2025 MSTAS

XIX. MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM ULUSAL SEMPOZYUMU

TÜBİTAK

28.06.2025 - 02.07.2025

ANTALYA BİLİM ÜNİVERSİTESİ

ANTALYA BİLİM ÜNİVERSİTESİ

XIX. MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM ULUSAL SEMPOZYUMU | SİMBİYOZ

MSTAS 2025
XIX. Mimarlıkta Sayısal Tasarım Ulusal Sempozyumu
30 Haziran - 1 Temmuz 2025, Antalya Bilim Üniversitesi
"Simbiyoz"

DÜZENLEYEN:
Antalya Bilim Üniversitesi Güzel Sanatlar ve Mimarlık Fakültesi,
Mimarlık ve İç Mimarlık ve Çevre Tasarımı Bölümleri tarafından düzenlenmiştir.

DÜZENLEME KURULU:
Prof. Dr. Salih OFLUOĞLU
Dr. Öğ. Üyesi Oya BABACAN
Dr. Öğr. Üyesi Setenay UÇAR AK
Öğr. Gör. Ramazan SARI
Öğr. Gör. Hakan HACIOĞLU
Öğr. Gör. Kadir Emre BAKIR

EDİTÖRLER:
Prof. Dr. Salih OFLUOĞLU
Dr. Öğ. Üyesi Oya BABACAN
Dr. Öğr. Üyesi Setenay UÇAR AK
Öğr. Gör. Ramazan SARI
Öğr. Gör. Hakan HACIOĞLU
Öğr. Gör. Kadir Emre BAKIR

MİZANPAJ & KAPAK TASARIMI :
Öğr. Gör. Hakan HACIOĞLU

ISBN NUMARASI :
978-625-94372-3-1
© Antalya Bilim Üniversitesi
Bu kitabın her hakkı saklıdır ve tüm yayın hakları "Antalya Bilim Üniversitesi Rektörlüğü'ne" aittir. Bu kitabın herhangi bölümü yayınevinin izni olmaksızın yayınlanamaz, basılamaz, mikrofilme çekilemez dolaylı dahi olsa kullanılamaz. Teksir, fotokopi veya başka teknikle çoğaltılamaz, B ilgisayarda dizgi makinalarında işlenebilecek ortama aktarılamaz. Kitapta yayınlanan tüm yazı ve görsellerin sorumluluğu yazar/ yazarlara aittir.

BİLİM KURULU:

Doç. Dr. Ahmet Emre Dinçer	Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi
Prof. Dr. Arzu Gönenç Sorguç	Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Doç. Dr. Aslı Ağırbaş	Özyeğin Üniversitesi
Doç. Dr. Ayşegül Akçay Kavakoğlu	İstanbul Teknik Üniversitesi
Doç. Dr. Başak Uçar	TED Üniversitesi
Doç. Dr. Benay Gürsoy	Pennsylvania State University
Doç. Dr. Derya Güleç Özer	İstanbul Teknik Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Elif Belkıs Öksüz	Kahramanmaraş İstiklal Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Emirhan Coşkun	Haliç Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Esra Gürbüz	Gaziantep Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Ethem Gürer	İstanbul Teknik Üniversitesi
Doç. Dr. Faruk Can Ünal	Yeditepe Üniversitesi
Doç. Dr. Fulya Akipek	İstanbul Bilgi Üniversirtesi
Prof. Dr. Gülen Çağdaş	İstanbul Teknik Üniversitesi
Doç. Dr. Hatice Demirkol	İzmir Yüksek Teknoloji Üniversitesi
Doç. Dr. İlker Erkan	Süleyman Demirel Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Kutay Karabağ	İstanbul Bilgi Üniversitesi
Prof. Dr. Leman Figen Gül	İstanbul Teknik Üniversitesi
Doç. Dr. Mehmet Ali Altın	Eskişehir Teknik Üniversitesi
Doç. Dr. Meltem Aksoy	İstanbul Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Meryem Birgül Çolakoğlu	İstanbul Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Mine Özkar	İstanbul Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Mustafa Emre İlal	İzmir Yüksek Teknoloji Üniversitesi
Prof. Dr. Neşe Çakıcı Alp	Kocaeli Üniversitesi
Doç. Dr. Orkan Zeynel Güzelci	İstanbul Teknik Üniversitesi
Dr. Özgün Balaban	Tilburg University
Prof. Dr. Özgür Ediz	Bursa Uludağ Üniversitesi
Doç. Dr. Özlem Kandemir	Eskişehir Teknik Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Pınar Çalışır Adem	Yeditepe Üniversitesi
Prof. Dr. Salih Ofluoğlu	Antalya Bilim Üniversitesi
Doç. Dr. Sema Alaçam	İstanbul Teknik Üniversitesi
Doç. Dr. Serkan Palabıyık	Balıkesir Üniversitesi
Doç. Dr. Sevil Yazıcı	İstanbul Teknik Üniversitesi
Doç. Dr. Sibel Macit İlal	İzmir Demokrasi Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Şehnaz Cenani Durmazoğlu	İstanbul Medipol Üniversitesi
Prof. Dr. Şule Pektaş Taşlı	Bilkent Üniversitesi
Doç. Dr. Togan Tong	Yıldız Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Tuğrul Yazar	İstanbul Bilgi Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Zülal Nurdan Korur	İstanbul Medipol Üniversitesi

ÖNSÖZ

Mimarlıkta Sayısal Tasarım Sempozyumu (MSTAS 2025), 30 Haziran – 1 Temmuz 2025 tarihleri arasında Antalya Bilim Üniversitesi ev sahipliğinde gerçekleştirilmiştir. Sempozyum öncesinde, 28–29 Haziran tarihlerinde farklı bilişim konularına odaklanan çalıştaylar düzenlenmiştir.

MSTAS, Türkiye'de mimarlık alanındaki en köklü bilimsel etkinliklerden biri olarak, akademi ve sektör paydaşlarını buluşturarak disiplinlerarası iş birliği için güçlü bir platform sunmaktadır. Antalya Bilim Üniversitesi Mimarlık Fakültesi ev sahipliğinde gerçekleştirilen bu yılki etkinlik, tarihindeki en yüksek bildiri katılımına ulaşarak MSTAS'ın en yoğun katılımlı toplantılarından biri olmuştur.

TÜBİTAK 2223-B Yurt İçi Bilimsel Etkinlik Düzenleme Desteği kapsamında desteklenen ve "Simbiyoz" temasıyla düzenlenen sempozyum, mimarlık ve ilişkili alanlarda bilişim teknolojileri ve uygulamaları üzerine çalışan akademisyenleri bir araya getirerek zengin bir paylaşım ve tartışma ortamı oluşturmuştur. Sempozyuma, Kanada Simon Fraser Üniversitesi'nden Prof. Dr. Halil Erhan ve Birleşik Krallık'tan Prof. Dr. Yusuf Arayıcı davetli konuşmacı olarak katılmıştır.

Etkinlik, Prof. Dr. Salih Ofluoğlu yürütücülüğünde; Dr. Öğr. Üyesi Oya Babacan, Dr. Öğr. Üyesi Setenay Uçar, Öğr. Gör. Dr. Ramazan Sarı, Öğr. Gör. Hakan Hacıoğlu ve Öğr. Gör. Kadir Emre Bakır'ın katkılarıyla gerçekleştirilmiştir.

Bu önemli etkinliğin hazırlanması ve yürütülmesinde emeği geçen; başta Üniversitemiz Rektörü Prof. Dr. Semih Ekercin olmak üzere, tüm akademik ve idari kadro üyelerine, öğrencilerimize, katılımcılarımıza ve katkı sunan diğer herkese teşekkür ederiz

MSTAS 2025 Düzenleme Ekibi

DAVETLİ KONUŞMACILAR

"What Can We Learn from the Evolution of Tools: Expanding Computational Design by Focusing on Data, Tasks and Outcomes"

PROF. DR. HALİL ERHAN

School of Interactive Arts and Technology (SIAT) Simon Fraser University Surrey, Kanada

Halil Erhan, lisans eğitimini Orta Doğu Teknik Üniversitesi'nde (ODTÜ) tamamlamıştır. Yüksek lisans eğitimini Clemson Üniversitesi'nde sürdürmüş ve burada bina tasarım bilgilerine 3D modellerin entegrasyonu üzerine odaklanmıştır. Bu deneyimi, Dr. Erhan'ın Tasarım Hesaplamaları (Design Computation) alanına olan ilgisini artırmış ve bu ilgisini Carnegie Mellon Üniversitesi'nde doktora çalışmaları sırasında daha da derinleştirmiştir.

Dr. Erhan, şu anda Simon Fraser Üniversitesi'nde profesör ve Hesaplamalı Tasarım Laboratuvarı'nın direktörüdür. Disiplinler arası araştırmaları, tasarımı bilişsel ve işbirlikçi bir problem çözme süreci olarak ele almakta ve yaratıcı pratisyenlerin kapasitelerini geliştirmek amacıyla etkili ve ilgi çekici araçlar sağlamayı hedeflemektedir. Dr. Erhan ve araştırma ekibi, insan odaklı yenilikçi hesaplamalı yaklaşımlar kullanarak tasarım araçları geliştirmekte ve test etmektedir.

Dr. Erhan, Performans Tahminlerinden elde edilen verileri kullanarak tasarım alanı keşfini etkileşimli veri görselleştirmeleri aracılığıyla yönlendiren "Design Analytics" adlı bir uygulamalı araştırma programı kurmuştur. Ayrıca, AEC (Mimarlık, Mühendislik ve İnşaat) sektöründe yeni araçların benimsenmesini teşvik etmek için endüstri ortaklarıyla yakından çalışmaktadır. Ek olarak, tasarım paydaşlarının inşa edilmiş çevre önerileri etrafında şeffaf bir tartışma yürütmelerini teşvik etmek amacıyla veriyle yönlendirilen tasarım demokratikleşmesine yönelik bir araştırma programı başlatmıştır. Dr. Erhan, insan odaklı yazılım tasarımı, mekansal biliş ve düşünme, üretken tasarım ve kanıta dayalı kullanıcı arayüzü geliştirme konularında dersler vermektedir.

DAVETLİ KONUŞMACILAR

"HBIM in Practice and the Way Forward for AI Implementation for Automated Scan to BIM"

PROF. DR. YUSUF ARAYICI

Department of Architecture and Built Environment, Northumbria Üniversitesi, İngiltere

Yusuf Arayıcı, Northumbria Üniversitesi'nde öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır ve Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) alanında önemli bir araştırma deneyimine sahiptir. Arayıcı'nın araştırmaları, BIM ve süreç modellemesinden sürdürülebilir kentsel yenilenmeye ve BIM destekli kültürel miras alanlarına kadar geniş bir yelpazeyi kapsamaktadır. Özellikle AB ve ERDF tarafından finanse edilen projelerde yer alarak, kültürel miras alanları için BIM tabanlı modelleme ve 3D lazer tarama alanında önemli çalışmalar yürütmüştür.

2001-2011 yılları arasında Avrupa Birliği tarafından finanse edilen çeşitli projelerde BIM entegrasyonu, kullanıcı gereksinim analizi ve 3D modelleme üzerine yoğunlaşmıştır. Bu projeler arasında DIVERCITY, INTELCITIES ve VEPS gibi önemli girişimler bulunmaktadır. Arayıcı, aynı dönemde mimarlık firmalarıyla bilgi tabanlı danışmanlık yaparak BIM benimseme süreçlerini desteklemiş ve kültürel miras modellemesi gibi özel projelere katkıda bulunmuştur.

2013'ten günümüze, Arayıcı enerji verimli bina tasarımı, akıllı miras bina performansı ve dijital ikizler gibi alanlarda BIM tabanlı araştırma projelerine liderlik etmektedir. Arayıcı, çeşitli akademik yayınlar yapmış olup "İnşaatta Bilgisayar Entegre Ortamı için Gereksinim Mühendisliği," "Yapı Bilgi Modellemesi" ve "Miras Bina Bilgi Modellemesi" gibi kitapları da bulunmaktadır.

İÇİNDEKİLER

1. Gün – 30 Haziran 2025

Oturum 1
Hesaplamalı Tasarım I
Oturum Başkanı: Prof. Dr. Levent Arıdağ

▪Fiziksel Prototiplemeden Dijital Varyasyona: Bağlamsal Parametrik Tasarım İçin Bütünleşik Bir Öğrenme Ortamı Modeli 2
Funda Tan Bayram, Esra Arslantürk

▪Kampüs Tasarımında Hesaplamalı Yöntemlerin Uygulanması: Bursa Uludağ Üniversitesi Örneği 15
Barış Mert Karasu, Özgür Ediz

▪Hesaplamalı Tasarım Sürecinde Farklı Dijital Pratiklerin Etkisinin Reflektif Pratik Üzerinden Değerlendirilmesi 26
Gülce Kırdar

▪Yaratıcılık ve Algoritma Arasında: Mimarlık Pratiğinde Dijital Simbiyozun Rol Dönüşümü 38
Zehra Kezer, Havva Alkan Bala

Oturum 2
Sayısal Yöntemler Ve Kültürel Miras
Oturum Başkanı: Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Çakır

▪Kültürel Mirasın Belgeleme Çalışmalarında Yersel Lazer Tarayıcı Kullanımı: İznik Roma Tiyatrosu Örneği 48
Ayşe Esin Kuleli

▪Tarihi Yapılarda Dijital Teknolojilerin Koruma Amaçlı Kullanımı: Nero Hamamı Örneğinde Fotogrametri, LIDAR ve HBIM Entegrasyonu 59
Merve Şule Yörük, Salih Ofluoğlu

▪Bedenleşme ve Yapay Zekâ ile Tarihi Mekânların Yeniden İnşası 72
Çisem Nur Demirci, Sümeyye Kökçen

▪Kesit Çizimlerinden Dikey Organizasyon İncelenmesi: Derin Öğrenme ile Palladio'nun Mimarisini Keşfetmek 84
Ece Savaş, Mine Özkar

Oturum 3
Hesaplamalı Tasarım II
Oturum Başkanı: Prof. Dr. Meryem Birgül Çolakoğlu

▪**Identifying Characteristics of Computational Design Thinking: Case of Adaptive Structures** 93
Furkan B. Cilesizoglu, Melek Kılınç, Kurtulus Atasever, Oğuz C. Çelik

▪**Mimari Çizimin Olanaklılığının Fiziksel Hesaplama ve Araçlaştırma ile Zenginleştirilmesi** 106
Görkey Gürel, Çağın Tanrıverdi Çetin, Sema Alaçam

▪**Hesaplamalı Tasarımda Malzeme Etmenliğinin Dokuma Yoluyla Araştırılması** 118
Asude Sena Kösebaş Yıldız, Sevil Yazıcı

▪**Hesaplamalı Tasarım Araçlarıyla Mukarnaslı Kubbelerdeki Zanaat ve Geometri İlişkisinin İncelenmesi** 130
Enes Karakaya, Mine Özkar

Oturum 4
Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi ve Sürdürülebilirlik
Oturum Başkanı: Dr. Öğr. Üyesi Oya Babacan

▪**Mimarlıkta Sayısal Tasarımın Gelişiminin Doğadan Esinlenme Açısından Analitik İncelenmesi** 140
Umay Karakaş, Şule Taşlı Pektaş

▪**Çevresel Ürün Beyanları Kapsamında Alüminyum Profilin Yaşam Döngüsü Analizi ve Malzeme Seçimi İçin Karar Destek Sistemlerinin İncelenmesi** 151
Damla Yıldırım Mutlu, Yiğit Güller

▪**Yapı Malzemesi Seçiminde Sürdürülebilirlik, Karbon Emisyonu ve Yapay Zekâ: Sistematik Literatür Taraması ve Meta Analizi** 166
Elif Basumli, Beyza Nur Yelten, Melek Obak, Gizem Can

▪**The Case Study of Bamboo Form-Finding based on the Material Passport** 174
Yusra Ekin

▪**Çok Katlı Konut Yapılarına Yönelik BIM-LCA Tabanlı Çevresel Değerlendirme ve Tasarım İyileştirme Stratejileri: Bir Vaka Çalışması** 184
Yiğit Yardımcı, Yasemin Erbil, Özgür Ediz, İlker Karadağ

Oturum 5
Sayısal Üretim ve Robotik
Oturum Başkanı: Dr. Öğr. Üyesi Setenay Uçar Ak

▪Hesaplamalı Dübel Tasarımı ve Biçim Bulma 196
Osman Gündüz, Serdar Aydın

▪Mimari Tasarım Sürecinde Kavramsal Tasarım Aşamasında Dijital Üretim Araçlarının Etkisi 205
Ülkü Şimşek Şengül, Elvan Elif Özdemir, Nida Naycı,

▪BIM ve 3D Yazıcıların Entegrasyonu; BIM+3D Kavramına Yönelik Bir Yaklaşım Önerisi 215
Mehmet İnceoğlu; Bircan İnan

Oturum 6
BIM ve Dijital İkiz
Oturum Başkanı: Prof. Dr. Mustafa Emre İlal

▪BIM Integration of Material Passports in the Construction Domain 225
Yusra Ekin, Meryem Birgül Çolakoğlu

▪Mimarlık Eğitiminde Yapı Bilgi Modelleme: Kritik Başarı Faktörlerinin Belirlenmesi 235
Handan Aş Çemrek, Ümit Işıkdağ

▪Dijital İkiz Uygulamaları ve IoT Entegrasyonu Üzerine Bir Literatür İncelemesi 246
Beyza Muş, Meryem Birgül Çolakoğlu

▪Atıl Endüstriyel Yapıların Yeniden İşlevlendirilmesinde Dijital İkiz Teknolojilerinin Rolü: İş Akışı Önerisi 259
Ecem Berna Şahin

2. Gün – 1 Temmuz 2025

Oturum 7
Yapay Zeka ve Mimarlık I
Oturum Başkanı: Dr. Öğr. Üyesi Ali Cem Başarır

▪Erken Tasarım Evresinde İmge Üreticisi olarak Yapay Zekâ ve Yol Kronotopu 272
Levent Arıdağ, Derya Çakır Aydın, Gözde Betülay Yorulmaz

▪Tek Katlı Plan Organizasyonlarında Çekişmeli Üretici Ağlar ve Pekiştirmeli Öğrenmenin Entegrasyonu: Kullanıcı Merkezli Ödül Fonksiyonları 282
Mertcan Güldilek, Mustafa Emre İlal, Berk Ekici

▪İç Mimari Görüntülerle Yapay Zekâ Modeli Eğitimi: Bir Veri Seti Hazırlama Strateji Önerisi 292
Yaren Cengiz, Orkan Zeynel Güzelci, Derya Güleç Özer, Koray Kıdış

▪"DeepSmart Corpus": Mimari Pavyon Verilerinden Yola Çıkarak Makine Öğrenimi ve Dijital Zanaatkârlık ile El Becerisinin Yeniden Değerlendirilmesi 302
Ayça Ayaz Erdağ, Arzu Gönenç Sorguç

Oturum 8
Sanal / Artırılmış / Karma Gerçeklik I
Oturum Başkanı: Prof. Dr. Salih Ofluoğlu

▪Kültürel Mirasın Dijital Geleceği: Artırılmış Gerçeklik Kesişiminde Araştırma Eğilimlerinin Haritalanması 313
Beryar Zübeyde Balaban, Leman Figen Gül

▪Spatial and Temporal Organization of Biometric Feedback for Architectural Research 323
Kutay Guler

▪Mimari Tasarım Stüdyo Eğitiminde Sanal Gerçeklik Teknolojileri ile Siber-Tektonik Mekân Deneyimi 337
Büşra Cantürk, Levent Arıdağ

Oturum 9
Yapay Zeka ve Mimarlık II
Oturum Başkanı : Doç. Dr. Sema Alaçam

▪Mimari Tasarım Sürecinde Örnek Proje İnceleme İçin Özelleştirilmiş Arama Motoru Tasarımı 350
Betül Uçkan, Gülen Çağdaş, Gülce Kırdar Bakraç

▪Yapay Zeka Çağında Dijital Model Görselleştirmesi: Eskizden Senaryoya, Senaryovdan Sahneye 364
Habibe Şenkal, Hakan Tong

▪Mimarlıkta Maket ve Üretken Yapay Zekânın Kullanımı: Simbiyotik Bir Tasarım Eylemi 373
Adil Yirmibeş, Barış Mert Karasu

Oturum 10
Sanal / Artırılmış / Karma Gerçeklik II
Oturum Başkanı: Doç. Dr. Derya Güleç Özer

▪Sanal Gerçeklik Alanlarında Sesin Görsel Algıya Etkisi 386
Dila Erdoğdu, Nuray Benli Yıldız, Asena Kumsal Şen Bayram

▪Tarihi Yapıların Analiz Süreçlerine VR Sistemlerinin Entegre Edilmesi: İnayetullah Camii Örneği 396
Hasan Söylemez, Mustafa Haki Erarslan, Serap Sevgi, Mesut Yılmaz

▪Yapay Zekâ Destekli Karma Gerçeklik Teknolojilerinin İnsan-Bilgisayar Etkileşimi Bağlamında Değerlendirilmesi 407
Sibel Özden Omuzlu, Ayşegül Akçay Kavakoğlu

Oturum 11
Mevzuata Uyum ve Denetim
Oturum Başkanı: Öğr.Gör. Dr. Ramazan Sarı

▪Mimari Tasarımda Koruma Amaçlı İmar Planları Hükümlerine Uygunluğun Dijital Modellerle Denetlenebilirliği 422
Kadir Emre Bakır, Sevim Ateş Can, İbrahim Bakır

▪Uyumluluk Denetimi Otomasyonu için Bina Yangın Yönetmeliğinin Dört Katmanlı Modelleme Yöntemi ile Sayısal Temsili 432
Tarık Çetin, M. Emre İlal, Sibel Macit İlal

▪Acil Durum Toplanma Alanlarının Ulaşılabilirliğin Ölçülmesi: İzmir odağında Eğitim ve Sağlık Yapılarının İncelenmesi 442
Esma Selen Aksoy, Burcu Kısmet Conk, M. Birgül Çolakoğlu

▪Yapı Ruhsat Süreçlerinde TF-IDF ve SVM Yöntemi ile Emsal Alan Tiplerinin Otomatik Sınıflandırılması 456
Eymen Çağatay Bilge

Çalıştaylar

▪Autodesk Forma ile Yapay Zeka Destekli Konsept Tasarım ve BIM Süreçleri 466
Hilal Ekinci

▪Sınırları Aşan Algılar (Expand Your Umwelt) : Yapay Zeka ile Yeni Bir Mimarlık Duyusu Yaratmak 467
Ali Cem Başarır

▪VR'da Kısa Bir Yürüyüş : Mekan, Renk ve Ses 468
Tolga Özdemir

▪Tasarım XR : VR ile Kentsel Gelecek 469
Gays Elukab, Serdar Aydın

▪Veriden Eskize : Üretken Yapay Zeka ile Kişiselleştirilmiş Tasarım Deneyimi 470
Nur Sipahioğlu

2025 MSTAS

OTURUM I

HESAPLAMALI TASARIM I

2025 MSTAS MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Fiziksel Prototiplemeden Dijital Varyasyona: Bağlamsal Parametrik Tasarım İçin Bütünleşik Bir Öğrenme Ortamı Modeli

Funda Tan Bayram[1]; Esra Arslantürk[2]
[1,2]Gebze Teknik Üniversitesi
[1]ftan@gtu.edu.tr; [2]esra.arslanturk@gtu.edu.tr

Özet

Bu çalışma, dijital ve fiziksel üretim süreçleri arasında kurulan pedagojik bir köprü aracılığıyla parametrik tasarımın mimarlık eğitimine entegrasyonunu ele almaktadır. 2022-2023 Bahar döneminde GTÜ Mimarlık Fakültesi'nde Mimari Tasarım 2 stüdyosu kapsamında yürütülen araştırma, öğrencilerin sezgisel ve hesaplamalı düşünme becerilerini bütüncül bir model üzerinden geliştirmeyi amaçlamıştır. Bu model, geleneksel stüdyo pedagojisinin sınırlarını aşarak, dijital araçların yalnızca teknik beceri edinimiyle sınırlı kalmadığı, aynı zamanda kavramsal tasarım üretimiyle doğrudan ilişkilendiği bir öğrenme deneyimi sunmaktadır. Modelin temel çıkış noktası, mimarlık eğitiminde sıklıkla karşılaşılan iki önemli sorunu hedeflemektedir: ilki, fiziksel ve dijital üretim süreçleri arasında yaşanan kopukluk; ikincisi ise parametrik araçların bağlamsal gereksinimlerle zayıf ilişkilendirilmesidir. Bu çerçevede geliştirilen iki fazlı stüdyo modeli, öğrencilerin hem fiziksel prototipleme hem de sayısal modelleme yoluyla tasarım sürecine çok katmanlı ve eleştirel bir şekilde yaklaşmalarını sağlamıştır. Birinci fazda, öğrencilerden dijital araçlara geçmeden önce kural tabanlı fiziksel bir prototip üretmeleri istenmiş; bu süreç, onların algoritmik düşünme becerilerini somut bir deneyim üzerinden geliştirmelerine olanak tanımıştır. Modülerlik, tekrarlanabilirlik ve bileşenler arası ilişkiler, bu üretimin temel parametrelerini oluşturmuştur. Fiziksel üretim süreci aynı zamanda öğrencilerin sezgisel tasarım reflekslerini ortaya koyduğu bir alan haline gelmiştir. İkinci fazda ise bu fiziksel prototipler dijital ortama aktarılmış, Grasshopper arayüzü kullanılarak parametrik modellere dönüştürülmüştür. Bu aşamada öğrenciler, tasarımlarını belirli bağlamsal senaryolara göre yeniden yapılandırarak parametrik değişkenleri yerinde ve bilinçli bir biçimde kullanmışlardır. Ayrıca, tasarım süreci sadece formal varyasyon üretmekle sınırlı kalmamış, kararların algoritmik kısıtlar içinde değil, öğrencinin sezgisel yönlendirmesiyle biçimlendiği bir yaklaşım benimsenmiştir. Araştırmanın bulguları, öğrencilerin dijital araçları sadece üretim aracı değil, aynı zamanda yaratıcı düşünme aracı olarak kullanabildiklerini ortaya koymaktadır. Model, mimarlık pedagojisinde sezgisel ve bilgi-işlemsel düşünme biçimlerini bir araya getirerek üretken, eleştirel ve bağlamsal duyarlılıkla örülmüş alternatif bir öğretim çerçevesi sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Parametrik Tasarım Pedagojisi, Hesaplamalı Düşünme, Tasarım Eğitimi, Fiziksel-Sayısal Bütünleşme, Algoritmik Prototipleme.*

MSTAS 2025 MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

From Physical Prototyping to Digital Variation: An Integrated Learning Environment Model for Contextual Parametric Design

Funda Tan Bayram[1]; Esra Arslantürk
[1,2]Gebze Technical University
[1]ftan@gtu.edu.tr; [2]esra.arslanturk@gtu.edu.tr

Abstract

This study explores the integration of parametric design into architectural education through a pedagogical model that bridges digital and physical modes of production. Conducted within the scope of the Architectural Design Studio II course at Gebze Technical University during the Spring semester of 2022–2023, the research aims to cultivate students' computational and intuitive design capacities within a comprehensive and process-oriented framework. Moving beyond the conventional limits of studio pedagogy, the proposed model offers an educational experience wherein digital tools are not solely conceived as instruments for technical acquisition but are directly linked to conceptual design thinking and decision-making. The model addresses two recurrent challenges in architectural education: (1) the disjunction between digital and physical production processes, and (2) the inadequate contextualization of parametric design outcomes. In response, a two-phase studio structure was devised, enabling students to engage critically and multidimensionally with design through both physical prototyping and computational modeling. In the first phase, students were asked to generate rule-based physical prototypes prior to engaging with digital tools. This stage foregrounded algorithmic thinking through embodied, material exploration and emphasized fundamental principles such as modularity, repetition, and relational logic. The physical prototyping process also served as a platform for intuitive experimentation and speculative inquiry. The second phase involved the translation of these physical prototypes into digital parametric models using Grasshopper. At this stage, students were tasked with adapting their systems to specific design scenarios by deploying parametric variables consciously and in context-sensitive ways. Rather than positioning the algorithm as a determinant of form, the process emphasized the designer's agency and intuition in configuring and reconfiguring relationships among design parameters. The findings suggest that students were able to construct operative design strategies by structuring parametric tools not only as means of production but also as mediums of inquiry and conceptual reflection. The model thus reframes the role of digital instruments within architectural pedagogy, proposing an integrative learning environment where intuitive and computational thinking modes operate in tandem. Ultimately, the study advances a pedagogical approach that cultivates critical awareness, contextual sensitivity, and creative adaptability within parametric design education.

Keywords: *Parametric Design Pedagogy, Computational Thinking, Design Education, Physical-Digital Integration, Algorithmic Prototyping.*

1. Giriş

Bilgisayar destekli tasarımın (CAD) ortaya çıkışı, bir yandan son derece karmaşık mimari biçimlerin belgelenmesini ve inşa edilmesini görece kolaylaştırırken; diğer yandan, geniş bir tasarım olasılıkları yelpazesinin hesaplamalı olarak erişilebilir ve analitik biçimde değerlendirilebilir hale gelmesini sağlayan algoritmik tasarım stratejilerinin gelişimine olanak tanımıştır (Jabi, 2013; Terzidis, 2006; Woodbury, 2010). Bu dönüşüm yalnızca mimari üretimi kökten değiştirmekle kalmamış, aynı zamanda mimarlık eğitiminde yaratıcılık anlayışını da yeniden tanımlamış; dijital araçlara ve hesaplamalı tasarım yöntemlerine dayalı pedagojik yaklaşımların gelişmesini teşvik etmiştir. Bu araçların dönüştürücü etkisinin fark edilmesi ise, söz konusu teknolojilerin mimarlık eğitimine en uygun biçimde nasıl entegre edileceğine dair eleştirel tartışmaları da beraberinde getirmiştir.

Sayısal araçlar, mimarlık eğitimi ve pratiğinde tasarımcının girdileri doğrultusunda çok sayıda varyasyon üreterek hızlı tasarım önerileri sunabilmekte; aynı zamanda, konsept geliştirme aşamasında beklenmedik olasılıkları tetikleyerek yaratıcı süreci teşvik edebilmektedir (Yazici, 2020). Ancak bu araçların mimari tasarım eğitimine entegrasyonu, genellikle iki temel sorun etrafında şekillenmektedir. İlk sorun, geleneksel tasarım anlayışı—kâğıt üzerindeki eskiz ve sezgisel karar alma süreçlerine dayalı yaklaşım—ile hesaplamaya ve algoritmik işleyişe dayalı sayısal araçların şekillendirdiği tasarım pratiği arasındaki zihinsel ayrışmadan kaynaklanmaktadır. Bu bağlamda, sayısal tasarım yalnızca teknik bilgi gerektiren bir uygulama değil; aynı zamanda bilgi-işlemsel düşünmenin tasarım süreçlerine nasıl entegre edileceği ve üretilen çıktılarının nasıl değerlendirileceği gibi pedagojik bir yeniden yapılandırmayı da zorunlu kılmaktadır. İkinci ve sıklıkla göz ardı edilen sorun ise, öğrencilerin mimarlık kuramı ve tasarım ilkeleri (ör. mekânsal organizasyon, biçimsel düşünce) ile parametrik tasarım araçlarını kullanmak için gerekli olan algoritmik düşünme, görsel programlama ve parametrik modelleme gibi dijital beceriler arasında anlamlı bir ilişki kurmakta zorlanmalarıdır (Gallas vd., 2015). Bu kopukluk, öğrencilerin özellikle karmaşık ve bağlamsal tasarım problemlerini parametrik araçlar aracılığıyla çözümleyememelerine ve süreç sonunda ortaya çıkan modellerin verilen probleme uygunluğunu yeterince değerlendirememelerine yol açmaktadır.

Bilgi-işlemsel düşünme becerisinin tasarım öğrencilerine nasıl kazandırılması ile ilgili olan ilk problem, parametrik tasarım pedagojisi üzerine temellenen araştırmaların sıklıkla ele aldıkları bir zorluk olmuştur. Literatürdeki pek çok çalışma, bu becerinin öğrencilerin tasarım eğitimine başladıkları ilk yıllarda, hatta birinci yıl temel tasarım derslerine entegre edilerek kazandırılması gerektiği konusunda görüş birliğindedir (Gündüz vd., 2018; Özkar, 2017). Ancak bu becerinin kazandırılması sürecinde dijital okuryazarlığın da eşzamanlı olarak öğretilip öğretilmemesi gerektiği konusunda farklı yaklaşımlar bulunmaktadır. Bazı araştırmacılar, kodlama ve parametrik tasarım becerilerinin geliştirilebilmesi için öncelikle zihinsel bir kavrayışın yerleşmesi gerektiğini savunur; bu nedenle, herhangi bir sayısal araca dair kullanım bilgisi edinilmeden önce, parametrik tasarım düşüncesinin kavramsal düzeyde tanıtılması gerektiğini ileri sürer(Alalouch, 2018; Defays vd., 2012; El-Mahdy, 2022; Lecourtois ve Guéna, 2012; Ostrowska-Wawryniuk vd., 2022). Nitekim öğrencilerin bilgi-işlemsel düşünme yetileri gelişmediğinde, parametrik kodlama araçlarıyla ilk karşılaştıklarında gerekli zihinsel dönüşümü gerçekleştiremedikleri gözlemlenmektedir (Carraher, 2011). Bu bağlamda yapılan çalışmalar, parametrik tasarım becerisinin gelişebilmesi için gerekli bilgi-işlemsel düşünmenin yalnızca sayısal araçlarla kazanılmak zorunda olmadığını göstermektedir.

Örneğin, Özsel Akipek ve Kozikoğlu (2007), veriyle bütünleşik, uyarlanabilir değişkenler ve betikler içeren dijital prototiplerin yanı sıra; yapı, form ve davranışı test eden fiziksel, dokunsal pavyon tasarımlarının maddesel prototipler olarak kavramsallaştırılabileceğini ileri sürmektedir. Bu yaklaşım, temel malzemelerle gerçekleştirilen dokunsal prototipleme süreçlerinin, hem kavramsal mekân oluşumuna öğrencilerin aktif katılımını sağlayacağını hem de hesaplamalı bir tasarım zihniyetinin gelişimine katkı sunacağını göstermektedir. Bu tür prototipsel/hesaplamalı tasarım yaklaşımları, görsel düşünmeyi güncel görsel kurallar ve şemalar üzerinden yapılandırır. Amaç, öğrencilere soyut biçimlerin yapısını kavrama, bu yapının hesaplamalı boyutunu değerlendirme, farklılaşma ve gelişim potansiyellerini analiz etme ve desen oluşturma becerilerini kazandırmaktır (Gürsoy ve Özkar, 2015; Knight & Stiny, 2015; Özkar, 2011; Yazar ve Özsel Akipek, 2014).

Ancak örüntü ve doku üretimi aracılığıyla bilgi-işlemsel düşünmenin geliştirilmesi, öğrencilerin dijital hesaplamalı/parametrik tasarım araçlarını aktif biçimde kullanabilmelerini tek başına garanti etmemektedir. Öğrencilerin bu araçlarla tanışması, onları anlaması ve etkin biçimde kullanabilmesi ayrı bir güçlük alanı olarak ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle bazı araştırmacılar, öğrencilerin dijital tasarım yöntemlerine daha kolay uyum sağlayabilmeleri

için müfredatın erken aşamalarında düşük seviyeli programlamayla tanıştırılmaları gerektiğini savunur; böylece tasarımın doğasına yönelik olası önyargıların önüne geçilebileceğini belirtirler (Iordanova, 2007). Bu erken karşılaşmanın, öğrencilerin ilerleyen mesleki süreçlerinde uygun araç ve teknikleri seçme, belirli tasarım problemlerine parametrik çözümler üretme ve özgün/yenilikçi tasarımlar geliştirme yetilerini destekleyeceği ifade edilmektedir (Duarte vd., 2012). Iordanova'ya (2007) göre, öğrencilerin gerçek yaşam problemlerini kavrayabilmeleri ve bu problemlere bilgi-işlemsel düşünme yoluyla çözüm geliştirebilmeleri için dijital tasarım keşfinin mimarlık stüdyosuna taşınması; mekânsal geometri ve programlama eğitiminin ise mimari bağlamla ilişkilendirilmesi gereklidir.

Bu noktada, sayısal hesaplamalı yöntemlerin mimarlık eğitimine entegrasyonunda karşılaşılan ikinci temel sorun gündeme gelmektedir. Sayısal araçların mimarlıkta etkili bir biçimde kullanılabilmesi ancak algoritmik düşünme ve görsel programlama becerileriyle mümkündür. Ancak bu beceriler, mekânsal organizasyon ve biçimsel düzenleme gibi temel mimari tasarım ilkeleriyle bütünleşmediğinde, yeni bir bilgi üretimi gerçekleşmemekte; dolayısıyla karmaşık mimari mekânların oluşumuna yönelik çözümler geliştirilememektedir. Salt bilgi-işlemsel düşünme ve programlama becerisi, mimari çıktılar üretemediği noktada yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle tasarımcının, algoritmik düşünmeyi mekânın örgütlenme süreçlerine içkin biçimde işlemselleştirmeyi başarması gerekmektedir.

Son yirmi yılda sayısal tasarım araçlarındaki gelişmeler, mimarlık kuramı ve pratiğinde köklü dönüşümler yaratmış olsa da bu araçların tasarım yöntemleriyle bütünleşik biçimde kullanıldığı pedagojik yaklaşımların stüdyo süreçlerine hâlâ sınırlı düzeyde entegre edilebildiği gözlemlenmektedir (Demircan ve Palabıyık, 2023). Bu bağlamda, söz konusu çalışma, mimarlık eğitiminde hesaplamalı tasarım yöntemlerinin gelişimine katkı sunmayı amaçlamakta; çevresel verileri dikkate alan, mekânsal organizasyona odaklanan ve parametrik tasarımı işlemselleştiren bağlamsal bir stüdyo modeli önermektedir. Model, sayısal araçlarla yürütülen stüdyo süreçlerinde sıklıkla karşılaşılan iki temel probleme yönelik çözüm stratejileri geliştirmektedir. Çalışmanın temel amacı, önerilen modelin deneysel uygulamasından elde edilen bulgu ve sonuçları ortaya koymaktır. Modelin kuramsal arka planı ise bir sonraki bölümde ayrıntılı biçimde sunulacaktır.

2. Literatür ve Kavramsal Çerçeve

Sayısal araçların mimarlık eğitimine entegrasyonu, bu araçların öğrencilere enformel yollarla tanıtılması, yapılandırılmış derslerde sistematik olarak öğretilmesi ya da doğrudan tasarım stüdyolarına entegre edilmesi gibi farklı modeller üzerinden gerçekleştirilmiştir (Duarte vd., 2012; Oxman, 2008; Oxman ve Oxman, 2014). Ancak süreç içerisinde birçok kurumda yapılandırılmış formel yaklaşımlardan çok, enformel öğrenme ortamlarına yönelim gözlemlenmektedir (Şen Bayram vd., 2023). Oysa hesaplamalı tasarımın mimarlık eğitimine problem temelli ve bütüncül formel yöntemlerle entegre edilmesi mümkündür (Tan, 2024).

Önceki bölümde de belirtildiği üzere, parametrik/algoritmik tasarım stratejilerinin eğitimdeki entegrasyonunda iki temel zorluk dikkat çekmektedir. İlk olarak, öğrencilere bu araçların etkili biçimde kazandırılabilmesi için öncelikle algoritmik ve bilgi-işlemsel düşünme becerilerinin geliştirilmesi gerekmektedir. İkinci olarak ise, bu düşünsel becerilerin karmaşık mekânsal tasarım problemleriyle ilişkilendirilerek anlamlı bir bağlam içinde kullanılabilmesi sağlanmalıdır. Bu çerçevede, formel bir sayısal tasarım stüdyosunun aşağıdaki üç temel yetkinlik alanına odaklanması önerilir:

1. Algoritmik/Bilgi-İşlemsel Düşünme
2. Programlama Yetkinliği
3. Parametrik/Algoritmik Yöntemlerle Mimari Tasarım Becerisi

Algoritmik düşünme, doğrudan sayısal araçlara bağımlı olmaksızın da geliştirilebilir. Bu çalışmanın da erken fazlarında bilgi-işlemsel düşünme pratiğinin öğrenciye kazandırılmasına yönelik, kural tabanlı yöntemler kullanılarak fiziksel modeller (prototipler) üretilmesini içeren egzersizler yapılmıştır.

Ancak programlama yetkinliğinin kazandırılmasına yönelik eğitimlerde sıklıkla karşılaşılan temel sorun, kavramsal çerçevenin yetersizliğidir. Bu noktada araştırmacılar, hesaplamalı tasarım odaklı araç kullanımına yönelik eğitimde düşünsel ve kavramsal boyutların da sürece dâhil edilmesi gerektiğini vurgulamaktadır (Alkan ve Taşlı Pektaş, 2020). Olgusal ve işlemsel bilgi düzeylerinin ötesinde, kavramsal bilgi—özellikle parametreler arası ilişkilerin kavranması—tasarım sürecinde kritik öneme sahiptir. Kavramsal akışın zayıf olduğu durumlarda, yaratıcı süreci destekleyici farklı

pedagojik stratejilerin uygulanması önerilmektedir. Örneğin bazı çalışmalar, metaforları yaratıcı kısıtlayıcılar olarak kullanan bir pedagojik model önermektedir. Bu bağlamda metaforlar hem bir düşünme aracı hem de biçimsel bir sınırlayıcı olarak, parametrik seçeneklerin daraltılmasına ve kavramsal netliğin sağlanmasına katkı sunmaktadır (Agirbas, 2018). Parametrik tasarım eğitiminde kavramsal boyutun güçlendirilmesi amacıyla, öğrenci ve eğitmenler arasında sürekli ve etkili bir tasarım diyaloğunun kurulması da önemlidir (Vrouwe vd., 2020). Bununla birlikte, öğrencilerin açık biçimde tanımlanmış, yere özgü tasarım alanlarında çözüm üretmelerini sağlayacak bağlamsal problemlerle karşılaştırılması büyük önem taşır. Böylece bağlam, algoritmik süreci şekillendiren kavramsal bir sınırlayıcı olarak işlev görebilir.

Ne var ki, birçok uygulamada bu entegrasyon yüzeysel düzeyde kalmaktadır. Öğrenciler, hesaplamalı araçları yalnızca geometrik örüntüler üretmek amacıyla kullanmakta; bu da araçların mimari bağlamla ve tasarım kararlarıyla ilişkili olarak değerlendirilmesini engellemektedir. Güçlü kavramsal/bağlamsal yönlendirmelerin bulunmadığı ortamlarda, parametrik yaklaşımların uygulanabilirliği—hatta olgusal ve işlemsel düzeyde bile—zayıflamakta; öğrenciler çoğunlukla önceden tanımlanmış şemaları taklit etmekte ve bu da parametrik tasarımın üretken potansiyelini ciddi biçimde sınırlamaktadır (Vrouwe vd., 2020). Nitekim güncel stüdyo uygulamalarında, öğrencilerin sahip oldukları mimari bilgiyi dijital ortama aktarma ve bunu parametrik bir sistem içinde anlamlı bir tasarıma dönüştürme konusunda zorlandıkları gözlemlenmektedir. Stüdyo sonunda ortaya çıkan dijital modellerin, öğrenciler tarafından geriye dönük olarak yeterince açıklanamaması da bu sürecin bütüncül kavranamadığını ortaya koymaktadır (Vrouwe vd., 2020). Bu durum, kullanılan araçların, alınan kararların ve uygulanan yöntemlerin tasarım bütününe entegre edilmeden uygulandığını göstermektedir.

Bu çerçevede, bu çalışma kapsamında geliştirilen stüdyo modeli yukarıda belirtilen üç yetkinlik alanını birlikte geliştirmeyi amaçlamakta; özellikle programlama yetkinliği ile kazanılan parametrik tasarım becerilerinin verili bağlamda kullanılmasına yönelik yeteneklerin geliştirilmesine odaklanan özgün bir pedagojik yaklaşım sunmaktadır. Modelin yukarıda bahsedilen son iki yetkinliği geliştirirken uyguladığı iki temel özgün tavır şu şekilde özetlenebilir:

1. Programlama yetkinliğinin gelişiminde kavramsal derinlik sağlayacak, sonuç odaklı bir kısıtlayıcı yapı geliştirmek
2. Elde edilen algoritmik programlama becerisini, düşük karmaşıklık düzeyine sahip, bağlamsal ve işlevsel gereksinimleri olan bir mimari problem bağlamında kullanabilmek

Modelin temel amacı, parametrik tasarımın stüdyonun erken aşamalarından final ürününe kadar olan süreci boyunca sürekliliğini sağlayarak, fiziksel çevreyi kavramsal bir kısıtlayıcı olarak yapılandırmak ve böylece öğrencilerin fiziksel ve sayısal üretim arasında güçlü, ilişkisel bir köprü kurabilmelerine olanak tanımaktır. Bu yaklaşım, öğrencilerin sayısal programlama becerilerini geliştirirken, kavramsal sınırlardan uzaklaşmadan soyut oluşumlardan yeni olasılıklar keşfetmelerini destekler. Farklı soyut oluşumlar üzerinden yeni tasarım olasılıklarının ortaya konması, mimari tasarım sürecinde yaratıcılığın gelişiminde belirleyici rol oynamaktadır (Schon ve Wiggins, 1992). Bu bağlamda, bilgi-işlemsel ve algoritmik düşünme biçimleri, alternatif çözümler üretme potansiyeli açısından güçlü araçlar olarak öne çıkmakta ve mimari yaratıcılığın gelişimine önemli katkılar sunmaktadır (Terzidis, 2004, 2008).

3. Model ve Metotlar

2022-2023 Bahar döneminde Mimari Tasarım 2 dersi kapsamında, geleneksel stüdyo pedagojisinden farklılaşan ve hesaplamalı tasarımı bütüncül biçimde tasarım sürecine entegre etmeyi amaçlayan bir model geliştirilmiş ve bu model 15 öğrencinin katıldığı bir stüdyoda uygulanmıştır. Uygulamanın yapıldığı kurumun müfredatında, ilk yarıyılda Mimari Tasarım 1, Temel Tasarım ve Anlatım Teknikleri gibi tasarıma giriş dersleri yer almaktadır. Bu derslerin hemen ardından gelen Mimari Tasarım 2 stüdyosu, öğrencilerin edindikleri temel tasarım becerilerini mimari kavramlar ve bağlamsal verilerle ilişkilendirmelerini hedefleyen bir içerik sunmaktadır.

Model, öğrencilerin bu ilişkilendirme sürecini gelişmiş düzeyde hesaplamalı tasarım araçlarını kullanarak gerçekleştirmesini teşvik etmiş; böylece, yalnızca mimari tasarım çıktılarına değil, aynı zamanda hesaplamalı düşünme, görsel programlama ve parametrik modelleme gibi dijital yetkinliklerin kazandırılmasına da odaklanmıştır. Bu doğrultuda, hesaplamalı tasarımın pedagojik bağlama içkinleştirilmesi amacıyla yukarıda belirtilen sorunlara çözüm üretmeye yönelik geliştirilen teknikler, 14 haftalık stüdyo süresince test edilmiştir.

Atölye çalışması, öğrencilerin üç temel yetkinliği —1) algoritmik/bilgi-işlemsel düşünme, 2) sayısal programlama ve parametrik tasarım, 3) programlama becerilerinin mimari bağlamda kullanımı— edinmesini hedefleyen iki fazlı bir yapıda örgütlenmiştir.

Faz 1: Algoritmik Düşünme ve Programlama Becerilerinin Gelişimi
Faz 2: Fiziksel Bağlamda Parametrik Tasarım Yetkinliklerinin Kullanımı (**Tablo 1**).

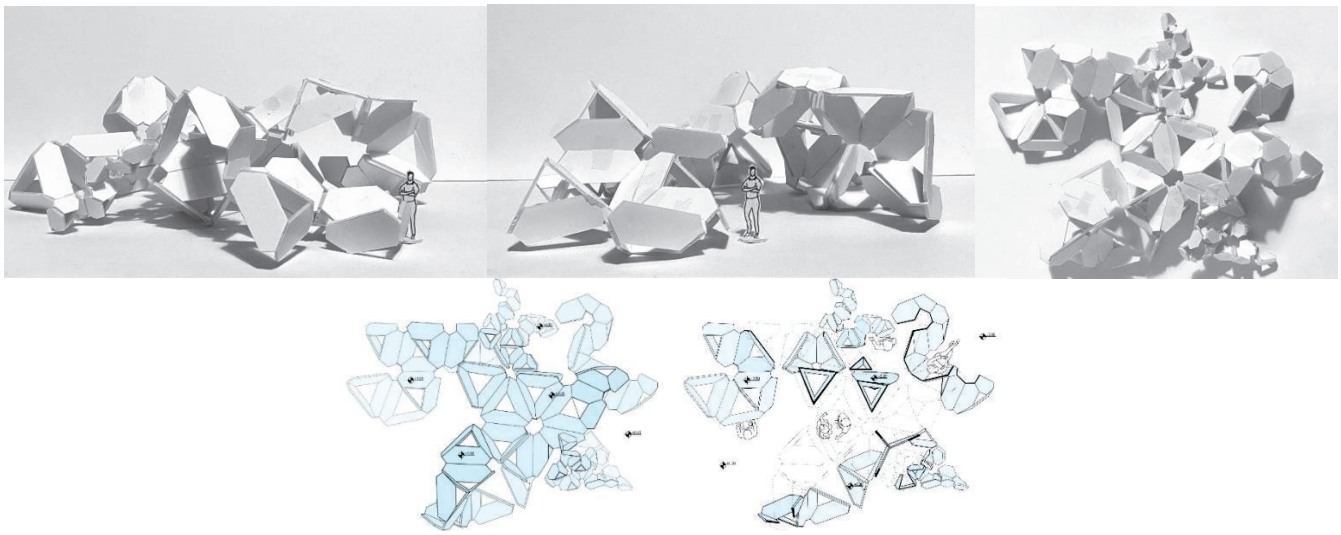
Tablo 1: Modelin iki aşamalı faz yapısı

Faz 1- Kendini Üreten Parça – Olasılıkların Keşfi		**Faz 2 -Parametre Yönetimi**
Faz 1_1 Fiziksel	Faz 1_2 Sayısal	Faz 2 Sayısal
El zihin koordinasyonu ve kural tabanlı geliştirme ile yaratıcı olasılıklar	İlk fiziksel modelin kısıtıyla kavramsallaştırılan parametrik komut dizisi ile geliştirilen ve fiziksel olarak bulabilenden çok daha fazla sayıda olasılık oluşumu	Sayısal ortamda kavramsal/bağlamsal kısıtlarda parametrik tasarım

Faz 1'in kurgusunda, sayısal parametrik tasarım araçlarının öğretimi sırasında kavramsal bir kısıt belirlenmesine özel önem verilmiştir. Birinci fazda benimsenen temel yöntem, öğrencilerin aynı problemi önce fiziksel araçlar yoluyla çözmeleri, ardından bu fiziksel modeli dijital ortama aktarmalarıdır. Bu doğrultuda Faz 1, kendi içerisinde iki alt başlıkta ele alınmıştır: Faz 1-1 ve Faz 1-2.

Faz 1-1 kapsamında, öğrencilerden dijital araçlar kullanmadan, tamamen fiziksel yöntemlerle kural tabanlı bir model üretmeleri istenmiştir. Bu süreç, algoritmik düşünme becerisinin doğrudan fiziksel deneyim yoluyla geliştirilmesini hedeflemektedir. Öğrenciler, Mimari Tasarım 1 ve Temel Tasarım derslerinde benzer fiziksel üretim süreçlerine aşina olsalar da bu aşamada hem bu becerilerin pekiştirilmesi hem de geliştirilen fiziksel modelin, ikinci fazda sayısal ortamda kavramsal bir kısıtlayıcı olarak işlev görmesi amaçlanmıştır.

Faz 1-1 sürecinde, öğrenciler kural tabanlı gelişime dayalı, modüler sistemli fiziksel maketler üretmiş; parametrik tasarımın temel prensipleri olan modülerlik, varyasyon ve tekrarlanabilirlik ilkelerini fiziksel olarak test etme imkânı bulmuşlardır. Kurgu, hesaplamanın en küçük birimi olan "bit" kavramının Türkçeye "parça" olarak çevrilip metaforik biçimde kullanılması üzerinden şekillenmiştir. Bu doğrultuda faz, "kendini üreten parça" olarak adlandırılmış; öğrencilerden, kendini tekrar eden ve çoğaltılabilir yapıda, kural tabanlı, üç boyutlu, akıllı bir fiziksel parça tasarlamaları istenmiştir.



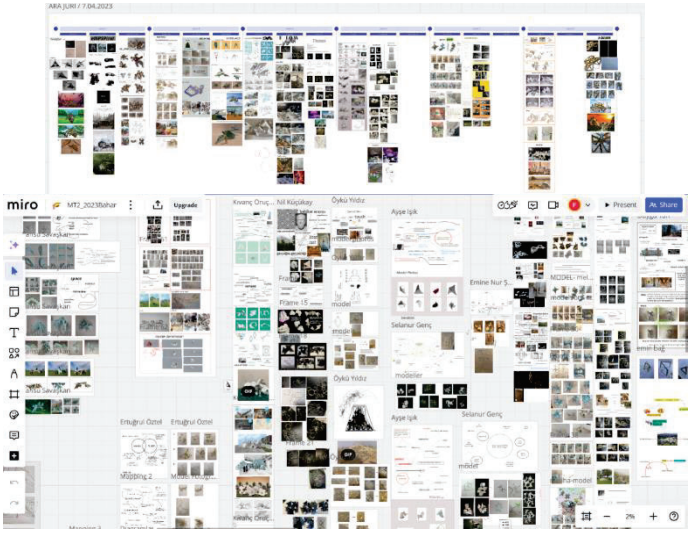
Şekil 1: Prototipin kural tabanlı sapmalarla çoğalırken beden-mekan kurgusunun düşünülmesine ve ölçekli çizimlerin üretilmesine örnek _ Öğrenci E

Parça üretim sürecinin ardından, öğrencilerin geliştirdikleri bu parçaların yeniden türetilmesini rasyonel bir zemine oturtmaları beklenmiştir. Her öğrenci, tasarladığı modül için bir kural tanımlamış ve bu kurala sadık kalarak ilk birimlerini türetmiştir. Çoğaltma süreci de aşamalı olarak ilerlemiştir: Öğrencilerden önce, tanımladıkları kuralları uygulayarak 10×10×10 cm ölçülerini aşmayan, yeni türetme potansiyellerine açık bir ön model (prototip) geliştirmeleri istenmiştir. Bu prototipin, çok sayıda parçanın bir araya gelmesiyle oluşması ve farklı tasarım olasılıklarına açık bir yapıda olması beklenmiştir. Devamında, prototipin çoğaltılabilirlik potansiyelleri incelenmiş; öğrenciler tasarladıkları modelleri yatay ve/veya dikey düzlemde çoğaltarak üç boyutlu hacimler üretmişlerdir.

Prototipin çoğaltılması sürecinde yalnızca geometrik yapı ve dokunun oluşumu değil, aynı zamanda öğrencilerin mekânsal sezgilerinin gelişimi, dolu-boş ilişkileri ve beden-mekân etkileşimi de değerlendirilmiştir. Bu bağlamda beden kavramı; bir mekânın bedene sunduğu olanaklar ve mimarın bu olasılık senaryolarını tasarlama sürecindeki rolü üzerinden tartışılmıştır. Öğrenciler bu süreçte, insan bedenine en fazla hareket özgürlüğü tanıyan mekânsal kurguları geliştirmeye çalışmış; ancak hareketin sınırlanması durumlarında, önerdikleri çözümlere bilinçli birer sapma formülü eklemeleri beklenmiştir.

İlk faz, bu fiziksel ve kavramsal üretim sürecini destekleyecek biçimde, mimari kuram ve tasarıma dair okumalar ve bir dizi seminerle desteklenmiştir. Süreç boyunca öğrenciler, fiziksel modellerinden elde ettikleri tasarım birimlerinin geometrik detaylarını ve organizasyonel kurgularını ortaya koymuşlardır İnsan ölçeğiyle ilişkilendirilen bu maketler, öğrencilerin tasarımlarını mekânsal ve strüktürel bir bağlamda değerlendirmelerine olanak sağlamıştır. Ayrıca öğrenciler, oluşturdukları modellerin en doğru biçimde temsil edilmesini sağlamak amacıyla, bu maketlerin plan, kesit ve vaziyet planı gibi farklı projeksiyon düzlemlerinde ölçekli çizimlerini üretmişlerdir. Böylelikle el becerileri ve yaratıcı düşünme süreçleri desteklenmiş, kavramsal tasarım temelleri güçlendirilmiştir (**Şekil 1**).

İlgili dönemin ilk 7-8 haftasında eğitim zorunlu olarak devam çevrimiçi devam etmiştir. Yoğun olarak fiziksel modeller üzerinde çalışılan bu periyodda eğitimdeki iletişim problemlerinin azalması ve akran öğrenmesinin gelişmesi için ilk haftada öğrenciler üçerli gruplara ayrılmış, birlikte çalışarak tartışma ortamı oluşturmaları istenmiştir. Öğrenciler teorik okumalarını zihin haritası haline getirip tasarım ve mekân üzerine tartışmışlardır. Online eğitimdeki etkileşim zayıflığına bir çözüm olarak, *Miro* uygulaması kullanılmış, öğrenci ve yürütücüler aynı sayısal çalışma kanvası üzerine çalışmalarını aktarmışlardır. Böylece stüdyo ortamına benzer bir şekilde tüm grup birbirinin çalışmalarını görebilirken yürütücüler de bu çalışmalara verdiği kritikleri tüm öğrencilerin görebileceği aynı çalışma ortamına aktarmış ve etkileşim arttırılmıştır. Faz 1-1'in sonunda bir ara jüri yapılmıştır. Sonrasında üretimler sayısal ortama taşınmıştır (**Şekil 2**).

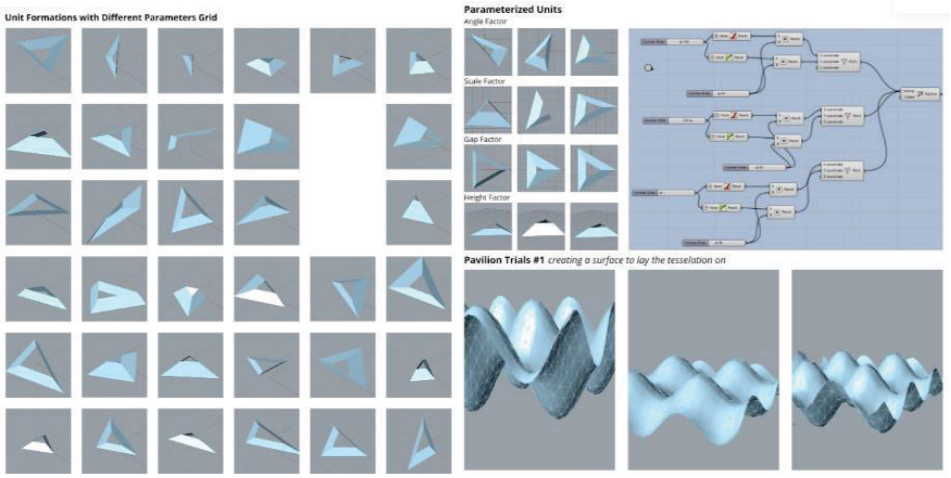


Şekil 2: Miro ortamı

Faz 1-2'de öğrenciler sayısal araçlarla çalışmaya başlamıştır. Bu aşamada, görsel programlama arayüzü olarak Rhino ve Grasshopper tercih edilmiştir. Atölyeye katılan öğrenciler, GTÜ Mimarlık Bölümü'nün ikinci yarıyılında yer alan zorunlu "MİM102- Mimarlıkta Bilgisayar Uygulamaları" dersini eş zamanlı olarak almaktadır. Bu ders kapsamında öğrenciler Rhino ve Grasshopper kullanımıyla tanışmakta, parametrik düşünme biçimini öğrenmekte ve temel uygulamalar

gerçekleştirmektedir. Bu nedenle, atölye süresince Grasshopper arayüzünün kullanımıyla ilgili ek bir eğitim verilmemiştir.

Stüdyonun bu aşamasında öğrencilerden, ilk jüri öncesinde fiziksel ortamda keşfettikleri parça ve prototipi, bu kez sayısal ortamda ve aşina oldukları Grasshopper arayüzü aracılığıyla parametrik olarak üretmeleri beklenmiştir. Fiziksel ortamda benzer bir geometrinin nasıl üretildiğini daha önce deneyimlemiş olmaları, onların aynı geometrik gelişimi sayısal ortamda nasıl betimleyeceklerine odaklanmalarını sağlamıştır. Bu bağlamda, kavramsal kısıt ve benzer bir sayısal prototipi üretme sorunsalı, öğrencilerin algoritmik yaklaşımlarını ve görsel programlama mantığını kavrayışlarını güçlendirmiştir.

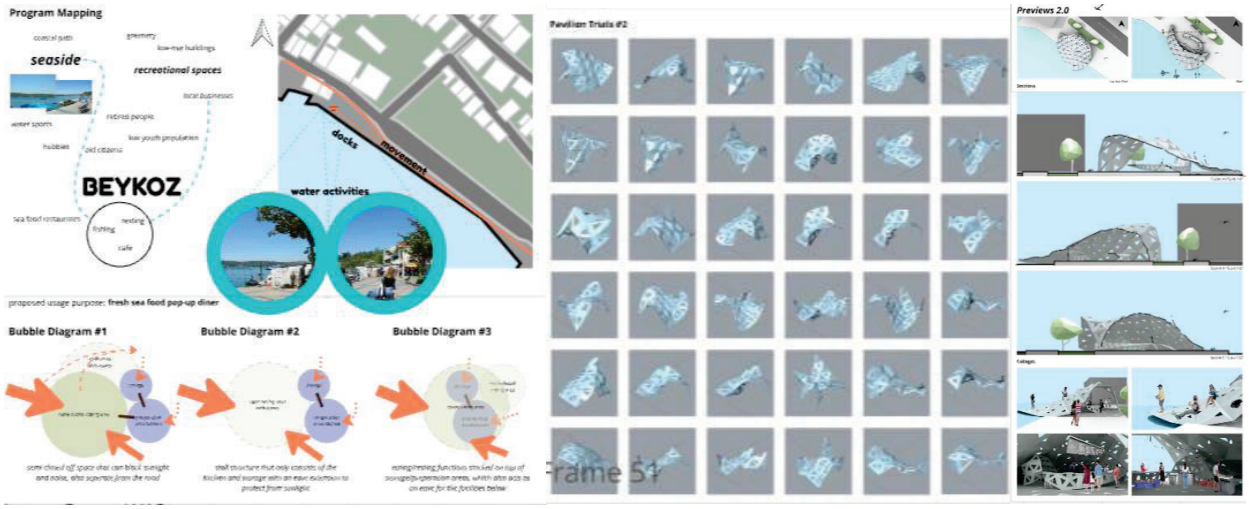


Şekil 3: Sayısal parça varyasyonları _ Öğrenci E

Jüri sonrasında yapılan kritikler doğrultusunda öğrenciler, “akıllı parça” ve “akıllı prototipi” dijital ortamda yeniden üretmiş; parçaların farklı uzama, kıvrılma ve dönme senaryolarını parametrik komut dizileri aracılığıyla araştırmışlardır. Bu süreçte, sayısal prototipin fiziksel prototiple benzer ve farklı çalışma biçimleri keşfedilmiş ve analiz edilmiştir. İlk aşamada parçanın olasılıklarını dijital ortamda yeniden keşfeden öğrenciler, devamında bu parçaların bir araya gelerek bütün oluşturma yöntemlerini geliştirmiştir (**Şekil 3**). Bu araştırma süreci sonunda Faz 2’ye geçilmiştir.

Faz 2'de, parametrik değişkenlerin bilinçli ve yerinde kullanımıyla tasarım gerekliliklerinin karşılanması hedeflenmiştir. Öğrenciler, bir önceki fazda geliştirdikleri sayısal prototipi bu kez, önerdikleri senaryoya ve verilen bağlamın ihtiyaçlarına uygun şekilde yeniden yorumlayarak sahaya uyarlamışlardır. Bu aşamada, algoritmik kısıtları daraltarak otomatik çözümler üretmek yerine, tasarımı yönlendiren kararların tasarımcının sezgisel müdahalesiyle şekillenmesini sağlayan bir yaklaşım benimsenmiştir. Böylece, sayısal araçların tasarımı yalnızca bir optimizasyon problemi olarak görmesinin önüne geçilerek, öğrencilerin parametreleri üretken bir medya olarak kullanma yetkinliklerinin gelişimine odaklanılmıştır.

Sahaya uyarlama sürecinde çevresel veriler detaylı biçimde analiz edilmiş, bu analizler doğrultusunda bağlama özgü tasarım kararları alınmıştır. Süreç, parametrik tasarım ilkelerinin bağlamsal düzeyde ne ölçüde esnek ve etkili bir şekilde uygulanabildiğini göstermektedir. Üretilen görsellerde, sahaya ilişkin programatik haritalamalar, parametrik grid yapısının mekânsal organizasyona dönüşüm biçimleri ve bu yapıların kullanıcı deneyimine etkileri temsil edilmiştir. Fazın sonunda öğrenciler, projelerini vaziyet planı ölçeğinden başlayarak 1/100 pano çizimi ölçeğine kadar detaylandırmış; plan, görünüş ve farklı kesit düzlemlerinde temsil üreterek tasarımlarını bütüncül bir yaklaşımla tamamlamışlardır (**Şekil 4**).



Şekil 4: Faz 2 final sunumundan örnekler _ Öğrenci E

4. Bulgular ve Tartışma

Modelin uygulanması sonucunda elde edilen öğrenci çıktıları, fiziksel ve dijital süreçlerin bütünleşik bir yaklaşımla nasıl sürdürülebileceğini ortaya koyarken, aynı zamanda algoritmik düşünme ve parametrik modelleme becerilerinin pedagojik olarak nasıl desteklenebileceğine dair önemli ipuçları sunmaktadır. **Tablo 2**'de yer alan örnek projeler, öğrencilerin benimsedikleri farklı tasarım stratejileri üzerinden sınıflandırılmış; bu sınıflama dört ana eksen altında değerlendirilmiştir: kural yaklaşımı, modül tasarımı, kurulum örnekleri ve mekân-beden ilişkisi.

Farklı kural yaklaşımları, öğrencilerin sezgisel ve kural tabanlı düşünme becerilerinin çeşitliliğini yansıtmaktadır. Örneğin, Öğrenci A'nın modüler sistemi, geometrik sadeliği güçlü bir çoğaltma kurgusuna dönüştürmüşken; Öğrenci C, daha serbest formlu ancak çevresel verilerle ilişkili, çevik bir yapısal kurgu önermiştir. Öğrenci B'nin tasarımında ise organik geometriye dayalı, kendi içinde esneyebilen bir sistemin varlığı dikkat çekmektedir. Bu çeşitlilik, öğrencilerin yalnızca form üretmekle kalmayıp, tasarımı biçimlendiren kurallar üzerinden özgün çözüm yolları geliştirdiklerini göstermektedir.

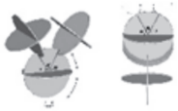
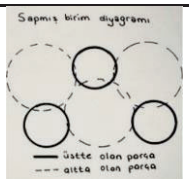
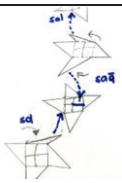
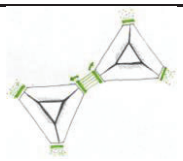
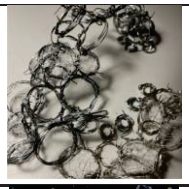
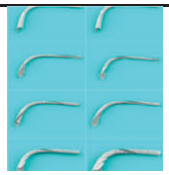
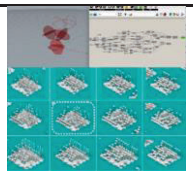
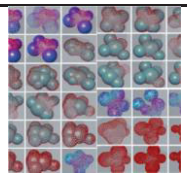
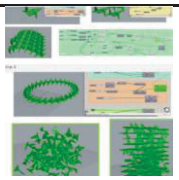
"Kendini üreten dönüşebilir parça" başlığı altındaki çıktılar, öğrencilerin parça tasarımlarını parametrik bir mantıkla sistemleştirebilme kapasitesini ortaya koymaktadır. Modül kavramı, burada yalnızca tekrarlanan birim olarak değil, dönüşebilirlik, uyarlanabilirlik ve bağlamla etkileşim açısından yeniden tanımlanmıştır. Öğrenci E'nin tasarımı, bu noktada hem parçaların bir araya geliş mantığını hem de mekânsal olarak nasıl pozisyonlandığını detaylı biçimde sorgulamaktadır.

Fiziksel prototip örnekleri, öğrencilerin üç boyutlu düşünme ve fiziksel den dijitale geçişte prototipin çoğalma becerilerini test etmeleri açısından önemli bir değerlendirme alanı sunmaktadır. Bazı öğrenciler gridal sistemler üzerinden üretimlerini rasyonel kurgulara dayandırmış; bazıları ise malzeme davranışlarını esas alan deneysel montaj teknikleri ile daha akışkan strüktürler oluşturmuştur. Bu fark, stüdyoda önerilen modelin öğrencilerin kişisel yorumlarına ve tercihlerine imkân tanıyan esnek yapısıyla doğrudan ilişkilidir.

Son olarak, mekân-beden ilişkisi başlığında yer alan çıktılar, öğrencilerin tasarımlarını yalnızca biçimsel değil, deneyimsel düzeyde de düşündüklerini göstermektedir. Özellikle Öğrenci A ve Öğrenci E'nin render çalışmaları ve yerleştirme önerileri, yapının kullanıcıyla kurduğu fiziksel ve görsel ilişkinin aktif biçimde tasarlandığını göstermektedir. Öğrenciler, fiziksel prototiplerini sayısal ortama aktarma sürecinde çeşitli zorluklarla karşılaşmışlardır. Özellikle parçadan bütüne kurulan kurgunun parametrik sistem içinde yeniden yapılandırılması aşaması, sürecin en karmaşık adımı olmuştur. Sayısal ortamda bu akışın karşılığı, "Wasp" gibi parametrik çoğaltma eklentileri üzerinden kurulamaya çalışılmıştır (Öğrenci D). Ancak bu tür eklentilerin karmaşık veri yapıları ve sınırlı görselleştirme olanakları, öğrencilerin tasarım üzerindeki tam kontrolünü engellemiştir. Bazı öğrenciler, parçadan bütüne gelişimi bu araçlarla doğrudan çözümlemeyi tercih etmemiş; bunun yerine yeni çoğaltma yöntemleri geliştirerek (Öğrenci A, B) ya da önceden tanımlı bir yüzeyi oluşturarak, parçalarını bu yüzey üzerinde panelleme yaklaşımını benimsemişlerdir (Öğrenci C, E). Bu çeşitlilik, parametrik tasarım araçlarının pedagojik bağlamda ne ölçüde destekleyici ya da sınırlayıcı olabileceğine dair

önemli bir tartışma zemini sunmaktadır. Tüm öğrenciler, Faz 1.2 sonunda çoğalma ve dönüşme potansiyeli barındıran bir dijital prototip üretmeyi başarmış; bu prototipi Faz 2'de, kendi geliştirdikleri senaryonun gerekliliklerine göre bağlamsallaştırarak ilgili araziye uyarlamışlardır.

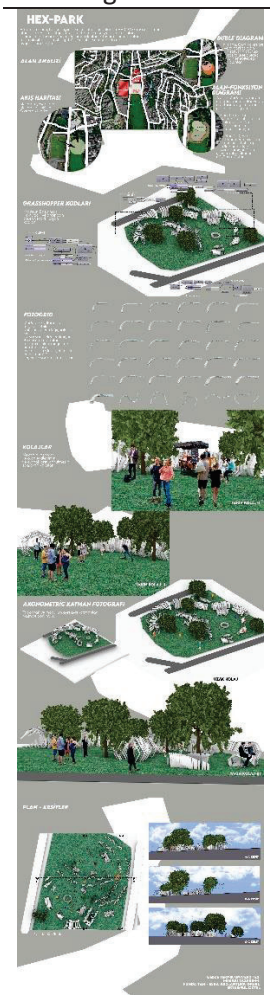
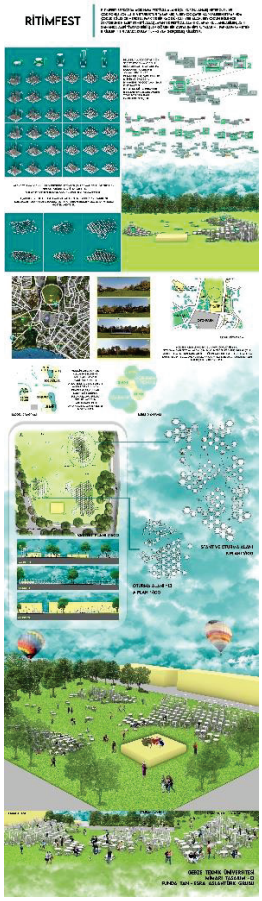
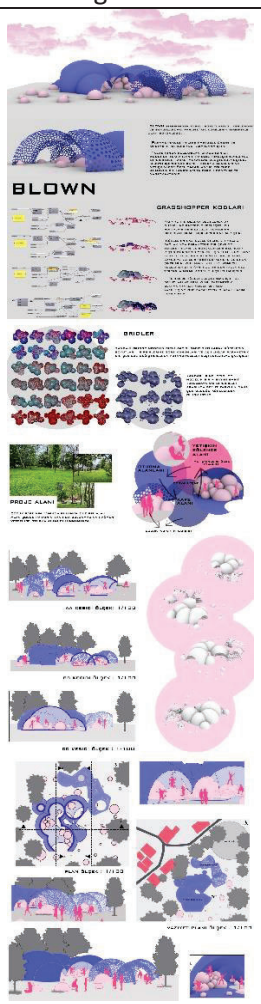
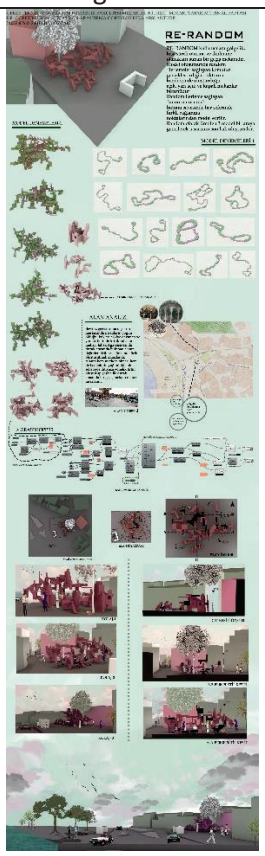
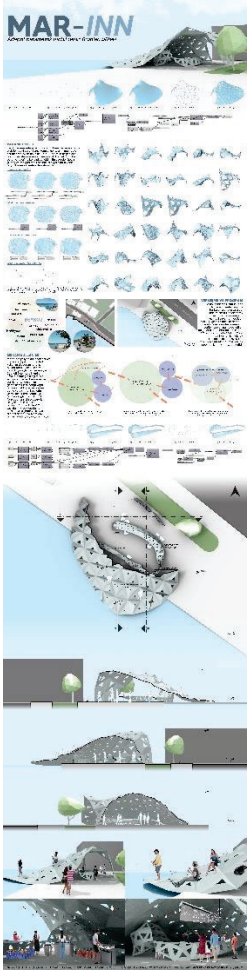
Tablo 2: Süreç çıktılarından örnekler

		Öğrenci A	Öğrenci B	Öğrenci C	Öğrenci D	Öğrenci E
FAZ 1.1 FİZİKSEL	Kendini üreten dönüşebilir parça					
	Farklı kural yaklaşımları					
	Fiziksel prototip örnekleri					
	Mekân-beden ilişkisi					
FAZ 1.2 SAYISAL	Çoğul olasılıklar					

Faz 2'de, öğrencilerin çoğu kendilerine verilen direktifler doğrultusunda başarılı yerleşim senaryoları geliştirmiş; projelerini anlamlı temsillerle ifade ederek süreci tamamlamışlardır. Örneklemde yer alan öğrenci çalışmalarının, arazi yerleşimi, beden-mekân ilişkisi, mekânsal derinlik, estetik, oransallık ve bütünsellik gibi değerlendirme kriterleri açısından yüksek başarı gösterdiği gözlemlenmiştir (**Tablo 3**).

Tüm bu değerlendirmeler ışığında, önerilen modelin en güçlü yönü, öğrencilerin soyut kavramsal üretimle sayısal araç kullanımı arasında anlamlı ve üretken bir ilişki kurmasına imkân tanımasıdır. Fiziksel modelleme süreci, yalnızca el becerilerinin değil, kavramsal netliğin de geliştirilmesine katkı sağlamış; dijital faz ise bu kavramsal altlığı farklı bağlamlara uygulayabilecek parametrik varyasyonların üretimini mümkün kılmıştır. Böylece tasarım süreci, sezgi ile hesaplama arasında kurulan dinamik bir diyalog şeklinde işlemiştir.

Tablo 3: Aynı örneklem öğrenci grubunun Faz 2 sonunda ortaya çıkan final ürünleri

Öğrenci A	Öğrenci B	Öğrenci C	Öğrenci D	Öğrenci E
				

5. Sonuçlar

Bu çalışma, mimarlık eğitiminde algoritmik düşünme ve parametrik tasarım becerilerinin pedagojik olarak nasıl bütüncül bir yaklaşımla kazandırılabileceğini araştırmış; geleneksel stüdyo pedagojisinden farklılaşan, fiziksel ve dijital üretimi kavramsal düzlemde ilişkilendiren iki fazlı bir model önermiştir. Model, mimarlık eğitiminde sıkça karşılaşılan bilgi-işlemsel düşünme ve programlama becerilerinin yetersizliği ile bu becerilerin mimari kuram ve tasarım ilkeleriyle bütünleştirilememesi gibi temel sorunlara çözüm sunmayı hedeflemiştir.

Modelin ilk fazında öğrencilerin fiziksel prototipleme yoluyla algoritmik düşünme becerileri geliştirmesi amaçlanmış; bu süreçte sezgisel yaratıcılık, kural tabanlı üretim ve modülerlik ilkeleri öne çıkarılmıştır. İkinci fazda ise bu beceriler dijital ortama taşınmış, geliştirilen sayısal prototipler belirli bağlamsal gereksinimlere göre yeniden yorumlanarak sahaya özgü mimari önerilere dönüştürülmüştür. Böylece öğrenciler, sezgiyle hesaplamayı, fiziksel üretimle sayısal modellemeyi, kuramsal kavrayışla teknik uygulamayı bir araya getiren bütüncül bir tasarım süreci deneyimlemişlerdir. Elde edilen bulgular, öğrencilerin yalnızca parametrik araçları kullanmakla kalmayıp, aynı zamanda bu araçları kendi geliştirdikleri tasarım stratejileri doğrultusunda esnek biçimde yapılandırabildiklerini göstermektedir. Parça-bütün ilişkisi, mekân-beden etkileşimi, çevresel verilerin çözüme entegre edilmesi ve kavramsal sınırlayıcılarla tasarım kararlarının temellendirilmesi gibi kriterlerdeki başarı düzeyi, modelin hem sezgisel hem işlemsel düşünme biçimlerini besleyen bir öğrenme ortamı sunduğunu ortaya koymaktadır.

Modelin en belirgin katkısı, dijital araçların yalnızca biçim üretimi için değil, kavramsal düşüncenin kurgulanmasında da etkin bir rol oynayabileceğini somut olarak göstermesidir. Öğrenciler, dijital üretimi sadece teknik bir süreç olarak değil, aynı zamanda eleştirel ve bağlamsal bir düşünme pratiği olarak deneyimlemiş; parametrik tasarımı bir temsil aracı olmanın ötesinde, mimari anlam kurma sürecinin bir parçası haline getirmişlerdir. Bu çift yönlü öğrenme

yaklaşımı, hesaplamalı tasarımı pedagojik olarak yeniden düşünmek isteyen tüm stüdyo kurguları için güçlü bir örnek oluşturmaktadır.

Sonuç olarak, geliştirilen model; dijital araç kullanımı, kavramsal netlik ve bağlamsal duyarlılığı eş zamanlı olarak destekleyen üretken bir pedagojik zemin sunmakta; mimarlık öğrencilerinin dijital çağın tasarım gereksinimlerine yaratıcı, eleştirel ve bütüncül yanıtlar verebilmesini mümkün kılmaktadır. Farklı bağlamlarda test edilerek geliştirilmeye açık olan bu model, hesaplamalı tasarımı yalnızca teknik bir yeterlilik değil, mimari düşüncenin dönüşen doğasına entegre bir yaratıcı düşünme biçimi olarak yeniden tanımlamaktadır.

Teşekkür
Stüdyo sürecinin tamamına aktif bir şekilde katılım gösteren ve süreci başarıyla tamamlayan tüm öğrencilerimize teşekkür ederiz. Ayrıca işleri burada örneklenen Kıvanç Oruç, Nil Küçükkaya, Meliha Özcan, Kübra Abdurrezzak ve Ertuğrul Öztel'e özel olarak teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

Agirbas, A. (2018). The use of metaphors as a parametric design teaching model: A case study. *Design and Technology Education: An International Journal, 23*(1), 40–54.

Alalouch, C. (2018). A pedagogical approach to integrate parametric thinking in early design studios. *Archnet-IJAR: International Journal of Architectural Research, 12*(2), 162. https://doi.org/10.26687/archnet-ijar.v12i2.1584

Alkan, D., & Taşlı Pektaş, Ş. (2020). Integrating computational thinking with architectural education: A study on making. *The 19th Symposium on Digital Design in Architecture*, 183–190.

Carraher, E. (2011). Parameters of a digital design foundation. *ACADIA 2011: Regional: Lincoln*. https://doi.org/10.52842/conf.acadia.2011.x.l3h

Defays, A., Safin, S., Darses, F., Mayeur, A., Rajeb, S. Ben, Lecourtois, C., Guéna, F., & Leclercq, P. (2012). Invisible computer for collaborative design: evaluation of a multimodal sketch-based environment. *Work, 41*, 3494–3503. https://doi.org/10.3233/WOR-2012-0629-3494

Duarte, J. P., Celani, G., & Pupo, R. (2012). Inserting computational technologies in architectural curricula. In N. Gu & X. Wang (Eds.), *Computational Design Methods and Technologies* (pp. 390–411). IGI Global. https://doi.org/10.4018/978-1-61350-180-1.ch022

El-Mahdy, D. (2022). Learning by doing: Integrating shape grammar as a visual coding tool in architectural curricula. *Nexus Network Journal, 24*(3), 701–716. https://doi.org/10.1007/s00004-022-00608-w

Gallas, M.-A., Jacquot, K., Jancart, S., & Delvaux, F. (2015). Parametric modeling: An advanced design process for architectural education. *eCAADe 2015 - 33rd Annual Conference Real Time Extending the Reach of Computation,* 149–157. https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2015.2.149

Gündüz, G., Oral, H., & Yazar, T. (2018). Integration of design geometry with "computational making" in basic design studio - A case study of lanterns project. *eCAADe 2018 – Computing for a Better Tomorrow,* 439–448. https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2018.2.439

Gürsoy, B., & Özkar, M. (2015). Visualizing making: Shapes, materials, and actions. *Design Studies, 41*, 29–50. https://doi.org/10.1016/j.destud.2015.08.007

Iordanova, I. (2007). Teaching digital design exploration: Form follows…. *International Journal of Architectural Computing, 5*(4), 685–702. https://doi.org/10.1260/147807707783600807

Jabi, W. (2013). *Parametric design for architecture*. Hachette UK.

Knight, T., & Stiny, G. (2015). Making grammars: From computing with shapes to computing with things. *Design Studies, 41*, 8–28. https://doi.org/10.1016/j.destud.2015.08.006

Terzidis, K. (2008). Algorithmic complexity: Out of nowhere. In Andrea Gleiniger & Georg Vrachliotis (Eds.*), Complexity. Design Strategy and World View* (pp. 75–86). Birkhäuser Verlag AG.

Lecourtois, C., & Guéna, F. (2012). Architectural design education and parametric modeling. In *Computational Design Methods and Technologies* (pp. 338–350). IGI Global. https://doi.org/10.4018/978-1-61350-180-1.ch019

Ostrowska-Wawryniuk, K., Strzała, M., & Słyk, J. (2022). Form follows parameter: Algorithmic-thinking-oriented course for early-stage architectural education. *Nexus Network Journal*, *24*(2), 503-522.

Oxman, R. (2008). Digital architecture as a challenge for design pedagogy: Theory, knowledge, models and medium. *Design Studies, 29*(2), 99–120. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.destud.2007.12.003

Oxman, R., & Oxman, R. (2014). *Theories of the digital in architecture* (Vol. 99). Routledge Abingdon.

Özkar, M. (2011). Visual schemas: Pragmatics of design learning in foundations studios. *Nexus Network Journal, 13*(1), 113–130. https://doi.org/10.1007/s00004-011-0055-7

Özkar, M. (2017). *Rethinking basic design in architectural education*. Routledge. https://doi.org/10.4324/9781315740003

Özsel Akipek, F., & Kozikoğlu, N. (2007). Prototypes in architectural education: As instruments of integration in the digital era. *METU Journal of the Faculty of Architecture, 24*(2), 169–178. http://jfa.arch.metu.edu.tr/archive/0258-5316/2007/cilt24/sayi_2/169-178.pdf

Schon, D. A., & Wiggins, G. (1992). Kinds of seeing and their functions in designing. *Design Studies, 13*(2), 135–156. https://doi.org/10.1016/0142-694X(92)90268-F

Şen Bayram, A. K., Güzelci, O. Z., & Alaçam, S. (2023). Informal learning in the context of digital design pedagogy in architecture. *Journal of Computational Design, 4*(1), 1-16. https://doi.org/10.53710/jcode.1227228

Tan, F. (2024). Translation of form: A model for teaching design coding to undergraduate students. *Nexus Network Journal 26*(4), 897-924. https://doi.org/10.1007/s00004-024-00778-9

Terzidis, K. (2004). Algorithmic design: A paradigm shift in architecture?. *eCAADe 2004 – Architecture in the Network Society,* 201–207. https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2004.201

Terzidis, K. (2006). *Algorithmic architecture*. Routledge.

Vrouwe, I., Dissaux, T., Jancart, S., & Stals, A. (2020). Concept learning through parametric design - A learning situation design for parametric design in architectural studio education. *eCAADe 2020 – Anthropologic – Architecture and Fabrication in the cognitive age … from smart to behavioral … from digital to material,* 135–144. https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2020.2.135

Woodbury, R. (2010). *Elements of parametric design*. Routledge.

Yazar, T., & Akipek, F. Ö. (2014). Infections: Parametric patterning and material behavior. *International Journal of Architectural Computing, 12*(2), 213–224. https://doi.org/10.1260/1475-472X.12.2.213

Yazici, S. (2020). Rule-based rationalization of form: Learning by computational making. *International Journal of Technology and Design Education, 30*(3), 613–633. https://doi.org/10.1007/s10798-019-09509-5

MSTAS 2025 MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Kampüs Tasarımında Hesaplamalı Yöntemlerin Uygulanması: Bursa Uludağ Üniversitesi Örneği

Barış Mert Karasu[1]; Özgür Ediz[2]
[1,2]Bursa Uludağ Üniversitesi
[1]bmertkarasu@uludag.edu.tr; [2]ozgur@uludag.edu.tr

Özet

Kampüs, tasarımcıları tarafından istenilen görsel etkiyi yaratmak amacıyla bilinçli olarak tasarlanmış bir düzeni ifade etmektedir. Türkiye'de Cumhuriyet dönemiyle birlikte yükseköğretim kurumlarının artışı ve buna bağlı olarak eğitim faaliyetlerinin gerçekleştirileceği fiziksel mekânlara olan ihtiyaç, kampüs tasarımına yönelik girişimlerin başlamasına yol açmıştır. Bu süreçte, kent merkezlerinin yaşam dokusunu bozmadan, kent dışı alanların değerlendirilmesi ve özerk yaşam alanları oluşturulması hedeflenmiştir. Kampüslerin tasarımı, gelecekteki eğitim ve toplumsal gereksinimlerin öngörüsüne dayanan çeşitli morfolojik yapılar önerilerek gerçekleştirilmiştir. Kampüs tasarım ilkelerini belirlemeye çalışan ve öğrenci eğitimi ile kampüs formu arasındaki ilişkiyi ifade eden çeşitli normatif çalışmalar mevcut olsa da tasarım önerilerinin sonuçlarını kanıta dayalı olarak tartışan nicel araştırmalara sık rastlanmamaktadır. Son yıllarda, sezgisel yöntemlere alternatif olarak gelişen hesaplamalı yöntemler dikkat çekmektedir. Bu çalışmanın amacı, seçilen bir kampüs yapılı çevresine yapılacak tasarım müdahalelerinin sosyo-mekansal etkilerini hesaplamalı tasarım ve analiz yöntemleriyle incelemektir. Bu amaç doğrultusunda, Bursa Uludağ Üniversitesi Görükle Kampüsü çalışma alanı olarak seçilmiştir. Sezar Aygen tarafından 1978 yılında 'lineer-konsantrik' bir düzende tasarlanan bu kampüste, yerel bölgeler arası iletişimin tekil noktalardan sağlandığı gözlemlenmiştir. Görükle Kampüsü'nün erişilebilirlik ve işlevsellik açısından optimize edilmesi için fraktal boyut ve mekân dizimi yöntemleri kullanılmıştır. Tasarım önerisi geliştirilirken özgün kampüs dokusuna ait mimari karakterin olabildiğince korunması hedeflenmiştir. Önerilen tasarım ile ilk durumun benzerlik seviyeleri fraktal analiz yöntemiyle test edilmiştir. Fiziksel müdahale önerilerinin olası sosyo-mekansal etkileri ise mekân dizimi yönteminin eksensel hat analiz tekniği aracılığıyla temsil edilmiştir. Fraktal boyut değerlerindeki %2'den az değişim, morfolojik bütünlüğün korunduğunu; ortalama entegrasyon değerindeki %22'lik artış ise mekânsal erişilebilirliğin iyileştirildiğini göstermiştir. Bu bulgular, hesaplamalı yöntemlerin kampüs planlamasında etkin bir araç olduğunu ve benzer ölçekli yerleşkeler için uygulanabilirliğini kanıtlamaktadır. Bu çalışma, kentsel tasarım kararlarının nicel verilerle desteklenmesinin önemini vurgulamakta ve gelecekteki araştırmalar için, çalışma kapsamında kullanılan yöntemlerin farklı bağlamlarda test edilmesi ile kullanıcı deneyimi odaklı detaylandırmaların yapılmasını önermektedir. Çalışma ayrıca olası tasarım müdahalelerinin etkilerini sayısal olarak ifade ederek, gelecekteki kampüs tasarımları için rehberlik edecek bir kurgu sunmayı hedeflemektedir.

Anahtar Kelimeler: *Hesaplamalı Tasarım, Mekân Dizimi, Fraktal Boyut, Bursa Uludağ Üniversitesi Görükle Kampüsü.*

MSTAS 2025 MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Application of Computational Methods in Campus Design: The Case of Bursa Uludağ University

Barış Mert Karasu[1]; Özgür Ediz[2]
[1,2]Bursa Uludağ University
[1]bmertkarasu@uludag.edu.tr; [2]ozgur@uludag.edu.tr

Abstract

A campus refers to an arrangement consciously designed by its designers to create the desired visual effect. The increase in the number of higher education institutions in Turkey in the Republican period and the need for physical spaces where educational activities will be carried out have led to the initiatives for campus design. In this process, it was aimed to make use of out-of-town areas and to create autonomous living spaces without disrupting the living environment of city centres. The design of campuses has been carried out by proposing various morphological structures based on the prediction of future educational and social needs. Although there are various normative studies that try to determine campus design principles and express the relationship between student education and campus form, quantitative studies that discuss the results of design proposals based on evidence are not common. In recent years, computational methods as an alternative to intuitive methods have attracted attention. The aim of this study is to examine the socio-spatial impacts of design interventions in a selected campus built environment by using computational design and analysis methods. For this purpose, Bursa Uludağ University Görükle Campus was selected as the study area. In this campus, which was designed by Sezar Aygen in 1978 in a 'linear-concentric' layout, it has been observed that communication between local areas is provided through singular points. Fractal dimensional analysis and space syntax methods were used to optimise the Görükle Campus in terms of accessibility and functionality. While developing the design proposal, it was aimed to preserve the architectural character of the original campus fabric as much as possible. The similarity levels of the proposed design and the initial situation were tested by the fractal analysis method. The possible socio-spatial effects of the physical intervention proposals were represented through the axial line analysis technique of the space syntax method. A change of less than 2% in fractal dimension values showed that morphological coherence was preserved, while a 22% increase in the average integration value showed that spatial accessibility was improved. These findings prove that computational methods are an effective tool in campus planning and can be applied to similar sized campuses. This study emphasises the importance of supporting urban design decisions with quantitative data and recommends that the methods used in this study should be tested in different contexts and elaborated with a focus on user experience for future research. The study also aims to provide a guiding framework for future campus designs by quantitatively expressing the effects of possible design interventions.

Keywords: *Computational Design, Space Syntax, Fractal Dimension, Bursa Uludağ University Görükle Campus.*

1. Giriş

Cumhuriyetin ilanı ile başlayan yükseköğretim kurumlarının kurulması süreci, eğitimin gerçekleştirileceği fiziksel mekân ihtiyacı doğurmuştur. Bu bağlamda, kentsel alanlardaki yaşamı etkilemeden, kent dışı bölgeleri değerlendirmek ve özerk yaşam çevreleri oluşturmak amacıyla büyük şehirlerden başlayarak kampüsler inşa edilmiştir. Türk eğitim sistemi, 1923 yılında ilan edilen Cumhuriyet'in ardından uygulanan köklü eğitim reformları ile tamamen yeniden yapılandırılmıştır. 1924 yılında yürürlüğe giren 'Tevhidi Tedrisat Kanunu' ile medreseler kapatılmış, darülfünun ise 'İstanbul Darülfünunu' adını alarak tüzel kişilik kazanmıştır (Sönmezler, 2003). Türkiye'deki üniversiteler, 1950'li yıllara kadar kentle iç içe bir yapı sergilemişlerdir. Günümüzde dahi kent içinde varlıklarını sürdüren üniversiteler mevcuttur. Üniversiteye bağlı fakülteler ve yüksekokullar, gelişimlerini genellikle kent içinde devam ettirmektedirler (Türeyen, 2003). Ancak 1960'lı yıllarda Avrupa'da ve sonrasında ülkemizde üniversitelerin kent dışına yönelmesi gözlemlenmektedir (Erkman, 1990).

Banliyö kampüsü olarak adlandırılan kent dışındaki üniversiteler, kentsel morfoloji çalışmalarında "kentsel tip" olarak değerlendirilen birer kent parçası olarak kabul edilmektedir (Dober, 1996; Larkham, 2000). Kentsel tasarım tekniklerinin kampüslere uygulanmasıyla, belirli sınırlarla tanımlı yerleşim alanları oluşturulmuştur (Carmona, 2021). Kentlerde olduğu gibi, kampüslerin biçimlenişini etkileyen birçok parametre bulunmaktadır. Üniversitelerin kendine özgü amaçları, tasarımcı yaklaşımları, iklimsel ve çevresel özellikler, ülkelere göre şekillenen mimari karakteristikler, kullanıcı beklentileri ve mimari teknolojideki değişimler gibi faktörler, kampüslerin biçimlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır (Türeyen, 2003). Erkman (1990), kampüslerin işlevlerini dört ana başlık altında toplamıştır: Çalışma, Barınma, Dinlenme ve Rekreasyon, Ulaşım. Kentlerdeki işlevlerin kampüslere uyarlanması sonucu farklı kampüs yerleşim biçimleri ve tasarım yaklaşımları ortaya çıkmıştır (Erkman, 1990; Maki ve Ohtaka, 1965).

Kampüs, kurucuları tarafından istenen görsel etkiyi oluşturmak amacıyla bilinçli bir şekilde tasarlanmış bir düzeni temsil etmektedir. Ancak, her kampüs biçimini kapsayan evrensel bir tasarım kuralı bulunmamaktadır. Kampüs tasarımı, her birimin bütüne hizmet eden küçük parçalar olarak düşünülmesinin yanı sıra, bireysel mimari ifadelerin toplamı şeklinde de şekillenebilmektedir (Chapman, 2006). Literatürde, iyi tasarlanmış bir kampüsün tasarım ilkelerini belirlemeye çalışan, öğrenci eğitimi ile kampüs tasarımı arasındaki ilişkiyi kurmayı ve tasarımcıları yönlendirmeyi amaçlayan birçok yoruma dayalı normatif çalışma bulunmaktadır (Coulson vd., 2022; Hajrasouliha, 2017; Hashimshony ve Haina, 2006). Ancak, tasarım süreci kapsamında ele alınan ve bir tasarım önerisi yapılırken olası sonuçlarını tartışan kanıt ve nicel araştırmalara dayalı çalışmalara ulaşmak oldukça zordur. Hajrasouliha (2019) tarafından da belirtildiği gibi, kampüs için belirli fiziksel müdahalelerin potansiyel etkisini araştırmak, kampüs planlamacıları ve mimarlar için ilginç bir konu olmayı sürdürmektedir.

Çalışma kapsamında alan çalışması olarak seçilen Bursa Uludağ Üniversitesi (BUÜ) Görükle Kampüsü 1978 yılında Sezar Aygen tarafından tasarlanmıştır. Tasarım sürecinde emsal çalışmalar incelenerek kampüs formunun 'lineer-konsantrik' düzende olmasına karar verilmiştir (Aygen, 1976). Çalışma 1978 yılında tasarlanan kampüse önerilen fiziksel müdahelelerin potansiyel etkilerini hesaplamalı yöntemlerle araştırmayı amaçlamaktadır. Bu müdahalelerin potansiyellerini ve karmaşık geometrik kurguların etkilerini test etmek, nicel bir yaklaşım kullanılmadan oldukça zordur. Günümüzde mevcut hesaplamalı yöntemlerin uygulanması sayesinde yerleşimlerin ve kentsel formların fiziksel özelliklerinin ölçülmesi, bu ölçüm sonuçlarının sayılar ve anlaşılır grafiklerle ifade edilmesi mümkün hale gelmiştir. Kentsel biçim ve bu biçimlerdeki değişimlerin analizi, kent morfolojisi disiplininin 1960'lı yılların başında ortaya çıkmasıyla gerçekleştirilebilmiştir. Kentsel morfoloji analizi, bir kentin yapısını veya kentsel dokusunu incelemekte, kentin oluşum ve dönüşüm süreçleri, tarihsel gelişimi ve meydana getiren unsurları detaylı bir şekilde değerlendirmeye olanak tanımaktadır (Conzen, 1960). Batty ve Longley (1994), fraktal boyut kavramından faydalanarak şehirlerin rastgelelik ve kendine benzerlik ilkeleriyle açıklanabileceğini ortaya koymuştur. Hillier ve Hanson (1984) ise mekân dizimi (space syntax) olarak adlandırılan, grafik teorisi temelllerine dayanan bir yaklaşım kullanarak kentsel formun özelliklerini nicel verilerle ortaya koymuştur. Mekân dizimi yöntemi ile yapılı çevrelerin sosyo-mekânsal analizi yapılabilir ve sistemin erişilebilirlik değeri ile insan etkileşimine olan etkileri incelenebilir. Hillier (2007), sistemi oluşturan tüm bileşenlerin eş zamanlı varlığı sonucu oluşan morfolojik yapıyı konfigürasyon olarak adlandırmıştır. Konfigürasyondaki herhangi bir noktasal değişim, tüm yapının değişmesine neden olmaktadır. Kentsel geometrilerin doğal bir sonucu olan mekânsal konfigürasyon, morfolojik yapıyı deneyimleyen kullanıcıların davranışlarını ve hareket şemalarını etkilemektedir.

Bu çalışma, fraktal boyut ve mekân dizimi analiz yöntemlerini entegre ederek bir banliyö kampüsünün fiziksel yapısını incelemek ve aynı zamanda kampüs için çeşitli öneri fiziksel müdahaleler geliştirmeyi amaçlamaktadır. Kentsel tasarım müdahalelerinin pratikteki olası etkilerini incelemek ve etkili yapılı çevrelerin nasıl oluşturulacağına dair çözüm önerileri geliştirmek, bu çalışmanın temel hedeflerinden birini oluşturmaktadır. Çalışma sürecinde yapılan müdahalelerin mevcut mimari dokunun karakterini bozmaması ve kampüsün biçimlenişini daha erişilebilir hale getirmesi hedeflenmiştir. Fraktal değere dayalı analiz yöntemi mevcut ve tasarlanan durum arasındaki görsel karmaşıklık seviyelerindeki değişimi gözlemlemek açısından seçilmiştir. Benzer bir şekilde; mekân dizimi yöntemi ise mevcut ve tasarlanan durum arasındaki sosyo-mekansal farklılıkları ve erişilebilirlik miktarlarındaki değişimleri analiz etmek açısından uygun bir yöntemdir. Alan çalışması çerçevesinde BUU Görükle kampüsü seçilmiştir. Çalışmada yapılacak bilinçli müdahalelerin pozitif etkilerini nicel verilerle ifade etmesi gelecek tasarımları için yol gösterici olacaktır.

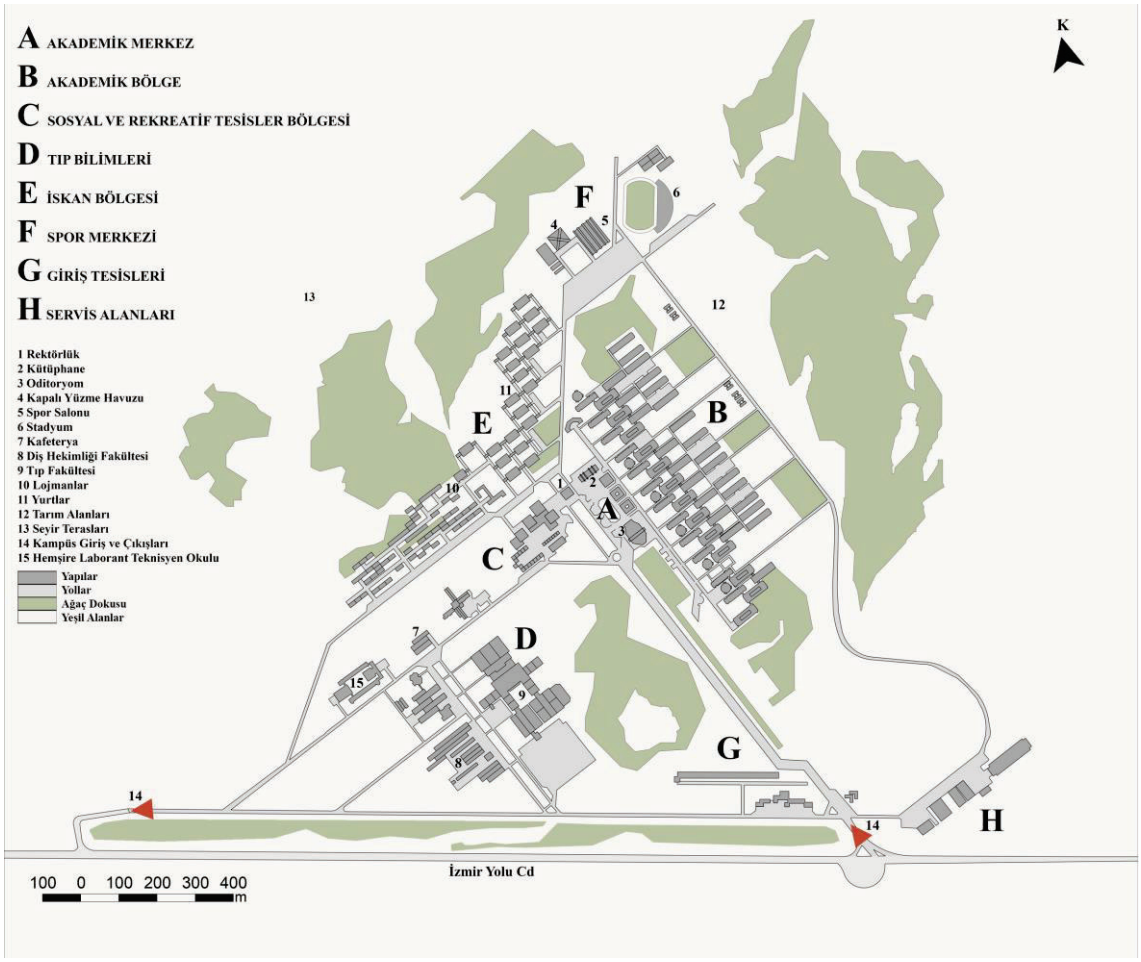
2. Materyal: Bursa Uludağ Üniversitesi

Bu başlık altında alan çalışması olarak seçilen BUÜ Görükle Kampüsü'nün kuruluş süreci, fiziksel yapısı ve çalışma kapsamından geliştirilen tasarım önerisinden bahsedilecektir.

2.1. Bursa Uludağ Üniversitesi Görükle Kampüsü

1973-1981 yılları arasında üniversitelerin Anadolu'ya yayılması sürecinde, Diyarbakır, Adana, Eskişehir, Sivas, Malatya, Elâzığ, Samsun, Konya, Bursa ve Kayseri'de toplam on yeni üniversite kurulmuştur (Türeyen, 2003). BUÜ Görükle Kampüsü, Bursa'nın Nilüfer ilçesi sınırlarında yer almaktadır. Kamulaştırma işlemleri sonucunda 16.000 dönümlük bir alana sahip olan Görükle Kampüsü'nün ve kampüs içindeki yapıların tasarımını gerçekleştirmek üzere 7 Haziran 1976 tarihinde Mimar Sezar Aygen görevlendirilmiştir. Türkiye'deki üniversiteler için emsal teşkil edecek tasarımlar mevcut olmasına rağmen, konuyla ilgili yeterli bilgi birikiminin eksikliği nedeniyle proje bürosu, detaylı bir araştırma yapılması ve sonuçların fiziksel planlamaya dönüşmesi kararını almıştır (Aygen, 1976). Sezar Aygen ve ekibi, yurt dışında East Anglia, Warwick, Lancaster, Bath, Surrey, Bochum, Simon Fraser ve Stirling üniversitelerini; yurt içinde ise ODTÜ Kampüsü, ODTÜ Gaziantep Kampüsü ve İstanbul Teknik Üniversitesi Ayazağa Kampüsü'nü incelemişlerdir. Kampüs tasarım süreci başlamadan önce, Tıp Fakültesine bağlı birimlerin inşası devam etmekteydi. Kampüs planlaması yapılırken, önceki örnekler dikkate alınarak, lineer ve konsantrik çözümlemelerin geçerli yönlerinin birleştirilmesiyle "lineer-konsantrik" bir planlama modeli benimsenmiştir (Aygen, 1976). Tasarım ve planlama süreci, 30 Eylül 1978 tarihinde tüm projelendirme çalışmalarının tamamlanmasıyla sonuçlanmıştır (Aygen, 1978).

Kampüs içi en yoğun sirkülasyon olan yaya sirkülasyonunun fonksiyonlar arasında ulaşımı kolaylaştırması için tüm kampüsün çapı 1500 metre olarak tasarlanmıştır. Kampüs azami büyümüş haline göre tasarlanmış olsa da ileri tarihlerde gelebilecek ilave fakülteler de göz önünde tutularak büyüme ve gelişme alanlarını içine alacak şekilde bir planlama yapılmıştır. Bursa'nın sivil mimarisinin belirgin özelliği olarak nitelendirilen içe dönük açık mekanlar ile birbirine akan iç ve dış ilişkisi tasarımda yansıtılmaya çalışılmıştır (Aygen 1976). Görükle Kampüsü; Tıp, İktisadi ve İdari Bilimler, Mühendislik, Veterinerlik, Ziraat, Fen-Edebiyat, Eğitim, Mimarlık, Spor Bilimleri ve Sağlık Bilimleri Fakülteleri, Konservatuvar, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu ve Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Enstitüler, Rektörlük merkez binası, spor birimleri, yurtlar, kütüphane ve yeme-içme için tasarlanmış yapılara ev sahipliği yapmaktadır. **Şekil 1** 1978 yılında Sezar Aygen ve ekibi tarafından tamamlanan Bursa Uludağ Üniversitesi Görükle Kampüsü'nün yerleşke planını göstermektedir.



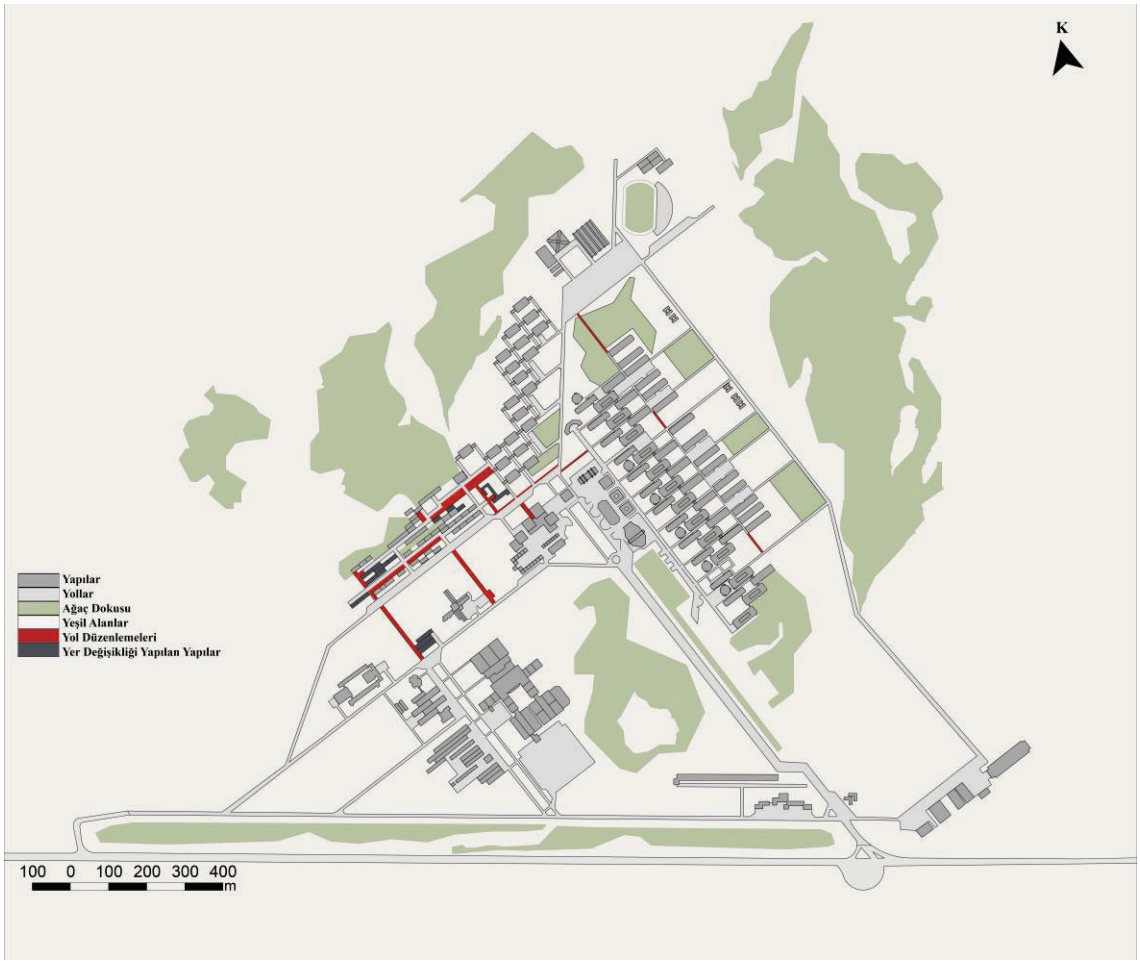
Şekil 1: Görükle Kampüsü tasarlanan yerleşke planı

2.2. Tasarım Önerisi

Kent planlamacıları ve tasarımcılar, belirli bir plan çerçevesinde tasarlanan kentsel formları oluştururken geçmiş deneyimlere ve benzer projelerden edinilen bilgi birikimine odaklanmaktadırlar. Ancak, tasarımcılar, etkili bir yapılı çevre oluşturma konusunda kesin bir çözüm sunamamaktadır (van Nes ve Yamu, 2021). Hillier (2007), tasarım sürecinin bir analiz-sentez aşaması olmaktan çok bir varsayım-test sürecine benzediğini belirtmiş ve konfigürasyondaki müdahalelerin mekân dizimi yöntemi aracılığıyla test edilebileceğini göstermiştir. Hajrasouliha (2017) ise kampüsün fiziksel çevresi ile akademik başarı ve öğrenci memnuniyeti arasında güçlü bir ilişki olduğunu vurgulamıştır. Bu kapsamda, kampüs mekanının fiziksel etkileşimi arttıracak şekilde tasarlanması rastgele karşılaşmaların sayısını arttırmakta bu durum da akademik başarı üzerinde pozitif bir etki yaratmaktadır. Alan çalışması olarak seçilen Görükle Kampüsü üzerinde yapılan fraktal ve sentaktik analizler sonucu yerleşkenin eksikleri tespit edilmiş ve bu eksikleri en az seviyeye indirmek için tasarım önerisi geliştirilmiştir. Tasarım önerisi geliştirilmesi Aygen tarafından geliştirilen kampüs planının fraktal boyut ve mekân dizimi yöntemleriyle analiz edilmesinden sonra gerçekleştirilmiştir.

1978 yılında Sezar Aygen ve ekibi tarafından tasarlanan Bursa Uludağ Üniversitesi Görükle Kampüsü'nde, yerel bölgeler arasındaki bağlantı sayısının oldukça düşük olması en önemli sorun olarak tespit edilmiştir. Oluşturulan yerleşke planında, bölgeler arasındaki ilişkiler yalnızca birkaç düğüm noktasından sağlanmaktadır. Yerleşke planının kuzeyindeki iskân bölgesinde ise yapılar, çizgisel bir hat yerine parçalı hatlar üzerine yerleştirilmiştir. Bu durum, sistemdeki eksensel hat sayısının artmasına neden olmakta; ancak oluşan bu akslar, bölünme sonucunda düşük bağlantılılık değerine sahip olmaktadır. Sistemdeki derinlik kazanımını azaltmak amacıyla, bu yerel bölgenin daha çizgisel bir düzenleme ile yeniden kurgulanması hedeflenmiştir. Belirlenen problemler sonucunda geliştirilen öneri yerleşke planı **Şekil 2**'de gösterilmiştir. Bu öneri geliştirilirken sisteme en az müdahale amaçlanmıştır. Kampüste yer alan yapıların oluşturduğu mimari dokuda mevcut birimler korunmuş, iskân bölgesinde yer alan dağınık yerleşim daha düzenli bir hale getirilmiştir. İskân bölgesinde yer alan yurt yapılarına, özgün özellikleri sebebiyle müdahalede bulunulmamıştır. Bunlara ek olarak sosyal ve rekreatif tesisler bölgesinde yer alan kafeterya yapısı kuzeydoğu yönünde kaydırılmıştır.

Öneri geliştirilirken erişilebilirlik ve karşılaşma potansiyelini etkileyen yol dokusuna öncelik verilmiştir. Sistemdeki bağlantısı düşük hatların sayısı azaltılarak yerel omurgalar oluşturulması hedeflenmiştir. Ayrıca yerel bölgeleri birbirine bağlayan uzun hatlar arasındaki bağlantısı sayısı da arttırılmıştır. Öneri yerleşke planında, sosyal ve rekreatif tesisler bölgesi üzerinde yer alan sınır dokusu üzerinde bir takım bağlantı yolları oluşturulmuştur. Böylece iskân bölgesi ve Temel Tıp Bilimleri arasında uzun bir yerel omurga elde edilmiştir. Sistemin güneydoğusunda yer alan organik yapılı yol ise yeşil dokuya müdahale etmeden, çizgisel bir düzenle değiştirilmiştir.



Şekil 2: Görükle Kampüsü öneri yerleşke planı

3. Yöntemler

3.1. Fraktal Boyut Yöntemi

Doğal ve doğal olmayan formlardaki düzensizliği ve pürüzlülüğü ölçmek için Mandelbrot (1982) tarafından geliştirilen fraktal boyut (D) değeri bir görüntü veya nesnenin karmaşıklık seviyesini temsil etmektedir. Bir görüntü veya nesnedeki geometrik bilginin yoğunluğunu ölçmek için D analizi, mimari de dahil olmak üzere çeşitli alanlarda benimsenmiştir. D ya da karmaşıklık değerini ölçmek için genellikle kutu sayma yöntemi kullanılmaktadır (Ostwald & Vaughan, 2016). Kutu sayma işlemi tamamlandığında elde edilen D değeri 1 ile 2 arasında değişmektedir. D değerinin 2'ye yakın olması, doku detay seviyesinin oldukça zengin olduğunu; 1'e yaklaşması ise detay zenginliğinin az ve sade olduğunu göstermektedir. Ayrıca, D değeri farklı görsellerin karmaşıklık seviyeleri arasındaki benzerliklerin incelenmesinde de kullanılmaktadır (Ediz ve Çağdaş, 2007; Ostwald ve Vaughan, 2016). Çalışma kapsamında D değeri geliştirilen önerinin tasarlanan durumla benzerlik seviyesini değerlendirmek için kullanılmıştır. Hesaplanan D değerleri arasındaki karşılaştırmalar yüzde olarak ifade edilen aralık kullanılarak oluşturulabilmektedir. Farklı D değerleri arasındaki aralık %2'nin altındaysa "ayırt edilemez" seviyede benzer olarak tanımlanmaktadır (Ostwald ve Vaughan, 2016; Vaughan ve Ostwald, 2022).

Çalışma kapsamında kullanılan kampüs dokularının çizimleri Bursa Uludağ Üniversitesi Yapı İşleri Başkanlığından elde edilen basılı çizimlerden faydalanılarak bilgisayar ortamında AutoCad programı yardımıyla hazırlanmıştır. Görükle

Kampüsü'nde bulunan dokuları temsil eden tüm imajlar, binary (siyah beyaz) formatında hazırlanmıştır. Analiz için oluşturulan görseller, literatürde tanınan standartları dikkate alarak hazırlanmıştır (Ostwald ve Ediz, 2015; Ostwald ve Vaughan, 2016).

3.2. Mekân Dizimi Yöntemi

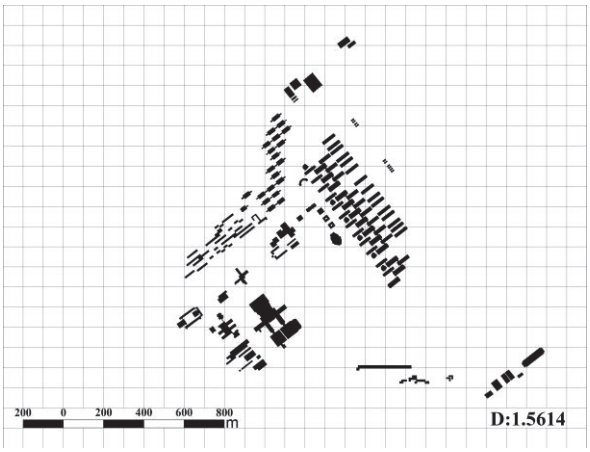
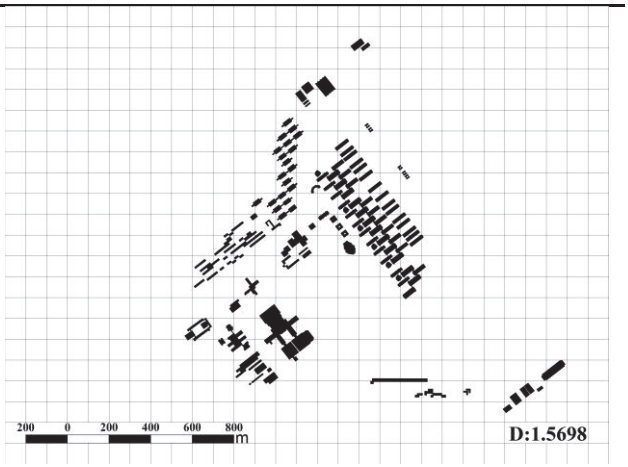
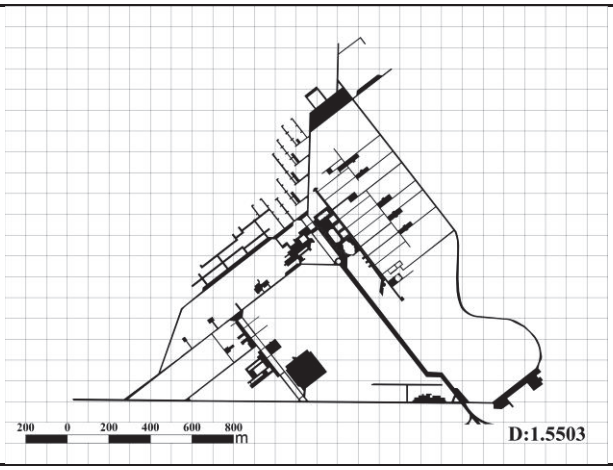
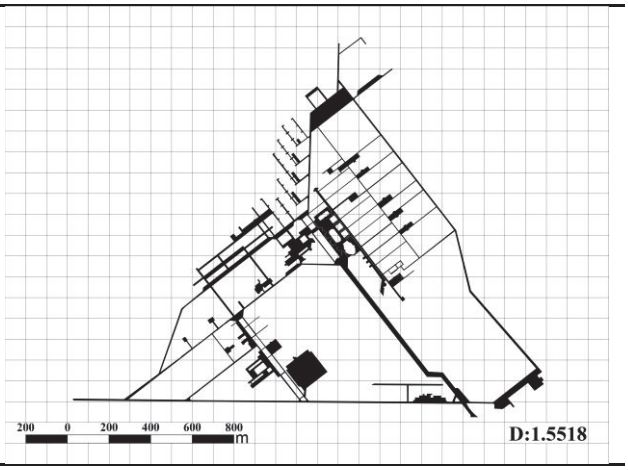
Mekan dizimi yaklaşımına göre bütünü oluşturan parçalarda yaşanan bir değişim bütünün yapısını değiştirmektedir. Mekanların barındırdığı geometrik yapının oluşturduğu düzen sonucu sahip olduğu morfoloji konfigürasyon olarak adlandırılmaktadır. Mekân dizim kuramı, yerleşimlerin konfigürasyonel özelliklerinin kullanıcı hareketleri ve etkileşimleri üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu öne sürmektedir. Mekân dizimi yaklaşımına göre, mekanların sosyal yapıları ile mekânsal konfigürasyonları arasında karşılıklı bir ilişki bulunmaktadır (Hillier, 2007; Hillier ve Hanson, 1984). Eksensel hat haritaları bir konfigürasyonun temsil edilebilmesi için gerçekleştirilmesi gereken ilk görev olarak tanımlanmaktadır (Oliveira, 2013). Eksensel haritalar oluşturmak, yollar, caddeler ve insanların hareket edebileceği boşlukları temsil etmenin bir yoludur. Bu alanlar, en uzun görüş ve hareket hatlarını yansıtan eksensel çizgiler kullanılarak modellenir (van Nes ve Yamu, 2021). Lee, Ostwald ve Zhou (2023) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, kentsel ölçekli mekân dizim araştırmalarının büyük çoğunluğunun eksensel hat analiz tekniğinin entegrasyon değerlerinin temel parametre olarak tercih edildiğini vurgulamaktadır. Global entegrasyon analizi, bir caddenin veya sokağın kentsel sistem içindeki diğer tüm cadde ve sokaklara erişilebilirliğini nicel olarak belirlemek için kullanılan bir yöntemdir (Hillier, 2007). Yüksek global entegrasyon değeri eksen hattının bulunduğu sokağın sistemdeki diğer sokaklarla kurduğu ilişkinin kuvvetli olduğunu başka bir deyişle sokağın erişilebilirlik derecesinin yüksek olduğunu ifade etmektedir. Literatürde, mekân dizimi erişilebilirlik parametreleri ile insan hareketleri arasındaki paralel ilişkiyi ortaya koyan çeşitli çalışmalar bulunmaktadır (Chiu vd., 2020; Colaço ve De Abreu e Silva, 2023; Hillier vd., 1993). Erişilebilirlik derecesi yüksek olan sokaklar yüksek insan hareket akış oranlarına sahip olmaktadır.

Bursa Uludağ Üniversitesi Yapı İşleri Başkanlığından elde edilen basılı çizimlerden faydalanılarak yerleşke planı AutoCad yazılımı yardımıyla oluşturulmuştur. Dxf formatında dışa aktarılan yerleşke planının eksensel hat haritaları DepthmapX yazılımında otomatik olarak oluşturulmuştur. DepthmapX, mekansal yol ve caddes ağlarının analizini gerçekleştirmeye imkân tanıyan açık kaynaklı bir yazılımdır (Varoudis, 2012). Analiz süreci Al_Sayed vd. (2014) tarafından önerilen adımlar izlenerek gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda grafiksel ve sayısal sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen görseller mavi kırmızı renk paletinde dışa aktarılmıştır. Grafiklerde sıcak renkler (kırmızı ve turuncu) yüksek entegrasyon değerlerini, soğuk renkler (mavi ve yeşil) ise düşük entegrasyon değerlerini temsil etmektedir. Görükle Kampüsü'nün Aygen tarafından tasarlanan durumundan elde edilen renk aralık değerleri önerilen durum için manuel olarak atanmıştır. Bu sayede geliştirilen tasarım önerisinin pozitif ve negatif etkileri sayısal değerlere ek olarak renk değerleriyle de gösterilmiştir.

4. Bulgular ve Tartışma

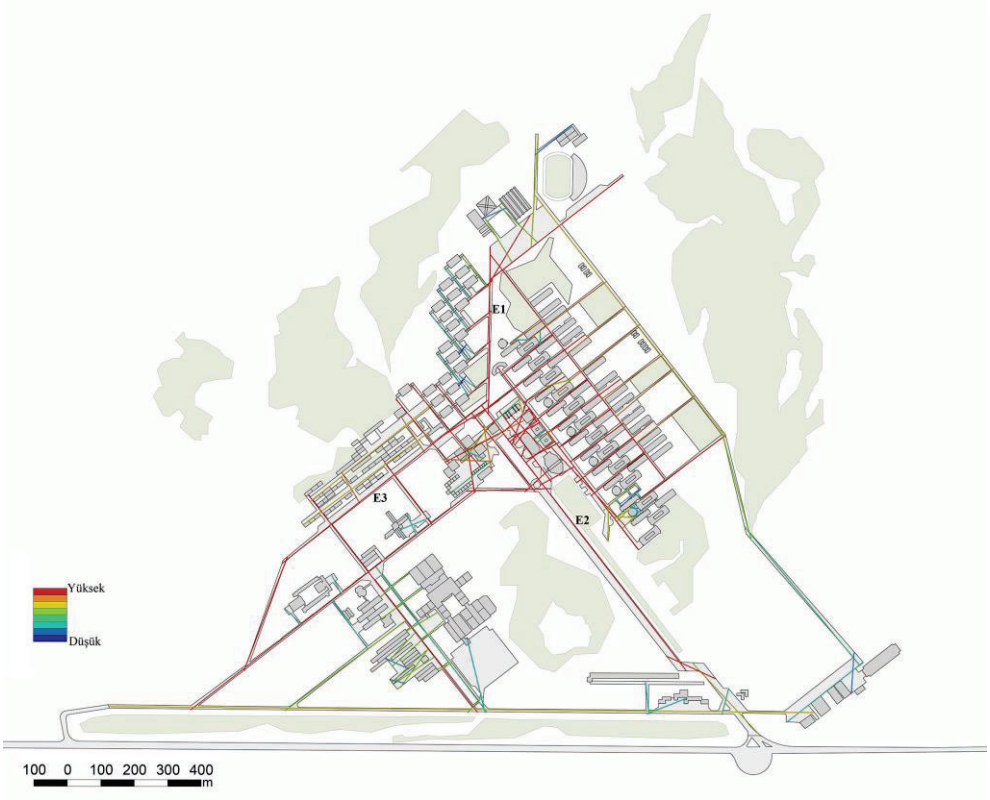
Çalışma kapsamında 1978 yılında Aygen tarafından tasarlanan Görükle Kampüsü yerleşke planına öneriler geliştirilmiş ve geliştirilen öneriler hesaplamalı yöntemlerle test edilmiştir. Bu hedef doğrultusunda yapılan müdahaleler sonucu oluşan dokuların ve tasarlanan dokuların fraktal lekeleri ve D değerleri **Tablo 1**'de gösterilmiştir. Kampüste yer alan yapılardan oluşan mimari dokunun birimleri değiştirilmemesine rağmen yapılan müdaheleler sonucunda D değeri 1.5614'ten 1.5698'e yükselmiştir. Bu durum mimari dokunun karmaşıklık seviyesinin arttığını göstermektedir. Yol dokusunun fraktal boyut değeri yeni eklenen yollar sonucu 1.5503'ten 1.5518'e yükselmiştir. Bu sonuç önerilen müdahalelerin yol dokusunun detay seviyesini az miktarda değiştirdiğini göstermektedir. Elde edilen D değerleri arasındaki farkların %2'nin altında kalması dokuların 'ayırt edilemez' benzerlik seviyesine sahip olduğuna işaret etmektedir. Bu durum çalışma kapsamında geliştirilen tasarım önerisinin Aygen tarafından önerilen yerleşke planının karakterini değiştirmediğine işaret etmektedir.

Tablo 1: Mevcut durum ve önerilen durum dokularının fraktal lekeleri ve fraktal boyut değerleri

	Tasarlanan Durum	Öneri Durum
Mimari Doku		
Yol Dokusu		

Aygen tarafından tasarlanan yerleşke planının entegrasyon haritası **Şekil 3**'te gösterilmiştir. Yüksek entegrasyon değerine sahip hatlar 'E' ile düşük entegrasyon değerine sahip hatlar 'A' ile ifade edilmiştir. Aygen tarafından geliştirilen yerleşke planında 151 adet eksensel hat bulunmaktadır. Ortalama eksensel hat uzunluğu ise 191 metre olarak hesaplanmıştır. **Şekil 4** çalışma kapsamında geliştirilen öneri yerleşke planının entegrasyon haritasını göstermektedir. Öneri yerleşke planında yapılan müdahaleler sonucu eksensel hat sayısı 135'e düşmüştür. Bu durum sistemdeki açısal değişimlerin azaldığına ve yerleşkeyi oluşturan geometrilerin daha düzgün yapıya kavuştuğuna işaret etmektedir. Sistemde yer alan aksların ortalama uzunluğu ise 213 metreye yükselmiştir. Aygen tarafından tasarlanan yerleşke 1.26 olarak ölçülen ortalama entegrasyon değeri öneri planda 1.54'e yükselmiştir. Önerilen müdahaleler sonucunda en yüksek global entegrasyon değeri 2.30'dan 2.65'e yükselmiştir. Aygen tarafından geliştirilen tasarım önerisinde en düşük entegrasyon değerine sahip hatlar yerleşkenin güney-batısında yer alan organik yapılı yolda bulunmaktadır. Önerilen müdahaleler sonucunda en düşük entegrasyon değerine sahip eksensel hatlar yerleşkenin farklı noktalarına dağılmıştır.

Şekil 3: Görükle Kampüsü tasarlanan yerleşke planı entegrasyon haritası



Şekil 4: Görükle Kampüsü öneri yerleşke planı entegrasyon haritası

Geliştirilen müdahaleler sonucu en yüksek entegrasyon değerine sahip olan eksensel hat (bkz. **Şekil 3**) değişmiştir. En yüksek entegrasyon değerine sahip olan eksensel hat sistemin kuzeyinde yer alan; sistemin iskân bölgesi, akademik bölge ve spor merkezi bölgelerini bağlayan hat olmuştur (**Şekil 4**). Entegrasyon değeri 2.30 olarak hesaplanan ve Aygen tarafından tasarlanan yerleşke planında en yüksek entegrasyon değerine sahip olan bu hattın yeni entegrasyon değeri ise 2.61 olarak hesaplanmıştır. İki durumda da en yüksek üçüncü entegrasyon değerine sahip E3 hattının, entegrasyon

değeri ise 1.97'den 2.47'ye yükselmiştir. Sistemin geneline bakıldığında sıcak renk toklarıyla ifade edilen yüksek entegrasyon değerine sahip aksların sayısının arttığı gözlemlenmektedir. Elde edilen sonuçlar öneri durumun karmaşıklık seviyenin Aygen tarafından tasarlanan yerleşke planının karmaşıklık seviyesi ile 'ayırt edilemez' seviyede benzerlik sergilediğini göstermiştir. Buna rağmen sistemin erişilebilirlik seviyesini ve hareket potansiyelini gösteren entegrasyon değerlerinde gözle görülür bir artış gözlemlenmiştir (**Tablo 2**). Bu durum, önerilen senaryoda insan hareket potansiyelinin arttığını göstermektedir. İnsan hareketliliği, rastgele karşılaşmalar sonucunda fikir alışverişi potansiyelini de artırmaktadır.

Tablo 2: Tasarlanan durum ve öneri durum analiz sonuçları

		Tasarlanan Durum	Öneri Durum	Değişim Oranı (%)
Fraktal Boyut Analizi Değerleri	Mimari Doku	1.5614	1.5698	0.84
	Yol Dokusu	1.5503	1.5518	0.15
Eksensel Hat Analiz Değerleri	Eksensel hat sayısı	151	135	-10.5
	Ortalama aks uzunluğu	191	213	11.5
	Ortalama entegrasyon	1.26	1.54	22.2
	En yüksek entegrasyon	2.30	2.65	15.2

5. Sonuçlar

1978 yılında Sezar Aygen ve ekibi tarafından emsal çalışmalardan çıkarımlar yapılarak tasarlanan Görükle Kampüsü'nün erişilebilirlik potansiyelini iyileştirmek amacıyla geliştirilen bu çalışmada, fraktal boyut analizi ve mekân dizimi yöntemleri kullanılarak yeni bir tasarım önerisi sunulmuştur. Günün koşullarında hesaplamalı yöntemlerin yaygın olarak kullanılmaması Aygen tarafından geliştirilen tasarım önerisinin hesaplamalı bir alt yapı olmadan tasarlanmasına sebep olmuştur. Hesaplamalı analiz ve tasarım yöntemlerinden yararlanılarak oluşturulan müdahaleler sonucunda kampüsün karmaşıklık seviyesi korunurken erişilebilirlik seviyesinin arttırılması hedeflenmiştir.

Yapılan analizler ve uygulanan yöntemler sonucunda, kampüs dokusunun mevcut fraktal özellikleri korunurken, kullanıcı hareketliliği için daha etkin bir çerçeve oluşturulmuştur. Önerilen tasarım sayesinde, mekânsal bağlantıların iyileştirilmesiyle erişilebilirlik seviyesinde gözle görülür bir artış sağlanmıştır. Bu durum, kampüsün işlevselliğini güçlendirirken aynı zamanda estetik ve organizasyonel bütünlüğünü de korumuştur. Fraktal boyut değerlerindeki farklarının %2'nin altında kalması ve ortalama entegrasyon değerinin %22 artması bu durumu kanıtlar niteliktedir.
Sonuç olarak, fraktal boyut ve mekân dizim, tekniklerinin kampüs planlamasına entegre edilmesi, benzer ölçekteki yerleşkeler için de uygulanabilir bir yaklaşım sunmaktadır. Gelecekte yapılacak çalışmalarda, bu yöntemlerin farklı bağlamlarda test edilmesi ve kullanıcı deneyimi odaklı detaylandırılması önerilmektedir. Bu çalışma, sürdürülebilir ve erişilebilir kampüs tasarımına yönelik yeni bir perspektif sunarak, akademik yerleşkelerin planlama süreçlerine katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

Teşekkür
Bu çalışma, 'Hesaplamalı Yöntemlerle Yerleşke Morfolojisini Okumak: Bursa Uludağ Üniversitesi Görükle Kampüsü Örneği' isimli tez çalışmasının parçasıdır.

KAYNAKLAR

Al_Sayed, K., Turner, A., Hillier, B., Iida, S., & Penn, A. (2014). *Space syntax methodology* (4th ed.). Bartlett School of Architecture, UCL.

Aygen, S. (1976). *Bursa Üniversitesi kampus planması*. Bursa Uludağ Üniversitesi.

Aygen, S. (1978). Bursa Üniversitesi kampus planlaması. *Mimarlık Dergisi*, *16*, 49–52.

Batty, M., & Longley, P. (1994). *Fractal cities: a geometry of form and function*. Academic Press.

Carmona, M. (2021). Public places urban spaces: The dimensions of urban design. In *Public Places Urban Spaces* (3rd ed.). Routledge.

Chapman, M. P. (2006). *American places: In search of the twenty-first century campus*. Praeger Publishers.

Chiu, Y. H., Chuang, I. T., & Tsai, C. Y. (2020). Analyzing correlation of urban functionality and spatial configuration. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, *48*(5), 1296–1313. https://doi.org/10.1177/2399808320924673

Colaço, R., & de Abreu e Silva, J. (2023). Exploring the role of accessibility in shaping retail location using space syntax measures: A panel-data analysis in Lisbon, 1995–2010. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, *50*(5), 1345–1360. https://doi.org/10.1177/23998083221138570

Conzen, M. R. G. (1960). *Alnwick, Northumberland: A study in town-plan analysis*. Institute of British Geographers.

Coulson, J., Roberts, P., & Taylor, I. (2022). *University trends: Contemporary campus design* (3rd ed.). Routledge.

Dober, R. P. (1996). *Campus planning*. John Wiley & Sons.

Ediz, Ö., & Çağdaş, G. (2007). A computational architectural design model based on fractals. *Open House International*, *32*(2), 36–45. https://doi.org/10.1108/ohi-02-2007-b0005

Erkman, U. (1990). *Büyüme ve gelişme açısından üniversite kampüslerinde planlama ve tasarım sorunları*. İTÜ Mimarlık Fakültesi.

Hajrasouliha, A. (2017). Campus score: Measuring university campus qualities. *Landscape and Urban Planning*, *158*, 166–176. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.10.007

Hajrasouliha, A. (2019). Connecting the dots: Campus form, student perceptions, and academic performance. *Focus*, *15*(1), 38–48.

Hashimshony, R., & Haina, J. (2006). Designing the university of the future. *Planning for Higher Education*, *34*(2), 5–19. https://doi.org/10.1215/9781478022503-005

Hillier, B. (2007). *Space is the machine: A configurational theory of architecture*. Space Syntax.

Hillier, B., & Hanson, J. (1984). *The social logic of space*. Cambridge University Press.

Hillier, B., Penn, A., Hanson, J., Grajewski, T., & Xu, J. (1993). Natural movement: Or, configuration and attraction in urban pedestrian movement. *Environment & Planning B: Planning & Design*, *20*(1), 29–66. https://doi.org/10.1068/b200029

Larkham, P. J. (2000). Institutions and urban form: The example of universities. *Urban Morphology*, *4*(2), 63–77. https://doi.org/10.51347/jum.v4i2.3890

Lee, J. H., Ostwald, M. J., & Zhou, L. (2023). Socio-spatial experience in space syntax research: A PRISMA-Compliant review. *Buildings*, *13*(3), 644. https://doi.org/10.3390/buildings13030644

Maki, F., & Ohtaka, M. (1965). *Some thoughts on collective form*.

Mandelbrot, B. B. (1982). The Fractal Geometry of Nature. In *American Journal of Physics*. W.H. Freeman and Company.

Oliveira, V. (2013). Morpho: A methodology for assessing urban form. *Urban Morphology*, *17*(1), 21–33. https://doi.org/10.51347/jum.v17i1.2885

Ostwald, M. J., & Ediz, Ö. (2015). Measuring form, ornament and materiality in Sinan's Kılıç Ali Paşa Mosque: An analysis using fractal dimensions. *Nexus Network Journal*, *17*(1), 5–22. https://doi.org/10.1007/s00004-014-0219-3

Ostwald, M. J., & Vaughan, J. (2016). *The fractal dimension of architecture*. Springer International Publishing.

Sönmezler, K. (2003). *Modern mimarinin kentsel deney alanı: Üniversite tasarımı*. [Doctoral dissertation, Mimar Sinan Üniversitesi].

Türeyen, M. N. (2003). Yükseköğretim kurumları ve kampuslar. Tasarım Yayın Grubu.

van Nes, A., & Yamu, C. (2021). *Introduction to Space Syntax in Urban Studies*. Springer International Publishing.

Varoudis, T. (2012). DepthmapX Multi-Platform Spatial Network Analysis Software. In *Version 0.30 OpenSource,*. The Bartlett School of Architecture, UCL. http://varoudis.github.io/depthmapX

Vaughan, J., & Ostwald, M. J. (2022). Measuring the geometry of nature and architecture: Comparing the visual properties of Frank Lloyd Wright's Fallingwater and its natural setting. *Open House International*, *47*(1), 51–67. https://doi.org/10.1108/OHI-01-2021-0011

MSTAS 2025 MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Hesaplamalı Tasarım Sürecinde Farklı Dijital Pratiklerin Etkisinin Reflektif Pratik Üzerinden Değerlendirilmesi

Gülce Kırdar
Yeditepe Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü
gulce.kirdar@yeditepe.edu.tr

Özet

Gelişen dijital teknolojilerin mimarlık pratiğine entegrasyonu, mimar ve teknoloji arasında simbiyotik bir ilişki kurmuştur. Bu simbiyotik ilişki aracılığıyla dijital pratikler hesaplamalı tasarım süreçlerini besleyerek dönüştürür. Dijital pratikler tasarım ortamını genişletir, tasarımcılara yaratıcı düşünmeyi destekleyen görme anları ve değerlendirmeler için olanak sağlar. Çalışma hesaplamalı tasarım sürecinin dijital pratiklerle simbiyotik ilişkisini reflektif değerlendirme kavramı üzerinden incelemeyi amaçlar.

Ders kapsamında öğrencilerden farklı hesaplamalı tasarım uygulamalarını kent mobilyası tasarımı üzerinden deneyimlemişlerdir. Bu çalışma, hesaplamalı tasarım sürecini beş dijital uygulama aracılığıyla incelemektedir: parametrik tasarım, çevresel verilerle biçim geliştirme, dijital fabrikasyon, artırılmış gerçeklik ve üretken yapay zekâ. Süreçte, biçimsel kararlar algoritmik olarak tanımlanmış; çevresel performans analizleriyle desteklenmiş; dijital modeller fiziksel prototipler üretilmiş ve AR ile mekânda temsil edilmiştir. Yapay zekâ ise alternatif tasarım fikirlerinin keşfini mümkün kılmıştır. Çalışma kapsamında katılımcı öğrenciler tasarımcı olarak tanımlanmıştır. Tasarımcıların eylem üzerine değerlendirmeleri, içerik analiz aracı Voyant ile analiz edilmiştir. Tasarımcılar, eylem sonrası düşünme ile dijital araçların tasarıma katkısını değerlendirmişlerdir.

Bu çalışma, hesaplamalı tasarım sürecinde kullanılan dijital araçların tasarımcıların reflektif düşünme pratiklerine katkısını incelemektedir. Bulgular, parametrik tasarımın algoritmik düşünmeyi ve iteratif üretimi destekleyerek; yapay zekâ tabanlı platformlarının eleştirel değerlendirmeyi teşvik ederek reflektif değerlendirme sürecine katkı sunmuştur. Dijital fabrikasyon ve artırılmış gerçeklik uygulamalarının tasarım sürecinin değerlendirilmesindeki katkısı ise sınırlı etkileşim düzeyleri nedeniyle daha düşük seviyededir. Sonuç olarak, Hesaplamalı tasarım sürecinde uygulanan dijital pratikler yaratıcı potansiyelleri görmelerini ve tasarımlarını geliştirmelerini (gör-ilerle-gör) farklı seviyelerde destekler. Sonuç olarak, dijital araçların reflektif düşünme süreçlerine etkisinde araçla etkileşim düzeyi ve teknik kısıtlar önemli rol oynamaktadır.

Anahtar kelimeler: *Reflektif Pratik, Eylem Sonrası Düşünme, Dijital Pratikler, Hesaplamalı Tasarım.*

2025 MSTAS MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Evaluating the Impact of Diverse Digital Practices on Reflective Practice in Computational Design Processes

Gülce Kırdar
Yeditepe Üniversitesi, Faculty of Architecture, Department of Architecture
gulce.kirdar@yeditepe.edu.tr

Abstract

The integration of emerging digital technologies into architectural practice has fostered a symbiotic relationship between the designer and technology. Through this relationship, digital practices enrich and reshape computational design processes. Digital practices expand the design environment by enabling moments of seeing and reflection that support creative thinking. This study explores the symbiotic relationship between digital practices and computational design, with a focus on evaluating reflective thinking as evidenced in student reflections on action.

Within the course, students engaged with various computational design applications through the design of urban furniture. This study examines the computational design process through five digital tools: parametric modeling, environmentally-informed form generation, digital fabrication, augmented reality (AR), and generative artificial intelligence (AI). In this process, formal decisions were defined algorithmically, supported by environmental performance analyses, fabricated as physical prototypes via digital fabrication, and represented in spatial context using AR. AI platforms enabled the exploration of alternative design solutions. Participating students were defined as designers, and their reflections were analyzed using the content analysis tool Voyant.

This study investigates the impact of digital practices on reflective practices. Findings show that parametric design supports reflective thinking by enhancing algorithmic reasoning and iterative production. AI-based platforms contributed to reflective evaluation by encouraging critical assessment of outputs. In contrast, digital fabrication and augmented reality had limited impact due to their lower levels of designer engagement. Ultimately, digital practices applied within the computational design process support the designers' creative development and reflective thinking at varying levels, depending on the level of engagement and technical constraints.

Anahtar kelimeler: *Reflective Practice, Reflection On Action, Digital Practices, Computational Design.*

1. Giriş

Tasarımcılar, tasarım sürecinde soyut düşünceyi somutlaştırarak problemleri tanımlar, çözümler üretir ve bunları çeşitli dışsal ve içsel temsiller aracılığıyla biçimlendirir (Visser, 2006). Simon (1969), Schön (1983) ve Goldschmidt (2001) tarafından geliştirilen tasarım sürecinin çözümlenmesine yönelik yaklaşımlar, tasarım sürecinin yaratıcı ve eleştirel yapısını anlamada önemli bir kuramsal çerçeve sunar (Iordanova, 2007).

Schön (1983), tasarımı yalnızca teknik bir süreç olarak değil, tasarımcının kendi eylemleri üzerine düşünerek süreci yönlendirdiği reflektif bir pratik olarak tanımlar. Uygulayıcılar, "eylemde bilme" (knowing in action) durumunda, ya bilinçli öğrenilmiş bilgiyi içselleştirerek ya da örtük bilgiyle doğrudan eyleme geçer. "Eylem içinde düşünme" (reflection-in-action) ve "eylem üzerinde düşünme" (reflection-on-action) durumlarında ise bu örtük ve içselleştirilmiş bilgilerin ötesine geçerek yeni düşünce eylemleri geliştirebilirler. Bu bağlamda, eylem deneyim ve keşif yoluyla düşünmeyi beslerken; düşünme de eylemi yönlendirir ve sınırlarını belirler (Schön, 1983). Schön'e (1992) göre tasarımcı, tasarım sürecinde "görme-çizme-görme" (*see-move-see*) eylemleri aracılığıyla malzemeyle yansıtıcı (*reflektif*) bir diyalog kurar. Bu süreçte, çizim/maket yoluyla fiziksel ya da sanal ortamda belirli bir problem ile işleve yönelik bir "tasarım dünyası" oluşturur. Bu tasarım dünyası, yalnızca biçimsel bir üretim alanı değil, aynı zamanda tasarımcının düşüncelerini temsil yoluyla dışsallaştırdığı ve değerlendirdiği reflektif bir eylem alanı niteliği taşır.

Temsil (*representation*), tasarımcının düşünsel sürecini görünür kılar; tasarım fikri eskiz, çizim, modelleme ya da görselleştirme yoluyla dijital ya da fiziksel ortamda ifade bulur. Pallasmaa'ya (2011) göre temsil, bağlama bağlı olarak bilgi verici, yaratıcı, dönüştürücü ve yeniden üretici işlevler üstlenebilir. Eskiz, tasarım sürecinde mimari düşüncenin dışsallaştırılması ve mimari temsillerin üretken biçimde kullanılması açısından iki yönlü bir görme biçimi sunar (Goldschmidt, 1991); maket ise tasarım bilgisinin somutlaştırılması ve yeniden şekillendirilmesi arasında döngüsel bir ilişki kurar (Glanville, 2012). Temsil, doğrudan nesneyle değil, onun temsili üzerinden denemeler yapmayı, biçimi gözlemleyip dönüştürmeyi mümkün kılar (Gürer, 2004). Bu süreç, hem eylem sırasında hem de eylem sonrasında düşünmeye olanak tanır; yalnızca mevcut fikri doğrulamakla kalmaz, aynı zamanda yaratıcı olasılıkların keşfini de destekler. Ayrıca temsil, tasarım düşüncesinin aktarımında söylemsel bir araç olarak iletişimi ve kolektif değerlendirmeyi güçlendirir (Gürer, 2004).

Dijital teknolojilerin gelişimiyle birlikte temsil süreci giderek dijital ortama taşınmış; çizim, modelleme, simülasyon ve görselleştirme gibi araçlarla çok katmanlı ve etkileşimli bir temsil pratiği ortaya çıkmıştır. Bu dönüşümle birlikte reflektif tasarım süreci de dijital araçlar aracılığıyla sanal ortama aktarılmış; tasarımcılar düşünsel üretim, temsil ve değerlendirme süreçlerini eşzamanlı sürdürebilmektedir. Dijital pratikler bu bağlamda, tasarım ortamını genişleterek yaratıcı düşünmeyi destekleyen görme anları ve değerlendirme fırsatları sunar. Dearden (2006), dijital uygulamaların mimar tasarımcılara "durumun materyalleriyle reflektif bir konuşma" için fırsat tanıdığını ifade ederek dijital uygulamaların reflektif pratikle ilişkisini destekler. Iordanova (2007), parametrik araçların yaratıcı potansiyeli görme ve değerlendirme süreçlerine katkı sağladığını belirtir.

Dijital üretim ve temsil teknolojilerinin mimarlık pratiğine entegrasyonu, tasarımcı ile teknoloji arasında güçlü bir simbiyotik ilişki kurulmasını sağlamıştır. Bu simbiyotik ilişki, dijital pratiklerin hesaplamalı tasarımı besleyerek dönüştürmüştür. Bu bağlamda, hesaplamalı tasarım; çoklu girdilerin yönetilmesini, sürecin sistematik biçimde kurgulanmasını ve buna bağlı olarak biçim keşfi, analiz, üretim ve temsil adımlarının bütüncül şekilde yürütülmesini sağlayan geniş kapsamlı bir metodoloji olarak tanımlanır (Terzidis, 2006). Hesaplamalı tasarım yaklaşımıyla, geometrik, işlevsel ve yapısal özellikler tasarıma entegre edildiği sistematik yaklaşım geliştirilir (Çinici, 2012). Bu doğrultuda dijital pratikler hesaplamalı tasarım sürecinde tasarım ortamını genişletir; yaratıcı düşünmeyi destekleyen görme anları ve değerlendirmeler için tasarımcılara olanaklar sunar. Öte yandan, Simon'a (1969) göre duyusal bütünlük ve mekânsal algı açısından sınırlılıklar da barındırır, tasarımın çok boyutlu gerçekliğini yansıtamamaktadır.

Bu çalışmada, hesaplamalı tasarım sürecinin çok yönlü değerlendirilmesini sağlamak amacıyla süreç, beş temel dijital uygulama aşaması üzerinden yapılandırılmıştır: parametrik tasarım, çevresel performansa dayalı biçim geliştirme, dijital fabrikasyon, artırılmış gerçeklik (AR) ile temsil ve üretken yapay zekâ (YZ) destekli tasarım geliştirme. Ders kapsamında yaklaşımlar, dijital araçlar kullanılarak "yaparak öğrenme" (learning-by-doing) yaklaşımı doğrultusunda deneyimlenmiştir. Parametrik tasarım süreci, biçimsel ilişkilerin algoritmik olarak tanımlanmasını ve sistematik olarak kontrol edilmesini sağlayarak sürecin temelini oluşturmuştur. Bu aşamaya çevresel performansa dayalı tasarımın (örneğin Ladybug eklentisi aracılığıyla) entegre edilmesinin nedeni, biçimsel kararların yalnızca estetik kriterlere değil,

aynı zamanda bağlamsal ve çevresel faktörlere göre değerlendirilmesidir. Dijital fabrikasyon süreci, dijital ortamda geliştirilen tasarımın fiziksel dünyada sınanmasını ve materyalle kurulan diyaloğun gözlemlenmesini sağlamış; artırılmış gerçeklik temsili ise tasarımın gerçek mekânsal bağlamda nasıl algılandığını test etmeye olanak tanımıştır. Son olarak, üretken yapay zekâ tabanlı platformlar, algoritmik tasarıma dair farklı tasarım fikirlerinin oluşmasına imkân vermiştir. Bu çalışmada, hesaplamalı tasarım süreci ile dijital pratikler arasındaki simbiyotik ilişki, Schön'ün (1983) ortaya koyduğu reflektif değerlendirme çerçevesinde incelenmiştir. Tasarımcılar, süreci eylemi sırasında ve sonrasında düşünerek değerlendirmiştir. Dijital uygulamaların çeşitliliği, eylem sırasında "görme" (*seeing-as*) anlarını tetiklediği ve eylem sonrası düşünme sürecini geliştirdiği varsayılmaktadır.

2. Yöntem

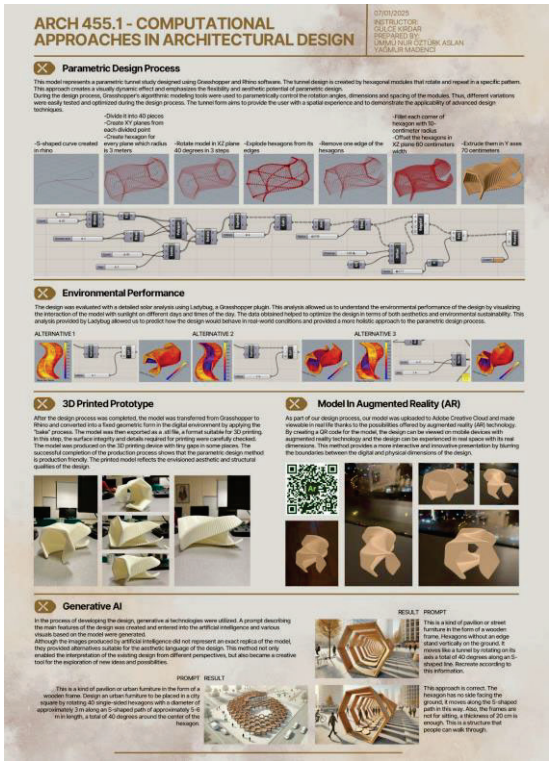
Yürütülen çalışma, öğrencilerin dijital pratiklerle desteklenen hesaplamalı tasarım süreçlerindeki görme ve değerlendirme biçimlerini, uygulama çıktıları ve deneyimlerine dayalı olarak analiz etmeyi amaçlamaktadır. Süreç, lisans ve lisansüstü düzeyde mimarlık öğrencilerinin katıldığı, işbirliğine dayalı uygulama temelli bir ders kapsamında yürütülmüştür. Uygulamaya katılan dokuz mimarlık öğrencisi, dördü ikili, biri bireysel olmak üzere beş grup hâlinde çalışmıştır. Dijital araçları aktif şekilde kullanan katılımcılar "tasarımcı" olarak tanımlanmış; katılımcı gizliliği ve etik koşullar gereğince kodlanmıştır (T1, T2, T3…).

Tasarımcılar, ders kapsamında hesaplamalı tasarım sürecini beş dijital uygulama aracılığıyla deneyimlemiştir: (1) parametrik tasarım, (2) çevresel verilerle ilişkilendirilmiş biçim geliştirme, (3) dijital fabrikasyon ile prototipleme, (4) artırılmış gerçeklik (AR) ile temsil ve (5) üretken yapay zekâ destekli tasarım. Parametrik biçimler algoritmik ilişkilerle tanımlanmış; çevresel koşullar (örneğin güneşlenme) ile ilişkilendirilerek biçim parametreleri Ladybug eklentisi ile değerlendirilmiştir. Dijital modellerin prototipleri 3B baskı ile üretilmiş, ardından artırılmış gerçeklik (AR) kullanılarak fiziksel mekânda temsil edilmiştir. Üretken yapay zekâ (YZ) platformları ise alternatif biçim çözümlerinin araştırılmasında kullanılmıştır. Her bir uygulamaya dair süreçler ve çıktı örnekleri, öğrenci posterlerinde görselleştirilmiştir (**Şekil 1a, Şekil 1b)**.

Veri toplama sürecinde dijital uygulama çıktıları, gözlem ve öğrenci değerlendirme raporları kullanılmıştır. Süreç boyunca tasarımcıların dijital modelleri, AR ve 3B baskı üretimleri ile YZ çıktıları üzerinden gözlemlenmiştir. Bunun yanında, her uygulamanın ardından tasarımcılar uygulama deneyimlerini değerlendirme raporlarıyla paylaşmışlardır. Bu araştırma, öznel deneyimlere dayalı bulgulara ulaşmak amacıyla nitel araştırma yaklaşımını benimsemektedir. Tasarımcıların dijital pratiklere ilişkin reflektif değerlendirmeleri, nitel içerik analizi yöntemiyle çözümlenmiştir. Bu kapsamda, öğrenci değerlendirme metinleri Voyant Tool aracılığıyla analiz edilmiştir. Araç, metinlerdeki terimlerin sıklığını, bağlamsal ilişkilerini ve dağılımını grafiksel olarak sunarak içerik örüntülerini ortaya koymaktadır (Sinclair ve Rockwell, 2016). Voyant Tool, metin verilerinin nicel olarak analiz edilmesine olanak tanıyan, uzak okuma (distant reading) yaklaşımına dayalı web tabanlı bir hesaplamalı metin analiz aracıdır. Kullanılan analiz uygulamaları kelime bulutu (*Cirrus ve Bubblelines*), kelime özet istatistikleri (*Summary*), eğilim analizleri (*Trends*), metin okuyucu (*Reader*), bağlam analizi (*Context*) ve kelime eş dizimidir (*Corpus Collocations*) (Sinclair ve Rockwell, 2016). Nitel içerik analizi uygulamasında kelime bulutu ve trend analizi araçları kullanılmıştır. Kelime bulutu aracı (cirrus) bir metin içeriğinde yer alan en sık kullanılan kelimelerin kelime bulutu olarak temsil ederek içeriğe dair özetleyici bir genel bakış açısı sunar (Sinclair ve Rockwell, 2016). Eğilim analizi (Trends), içerik genelinde göreceli frekansların çizgi grafiğini gösterir (Sinclair ve Rockwell, 2016).

Veri çözümlemesinde Schön'ün (1992) "görme anları" kavramından yola çıkılmıştır. Schön'e (1992) göre görme anları sırasında tasarımcı görsel bilgi kaydetmenin yanı sıra, anlamlandırır. 'Tanımak', 'algılamak', 'keşfetmek' ve 'takdir etmek' gibi eylemler, tasarımcıların eylemleri nasıl gördüğü ve anlamlandırdığına dair bilgi verir (Schön, 1992). Bu eylemler görmenin varyantlarını ifade eder. Benzer şekilde, çalışmada eylem sonrası değerlendirmeyi analiz etmek için kullanılan deneyimlemek, farkına varmak, fırsat sunmak, geliştirmek ve desteklemek eylemleri de birer "değerlendirme varyantı" olarak ele alınmıştır. Her bir dijital uygulama sonrasında tasarımcıların paylaştığı metinlerde bu eylemler, Reader ve Trends araçları aracılığıyla bağlam içinde analiz edilmiş; dijital pratiğin eylem sonrası değerlendirmeye etkisi incelenmiştir. Uygulamalara özgü öne çıkan kavramlar ise Trend Analizi ve Kelime Bulutu araçlarıyla görselleştirilmiş ve bu eylemlerle ilişkili içerik örüntülerini ortaya koymuştur.

Şekil 1a. Grup 1'e ait süreç posteri

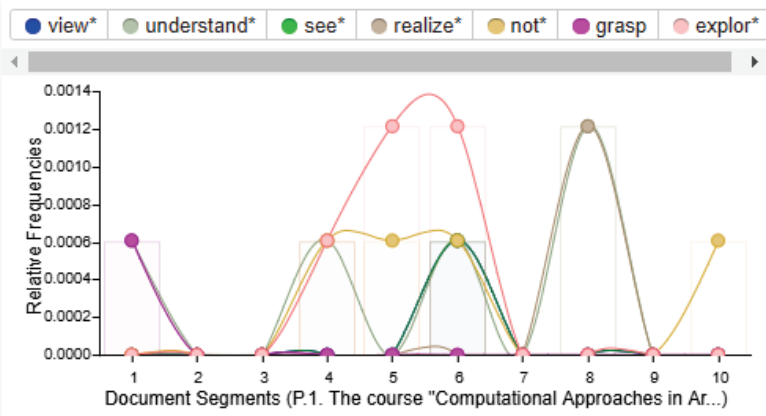


Şekil 1b. Grup 4'e ait süreç posteri

3. Bulgular

Tasarım süreci boyunca edinilen bireysel farkındalıkları ve kavramsal kazanımları değerlendirmek amacıyla, Schön'ün (1992) "görme anları" çerçevesi doğrultusunda bir analiz gerçekleştirilmiştir. Tasarımcıların deneyimlerine yansıyan bu görme eylemleri ('tanımak', 'algılamak', 'keşfetmek', 'takdir etmek'), trend analizi sonuçları üzerinden değerlendirilmiştir. **Şekil 2** trend analizi sonuçlarında bu görme anlarının dağılımını gösterir. Tasarımcıların deneyimlerinde "görme" eyleminin varyantlarından yola çıkarak elde ettikleri kazanımlar aşağıda derlenmiştir:

- Dijital teknolojinin artan rolünü fark ettiler ve mimari pratiğe nasıl entegre olduğunu gördüler (*recognize*).
- Dijital teknolojilerin mimari pratiğe entegrasyonunu kapsamlı bir şekilde anladılar. (*understood*) (T4).
- Grasshopper kullanarak algoritmik mantığı daha iyi kavradılar (*grasp*) (T1).
- Dijital ortamda tasarım sürecini şekillendirmeyi ve 3B baskı ile dijital tasarımı fiziksel ortama aktarmayı keşfettiler (explore) (T5) ve 3B baskının üretim teknolojisindeki potansiyelini keşfettiler (*explore*) (T3).
- Artırılmış gerçekliğin (AR) öğrenmeyi nasıl kolaylaştırdığını ve tasarım sürecini nasıl daha anlaşılır hale getirdiğini fark ettiler (*realize*) (T7).
- Artırılmış ve genişletilmiş gerçeklik teknolojilerini deneyimleyerek fiziksel ve dijital mekanlar arasındaki ilişkiyi yeni bir düzeyde keşfettiler (*explore*) (T5).
- AR teknolojilerine ilgi ve merak geliştirdiklerini fark ettiler (*realize*) (T7).
- Yapay zekanın alternatif bakış açıları sunarak yaratıcılığı destekleyen güçlü bir araç olduğunu fark ettiler (realize) (T7).
- Yürütülen tartışmalarda sınıf arkadaşlarının bakış açılarını görerek, kendi perspektiflerini genişlettiler (view) (T3, T5, T7).
- Uzman araştırmacıların sunumu ile farklı araştırma yaklaşımlarını gördüler (*gain insight*) (T5, T8).



Şekil 2: Görme anlarının dağılımı

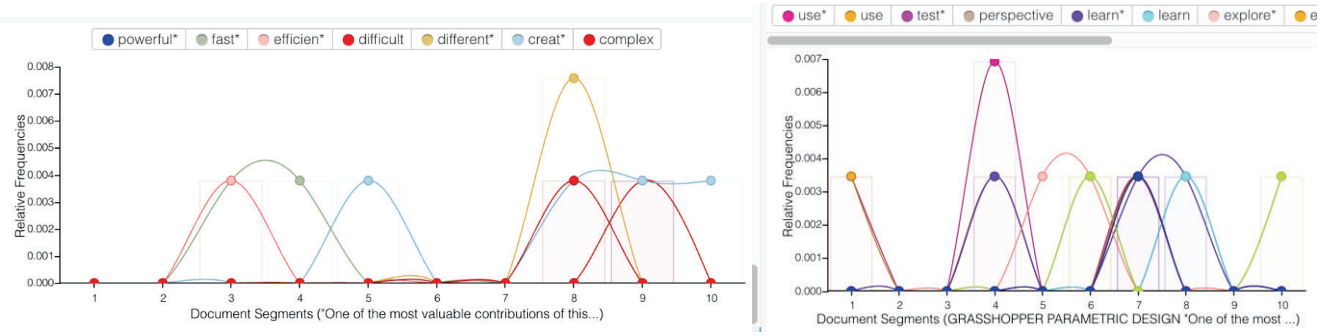
Bu analiz çerçevesinde, dijital araçların tasarım sürecindeki kullanım biçimleri gözlemsel bulgular ve içerik analizine dayalı olarak ele alınmıştır. Çeşitli uygulama süreçlerde ortaya çıkan görme anları ve reflektif düşünme biçimleri ayrıntılı şekilde değerlendirilmiştir. Parametrik tasarım sürecinde, tasarımcılar görsel programlama dili aracılığıyla algoritmik biçim üretmiş, eylem sırasında düşünme (reflection-in-action) yoluyla alternatif çözümler keşfetmiş ve tasarımlarını yeniden şekillendirmiştir. Ladybug eklentisi ile yapılan güneş ışığı analizleri, biçimsel kararların çevresel verilerle birlikte yeniden değerlendirilmiş, bu da süreci daha analitik ve bağlama duyarlı hâle getirmiştir. Trend analizine göre tasarımcılar uygulamanın güçlü, hızlı ve yaratıcı çözüm üretme potansiyeli vurgulanmıştır (**Şekil 2**). Bununla birlikte, parametrik tasarım sürecini algoritmaya dayalı görsel programlama dili kullanımından dolayı karmaşık ve zorlayıcı olarak tanımlanmıştır. Eylem sonrasında değerlendirme sonucunda, tasarımcılar Grasshopper kullanımının, teknik becerileri geliştirmenin yanı sıra algoritmik düşünceyi geliştirdiği, yaratıcı ve verimli süreçler sunduğu ifade edilmiştir (**Tablo 1, Şekil 3**).

Tablo 1: Parametrik tasarım sürecine ilişkin tasarımcıların eylem sonrası değerlendirmesi

Eylem sonrasında düşünme (Reflection on action)
https://voyant-tools.org/?corpus=f7efedb899abc7a33b1e4f5432f3bcde

Eylem (action)	**İfadeler (Statements)**
test* (1) Segment 8	Özellikle parametrik yöntemlerle karmaşık geometriler oluşturmak ve bu süreçte farklı varyasyonları hızlıca test etmek, **tasarım sürecini daha verimli hâle getirdi.** *Especially **creating** complex geometries with parametric methods and **quickly** **testing** different variations in this process made my design process more efficient.*
learn* (3) Segment 4 Segment 7 Segment 8	-Grasshopper gibi araçları kullanmayı **öğrenmek**, hem teknik hem de yaratıcı becerilerimi geliştirmemi sağladı. ***Learning** to use tools such as Grasshopper allowed me to enhance both my technical and creative skills.* -Grasshopper ve Rhino gibi parametrik tasarım araçlarını kullanmayı **öğrenmek**, tasarım sürecine **farklı bir bakış açısı kazandırdı.** ***Learning** to use parametric design tools such as Grasshopper and Rhino gave me a different **perspective** on my design process.* -Grasshopper gibi araçlar, ilk başta **öğrenmesi** zor olsa da, hakim olduğunda yaratıcılık için **güçlü birer yardımcıya dönüşebilir.** *Tools like Grasshopper, though difficult to **learn** at first, can become powerful allies for creativity once mastered.*
grasp* (1) Segment 2	Grasshopper ve Rhino gibi parametrik tasarım araçlarıyla **çalışmak**, **algoritmik mantığı daha kapsamlı biçimde kavramayı** sağladı. ***Working** with parametric design tools such as Grasshopper and Rhino allowed me to **grasp** **algorithmic logic more thoroughly**.*
experience* (2) Segment 6 Segment 10	Grasshopper aracılığıyla bir pavyon tasarlayarak, **tasarım sürecini dijital ortamda nasıl şekillendirebileceğimizi deneyimledik**. *We designed a pavilion through Grasshopper, **experiencing** how to shape the design process in a digital environment.*

İçerikte en sık kullanılan kavramlar: tasarım (10); grasshopper (9); araçlar (7); süreç (5); parametrik (5); kullanım (3); rhino (3); dijital (3); ders (3); olanak sağlamak (3);
Most frequent words in the corpus: *design (10); grasshopper (9); tools (7); process (5); parametric (5); use (3); rhino (3); digital (3); course (3); allowed (3);*



Şekil 3: Parametrik tasarım eğilimleri ve eylem sonrası düşünme dağılımı.

Tasarımcılar, dijital modellerini 3B baskı yoluyla fiziksel ortama aktararak materyalle doğrudan etkileşim kurmuş ve üretim sürecinde verimli biçimsel çözümler geliştirmiştir (Schön, 1982). Üretim kısıtlarına bağlı olarak eleman kalınlıkları, birleşim detayları ve mesafeler revize edilmiştir. Voyant kavram ağı analizine göre, dijital fabrikasyon süreci kişiselleştirilmiş üretimi, üretimi kolaylaştırma stratejilerini ve dijital-fiziksel etkileşim potansiyelini ortaya koymuştur. Üretim, bağlantı, kişiselleştirme ve yenilik kavramları ön plana çıkar. Değerlendirmeler genellikle 3B baskı aracının özellikleri ile ilişkilidir ve doğrudan süreç içindeki eylemleri kapsamaz. Bu durumun nedeni, tasarımcının üretim sürecinde—dosya hazırlığından üretim aşamasına kadar—yeterince aktif rol almamasıdır.

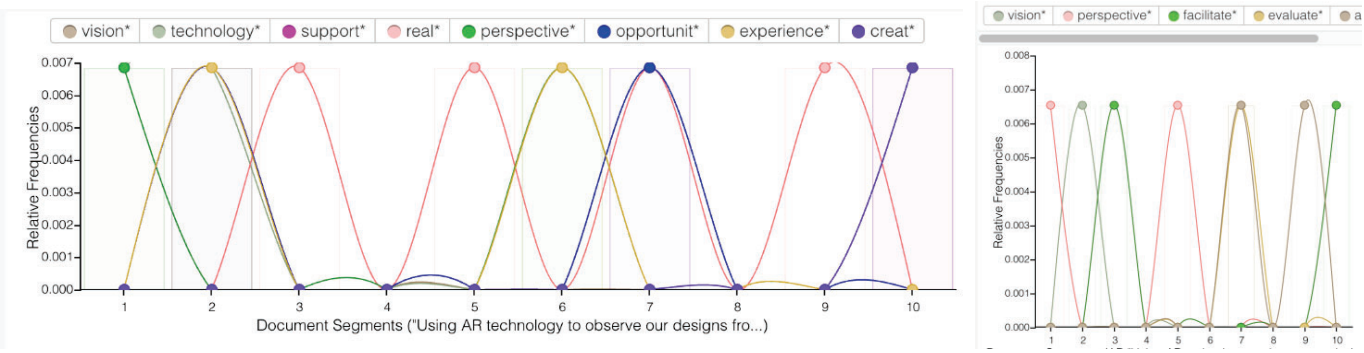
Fabrikasyon sürecinin ardından, dijital modeller artırılmış gerçeklik (AR) uygulaması olan Adobe Aero ile fiziksel mekânda temsil edilmiştir. AR ortamı, tasarımcılara modelleri farklı ölçeklerde mekânsal olarak değerlendirme ve kullanım senaryoları üzerine düşünme fırsatı sunmuştur. AR temsili, eylem sonrası düşünme sürecinde "deneyim" ve "gerçeklik" kavramlarını öne çıkarmış; öğrenmeyi kolaylaştıran, analitik düşünmeyi teşvik eden ve alternatif bakış açıları kazandıran bir araç olarak tanımlanmıştır. Tasarımcı ifadeleri, AR'nin yalnızca görsel destek sunan bir araç olmanın ötesine geçerek, tasarımcıların 3B algı geliştirmelerine ve daha bilinçli tasarım kararları almalarına katkı sağladığını göstermektedir (**Tablo 2, Şekil 4**).

Tablo 2: AR ile temsil sürecine ilişkin tasarımcıların eylem sonrası değerlendirmesi

AR ile Temsil Eylem sonrasında düşünme (Reflection on action)
https://voyant-tools.org/?corpus=400a2372b28c66bd192ccd463d773776

Eylem (action)	**İfadeler (Statements)**
perspective* (2) 0.065359 Segment 1 Segment 5	-Artırılmış gerçeklik (AR) teknolojisini kullanarak tasarımlarımızı mobil cihazlarımız üzerinden **farklı açılardan gözlemlemek**, bana tamamen **yeni bir bakış açısı kazandırdı**. *-Using AR technology to observe our designs from different perspectives through our mobile devices gave me an entirely new vision.* -Aynı zamanda artırılmış gerçeklik (AR), t**asarımları daha gerçekçi bir biçimde hayata geçirerek** hem **tasarımcılar** hem de **kullanıcılar** için **yeni bakış açıları** sunmaktadır. *At the same time, AR brings designs to life in a more realistic way, offering fresh perspectives for both designers and users alike.*
facilitate* (2) 0.065359 Segment 3 Segment 9	**-Öğrenmeyi kolaylaştıran ve tasarım sürecini daha anlaşılır hâle getiren** AR yapısı, bu alanın önemini kavramama yardımcı oldu. *-The structure of AR, which facilitates learning and makes the design process more understandable, helped me understand the importance of this field.* AR, **sarmalayıcı (immersive) görselleştirme ve işbirliğini** kolaylaştırır. *AR facilitates **immersive visualization** and **collaboration**.*
allow* (2) 0.065359 Segment 7 Segment 9	-ARH455 dersinde Grasshopper ve artırılmış gerçeklik (AR) platformları gibi araçlarla çalışmak, s**orunlara analitik bir yaklaşımla çözüm bulmamı sağladı.** *Working with tools such as Grasshopper and augmented reality (AR) platforms in the ARH455 course I took allowed me to find solutions to problems with an analytical approach.* -Özellikle dersteki AR deneyimim, **projelerimi gerçek dünya bağlamında değerlendirme fırsatı sundu** ve tasarım kararlarımda daha **bilinçli adımlar atmamı sağladı.** *In particular, my AR experience in the course provided me with the opportunity to evaluate my projects in the real-world context, allowing me to take more conscious steps in my design decisions.*

İçerikte en sık kullanılan kavramlar: *ar (8); teknoloji (3); tasarım (3); gerçek (2); bakış açısı (2)*
Most frequent words in the corpus: *ar (8); technology (3); design (3); real (2); perspectives (2)*



Şekil 4: AR uygulaması eğilimleri ve eylem sonrası düşünme dağılımı

Bunun yanında, artırılmış modellerin tasarımın temsilindeki iletişimci rolü de test edilmiştir. Tasarımcılar, artırılmış gerçeklik (AR) modelleri aracılığıyla tasarımlarını mimar olmayan katılımcılara sunmuş, kullanım kararlarına yönelik geri bildirim almışlardır. Katılımcılar, AR ortamında modelle döndürme, yakınlaşma ve ölçekleme gibi etkileşimlerde bulunarak üç boyutlu düşünme deneyimi kazanmış; ancak küçük ölçekli prototipler nedeniyle tasarımları kamusal donatı olarak değil, biçimsel nesneler olarak algılamışlardır. Bu durum, kullanım pratiklerini ve mekânsal işlevleri kavramalarını sınırlamıştır. Gözlemler, artırılmış modellerin üç boyut algısını geliştirdiğini, ancak gerçek ölçek ve bağlamsal verilerin eksikliğinin mekânsal deneyimi sınırladığını ortaya koymuştur. Tasarımların daha anlaşılır temsil edilebilmesi için bağlam ve ölçeğe dair bilgilerin dijital modellemeye entegre edilmesi gerekmektedir.

Tasarımcılar, algoritmik biçim geliştirme süreçlerini yapay zekâ (YZ) platformlarına dijital modeller, çizimler ve komutlar (prompt) aracılığıyla aktarmış; farklı türde üretken YZ araçlarını deneyimlemişlerdir. Kullanılan platformlar arasında komut tabanlı, eskize dayalı ve 3B görselleştirmeye yönelik difüzyon modelleri yer almıştır. Eskize dayalı platformlarda işlevsel bağlamdan kopuk, 3B render tabanlı platformlarda ise sınırlı alternatifler elde edilmiştir. Komut tabanlı YZ platformları bazı gruplarda fikir üretimini desteklemiştir: Örneğin, Grup 2 yeni eleman eklemeyi, Grup 3 ise biçimsel değişiklik yapmayı tercih etmiştir. Bununla birlikte, sürecin iteratif olmaması, girilen komutların sınırlı takibi ve platformların "kapalı kutu" (*black box*) yapısı, birlikte tasarımı sınırlı kılmıştır.

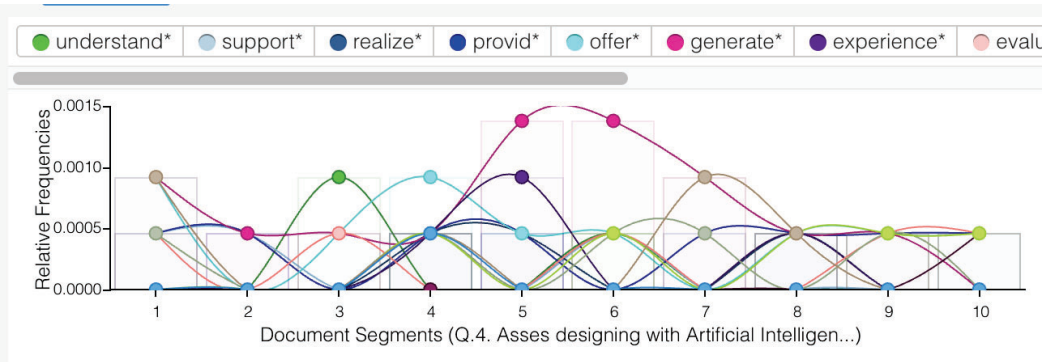
Gözlemsel bulgulara ek olarak, tasarımcı yorumlarına dayanan içerik analizi, üretken YZ kullanımına ilişkin eğilimleri ortaya koymuştur. Voyant analizine göre, "yaratıcılık ve yaratma" (55), "işbirliği" (16), "fırsat" (6), "fikirler"(12), "etik" (16) ve "orijinallik"(12) kavramları öne çıkmıştır (**Şekil 5**). Tasarımcılar yapay zekânın işbirlikçi bir araç olarak çeşitli tasarım alternatifleri sunma ve erken tasarım sürecindeki keşif sürecini destekleme potansiyelini öne çıkarmıştır. Bununla birlikte özgünlük, etik sorumluluklar ve tasarım sahipliği konularında eleştirel değerlendirmeler yapmışlardır. Eylem sonrası değerlendirmelere göre, özellikle deneyimlemek ve farkına varmak eylemleri, tasarımcıların yapay zekâ uygulamasındaki kişisel ve deneyim temelli içgörüleri yansıtması; fırsat sunmak eylemi sürecin potansiyel katkılarını ortaya koyması nedeniyle önceliklendirilmiştir. Tasarımcılar eleştirel düşünerek tasarım kararların ve komutla üretilen çıktı arasındaki ilişkiyi sorgulamışlardır. YZ'nin sunduğu farklı biçimsel öneriler, tasarımcılara fikirlerini test etme, alternatif yönler keşfetme ve kendi yaratıcı kararlarını yeniden gözden geçirme fırsatı sunmuştur. Tasarımcılar, tasarım sürecindeki kararlarını ifade etme, YZ üretimli görsel çıktılar üzerine düşünme ve üretilen alternatifleri eleştirel biçimde değerlendirme yoluyla süreç sonrasında düşünsel farkındalık geliştirmiştir. Bu durum, eylem sonrasında düşünmeye (reflection-on-action) dair önemli bir değerlendirme örneği sunmaktadır (**Şekil 5, Tablo 3**).

Tablo 3: YZ platformlar ile birlikte tasarım sürecine ilişkin tasarımcıların eylem sonrası değerlendirmesi

Eylem sonrasında düşünme (Reflection on action)
https://voyant-tools.org/?corpus=b310a6fa22dc2cfc66a6466576254f25

Eylem (action)	İfadeler (Statements)
experience*(5) 0.0009187 Segment 4 Segment 5 Segment 8	Deneyimlerime göre, YZ beklenmedik kombinasyonlar önererek yaratıcılığın sınırlarını zorlayabiliyor; ancak sürecin yönlendirilmesi için hâlâ insan katkısına ihtiyaç duyuyor. *From my experience, I've found that AI can push the boundaries of creativity by suggesting unexpected combinations, but it still requires human input to guide the process.* Deneyimlerime dayanarak, üretken YZ araçlarının tasarımcılarla son derece etkili bir işbirliği sunduğunu söyleyebilirim. *Based on my experience, generative AI tools offer highly effective collaboration with designers.* Kendi deneyimime göre, YZ'nin tasarım sürecine olan katkısını gözlemleme fırsatım oldu. *From my own experience, I have had the opportunity to observe the contribution of AI in the design process.* -Midjourney gibi YZ araçlarını ilk kullanmaya başladığımda, bunun pasif bir deneyim olacağını, sadece bir komut girip makinenin tasarımı oluşturacağını düşünmüştüm. *When I first started using AI tools like Midjourney, I assumed it would be a passive experience, where I simply input a prompt and the machine would generate the design.*
provide* (8) opportunity perspectives 0.0009187 Segment 1 Segment 2 Segment 4 Segment 5 Segment 7 Segment 8	-YZ araçlarının özgünlük ve yaratıcılık açısından sunduğu fırsatlar hem umut verici hem de tartışmalıdır. *The opportunities AI tools provide in terms of originality and creativity are both promising and contentious.* -YZ, tasarımcıların fikirlerini somutlaştırma fırsatı sunar; ancak tasarıma özgünlük ve derinlik kazandıran asıl unsur insan dokunuşudur. *AI provides opportunities to materialize designers' ideas,the human touch remains the key element that gives a design its uniqueness and depth.* -YZ, tasarımcıların fikirlerini hızla şekillendirebilir ve yeni bakış açıları sunarak yaratıcı süreçte onlara yardımcı olabilir. *AI can quickly shape designers' ideas and provide new perspectives, helping them in the creative process.* -YZ tabanlı çok modlu difüzyon modelleri, tasarım süreçlerini hızlandırma, çeşitlendirme ve dönüştürme açısından önemli fırsatlar sunar. *AI-based multimodal diffusion models provides significant opportunities for accelerating, diversifying, and transforming design processes.*
realize* (4) 0.0009187 Segment 3 Segment 4 Segment 5 Segment 8	-Ancak kısa sürede bunun YZ ile benim aramda bir tür diyalog olduğunu fark ettim. *But I quickly realized that it's more like a conversation between me and the AI.* -Ancak zamanla bu araçların yaratıcılığı sadece sınırlamadığını, aynı zamanda yeni fikirler ve yönler sunarak onu genişletildiğini fark ettim. *However, over time, I realized that these tools don't just restrict creativity—they can actually expand it by offering new ideas and directions.*

İçerikte en sık kullanılan kavramlar: *yapay zekâ (74); tasarım (44); araçlar (34); süreç (31); tasarımcılar (28); yaratıcılık (27); yaratıcı (17); insan (14); etik (13); zekâ (11); fikirler (11); süreçler (10); yapay (10); modeller (9); üretilmiş (9); yeni (8); işbirliği (8).*
Most frequent words in the corpus: *ai (74); design (44); tools (34); process (31); designers (28); creativity (27); creative (17); human (14); ethical (13); intelligence (11); ideas (11); processes (10); artificial (10); models (9); generated (9); new (8); collaboration (8);*



Şekil 5: YZ ile tasarım sürecinde eylem sonrasında düşünme trend dağılımı

Tüm tasarım süreçleri değerlendirildiğinde, dijital araçların ve teknolojilerin yalnızca temsil, üretim ve analiz aracı değil, aynı zamanda tasarımcıların reflektif düşünme ve karar alma süreçlerini yönlendiren etkileşimli bileşenler olarak işlev görmüştür. Gerek çevresel veriye dayalı biçim düzenlemeleri, gerek üretim kısıtlarına göre yapılan tasarım revizyonları, gerekse AR ve YZ platformları ile sürdürülen deneyimler, tasarımcıların düşünme, görme, değerlendirme ve

dönüştürme döngülerini çok boyutlu bir biçimde deneyimlemelerine olanak tanımıştır. Görme anlarının incelenmesi sonucunda, dijital tasarım süreci boyunca edinilen deneyimler, tasarımcıların yalnızca araçlara değil, aynı zamanda kendi tasarım düşüncelerine yönelik farkındalık geliştirdiğini göstermektedir. Görme eyleminin farklı biçimleri üzerinden şekillenen bu farkındalıklar, reflektif düşünme kapasitesini besleyerek hem bireysel öğrenmeyi hem de yaratıcı üretimi desteklemiştir.

Çalışmada yer alan dijital uygulamalar, tasarımcıların eylem sonrasındaki düşünsel değerlendirme süreçlerine farklı düzeylerde katkı sunmuştur. Parametrik tasarım süreci, özellikle algoritmik düşünme becerisinin gelişmesini ve verimli biçimsel üretim deneyimlerini destekleyerek eylem sırasında ve sonrasında düşünmeyi sürekli olarak desteklemiştir. Bunda parametrik tasarımın iteratif olmasının rolü de bulunmaktadır. Dijital fabrikasyon, daha çok aracın olanaklarıyla sınırlı kalmış, süreçte kısıtlı aktif katılımı nedeniyle düşünsel katkı daha zayıf gözlemlenmiştir. Buna karşın, artırılmış gerçeklik (AR), yalnızca temsil aracı olarak değil, tasarımcıların 3 boyutlu algısal farkındalıklarını artıran ve buna göre daha bilinçli mekansal tasarım kararları almalarını sağlamıştır. YZ platformları ise tasarımcıların üretilen çıktılarla kendi kararları arasındaki ilişkiyi değerlendirebildiği, çıktı üzerinden eleştirel düşünmeyi tetikleyen güçlü bir reflektif araç olarak öne çıkmıştır. Değerlendirme tablolarında yer alan ifadeler, kullanılan eylem türlerinin çeşitliliği ve ifadenin kapsamına göre analiz edilmiş; bu doğrultuda her dijital pratiğin sürece sağladığı aktif katılım düzeyi ve eylem sonrasında düşünmeyi destekleme potansiyeli değerlendirilmiştir. Katılımın tasarlayarak ya da değerlendirerek yüksek seviyede olduğu parametrik tasarım ve YZ ile birlikte tasarım aşamalarında, eylem sonrası değerlendirme de yüksektir. Araca bağlı olarak nitelendirilebilecek AR ile temsil ve dijital fabrikasyon ile üretim sürecinde katılım deneyimleri ile birlikte eylem sonrası değerlendirmeye katkısı da görece düşüktür.

4. Sonuçlar

Çalışma bulguları, dijital pratiklerin — özellikle parametrik modelleme, 3B baskı, artırılmış gerçeklik (AR) ve yapay zekâ (YZ) tabanlı araçların — hesaplamalı tasarım sürecindeki reflektif düşünmeyi farklı düzeylerde desteklediğini ortaya koymuştur. Parametrik tasarım, eşzamanlı değişken kontrolü sayesinde *eylem sırasında düşünme*yi en güçlü şekilde destekleyen uygulama olarak öne çıkmıştır. AR uygulamaları 3B görsel temsilin etkisini güçlendirmiş ancak sınırlı mekânsal bütünlük sunduğundan tasarım geliştirme sürecine olan katkısı sınırlı kalmıştır. YZ destekli platformlar, fikir üretimini teşvik etmiş ancak algoritmik yapının kapalı doğası tasarımcının yaratıcı kontrolünü sınırlandırmıştır. Dijital fabrikasyon biçimsel kararların fiziksel bağlamda test edilmesine olanak tanımıştır. Materyal ile diyalogu kurulması eylem sonrası değerlendirmeyi geliştirmiştir; ancak, üretimin araca bağlılığı ve teknik kısıtları eylem sırasında değerlendirmeyi kısıtlamıştır. Genel olarak, dijital araçların reflektif pratikleri destekleme düzeyi, tasarımcının araçla kurduğu etkileşimin niteliğine, teknik sınırlara ve sürecin yenilenmesine bağlı olarak değişmektedir.

Hesaplamalı tasarım sürecinde uygulanan dijital pratikler, Schön'ün (1992) tasarım asistanı için önerdiği görme-çizim-görme kapasitesini geliştirme; tasarım dünyaları oluşturma ve tasarım bilgisini keşfetme yönündeki kuramsal çerçeveyi desteklemektedir. Bu doğrultuda, farklı dijital araçların belirli tasarım durumlarıyla daha etkin etkileşim kurabileceği entegre tasarım ortamlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Dijital araçlar eylem sonrası düşünmeyi desteklese de, eylem içinde düşünme ve görsel temsil sürecine daha fazla odaklanılması gerekmektedir. Schön'ün (1992) tanımladığı gör-ilerle-gör sürecinde tasarımcılar potansiyelleri görmüş olsalar da ilerleme süreçleri araçlarla girdikleri etkileşim derecesine ve araçların teknik kısıtlarına bağlı kalmıştır. Örneğin, YZ platformlarının kapalı kutu yapısı ve sınırlı etkileşim olanağı, YZ ile birlikte tasarımı kısıtlamıştır. Benzer şekilde, AR araçlarında görselle kurulan etkileşimin ortam ile sınırlı olması ve dijital kısıtlar, tasarımın bu ortamda doğrudan geliştirilmesini zorlaştırmıştır. Buna rağmen, AR uygulamaları bilgi görselleştirme, üç boyutlu düşünme ve işbirlikçi temsiller açısından önemli potansiyele sahiptir. Temsilin mekânsal deneyim açısından sınırlı bir algısal bütünlük (immersiveness) sunduğu, ancak görsel bilgilendirme açısından işlevsel bulunduğu gözlemlenmiştir.

Parametrik modelleme, eş zamanlı parametre güncellemeleri sayesinde gör–ilerle–gör sürecini en güçlü şekilde destekleyen araç olarak öne çıkmıştır. Ancak bu aracın yüksek öğrenme eğrisi, görsel programlama dili ve algoritmik okuryazarlık gerekliliğinden dolayı, tasarım süreci zorlaştırıcı bulunmuştur. Dijital fabrikasyon ise, dijital modellerin fiziksel prototiplere dönüşmesini sağlayarak bu reflektif süreci somutlaştırmıştır. Ancak üretim kısıtlarına bağlı olarak tasarım biçimlerinin revize edilmesi gerekmiştir. Ayrıca üretim süreci araç ile gerçekleştiğinden tasarımcı eylem içerisinde eylemde bulunamamıştır. Genel olarak, dijital yöntem ve araçların teknik güçlüklerine ve kısıtlarının tasarım eylemlerini teknik bilgiye bağlı hale getirdiği tartışılmıştır.

Simon'un (1969) bilgisayar teknolojilerinin algısal sınırlılığına dair tespiti günümüzde de geçerliliğini korumaktadır. Tartışma kapsamında tasarımcılar, sezgisel düşüncenin eskizle doğrudan aktarılabildiğini; ancak parametrik üretimde algoritmik yapının bu süreci sınırladığını belirtmiştir. Bu nedenle, tasarıma eskizle başlanıp dijital araçlarla geliştirilmesi önerilmiştir. Dijital fabrikasyon ise çeşitlilik sunsa da, malzeme ve yöntem kısıtları tektoniği sınırlayarak sezgisel kararları etkileyebilmektedir. Tartışmada ayrıca, dijital ekosistemin mimarlık alanına entegrasyonundaki potansiyel ve kısıtlar ele alınmıştır. Dijital araçlar, tasarımcılara farklı bakış açıları sunarak teknoloji destekli yaratıcılığı teşvik etmekte; ancak teknik uzmanlık gerekliliği ve erişim sorunları bu entegrasyonu zorlaştırmaktadır. Tartışma sonuçları, dijitalleşmenin mimarın rolünü dönüştürdüğünü; disiplinler arası işbirliği, araç ve yöntemlerde uzmanlaşma ihtiyacını artırırken, tasarım süreçlerinin sistemleşmesiyle birlikte standardizasyon riskini de beraberinde getirdiğini göstermektedir.

Çalışmanın sonuçlarına göre, tasarımcıların teknik becerilerinde anlamlı bir gelişim gözlemlenmiştir. Katılımcılar, parametrik tasarım araçlarının algoritmik mantığı kavrama, karmaşık geometriler oluşturma ve varyasyonları hızlıca test etme gibi açılardan süreci verimli kıldığını belirtmiştir (T1, T4, T7). Bu araçların, yalnızca teknik becerileri değil, aynı zamanda yaratıcı potansiyeli de geliştirdiği; estetik ve işlevsellik arasında denge kurmayı kolaylaştırdığı ifade edilmiştir (T4, T8). Bazı katılımcılar, Grasshopper ve artırılmış gerçeklik (AR) gibi araçların, teknoloji destekli yaratıcılığı teşvik ettiğini ve sürece analitik bir boyut kazandırdığını vurgulamıştır (T5, T8).

Çalışmanın başlıca kısıtı belirli sayıda öğrencinin katılımıyla sınırlı bir örneklem grubu ile gerçekleştirilmesidir. Yürütülen çalışmada, tasarım pedagojisinde dijital pratiklerin yaratıcı düşünmeyi destekleyen eylem sonrasında düşünme sürecindeki etkilerini değerlendiren veriler sunulmuştur. İlerleyen aşamalarında dijital uygulamalar sırasında tasarımcıların sesli düşünme (*thinking loud*) yöntemi ile eylem sırasında zihinsel süreçleri eylem ile eşzamanlı analiz edilebilir, böylece görme anları eylem sırasında doğrudan gözlemlenebilir. Bu çalışma, dijital tasarım araçlarının reflektif düşünme biçimlerini farklı düzeylerde nasıl desteklediğini ortaya koyarak, hesaplamalı tasarım pedagojisinde araç-temelli bilişsel süreçlerin analizine özgün bir katkı sunmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma, Yeditepe Üniversitesi Mimarlık Bölümü'nde yürütülen "ARCH 555- Computational Approaches in Architectural Design" dersi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Ders kapsamında yürütülen bu süreçte çalışmaya katkı sunan tüm öğrencilere, özverili destekleri ve değerli katkıları için teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Çinici, Ş. (2012). *Computation: Çevirisi ve anlaması kolay olmayan dil, düşünce ve mimarlık*. Dosya (29), 12-19. TMMOB Ankara Mimarlar Odası Şubesi http://www.mimarlarodasiankara.org/dosya/dosya29.pdf

Dearden, A. (2006). Designing as a conversation with digital materials. *Design Studies*, *27*(3), 399–421. https://doi.org/10.1016/j.destud.2005.11.004

Glanville, R. (2012). Intention and the user. In P. Ayres (Ed.), *Persistent modelling: Extending the role of architectural representation* (pp. 41–50). Routledge. https://doi.org/10.4324/9780203782545

Goldschmidt, G. (1991). The dialectics of sketching. *Creativity Research Journal, 4*(2), 123–143. https://doi.org/10.1080/10400419109534381

Goldschmidt, G. (2001). Visual analogy - A strategy for design reasoning and learning. In C. Eastman, M.McCracken and W. Newstetter (Eds.), *Design knowing and learning: Cognition in design education*. Elsevier (pp. 199–219). https://doi.org/10.1016/B978-008043868-9/50009-7

Gürer, T. K. (2004). *Bir paradigma olarak mimari temsilin incelenmesi* [Yüksek Lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. Yök Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=biL2P3cCsPgUNjVdV2BsGJqoDmHKlYd0rDaMjuNjd539WoIySWjssBbM6ycBCwvb

Iordanova I. (2007). Teaching Digital Design Exploration: Form Follows…. *International Journal of Architectural Computing 5*(4), 685-702. https://doi.org/10.1260/147807707783600807

Pallasmaa, J. (2011). *The embodied image: Imagination and imagery in architecture*. Wiley.

Schön, D.A. (1983). *The reflective practitioner: How professionals think in action*. Basic Books.

Schön, D. A. (1992). Designing as reflective conversation with the materials of a design situation. *Knowledge-Based Systems, 5*(1), 3-14. https://doi.org/10.1016/0950-7051(92)90020-G.

Simon, H. A. (1969). *The sciences of the artificial* (1st ed.). MIT Press.

Sinclair, S. & G. Rockwell. (2021). *Voyant tools*. https://voyant-tools.org
Terzidis, K. (2006). *Algorithmic architecture*. Elsevier (ss. 1-16). https://doi.org/10.4324/9780080461298
Visser, W. (2006). *The cognitive artifacts of designing* (1st ed.). Routledge.

MSTAS 2025 MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Yaratıcılık ve Algoritma Arasında: Mimarlık Pratiğinde Dijital Simbiyozun Rol Dönüşümü

Zehra Kezer[1]; Havva Alkan Bala[2]
[1,2]Çukurova Üniversitesi
[1]zehrakzr3@gmail.com; [2]hbala@cu.edu.tr

Özet

Simbiyotik ilişki, doğadaki organizmalar arasında olduğu gibi, günümüzde mimar ile dijital teknolojiler arasında da karşılıklı bağımlılık ve evrimsel bir işbirliğini tanımlar. Bu çalışma, dijital dönüşümün mimarlık pratiğine entegrasyon sürecinde ortaya çıkan simbiyotik ilişkinin, sistem teorisi ve etkileşimsel tasarım yaklaşımları çerçevesinde nasıl kavramsallaştırıldığını ve deneysel olarak değerlendirilebileceğini irdelemektedir. Geleneksel mimari üretim süreçlerinden farklı olarak, günümüz dijital tasarım ortamında yapay zeka, hesaplamalı tasarım ve veri odaklı teknolojiler, yalnızca araçsal işlevler üstlenmekle kalmayıp; mimar ile teknoloji arasında simbiyotik bir işbirliği oluşturarak, mimarın rolünü yaratıcı süreçlerin eş zamanlı yöneticisi ve dijital ortamların aktif bir tasarım ortağı haline getirmektedir. Araştırmanın temel soruları; (i) dijital teknolojilerin entegre kullanımıyla mimari yaratım sürecine nasıl katkı sağlandığı, (ii) bu etkileşimin geleneksel tasarım yöntemleriyle nasıl karşılaştırıldığı ve (iii) bu dönüşümün mimarlık eğitimi ve mesleki uygulamalara yansımalarının neler olduğu şeklinde belirlenmiştir. Bu amaç doğrultusunda, iki paralel tasarım atölyesi kapsamında Rhino/Grasshopper ve yapay zeka destekli yazılımların kullanıldığı deneysel bir metodoloji benimsenmiştir. Katılımcı mimarların tasarım süreçlerinde dijital araçları kullanırken karşılaştıkları avantajlar, dezavantajlar ve adaptasyon süreçleri; derinlemesine görüşmeler, sistematik gözlemler ve nicel performans ölçümleri ile nitel ve nicel veri toplama teknikleri aracılığıyla incelenmiştir. Bu çalışma, mimarlıkta dijital simbiyotik ilişkinin sistematik bir ilk deneysel modellemesini sunmaktadır. Derinlemesine görüşmeler, gözlem notları ile içerik analizi ve performans ölçümleri ile karşılaştırmalı analizler yapılmıştır. Elde edilen veriler, içerik analizi ve sistematik gözlemler yoluyla değerlendirilmiş; performans ölçümleri ile karşılaştırmalı analizler gerçekleştirilmiştir. Soliman vd. (2019), Lukovich (2023) ve Asghar (2023) gibi güncel çalışmalar, dijital teknolojilerin mimarlık eğitimine entegrasyonu ile eğitim süreçlerinin dönüşümündeki önemini vurgulamaktadır. Literatürde Oxman (2006) ve Yıldırım (2023a) gibi çalışmalarla paralellik gösteren bu analiz, dijital teknolojilerin mimari yaratıcılığı sadece optimize etmekle kalmayıp, aynı zamanda tasarım sürecinin temel dinamiklerini dönüştürdüğünü ortaya koymaktadır. Elde edilen bulgular, dijital teknolojilerin mimarlık pratiğinde yalnızca araçsal değil, aynı zamanda yaratıcı sürecin aktif bir destekçisi olarak işlev gördüğünü ve bu kapsamda mimar ile teknoloji arasında kurulan simbiyotik ilişkinin, tasarım süreçlerine hız, doğruluk ve yenilikçilik kattığını göstermektedir. Çalışma, dijital simbiyozun mimarlıkta tek tip bir ilişki olmadığını; aksine, kullanıcının becerisi ve tasarım aşamasına göre çeşitlendiğini ortaya koymuştur. Profesyoneller için araçsal optimizasyon, öğrenciler için ise yaratıcı tetikleyici olarak işlev gören teknoloji, her iki bağlamda da karar destek sistemlerinin kritik bir parçasıdır. Ayrıca, çalışma, dijital karar destek araçlarını etkin kullanabilmesi için disiplinlerarası veri okuryazarlığı, algoritmik düşünme ve sürekli öğrenme gibi yetkinliklerin yanı sıra, dijital okuryazarlık, dijital işbirliği gibi becerilerin de mimarlık eğitiminde önem taşıdığını vurgulayarak, geleceğin mesleki dinamiklerine yönelik önemli öngörüler sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Simbiyotik İlişki, Dijital Dönüşüm, Teknoloji ve Mimarlık, Mimarlık Eğitimi.*

2025 MSTAS MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Between Creativity and Algorithm: The Role Transformation of Digital Symbiosis in Architectural Practice

Zehra Kezer[1]; Havva Alkan Bala[2]
[1 2] Cukurova University
[1]zehrakzr3@gmail.com; [2]hbala@cu.edu.tr

Abstract

Symbiotic relationships, as observed among organisms in nature, today characterize the mutual dependence and evolutionary collaboration between architects and digital technologies. This study examines how the symbiotic relationship emerging during the integration of digital transformation into architectural practice can be conceptualized and experimentally evaluated within the framework of systems theory and interactional design approaches. Unlike traditional architectural production processes, today's digital design environments—through artificial intelligence, computational design, and data-driven technologies—not only serve instrumental functions but also establish a symbiotic collaboration between architect and technology, redefining the architect's role as a simultaneous manager of creative processes and an active design partner within digital environments. The main research questions of the study are: (i) how the integrated use of digital technologies contributes to the architectural creative process, (ii) how this interaction compares with traditional design methods, and (iii) what implications this transformation has for architectural education and professional practice. For this purpose, an experimental methodology was adopted, involving two parallel design workshops utilizing Rhino/Grasshopper and AI-supported software. The advantages, disadvantages, and adaptation processes encountered by participating architects during the use of digital tools in their design processes were examined through qualitative and quantitative data collection methods, including in-depth interviews, systematic observations, and performance measurements. This study presents a systematic initial experimental modeling of the digital symbiotic relationship in architecture. In-depth interviews, observation notes, content analysis, and comparative analyses based on performance measurements were conducted. The collected data were evaluated through content analysis and systematic observations, and comparative analyses were performed based on the performance data. Contemporary studies by Soliman et al. (2019), Lukovich (2023), and Asghar (2023) emphasize the importance of integrating digital technologies into architectural education and the transformative impact on educational processes. This analysis, aligning with the works of Oxman (2006) and Yıldırım (2023a), reveals that digital technologies not only optimize architectural creativity but also fundamentally reshape the dynamics of the design process. The findings demonstrate that digital technologies in architectural practice function not merely as instrumental tools but as active supporters of the creative process, enhancing design processes in terms of speed, accuracy, and innovation through the symbiotic collaboration between architects and technology. Moreover, the study reveals that digital symbiosis in architecture is not a uniform phenomenon; instead, it varies depending on the user's skills and the stage of the design process. While technology serves as a tool for optimization among professionals, it acts as a creative trigger for students, making decision support systems a critical component in both contexts. Additionally, the study emphasizes the importance of interdisciplinary data literacy, algorithmic thinking, continuous learning, digital literacy, and digital collaboration skills within architectural education to effectively utilize digital decision support tools, offering significant insights into the future dynamics of the profession.

Keywords: *Symbiotic Relationship, Digital Transformation, Technology and Architecture, Architectural Education.*

1. Amaç ve Kapsam

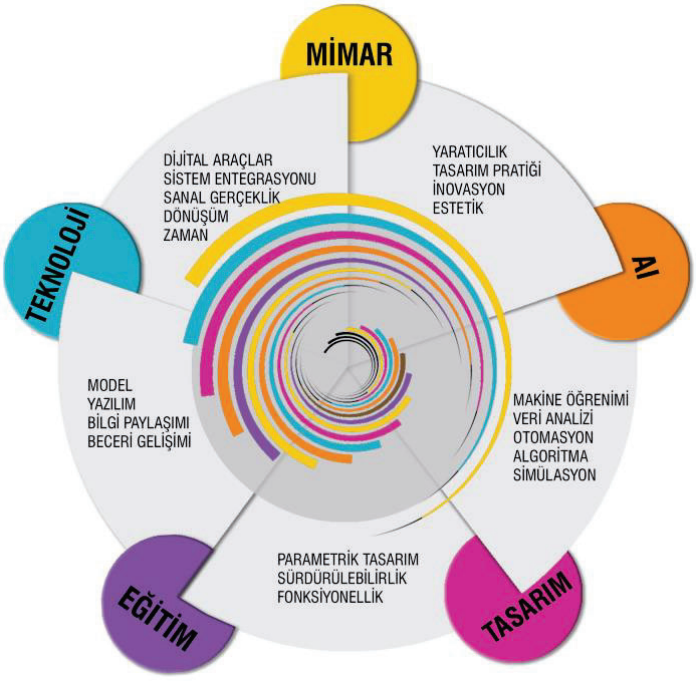
Mimarlık, doğası gereği, çevresiyle ve teknolojik araçlarıyla sürekli simbiyotik ilişkiler kurarak evrilen bir disiplindir. Teknolojinin mimarlıkla olan etkileşimi tarih boyunca farklı dönemlerde çeşitli formlarda kendini göstermiştir. Geleneksel el işçiliği ve ustalıkla başlayan mimari tasarım, endüstri devrimi ile makinelerin kullanımının artması sonucu mekanik bir yapıya bürünmüştür. Dijital dönemle birlikte ise bu mekanik yaklaşım yerini algoritmalara, veriye dayalı tasarıma ve hesaplamalı modellere bırakarak tamamen dönüşmüştür. Günümüzde, yapay zeka (AI), hesaplamalı tasarım, dijital ikizler ve nesnelerin interneti gibi yenilikçi teknolojiler, mimarlık pratiğinin her aşamasını yeniden şekillendirmekte ve mimarın rolünü geleneksel sınırların ötesine taşımaktadır. Bu dönüşümde ortaya çıkan, mimarlık ve teknoloji arasındaki simbiyotik ilişki, teknolojinin pasif bir araç olmaktan çıkarak yaratıcı sürecin etkin bir destekçisi haline gelmesiyle şekillenmektedir. Peki mimar ve dijital teknoloji arasındaki simbiyotik ilişki, tasarım sürecine nasıl etki etmektedir?

Bu çalışma, dijital teknolojilerin mimarlık pratiğine entegrasyonu sürecinde karşılıklı bağımlılık ve etkileşimin ne şekilde somutlaştığını gözler önüne sermek amacıyla, uygulamalı tasarım atölyeleri üzerine deneysel bir yaklaşım benimsemektedir. Araştırma, bu teknolojilerin tasarım süreçlerindeki etkilerini, avantajlarını ve sınırlamalarını gözlemleyerek, mimarın teknoloji ile kurduğu ilişkiyi daha derinlemesine analiz etmeyi amaçlamaktadır. Araştırmanın temel soruları; (i) dijital teknolojilerin entegre kullanımıyla mimari yaratım sürecine nasıl katkı sağlandığı, (ii) bu etkileşimin geleneksel tasarım yöntemleriyle nasıl karşılaştırıldığı ve (iii) bu dönüşümün mimarlık eğitimi ve mesleki uygulamalara yansımalarının neler olduğu şeklinde belirlenmiştir.

Literatürde dijital dönüşüm, yapay zeka, hesaplamalı tasarım, dijital ikizler ve nesnelerin interneti gibi konulara ilişkin pek çok çalışma yer alsa da, bu araştırmada "simbiyotik ilişki" kavramı ön plana çıkarılarak teknolojinin yalnızca pasif bir araç değil, aynı zamanda yaratıcı sürecin aktif destekçisi olarak nasıl konumlandığı ele alınmaktadır. Bu bağlamda çalışma, dijital teknolojilerin mimarlık pratiğine etkilerini teorik ve pratik açıdan incelemek, mimarın dijitalleşen dünyada değişen rolünü ve dijital teknolojiler ile kurduğu simbiyotik ilişkiyi analiz etmeyi hedeflemektedir.

2. Simbiyotik İlişki: Mimar ile Dijital Teknolojiler

Simbiyoz, biyolojide farklı organizmaların birbirlerine bağımlı olarak yaşamalarını sürdürdükleri bir etkileşim biçimi olarak tanımlanır. Simbiyoz, biyolojide olduğu gibi, mimar ve teknoloji arasında karşılıklı bağımlılığı ve birlikte evrimleşmeyi temsil eder hale gelmiştir. Mimar ve teknoloji arasındaki bu ilişki, birbirini destekleyerek yaratıcı süreçlerin dinamiklerini dönüştürür. Mimarlık bağlamında, teknoloji ile mimar arasındaki simbiyotik ilişki, tasarım süreçlerinde teknolojiye bağımlılığın artmasını ve bunun mimari düşünme pratiğine etkisini ifade eder (**Şekil 1**).



Şekil 1: Simbiyotik İlişki (Yazar tarafından üretilmiştir.)

İlk dijital çağ, mimarlık pratiğinde hesaplamalı araçların kullanımıyla başlayan köklü bir dönüşümü temsil eder. Bu dönemde, dijital teknolojiler yalnızca tasarım süreçlerini değil, aynı zamanda mimarların mekân ve formu kavramsallaştırma biçimlerini de etkilemiştir (Oxman, 2006). Bu dönüşüm, mimarlık ile teknoloji arasında simbiyotik bir ilişkinin temellerini atmıştır. Oxman, dijital tasarım düşüncesinin formülasyonu üzerine çalışarak, dijital tasarımın hem teoriyi hem de pratiği dönüştürdüğünü, geleneksel tasarım teorilerini zorlayarak yeni düşünme biçimleri ve tasarımcılara yeni roller sunduğunu, ayrıca karmaşıklık ve disiplinler arası etkilerini vurgulamıştır. Bu bağlamda, dönüşümün tasarım düşüncesine olan etkilerini ele alarak, dijital çağda tasarımın evrimini anlamaya yönelik güçlü bir teorik temel sunmaktadır.

Dijital dönüşüm mimari tasarımda manuel araçlardan dijital araçlara bir geçişten daha fazladır; tasarımın kavramsal anlayışında derin bir dönüşümü temsil etmektedir. Bu dönüşüm, geleneksel üretim yöntemlerinden farklı olarak, mimarlara yaratıcı süreçlerde daha fazla esneklik ve fırsat sunar. Dijital teknolojiler araç olmanın ötesinde yeni bir tasarım dili ve düşünme biçimini kolaylaştırır (Yıldırım, 2023a). Geleneksel olarak, mimar tasarım sürecinde merkezde yer alırken, dijital teknolojilerin gelişmesi ile birlikte bu merkezilik yeniden tanımlanmaktadır. Yapay zeka destekli tasarım sistemleri, parametrik tasarım araçları ve veri analitiği gibi unsurlar, mimarın karar alma sürecinde aktif bir rol oynamaya başlamıştır.

"Aletlerimizi biz biçimlendiriyoruz, sonra aletlerimiz bizi biçimlendiriyor" (McLuhan, 1967; Yılmaz, 2023) ifadesi, bu dönüşümün mimarlık pratiğinde nasıl derin etkiler yarattığını göstermektedir. Teknoloji-mimar etkileşimi, artık tek yönlü bir araç kullanımı değil, karşılıklı öğrenme ve karar destek mekanizmalarıyla şekillenen simbiyotik bir süreçtir. Sadece mesleki pratikleri dönüştürmekle kalmayıp, aynı zamanda gelecekteki mimarlık eğitimini ve meslek pratiğini de derinden etkileyecek bir rol üstlenmektedir. Bu bağlamda, dijital teknolojilerin mimarlıkta entegre bir şekilde kullanımı, mesleğin geleceği için kritik bir öneme sahiptir ve bu süreçte gelişen simbiyotik ilişki, tasarımın yaratıcı ve işlevsel boyutlarını bir araya getirerek mimarların gelecekteki rollerini yeniden tanımlamaktadır.

3. Yöntem

Araştırmanın teorik altyapısı, dijital teknolojilerin mimarlık pratiğinde yarattığı dönüşümü sistem teorisi ve etkileşimsel tasarım yaklaşımları çerçevesinde değerlendirirken, uygulamalı tasarım atölyeleri metodolojisi ile somut veriler elde edilmiştir. Sistem teorisi, mimarlık ve teknoloji arasındaki karşılıklı etkileşimi anlamak için bir çerçeve sunarken, etkileşimsel tasarım yaklaşımları, dijital araçların tasarım süreçlerine nasıl entegre edildiğini açıklar. Rhino/Grasshopper ve AI destekli yazılımlar kullanılarak düzenlenen iki paralel tasarım atölyesinde, katılımcı mimarların dijital araçları kullanarak tasarım süreçlerini nasıl optimize ettikleri, hangi noktalarda geleneksel yöntemlere kıyasla avantaj ve dezavantajlar yaşadıkları gözlemlenmiştir (**Tablo 1**). Atölyelere mimarlık öğrencileri, akademisyenler ve meslek pratiğinde aktif olarak yer alan mimarlar katılmıştır. Katılımcılar, dijital teknolojilerin tasarım süreçlerine entegrasyonu konusunda deneyim kazanmış ve süreç içerisindeki avantajlar, sınırlamalar ve adaptasyon dinamikleri gözlemlenmiştir.

Atölye 1: Bu ilk atölyede, katılımcılar dijital araçları kullanarak geleneksel tasarım yöntemlerinden farklı olarak tasarımlarını geliştirmişlerdir. (3. ve 4. sınıf mimarlık öğrencileri, yüksek lisans öğrencileri ve profesyonel mimarların katılımıyla gerçekleştirilmiştir.) Herhangi bir yazılım bilgisi olmadığı kabul edilen 15 katılımcıya Rhinoceros yazılımı üzerinden 2 boyutlu ve 3 boyutlu modelleme yöntemleri anlatılmış, Grasshopper üzerinden sistemsel tasarım ve prosedürel modelleme yöntemleri deneyimletilmiştir. Parametrik araçlarla tasarım problemi çözülmeye çalışılmış; katılımcılardan, tasarımda veri akışını ve parametreleri nasıl kontrol edebilecekleri sorusuna odaklanmaları istenmiştir. Ardından, ürettikleri dijital modelleri lazer kesim teknolojisi ile fiziksel prototiplere dönüştürmeleri beklenmiştir. Bu süreç, tasarımdan üretime giden dijital simbiyotik etkileşimi gözlemlemek için bir zemin sağlamıştır.

Atölye 2: İkinci atölyede, AI ve diğer dijital araçlar ile daha derinlemesine çalışmalar yapılmış ve katılımcıların tasarım süreçlerini nasıl etkilediği incelenmiştir. Yapay zeka (AI image tools) tabanlı düşünce süreçlerinin mimarlık pratiğine entegrasyonuna odaklanmaktadır. Mimari proje tasarım başlangıcında belirlenen anahtar kelimeler seçilmiş, bu çerçevede görsel üretimi istenmiştir. Katılımcılar ürettikleri görselleri yorumlayarak tasarım konseptlerini rafine etmiş ve geliştirmiştir. Bu süreç, AI araçlarının yalnızca görselleştirme değil, aynı zamanda tasarım fikrinin evrimleşmesine nasıl katkı sunduğunu gözlemlemek açısından önemli bir deney alanı oluşturmuştur.

Tablo 1: Atölyeler

	SİMBİYOTİK İLİŞKİ	KATILIMCILAR	YÖNTEM&ARAÇLAR	AMAÇ	UYGULAMA
ATÖLYE 1	✓Üretim odaklı etkileşim ve dijital araçlarla somut (fiziksel) prototiplerin üretilmesi **"TEKNİK SİMBİYOZ"**	✓3. ve 4. sınıf mimarlık öğrencileri ✓Mimar ✓Akademisyen	✓Rhinoceros (3B modelleme) ✓Grasshopper (parametrik tasarım) ✓Lazer kesim (prototipleme)	✓Geleneksel tasarım yöntemlerinden farklı olarak dijital araçlarla tasarım geliştirme, parametrik-algoritmik düşünme ✓Tasarım ve üretim sürecinde dijital araçların aktif kullanımı	✓2D ve 3D modelleme, parametrik tasarım ve prosedürel modelleme ✓Dijital modellerin lazer kesim teknolojisi ile fiziksel prototiplere dönüştürülmesi
ATÖLYE 2	✓Kavramsal tasarım aşamasında AI destekli araçlarla görsel üretimi, tasarım fikirlerinin evrimleşmesi **"KAVRAMSAL SİMBİYOZ"**	✓1. sınıf öğrencileri	✓AI tabanlı görsel üretim araçları (Midjourney,Microsoft Bing,Leonardo AI,Look-x ,DALL-E,vb.) ✓Konsept rafinasyonu ve yorumlama	✓Tasarım fikir oluşturma ✓Yapay zeka araçlarının tasarım konsepti geliştirmede yaratıcı süreçlere entegrasyonu	✓Anahtar kelimeler ile görsel üretimi, tasarım konseptlerinin rafine edilmesi

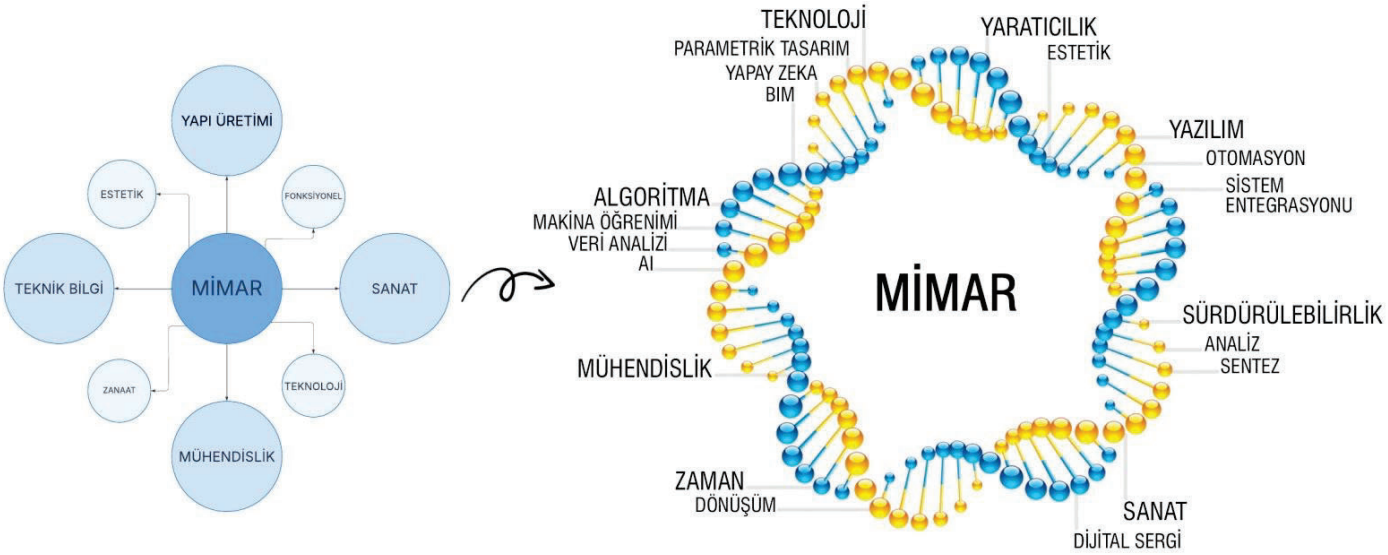
Araştırmacılar, tasarım atölyelerinde aktif olarak bulunmuş ve katılımcıların süreçlerini gözlemleyerek ayrıntılı notlar almışlardır. Bu notlar, tasarımcıların dijital araçlarla nasıl etkileşimde bulunduğu, karar verme süreçlerinde hangi faktörlerin etkili olduğu gibi unsurları incelemiştir. Derinlemesine görüşmeler, gözlem notları ile içerik analizi ve performans ölçümleri ile karşılaştırmalı analizler yapılmıştır. Dijital araçların kullanımının geleneksel tasarım yöntemlerine kıyasla sağladığı avantajlar ve dezavantajlar, elde edilen veriler ışığında karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma, katılımcıların dijital araçlar kullanarak hangi süreçleri daha verimli hale getirdiklerini ve hangi durumlarda geleneksel yöntemlere başvurduklarını ortaya koymuştur.

Bu çalışmada, farklı dijital araçların tasarım sürecinin çeşitli aşamalarında mimar ile teknoloji arasında kurulan simbiyotik ilişkiyi nasıl dönüştürdüğü incelenmiştir. Birinci atölye üretim odaklı etkileşimi, ikinci atölye ise kavramsal tasarım başlangıcındaki etkileşimi analiz etmeye yöneliktir. İki atölye, dijital teknolojilerin mimari karar alma süreçlerindeki rolünü 'basit araç kullanımı'ndan 'yaratıcı ortaklığa' evrimini simbiyoz kavramıyla incelemektedir. Atölyeler bağımsız olarak planlanmış, ancak her ikisi de insan-teknoloji etkileşiminin farklı deneyim seviyelerindeki yansımalarını, farklı boyutlarını göstermek amacıyla yapılandırılmıştır. Atölyelerin bağımsızlığı, teknolojinin mimarlık pratiğindeki çok katmanlı rolünü göstermek açısından bir avantajdır. Bu çalışma, sempozyum teması olan 'simbiyoz'u, dijital teknolojilerin mimari karar destek sistemlerindeki dönüştürücü rolü bağlamında ele almaktadır. Mimar ile teknoloji arasındaki bu ilişki, yalnızca araçsal değil, karşılıklı öğrenme ve yaratıcılığı tetikleyen bir ortaklık olarak kavramsallaştırılmıştır.

4. Mimarın Rolünde Dönüşüm: Dijital Çağda Yeni Yönelimler

Dijital teknolojilerin mimarlık pratiğine entegrasyonu, yalnızca tasarım araçlarının değişimiyle sınırlı kalmamakta, aynı zamanda mimarın rolünü yeniden tanımlayarak daha stratejik ve kavramsal bir konuma taşımaktadır(Picon, 2020; Trabucco, 2021). Geleneksel anlamda mimar, tasarım sürecinin merkezinde yer alan ve estetik, işlevsellik ile teknik çözümleri bütünleştiren bir "yaratıcı yönetici" konumundaydı. Dijital dönüşümle birlikte bu rol, teknolojiyle kurulan simbiyotik ilişki çerçevesinde genişleyerek çok boyutlu bir nitelik kazanmıştır (**Şekil 2**). Yapay zekânın mimarlık pratiğindeki bu dönüştürücü etkisi, ani bir değişimden ziyade modülerlik, hesaplamalı tasarım, parametrik tasarım ve son olarak yapay zekâ olmak üzere dört ana aşamada gerçekleşen 70 yıllık bir birikimin sonucudur (Chaillou, 2019). Her aşama mimarlık pratiğini dönüştürerek yeni olanaklar sunmuştur. Bu evrimsel süreç, yapay zekânın mimari tasarım süreçlerinde "ortak tasarımcı" olarak konumlanmasına ve insan zihninin keşfedemediği yeni perspektifler sunabilmesine olanak tanımıştır (Borglund, 2022; Cudzik ve Radziszewski, 2018). Yapay zeka, hesaplamalı tasarım, dijital ikizler ve nesnelerin interneti gibi teknolojiler, mimarı veri analizi, süreç yönetimi ve sistem entegrasyonu gibi yeni sorumluluk alanlarıyla karşı karşıya bırakmaktadır. Bu bağlamda mimar, sadece biçim üreten bir tasarımcı değil,

aynı zamanda çok katmanlı dijital süreçleri yöneten ve bu süreçlerle yaratıcı bir işbirliği geliştiren bir aktör haline gelmektedir. Bu dönüşüm, teknolojiyi mimarla yaratıcı bir ortaklık kuran dinamik bir bileşene dönüştürmektedir.



Şekil 2: Mimarın rolündeki dönüşüm (Yazar tarafından üretilmiştir.)

5. Bulgular ve Tartışma

Atölye uygulamalarından elde edilen bulgular (**Tablo 2**), dijital teknolojilerin mimarlık pratiği üzerindeki etkisini çeşitli boyutlarda ortaya koymaktadır:

- Rhino/Grasshopper kullanımı, tasarım sürecinde veri tabanlı ve sistematik bir yaklaşım sağlamış, üretim evresinde hız ve hassasiyet artırmıştır.
- Parametrik tasarım, tasarım elemanları arasında dinamik ilişkiler kurarak süreci dönüştürmüştür. Ancak atölye bulguları, bu araçların verimliliğinin kullanıcıların; dijital okuryazarlık seviyelerine, algoritmik düşünme becerilerine, tasarım aşamasına (konsept/geliştirme/detay) bağlı olarak değişkenlik gösterdiğini ortaya koymuştur.
- Parametrik tasarım, elemanlar arasında dinamik ilişkiler kurarak ve tasarım parametrelerinde yapılan değişikliklerin tüm projeyi otomatik olarak etkilemesini sağlayarak, tasarım sürecini temelden dönüştürdüğü görülmüştür.
- Yapay zekâ destekli araçlar, tasarım fikirlerinin hızlıca çeşitlendirilmesini sağlamış, ancak konsept olgunlaşması için insan değerlendirmesinin kritik olduğu görülmüştür.
- Her iki atölye de dijital araçlar ile insan arasında karşılıklı etkileşim ve adaptasyon mekanizmalarını güçlendirmiştir.
- Simbiyotik ilişki, geleneksel araç kullanımından farklı olarak teknolojiye yaratıcı bir ortak rolü verildiğinde daha belirgin hale gelmektedir.

Tablo 2: Atölye Çıktıları

	ANA BULGULAR	TASARIM KARARINA ETKİSİ	KATILIMCI DİRENCİ	SİMBİYOTİK ÇIKARIM	ÇIKTILAR/GÖZLEMLER
ATÖLYE 1	✓Dijital araçlar, tasarımın tekrarlanabilirliğini artırarak prototip-iterasyon döngüsünü hızlandırdı. ✓Katılımcılar, parametre kontrolüyle "dijital el" metaforunu deneyimledi.	✓Parametre optimizasyonu ✓Prototip odaklı hızlanma	✓Yazılım öğrenme eğrisi	✓Araçsal vs. Sezgisel Dönüşüm ✓Teknoloji adaptasyonunun aşamaları ✓Farklı süreçlerde simbiyotik verimlilik ✓Tekno-Mekanik Simbiyoz	✓Dijital araçların iteratif tasarım sürecine etkisi ✓Veri akışı ve parametre kontrolü deneyimi ✓Fiziksel prototipleme ile simbiyotik etkileşim gözlemi
ATÖLYE 2	✓AI, sezgisel tasarım kararlarını görsel veriyle besleyerek "düşünce ortağı" işlevi gördü. ✓Geleneksel yöntemlerle rekabet değil, tamamlayıcılık ilişkisi gözlendi.	✓Konsept çeşitliliği ✓Kavramsal hızlanma	✓AI 'ya güven sorgulama	✓Araçsal vs. Sezgisel Dönüşüm ✓Teknoloji adaptasyonunun aşamaları ✓Farklı süreçlerde simbiyotik verimlilik ✓Bilişsel-Kreatif Simbiyoz	✓AI'nın kavramsal aşamada yaratıcılığı tetikleme potansiyeli ✓Görsel verinin tasarım kararlarını şekillendirmesi ✓Geleneksel yöntemlerle sinerji ihtiyacı

Atölye çalışmalarından elde edilen bulgular, dijital tasarım araçlarının mimarlık pratiğinde yarattığı dönüşümü üç temel boyutta ortaya koymaktadır:

Parametrik Tasarım ve Sistem Yaklaşımı

Rhino/Grasshopper gibi dijital araçların kullanımı, mimari tasarım süreçlerinde veri tabanlı ve sistematik bir yaklaşımı mümkün kılmıştır. Üretim aşamasında sağlanan hız ve hassasiyet artışı, dijital araçların yalnızca teknik destek sağlamadığını; aynı zamanda tasarım sürecinin paradigmasını dönüştürdüğünü göstermektedir. Bu dijital araçlar, tasarımda daha entegre ve optimize edilmiş çözümler üretmeye olanak tanımaktadır. Parametrik tasarım, tasarım elemanları arasında dinamik ilişkiler kurarak ve tasarım parametrelerinde yapılan değişikliklerin tüm projeyi otomatik olarak etkilemesini sağlayarak, tasarım sürecini temelden dönüştürmüştür. Yapılan uygulamalar, dijital araçların yalnızca teknik çözümler sunmadığını, aynı zamanda mimari tasarım sürecine yeni bir paradigma getirdiğini göstermiştir (Chaillou, 2019; del Campo vd., 2020; Lukovich,2023). Sonuç olarak mimari tasarım süreçleri daha entegre, optimize ve veri odaklı bir yapıya evrilmiştir. Ancak, parametrik tasarım herkes için aynı verimi sağlar mı?

Yapay Zekâ ve Yaratıcı Süreç

Yapay zekâ destekli araçlar, tasarım fikirlerinin hızlıca çeşitlendirilmesini sağlamış; ancak konseptin olgunlaşması sürecinde insan değerlendirmesinin kritik bir rolü olduğu gözlemlenmiştir. Bu bulgu, yapay zekânın tasarım süreçlerinde yalnızca bir araç olmanın ötesine geçerek, mimar ile teknolojinin işbirliği içinde daha etkili bir çözüm üretebileceğini ortaya koymaktadır (Chaillou, 2019). Her iki atölye de dijital araçlarla insan arasında karşılıklı etkileşim ve adaptasyon mekanizmalarını güçlendirerek, teknoloji ile kurulan simbiyotik ilişkiyi pekiştirmiştir. Atölye sonuçları yapay zekânın rutin görevleri otomatikleştirerek mimarın yaratıcı sürece odaklanmasını sağladığını (Widyakusuma, 2024), ancak teknolojik araçlarla donatılırken yaratıcılık ve eleştirel düşünmenin korunması gerektiğini (Trabucco, 2021), insan-AI işbirliğinin tasarım alternatiflerini çeşitlendirdiğini, ancak nihai kararlarda insan değerlendirmesinin kritik olduğunu ortaya koymuştur (Lukovich, 2023). Del Campo vd. (2021), dijital araçların tasarımcıların onları dünyayı farklı bir şekilde görmelerini sağlayan araçlar olarak kullanabileceğini ve bu yeni bakış açısının tasarım sürecini bilgilendirmek için kullanılabileceğini belirtmektedir. Peki, yapay zekâ araçlarının yaratıcılığı desteklemesi her zaman olumlu mu?

Simbiyotik İlişkinin Dinamikleri

Katılımcıların büyük çoğunluğu, dijital araçlarla kurulan karşılıklı adaptasyonun tasarım kalitesini artırdığını belirtmiştir. Atölye sonuçları, dijital araçlarla kurulan karşılıklı adaptasyonun tasarım kalitesini artırdığını ve teknoloji ile insan yaratıcılığı arasında kurulan simbiyotik ilişkinin, geleneksel araç kullanımından niteliksel olarak farklılaştığını ortaya koymuştur. Bu bulgu, teknoloji ve yaratıcılık arasındaki simbiyotik ilişkinin geleneksel araç kullanımından niteliksel olarak farklı olduğunu göstermektedir. Simbiyotik ilişki, geleneksel araç kullanımından farklı olarak, teknolojiye yaratıcı bir ortak rolü verildiğinde daha belirgin hale gelmektedir. Cudzik ve Radziszewski (2018), yapay

zeka destekli tasarım süreçlerinin iteratif döngüler oluşturarak tasarım ve üretim arasında yeni bir etkileşim zemini yarattığını belirtmektedir. Bu, mimarın tasarım sürecinde daha fazla kontrol ve özgürlük elde etmesine olanak tanımış, aynı zamanda dijital teknolojilerin entegrasyonunun, mimarın rolünü geleneksel estetik ve işlevsellik kriterlerinin ötesinde; dijital süreç yöneticisi, veri analisti ve sistem entegratörü gibi çok boyutlu roller üstlenmesi gerektiğini göstermektedir.
Dijital dönüşüm, mimarlık pratiğinde köklü değişimlere yol açarak, eğitim sürecinde dijital okuryazarlık, disiplinlerarası işbirliği ve sürekli öğrenme becerilerini zorunlu kılmaktadır. Bu durum, günümüz mimarlarının yalnızca geleneksel teknik bilgiye değil, aynı zamanda dijital araçlarla etkin işbirliği kurabilme yetkinliğine de sahip olmasını gerektirmektedir. Sürekli gelişen dijital dönüşüm, mimarlık pratiği ve eğitiminin güncelliğini koruyabilmesi için dinamik bir yapıya sahip olmasını gerektirmektedir. Mimar ile teknoloji arasında kurulan simbiyotik ilişki, tasarım süreçlerinde hız, doğruluk ve yaratıcılık arasında denge sağlamakla kalmayıp, mesleğin geleceğini şekillendirecek temel dinamiklerden biri olarak öne çıkmaktadır. Yapay zekâ, insan ve makine arasındaki işbirliğini güçlendirerek, tekrarlayan ve rutin görevleri otomatikleştirirken, mimarların tasarımın yaratıcı ve özgün yönlerine daha fazla odaklanmalarını sağlamaktadır (Widyakusuma, 2024).

Simbiyotik mimarlık pratiği, insan ve teknoloji arasındaki etkileşimi daha güçlü hale getirirken, mimarın yaratıcı kimliğini de yeniden şekillendirmektedir. Gelecekte, mimar ve yapay zeka arasındaki ilişkinin nasıl evrileceği, mesleğin dönüşüm sürecini belirleyecektir. Bu süreçte, teknolojiyi yalnızca bir araç olarak görmek yerine, yaratıcı süreçleri destekleyen bir ortak olarak kabul etmek gerekmektedir. Mimarlık pratiğinin geleceği, bu insan-teknoloji simbiyozunun derinleşmesiyle şekillenecek; meslek, doğayla, teknolojiyle ve toplumla kurduğu çok katmanlı ilişkileri yeniden tanımlayacaktır. Yeni nesil mimarlık, iş birliği, adaptasyon ve yenilikçilik ekseninde şekillenerek, dijital çağın dinamiklerine uyum sağlayan bir meslek pratiği sunacaktır.

Dijital çağın mimarlık pratiğine en önemli katkısı, insan-makine simbiyozunu yaratıcı bir ortaklığa dönüştürmesidir. Yapay zekâ destekli araçlar:

- Rutin görevleri otomatikleştirerek operasyonel verimliliği artırmakta,
- Tasarım alternatiflerini çeşitlendirerek yaratıcılık sınırlarını genişletmekte,
- İnsan değerlendirmesiyle sentezlenen nihai kararlarda mimari niteliğin korunmasını ve geliştirilmesini sağlamaktadır.

Bu dönüşüm, mimarlık mesleğini doğa, teknoloji ve toplumla kurduğu ilişkileri yeniden tanımlayan; işbirliği, adaptasyon ve yenilikçiliği merkeze alan bir pratik anlayışına doğru evrimleştirmektedir. Bu simbiyotik etkileşim, mimarlığı geleneksel sınırlarından çıkararak:

- Doğa-teknoloji-toplum üçgeninde yeni ilişki ağları kuran,
- İşbirliği ve adaptasyonu merkeze alan,
- Sürekli evrimleşen bir disiplin haline getirmektedir.

KAYNAKLAR

Alkan Bala, H. (2022). *Mimarlık öğrencisi misin?* YEM Yayınları.

Babbar, N. (2020). Architectural learning model in context of artificial intelligence, In *Skills in architectural education- A new paradigm*.

Bala, H. A. (2024). *Parametrik Tasarım ve Dijital Fabrikasyon Atölyesi Deneyimleri*. Arkitera. Retrieved January 20, 2024 20 Ocak 2024, from https://www.arkitera.com/haber/parametrik-tasarim-ve-dijital-fabrikasyon-atolyesi-deneyimleri/

Borglund, C. (2022). *Artificial Intelligence in Architecture and its Impact on Design Creativity: A Study on how Artificial Intelligence Affect Creativity in the Design Process*, Degree project in The Build Environment, KTH Royal Institute of Technology

Chaillou, S. (2019). *The advent of architectural AI: A historical perspective*. Medium. Retrieved from https://towardsdatascience.com/the-advent-of-architectural-ai-706046960140.

Cudzik, J., & Radziszewski, K. (2018). *Artificial intelligence aided architectural design*. In A. Kępczyńska-Walczak, S. Białkowski (Eds.), *AI for Design and Built Environment, eCAADe 36* (pp. 77-84).

Culkin, J. M. (1967, March). A schoolman's guide to Marshall McLuhan.

Del Campo, M., Carlson, A., & Manninger, S. (2021). Towards hallucinating machines-designing with computational vision. *International Journal of Architectural Computing*, 19(1), 88-103. https://doi.org/10.1177/1478077120963366

Galanos, T., & Chronis, A. (2022). Time for change–The InFraRed revolution: How AI-driven tools can reinvent design for everyone. *Architectural Design*, 92(3), 108-115. https://doi.org/10.1002/ad.2821

Günaydın, C., Kasalı, A., & Doğan, F. (2024). Artificial intelligence as a pedagogical tool for architectural design education. *Journal of Design Studio*, *6*(2), 219-229. https://doi.org/10.46474/jds.1533480

Gürsel Dino, İ. (2020). *Gelecek, teknoloji ve mimarlık*. 1–5. https://hdl.handle.net/11511/85752

Larsen, N. M. (2016). Digital fabrication in tomorrow's architecture, *Open Room Publication Series* No. 3. Arkitektskolens Forlag.

Lukovich, T. (2023). Artificial intelligence and architecture towards a new paradigm. *YBL Journal of Built Environment*, 8(1), 30-45. https://doi.org/10.2478/jbe-2023-0003

Oxman, R. (2006). Theory and design in the first digital age. *Design Studies*, 27(3), 229-265. https://doi.org/10.1016/j.destud.2005.11.002

Picon, A. (2020). What about humans? Artificial intelligence in architecture. In Yuan, P.F., Xie, M., Leach, N., Yao, J., Wang, X. (Eds), *Architectural Intelligence* (pp. 15-29). Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-6568-7_2

Trabucco, D. (2021). Will artificial intelligence kill architects? An insight on the architect job in the AI future. *TECHNE-Journal Of Technology For Architecture And Environment*, (2), 128-132. https://doi.org/10.13128/techne-10696

Vostinar, A. E., Skocelas, K. G., Lalejini, A., & Zaman, L. (2021). Symbiosis in digital evolution: Past, present, and future. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 9. https://doi.org/10.3389/fevo.2021.739047

Widyakusuma, A. (2024). The future role of architects in the age of artificial İntelligence. *Proceeding of International Seminar on Arts, Artificial Intelligence & Society* (pp. 178-197).

Yıldırım, E. (2023a). A crisis in education: navigating the technological abyss in architectural design studio. *2. International Cankaya Scientific Studies Congress*, Ankara, 1 (s.605-611).

Yıldırım. E. (2023b) *Mimarlıkta Yapay Zeka.* In A, Özen (Ed.), *Dijital Dönüşüm Ve Değişen Uygulamalar* (s.561-578). Efe Akademi Yayınları. https://www.researchgate.net/publication/374055884

Yılmaz, S. (2023). Mimarlık pratiğinde dijitalleşme bağlamında ideoloji olarak teknoloji ve Denizli ölçeğinde bir soruşturma (Yüksek Lisans Tezi).

2025 MSTAS

OTURUM 2

SAYISAL YÖNTEMLER VE KÜLTÜREL MİRAS

MSTAS 2025 MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Kültürel Mirasın Belgeleme Çalışmalarında Yersel Lazer Tarayıcı Kullanımı: İznik Roma Tiyatrosu Örneği

Ayşe Esin Kuleli
Antalya Bilim Üniversitesi
esin.kuleli@antalya.edu.tr

Özet

Türkiye sahip olduğu kültürel miras açısından değerlendirildiğinde, farklı medeniyetlere ait yapı ve alanların ülke genelinde zengin ve çok katmanlı bir doku oluşturduğu görülür. Bu durum, günümüzde insanlığın ortak kültürel mirası olarak da nitelendirilen bu değerlerin korunması sorumluluğunu bizlere yüklemektedir. Korumanın ilk aşaması envanter ve belgeleme çalışmaları olduğundan, yapı ya da korunması gerekli kültür varlığı niteliği taşıyan arkeolojik ve kentsel sit alanlarının doğru yöntemlerle belgelenmesi çok önemlidir. Belgeleme çalışmalarında geçmişte kullanılan geleneksel yöntemler, yerini ileri belgeleme sistemlerine bırakmıştır. Mimari mirasın yüksek hassasiyetle ve hızlı şekilde sayısal belgelenmesini sağlayan bu sistemler, yapıyı temassız, zarar vermeyecek şekilde gerekirse uzaktan ölçümlerle 3B nokta bulutu üreterek milimetre hassasiyetinde kaydetmektedir. Uzman ekipler tarafından yapılan ileri belgeleme sistemlerini kullanarak hazırlanan rölöve çizim çalışmaları sayesinde, koruma projesinin restitüsyon ve restorasyon projesi etapları için sağlıklı altlıklar oluşturulması mümkün olabilmektedir.

Bursa İlinin kuzeydoğusunda İznik gölünün kıyısında M.Ö. IV. yüzyılda kurulan İznik, günümüze kadar kesintisiz kullanım gören nadir antik kentlerimizden biridir (Yalman, 2006). İznik, Bithynia Krallığı'ndan itibaren sırasıyla Bizans Laskarisler Dönemi, Anadolu Selçukluları ve Erken Osmanlı Dönemi'nde başkentlik yapmıştır. Denizden uzak, fakat geniş bir göl kenarında ve verimli bir ova üzerine kurulmuş olması kentin önemini arttırmaktadır.

Bu çalışmada; İznik'te yer alan MS 2. yüzyıla tarihlenen Roma Tiyatrosu'nun 3B yersel lazer tarama cihazı ile yapılan ölçüm çalışmaları ve üretilen datalar kullanılarak hazırlanan analitik rölöve çalışmaları anlatılmaktadır. İznik Roma Tiyatrosu'na ait ölçüm verileri ölçüm ekibi tarafından işlendikten ve çizime hazır hale getirildikten sonra çizim ekibine aktarılmıştır. 3B nokta bulutu incelenerek, yapıyı en iyi şekilde anlatacak plan kotları ve kesit yerleri belirlenmiştir. Ortoscan ve ortophoto görüntüleri üzerinden çalışılarak, yapının farklı kot planları, kesitleri ve siluetleri hazırlanmıştır. Çizim sürecinde çekilen fotoğraflardan da yararlanılmıştır. Yersel lazer tarama yöntemi ile İznik'in en önemli tarihi yapılarından biri olan ve arkeolojik alan içerisinde kalan Roma tiyatrosunun ölçüm ve belgeleme çalışma aşamalarının ve bu verilerden üretilen rölöve, hasar analizleri gibi çizimlerin anlatımı ve süreçte edinilen deneyimin diğer araştırmacılarla paylaşılması amaçlanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Kültürel Miras, Mimari Belgeleme, 3B Yersel Lazer Tarayıcı, Nokta Bulutu, Rölöve, Roma Tiyatrosu.*

MSTAS 2025 MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

The Use of Terrestrial Laser Scanning in the Documentation of Cultural Heritage: The Case of the Iznik Roman Theatre

Ayşe Esin Kuleli
Antalya Bilim University
esin.kuleli@antalya.edu.tr

Abstract

When Turkey is evaluated in terms of its cultural heritage, it is evident that structures and sites belonging to various civilizations create a rich and multilayered texture across the country. This situation places upon us the responsibility of preserving these values, which are now regarded as part of humanity's shared cultural heritage. Since the first step of preservation is inventory and documentation, it is crucial to record buildings or heritage assets located in archaeological and urban conservation sites using accurate methods. Traditional methods previously used in documentation studies have been replaced by advanced documentation systems. These systems allow for the digital recording of architectural heritage with high precision and speed, generating 3D point clouds through contactless and non-destructive measurements, even from a distance, with millimeter-level accuracy. Measured drawings prepared by expert teams using advanced documentation techniques provide a reliable basis for subsequent stages of conservation projects such as restitution and restoration.

Located on the northeastern shore of Lake İznik in the province of Bursa, İznik was founded in the 4th century BC and is one of the rare ancient cities in continuous use to this day (Yalman, 2006). İznik served as the capital city during the Bithynian Kingdom, the Byzantine Laskarid period, the Anatolian Seljuks, and the Early Ottoman Empire. Its location, though far from the sea, on the edge of a large lake and fertile plain, increased the city's importance.

This study presents the measurement work carried out on the Roman Theatre in İznik, dated to the 2nd century AD, using a terrestrial 3D laser scanner, and the analytical measured drawings produced from the acquired data. After the measurement data of the İznik Roman Theatre was processed and made ready for drafting by the measurement team, it was handed over to the drawing team. By analyzing the 3D point cloud, plan levels and section lines that best represent the structure were determined. Working with orthoscan and true-orthophoto images, different level plans, sections, and silhouettes of the building were prepared. Photographs taken during the scanning process were also utilized during the drawing stage. The aim of this study is to describe the measurement and documentation process of the Roman Theatre—one of İznik's most significant historical structures located within an archaeological site—using terrestrial laser scanning technology, and to share the measured drawings, damage analyses, and the experience gained throughout the process with other researchers.

Keywords: *Cultural Heritage, Architectural Documentation, 3D Terrestrial Laser Scanner, Point Cloud, Measured Drawing, Roman Theatre.*

1. Giriş

Tarihi yapıların belgeleme çalışmalarında geçmişte kullanılan geleneksel yöntemler, teknolojinin gelişmesi ile yerini ileri belgeleme sistemlerine bırakmıştır. Bu durum pek çok yapı ve alanın 3 boyutlu (3B) yersel lazer tarayıcılar ile taranmasını ve destekleyici belgeleme yöntemleri ile birlikte kullanımını da beraberinde getirmiştir. Yersel lazer tarayıcılar (Terrestrial Laser Scanner-TLS), kültürel mirasın belgelenmesinde öne çıkan en güvenilir yöntemlerden biridir. Mimari mirasın sayısal belgelenmesine, dijital arşivlenmesine imkan veren bu tür yöntemler, aynı zamanda yüksek hassasiyetle ölçüm, hızlı veri toplama, hasar ve temassız ölçüm ve ulaşılması güç olan alanlara dahi erişimi mümkün kılması gibi avantajlar da sağlamaktadır. Ancak çizim aşamasına gelindiğinde altlık olarak kullanılacak verilerin sağlıklı ve doğru bir şekilde üretilebilmesi için, tarama cihazlarının kullanımı ve verilerin işlenmesi gibi çalışmaların işin uzmanı ekipler tarafından yapılması gerekmektedir.

Günümüzde, mimari mirasın korunmasına yönelik koruma projelerinin ilk aşaması olan belgeleme çalışmalarına, konusunda uzman interdisipliner ekiplerce yürütülen ve sağladığı olanaklar nedeniyle dijital teknolojilerin kullanıldığı çok sayıda farklı araştırma örnek olarak verilebilir. Bazı araştırmacılar kültürel mirasın belgelenmesinde ileri tekniklerinin kullanımına yönelik rehber nitelikli yayınlar hazırlarken (Andrews, vd., 2024), bazıları da yapı ya da alan ölçeğinde çalışarak deneyimlerini paylaşmaktadır. Örneğin, Garnero vd. (2010) 3B yersel lazer tarayıcı teknolojisini kullanarak yaptıkları araştırmalar sırasında yüksek bir kaliteye ulaştıklarını ve zaman tasarrufu sağlandığını bildirmektedirler. Dile getirdikleri sorunlar genel olarak, bilgisayarların veri üzerinde çalışırken yavaşlaması ve yetersizliği ile ilgilidir. Ayrıca, araştırmada düz olmayan yüzeylerde görüntüleri yönetmek ve projelendirmek için uygun yazılım araçlarını bulmanın zorluğundan bahsedilmektedir (Garnero, vd., 2010). Bir diğer araştırma, kentsel ve tek yapı ölçeğinde mimari elemanların belgelenmesi, üç boyutlu sayısallaştırılması sürecinin, aynı yerleşimdeki bina komplekslerine ilişkin standartlaştırılmış analizler, izleme ve değerlendirme faaliyetlerinin ancak bütüncül planlanması durumunda başarıya ulaşılabileceğini vurgular (Morandotti ve Doria, 2023). 3B yersel lazer tarayıcı teknolojisi ve destekleyici belgeleme yöntemleri, yoğun bezeme programına sahip saray, konak gibi yapılarda yüksek hassasiyetle belgeleme yapılmasına imkan vermektedir. Bu bağlamda Trabzon'daki Kostaki konağı ile ilgili araştırma makalesinde yapıdaki kalem işleri, alçı işleri ve diğer bezemelere ait detaylı ölçüm, belgeleme ve çizim çalışmaları paylaşılmıştır (Kuleli, 2018). Farklı alan ve yapılarda yapılan çalışmalarda, farklı sorunlarla karşılaşılabildiği için edinilen deneyimlerin paylaşılması değerlidir.

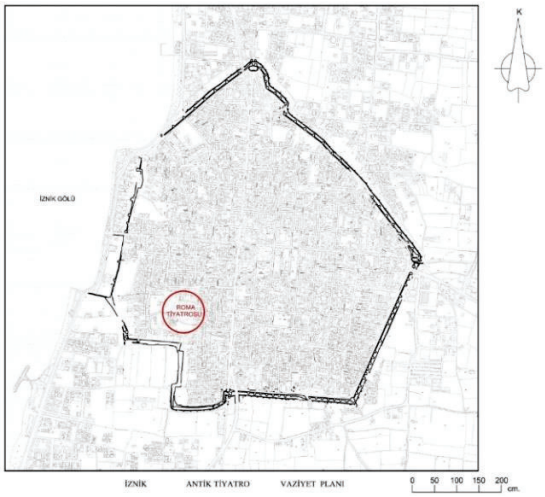
Bu araştırmada, anıtsal nitelik taşıyan İznik Tiyatrosu'nun koruma projesinin ilk aşamasında 3 boyutlu (3B) yersel lazer tarayıcılarla gerçekleştirilen ölçüm çalışmaları ve analitik rölöve çizimleri, ülkemizde arkeolojik alanlarda gerçekleştirilen belgeleme çalışmalarına bir örnek olarak sunulmaktadır (Kuleli, 2017).

2. İznik Roma Tiyatrosu

Korunması gerekli kültür varlığı olarak tescillenen İznik Tiyatrosu, MS 2. Yüzyılda Roma döneminde inşa edilmiştir. Tiyatro, İznik ilçesinin güney batısında yer alan Selçuk Mahallesi, Saraybahçe mevkiinde bulunmakta olup, İznik Gölünün kotundan 13 m yükseklikte ve kıyıdan 400 m, surlardan 90 m içerde olacak şekilde konumlandırılmıştır (**Şekil 1**). Anadolu'nun ayakta kalan en görkemli arkeolojik eserlerinden birisidir. Yapı özgün işlevini yitirdikten sonra dolmuş/doldurulmuş olması nedeniyle uzun bir süre atıl durumda kaldıktan sonra, kalıntıların ilk kez 1743 yılında R. Pococke tarafından tiyatroya ait olduğu belirlenmiş ve krokisi çizilmiştir (Schneider,1938). Texier ise 1862'de tiyatronun kent içindeki yerini belirtmiştir (Texier, 1962). Sahne bölümü kuzeye yönelen tiyatro, yaklaşık olarak 84/63 m boyutlarında düz bir alana inşa edildiğinden, eşine ender rastlanan tonozlu bir alt yapıya sahiptir. Yapı, alt kavea'yı taşıyan yedi adet trapezoidal tonozun devamında, üst kavea için iki tonozla yükseltilmiş 16 tonozdan oluşmaktadır. Bu tonozlardan 4 adeti yukarı kotlara geçiş için merdivenlerin yer aldığı bölümler olarak düzenlenmiştir. Diazoma ile alt ve üst kavea olarak ayrılan oturma sıraları, sekiz adet kerkides'e bölünmüştür. İznik Tiyatrosu moloz taş ve harç kullanılarak, *Opus Caementitum* (Roma betonu) tekniğiyle inşa edilmiştir. Sahne yapısında ve analemna duvarlarında kullanılan mermer kaplamalar dikkat çekmektedir. Diğer kısımlarda ise dış yüzey kireçtaşı bloklarıyla kaplanıp, demir kenetlerle sağlamlaştırılmıştır (Kuleli, 2017).

Roma İmparatoru Trajan Dönemi'nde (MS. 97-117), Bithynia eyaleti valisi, tarihçi ve yazar Genç Plinius'un MS 111 yılında İmparatora yazdığı mektuplarda, İznik Tiyatrosu'nun tarihçesi hakkında verdiği önemli bilgiler dikkat çekici niteliktedir (Pliny, 1969, 39. mektup). Plinius, yapının henüz tamamlanmamış olduğundan, mali ve statik sorunları

bulunduğundan bahsetmektedir. İznik tiyatrosu hakkında günümüze böylesine önemli bir belge erişmesine karşın, yapının tam anlamıyla bitirilip bitirilmediği hakkında kesin bilgiler yoktur. İznik Roma Tiyatrosu'nun skene, üst kavea gibi bölümlerinin büyük bir kısmı yıkılmış olsa da son yıllarda yapılan kazılarla ortaya çıkarılan kalıntılar, yapının büyüklüğünü ve ihtişamını gözler önüne sermektedir.



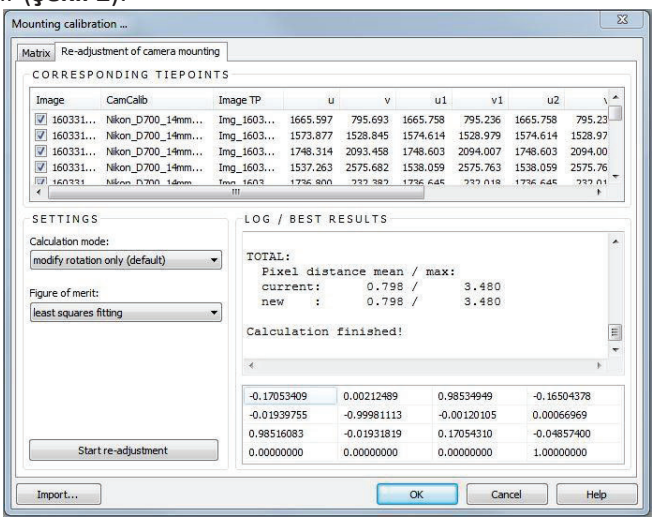
Şekil 1: Roma Tiyatrosunun kent surları içindeki yeri.

3. Kültürel Mirasın Belgelenmesinde Kullanılan Yöntem

3.1. Kullanılan Ekipman

Yersel lazer tarayıcılar, çevredeki nesnelere lazer ışınları gönderip geri dönüş sürelerini ölçerek üç boyutlu *nokta bulutu* verisi oluştururlar. Bu veriler, yapıların detaylı geometri bilgilerinin elde edilmesini sağlar. Belgelemede RIEGL Vz-400 marka 3B yersel lazer tarayıcı kullanılmış olup, saniyede 122.000 nokta ölçülmüştür. Cihaz yatayda 360°, dikeyde ise 100°lik açıyla tarama yapılabilmektedir. Cihazın maksimum ölçüm kapasitesi 650 metre ve bu mesafelerde ölçüm yaparken hassasiyet 4 mm'dir.

Yersel lazer tarayıcı ile bütünleşik çalışan kamerada / Nikon D700, Nikkor 14mm lens kullanılmıştır. Toplam 270 tarama pozisyonunda, kamera ile 1890 adet fotoğraf çekilmiştir. Ölçüm çalışmasına *Mounting* kalibrasyonunun yapılması ile başlanmıştır. Bu işlemin amacı cihazın üzerinde bulunan kamera ile ölçüm cihazının lazer sensörünün birbiri ile olan bağlantısının cihaza veri işleme aşamasında tanıtılmasıdır. Cihaz ile reflektörlü bir ölçüm yapılması gerekmektedir. Reflektörler 5 cm çapında *Retro-reflektif* hedef objeleridir. Yersel lazer tarayıcı, bu hedefleri otomatik olarak tanımaktadır. Bu sayede kamera ile çekilen hedefler aynı zamanda yersel lazer tarayıcı tarafından ölçüldükten sonra yazılımsal olarak eşleştirilmektedir (**Şekil 2**).



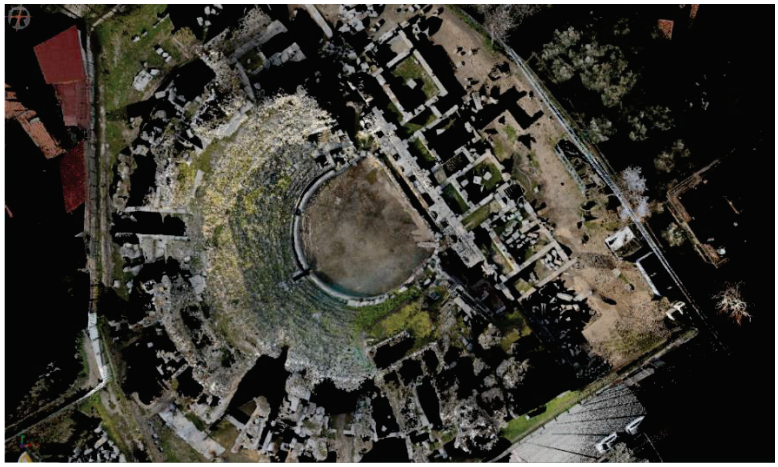
Şekil 2: Kamera ile çekilen hedefler ile yersel lazer tarayıcı tarafından yapılan ölçümlerin yazılımsal olarak eşleştirilmesi

3.2. Tarama Pozisyonlarının Hassasiyetinin Belirlenmesi

Tarama pozisyonları, ölçülmek istenen yüzeye göre aralarında çok mesafe bırakılmadan konumlandırılmaktadır. Diğer sistemlerin aksine ölçüm yapılırken reflektör ölçümüne ek olarak cihazın üzerinde bulunan tek frekanslı D-GPS kullanılarak pozisyonlar kabaca birbirlerine bağlı olarak ölçülmektedir. Hassasiyet, tarama pozisyonlarında önceden belirlenebilir bir değerdir. Bu değer 0,001 den 0,2 ye kadar ayarlanabilmekte olup, rakamlar tarayıcının kendi ekseni etrafında dönerken önceden belirlenmiş grad cinsinden adım aralıklarıdır. Adım aralıkları azaldıkça, ölçülen yüzeye düşen noktalar sıklaşmakta ve sayısı artmaktadır. Detay gerektiren yüzeylerde bu değer, yapılan bölgesel taramalarda 0,1 ayarında kullanılmıştır.

3.3. Veri İşleme Safhası

Veri bilgisayara aktarıldıktan sonra, cihazla birlikte gelen Riscan Pro yazılımında işlenmiştir (**Şekil 3**).



Şekil 3: Veriler

Bütün oturumlarda aynı süreç işletildikten sonra pozisyonların bağlantılarını kontrol etmek üzere birleştirilmiş veri üretilir ve bağlantı hataları bu veri üzerinden kontrol edilir. Eğer hata yoksa verinin çizime hazır halde getirilmesi için temizlenerek, istenilen formatlarda aktarılması gerekmektedir.

3.4. Ortho-Grafik Resimlerin Elde Edilmesi

Bu aşama Riscan Pro yazılımı ile yapılabildiği gibi, üçüncül yazılımlar ile de yapılabilir. Verinin detay niteliği ve boyutu, kullanılacak yazılımın seçiminde ana etkendir. İznik tiyatrosu özelinde detay gerektiren kısımlarda Luposcan 3D, aşınan yüzeylerde Bentley Pointools V8i yazılımı kullanılmıştır. Bu yazılım True Orho-Photo tekniğinden çok, Orho-Scan tekniğini kullanmaktadır. Bu iki tekniğin genel olarak birbirinden farkı; *True-Orhophoto ile resimlerin yüzey modeli üzerine doku giydirme ile yapılması ve *Ortho-Scan tekniğinde ise nokta bulutundan yüksek çözünürlükte ekran görüntüsü alınması şeklinde özetlenebilir (**Şekil 4, 5, 6)**.

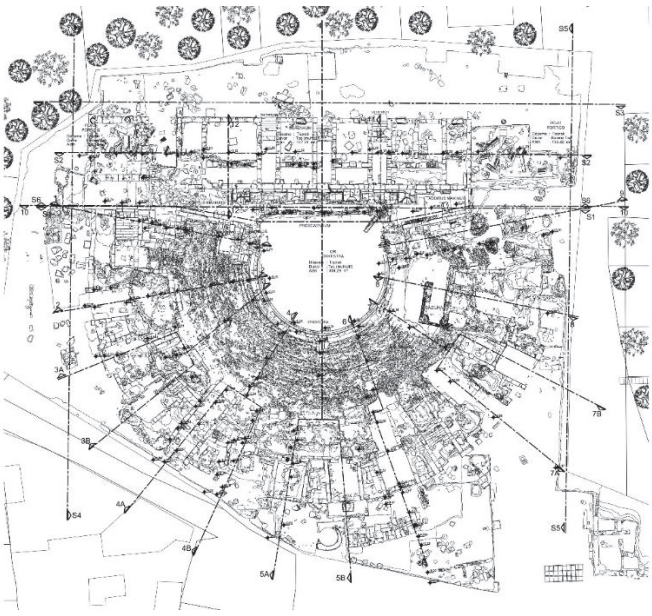
Şekil 4, 5: * True-Orhophoto ile * Ortho-Scan tekniğinde elde edilen görüntüler.

Şekil 6: Kavea bölümü.

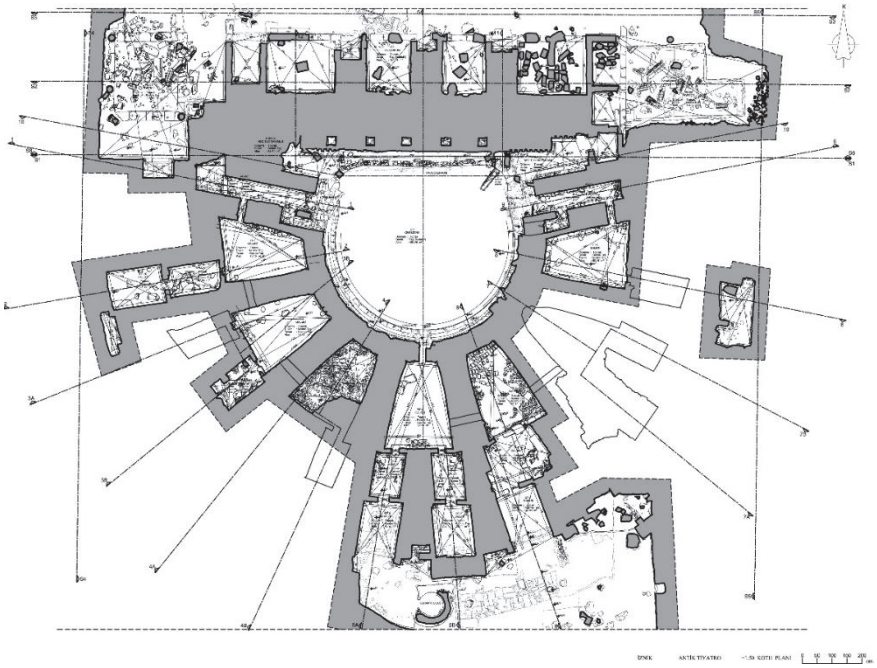
4. Rölöve Çizim Aşaması

İznik Roma Tiyatrosu'nun belgelenme sürecinde, üç boyutlu (3B) yersel lazer tarayıcı ile bu cihaza entegre şekilde çalışan yüksek çözünürlüklü kamera birlikte kullanılmıştır. Tarama işlemi sonucunda elde edilen yoğun nokta bulutu verisi üzerinden ortho-scan tekniği kullanılmıştır. Arazi çalışmaları kapsamında, yapının genel strüktürü ile mimari detaylarını belgelemek amacıyla çok sayıda yüksek çözünürlüklü fotoğraf çekilmiştir. Arkeolojik miras niteliği taşıyan bu anıtsal yapının bazı bölümleri henüz kazılmamış olduğundan, ölçüm ve belgeleme sürecinde bu alanlara erişim sağlanabilen boşluklardan sınırlı da olsa tarama yapılması hedeflenmiştir. Bu durum, kazılmamış alanlara dair veri ve bilgi elde edilmesine imkan sağlamıştır. Çizim sürecinde, doğrudan nokta bulutu verileri üzerinden çalışılarak, istenilen noktalardan ortofoto üretimi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, planların geçeceği kotların ve kesit düzlemlerinin belirlenmesinde nokta bulutu üzerinden çeşitli denemeler yapılmıştır. Bu doğrultuda, yapının mimari karakterini en iyi yansıtan yönlerden plan ve kesit çizimlerinin hazırlanmasına özen gösterilmiştir.

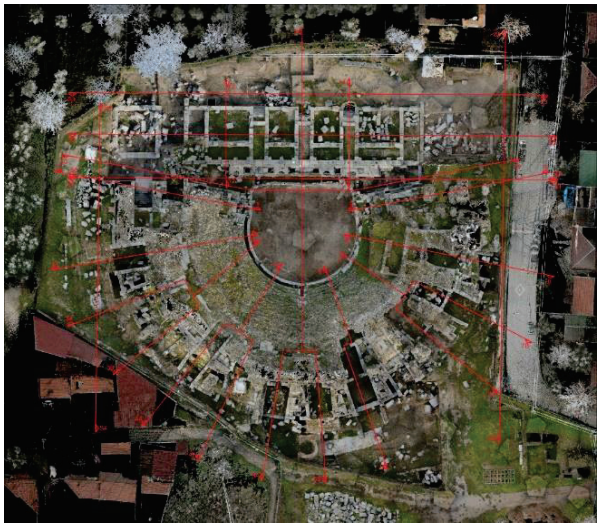
Çalışmalar kapsamında, yapıyı yakın çevresi ile birlikte gösteren vaziyet planı (**Şekil 7**), yapıyı tanımlayacak şekilde farklı kot ve düzlemlerden geçen planlar (**Şekil 8**), tavan planları, kesitler (**Şekil 9, Şekil 10**) ve siluetler (**Şekil 11)** hazırlanmıştır. Tiyatronun orkestra bölümünde bozulmadan günümüze ulaşan mermer korkuluğun alt kotunda yer alan profil hizası ±0.00 metre kotu olarak belirlenmiştir. Yapıda farklı kotlarda yer alan mekanların tanımlanması, pencere ve kapı boşluklarının gösterilmesi için 3 farklı kottan geçen plan hazırlanmıştır. İlk plan alt kottaki kapıları ve mekanları kesecek şekilde, +1.50 metre kotundan çizilmiştir. 2. plan, üst kottaki galeri mekanlarını kesecek şekilde +5.00 metre kotundan geçmektedir. 3. plan ise yapının tamamını yukarıdan görecek bir kottan (+15.50 m) bakılarak çizilmiştir. Kesit yerleri belirlenirken, yapının mimarisinin algılanmasının kolaylaştırılması amaçlanmıştır. Bu bağlamda tonozlardan geçen 9 adet kesit, batı yönden başlanarak, numaralandırılmıştır. 10. kesit ise analemna duvarlarına paralel olup, kaveaya karşıdan bakmaktadır. 11 ve 12 nolu kesitler skene'den geçmektedir. Yapının siluet yerleri belirlenirken, ilk 3 siluet hattı kuzey yönde skene bölümüne paralel olarak planlanmıştır. S4 yapının batı yönden, S5 hattı ise doğu yönden siluet çizimlerini içermektedir. S6 siluet hattı ise skene bölümüne güney yönden bakarak hazırlanmıştır (Kuleli, 2017).



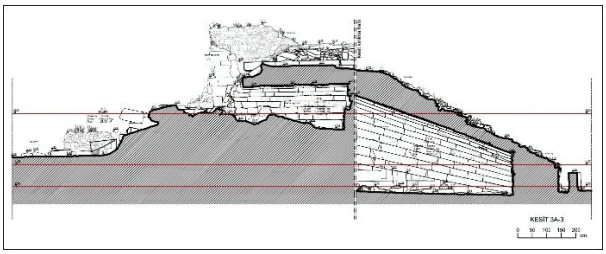
Şekil 7: Roma Tiyatrosunun vaziyet planı



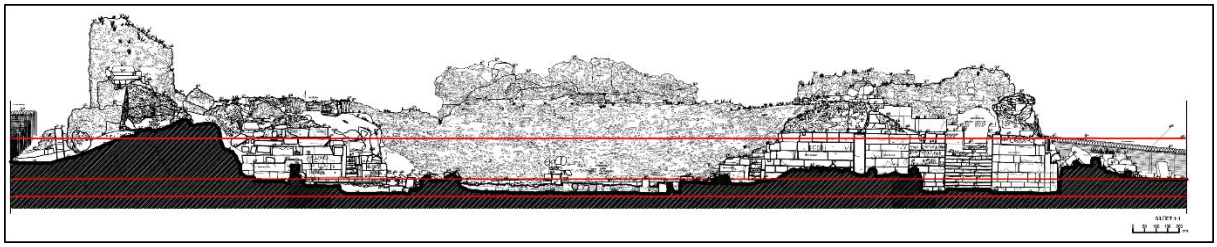
Şekil 8: Roma Şekil: Tiyatrosunun +1.50 kotu planı



Şekil 9: Tiyatro planında kesit yerleri



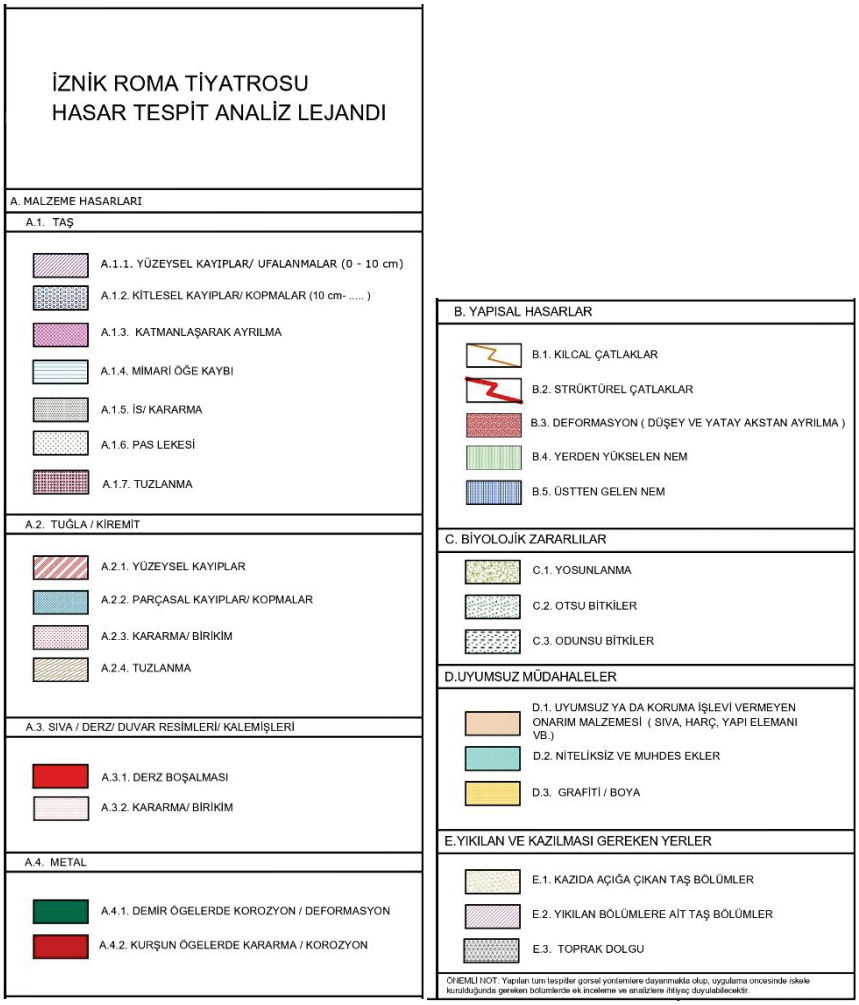
Şekil 10: 3A- 3 Kesiti



Şekil 11: Siluet 1- 1

4.1. Yapı Malzemelerinde Görülen Bozulma ve Sorunlara Yönelik Analiz Yöntemi

İznik Roma Tiyatrosu tarihi süreç içerisinde bölgede gerçekleşen depremlerden zarar görmüş, kapsamlı onarım müdahalelerine maruz kalmış ve yapının mimari kurgusu ve yapısal niteliği kısmen değişikliğe uğramıştır. Bu bağlamda kültür varlığı niteliği taşıyan yapının sorunlarının tespit ve analizi sürecinde, 4 ana başlık altında çalışılmıştır. Bu başlıklar, *malzeme hasarları, *yapısal hasarlar, *biyolojik zararlılar ve *uyumsuz müdahaleler olarak belirlenmiştir (**Şekil 12;** Kuleli, 2017).

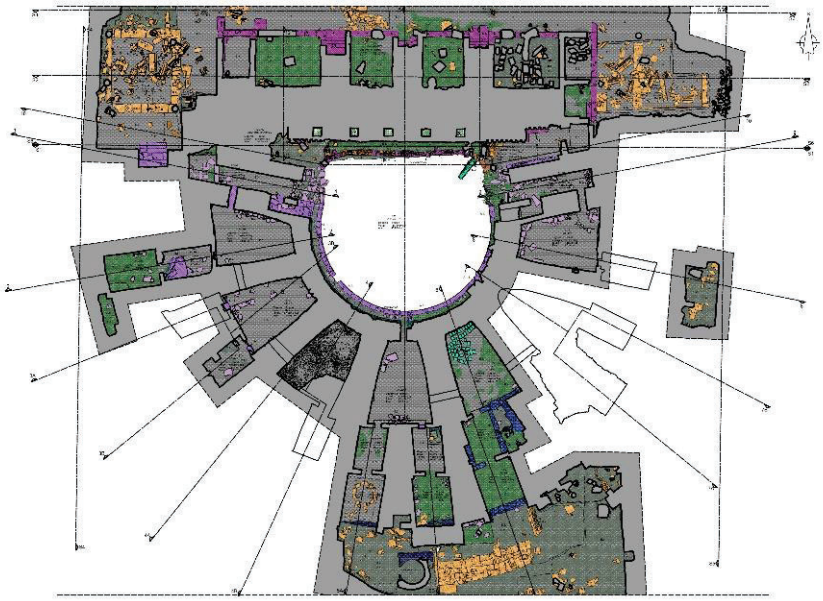


Şekil 12: Hasar Tespit Analiz Lejandı

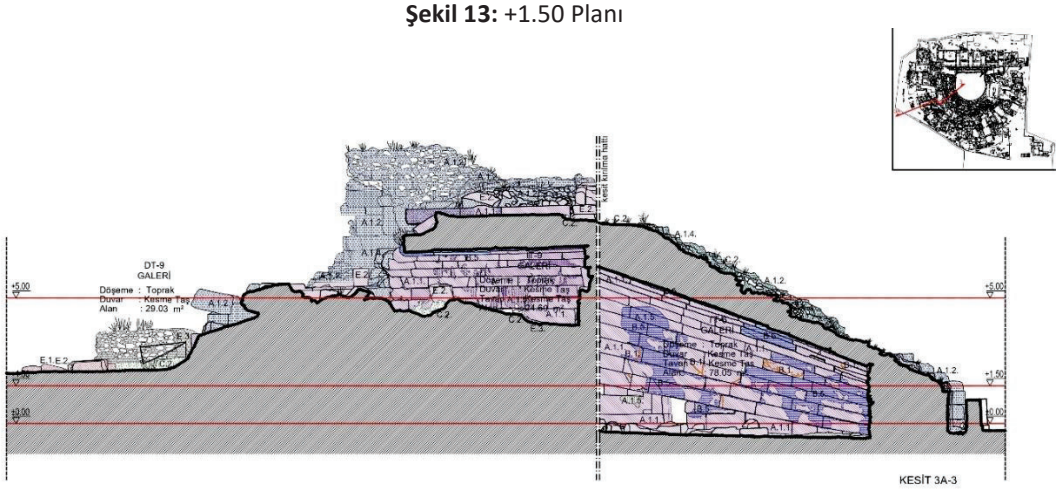
Arazide yapılan çalışmalar sırasında;

- Yapı yerinde görsel yöntemlerle incelenerek, edinilen bilgiler, analitik çizimler üzerine taramalar ve notlarla işlenmiştir.
- Bu süreçte yapının sorunlu olarak belirlenen bölgeleri detaylı şekilde fotoğraflanmıştır.

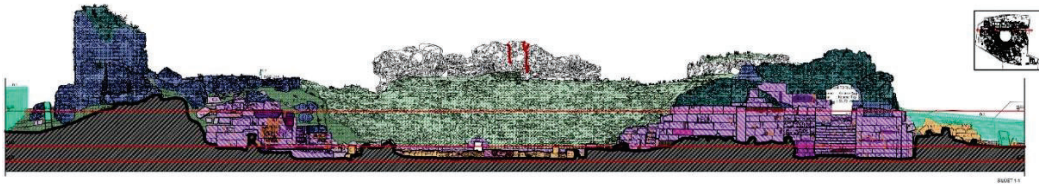
Arazide yapılan çalışma sonucunda tespit edilen sorunlar, ofise dönüldüğünde bilgisayar ortamında ve 'Mapping Yöntemi' (haritalandırma) kullanılarak, analiz çizimleri üzerine aktarılmıştır. Mapping yönteminde her bir sorun ve yapısal hasar ayrı bir renkte tarama ile gösterilmiş ve bu taramalar antet üzerinde sorunların ayrıntılandırıldığı bir lejant ile tanımlanmıştır. Böylece yapının çeşitli bölgelerinde oluşan, benzer ve farklı sorunların tespit edilmesi amaçlanmıştır (**Şekil 13, 14, 15)**.



Şekil 13: +1.50 Planı



Şekil 14: Kesitler



Şekil 15: Siluetler

5. Sonuçlar

Türkiye, tüm bölgelerinde zengin ve çok katmanlı kültürel mirasa sahiptir. Bu kültürel varlıkların korunması, yalnızca uzmanların değil, tüm bireylerin ortak sorumluluğundadır. Koruma sürecinin ilk aşamasını oluşturan belgeleme çalışmaları, anıtların özgün niteliklerinin doğru yöntemlerle kayıt altına alınmasını gerekli kılmaktadır. Günümüzde, pek çok tarihî yapı ve alan üç boyutlu (3B) yersel lazer tarayıcılar aracılığıyla belgelenmekte ve bu süreci destekleyici çeşitli dijital yöntemler uygulanmaktadır. Söz konusu teknolojiler; yapıların sayısal ortamda belgelenmesine, dijital arşivlerin oluşturulmasına olanak tanımasının yanı sıra, yüksek hassasiyetli ölçüm, hızlı veri toplama, zarar görmüş ya da ulaşılması güç bölgelere temas etmeksizin erişim gibi önemli avantajlar sunmaktadır. Ancak tüm bu çıktının sağlıklı ve güvenilir olabilmesi, tarama cihazlarının uygun koşullarda ve alanında uzman ekiplerce kullanılmasıyla mümkündür.

Bu kapsamda, Bursa ilinin kuzeydoğusunda, İznik Gölü kıyısında konumlanan ve M.S. 2. yüzyıla tarihlendirilen İznik Roma Tiyatrosu'nun üç boyutlu (3B) yersel lazer tarayıcı ile belgelemesi gerçekleştirilmiş; yapı üzerinde analitik rölöve

çalışmaları yürütülmüştür. Arazi çalışmaları sonucunda elde edilen veriler bilgisayar ortamına aktarılmış, 3B nokta bulutu ve ortoscan görüntüleri üzerinden yapının farklı kotlardaki planları, kesitleri ve siluet çizimleri hazırlanmıştır. Belgeleme süreci sırasında, yapının bazı bölümleri henüz kazılmamış olduğundan, bu alanlara erişim sağlanabilen boşluklardan sınırlı da olsa tarama yapılabilmiş; bu sayede kazılmamış bölgelere ilişkin veri ve bilgi elde edilmesi mümkün olmuştur. Elde edilen bu veriler, üretilen çizimlere yansıtılmıştır. Yapının mevcut durumuna ilişkin sorun analizleri ise dört ana başlık altında ele alınmıştır: *malzeme bozulmaları, yapısal hasarlar, biyolojik etkiler* ve *uyumsuz müdahaleler.* Belirlenen sorunlar, sayısal ortamda 'haritalama (mapping) yöntemi' kullanılarak analiz çizimlerine aktarılmış ve yapı üzerindeki konumları grafiksel olarak gösterilmiştir.

Tarihsel süreçte bölgede meydana gelen depremlerden zarar gören yapı, farklı dönemlerde çeşitli onarım müdahalelerine maruz kalmış ve bu müdahaleler sonucunda tiyatronun özgün mimari özellikleri kısmen değişikliğe uğramıştır. Çok katmanlı bir kültürel varlık niteliği taşıyan yapının farklı dönemlere ait mimari katmanları belgeleme sürecinde belirlenmiş; söz konusu katmanların tarihsel gelişimi ve değişimi, restitüsyon araştırmaları kapsamında analiz edilmiştir.

Tiyatronun ölçüm ve belgeleme sürecinde elde edilen sonuçlar ile üretilen analitik rölöve çizimleri, geleneksel yöntemlerle yürütülen çalışmalarla karşılaştırıldığında, sürecin çok daha sağlıklı, ayrıntılı ve hızlı bir şekilde tamamlandığı gözlemlenmektedir. İznik'in en önemli tarihî yapılarından biri olan Roma Tiyatrosu'nun belgelenmesinde kullanılan üç boyutlu (3B) yersel lazer tarama yöntemi aracılığıyla elde edilen 3B nokta bulutu, ortofoto, ortoscan ve 360 derece panoramik fotoğraflar gibi çıktılar, yalnızca yapının ayrıntılı biçimde belgelenmesine olanak sağlamakla kalmamış; aynı zamanda ileride gerçekleştirilecek restitüsyon ve restorasyon çalışmalarına yönelik güvenilir bir veri altyapısının oluşturulmasına da katkı sunmuştur. Söz konusu yöntem, erişimi güç alanlardaki mimari detayların kayda geçirilmesini mümkün kılmakta; bu sayede restitüsyon kapsamında yürütülecek analojik karşılaştırmalara katkı sağlamaktadır. Aynı zamanda, yapıda mevcut olan hasarların tespitine imkân vererek, müdahale gerektiren sorun alanlarının belirlenmesinde de etkili olmaktadır. Bu bağlamda, büyük boyutlu arkeolojik miras niteliği taşıyan anıtsal yapıların belgelenmesinde ve rölöve çizimlerinin hazırlanmasında 3B yersel lazer tarama teknolojisinin uygun ve nitelikli bir yöntem olduğu değerlendirilmektedir. Bu çalışmada, söz konusu yöntemle gerçekleştirilen ölçüm ve belgeleme süreci aktarılmakta; süreç boyunca üretilen veriler doğrultusunda hazırlanan rölöve çizimleri, hasar analizleri ve diğer görsel belgelerin bir kısmı örnek olarak sunulmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesi sürecinde, 3B tarama, veri işleme ve modelleme aşamalarında teknik destek sunan Y.Mimar Rest. Uzm. Zilan Doğan Özcan koordinasyonunda çalışan Sema Mimarlık Ltd. Şt. ekibine, tiyatro ile ilgili çalışma ve erişim izni için Bursa Büyükşehir Belediyesi ve İznik Müze Müdürlüğüne minnettarlığımı sunarım. Ayrıca, koruma projesinin hazırlanması çalışmaları sürecinde destekleri için danışmanlarımız Doç. Dr. Aygün Ekin Meriç, Doç. Dr. Ali Kazım Öz, Doç. Dr. Nezihat Köşklük Kaya ve Doç. Dr. Zeynep Aktüre'ye değerli rehberlikleri için özel olarak teşekkür ederim. Son olarak bu çalışmanın şekillenmesinde ve tamamlanmasında emeği geçen tüm çalışma arkadaşlarıma, proje ekibimize gönülden teşekkür etmek isterim.

KAYNAKLAR

Andrews, D., Bedford, J. & Young, G. (2024). *Geospatial Survey Specifications for Cultural Heritage*, York. Historic England. HistoricEngland.org.uk/images-books/publications

Alberto Da Villa, G., Zara, A., Faresin, E., Bonetto, J., Miele, C., & Persichetti, A. (2024). *Methods and tools for*

Garnero, G., Godone, D., & Bacciocchi, M. (2010). *The Employment of Terrestrial Laser Scanner in Cultural Heritage Conservation: The Case Study of Vallinotto Chapel in Carignano-Italy*, Applied Geomatics, vol. 2 issue. (2): pages 59-63. https://link.springer.com/article/10.1007/s12518-010-0018-9, https://doi.org/1007/s12518-010-0018-9

Kuleli, A. E. (2017). İznik Roma Tiyatrosu Rölöve ve Ölçüm Raporu&İznik Roma Tiyatrosu Restitüsyon Raporu, Bursa Kültür Varlıklarını Koruma Bölge Kurulu Müdürlüğü Arşivi.

Kuleli, A. E. (2018). Kostaki Konağının Mimari Özellikleri ve Günümüzdeki Kullanımı Üzerine Bır Araştırma, TÜBA-KED

Türkiye Bilimler Akademisi Kültür Envanteri Dergisi, issue. (18): pages 59-63. https://doi.org/10.22520/tubaked.2018.18.009

Morandotti, M., & Doria E. (2023). *Information system as tool for Cultural Heritage documentation and preservation. Protocol structuring and testing on a case study,* The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, *Documenting, Understanding, Preserving Cultural Heritage: Humanities and Digital Technologies*

for Shaping the Future, Volume XLVIII-M-2-2023 29th CIPA Symposium, 25–30 June 2023, Florence, Italy, (pp. 1081-1088). https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-1081-2023

Pliny. (1969). *Pliny the Younger, Letters, Volume II: Books 8-10, Panegyricus, (Translated by B. Radice)*. Loeb Classical Library 59, MA: Harvard University Press, Cambridge

Schneider, A. M., & Karnapp, W. (1938). *Die Stadtmauer von Iznik (Nicaea)*, Istanbuler Forschungen 9, Berlin.

Texier, C. (1962). *Asie Mineure Description Geographigue Historigue Et Archeologiue*, Paris.

Yalman, B. (2006). *2006 Yılı İznik Tiyatro Kazısı*, 29. Kazı Sonuçları Toplantısı 3. Cilt, S. 37- 54.

MSTAS 2025 MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Tarihi Yapılarda Dijital Teknolojilerin Koruma Amaçlı Kullanımı: Nero Hamamı Örneğinde Fotogrametri, LIDAR ve HBIM Entegrasyonu

Merve Şule Yörük [1]; Salih Ofluoğlu[2]
[1,2]Antalya Bilim Üniversitesi
[1]yorukmervesule@gmail.com; [2]salih.ofluoglu@antalya.edu.tr

Özet

Tarihi binaların belgelenmesi, korunması ve yönetiminde dijital teknolojilerin kullanımı giderek yaygınlaşmakta; bu bağlamda Heritage Building Information Modeling (HBIM) sistemleri önemli bir araç haline gelmektedir. HBIM, sadece görselleştirme değil, aynı zamanda veri depolama, koruma planlaması ve yapısal analiz gibi işlevleri de içeren bütüncül bir dijital platform sunmaktadır. Bu çalışma, arkeolojik mirasın belgelenmesi ve sürdürülebilirliğinin yönetimi açısından HBIM'in potansiyelini değerlendirmekte ve Patara Antik Kenti'ndeki Nero Hamamı örneği üzerinden yöntemin uygulanabilirliğini tartışmaktadır.

Nero Hamamı üzerinde yapılan çalışmada, yapı LİDAR ve İHA teknolojileriyle taranmış, elde edilen veriler nokta bulutlarına ve mesh modellere dönüştürülmüştür. Bu sayede yapının mevcut durumu dijital olarak belgelenmiş, hasarlı alanlar tanımlanmış ve rekonstrüksiyon süreci için bir altlık elde edilmiştir. Parametrik modelleme süreci Rhinoceros ve Autodesk Revit programları aracılığıyla gerçekleştirilmiş, yapının eksik elemanları dijital ortamda NURBS yüzeyleri yardımıyla oluşturulmuştur. Bu süreçte yapı elemanlarına işlev ve konumlarına uygun malzeme atamaları yapılarak, rekonstrüksiyonun gerçekliğe yakınlığı artırılmıştır.

HBIM'in sağladığı semantik modelleme ve veri yönetimi olanakları, sadece fiziksel koruma değil aynı zamanda yönetim, planlama ve restorasyon kararlarını yönlendirebilecek kapsamlı bilgi sistemleri oluşturmaktadır. Literatürdeki örneklerle karşılaştırıldığında, HBIM'in çok disiplinli çalışmaya olanak tanıyan yapısı, geleneksel yöntemlerin ötesinde sürdürülebilir çözümler üretme kapasitesini ortaya koymaktadır. Özellikle yüzey dokularının doğru temsili, model doğruluğu, ölçüm hassasiyeti ve sanal gerçeklik entegrasyonu açısından HBIM sistemleri ilgili alana yenilikçi fırsatlar sunmaktadır. Söz konusu çalışmada Nero hamam yapısının Frigidarium (soğukluk), Tepidarium (ılıklık) ve Caldarium (sıcaklık) olmak üzere üç ana mekânı parametrik modeller ve mesh modeller kullanılarak temsil edilmiştir. Yapının yıkılmış ve hasarlı bölgeleri analiz edilerek model üzerine işlenmiştir. Ardından belirlenen rekonstrüksiyon kararları doğrultusunda yeni NURBS elemanları oluşturularak mekânın tamamlaması yapılmıştır. Mesh modelden referans alınan noktalar doğrultusunda eksik yapı elemanları tespit edilerek öncelikle 2 boyutta bir yüzey elde edilmiş sonrasında yüzey genişletilerek 3. boyuta taşınmıştır. Üretilen yapı elemanları mekânın ait olduğu bölge ve işleve göre malzeme atamaları yapılarak rekonstrüksiyon temsilleri tamamlanmıştır.

HBIM araçları kullanılarak elde edilen modelde miras yapısının arkeolojik kazı sonrası ham hali ve rekonstrüksiyon uygulanmış hali belgelenmiştir. Böylece yapının dijital ortamda bir kopyası üretilmiştir. Söz konusu temsil miras yapılarının koruma alanı için hem belgeleme hem de restorasyon ve rekonstrüksiyonu içinde barındıran konservasyon çalışmalarının uygulama süreci için yönlendirici olup planlama ve yönetim aşamaları için bir altlık oluşturmaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışma HBIM'in tarihi yapıların dijital ortamda belgelenmesi, analiz edilmesi ve korunmasına yönelik etkinliğini dijital araçların potansiyelini karşılaştırarak ortaya koymakta; disiplinler arası bir yaklaşımla kültürel mirasın sürdürülebilir yönetimi için dijital temelli stratejilere katkı sağlamaktadır. HBIM'in gelişen teknolojiyle desteklenerek daha geniş bir uygulama alanına yayılması beklenmektedir.

Anahtar Kelimeler: *Arkeolojik Miras, Dijital Belgeleme, Tarihi Yapı Bilgi Modellemesi (HBIM), Dijital Rekonstrüksiyon.*

2025 MSTAS MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Digital Technologies in Heritage Conservation: A Case Study on the Integration of Photogrammetry, LiDAR, and HBIM in the Nero Bath

Merve Sule Yoruk[1]; Salih Ofluoglu[2]
[1,2] Antalya Bilim University
[1]yorukmervesule@gmail.com; [2]salih.ofluoglu@antalya.edu.tr

Abstract

The use of digital technologies in the documentation, conservation, and management of historical buildings is becoming increasingly widespread; in this context, Heritage Building Information Modeling (HBIM) systems are emerging as significant tools. HBIM offers a comprehensive digital platform that encompasses not only visualization but also data storage, conservation planning, and structural analysis. This study evaluates the potential of HBIM in the documentation and sustainable management of archaeological heritage and discusses the applicability of the method through the case study of the Nero Bath in the ancient city of Patara.

In the study conducted on the Nero Bath, the structure was scanned using LiDAR and UAV technologies, and the obtained data were converted into point clouds and mesh models. In this way, the current condition of the structure was digitally documented, damaged areas were identified, and a foundation was established for the reconstruction process. The parametric modeling process was carried out using Rhinoceros and Autodesk Revit software, and the missing architectural elements were digitally recreated with the aid of NURBS surfaces. During this process, materials were assigned to structural components in accordance with their function and location, enhancing the realism of the reconstruction.

The semantic modeling and data management capabilities provided by HBIM create comprehensive information systems that guide not only physical conservation but also management, planning, and restoration decisions. Compared to examples in the literature, HBIM's capacity for multidisciplinary collaboration demonstrates its ability to offer sustainable solutions beyond traditional methods. Particularly in terms of accurate surface texture representation, model precision, measurement accuracy, and virtual reality integration, HBIM systems offer innovative opportunities to the field. In this study, the three main spaces of the Nero Bath—Frigidarium (cold room), Tepidarium (warm room), and Caldarium (hot room)—were represented using parametric and mesh models. Collapsed and damaged areas of the structure were analyzed and incorporated into the model. Subsequently, in line with the established reconstruction decisions, new NURBS elements were created to complete the spaces. Based on reference points from the mesh model, missing architectural components were first defined in two dimensions, then extended into three dimensions. The produced structural elements were assigned materials according to their respective zones and functions within the space, thereby finalizing the reconstruction representations.

The model generated through HBIM tools documents both the post-excavation raw state and the reconstructed state of the heritage structure. Thus, a digital replica of the building was produced. This representation serves as a guide for the implementation of conservation practices that encompass documentation, restoration, and reconstruction within the field of heritage preservation, providing a foundation for planning and management processes.

In conclusion, this study demonstrates the effectiveness of HBIM in the digital documentation, analysis, and conservation of historical buildings by comparing the potential of digital tools. It contributes to digitally based strategies for the sustainable management of cultural heritage through an interdisciplinary approach. It is anticipated that HBIM will expand into a wider field of application with the support of advancing technology.

Keywords: *Archaeological Heritage, Digital Documentation, Heritage Building Information Modeling (HBIM), Digital Reconstruction.*

1. Giriş

Kültürel miras, dünya tarihi açısından bir hafıza işlevi görmektedir. Tarihi yapı mirası, bir bölgenin tarihini tanımlayan, geçmişin bir oluşumu olmakla birlikte gelecek için korunması ve saklanması gereken ortak bir değeri temsil etmektedir. Miras yapılarının korunma süreci, on dokuzuncu yüzyılda yaygınlaşan kazı çalışmaları ve yirminci yüzyılda ortaya çıkan yöntemlerle birlikte daha sistematik ve bilinçli bir hale gelmiştir. Ülkeler, yalnızca kendi sınırları içindeki miras yapılarını korumakla kalmamış, dünya genelindeki diğer kültürel miras yapılarının da korunması amacıyla uluslararası kurumlar oluşturmuş ve bu kurumlar aracılığıyla restorasyon süreçlerini yönetmişlerdir. Birleşmiş Milletler öncülüğünde 1946'da UNESCO, 1959'da ICCROM ve 1965'te ICOMOS kurulmuştur (Akın & Erdoğan, 2022). Söz konusu oluşumlar, kültürel mirasın koruma çalışmalarını sistematize etmeyi hedefleyerek miras değerlerini ulaşılabilir veriler halinde günümüze yeniden sunmaktadır.

Kültürel mirasın korunmasında ilk ve en kritik adım, bilimsel yöntemlerle yapıların detaylı biçimde belgelenmesidir. Mimarlığın temel iletişim yöntemi olan görselleştirme, belgeleme sürecinin büyük bir kısmını kapsamaktadır (Ekinci, 2021). Arkeolojik miras alanı incelendiğinde antik yapıların çoğunlukla derin dönüşümler geçiren düzensiz morfoloji ve geometrilerle karakterize edildiği görülmektedir (Sarıcıoğlu, 2021). Her biri özgün planlardan oluşan mimari yapıların farklı el işçilikleriyle inşa edilmesi, yapısal kategorizasyonu zorlaştırmaktadır. Bu da yapının fiziksel durumunu dijitale aktarılmasında yeni araçların aranmasını neden olmuştur.

Gelişen teknolojiler, kültürel mirasın belgelenmesinde modern yöntemlerin daha pratik ve etkili biçimde kullanılmasını mümkün kılmıştır. Bu bağlamda, restorasyon ve sanal depolama araçlarındaki gelişmeler, Tarihi Bina Bilgi Modellemesi (HBIM) sistemini öne çıkarmaktadır. HBIM, yapısal mirasın belgelenmesi, bakım süreçlerinin takibi ve çok disiplinli iş birliği olanakları sunarak koruma alanında bütüncül bir yönetim modeli sağlamaktadır (Intrigila vd., 2024). HBIM ile oluşturulan 3B modeller, yapı elemanlarının geometrik formları ve doku verileriyle bütünleştirilerek mimari analiz, hasar tespiti ve konservasyon planlaması için temel veri sağlar. Bu sistem, lazer ve fotogrametrik taramalardan elde edilen verilerin; inşaat teknikleri, malzeme bilgileri ve arkeolojik dokümantasyonla entegre edildiği bir dijital veri tabanı oluşturmaktadır. Çalışmanın amacı, çok katmanlı arkeolojik bağlamların temsil, analiz ve yönetimi için metodolojik bir yaklaşım geliştirmektir. Bu kapsamda Agisoft Metashape, Autodesk Recap Pro ve 3D Scanner yazılımları ile nokta bulutu verileri elde edilmiş; bu veriler, 3B modelleme süreci için Autodesk Revit ve Rhinoceros yazılımlarına aktarılmıştır. Revit, özellikle teknik bilgi (boyut, metraj, malzeme) odaklı çalışmalarda tercih edilirken; Rhinoceros, görsel modelleme ve mimari tamamlamalar açısından daha esnek bir platform sunmuştur. HBIM tabanlı belgeleme süreci, bağlamın derinlemesine anlaşılmasını ve disiplinler arası iş birliğini kolaylaştıran semantik modellerin üretimini destekleyerek, arkeolojik araştırma ve koruma uygulamalarının bütüncül biçimde sürdürülebilirliğine katkı sağlamaktadır.

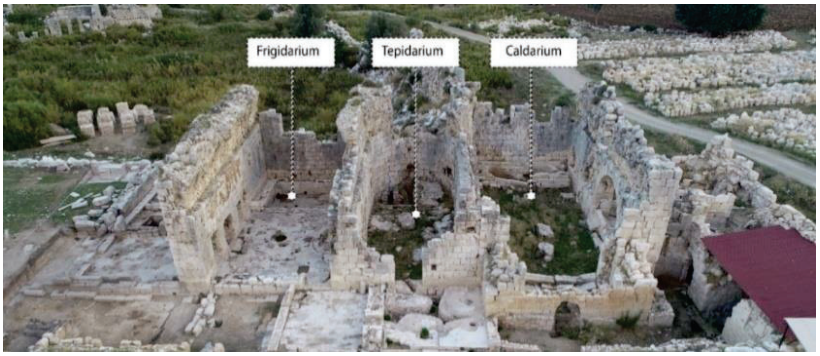
1.1. Nero Hamam Yapısı

Bu çalışma, birinci derecede arkeolojik sit alanında yer alan Nero hamam yapısı üzerinde gerçekleştirilmiştir **(Şekil 1)**. Antalya iline bağlı Kaş ilçesinin Gelemiş köyü yakınlarında konumlanan Patara Antik Kenti içerisinde yer alan Nero Hamamı, bölgenin önemli yapılarından biridir. M.Ö. 8–7. yüzyıllardan itibaren iskân edildiği düşünülen Patara (Öner, 1997), Antik Dönem'de Likya Bölgesi'nin idari merkezi olarak stratejik bir rol üstlenmiştir. Batısında Sinus Glaucos (Fethiye Körfezi), doğusunda ise Mare Pamphylium (Antalya Körfezi) bulunan kent, kuzey Akdeniz'de ticari faaliyetlerin yürütülmesini sağlayan elverişli bir limana sahipti. Bu liman yalnızca kentin ekonomik temellerini oluşturmakla kalmamış, aynı zamanda farklı uygarlıklarla kurulan ilişkiler sayesinde kültürel ve sosyal etkileşimi de teşvik etmiştir. Ancak, MS 15. ve 16. yüzyıllarda Ksanthos Çayı'nın taşıdığı alüvyonlar sonucunda liman zamanla dolarak bataklık hâline gelmiş; bu gelişme kentin ekonomik işlevselliğini yitirmesine ve zamanla canlılığını kaybetmesine neden olmuştur. Likya bölgesinde günümüze ulaşan en erken tarihli hamam yapısı olarak kabul edilen Nero Hamamı, bu yönüyle bölge mimarlığı açısından dikkat çekici bir örnek teşkil etmektedir (İşkan, 2020). Yapı, Patara kent planlaması içinde tiyatro ve meclis binası aksını takip eden devlet agorasının kuzeydoğu ucunda, liman caddesinin yaklaşık 60 metre doğusunda konumlanmaktadır (Koçak & Şahin, 2020). Nero Hamamı, bulunduğu bu stratejik konum sayesinde kentsel dokunun bütüncül yapısı içerisinde önemli bir işlev üstlenmiştir.

Şekil 1: Nero Hamamı kuş bakışı görüntüsü

Nero hamamı, Frigidarium (soğukluk), Tepidarium (ılıklık) ve Caldarium (Sıcaklık) olmak üzere üç ana mekândan oluşmaktadır **(Şekil 2)**. Yapıya uygulanan dönemsel eklemeler, farklı işlev ve boyutlardaki mekanlar kompleks bir hamam yapısı olduğunu göstermektedir (Koçak ve Şahin, 2020). Mekanlar arası geçişler dönemsel olarak ihtiyaç duyulan sayıda ve boyutta değiştirildiği yapının mevcut izlerinden anlaşılmaktadır.

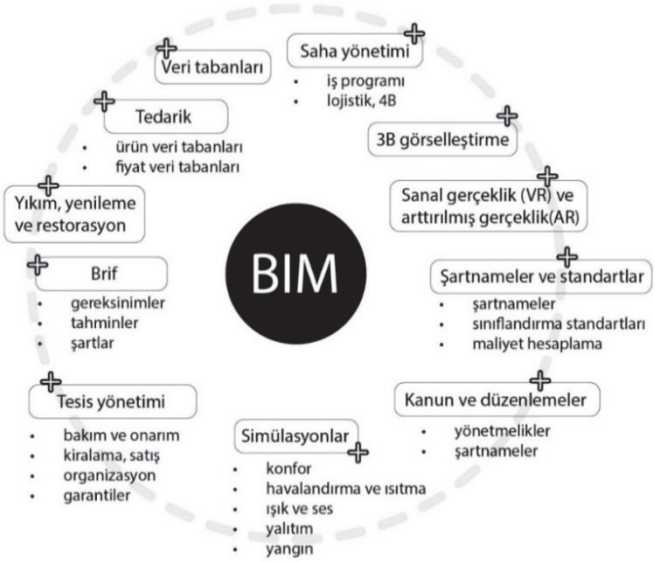
Nero hamam yapısında da gözlemlendiği gibi miras yapılarında dönemsel değişimler günümüz koruma çalışmaları için mimarilerinin çözümlemesini etkilemektedir. Bu nedenle doğru ve pratik belgeleme yapmak söz konusu alan ve disiplinler için önemlidir (Duran ve Toz, 2010).



Şekil 2: Nero hamamı, güneydoğu perspektifi

2. HBIM ve Tarihi Yapıların Modelleme Sürecinde Kullanılan Yöntemler

Miras yapılarının sanal ortama aktarılmasında mimari detayların veri eksikliği sebebiyle açısal, geometrik ya da sayısal sapmalar olabilmektedir. Farklı zamanlardaki uygulamalar inşaat tekniklerinin çeşitliliğini arttırmaktadır. Bu çeşitlilik yapısal çözümü zorlaştıran parametreler arasındadır. Yapı elemanlarının niteliklerine göre sınıflandırılması bu çözümleme katkı sağlayacak bir adım olabilir. Sınıflandırılan elemanlar dijital ortamda parametrik nesneler olarak üretilerek kütüphane haline getirilmesi, veri toplama ve üretmek için hızlı bir çözüm sunmaktadır. HBIM ile oluşturulan kütüphanelerin kullanımı, BIM sistemini miras koruma alanında yaygınlaşmasını sağlayarak söz konusu alanda ortak bir dil kullanımına da öncülük edebilir. Bununla birlikte HBIM'in son aşaması olarak paylaşılan bilgiler, miras yapısı, zaman ve maliyet hesaplamaları, enerji simülasyonları, bakım, onarım ve müdahaleler süreçleriyle ilgili çalışmalar hakkında tarihsel analizlerin yapılma potansiyeline sahiptir. Bununla birlikte HBIM modeli elde edildiğinde, dijital modele entegre edilen veriler farklı disiplinler tarafından kullanılabilir (Benli vd., 2023).



Şekil 3: BIM sistemi kullanım alanları

2.1. Varolan Çalışmalar

Miras Yapı Bilgi Modellemesi (HBIM), gelişmiş 3B modelleme ve heterojen bilgilendirici verilerin birleşimini kullanarak tarihi yapı mirasının bilgi, koruma ve değerlendirme süreçlerini desteklemek için tutarlı bir yaklaşımdır. 1990'lı yılların ortalarından itibaren ağırlıklı olarak görselleştirme amaçlı geliştirilen 3B modelleme araçları, zamanla mekânsal analiz, karar destek sistemleri ve planlama gibi çok daha kapsamlı işlevlere evrilmiştir. Bu bağlamda, tarihi yapıların belgelenmesi, korunması ve dijital ortamda yeniden inşası süreçlerinde de önemli bir araç hâline gelmiştir. Özellikle Tarihi Bina Bilgi Modellemesi (HBIM), tarihi yapıların dijital ikizlerinin oluşturulmasında, detaylı veri yönetimi ve sürdürülebilir koruma stratejilerinin geliştirilmesinde merkezi bir rol üstlenmektedir (Sewasew vd., 2024). Dijital teknolojilerin hızlı gelişimi, özellikle üç boyutlu (3B) modelleme uygulamalarının artması, çalışmalara pratiklik kazandırmakla birlikte yöntemsel karmaşaya da yol açmaktadır (Jordan-Palomar vd., 2018). Araçların stratejik kullanımı ilgili disiplinler tarafından belirlenerek söz konusu araçların sınıflandırılması yapılabilir. Bu çalışmada, HBIM yaklaşımı çerçevesinde tarihi yapıların modellenmesinde kullanılan güncel araçlar ele alınmakta ve bu araçların koruma süreçlerine olan katkısı değerlendirilmektedir. Literatür incelendiğinde HBIM sistemleri ve dijital araçların koruma alanındaki çeşitliliği gözlemlenmektedir. Costantino vd. (2023) söz konusu belgeleme yöntemi için veri tabanı kurmak üzere kültürel miras değeri olan bir kilise yapısı için 3B model üreterek mimari yapı elemanlarını kategorize etmişlerdir. Bu kategorizasyonu Rhino ortamında NURBS yüzeyleri kullanarak oluşturulan parametrik nesnelerle sağladıkları görülmektedir. Önerilen sistemde mimari elemanlar geometrileriyle birlikte tarihi bir veri tabanının karşılık gelen nitelikleriyle de temsil edilmektedir. Böylelikle bir binadaki geometriler, malzemeler, bozulma durumu, tarihi evreler ve tasarım müdahaleleri üç boyutlu bir model üzerinde yönetilebilir. Lucchi ve Agliata (2023) yaptığı çalışmada PV teknolojisini (Fotovoltaik Teknoloji) tarihi binalar için kullanarak sürdürülebilir restorasyon önerisinde bulunmaktadır. Projenin bakım ve yönetimi için Autodesk Revit yazılımı kullanılarak nesne kütüphanesi oluşturulmuş ve yapısal analizler doğrultusunda PV sistem yapıya entegre edilmiştir. Başka bir çalışmada Curra vd. (2022), Tivoli'deki Eski Segrè Kâğıt Fabrikası ve Hercules Tapınağı üzerinde çalışarak, bu yapıların fiziksel, tarihî ve işlevsel evrimlerini dijital ortamda modellemeyi amaçlamıştır. Endüstriyel ve arkeolojik mirası belgelemek ve yönetmek için HBIM yaklaşımı kullanılmış; veri toplamada İHA'lar ve fotogrametriyle elde edilen nokta bulutları, Autodesk Revit ve Navisworks yazılımlarında işlenmiştir. Yapıların tarihsel gelişimini zamansal (4B) olarak yansıtmak için işlevsel sınıflandırmalarla birim modeller oluşturulmuştur.

2.2. Nero Hamamı: Metodolojinin Belirlenmesi

Miras yapılarının sürdürülebilirliği için koruma verilerinin yönetimi, konservasyon ve bakım çalışmaları için erişilebilir bir bilgi ağının geleneksel yöntemlere entegre edilmesi gerekmektedir (Penjor vd., 2024). Söz konusu ağı üretmek için Nero hamam yapısı kapsamında yapılan çalışmada uygulanacak adımlar; nokta bulutu, mesh model ve pre-BIM model şeklinde sıralanmıştır. Nokta bulutu modeli, fiziksel ortamdaki verileri x,y,z eksen bilgileri ve dokusuyla noktalar halinde temsil etmektedir. Ardından noktalar birleştirilerek yapının bütüncül geometrisi yani mesh model

elde edilmiştir. Konservasyon çalışmalarını modellemek için elde edilen mesh model altlık olarak 3B model araçlarına aktarılmıştır. Böylece miras yapısının dijital ortamda yeniden inşa edilerek belgelemenin ana verisi oluşturulmuştur.

3. LİDAR ve İHA Taramalarının Veri Toplama Sürecindeki Rolü

Modelleme sürecinin ilk aşamasında, yapının tarihsel belgeleri, arşiv fotoğrafları ve çizimlerine dayalı ön dokümantasyon yapılmıştır. Mevcut durumu belgelemek amacıyla, İHA destekli fotogrametri ve LİDAR tabanlı yer taramaları ile yapıdan yoğun bir nokta bulutu elde edilmiştir. Çekimler ızgara ve dairesel rotalarla planlanarak yapının tüm yönleriyle taranması sağlanmıştır. Toplanan veriler Agisoft Metashape ve Autodesk Recap Pro yazılımlarıyla işlenmiş, fotogrametri ile nokta bulutu ve ardından mesh modeller oluşturulmuştur. LİDAR, özellikle karmaşık geometrilerde daha yüksek doğruluk sunduğundan tercih edilmiştir. Ayrıca iPad Pro (2020) ile LİDAR sensörlü mobil tarama yapılarak Polycam ve 3D Scanner uygulamalarıyla dar iç mekânlar belgelenmiştir. Bu yöntem, erişimi kısıtlı alanlar için hızlı ve etkili bir çözüm sunmuştur. İkinci aşamada, nokta bulutları Autodesk Revit'e aktarılmış ve nesne tabanlı modelleme süreci başlatılmıştır. Mesh model temel alınarak yapı elemanları geometrik olarak ayrıştırılmış; her eleman, malzeme türü, ölçü ve bozulma durumu gibi verileriyle parametrik nesnelere dönüştürülmüştür. Böylece, yalnızca fiziksel değil, müdahale ve koruma süreçlerine dair bilgiler de modele entegre edilmiştir.

HBIM modelinde temel veri seti olarak kullanılan nokta bulutu, yapının geometrisinin korunmasını sağlamış ve uzmanlar için ortak bir referans ortamı sunmuştur. Süreç, dijital arşivin güncelliğini ve sürdürülebilirliğini sağlayarak disiplinler arası iş birliğine katkı sunmuştur. Sonuç olarak, Nero Hamamı için oluşturulan HBIM modeli hem belgeleme hem de koruma planlamasında bütüncül bir araç işlevi görmüştür.

4. Nokta Bulutu, Mesh Modelleme ve Parametrik Modelleme Karşılaştırması

4.1. Nokta Bulutu Modeli ve Mesh Modele Geçiş Süreci

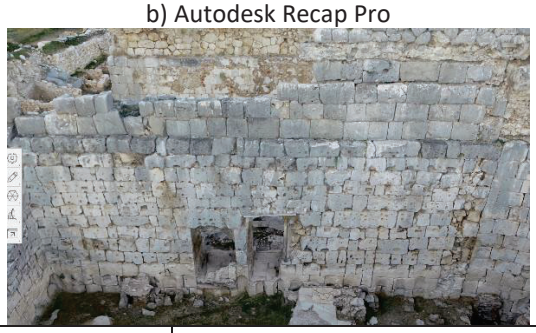
iPad Pro kullanılarak gerçekleştirilen tarama süreci, dış cepheden iç mekâna doğru yapı boyunca X ve Y düzlemlerinde yatay geçişlerle yürütülmüştür. Tüm işlem, App Store'dan temin edilen 3D Scanner uygulaması ile yapılmış; elde edilen veriler uygulamanın otomatik algoritmasıyla üç boyutlu mesh modele dönüştürülmüştür. Uygulama, LİDAR tabanlı nokta bulutu üretimi ve fotogrametrik görüntüleme olmak üzere iki veri toplama yöntemi sunmaktadır. Fotogrametri sürecinde, yapı çevresinde sistematik hareketle yaklaşık 1m aralıklarla fotoğraflar çekilmiş ve belirlenen yazılımlarla birleştirilmiştir. LİDAR, özellikle zemine yakın ve insan ölçeğindeki duvar yüzeylerinde yüksek çözünürlük sağlamış; daha uzun süreli taramalarda detay düzeyi artmıştır. Ancak, yaklaşık 1,5 metrenin üzerindeki duvar kesitlerinde ve dar açılı bölgelerde fotogrametri daha başarılı sonuçlar vermiştir. iPad Pro ile saha ortamında hızlı modelleme yapılabilmesi, veri kaybını önleyerek süreci pratikleştirmiştir. Ancak yüksek duvarlar (yaklaşık 9 m) ve dar açılı alanlarda yetersiz kalmıştır. Bu bölgelerde doku kaymaları ve eksik veri gözlemlenmiş, özellikle tonoz hizasının üst kısmı modele dahil edilememiştir. Bu durum, yöntemlerin birbirini tamamlayıcı şekilde kullanılmasının etkinliği artırdığını göstermiştir.

Bu çalışmada, Nero Hamamı'nın bütüncül biçimde belgelenmesi amacıyla insansız hava aracı (İHA) ile sabah saatlerinde hava çekimleri gerçekleştirilmiştir. 705 fotoğrafın işlenmesi sonucunda 4,91 GB büyüklüğünde bir nokta bulutu elde edilmiş ve bu veri, mesh modele dönüştürülerek üç boyutlu modelleme çalışmalarına temel teşkil etmiştir. Karşılaştırmalı analiz kapsamında her iki yazılımın veri işleme yetkinlikleri değerlendirilmiştir. Agisoft Metashape, sınırsız sayıda fotoğraf işleyebilme kapasitesi sayesinde kapsamlı veri setleriyle çalışmayı mümkün kılarken; Autodesk ReCap Pro yazılımı, öğrenci lisansında 100, tam sürüm lisansında ise 1000 fotoğraf ile sınırlıdır. Bu nedenle ReCap Pro ile model oluşturmak için örneklem olarak yalnızca 100 fotoğraf kullanılmıştır. ReCap Pro'nun öne çıkan yönlerinden biri, görsel verileri doğrudan mesh modele dönüştürebilmesidir. Bununla birlikte, fotoğraf sayısının sınırlı olması veya düşük kaliteli görsellerin kullanılması, modelde yapısal bozulmalara ve geometrik tutarsızlıklara neden olabilmektedir. Ancak yazılım, bu tür hataların manuel müdahalelerle düzeltilmesine olanak tanıyarak model doğruluğunu artırma imkânı sunmaktadır. Her iki yazılımın değerlendirilmesi sonucunda; ReCap Pro'nun az sayıda görselle yüksek çözünürlükte model üretme kapasitesine karşın, Metashape'in daha geniş veri setleriyle çalışarak yapının daha kapsayıcı ve detaylı bir temsilini sunduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, çözünürlük kalitesi ile mekânsal kapsam arasında bir denge gözetilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Tablo 1: Nokta bulutu görselleştirme programları nitelik karşılaştırması

a) Agisoft Metashape

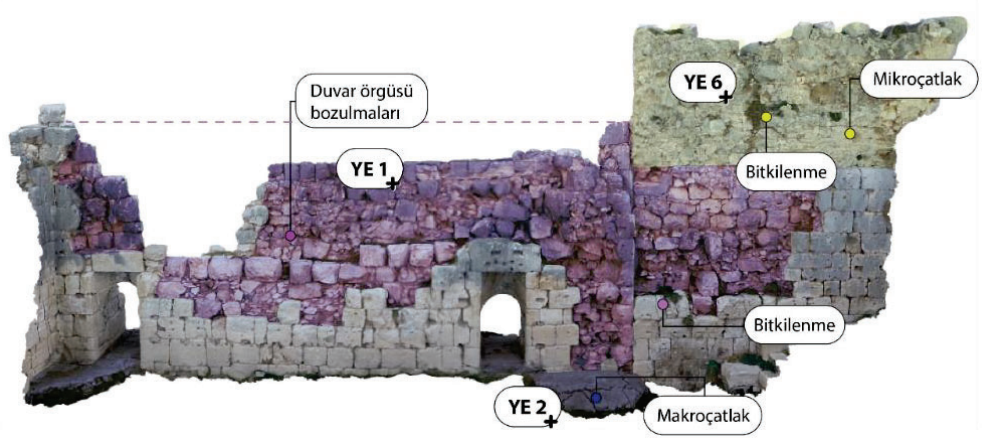
b) Autodesk Recap Pro



	Agisoft Metashape	Autodesk Recap Pro
Çözünürlük kalitesi	% 65	% 85
Kullanılabilecek fotoğraf sayısı	sınırsız	100
Nokta bulutu modeline müdahale imkanı	mevcut değil	mevcut
Fotoğraflara müdahale imkanı	mevcut	mevcut değil

4.2. Mesh Modelin Analizi

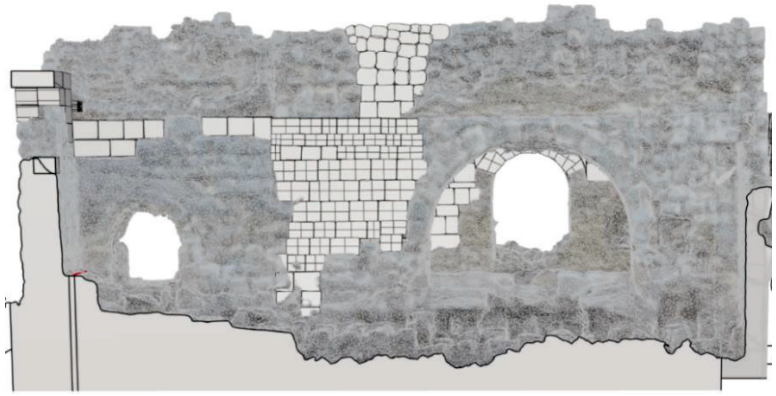
Yapının Caldarium ve Tepidarium bölümünü ayıran duvarın Caldarium bölümüne ait batı cephesi, üretilen mesh modelin Rhinoceros yazılımına aktarılıp boolean komutuyla bozulma analizlerini tespit etmek üzere yapıdan ayrılmıştır **(Şekil 4)**. Cepheye yönelik yapılan incelemelerde, duvar örgüsünü oluşturan kesme taş blokların büyük bir bölümünde yıkılma, yer değiştirme ve kırılmaların meydana geldiği belirlenmiştir. Buna karşın, kapı açıklıkları ile lentoların özgün konumlarıyla korunduğu gözlemlenmektedir. Duvarın erken inşa evresine ait olduğu düşünülen bölümü, Tepidarium mekânını örten tonozun dayandığı çıkıntı seviyesini işaret eden kesikli çizgi dikkate alındığında, bu alanda duvar örgüsünün en az iki sıra taşının tamamen yıkıldığı anlaşılmaktadır. Cepheye ait kesme taş blokların deformasyona uğraması sonucunda, bloklar arasında kalan moloz taş dolgular açığa çıkmıştır. Ayrıca, taş bloklar arasında yer yer bitki örtüsünün geliştiği de tespit edilmiştir.



Şekil 4: Caldarium bölümü, batı cephesi, bozulma analizi

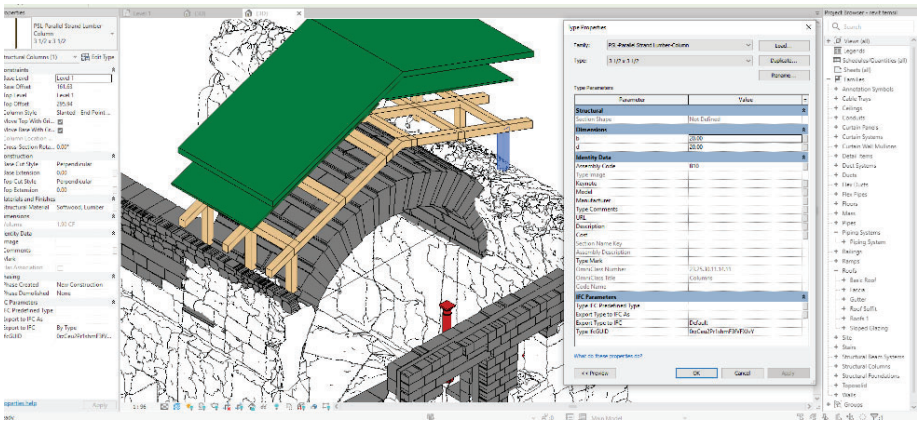
4.3. Pre-BIM ve Parametrik Modelleme

Yapının Candarium bölüme ait doğu duvarı için Rhinoceros ortamında belirlenen konservasyon ve bakım çalışmaları modellenmiştir **(Şekil 5)**. Üzengi seviyesine kadar kesme taş blok, tonozu dışardan saklayan üst kısımda moloz taş tamamlaması yapılmıştır. Mevcut taşların formları referans alınarak görünüşü çizilen taşlar extrude komutu ile 3B hale getirilmiştir. Kemer taşlarına yakın blokların kemer eğimini takip etmesi için yüzey eğrilerinde düzeltmeler yapılmıştır. Üzengi seviyesinin üst kısmında harç ile birleştirilen taşlar amorf formda kullanılmıştır. Rhinoceros yazılımı, nokta bulutundan alınan mesh modeli dokusuyla birlikte açarak çizim sırasında altlıktan referans alınmasını sağlayarak süreci kolaylaştırmıştır.



Şekil 5: Caldarium bölümü doğu duvarının 3B modelde tamamlaması

Yapının dijital rekonstrüksiyonu sürecinde öncelikle Autodesk Revit yazılımı kullanılmış, ancak belirli aşamalarda yazılımın yetersizlikleri gözlemlenmiştir. Nokta bulutundan üretilen mesh model Revit'e aktarılmış olsa da "mass" ortamında model üzerinde temel düzenleme işlemlerinin (kesme, taşıma vb.) gerçekleştirilememesi önemli bir sınırlılık oluşturmuştur. Ayrıca, yüzey dokularının algılanamaması nedeniyle, duvar örgüsü gibi elemanların yeniden inşasında mesh model referans alınamamıştır. Arayüzdeki performans sorunları da modelleme sürecini yavaşlatmıştır. Bu nedenlerle süreç, daha esnek düzenleme imkânları sunan Rhinoceros yazılımında sürdürülmüş ve modelin üretimi bu ortamda tamamlanmıştır. Modelleme sonrası, yapının Frigidarium bölümü yeniden Revit ortamına aktarılmış ve belirli yapı elemanları (ör. tonoz, çatı strüktürü, kaplama malzemeleri) BIM elemanları olarak modellenmiştir. HBIM kapsamında, her bir eleman için tür, boyut, malzeme ve müdahale geçmişi gibi bilgileri içeren veri tabloları oluşturulmuştur **(Şekil 6).** Bu tablolar, elemanın teknik özelliklerinin yanı sıra görsel içeriklerin (fotoğraf, çizim) entegre edilmesine de olanak tanımaktadır. Böylece yapı elemanlarının mevcut durumu ile geçmiş halleri karşılaştırılabilmekte; zamana bağlı değişimlerin belgelenmesi mümkün hâle gelmektedir.



Şekil 6: Revit ortamında BIM nesneleri için kimlik kartının oluşturulması

{3D} | Column Schedule | **Multi-Category Schedule**

<Multi-Category Schedule>

A	B	C	D	E	F
Category	Cost	Family	Level	Type	Count
Roofs	2000.00	Basic Roof		Roof 1	1
Structural Columns	450.00	PSL-Parallel Strand Lumber-Column	Level 1	10x10 cm_dikme	1
Structural Columns	450.00	PSL-Parallel Strand Lumber-Column	Level 1	10x10 cm_dikme	1
Structural Columns	450.00	PSL-Parallel Strand Lumber-Column	Level 1	10x10 cm_dikme	1
Structural Columns	450.00	PSL-Parallel Strand Lumber-Column	Level 1	10x10 cm_dikme	1
Structural Columns	450.00	PSL-Parallel Strand Lumber-Column	Level 1	10x10 cm_dikme	1
Structural Columns	450.00	PSL-Parallel Strand Lumber-Column	Level 1	10x10 cm_dikme	1

Şekil 7: Revit ortamında çatı strüktürü için metraj tablosunun oluşturulması

Yapı elemanlarının BIM modeli şeklinde tasarlanmasının önemli avantajlarından biri, metraj tablolarının Revit yazılımı tarafından otomatik olarak oluşturulabilmesidir. Örneğin, Frigidarium bölümünün çatı strüktürü 10x10 cm boyutlarında ahşap keresteler kullanılarak modellenmiştir. Bu kerestelere ait boyut, adet ve birim fiyat bilgileri, **Tablo 2**'de görüldüğü üzere tablo formatında elde edilmiştir. Model üzerinde ahşap taşıyıcı sisteme yönelik herhangi bir değişiklik yapıldığında, metraj tablosu da eş zamanlı olarak güncellenmektedir. Bu özellik sayesinde, rekonstrüksiyon sürecinin planlamasında metraj hesaplamaları için ayrıca manuel bir işlem yapılmasına gerek kalmaksızın süreç verimli bir biçimde sürdürülebilmektedir.

5. HBIM Modelleme Araçlarının Pratikliği, Sınırlamaları ve Çözünürlük Analizi

Kültürel miras yapılarının sürdürülebilir korunması ve belgelenmesi açısından HBIM yaklaşımı, veri bütünlüğü sağlayan bütüncül bir yöntem sunmaktadır. Nero Hamamı özelinde yürütülen bu çalışma, HBIM sürecinde kullanılan veri toplama yöntemlerinin doğruluk oranlarını, modelleme araçlarının işlevselliğini ve yazılım temelli sınırlılıkları çözünürlük üzerinden analiz etmeyi hedeflemiştir. Nero hamam yapısının Frigidarium, Tepidarium ve Caldarium mekanlarının yapı elemanları aynı işleve sahip alternatif araçlar ile rekonstrüksiyon uygulamaları doğrultusunda temsilleri oluşturulmuştur. İzlenen adımlar, sonuç ürünleri, araçların avantajları ve dezavantajları incelenmiştir.

5.1. Veri Toplama ve Ön İşleme Araçları: Fotogrametri ve LİDAR Karşılaştırması

Fotogrametri, geniş yüzeylerin belgelenmesinde etkili olurken; LIDAR, dar ve erişilmesi güç iç mekânlardaki ve pratik bir çözüm sunmaktadır. Ancak LIDAR cihazlarının erişim mesafesi insan boyuyla sınırlı olduğundan, Nero Hamamı'nda olduğu gibi 9 metreyi aşan duvarlarda üst kotlara ilişkin veriler eksik kalmıştır. Yöntem, fotogrametriye kıyasla daha hızlı sonuç üretmekte ve sahada mevcut durumun eşzamanlı olarak belgelenmesine olanak tanımaktadır. Geleneksel yöntemlerin (el çizimi, manuel fotoğraflama) bu dijital yaklaşımlarla desteklenmesi, HBIM entegrasyonunu kolaylaştırmakta ve yaygınlaştırmaktadır.

Tablo 3: Fotogrametri ve LİDAR Karşılaştırması

Kriter / Özellik	LİDAR (iPad Pro / Mobil)	Fotogrametri (Drone + Kamera)
Veri Toplama Cihazı	iPad Pro (2020), LIDAR sensörlü	DJI Drone, DSLR, Telefon Kamerası
Kullanılan Yazılımlar	Polycam, 3D Scanner	Agisoft Metashape, Autodesk ReCap Pro
Tarama Süresi	Kısa - Orta	Orta - Uzun
Model Hassasiyeti (1.5 m altı)	Yüksek	Orta
Model Hassasiyeti (1.5 m üstü)	Düşük	Yüksek
Doğruluk (karmaşık formlar)	Yüksek (zemine yakın bölgelerde)	Orta - Yüksek (özellikle 1.5 m üstü alanlarda)
Çözünürlük	Sabit, insan ölçeğine bağlı	Yüksek ancak çevresel koşullara bağlı olarak değişken
Dar Alan Performansı	Yetersiz	Başarılı
Erişilebilirlik	Dar ve sınırlı alanlarda yüksek	Geniş ve açık alanlarda yüksek
Kapsama Alanı	Kısıtlı (yerçekimi ve insan erişimiyle sınırlı)	Geniş (kamera yönlendirmesi ile)
Veri Temizliği Gereksinimi	Düşük	Orta - Yüksek
Sonuç Formatı	Nokta bulutu + mesh	Nokta bulutu + mesh
Donanım Gereksinimi	Yüksek (LIDAR sensörlü cihaz gerekli)	Düşük (kamera yeterli)
Sınırlamalar	Yükseklik ve açı sınırlamaları, LIDAR erişiminin sınırları	Işık koşullarına duyarlılık, gölgeler ve parlamalara bağlı değişkenlik

Çalışma, büyük ölçekli alanlarda İHA destekli fotogrametrinin tercih edilebilir olduğunu; ancak modelleme sürecinin zaman aldığını ortaya koymuştur. Buna karşılık, küçük ölçekli alanlarda LIDAR tabanlı mobil cihazlar, yüksek detaylı ve hızlı veri üretimi ile öne çıkmaktadır. İHA'lar belirli bir kullanıcı eğitimi gerektirirken, iPad Pro

gibi mobil araçlar daha pratik bir kullanım sunmaktadır. Özellikle iPad Pro ile yapılan taramalarda, sahada anlık veri işleme imkânı sayesinde model doğruluğu yerinde kontrol edilmiş, eksik bölgeler erken aşamada tespit edilmiştir. Ancak cihazın kullanıcı eliyle taşınıyor olması, yüksek kotlu yüzeylerde veri eksikliğine yol açmıştır. Nero Hamamı örneğinde, duvar yüksekliğinin 9 metreye ulaşması bu sınırlılığı belirginleştirmiştir.

Tablo 4: İpad Pro ile LİDAR uygulamasının avantajları

Özellik	Açıklama
Anlık Görüntüleme	Verilerin eş zamanlı işlenmesiyle alanda mesh model ön izlemesi sağlanır.
Mobilite	Hafif cihaz yapısı ve dokunmatik kullanım ile saha içi hareket kabiliyeti yüksektir.
Veri Kaybı Azalması	Modelin oluşturulma sürecinin sahada kontrol edilebilmesi, hata riskini azaltır.
Zaman Verimliliği	Geleneksel lazer tarama sistemlerine kıyasla daha kısa sürede modelleme yapılabilir.

Tablo 5: İpad Pro ile LİDAR uygulamasının dezavantajları

Sınırlı Tarama Alanları	Belirtilen Sorunlar
Tonoz üzengi seviyesi ve üstü	Texture (doku) kaymaları; nokta bulutunda seyrelme
Yüksek duvar kısımları (~9 m)	Görsel veri eksikliği; fotogrametrik destek gerekliliği
90 derece dik yüzeyler (üstten)	Kamera açısının yetersizliği nedeniyle veri elde edilememesi

5.2. Yazılım Temelli Modelleme Süreci

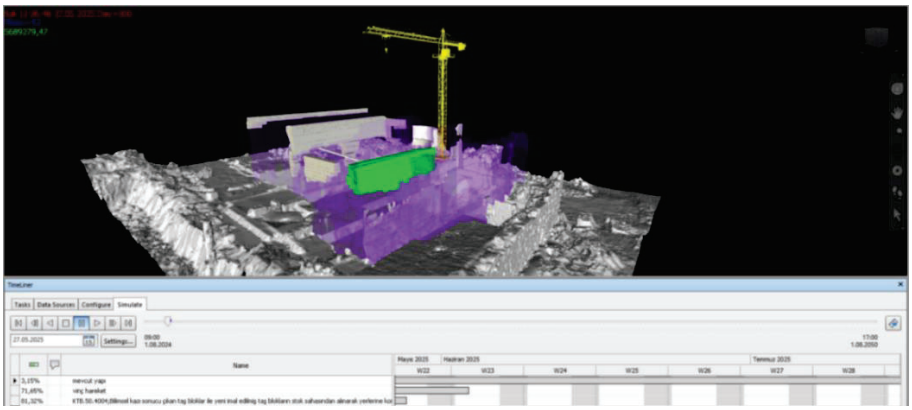
Görsel veri işleme sürecinde, Metashape yazılımı daha kapsamlı model üretimine olanak tanırken, ReCap Pro daha yüksek çözünürlükte çıktılar sunmaktadır. Ancak ReCap Pro'nun sınırlı kullanıcı müdahalesine izin vermesi, restorasyon temelli çalışmalarda esneklik kaybına yol açmaktadır. Metashape, sınırsız fotoğraf işleme kapasitesi nedeniyle büyük ölçekli alanlar için uygunken; detay odaklı, küçük ölçekli projelerde ReCap Pro tercih edilebilir. Metashape'te kullanıcıya sunulan düzenleme ve koordinat işleme imkânı doğruluğu artırsa da süreci uzatmaktadır. Öte yandan, ReCap Pro'nun otomatik işlem adımları, benzer doğrulukta sonuçlara daha hızlı ulaşılmasını sağlamıştır.

Tablo 6: Agisoft Metashape ve Autodesk ReCap Pro

Özellikler	Agisoft Metashape	Autodesk ReCap Pro
Fotoğraf işleme kapasitesi	Sınırsız	Öğrenci lisansı: 100, Tam lisans: 1000
Kullanıcı müdahalesi	Yüksek (düzenleme, hizalama vb.)	Sınırlı
Mesh model üretimi	Yüksek kapsayıcılık	Yüksek çözünürlük
Yüzey dokusu	Yüksek detaylı	Bazı bölgelerde bozulma riski
Uygulama süresi	Daha uzun	Daha hızlı

6. Rekonstrüksiyon Sürecinde Kullanılan Tekniklerin Uygulanabilirliği ve Verimliliği

BIM araçları kullanılarak üretilen veri tabanı, koruma alanı için belgelemenin yanı sıra konservasyon çalışmalarının uygulama sürecinin planlanmasına ve yönetilmesine imkân tanımaktadır. Söz konusu çalışmada Rhinoceros ve Revit yazılımında üretilen modeller koordinasyon programı olan Navisworks'e aktarılmıştır. Rekonstrüksiyon çalışmaları için gerekli adımlar program içerisine uygulama tarihine göre girilmesinin ardından her bir adımın yazılım içerisine aktarılan 3B nesneler ile entegre edilmesi, yapının rekonstrüksiyon sürecini gösteren bir simülasyon elde edilmesini sağlamaktadır. Bununla birlikte VR ve AR teknolojilerinden yararlanarak üretilen altlık mimari ve arkeoloji eğitiminde sanal deneyim, sanal müze, oyunlarda sahne tasarımı alanlarında kullanılma ve geliştirme potansiyeli taşımaktadır.



Şekil 7: Navisworks yazılımında süreç simülasyonun oluşturulması

7. Sonuçlar

Nero Hamamı özelinde yürütülen dijital belgeleme süreci, HBIM yaklaşımının kültürel miras yapılarının korunmasındaki işlevselliğini ve potansiyelini ortaya koymuştur. Çalışma kapsamında kullanılan fotogrametri, mobil ve yer tabanlı LIDAR gibi teknolojilerle kapsamlı bir dijital veri seti oluşturulmuş; nokta bulutu, mesh ve parametrik modelleme aşamalarıyla çok yönlü bir yöntem izlenmiştir. Bu teknolojilerin entegrasyonu, veri doğruluğu, zaman verimliliği ve modelin işlevselliği üzerinde belirleyici olmuştur. LIDAR, özellikle dar iç mekânlarda ve zemine yakın alanlarda yüksek çözünürlük sunarken; fotogrametri, üst kotlarda ve geniş cephelerde daha başarılı sonuçlar vermiştir. LIDAR'ın hızlı uygulanabilirliği, sahada pratiklik sağlarken; fotogrametrik veriler çevresel etkenlere karşı daha duyarlıdır. Bu yöntemlerin birlikte kullanımı, dijital modelleme sürecinde hem yatay hem dikey çözünürlük açısından tamamlayıcı katkılar sunmuştur. Yazılım değerlendirmelerinde, Agisoft Metashape, sınırsız fotoğraf işleme kapasitesi ve yüksek yoğunluklu nokta bulutu üretimiyle kompleks formların belgelenmesini kolaylaştırmıştır. Autodesk ReCap Pro, daha az fotoğrafla yüksek çözünürlüklü çıktılar üretmiş ancak sınırlı kullanıcı müdahalesi nedeniyle esneklik sunamamıştır. Buna karşılık hızlı işleme kapasitesiyle sahada ön modelleme açısından avantaj sağlamıştır. Autodesk Revit, BIM modelinin oluşturulmasında merkezi rol üstlenmiş; ancak mesh veriler üzerindeki müdahale sınırlılıkları süreci kısıtlamıştır. Rhinoceros ise bu eksikleri gidererek, mesh modelin yapı elemanlarına ayrıştırılmasını ve bozulma tespiti yapılmasını mümkün kılmıştır. Ayrıca, dokularla birlikte açılabilen mesh modeller, bozulma analizlerinin doğruluğunu artırmıştır.

HBIM süreci kapsamında üretilen dijital modeller, yalnızca fiziksel temsiliyet sağlamamış; aynı zamanda yapı elemanlarına ait koruma, bakım, müdahale ve restorasyon geçmişi gibi bilgilerle zenginleştirilmiştir. Her bir yapı elemanına ait veri tabloları, bu bileşenlerin dijital "kimlik kartı" niteliğini taşımaktadır. Bu tablolar sayesinde, yapıdaki geçmiş restorasyonlar, kullanılan malzemeler, bozulma durumları ve gelecekte yapılacak müdahaleler önceden planlanabilir hale gelmiştir. Özellikle Frigidarium bölümünün BIM modeliyle birlikte oluşturulan metraj tabloları, rekonstrüksiyon sürecinde mühendislik, maliyet yönetimi ve yapım planlaması için somut girdiler sunmuştur. Yapıdan elde edilen mesh model, Revit ve Rhinoceros gibi yazılımlarda dijital olarak yeniden inşa edilerek hem belgelenmiş hem de mevcut bozulmalar doğrultusunda müdahale planları dijital ortamda test edilmiştir. Rhinoceros yazılımı, mesh modelin yapı elemanlarına ayrıştırılmasını ve bozulma bölgelerinin görselleştirilmesini mümkün kılmış; bu görseller aracılığıyla konservasyon kararları daha somut biçimde modellenmiştir. Üzengi seviyesi üzerindeki amorf taş dolgular, kapı lentolarındaki bozulmalar ve bitki örtüsünün tespiti gibi detaylar, dijital analizler sayesinde bütüncül biçimde ortaya konmuştur.

Bu çalışma, dijital modelleme araçlarının miras yapılarının belgelenmesinde, analizinde ve sürdürülebilirliğinde nasıl etkili biçimde kullanılabileceğini göstermiştir. Ancak bazı sınırlamalar ve gelişime açık alanlar da gözlemlenmiştir. Tarama süresinin doğrudan çözünürlükle bağlantılı olması, hızlı uygulamalar ile detaylı analizler arasında bir tercih yapılmasını zorunlu kılmaktadır. Mobil tarama teknolojilerinde (örneğin iPad Pro LIDAR) elde edilen verilerin yüksek bölümlerde eksik kalması, çok yönlü veri toplama ihtiyacını artırmıştır. Yazılımlar arası veri uyumsuzlukları (örneğin Revit'te mesh düzenleme zorluğu) modelleme sürecinde entegrasyon sorunlarına yol açabilmektedir. Gelecekte, HBIM modellerine yapay zeka destekli bozulma tahmini ve sürdürülebilirlik analizi modüllerinin entegre edilmesi, süreçleri daha öngörülebilir ve proaktif hale getirebilir.

Sonuç olarak, Nero Hamamı çalışması üzerinden değerlendirildiğinde, HBIM araçlarının disiplinler arası iş birliği ile harmanlanarak kullanılması, kültürel miras yapılarının belgelenmesi ve korunması için etkili, sistematik ve sürdürülebilir çözümler sunmaktadır. Bu yöntemlerin yaygınlaştırılması, geleneksel konservasyon uygulamaları ile dijital teknolojiler arasında köprü kurarak, miras yapıların gelecek nesillere aktarımında kritik bir rol üstlenecektir.

Teşekkür
Bu çalışma, Antalya Bilim Üniversitesi, Mimarlık Yüksek Lisans Programı'nda gerçekleştirilen 'Dijital Mirasın Rekonstrüksiyonu Sürecinde HBIM Metodolojisine Dayanan Bir Yaklaşım Önerisi' isimli tez çalışmasının parçasıdır.

KAYNAKLAR

Akın, E. S. ve Erdoğan, A. (2022). İnsansız Hava Araçları (İHA) ile Arkeolojik Alanlarda Belgeleme: Sarıkaya Roma Hamamı (Therma Basilica) Örneği. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 26*(3), 335-343. https://doi.org/10.19113/sdufenbed.1038407

Arico, M., Lo Brutto, M. & Maltese, A. (2023). A Scan-to-BIM Approach for the Management of Two Arab-Norman Churches in Palermo (Italy). *Heritage, 6*(2). 1622-1644. https://doi.org/10.3390/heritage6020087

Banfi, F. (2020). HBIM, arkeolojik alanlar ve antik kalıntılar için 3 boyutlu çizim ve sanal gerçeklik. *Sanal Arkeoloji Dergisi* , *11* (23), 16–33. https://doi.org/10.4995/var.2020.12416

Benli Yıldız, N., Kalpaklı, Z. & Özkaraca, N. (2023). Creation of Historical Building Information Modelling (HBIM) Library, A Case Study of Registered House (No:56), Akçakoca. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi. 12*. 10.29130/dubited.1241508.

Costantino, D., Pepe, M. & Restuccia, A. (2023). Scan-to-HBIM for conservation and preservation of Cultural Heritage building: the case study of San Nicola in Montedoro church (Italy). *Appl Geomatics* (15), 607–621. https://doi.org/10.1007/s12518-021-00359-2

Cuperschmid, A. R. M., Costa, A. P., Neves, I., Fonseca, F. R. & Cuperschmid, E. M. (2024). Virtual reconstruction of the deconstructed heritage: The former building of the Belo Horizonte School of Medicine. *Journal of Computational Cultural Heritage, 17*(2), Article 21. https://doi.org/10.1145/3639931

Currà, E., D'Amico, A., & Angelosanti, M. (2022). HBIM between Antiquity and Industrial Archaeology: Former Segrè Papermill and Sanctuary of Hercules in Tivoli. *Sustainability*, *14*(3), 1329. https://doi.org/10.3390/su14031329

Duran, Z., & Toz, G. (2010). Tarihi eserlerin fotogrametrik olarak belgelenmesi ve coğrafi bilgi sistemine aktarılması. *İTÜDERGİSİ/d*, *2*(6).

Ekinci, O. (2021). Dijital Görselleştirme Araçlarının Mimari Cephe Tasarımına Etkisi [Yayımlanmış yüksek lisans tezi] Maltepe Üniversitesi.

Intrigila, C., Giannetti, I., Eramo, E., Gabrielli, R., & Caruso, G. (2024). HBIM for conservation and valorization of structural heritage: The Stylite Tower at Umm ar-Rasas, Jordan. *Journal of Cultural Heritage, (70)*, 397–407. https://doi.org/10.1016/j.culher.2024.10.010

İşkan, H. (2020). Konum ve tarih. In H. İşkan & F. Şahin (Eds.), *Lykia'nın Akdeniz'e açılan kapısı Patara* (1.Baskı, s. 11-20). Kültür ve Turizm Bakanlığı.

Jordan-Palomar, I., Tzortzopoulos, P., García-Valldecabres, J., & Pellicer, E. (2018). Protocol to Manage Heritage-Building Interventions Using Heritage Building Information Modelling (HBIM). *Sustainability*, *10*(4), 908. https://doi.org/10.3390/su10040908

Karslı, B., Yilmazturk, F., Bahadir, M., Ozdemir, E. & Karsli, F. (2022, 17-19, Kasım). Görüntü eşleştirme ve lidar tabanlı nokta bulutu üzerinden otomatik bina çıkarımı ve sayısallaştırma. *VIII. Uzaktan algılama-cbs sempozyumu*, Ankara.

Khan, M. S., Khan, M., Bughio, M., Talpur, B. D., Kim, I. S. & Seo, J. (2022). An Integrated HBIM Framework for the Management of Heritage Buildings. Buildings, *12*(7), 964. https://doi.org/10.3390/buildings12070964

Koçak, M. & Şahin, F. (2020). Two Reused Blattkelch Capitals. An Example of Reuse In 2nd Century AD in the Context of the Building Activities in and around the Nero Bath at Patara. *Gephyra. 20*. 193-243. 10.37095/gephyra.817742.

Liu, J., Galiano-Garrigos, A. & Garcia Valldecabres, J. (2022). The need to implement cultural heritage máster plans through the building information modelling methodology la necesıdad de implementar a través de la metodología building information modelling los planes directores del patrimonio cultural. *Ege-Expresión Gráfica en la Edificación. 17*, 4-17. https://doi.org/10.4995/ege.2022.18597

Lucchi, E., & Agliata, R. (2023). HBIM-based workflow for the integration of advanced photovoltaic systems in historical buildings. Journal of Cultural Heritage, *64*, 301–314. https://doi.org/10.1016/j.culher.2023.10.015)

Megahed, N. A. (2015). Towards a theoretical framework for HBIM approach in historic presevation and management. *International Journal of Architectural Research 9* (3), 130–147. 10.26687/archnet-ijar.v9i3.737

Öner, E. (1997). Eşen Çayı Taslun-Delta Ovasının Jeomorfolojisi ve Antik Patara Limanı. *Ege Coğrafya Dergisi, 9*(1), 89-130. Öztürk, K. (2024). Proje Yönetimi ve BIM (Building Information Modeling) [Yayımlanmış yüksek lisans tezi, Üsküdar Üniversitesi]. Penjor, T., Banihashemi, S., Hajirasouli, A. & Golzad, H. (2024). Heritage building information modeling (HBIM) for heritage conservation: Framework of challenges, gaps, and existing limitations of HBIM. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage, 35*, e00366. https://doi.org/10.1016/j.daach.2024.e00366

Sarıcaoğlu, T. (2021). Arkeolojik Miras Bilgi Yönetimi: HBIM Erythrai (Ildır) Örneği [Yayımlanmış doktora tezi] Dokuz Eylül Üniversitesi.

Sewasew, Y. T., Teklemariam, M., Teame, B., & Tesfamariam, S. (2024). Extension of HBIM to 3D city modeling: Application for the port city of Massawa, Eritrea. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, *34*, e00367. https://doi.org/10.1016/j.daach.2024.e00367

Ulvi, A. & Hamal, S.N. (2024). A New technology for documentation cultural heritage with fast, practical, and cost-effective methods IPAD Pro LİDAR and Data Fusion. *Research Square*. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4400658/v1

2025 MSTAS MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Bedenleşme ve Yapay Zekâ ile Tarihi Mekânların Yeniden İnşası

Çisem Nur Demirci[1]; Sümeyye Kökçen[2]
[1,2]Serbest Mimar
[1]cisemdemirci21@gmail.com; [2]sumeyyekokcen@hotmail.com

Özet

Bu çalışma, tarihî yapıların yeniden inşa süreçlerinde geleneksel koruma ve restorasyon yaklaşımlarının ötesine geçerek, bedenleşme kuramı, yapay zekâ destekli üretim araçları ve spekülatif tasarım yöntemlerini bütüncül bir çerçevede bir araya getirmeyi amaçlamaktadır. Tarihî mekânlar, yalnızca fiziksel varlıklar olarak değil; aynı zamanda kolektif hafızanın, toplumsal kimliğin ve duyusal deneyimlerin taşıyıcısı olarak, çağdaş mimari temsil biçimlerinin ele aldığı çok katmanlı anlatı alanlarıdır. Ancak çoğu zaman bu mekânlara yönelik müdahaleler, fiziksel bütünlüğü korumaya indirgenmekte; mekânın algısal, sezgisel ve deneyimsel boyutları göz ardı edilmektedir. Bu bağlamda çalışma, mimarlıkta tarihsel bağlamların yalnızca korunacak miras nesneleri olarak değil; eleştirel düşünce ve tasarım spekülasyonlarına açık, yeniden üretilebilir anlatı alanları olarak değerlendirilmesi gerektiğini savunmaktadır. Araştırmanın kuramsal altyapısı, bedenin mekânla kurduğu ilişkiyi açıklayan fenomenolojik yaklaşımlar (Merleau-Ponty), mekânsal hafıza, nörobilimsel algı ve deneyimsel anlatı biçimlerini kapsayan disiplinlerarası bir yapı üzerine inşa edilmiştir. Özellikle bedenleşme kuramı üzerinden, mimari deneyimin yalnızca görsel algıya değil; işitsel, dokunsal ve yönelime bağlı çoklu duyusal süreçlerle şekillendiği bir çerçeve ortaya konmuştur. Bu çerçeve, yapay zekâ destekli üretim araçlarının sunduğu yaratıcı potansiyel ile birleştiğinde, tarihî yapıların temsil biçimlerinin yeniden düşünülmesini olanaklı kılmaktadır. Çalışmada, Antalya Kaleiçi'nde yer alan Hadrian Kapısı ve çevresi örnek alan olarak seçilmiştir. Yapı, Roma döneminden günümüze kadar gelen çok katmanlı fiziksel dokusu, arkeolojik sürekliliği ve günümüzdeki yoğun yaya kullanımı ile hem geçmişin izlerini hem de çağdaş deneyimi taşıyan bir eşik mekân olarak değerlendirilmiştir. Seçilen alanda geliştirilen yapay zekâ destekli spekülatif kesitler, senaryolaştırılmış sahneler ve mekânsal anlatılar aracılığıyla, fiziksel temsile alternatif eleştirel ve deneyimsel modeller üretilmiştir. Yöntemsel olarak çalışma, alanın tarihsel verilerinin harita temelli analizlerle derlenmesiyle başlamış; ardından üretken yapay zekâ modelleri kullanılarak kesitler, sahneler ve mekânsal akış diyagramları tasarlanmıştır. Bu temsiller, yalnızca estetik görselleştirmeler değil; aynı zamanda bedenin mekânla kurduğu ilişkileri, hafızayı ve zaman-mekân sürekliliğini temsil eden anlatı araçları olarak değerlendirilmiştir. Yapay zekânın yalnızca üretim aracı değil, düşünsel bir ortak olarak konumlandığı bu yaklaşım, mimari temsilde eleştirel düşüncenin görsel ifadesine zemin hazırlamaktadır. Sonuç olarak, bu çalışma; spekülatif mimari temsilin, bedenleşmiş deneyimin ve yapay zekâ destekli üretimlerin bir araya getirildiği çok katmanlı bir model önererek, tarihî mekânların yeniden inşasına dair mimarlık kuramı ve dijital tasarım pratiği arasında özgün bir köprü kurmaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Spekülatif Tasarım, Bedenleşme Kuramı, Yapay Zekâ, Mimari Temsil, Tarihî Mekân, Deneyim Tasarımı, Dijital Anlatı, Hadrian Kapısı.*

2025 MSTAS MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Reconstructing Historical Places with Embodiment and Artificial Intelligence

Çisem Nur Demirci[1]; Sümeyye Kökçen[2]
[1,2]Freelance Architect
[1]cisemdemirci21@gmail.com; [2]sumeyyekokcen@hotmail.com

Abstract

This study aims to develop an alternative, interdisciplinary approach to the reconstruction of historical spaces by integrating embodiment theory, AI-assisted design tools, and speculative design strategies into a unified architectural framework. Historical sites are not merely physical remnants of the past but also carriers of collective memory, social identity, and multisensory experiences. However, interventions in such spaces often prioritize physical preservation while overlooking the experiential, perceptual, and cognitive dimensions of space. In response, this study argues that historical contexts in architecture should be understood not only as heritage objects to be conserved but also as narrative environments open to reinterpretation, speculation, and experiential reconstruction. The theoretical foundation of the study draws from phenomenological understandings of the body-space relationship (Merleau-Ponty), spatial memory, neurocognitive perception, and experiential storytelling. Embodiment theory frames architectural experience as not solely visual, but as shaped by tactile, auditory, and directional interactions with space. When combined with the creative potential of AI-based design tools, this framework enables a reevaluation of how historical structures are represented and reconstructed. Hadrian's Gate and its surrounding context in Antalya's Kaleiçi district serve as the case study. With its layered archaeological fabric, continued urban presence, and high pedestrian activity, the site functions as both a material remnant of the past and a sensory threshold in the contemporary city. AI-assisted speculative sections, scenographic spatial narratives, and representational diagrams were developed for this site to explore critical and experiential modes of reconstruction. Methodologically, the study involves the collection and analysis of historical data through map-based research and chronological documentation, followed by the generation of speculative architectural content via generative AI models. These visual outputs do not merely function as renderings, but rather as narrative tools that reflect the embodied relationship between user and space. The use of AI is positioned not only as a means of visualization, but as a conceptual partner in architectural speculation and critical design thinking. In conclusion, this research proposes a multi-layered representational strategy for the speculative reconstruction of historical architecture. By combining digital technologies with theories of sensory perception and embodied experience, the study contributes to contemporary architectural discourse through a model that bridges theoretical inquiry and digital design practice.

Keywords: *Speculative Design, Embodiment Theory, Artificial İntelligence, Architectural Representation, Historical Site, Experiential Design, Digital Narrative, Hadrian's Gate.*

1. Giriş

Tarihi mekânlar, yalnızca geçmişin fiziksel izlerini barındıran yapılar olarak değil, aynı zamanda kolektif hafızanın, toplumsal kimliğin ve duyusal deneyimin taşıyıcıları olarak mimarlık disiplininin hem kuramsal hem de temsil düzeyinde ele aldığı çok katmanlı alanlardır. Geleneksel koruma ve restorasyon yaklaşımları bu alanların fiziksel varlığını sürdürmeye odaklanırken, tarihî katmanların deneyimsel, algısal ve bilişsel boyutlarını büyük ölçüde göz ardı etmektedir. Bu eksiklik, mimarlığın yalnızca geçmişe ait yapıları belgeleyen değil, aynı zamanda onları bugünün ve geleceğin kavrayış biçimleriyle yeniden kuran bir temsil alanı olarak ele alınması gerektiğini göstermektedir. Bu bağlamda çalışma, yapay zekâ destekli tasarım araçlarının sunduğu üretim olanakları ile bedenleşme kuramının mekânsal deneyimi merkezine alan yaklaşımını bir araya getirerek, tarihsel bir yapının – bu çalışmada Hadrian Kapısı ve çevresi – yalnızca fiziksel bir nesne değil, deneyimlenebilir, yorumlanabilir ve yeniden kurgulanabilir bir anlatı alanı olarak değerlendirilmesini önermektedir. Yapay zekâ teknolojilerinin mimari temsilde yeni bir ifade dili olarak nasıl kullanılabileceği; spekülatif kesitler, sahneler ve diyagramlarla desteklenmiş deneyimsel anlatıların nasıl üretilebileceği üzerine odaklanan çalışma, mimarlıkta tarihsel bağlamın eleştirel temsili konusunda kuramsal bir çerçeve oluşturmayı amaçlamaktadır. Çalışmanın özgünlüğü, bir yandan yapay zekânın üretken potansiyelini mimari tasarım sürecine entegre ederken, diğer yandan fenomenolojik bir zemin üzerinden mekânın duyusal ve bilişsel yönlerini tartışmaya açmasında yatmaktadır. Böylece tarihî bir yapının restorasyonu ya da belgelenmesiyle sınırlı kalmayan; tersine, onun geçmişi ve geleceği arasında yeni bir anlatı örüntüsü kurmayı hedefleyen bir tasarım yaklaşımı önerilmektedir. Spekülatif kurgu, deneyim temelli kesitler ve yapay zekâ üretimli temsiller aracılığıyla, mimarlıkta temsilin yalnızca görsel bir anlatı değil; aynı zamanda duyu, hafıza ve algı gibi kavramlarla örülü çok katmanlı bir deneyim alanı olduğu savunulmaktadır. Bu kapsamda sunulan çalışma, hem mimarlık kuramında deneyimsel temsillerin yeri hem de dijital üretim teknolojilerinin tarihî bağlamlarla ilişki kurma biçimleri üzerine yeni tartışmalar açmayı hedeflemekte, disiplinlerarası bir yaklaşımla mimari tasarımın sınırlarını genişletmektedir.

2. Tarihi Mekânların Yeniden İnşası: Temsil, Yorum ve Eleştirel Tasarımı

Tarihi mekânların yeniden inşası, mimarlık pratiğinde sadece restorasyon veya onarım çerçevesinde değil, aynı zamanda kültürel ve toplumsal bağlamlarda da önemli bir tartışma alanıdır. Geleneksel olarak restorasyon, geçmişin fiziksel izlerini koruma amacını güderken, yeniden inşa etme süreci, mekânları sadece fiziksel olarak değil, aynı zamanda kültürel, psikolojik ve toplumsal açıdan da yeniden şekillendirmeyi hedeflemektedir (Rossi, 1982). Bu yaklaşım, tarihi mekânların sadece eski haliyle korunması yerine, o mekânın geçmişi ile günümüz arasındaki diyalogu kurarak yeni bir anlam kazanmasını amaçlamaktadır. Ancak bu süreç, mekânların yeniden kurulumunun ne şekilde yapılacağı sorusunu gündeme getirmektedir: Eskiyi doğrudan yeniden inşa etmek mi, yoksa farklı bir bakış açısıyla eskiyi yorumlamak mı daha anlamlıdır? Bu sorunsal, sadece restorasyonun ötesine geçer ve tasarımda tarihi bir biçimdeki davranış-yaklaşım sorunsalı olarak tartışılmalıdır. Mimarlık pratiğinde "yeniden kurma" fikri, restorasyonun ötesinde bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır. Bu kavram, mekânların geçmişten bugüne taşınırken, sadece fiziksel unsurları koruma amacını taşımadığını, aynı zamanda yeni anlamlar ve yorumlarla mekânların yeniden şekillendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır (Smithson, 2003). Bu yaklaşım, eskiyi sadece bir iz olarak değil, yeni bir kültürel ve estetik değer olarak yeniden üretmeyi amaçlamaktadır. Dolayısıyla, tarihsel mekânların yeniden inşası, geçmişin yalnızca bir yansıması değil, aynı zamanda günümüzün toplumsal, kültürel ve teknolojik gereksinimlerine hizmet eden bir tasarım alanı haline gelmektedir (Boyer, 1996). Yeniden inşa sürecinin önemini anlamak için, sadece mekânın fiziksel olarak yeniden yapılandırılması değil, aynı zamanda mekânın toplumla olan ilişkisinin yeniden inşa edilmesi gerektiği vurgulanmalıdır. Tarihi mekânlar, toplumsal hafızanın, kültürel kimliğin ve şehirlerin sosyal yapılarının taşıyıcılarıdır. Bu bağlamda, yeniden inşa edilen mekânlar, geçmişi korumanın yanı sıra, geleceğe dair yeni anlamlar ve işlevler de taşımalıdır (Auster, 2012). Yeniden inşa edilen bir mekân, toplumların tarihsel ve kültürel değerlerini bugünün teknolojik ve estetik ihtiyaçlarıyla buluşturduğunda, bir tür köprü işlevi görerek geçmiş ile gelecek arasında bir bağ kurmaktadır. Mimarlık pratiğinde tarihsel bağlamın yeniden yorumlanması, geçmişin unsurlarını bugünün perspektifiyle yeniden şekillendirme sürecini kapsamaktadır. Bu süreç, tarihi mekânların var olan dilini ve formunu yeniden tasarlamayı değil, onları günümüzün estetik, fonksiyonel ve kültürel ihtiyaçlarına göre ele almayı hedeflemektedir. Bu bakış açısı, geçmişin izlerini sürekli olarak referans alırken, aynı zamanda mekânın yeni bir anlam kazanmasını sağlamaktadır (Auster, 2012). Örneğin, tarihi bir yapının yeniden inşasında, o yapının işlevsel olarak yeniden tasarlanması, eski ve yeni arasındaki diyalog üzerinden mekânın anlamını genişletebilmektedir. Spekülatif tasarım ve eleştirel yaklaşım, tarihi mekânlardaki bu yeniden kurma sürecinde önemli bir rol oynamaktadır. Spekülatif tasarım, geçmişin fiziksel ve kültürel bağlamını modern tasarım anlayışlarıyla birleştirerek yeni mekânsal anlatılar yaratmayı mümkün kılmaktadır. Eleştirel bir yaklaşım ise, bu yeniden inşa sürecine dair toplumsal, kültürel ve tarihsel

eleştiriler geliştirmeyi amaçlamaktadır. Bu tür bir eleştiri, sadece tarihi mekânları korumakla kalmaz, aynı zamanda bu mekânların tarihsel bağlamda ne anlama geldiğini sorgulamakta ve farklı bir perspektiften yeniden yorumlanmasını sağlamaktadır (Green, 2005). Bu noktada, yapay zekâ destekli tasarım araçlarının ve spekülatif üretim yöntemlerinin mekânsal yeniden inşa süreçlerine nasıl katkı sağladığı önemlidir. Bu çalışmada, tarihi mekânların yeniden inşası yalnızca fiziksel bir süreç olarak ele alınmamaktadır. Aksine, mekânın temsili, yorumlanması ve yeniden tasarımı, tarihsel bağlamın yeniden kurulumunun bir aracı olarak düşünülmektedir. Dolayısıyla, "yeniden kurma" kavramı, tarihsel mekânların modern ihtiyaçlar ve toplumsal değişimlerle uyumlu bir şekilde yeniden biçimlendirilmesi için bir yol haritası sunmaktadır. Bu bağlamda, mekânın yeniden inşası, yeni bir anlam kazanma ve toplumsal hafızayı modernize etme süreci olarak şekillendirilebilmektedir.

2.1. Bedenleşme Kuramı ve Mekânsal Deneyim

Bedenleşme kuramı, bireyin mekânla kurduğu ilişkinin yalnızca görsel ve zihinsel değil, aynı zamanda duyusal, bilişsel ve bedensel boyutlarını da içeren bütüncül bir deneyim olduğunu temellendirmektedir. Maurice Merleau-Ponty'nin fenomenolojik yaklaşımına göre beden, dünyayı algılamanın bir aracı değil, bizzat algının kaynağıdır; bu nedenle beden, mekânla kurduğu ilişki üzerinden çevresini anlamlandırmaktadır (Merleau-Ponty, 1962). Bu yaklaşım, mimarlıkta mekânın sadece fiziksel değil, aynı zamanda deneyimsel bir organizma olarak ele alınmasını gerektirmektedir. Mimarlık kuramında bedenin mekânla kurduğu bu ilişkiler, yalnızca duyusal etkileşimle sınırlı değildir. Nörobilimsel araştırmalar, bireylerin mekân algısının beynin çeşitli bilişsel işlevleriyle doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir. Özellikle mekânsal hafıza ve yer yön bulma gibi bilişsel süreçlerde, hipokampus gibi beyin yapılarının aktif olduğu ortaya konmaktadır (O'Keefe ve Nadel, 1978). Bu da mimari mekânların bireyin zihinsel haritalarında nasıl yer ettiğini ve bu haritaların deneyimle nasıl yeniden şekillendiğini anlamak açısından önemlidir. Bununla birlikte, mekânın deneyimsel yönü sadece bilişsel süreçlerle değil, aynı zamanda duyusal bütünlük ile şekillenmektedir. Pallasmaa (1996), mimarlıkta görme duyusunun aşırı ön plana çıkmasının mekânın diğer duyularla algılanma potansiyelini zayıflattığını belirtmektedir. Bu eleştiri doğrultusunda beden, görmenin ötesinde dokunma, işitme, koku alma gibi duyular yoluyla mekânla bütünleşmektedir. Böyle bir duyusal derinlik, özellikle tarihi mekânların yeniden kurgulanmasında mekânsal hafızanın yeniden etkinleştirilmesini sağlamaktadır. Mekânsal hafıza, kullanıcıların geçmişteki mekânsal deneyimlerinden edindikleri bilgi ve duygularla doğrudan ilişkilidir. Tarihi bir mekâna dair kolektif ya da bireysel hafızalar, yalnızca fiziksel çevre üzerinden değil, o çevrede yaşanmış deneyimlerin duygusal yüküyle birlikte hatırlanmaktadır. Bu bağlamda, mekânların yeniden inşasında yalnızca görsel referanslara dayanmak yerine, bedensel ve bilişsel izleri de dikkate almak, mekânın bütüncül anlamda yeniden inşa edilmesini olanaklı kılmaktadır. Bu yaklaşımlar, mekân tasarımında deneyim odaklı anlatıların ve sahnelerin oluşturulmasını da kaçınılmaz kılmaktadır. Kullanıcının bedensel olarak katıldığı, duyularla ilişki kurduğu ve bilişsel süreçlerle anlamlandırdığı sahneler, özellikle tarihi dokularda mekânla olan ilişkiyi güçlendirmektedir. Bu anlatılar, kullanıcıya mekân içinde yalnızca bir izleyici değil, aktif bir deneyimleyici olma imkânı tanımaktadır. Bu bağlamda bedenleşme kuramı, duyusal algılar, nörobilimsel yaklaşımlar ve mekânsal hafıza kavramları, mimari deneyimin yeniden inşasında birbirini destekleyen bütünlüklü bir çerçeve sunmaktadır. Bu çerçeve, çalışmanın bir sonraki bölümünde ele alınacak olan yapay zekâ destekli tasarım araçlarının, deneyimi nasıl simüle edebileceği ve sahneleştirebileceği sorularına da zemin hazırlamaktadır. Mimari deneyim, yalnızca görsel değil; çok katmanlı, duyusal bir etkileşimler bütünüdür. Merleau-Ponty'nin fenomenolojik yaklaşımında öne çıkan beden-merkezli algı biçimi, mekânın yalnızca gözle değil, tüm duyularla kavrandığını ileri sürmektedir. Mekân, bedenin zaman içerisindeki hareketiyle anlam kazanmakta; dolayısıyla beden, pasif bir algılayıcı değil, mekânı kuran aktif bir bileşendir. Bu bağlamda, mimarlıkta bedenleşme, mekânsal organizasyonun yalnızca geometrik değil, aynı zamanda duyumsal bir deneyime dönüştürülmesinde merkezi bir rol oynamaktadır. Son yıllarda, nörobilimsel araştırmalar, mimari deneyimin yalnızca fiziksel çevrenin bir yansıması olmadığını, aynı zamanda zihinsel ve duyusal süreçlerce yapılandırıldığını ortaya koymaktadır. Özellikle mekânsal hafıza, proprioseptif algı (bedenin mekânda konumlanma hissi) ve çoklu duyusal entegrasyon gibi süreçler, bireyin mekânla kurduğu ilişkiyi anlamada kritik kavramlardır. Noë (2004)'nun "perceptual enaction (algısal eylem)" yaklaşımı ya da Pallasmaa (1996)'nın "duyuların mimarlığı" üzerine çalışmaları, mimari üretimin salt görsel temsiller üzerinden değil, bütünsel beden deneyimleri aracılığıyla değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Bedenin mekânla etkileşimi, aynı zamanda zamansal bir düzlemde gerçekleşir. Her adımda oluşan mikro-duruşlar, yönelim değişimleri, yüzeyle temas biçimleri gibi mikrojestler; bireyin belleğinde duyusal izler bırakmaktadır. Bu izler, nörobilimsel düzeyde, beynin hipokampüs bölgesindeki mekânsal haritalarla ilişkilendirilmekte ve bireyin çevresini nasıl hatırladığına dair dinamik bir yapı ortaya koymaktadır. Dolayısıyla deneyimlenen bir mimari ortam, yalnızca geçici bir mekânsal olay değil, aynı zamanda nörobiyolojik olarak kodlanan bir hafıza birimine dönüşmektedir. Bütün bu çerçevede, mimarlıkta deneyimsel üretimler; görsel imgelerin ötesine geçerek, duyusal sürekliliği temel alan, bedenin mekânla kurduğu ilişkinin izlerini

taşıyan tasarımlarla şekillenmektedir. Bu tür bir yaklaşım, geleneksel temsillerin ötesinde, bedenin mekânsal hikâyesini kuran sahnelemeler, senaryolar ve kesitler aracılığıyla ifade bulmaktadır. Böylece bedenleşme, yalnızca bir algı biçimi değil, aynı zamanda tasarımın üretici unsurlarından biri olarak mimari anlatının merkezine yerleşmektedir.

2.2. Yapay Zekâ Destekli Tasarım Araçları

Mimarlık pratiği, teknolojik dönüşümlerle birlikte yalnızca üretim yöntemleri bakımından değil, aynı zamanda düşünme ve temsil biçimleri açısından da köklü bir değişim sürecine girmiştir. Yapay zekâ (YZ) destekli tasarım araçları, bu dönüşümün önemli bileşenlerinden biri olarak, geleneksel tasarım anlayışının ötesine geçen yeni yaratım biçimlerini mümkün kılmaktadır. YZ'nin özellikle tasarımda örüntü tanıma, öngörüleme, form üretimi ve veri temelli spekülasyon gibi alanlarda sunduğu olanaklar, tasarımcının sezgisel kararlarını destekleyen yaratıcı bir işbirlikçi haline gelmesini sağlamaktadır (Schumacher, 2021; Oxman, 2017). Yapay zekânın bu tür üretim süreçlerine entegrasyonu, yalnızca verimlilik odaklı bir optimizasyon aracı olarak değil, aynı zamanda eleştirel ve spekülatif tasarımın tetikleyicisi olarak da değerlendirilmektedir. Özellikle tarihsel bağlamla çalışan projelerde, YZ'nin sunduğu üretim kapasitesi, geçmişe dair kısıtlı verilerden yola çıkarak, çoklu yorum olanaklarıyla alternatif gelecekler veya "hiç yaşanmamış geçmişler" kurgulamak için kullanılabilmektedir. Bu yaklaşım, restorasyonun ötesinde, yeniden kurma eylemini eleştirel bir tasarım pratiği olarak yeniden düşünmeyi mümkün kılar (Graham ve Cook, 2010). YZ tabanlı üretim süreçlerinde, geleneksel çizim tekniklerinden farklı olarak, mekânsal veriler; metinsel girdiler, görsel örüntüler, ses kayıtları veya topografik veriler gibi çoklu veri setlerinin yorumlanmasıyla yeniden şekillendirilebilmektedir. Bu durum hem görselleştirme hem de mimari temsil yöntemlerinde önemli bir kırılmaya işaret etmektedir. Tasarımcı artık yalnızca plan, kesit ve görünüş üretmez; aynı zamanda anlatı kurmakta, sahne oluşturmakta, duyusal izlenimler simüle etmektedir. Böylece tasarım süreci, yalnızca fiziksel çevrenin değil, tarihsel ve duyusal bağlamın da yeniden üretildiği bir kurguya dönüşmektedir. Bu noktada, yapay zekânın mimari tasarıma katkısı, yalnızca araçsal değil, aynı zamanda kuramsal ve deneyimsel bir boyut taşmaktadır. İnsan-YZ iş birliği, mimari temsilin sınırlarını genişletirken, bellek, anlatı ve mekânsal deneyim gibi kavramların tasarım sürecine entegre edilmesine de olanak tanımaktadır. Bu da mimarlıkta sadece "inşa etmeyi" değil, geçmişin, şimdiyle ve gelecek kurgularıyla ilişkisini yeniden kurmayı mümkün kılan bir yaratım alanı ortaya koymaktadır. Günümüzde yapay zekâ (YZ), mimarlık pratiğinde yalnızca üretim süreçlerini hızlandıran bir teknoloji değil; aynı zamanda tasarımın spekülatif, deneyimsel ve kuramsal boyutlarını dönüştüren yaratıcı bir ortak olarak değerlendirilmektedir (Burry, 2011). YZ'nin özellikle spekülatif tasarım yaklaşımlarında sunduğu olanaklar, veri temelli yeni düşünme biçimlerini teşvik etmekte ve mimarın sezgisel karar verme sürecini genişleten hibrit bir üretim modelini beraberinde getirmektedir. YZ destekli tasarım, özellikle generatif ve öğrenen algoritmalar sayesinde, tasarım girdilerine karşılık çok sayıda mekânsal olasılık üretebilme kapasitesine sahiptir. Bu durum, yalnızca alternatif mekânsal çözümler üretmekle kalmaz; aynı zamanda geçmişte var olmuş fakat belgelenememiş mimari yapıların yeniden yorumlanmasını da mümkün kılmaktadır. Böylece, mimarlık tarihinde veri eksikliği nedeniyle temsil edilemeyen yapılar veya mekânsal bağlamlar, YZ'nin sentezleme ve örüntü oluşturma kabiliyeti sayesinde yeniden "kurgulanabilir" hale gelmektedir. Bu bağlamda, restorasyonun ötesinde "yeniden kurma" fikri, yapay zekâ teknolojilerinin eleştirel tasarımla birleştiği noktada güçlü bir araç haline gelmektedir (Graham ve Cook, 2010). Örneğin, tarihi bir mekâna ait sınırlı görsel, yazılı veya topografik veriler, YZ destekli algoritmalar tarafından sentezlenerek geçmişe dair farklı olasılıklar üretmekte kullanılmaktadır. Bu hem tarihsel bağlamın yeniden yorumlanmasına hem de temsil biçimlerinin çeşitlenmesine katkı sağlamaktadır.

Mimari tasarımda sıklıkla kullanılan bazı YZ tabanlı araçlar şunlardır:

- Midjourney / DALL·E / Stable Diffusion gibi görsel üretim modelleri, yazılı girdilerden görsel senaryolar ve atmosferler oluşturmaktadır. Bu araçlar, özellikle tarihi mekânların spekülatif yeniden yorumlanmasında mimara anlatı temelli sahneler üretme gücü kazandırmaktadır.
- Runway ML, ControlNet, TopoAI gibi platformlar, mimari kesit ve planlara görsel veya işitsel veri entegre ederek, mekânın duyusal yönlerinin daha karmaşık biçimlerde temsil edilmesine olanak tanımaktadır. (Runway ML, n.d.)
- Rhino+Grasshopper ile entegre edilen Machine Learning bileşenleri (örn. Owl - Machine Learning for Grasshopper, n.d., Lunchbox ML), parametrik modelleme sürecinde YZ tabanlı varyasyonlar üretir ve mekânsal analizleri otomatikleştirmektedir.

Bu araçlar sadece üretim sürecini çeşitlendirmekle kalmaz; aynı zamanda veri odaklı spekülasyonlar sayesinde geçmiş, şimdi ve gelecek arasında yorumlayıcı bağlar kurma imkânı sunmaktadır. YZ tabanlı araçların en dikkat çekici yönlerinden biri, temsil araçlarını dönüştürmesidir. Geleneksel mimari temsil teknikleri olan plan, kesit ve görünüşler;

artık sahneleştirilmiş atmosferler, olay dizinleri, zaman-mekân ilişkisini içeren kolaj yapılar ya da çok katmanlı veri haritalarıyla birlikte sunulmaktadır (Carpo, 2020). Bu da temsilin yalnızca fiziksel değil, bilişsel ve duyusal verileri de içerecek biçimde yeniden inşa edilmesini gerektirmektedir. Bu bağlamda, temsil artık yalnızca bir mekânı göstermek değil, o mekânın belleğini, olasılıklarını ve deneyim potansiyelini de yeniden canlandırmak anlamına gelmektedir.

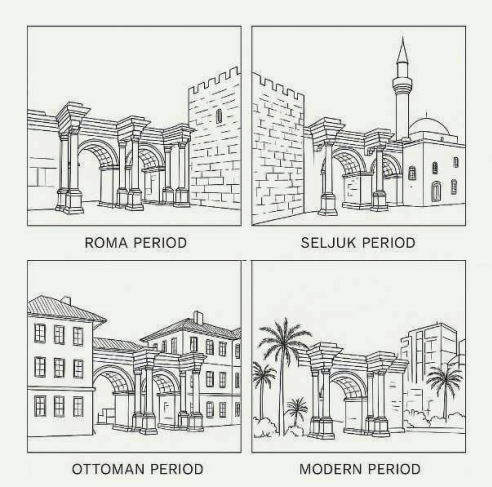
2.3. Mimarlıkta Deneyimsel ve Senaryolaştırmış Anlatılar

Mekânın yalnızca fiziksel değil, aynı zamanda zamansal ve duygusal bir deneyim olduğu savı, son yıllarda mimarlık alanındaki anlatı odaklı yaklaşımların önemini arttırmaktadır (Rendell, 2006). Özellikle tarihsel bağlamdaki tasarımlarda, geçmişin sadece belgelerle değil, deneyimsel kurgu ve mekânsal hikâyeleme yoluyla da temsil edilebileceği düşüncesi ön plana çıkmaktadır. Bu bağlamda, deneyimsel anlatılar ve senaryolaştırma, kullanıcıyı yalnızca gözlemleyen değil, aynı zamanda mekânla etkileşimde bulunan bir özne olarak konumlandırmaktadır. Böylece kullanıcı, geçmişin izlerini yeniden kurarken aynı zamanda bugünü ve geleceği de yeniden yorumlayan aktif bir fail haline gelmektedir. Senaryolaştırılmış anlatılar, mekânın anlam katmanlarını çoğaltarak, kullanıcı deneyimini yalnızca görsel bir etkiyle sınırlamaz; bunun yerine zamansal geçişler, olay örgüleri ve mekânsal değişkenlerle birlikte çok katmanlı bir anlatı örüntüsü sunmaktadır (Schmid, 2008). Bu tür yaklaşımlar, özellikle geçmişte yaşanmış olayların ya da kolektif hafızanın yeniden inşa edildiği mimari kurgularda, bellek, kurgu ve temsil ilişkisini tartışmaya açmaktadır. Böylece mimarlık, sadece inşa eden değil, aynı zamanda anlatan bir disiplin olarak konumlanmaktadır. Özellikle dijital üretim teknikleri ve yapay zekâ destekli tasarım araçlarıyla elde edilen spekülatif sahneler, mekânın mevcut biçimini sorgularken aynı zamanda alternatif tarihsel senaryolar üretme potansiyeli taşımaktadır. Bu noktada kurgusal sahneler, sadece fiziksel bir düzenleme değil, aynı zamanda duygusal ve bilişsel bir yeniden inşa aracıdır. Mimari temsilde hikâyeleme yöntemleri, geçmişin sabit bir veri kümesi olmaktan çıkarılarak, yorumlanabilir ve yeniden kurulabilir bir yapı olarak ele alınmasını mümkün kılmaktadır (Narrative Architecture, 2021). Zaman-mekân bütünlüğü içerisinde geliştirilen senaryolar ise, geçmişe ait yaşantıların yeniden canlandırılmasını değil, bugünün soruları ışığında yeniden kurgulanmasını hedeflemektedir. Bu yaklaşım, mimarlığın sadece estetik ve işlevsel değil, aynı zamanda kültürel ve tarihsel sorumluluklar taşıyan bir üretim pratiği olduğunu hatırlatmaktadır. Yapay zekâ ile desteklenen bu senaryo kurguları; geçmişte yaşanmış, belgelenmiş ya da spekülatif olayların sahneleştirilmesi yoluyla deneyimsel diyagramlar, kesitler ve görsel anlatılarla desteklenmektedir. Böylece mimarlık, klasik temsillerin ötesine geçerek, kullanıcıda etki bırakan ve zamansal farkındalık yaratan bir anlatı düzlemine evrilmektedir.

3. Alan Seçimi: Hadrian Kapısı ve Çerçevesi

Hadrian Kapısı'nın kent içindeki konumlanışı, çevresindeki yaya sirkülasyonu, turistik yoğunluk, algısal sınırlar ve kamusal kullanım biçimleri göz önünde bulundurulduğunda, çalışma kapsamında geliştirilecek olan spekülatif kesitlerin ve deneyimsel anlatıların test edilebileceği nitelikte bir örneklem sunduğu değerlendirilmektedir. Bu bağlamda yapı, yalnızca tarihsel bir anıt olarak değil; senaryo kurgusu, bedenleşmiş deneyim ve yapay zekâ destekli görsel üretim gibi çağdaş anlatım tekniklerinin uygulanabileceği bir araştırma alanı olarak konumlandırılmıştır. Seçilen alanın hem arkeolojik katmanlarla ilişkili mekânsal derinliği, hem de duyusal ve bilişsel algının çeşitlenmesine imkân veren yapısal özellikleri, burayı mimari anlatım araçlarıyla yeniden ele almak için uygun kılmaktadır. Bu özellikleriyle Hadrian Kapısı, çalışma kapsamında önerilecek spekülatif yeniden inşa kurgularının hem fiziksel hem de temsil düzeyinde sınanabileceği bir mekânsal bağlam sunmaktadır. Antalya'nın kent belleğinde önemli bir yere sahip olan Hadrian Kapısı, Roma İmparatoru Hadrianus'un MS 130 yılında kenti ziyareti onuruna inşa edilmiş, üç kemerli anıtsal bir giriş yapısıdır. Helenistik, Roma ve Bizans dönemlerinden izler taşıyan Kaleiçi sur hattının bir parçası olarak konumlanan bu yapı, kent dokusu içerisinde tarihsel sürekliliğin ve kesintinin mekânsal karşılıklarından biri olarak değerlendirilmektedir (Foss, 1997). Kapı, yalnızca fiziksel bir geçiş noktası değil; aynı zamanda kentsel bir eşik, zamanlar arası bir bağlayıcı ve tarihsel temsillerin yoğunlaştığı bir anlatı alanı olarak da okunmaktadır. Tarihsel bağlamda Hadrian Kapısı, farklı dönemlerde geçirdiği onarımlar, çevresindeki yapılaşma dinamikleri ve geçirdiği dönüşümler ile çok katmanlı bir mekânsal deneyim sunmaktadır. Bu çok katmanlılık, yalnızca restorasyon perspektifiyle ele alınmaktan öte, eleştirel bir temsil aracılığıyla yeniden inşa edilmesi gerektiği fikrini güçlendirmektedir (Rossi, 1982). Yapının her bir katmanında bedenin deneyimlediği farklı zaman ve mekânlara ait izler bulunmakta; bu durum, yapının mimarlık kuramları açısından bir geçiş mekânı olarak ele alınmasına olanak tanımaktadır. Merleau-Ponty'nin fenomenolojik yaklaşımıyla bedenin dünyayla ve özellikle mekânla kurduğu ilişki, deneyimin yalnızca görsel değil, çok duyulu ve bedensel bir katılım üzerinden gerçekleştiğini ortaya koymaktadır (Merleau-Ponty, 1962). Hadrian Kapısı, bu anlamda bedenin kent ile kurduğu ilişkinin yoğunlaştığı bir eşik mekânı olarak okunabilmektedir. Ziyaretçinin yavaşladığı, yön değiştirdiği, çevresine baktığı ya da durduğu bu alan, bedenin mekânla kurduğu ilişkisel yoğunluğu artırmakta ve mimari deneyimi bilişsel bir

etkinlik haline dönüştürmektedir (Pallasmaa, 1996). Aynı zamanda bu alan, kent belleği ile bireysel hafıza arasında bir ara yüz olarak da işlev görmektedir. Nora'nın (1989) "lieux de mémoire" yani "hafıza mekânları" kavramıyla açıklanan bu yapılar, geçmişin izlerini taşımanın ötesinde, güncel anlatıların üretildiği ve yeniden yapılandırıldığı alanlardır. Hadrian Kapısı, bu anlamda sadece bir anıt değil; eleştirel, deneyimsel ve spekülatif anlatıların sınanabileceği dinamik bir temsil alanı olarak değerlendirilmektedir. Yapının kent içindeki konumlanışı, çevresindeki yaya sirkülasyonu, turistik yoğunluk, algısal sınırlar ve kamusal kullanım biçimleri göz önünde bulundurulduğunda, geliştirilecek spekülatif kesitlerin ve deneyimsel anlatıların test edilebileceği nitelikte bir örneklem sunduğu görülmektedir. Arkeolojik katmanlarla ilişkili derinliği ve duyusal-bilişsel algının çeşitlenmesine olanak tanıyan yapısal özellikleriyle Hadrian Kapısı, hem fiziksel hem de temsil düzeyinde mimari senaryoların kurgulanabileceği özgün bir bağlam teşkil etmektedir. Bu diyagram, Antalya Kaleiçi'nde yer alan Hadrian Kapısı ve çevresinin dört tarihsel dönem boyunca geçirdiği fiziksel, işlevsel ve çevresel dönüşümü görselleştirmektedir. Diyagramda sırasıyla Roma İmparatorluğu dönemi (M.S. 2. yy), Selçuklu dönemi (11–13. yy), Osmanlı dönemi (17–19. yy) ve Cumhuriyet sonrası modern kentleşme süreci (20–21. yy) temsili olarak sunulmuştur. Her bir evrede yapının çevresiyle kurduğu ilişkiler, kamusal kullanımı, algısal sınırlar ve mimari müdahaleler açısından değerlendirilmiştir. Bu kronolojik katmanlama, Hadrian Kapısı'nın yalnızca fiziksel bir anıt olarak değil; aynı zamanda zaman içerisinde farklı yönetim biçimleri, kültürel anlayışlar ve mekânsal politikalarla yeniden biçimlendirilmiş bir kent parçası olduğunu ortaya koymaktadır (Rossi, 1982; Boyer, 1996). Bu tür diyagramatik anlatımlar, özellikle tarihî yapıların yalnızca koruma bağlamında değil, dönüşüm süreçleri üzerinden yeniden okunmasını sağlayarak mimarlık kuramında süreklilik ve kopuş arasındaki ilişkileri görünür kılmaktadır. Roma döneminde imparatorluk anıtı olarak işlev gören Hadrian Kapısı, Selçuklu ve Osmanlı dönemlerinde savunma ve geçiş yapısı olarak farklılaşmış, modern dönemde ise turistik ve kültürel bir odak noktasına dönüşmüştür (Smithson, 2003). **(Şekil 2)** Bu dönüşüm, yapının fiziksel katmanları kadar, kamusal hafızadaki yeri açısından da mekânsal bir süreklilik oluşturur. *(bu çalışma kapsamında yazar tarafından yapay zekâ destekli üretim araçları kullanılarak oluşturulmuştur.)* **(Şekil 1)**



Şekil 1: Hadrian Kapısı'nın Tarihsel Katmanları: Mekânın Dönemsel Dönüşüm Diyagramı

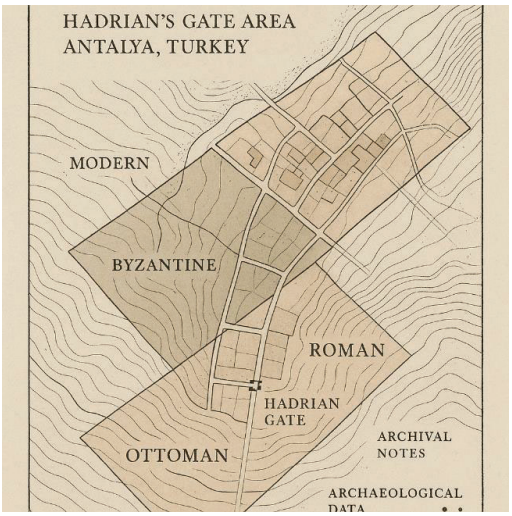
Şekil 2: Antalya Kaleiçi'nde yer alan Hadrian Kapısı'nı ve çevresi

4. Yöntem (AI destekli spekülatif kesitler ve sahneler)

Bu çalışmanın yöntemsel çerçevesi, mimarlıkta temsil araçlarının dönüşümüne odaklanan çağdaş kuramsal yaklaşımlardan beslenmekte; yapay zekâ destekli spekülatif kesit ve sahne üretimi üzerinden özgün bir temsil dili geliştirmeyi amaçlamaktadır. Bu bağlamda, tarihsel yapının fiziksel restorasyonun ötesinde, eleştirel temsiller yoluyla yeniden kurgulanması hedeflenmektedir. Söz konusu yaklaşım, geçmişin durağan bir yeniden üretimi değil; alternatif senaryolar ve deneyimsel açılımlar üzerinden geleceğe dönük bir mimari düşünce pratiği önermektedir (Dunne ve Raby, 2013). Yapay zekâ tabanlı üretim araçlarının sunduğu yaratıcı olanaklar, özellikle mimarlık kuramında spekülatif tasarım, temsilde çokluk ve beden-mekân etkileşimi gibi kavramlarla birleştiğinde, tarihî yapıların yeniden ele alınmasına yeni bir zemin sağlamaktadır. Çalışmada kullanılan AI modelleri, veriye dayalı görsel sentezleme yoluyla yalnızca estetik üretim gerçekleştirmemekte; aynı zamanda mekânsal anlatıların çeşitlenmesine katkı sunmaktadır (Bishop, 2017). Bu bağlamda üretimler, "doğru" bir tarihsel temsili yeniden kurmaktan ziyade, tarihsel bağlamla olası ilişkilenme biçimlerine dair eleştirel bir öneri sunmaktadır. Bu yöntemde üç aşamalı bir süreç izlenmiştir:

1. Veri Temelli Kurgu

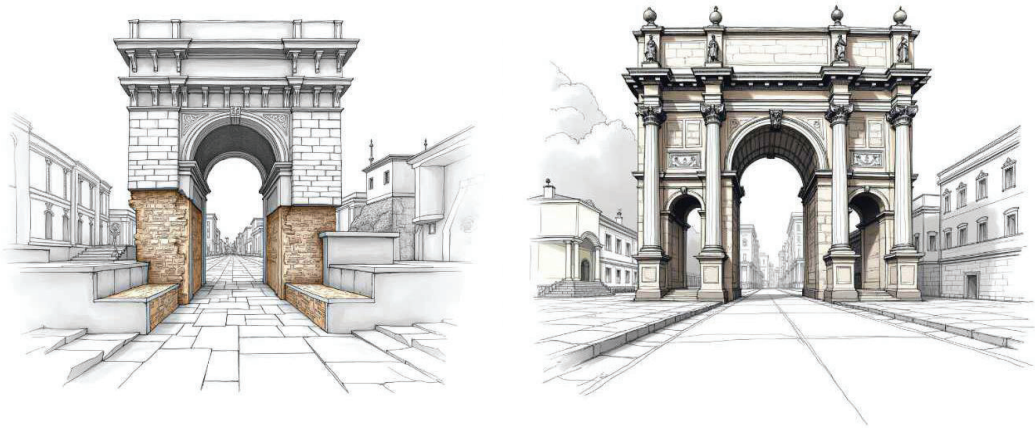
Alanla ilgili tarihsel belgeler, arkeolojik veriler, mevcut planlar ve görsellerin analiz edilmesiyle bir görsel/mekânsal veri havuzu oluşturulmuştur. Bu veriler yalnızca yapının fiziksel geçmişini değil; aynı zamanda çevresel değişimleri, algısal sınırları ve kamusal kullanımla ilgili dinamikleri de kapsamaktadır **(Şekil 3).**



Şekil 3: Hadrian Kapısı ve çevresinin tarihsel katmanlarını gösteren harita üzerindeki veri diyagramı

2. Yapay Zekâ Destekli Görsel Üretim

Diffusion modelleri ve stil transferine dayalı üretim araçları kullanılarak alternatif temsiller oluşturulmuştur. Bu temsiller, gerçeklikten tamamen kopmayan ancak onu yeniden yorumlayan, çoğul perspektiflere dayalı sahne ve kesitlerdir. Üretim süreci, hem disiplinler arası hem de katmanlı bir anlatım diliyle desteklenmiştir (Goodman, 2021). **(Şekil 4).**



Şekil 4: Hadrian Kapısının farklı tarihsel katmanlarını ve geçişlerini ifade eden spekülatif kesit örneği

3. Kurgu, Senaryo ve Temsil Bütünlüğü

Üretilen temsiller, yalnızca görsel birer ifade değil; aynı zamanda mekânsal deneyimi canlandıran birer anlatı aracı olarak değerlendirilmiştir. Bu kapsamda bedenin mekânla kurduğu ilişki, kullanıcı perspektifinden zaman içinde değişen sahne deneyimleriyle temsil edilmiştir **(Şekil 5).**

Şekil 5: Kullanıcı rotaları ve beden-mekân etkileşimlerini gösteren sahne içi temsil

Bu yaklaşım, Merleau-Ponty'nin bedenlenmiş özne anlayışıyla da örtüşmektedir. Ona göre beden, yalnızca mekân içinde bulunan bir nesne değil, aynı zamanda mekânı kuran özne olarak hareket etmektedir (Merleau-Ponty, 1962). Bu bağlamda spekülatif sahneler, kullanıcının mekânla olan bu duyusal ilişkisini görünür kılacak şekilde kurgulanmıştır. Görselleştirme araçlarının deneyimle kurduğu ilişki, temsili tekillikten uzaklaştırarak çoklu algı potansiyellerine alan açmaktadır (Pallasmaa, 1996). Bu yöntem, temsilin yalnızca bir sonuç değil; aynı zamanda bir düşünme biçimi olduğunu savunan kuramcıların yaklaşımına paralel olarak geliştirilmiştir (Corner, 1999). AI destekli spekülatif temsiller bu yönüyle birer epistemolojik araç olarak da işlev görmektedir; yani yalnızca göstermez, aynı zamanda sorgulamakta, varsaymakta ve önermektedir. Bu yaklaşım, restorasyonun sabit doğruluk arayışına alternatif olarak, eleştirel temsile dayalı ve deneyime açık bir yeniden inşa anlayışı sunmaktadır. Temsili çoğaltmak, algıyı çoğullaştırmak anlamına gelir; bu da mimarlıkta yalnızca nesnenin değil, izleyicinin de üretici olduğu bir düzlemi mümkün kılmaktadır (Vidler, 1992). Çalışmada yapay zekâ, bu çoğul anlatıların üretiminde etkin bir düşünme ortaklığı olarak kullanılmaktadır.

5. Senaryolaştırılmış Mekânsal Anlatılar

Yapay zekâ destekli spekülatif sahne ve kesitlerin üretilmesi, geleneksel temsil araçlarının ötesine geçerek yeni bir tasarım dili oluşturmayı mümkün kılmaktadır. Bu bağlamda, oluşturulan kesitlerde yalnızca fiziksel mekânın tarihsel dokusu değil, aynı zamanda beden-mekân etkileşimleri ve kullanıcı deneyimleri de önceliklendirilmiştir. Bu sahnelerde bedenin mekânsal deneyimi, Merleau-Ponty'nin "bedenlenmiş özne" kavramı doğrultusunda yorumlanmaktadır (Merleau-Ponty, 1962). Özellikle geçiş, bekleme, yön bulma gibi eylemlerin tarihî bir mekânın farklı dönemleriyle nasıl ilişkilendiği, yapay zekâ tarafından işlenmiş spekülatif sahneler aracılığıyla görsel olarak sorgulanmaktadır. Bu kesitte, mimari strüktürlerin yanı sıra kullanıcı hareketleri, görsel odaklar, sesin yayılımı ve yönelme biçimleri gibi unsurlar temsil edilmektedir **(Şekil 6).**

Şekil 6: Hadrian Kapısı çevresinde beden-mekân etkileşimlerini betimleyen spekülatif kesit

Üretilen sahneler yalnızca tekil bir zaman dilimine ait değil, birden fazla tarihsel ve kurgusal zamanın eşzamanlı olarak temsil edildiği anlatı alanlarıdır. Bu durum, özellikle Gilles Deleuze'ün "kristal-zaman" kavramı (1985) ile ilişkilendirilebilir; çünkü sahnelerde geçmiş, şimdi ve olası gelecek temsilleri bir arada okunabilmektedir. Bu anlatım biçimi, hem kullanıcıyı mekânın içine yerleştirir hem de tasarımcıyı alternatif tarih anlatıları oluşturmaya teşvik eder. Sahneler, bir tür mimari spekülasyon aracı olarak işlev görmekte, mimarın temsil ile kurgu arasındaki ilişkiyi yeniden düşünmesini sağlamaktadır (Rendell, 2006). Aşağıdaki spekülatif kesitte, mimari strüktürlerin yanı sıra kullanıcı hareketleri, görsel odaklar, sesin yayılımı ve yönelme biçimleri gibi unsurlar temsil edilmektedir **(Şekil 7).**

Şekil 7: Geçmiş, şimdi ve olası gelecek bağlamlarını eşzamanlı temsil eden sahne

Bu görsel üretim sürecinde özellikle bedenin mekâna verdiği tepkilerin, yönelme, uzaklaşma, eğilme, odaklanma gibi, sahne içinde sezgisel olarak temsili önemsenmektedir. AI destekli görsel üretim, yalnızca geometrik bir modelleme değil, aynı zamanda deneyimin sezgisel boyutunu aktaran bir mimari anlatı üretilmektedir. Bu noktada diyagram ve sahneler, mimarlığın anlatım gücünü artıran bir yöntem olarak değil, aynı zamanda kuramsal bir sorgulama aracı olarak da işlev görmektedir. Görseller, bedenin mekânsal hafızası, duyusal eşikler ve davranışsal tepkiler gibi katmanları, temsil düzeyine taşımaktadır (Bloomer ve Moore, 1977). AI destekli üretim araçları yalnızca bir "görselleştirme" işlevi değil, aynı zamanda anlam üretme sürecine katkıda bulunan birer yorumlayıcı olarak çalışmaktadır. Görsellerin biçimlenmesinde, yapay zekâ algoritmalarının olasılıksal önerileri, tasarımcının sezgileriyle birleşerek yeni bir anlatım dili ortaya koymaktadır. Bu durum, temsili yalnızca "betimleme" eylemi olmaktan çıkarıp, "yorumlama" ve "önermede bulunma" düzeyine taşımaktadır. Yapay zekâ ile üretilen bu sahneler, aynı zamanda mimari söylemin sınırlarını

genişleten alternatif düşünce biçimlerinin birer ürünü olarak okunabilmektedir (Carpo, 2021) Aşağıdaki sahnede, görsel dikkat noktaları, ışık-gölge ilişkisi, sesin mekâna yayılımı gibi unsurlar, insan figürleri üzerinden anlatılmıştır **(Şekil 8).**

Şekil 8: Duyusal eşiklerin beden hareketlerine etkisini gösteren sahne anlatısı

6. Sonuçlar

Bu çalışma, tarihî bir yapının, Hadrian Kapısı'nın, sadece geçmişin bir temsili olarak değil, aynı zamanda çağdaş anlatım biçimleriyle yeniden inşa edilebilecek, deneyimlenebilecek ve eleştirilebilecek çok katmanlı bir mekânsal anlatı alanı olarak ele alınabileceğini ortaya koymuştur. Mimarlığın temsili ve kuramsal araçları, yalnızca fiziksel mekânın betimlenmesini değil; aynı zamanda beden, algı, bellek ve teknoloji arasında kurulan karmaşık ilişkilerin görünür kılınmasını da mümkün kılmaktadır. Bedenleşme kuramı üzerinden geliştirilen yaklaşımlar, mekânın yalnızca görsel değil; dokunsal, işitsel ve yönelimsel deneyimlerle şekillendiğini ortaya koymuş; yapay zekâ destekli üretim araçları ile bu duyusal deneyimlerin spekülatif temsillere nasıl dönüştürülebileceği incelenmiştir. Bu doğrultuda, tarihî mekânın fiziksel katmanları ile zihinsel temsilleri arasındaki geçirgenlik, hem kesit hem de sahne düzeyinde yeniden üretilmiş ve birer deneyim aracına dönüştürülmektedir. Yapay zekâ destekli sahne ve kesit üretimleri, tasarımcının sezgisel kararlarını destekleyen, çoklu olasılıkları test edebilen ve duyusal yoğunlukları artırabilen bir üretim diline dönüşmektedir. Bu bağlamda çalışma, restorasyonun ötesine geçerek, eleştirel temsili bir tasarım pratiği olarak yeniden inşa fikrini savunmuştur. Yalnızca nesnel doğruların peşinden giden bir tarihsel yaklaşım yerine; öznel, yorumlayıcı ve çoklu anlatılar barındıran bir temsil stratejisi önermektedir. Çalışma sürecinde geliştirilen spekülatif diyagramlar, kesitler, harita temelli analizler ve deneyimsel sahneler; tarihî bir yapının yalnızca geçmişe değil, aynı zamanda bugüne ve geleceğe dair nasıl yeniden düşünebileceğini göstermektedir. Hadrian Kapısı örneğinde olduğu gibi, bir mekânın zamansal ve duyusal derinliği, onun temsil biçimlerini de dönüştürebilecek bir potansiyel taşımaktadır. Sonuç olarak bu çalışma, tarihî mekânların korunması, temsili ve yeniden inşasına dair mimarlık içinde süregelen tartışmalara kuramsal ve görsel düzeyde bir katkı sunmaktadır. Deneyimsel anlatı, bedenleşmiş algı ve yapay zekâ destekli üretimlerin birleşimi; sadece tarihî mekânın nasıl "yeniden kurulabileceğine" dair bir öneri değil, aynı zamanda mimarlığın gelecekteki temsil biçimlerine dair bir sorgulama alanı olarak değerlendirilebilmektedir.

6.1 Tartışma: Tarihî Anlatının Dönüşümü ve Eleştirel Temsil

Tarihî yapılar, çoğu zaman geçmişin birer temsili olarak ele alınırken; bu yapıların çağdaş araçlarla yeniden değerlendirilmesi, mimarlık disiplini içinde eleştirel ve yaratıcı bir temsil olanağı sunmaktadır. Özellikle dijital teknolojilerin gelişimiyle birlikte, tarihî yapılar artık yalnızca korunacak nesneler değil, aynı zamanda yeniden kurgulanabilecek anlatılar haline gelmektedir. Bu bağlamda, temsilin kendisi de yalnızca bir sunum aracı olmaktan çıkıp, tasarımın öznesine dönüşmektedir (Vidler, 1992). Yapay zekâ destekli üretim teknikleri ve bedenleşme kuramı gibi çağdaş yaklaşımlar, tarihî mekânların deneyimsel ve yorumlayıcı biçimlerde yeniden ele alınmasını mümkün kılmaktadır. Bu tür bir temsil, yalnızca geçmişi taklit etmeyi değil, aynı zamanda o geçmişi anlamlandırma, sorgulama ve yeniden kurma süreçlerini de içine alır (Rendell, 2006). Spekülatif anlatılar, geleneksel koruma pratiklerinin ötesine geçerek tarihsel katmanları günümüz yorumlarıyla yeniden şekillendirmeyi önerir. Bu yaklaşım, Walter Benjamin'in tarihsel süreksizlik ve fragmanlar üzerinden kurguladığı "şimdi-zaman" anlayışıyla da örtüşmektedir (Benjamin, 1968).

Bu bağlamda, Hadrian Kapısı çevresinde geliştirilen spekülatif kesitler ve deneyimsel sahneler, yalnızca fiziksel bir yeniden inşa süreci değil, aynı zamanda tarihî mekânın algılanışı, belleği ve bedenlenişi üzerine bir tartışma zemini sunmaktadır. Bu yaklaşım, mimarlığın yalnızca mekânsal değil, aynı zamanda anlatımsal bir disiplin olarak konumlandırılması gerektiğine işaret eder. Dolayısıyla, yapay zekâ destekli üretimlerin sunduğu temsil biçimleri, tarihsel anlatıların sabitliğini kırarak daha esnek, çok katmanlı ve deneyim odaklı yorumlar üretmeyi mümkün kılmaktadır. Tasarımın kendisi, bu yönüyle tarihî mekânın deneyimlenme biçimini dönüştüren bir temsil aracına dönüşmekte; anlatının fiziksel değilse de bilişsel ve duyusal yeniden inşasını olanaklı hale getirmektedir. Bu dönüşüm, temsilin sadece 'ne olduğu'nun değil, 'nasıl deneyimlendiği'nin de önem kazandığı bir anlatı rejimini ön plana çıkarır.

KAYNAKLAR

Auster, A. (2012). *The architecture of the city: A reconsideration*. New York University Press.

Bishop, R. (2017). *The Artificial intelligence design nexus*. Architectural Design, *87*(4), 6–13. https://doi.org/10.1002/ad.2198

Bloomer, J., & Moore, C. (1977). *Body, memory, and architecture*. Yale University Press.

Boyer, M. C. (1996). *The city of collective memory: Its historical imagery and architectural design*. MIT Press.

Burry, M. (2011). *Scripting Cultures: Architectural design and programming*. Wiley.

Carpo, M. (2020). *The second digital turn: Design beyond intelligence*. MIT Press.

Carpo, M. (2021). *Beyond digital: Design and automation at the end of modernity*. MIT Press.

Corner, J. (1999). *The agency of mapping: Speculation, critique and invention*. In D. Cosgrove (Ed.), *Mappings* (pp. 213–252). Reaktion Books.

Deleuze, G. (1985). *Cinema 2: The time-image*. University of Minnesota Press.

Dunne, A., & Raby, F. (2013). *Speculative everything: Design, fiction, and social dreaming*. MIT Press.

Foss, C. (1997). *Survey of Antalya and environs: Historical topography and monuments*. British Institute of Archaeology.

Graham, B., & Cook, S. (2010). *Rethinking curating: Art after new media*. MIT Press.

Green, H. (2005). Reconstructing the past: Architectural preservation and the politics of history. *Journal of Architecture and Urbanism*, *11*(2), 45-60.

Goodman, L. (2021). AI and the aesthetics of architectural speculation. *Journal of Architectural Theory*, *28*(2), 145–163.

Kolarevic, B. (2003). *Architecture in the digital age: Design and manufacturing*. Taylor & Francis.

Merleau-Ponty, M. (1962). *Phenomenology of perception* (C. Smith, Trans.). Routledge.

Narrative Architecture. (2021). *Exploring the role of storytelling in architectural representation*. Architectural Review Press.

Noë, A. (2004). *Action in perception*. MIT Press.

Nora, P. (1989). Between memory and history: Les lieux de mémoire. *Representations*, (26), 7–24. https://doi.org/10.2307/2928520

O'Keefe, J., & Nadel, L. (1978). *The hippocampus as a cognitive map*. Oxford University Press.

Oxman, N. (2017). Material Ecology. *Journal of Design and Science*, (1). https://doi.org/10.21428/7e0583ad

Owl – Machine Learning for Grasshopper. (n.d.). Retrieved from https://www.food4rhino.com/en/app/owl

Pallasmaa, J. (1996). *The eyes of the skin: Architecture and the senses*. Wiley.

Rendell, J. (2006). *Art and architecture: A place between*. I.B. Tauris.

Rossi, A. (1982). *The architecture of the city*. MIT Press.

Runway ML. (n.d.). Retrieved from https://runwayml.com

Schumacher, P. (2021). *Parametricism 2.0 and the autopoiesis of architecture*. Routledge.

Schmid, C. (2008). Henri Lefebvre's theory of the production of space: Towards a three-dimensional dialectic. In K. Goonewardena, S. Kipfer, R. Milgrom, C. Schmid (Eds.), *Space, Difference, Everyday Life*. Routledge.

Smithson, A. (2003). The modern city and its transformations. *Architectural Review*, *57*(3), 77-81.

Tuan, Y. F. (1977). *Space and place: The perspective of experience*. University of Minnesota Press.

Varela, F. J., Thompson, E., & Rosch, E. (1991). *The embodied mind: Cognitive science and human experience*. MIT Press.

Vidler, A. (1992). *The Architectural uncanny: Essays in the modern unhomely*. MIT Press.

MSTAS 2025 MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Kesit Çizimlerinden Dikey Organizasyon İncelenmesi: Derin Öğrenme ile Palladio'nun Mimarisini Keşfetmek

Ece Savaş[1]; Mine Özkar[2]
[1,2]İstanbul Teknik Üniversitesi
[1]savase22@itu.edu.tr; [2]ozkar@itu.edu.tr

Özet

Bu çalışma, mimari temsilde sıklıkla geri planda kalan kesit çizimlerinin, özellikle hesaplamalı tasarım ve yapay zekâ temelli üretim süreçleri bağlamında taşıdığı potansiyeli incelemeyi amaçlamaktadır. Mimari analizlerde baskın olarak kullanılan plan çizimleri, yapının yatay organizasyonu hakkında bilgi sunarken; kesit çizimleri, yapıların düşey boyuttaki mekansal ilişkilerini, işlevsel ayrımlarını, dolaşım örüntülerini ve strüktürel özelliklerini açığa çıkararak özgün bir anlatım dili sunar. Bu bağlamda, kesit çizimleri yalnızca temsili değil, aynı zamanda analitik bir araç olarak ele alınmakta ve hesaplamalı yöntemlerle yeniden üretilebilme potansiyeli araştırılmaktadır. Çalışma kapsamında, Rönesans döneminin önde gelen mimarlarından Andrea Palladio'nun ideal villa tasarımları seçilmiş ve bu yapıların mekansal kompozisyonları, biçimsel düzenlemeleri ve simetrik kurguları üzerinden bir üretim süreci kurgulanmıştır. Villa Rotonda, Villa Foscari ve Villa Caldogno gibi Palladian yapılarının 3B modelleri Rhino ortamında üretilmiş ve her yapıdan yatay düzlemde 50 cm aralıklarla alınan toplam 259 kesit dilimi görsel veri setini oluşturmuştur. Bu görseller, 128x128 piksel boyutuna ölçeklendirilerek derin öğrenme modelleri için optimize edilmiş ve eğitim sürecine dâhil edilmiştir. Makine öğrenmesi yöntemlerinden Çekişmeli Üretici Ağlar'ın (GAN) bir türevi olan DCGAN mimarisi kullanılarak, hem gerçek hem de sentetik kesit çizimlerinin üretimi hedeflenmiştir. PyTorch platformu üzerinde geliştirilen model, farklı epoch'larda değerlendirilerek üretim kalitesi FID skorları ve kayıp fonksiyonları üzerinden analiz edilmiştir. Çıktılar, Palladian mimarisine özgü simetri, aksiyel yerleşim ve hacimsel bütünlük gibi özellikleri kısmen öğrenebildiği gözlemlenmiştir. Ancak bazı üretilen örneklerde, arka plan gürültüsü, strüktürel belirsizlik ve detay kaybı gibi sorunlara da rastlanmıştır. Bu durum, modelin mekansal tutarlılık üretimi konusunda hâlen geliştirilmeye açık olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, bu çalışma kesit çizimlerinin üretimi ve analizi için veri odaklı, hesaplamalı ve yaratıcı bir yöntem önererek mimari temsile yeni bir katkı sunmaktadır. Hem üretilebilirlik hem de analiz edilebilirlik açısından yeniden üretilebilir bir sistem kurgulanmış, bu bağlamda kesitlerin mimarlık literatüründeki önemi vurgulanmıştır. Gelecek çalışmalarda; metin-görsel yönlendirmeli modeller, multimodal veri kullanımı ve semantik kontrol mekanizmaları içeren hibrit yaklaşımlarla bu yöntemin daha gelişmiş versiyonlarını üretmeyi hedeflemektedir.

Anahtar Kelimeler: *Makine Öğrenmesi, Kesit Çizimi, Mimari Temsil, Görsel Üretimi.*

2025 MSTAS MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Examining Vertical Organization from Section Drawings: Exploring Palladio's Architecture with Deep Learning

Ece Savaş[1]; Mine Özkar[2]
[1,2]Istanbul Technical University
[1]savase22@itu.edu.tr; [2]ozkar@itu.edu.tr

Abstract

This study aims to examine the potential of section drawings, which are often left in the background in architectural representation, especially in the context of computational design and artificial intelligence-based production processes. While plan drawings, which are dominantly used in architectural analyses, provide information about the horizontal organization of the structure, section drawings present a unique narrative language by revealing the spatial relationships, functional distinctions, circulation patterns and structural features of the structures in the vertical dimension. In this context, section drawings are considered not only as a representational but also as an analytical tool, and their potential for reproduction with computational methods is investigated. Within the scope of the study, ideal villa designs by Andrea Palladio, one of the leading architects of the Renaissance period, were selected and a production process was designed based on the spatial compositions, formal arrangements and symmetrical structures of these structures. 3D models of Palladian structures such as Villa Rotonda, Villa Foscari and Villa Caldogno were produced in the Rhino environment, and a total of 259 section slices taken at 50 cm intervals on the horizontal plane from each structure constituted the visual data set. These images were scaled to 128x128 pixels and optimized for deep learning models and included in the training process. The DCGAN architecture, which is a derivative of the Adversarial Generative Networks (GAN) from machine learning methods, aimed to produce both real and synthetic section drawings. The model developed on the PyTorch platform was evaluated in different epochs and its production quality was analyzed via FID scores and loss functions. It was observed that the outputs could partially learn features such as symmetry, axial layout and volumetric integrity specific to Palladian architecture. However, problems such as background noise, structural uncertainty and loss of detail were also encountered in some produced examples. This shows that the model is still open to improvement in terms of spatial consistency generation. In conclusion, this study offers a new contribution to architectural representation by proposing a data-driven, computational and creative method for the production and analysis of section drawings. A reproducible system was designed in terms of both producibility and analyzability, and in this context, the importance of sections in architectural literature was emphasized. In future studies; It aims to produce more advanced versions of this method with hybrid approaches that include text-visual oriented models, multimodal data usage and semantic control mechanisms.

Keywords: *Machine Learning, Section Drawing, Architectural Representation, Visual Generation*.

1. Amaç

Mimari temsil ve hesaplamalı tasarımda plan tabanlı analizin baskınlığı, kesit çizimlerinin mekansal yapılandırmaları oluşturmak ve değerlendirmek için değerli bir araç olarak araştırılmasını kısıtlamıştır. Kesit çizimleri, mekansal yakınlık, organizasyonel ilişkiler gibi dikey perspektifte vurgulanan yapı içi sirkülasyon gibi temel yönleri ortaya koyar. Kesitler, açıklıklar, ışık saçaklar ve boyutlar gibi elemanların birbirlerine göre nasıl düzenlendiğini göstererek mekanlar arasındaki etkileşimleri daha da belirgin hale getirir. Planlar yalnızca tek bir yatay düzlem üzerinden analiz sunarken; cepheler yapının dış kabuğuna odaklanır. Buna karşın kesitler, bir yapının birden fazla kotta nasıl işlediğini ve iç mekânların birbirleriyle olan dikey ilişkisini açıkça ortaya koyar. Aynı zamanda cephenin, açıklıkların ve diğer mimari bileşenlerin bu dikey organizasyonla nasıl bütünleştiğini de bütünsel bir bakış açısıyla sunar. Bu bağlamda, kesit çizimleri yalnızca tamamlayıcı değil, binanın mekansal organizasyonunu hem yatay hem dikey eksenlerde dinamik biçimde temsil eden temel bir araç olarak değerlendirilmelidir. Bu çalışmada, kesit çizimlerinin üretimi ve analizi makine öğrenmesi yöntemleriyle ele alınarak, bu temsil biçiminin hesaplamalı tasarım literatüründeki eksik konumuna katkı sağlanması amaçlanmaktadır.

1.1. Literatür Taraması

Kesit çizimlerin farklı kotlardaki mekansal ilişkileri ifade etmedeki potansiyeline rağmen, mimari analiz genellikle mekansal organizasyonları tek bir eksende temsil etmedeki faydaları nedeniyle özellikle hesaplamı tasarım alanında plan çizimlerine öncelik verilmiştir. Bunun başlıca nedeni, planların mekansal organizasyonları yatay düzlemde sade ve doğrudan bir biçimde temsil edebilme avantajıdır.

Bu doğrultuda yapılan çalışmalardan biri Huang ve Zheng (2018) tarafından gerçekleştirilmiş; bu çalışmada, derin öğrenme ağları kapsamında üretken sistemlerden biri olan Çekişmeli Üretken Ağlar (GAN) kullanılarak plan tasarımı yapılmıştır. Araştırmada, özellikle pix2pixHD adlı özel bir GAN mimarisi tercih edilmiş; bu yapı, etiketlenmiş alanlara karşılık gelen gerçekçi mekansal görseller üretebilme kapasitesiyle öne çıkmıştır. Chaillou (2019) ise Çekişmeli Üretken Ağlar (GAN) kullanarak plan üretimi üzerine farklı bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, plan üretim süreci üç aşamalı bir yapıya sahiptir: İlk olarak, planın genel sınırlarını belirleyen bir leke haritası oluşturulmakta; ikinci aşamada, iç mekansal bölüntüler ve organizasyonel düzenlemeler gerçekleştirilmektedir; son aşamada ise tefriş yerleştirilerek plan tamamlanmaktadır. Ancak tüm bu ilerlemelere karşın, kesit analizlerine odaklanan çalışmalar sınırlı kalmıştır. Özellikle dikey mekansal ilişkilerin temsil edildiği kesit çizimleri, hesaplamalı mimarlık metodolojileri içerisinde büyük ölçüde keşfedilmemiş ve yeterince değerlendirilmemiştir.

Mısır kaya oyma anıtları (Wutte ve Duarte, 2021) ve Derinkuyu yeraltı şehri gibi antik yerleri analiz etmek için hesaplamalı yaklaşımlardan yararlanmıştır (Ünlü vd., 2023). Birkaç çalışma, kesit çizimler aracılığıyla form bulma süreçlerini sorgulamak için stil tabanlı makine öğrenimi modelleri kullanmıştır (Zhang vd., 2021). Kesit çalışmalarını ve makine öğrenmesini bir araya getiren bir çalışma ise kesit çizimlerini kullanarak kümbetlerin çatı geometrisini tahmin edebilen makine öğrenmesi tabanlı bir model geliştirilmiştir (Güzelci, 2022). Bu çalışmalar mimari tasarımda dikeyliğin karmaşıklıklarını keşfedilmesi adına adımlar atmıştır.

Bu araştırma, yeni mekansal olasılıkları anlamak ve formüle etmek amacıyla kesit çizimlerinin üretimi ve analizi için hesaplamalı yöntemlerden yararlanarak, literatürdeki bu eksikliği gidermeyi hedeflemektedir. Çalışmada, Andrea Palladio'nun tasarladığı yapı tipolojileri inceleme konusu olarak seçilmiştir. Rowe'nin The Mathematics of the Ideal Villa (1976) adlı çalışmasında Palladio'nun geometrik düzen, oranlar ve kompozisyonel ilkeleri ön plana çıkarılmış; Wittkower'ın Architectural Principles in the Age of Humanism (1949) adlı eserinde ise Palladian villalarının geometrik, oransal ve modüler sistemleri ayrıntılı biçimde ele alınmıştır. Mimarlık ve sanat tarihi literatüründe "ideal villa" konsepti çerçevesinde sıklıkla referans verilen Palladio'nun yapıları, mekansal organizasyon ve sirkülasyon analizleri açısından tutarlı bir veri seti sunmaktadır. Bununla birlikte, Palladian planlara dair yapılan çalışmalar oldukça geniş olsa da, bu yapıların dikey boyutuna ilişkin analizler sınırlıdır. Plan düzeyindeki düzen kurallarının kesit organizasyonuna da yansıdığı varsayımından hareketle, bu çalışma Palladio mimarisine bir vaka çalışması olarak yaklaşmakta ve dikey mekansal ilişkileri merkeze alan yeni analiz ve üretim metodolojileri geliştirmeyi amaçlamaktadır.

2.Yöntem

2.1. Çekişmeli Üretici Ağlar ve DCGAN

Bu çalışmanın temel bileşenlerinden biri, kesit çizimlerine Çekişmeli Üretken Ağların (GAN) uygulanmasıdır. İlk olarak Goodfellow ve diğerleri (2014) tarafından tanıtılan GAN, eğitilen bir üretici (generator) ve bir ayırıcı (discriminator) olmak üzere iki nöral ağından oluşur. Üretici sentetik kesit çizimleri oluştururken, ayırıcı bunları üretilen çıktıların doğruluğunu ve gerçekçiliğini artırmak için gerçek kesitlerle karşılaştırır. Bu yinelemeli süreç, yalnızca önceden tanımlanmış mekansal kısıtlamalara uymakla kalmayıp aynı zamanda mevcut veri kümelerinin sınırlarının ötesinde yeni yapılandırmaları da keşfeden kesit çizimlerinin üretilmesini sağlamayı amaçlamaktadır.

GAN'lerin evrimsel bir türevi olan Deep Convolutional GAN (DCGAN), GAN'lerin görsel veri üretimindeki performansını artırmak amacıyla evrişimsel katmanlar ile zenginleştirilmiştir (Radford vd.,2016). Bu çalışmada kullanılan DCGAN modeli, mimari kesit görsellerini üretmek için tercih edilmiştir çünkü bu mimari, derin öğrenme yöntemleri arasında görsel kalite açısından başarılı ve istikrarlı sonuçlar sunmaktadır. Geleneksel yapay sinir ağlarının aksine, DCGAN tamamen görüntü üretimi için tasarlanmış katmanlar içerir ve öğrenme sürecinde daha az hata ile daha gerçekçi çıktılar üretir. Modelin üretici kısmı, rastgele bir başlangıç verisiyle başlar ve bunu adım adım büyüterek gerçek kesit çizimlerine benzeyen görüntüler oluşturur. Bu süreçte kullanılan bazı işlemler (örneğin veriyi büyütme, normalleştirme ve etkinleştirme) sayesinde çıktılar daha dengeli ve tanımlı hale gelir. Son katmanda, çıktının belirli bir değer aralığında kalması sağlanır, böylece modelin ürettiği görseller tutarlı bir yapı kazanır. Ayrıştırıcı kısım ise hem gerçek hem de üretilmiş görselleri değerlendirerek hangilerinin sahte olduğunu anlamaya çalışır. Bu yapı, üretici ağı daha gerçekçi örnekler üretmeye zorlar. Böylece iki ağ arasında bir rekabet oluşur ve her tekrar ile birlikte görsel kalite artar. DCGAN mimarisi; özellikle sınırlı sayıda veriye sahip durumlarda, görüntü üretimi, stil dönüşümü ve mimari gibi alanlarda güçlü bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışma kapsamında da, mimari kesit çizimlerinin üretimi için etkili ve uygulanabilir bir yöntem sunmaktadır.

2.2. Veriseti

Bu araştırma, dikey kesit analizine makine öğrenimi tekniklerini entegre ederek, kesit çizimlerinden mekansal kurallar türetmeyi amaçlayan yeni bir metodoloji önermektedir. Önerilen yaklaşım üç temel adımdan oluşmaktadır: İlk olarak temsili Palladian villaları seçilmekte, ardından bu yapılardan kesit verileri toplanmakta ve son aşamada bu verilerden elde edilen kurallar kullanılarak yeni mekansal yapılandırmalar üretilmektedir.

Bu yöntem, dikey mekansal ilişkileri kompozisyonel analizle bütünleştirerek Palladio'nun tasarım ilkelerinin kuramsal açıdan daha derinlemesine anlaşılmasına katkı sunmayı hedeflemektedir. Aynı zamanda, daha geniş bir mimari problem alanını kapsayabilecek kural kümeleri üreten esnek bir hesaplamalı tasarım çerçevesi geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu bağlamda çalışma, daha önce üretken sistemlerle genellikle plan düzeyinde ele alınmış Palladio mimarisini kesit boyutunda inceleyerek, bu yapıların mekansal organizasyonuna dair daha kapsamlı bir anlayış geliştirmeyi hedeflemektedir.

Kesit verisi üretimi, mimarlıkta veri seti oluşturma açısından önemli bir zorluk olarak değerlendirilmektedir. Bu nedenle bu çalışmada, mimarlık tarihinde kapsamlı biçimde belgelenmiş ve hesaplamalı tasarım alanında sıklıkla incelenmiş olan Palladio villaları tercih edilmiştir. Aynı yapıya ait plan ve kesit verilerine eşzamanlı erişimin kısıtlı olması nedeniyle, veri seti doğrudan üç boyutlu (3B) modeller üzerinden elde edilmiştir. Bu kapsamda, Palladio'nun tasarımlarını temel alan yapı tipolojileri incelenmiş; Architectural Principles in the Age of Humanism (Wittkower, 1962) adlı çalışmada detaylandırılan geometrik, oransal ve modüler sistemler referans alınmıştır. Ayrıca Bertòtti-Scamozzi'nin 1776 tarihli Palladio çizimleri de modelleme sürecine entegre edilmiştir. Çalışma kapsamında, Palladio'nun çizimlerinden yola çıkılarak üç boyutlu modeller oluşturulmuş; bu modeller üzerinden belirli aralıklarla hem plan hem de kesit dilimleri çıkarılmıştır. Kesit alma işlemi, Kartezyen koordinat sisteminde tanımlanan x ve y düzlemleri üzerinden yapılmış; planlar ise z ekseni boyunca alınmıştır. Elde edilen tüm dilimler iki boyutlu görüntülere dönüştürülerek model eğitimi için uygun bir veri seti haline getirilmiştir. Veriseti için Villa Rotanda, Villa Foscari, Villa Caldagno üç boyutlu modelleri oluştrulmuş. X ve y koordinatlarında 50 cm aralıklarla kesit dilimleri alınmış; her biri 128x128 pikselden oluşacak şekilde 259 kesit veri dilimi oluşturulmuştur (**Şekil 1**).

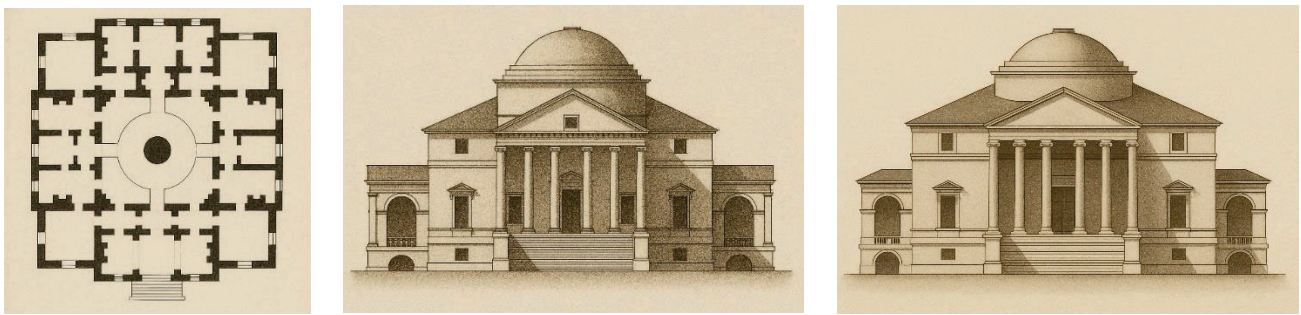
.

Şekil 1: Villa Rotunda x ve y eksenlerinden oluşturulmuş kesit dilimleri

2.3. Çalışma Yöntem ve Kısıtlamaları

Mimarlık, bağlamsal ve etkili biçimde problem çözmeye odaklanan bir alan olarak yaratıcılıkla doğrudan ilişkilidir. Doğal dilde yazılmış yönlendirmelerden özgün dijital görseller üreten metin yönlendirmeli difüzyon modelleri (Nichol vd., 2022) , son dönemde oldukça popüler hale gelmiş ve üretken yapay zekâ, hem akademide hem de endüstride giderek daha fazla kullanılmaya başlanmıştır. Mimarlık alanındaki makine öğrenimi araştırma eğilimlerini incelediği çalışmada, üretken yapay zekâya olan ilginin hızla arttığı tespit edilmiştir (Özerol ve Arslan, 2020). Midjourney ve DALL·E gibi üretken yapay zekâ araçları ise sırasıyla Midjourney ve OpenAI tarafından web tabanlı hizmetler olarak sunulmaktadır. Mimarlık eğitiminde kesit çizimleri, mekansal düşüncenin geliştirilmesi ve mekân üretiminin anlaşılması açısından önemli bir araç olmasına rağmen, uygulamada zaman zaman arka planda kalabilmektedir. Günümüzde tasarımın farklı disiplinleriyle etkileşim içinde gelişen üretim araçları giderek daha fazla çeşitlenmekte ve yaygınlaşmaktadır.

Özellikle difüzyon modelleriyle desteklenen yapay zekâ tabanlı araçlar, tasarımın pek çok alanında aktif olarak kullanılmaktadır. Mimarlık alanındaki uygulamaları henüz sınırlı görülse de, bu tür araçlar tasarım süreçlerinde fikir üretme ve alternatif çözüm önerileri geliştirme açısından potansiyel taşımaktadır. Nitekim, DALL·E gibi difüzyon modeline dayalı yapay zekâ sistemler aracılığıyla Palladio mimarisine ilişkin görsel üretim talebinde bulunulduğunda, belirli estetik ve biçimsel nitelikleri yansıtan sonuçlar elde edilebilmiştir (**Şekil 2**). Şekilde görüldüğü gibi model plan ve cephe görsellerini uygun şekilde üretebilirken kesit ve cephe kavramlarını karıştırarak benzer görseller üretmiştir. Bu nedenle çalışma yöntemi özelleştirilmiş Palladio kesit veriseti hazırlanarak daha uygun bir üretken modelle sağlanmıştır.



Şekil 2: Metin - görüntü modeli ile sırasıyla üretilen plan, kesit ve cephe görselleri

Mimari üretim çalışmalarında kesit çizimleri, mekansal çözümleme açısından önemli bir temsil aracı olmasına rağmen, genellikle arka planda kalmaktadır. Görsel odaklı üretim modellerinde kullanılan veri setleri; kat planları, çizimler, fotoğraflar ve diyagramlar gibi mimari tasarıma ilişkin temsillere dayanmaktadır. Bu durum, görüntü tabanlı makine

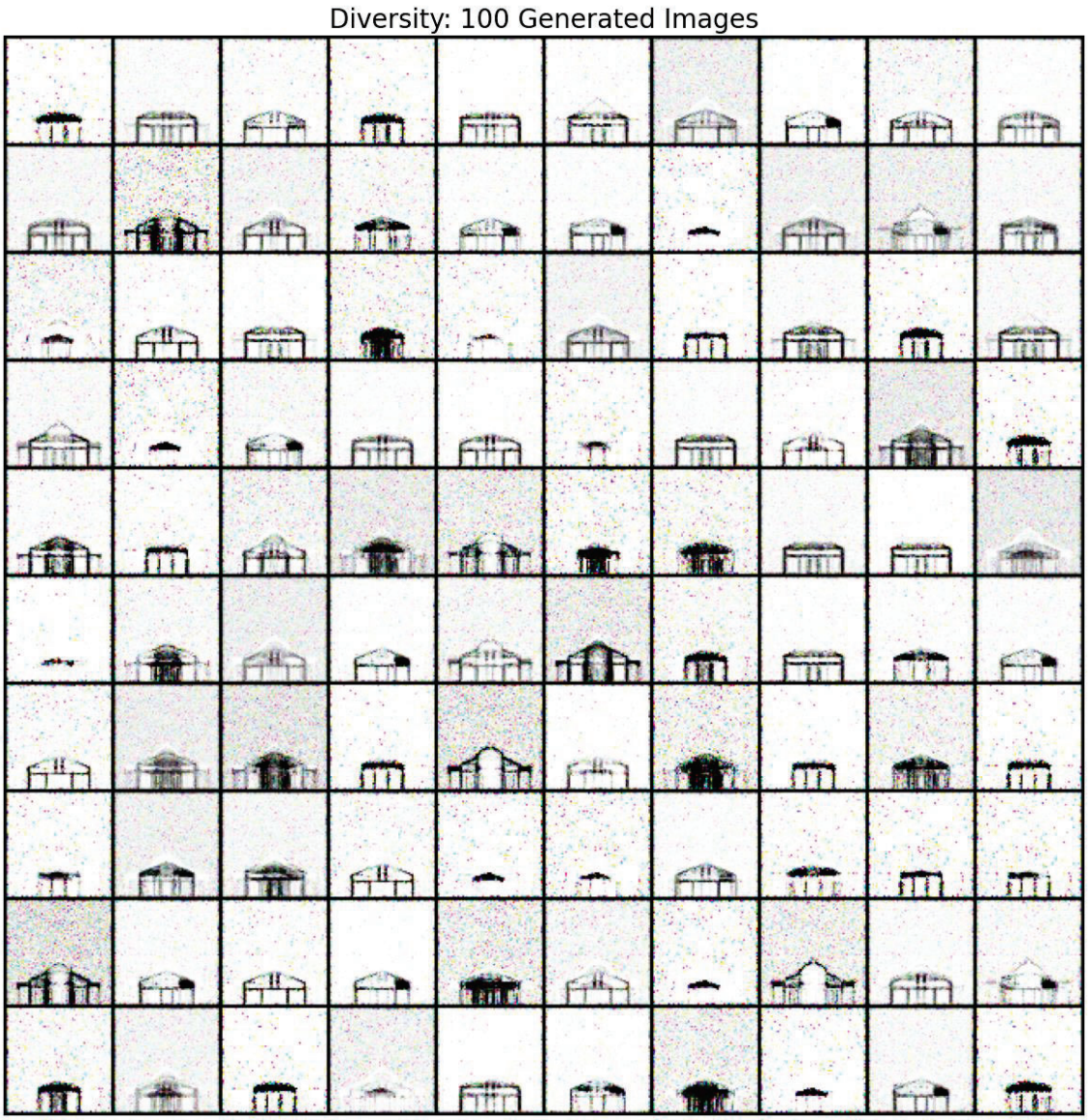
öğrenimi uygulamalarının mimarlık alanında yaygınlık kazanmasına neden olmuştur. Mevcut çalışmaların büyük bir kısmı kat planlarına odaklanmaktadır (Zheng vd., 2018; Chaillou, 2021; Zeng vd. 2024).

Plan çalışmaları için kullanılan Global Building Footprints(2023) ve OpenBuildings(Google,2021) gibi açık veri tabanları da bu alanda gelişiminde etkisi olmuştur. Ancak bu veri kaynakları da ağırlıklı olarak zemin planları üzerinden şekillenmekte, kesit üretimi konusunda yeterli veri sunamamaktadır. Kesit verisinin sistematik biçimde oluşturulamaması, bu alandaki üretimlerin sınırlı kalmasına neden olmaktadır.

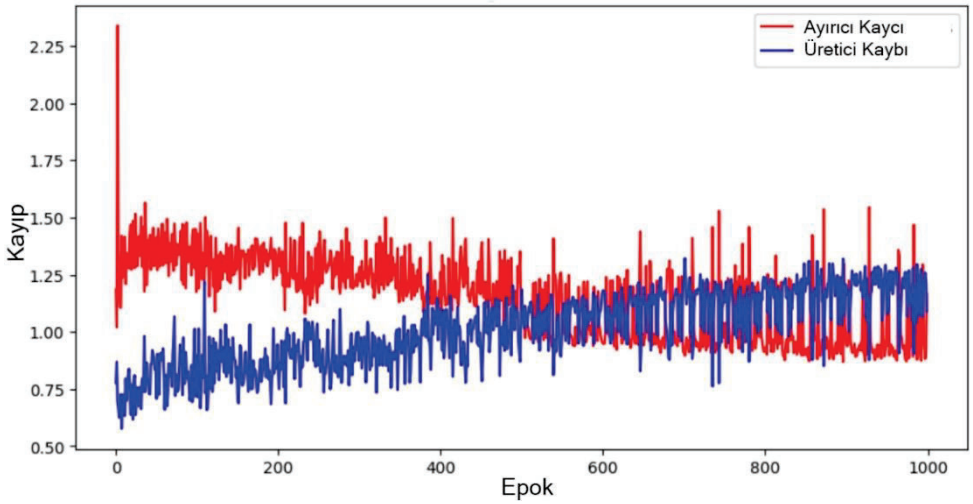
2.4. Eğitim ve Değerlendirme

Görüntüler, modele uygun hale getirilmek üzere yeniden boyutlandırılmış, tensör formatına dönüştürülmüş ve normalize edilmiştir. Bu ön işleme adımları sayesinde veriler, derin öğrenme modeline girdi olarak verilebilecek yapıya getirilmiş ve eğitim sürecinin daha sağlıklı ilerlemesi sağlanmıştır.

Modelin eğitimi ve görüntü üretimi süreci PyTorch Kütüphanesi kullanılarak yürütülmüştür. Küçük veri boyutuna rağmen, modelin anlamlı yapılar üretebilmesi için veri, eğitim sırasında rastgele karıştırılarak mini yığınlar halinde modele aktarılmıştır. Eğitimin her aşamasında üretilen görseller kaydedilmiş (**Şekil 3**) ve performans değerlendirmesi hem görsel hem de sayısal (FID skoru) yöntemlerle gerçekleştirilmiştir.



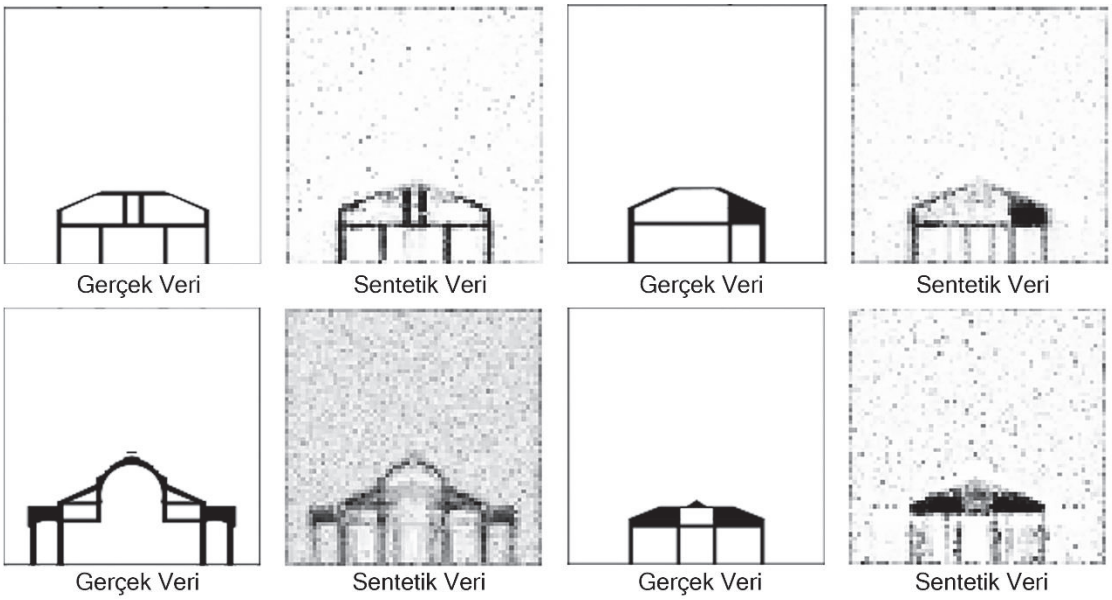
Şekil 3: 1000 epok sonrası üretilmiş görseller



Şekil 4: Epok-Kayıp Eğrisi

Eğitim sürecine ait Kayıp Fonksiyonu Eğrileri **Şekil 4'**te sunulmaktadır. Bu grafik, GAN mimarisinin eğitiminde jeneratör (mavi) ve ayırt edici (kırmızı) ağlara ait kayıp değerlerinin epoch bazında değişimini göstermektedir. Başlangıç

Yapılan niteliksel değerlendirme sonucunda, modelin mimari form, simetri, yapısal bütünlük gibi öğrenmede başarılı olduğu gözlemlenmektedir. Üretilen görüntüler, büyük oranda mimari olarak tanımlanabilir yapılara sahiptir ve gerçek veri kümesindeki örneklerle görsel olarak anlamlı benzerlikler sunmaktadır. Bazı sentetik örneklerde arka plan gürültüsü ya da bozulmalar dikkat çekmekte olup, bu durum modelin bazı durumlarda istikrarsız çıktılar ürettiğini göstermektedir.



Şekil 6: Birbirine en yakın gerçek ve sahte görsellerin gösterimi

3. Sonuçlar

Çalışmada uygulanan GAN tabanlı yöntem, mimari kesit üretimini veri temelli, yeniden üretilebilir ve stilize edilebilir hale getirerek geleneksel çizim pratiklerine dijital bir alternatif sunmaktadır.

Mimarlık disiplini, bağlamsal koşullara duyarlı ve etkili problem çözme süreçleriyle doğrudan yaratıcılıkla ilişkilenir. Ancak, mimari temsilde ve hesaplamalı tasarım yaklaşımlarında plan odaklı analizlerin ağırlık kazanması, kesit çizimlerinin mekansal düzenlemeleri üretme ve analiz etme açısından taşıdığı potansiyelin yeterince incelenmesini

engellemiştir. Bu çalışma, Palladian tasarımlarına dayalı mimari kesitleri analiz etmek ve oluşturmak için makine öğrenimi tekniklerini kullanır. Kesit çizimleri mimari tasarım sürecinde önemli bir rol oynar, ancak bunların keşfi, özellikle hesaplamalı tasarım alanında nispeten az gelişmiştir. Bu araştırma, kesit çizimlerine odaklanarak mimari temsil konusundaki söyleme katkıda bulunur ve bu alanda gelecekteki araştırmalar için temel oluşturmayı amaçlanmaktadır.

Genel olarak, görsel analiz sonuçları modelin temel biçimsel özellikleri öğrenebildiğini ancak gerçekçilik düzeyinin artırılması için detay üretme kapasitesinin güçlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Modelin bazı durumlarda yapısal tutarlılığı koruyamaması, mimari anlam bütünlüğünün korunabilmesi için semantik yönlendirmelere veya hibrit modellerin geliştirilmesine ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir. Gelecek çalışmalarda kesit üretim sürecine metinsel girdilerin entegre edilmesi ve multimodal veri kullanımı ile daha kontrollü ve anlamlı üretimler hedeflenebilir.

KAYNAKLAR

Bertòtti-Scamòzzi, O. (1776). *Le fabbriche e i disegni di Andrea Palladio*. Vicenza, Per Francesco Modena.

Chaillou, S. (2019). AI+ Architecture: Towards a New Approach. Harvard University.

Goodfellow, I., Pouget-Abadie, J., Mirza, M., Xu, B., Warde-Farley, D., Ozair, S., Courville, A., & Bengio, Y. (2014). Generative adversarial nets. In Z. Ghahramani, M. Welling, C. Cortes, N. Lawrence, & K. Q. Weinberger (Eds.), *Advances in Neural Information Processing Systems* (Vol. 27).

Google(2021). Open Buildings. https://sites.research.google/open-buildings/#faq.

Güzelci, O. Z. (2022). A machine learning-based model to predict the cap geometry of Anatolian Seljuk Kümbets. *Periodica Polytechnica Architecture, 53*(3), 207–219. https://doi.org/10.3311/ppar.20112

Heusel, M., Ramsauer, H., Unterthiner, T., Nessler, B., Hochreiter, S. (2017). GANs Trained by a Two Time-Scale Update Rule Converge to a Local Nash Equilibrium. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 30. arXiv:1706.08500.

Huang, W., & Zheng, H. (2018). Architectural drawings recognition and generation through machine learning. *Proceedings of the 38th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA), Mexico City, Mexico 18-20 October, 2018, pp. 156-165*. https://doi:10.52842/conf.acadia.2018.156

H. Zheng, & W. Huang (2018). Understanding and Visualizing Generative Adversarial Networks in Architectural Drawings. *23rd International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA)*.

Microsoft (2023). Bing Maps Global Building Footprints Released [Dataset]. https://planetarycomputer.microsoft.com/dataset/ms-buildings

Nichol, A.Q., Dhariwal, P., Ramesh, A., Shyam, P., Mishkin, P., Mcgrew, B., Sutskever, I. & Chen, M.. (2022). GLIDE: Towards Photorealistic Image Generation and Editing with Text-Guided Diffusion Models. *Proceedings of the 39th International Conference on Machine Learning*, *in Proceedings of Machine Learning Research* 162:16784-16804. Available from https://proceedings.mlr.press/v162/nichol22a.html

Özerol G., Arslan & Selçuk S. (2022). Machine learning in the discipline of architecture: A review on the research trends between 2014 and 2020. *International Journal of Architectural Computing, 21*(1):23-41. https://doi.org/10.1177/14780771221100102

Palladio, A. (1570). *I quattro libri dell'architettura*. Venice: de Franceschi.

Palladio, A. (1997). *The four books on Architecture* (R. Tavernor, R. Schofield, Trans.). London: The MIT Press.

Zeng, P., Gao, W., Yin, J., Xu, P., & Lu, S. (2024). Residential floor plans: Multi-conditional automatic generation using diffusion models. *Automation in Construction, 162*, 105374. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105374

Radford, A., Metz, & L., Chintala, S. (2016). Unsupervised representation learning with deep convolutional generative adversarial networks. *ICLR*. S2CID 11758569.

Rowe, C. (1976). *The mathematics of the Ideal Villa*. Archit. Rev., 100–104.

Schmidt, N. A., & Brown, J. M. (2017). *Evidence-based practice for nurses: Appraisal and application of research* (4th ed.). Jones & Bartlett Learning, LLC.

Stiny, G. & Mitchell, W. (1978). 'The Palladio grammar'. *Environment and Planning B, 5*(1), pp. 5–18.

Ünlü, E., Güzelci, O., & Alaçam, S. (2023). *Section Grammars: An experimental study on decoding forms of underground cities*. https://doi:10.5151/sigradi2023-498

Wittkower, R. (1962). *Architectural principles in the age of humanism*. [3d rev. Ed.] New York, Norton.

Wutte, A., & Duarte, J. P. (2021). Shape grammar as a typology defining tool for ancient egyptian funerary monuments. *Nexus Network Journal, 23*(2), 319-336.

Zhang, Hang & Huang, Ye. (2021). Machine learning aided 2D-3D architectural form finding at high resolution. In Yuan, P.F., Yao, J., Yan, C., Wang, X., Leach, N. (Eds.) *Proceedings of the 2020 DigitalFUTURES*. CDRF 2020. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-33-4400-6_15

2025 MSTAS

OTURUM 3

HESAPLAMALI TASARIM II

2025 MSTAS MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Identifying Characteristics of Computational Design Thinking: Case of Adaptive Structures

F. Berke Cilesizoglu[1]; Melek Kılınç[2]; Kurtulus Atasever[3]; Oguz C. Celik[4]
[1,4]Istanbul Technical University (ITU); [2,3]Mimar Sinan Fine Arts University (MSGSU)
[1]cilesizoglu22@itu.edu.tr; [2]melek.kilinc@msgsu.edu.tr; [3]kurtulus.atasever@msgsu.edu.tr; [4]celikoguz@itu.edu.tr

Abstract

Computational Design Thinking (CDT) is a contemporary cognitive model that has gained increasing significance in the 21st century, in parallel with major advancements in integrated systems, material simulations, and digital fabrication technologies. Mediations in CDT extend beyond the static, object-based use of representational techniques and instead enable an interactive, iterative, and information-rich design environment. The clarity and well-defined nature of the design parameters, coupled with the rapid responsiveness of the digital environment, provide an optimal experimental setting for a comprehensive understanding of the causal relationships between design elements, materials, dimensions, potential configurations, and fabrication techniques. This study investigates and analyzes the essential characteristics of CDT to explore design processes and thinking in their entirety by focusing on mediations of tools in the process. It identifies three core characteristic concepts: parametric relationality, generative differentiation, and informed tectonics. Architecture's intrinsic connection to materiality and the practice of making emphasizes the value of a research-through-design methodology, using the architectural design process as a conduit to case-specific insights. Consequently, this study examines an adaptive structural case project titled Ningen within the theoretical framework that aims to reveal the mediating roles of agents involved in the design process. Ningen's inherent adaptability renders it particularly appropriate for examining CDT's mediation processes, highlighting computational methodologies' flexibility and configurability in responding to dynamic environmental and situational demands. Through the documentation and systematic evaluation of mediations—from initial conceptualization to final manufacturing—this research further elucidates the complexity and precision characterizing contemporary computational design practices. CDT repositions the designer as the subject of the design process, whereby design is guided and interpreted through algorithmic schemas, topological geometries, material agency, and fabrication techniques, controlled via parameters and operations. It is concluded that CDT not only demonstrates how input data is transformed into design intent through procedural operations but also actively generates and defines a wide spectrum of viable design outcomes. The case study further illustrates CDT's methodological effectiveness within the context of adaptive design, showing that it supports both creativity and feasibility in multi-state, and dynamic design processes driven by high-precision and complex geometries.

Keywords: *Computational Design Thinking, Design Process, Mediation, Adaptive Structural Design.*

2025 MSTAS MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Hesaplamalı Tasarım Düşüncesinin Karakteristik Özelliklerinin Belirlenmesi: Uyarlanabilir Yapılar Vakası

F. Berke Cilesizoglu[1]; Melek Kılınç [2]; Kurtulus Atasever[3]; Oguz C. Celik[4]
[1,4]İstanbul Teknik Üniversitesi İTÜ); [2,3]Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi (MSGSÜ)
[1]cilesizoglu22@itu.edu.tr; [2]melek.kilinc@msgsu.edu.tr; [3]kurtulus.atasever@msgsu.edu.tr; [4]celikoguz@itu.edu.tr

Özet

Hesaplamalı Tasarım Düşüncesi (HTD), 21. yüzyılda, entegre sistemler, malzeme simülasyonları ve sayısal üretim teknolojilerindeki önemli gelişmelerle birlikte giderek önem kazanan çağdaş bir bilişsel modeldir. HTD'deki dolayımlar, temsil tekniklerinin sabit, tanımlı nesne ifadesindeki kullanımlarının ötesine geçerek etkileşimli, yinelemeli ve veriye dayalı bir tasarım ortamı sağlar. Tasarım değişkenlerinin açık ve net tanımlanmış doğası ile sayısal ortamın hızlı tepkiselliği; tasarım öğeleri, malzemeler, boyutlar, potansiyel konfigürasyonlar ve üretim teknikleri arasındaki nedensel ilişkilerin kapsamlı biçimde anlaşılabilmesi için uygun bir deneysel ortam oluşturur. Bu çalışma, tasarım süreçlerini ve tasarım düşüncesini bütüncül biçimde incelemek amacıyla, HTD'nin temel özelliklerini, süreçteki ilgili aracıların dolayımına odaklanarak araştırmakta ve çözümlemektedir. Çalışmada parametrik ilişkisellik, üretken farklılaşma ve bilgilendirilmiş tektonik olmak üzere üç ana karakteristik kavram tanımlanmaktadır. Mimarlığın malzeme ve yapım pratiği ile olan içsel bağlantısı; mimari tasarım sürecini, vakaya özgü yeni içgörülere ulaşmak için kullanan tasarım yoluyla araştırma yöntemini kullanmaya uygun kılmaktadır. Bu nedenle çalışma, tasarımı oluşturan dolayımları, aracıların dolayımdaki rollerini açığa çıkarmayı hedefleyen bir kuramsal çerçevede, Ningen adlı bir uyarlanabilir yapısal vaka projesini incelemektedir. Ningen'in doğasında bulunan uyarlanabilirlik, HTD'nin dolayım süreçlerini araştırmak için uygun bir özelliktir. Hesaplamalı yöntemlerin, değişen çevresel ve durumsal taleplere esnek ve yapılandırılabilir biçimde yanıt verebilme yeteneğini inceleme fırsatı vermektedir. Başlangıçtaki kavramsallaştırmadan nihai üretime kadar dolayımların belgelenmesi ve sistematik olarak değerlendirilmesiyle, bu araştırma, çağdaş hesaplamalı tasarım uygulamalarının oluşturduğu süreç ve düşünceleri daha net bir biçimde ortaya koymaktadır. HTD'de, tasarımcının süreci tasarlayan bir özne olarak yeniden konumlandığı, tasarımın topolojik geometriler, malzeme etkenliği ve üretim tekniklerini algoritmik şemalarla tanımlanarak işlemler ve değişkenler aracılığıyla yönlendirildiği ve yorumlandığı görülmüştür. HTD'nin, yalnızca girdilerin tasarım niyetine işlemlerle nasıl dönüştürüldüğünü göstermediği, aynı zamanda tasarım sonuç kümelerinin kapsamlı bir yelpazesini aktif olarak ürettiği ve tanımladığı görülmüştür. Vaka çalışması, HTD'nin uyarlanabilir tasarım çerçevesi içindeki yöntemsel etkinliğini ortaya koyarak, çok durumlu ve dinamik tasarım süreçlerine özgü karmaşık geometrili ve yüksek hassasiyete dayalı hesaplamalı tasarım süreçlerinde hem yaratıcılığı desteklediği hem de yapılabilirliği mümkün kıldığını göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: *Hesaplamalı Tasarım Düşüncesi, Tasarım Süreci, Dolayım, Uyarlanabilir Yapısal Tasarım.*

1. Introduction

Design is a multifaceted phenomenon focused on generating innovative ideas and concepts with specific intentions. Broadly defined, it integrates problem-solving, organizational, and management skills, informed by diverse material, environmental, and social parameters. Central to architectural education and practice, design has historically been perceived as a cognitive activity mediated through representational techniques. Nevertheless, the cognitive processes underpinning design thinking remain ambiguous and are frequently attributed to innate creative talent (Rowe, 1987; Daalhuizen & Cash, 2021). Historically, representation techniques have evolved from physical models and paper-based drafting to digital and automated drafting in Computer-Aided Design (CAD). However, recently, a significant evolution in architectural design methodologies has occurred, moving beyond mere representation techniques, as mediations shift towards computational simulations and parametric topologies central to Computational Design (CD) (Menges & Ahlquist, 2011). Computational Design Thinking (CDT) represents the latest development in this trajectory, emerging alongside significant advances in computational tools, digital simulations, material studies, and digital fabrication technologies. CDT expands conventional design thinking by incorporating integrated systems, embedded information, and processes derived from computational methodologies (Caetano et al., 2020; Caetano & Leitão, 2024; Menges, 2016; Oxman, 2012; Yazici & Tanacan, 2020;).

This study adopts a mediation-oriented approach to analyze CDT, aiming to clarify its principal characteristics and enhance understanding of related design processes and cognitive frameworks. The precision and specificity offered by computational parameters, coupled with the dynamic responsiveness of digital environments, create optimal conditions for investigating causal relationships among design elements, materials, dimensions, potential configurations, and fabrication techniques. Such explorations yield concrete insights into the complexities inherent in contemporary design processes. Architecture's intrinsic connection to materiality and the practice of making emphasizes the value of a research-through-design methodology, using the architectural design process as a route to novel insights, knowledge, practices, or products (Hauberg, 2011; Roggema, 2016). Consequently, this study examines an adaptive structural case project titled Ningen within the theoretical framework that aims to reveal the mediating roles of agents involved in the design process. Ningen's inherent adaptability renders it particularly appropriate for examining CDT's mediation processes, highlighting computational methodologies' flexibility and configurability in responding to dynamic environmental and situational demands. Through rigorous documentation and systematic evaluation of mediations—from initial conceptualization to final manufacturing—this research further elucidates the complexity and precision characterizing contemporary computational design practices.

2. Background on Design Thinking

The act of designing is the central element of architectural education and practice, the question of how the field of mental action created by these representation systems works is largely unclear. This ambiguity has been interpreted as the result of the inaccessible genius of the architect (subject) or drawing skills since the Renaissance and Enlightenment periods, when the practice of architecture started to define a field of mental activity, especially depending on the developments in paper technology and drawing techniques. Roles of the other non-human mediators (agents) active in the process remained invisible for a long time. But, the projection activity (projection to the future in a temporal and spatial distances) that permeates all kinds of practice in modernization processes makes the invisibility of the mediators in which the projection takes place impossible. It becomes necessary to reconceive the subject-object relation as subject-agent-object in order to acknowledge the decisive role of the agent in mediating between them. In the post-humanist approaches, accelerated following Hassan's (1977) naming of the end of humanism as "posthumanism", the extension of a bodily dissolution, that is, the relationality of the subject and his environment, what is essential is the environment (milieu) where the mediation takes place. The reference to the mediators operating in the milieu raises awareness of the hybridization processes involved in mediation. Designing as a projection activity is a modern action that takes place through representation tools and techniques and includes a process that involves researching and discussing the parameters that will determine the object and the reproduction and evaluation of its spatial results in the context of architecture. Therefore, designing should be considered as the construction of representations (Visser, 2010). While the ways of making architecture undergo radical transformations from bodily activity to intellectual activity, intellectual activity becomes realized within the limits and possibilities of drawing techniques. Therefore, the transformative role of agents in the processes they mediate should be considered in the subject-agent-object relation, which is valid for all kinds of practice. In Latourian terms, they are mediators who transform what they convey, not just "intermediaries" in the sense of transmitting (Latour, 2005). Notions such as

agent, media, and technic emphasize that the information/meaning conveyed through them is inevitably transformed only because of this mediation. Considering the dependency of design thinking on representation, these mediators are not the means that transfer the intellectual to representation without any bending, but the mediators that reveal it in itself through its own mediation. Intellectual activity represents a complex field when it comes to deciphering the subject-agent-object mediations, primarily due to the multiplicity and relationality of the non-quantitative and non-qualitative parameters they encompass.

Design thinking studies is a field that seeks methods related to the creative process by generating thoughts on how the design process takes place. While Lawson (1980) tried to explain the uncertainty of the design process by drawing attention to the effectiveness of intuitive and tacit knowledge in the process, after the 1990s, the design process was attempted to be explained with cognitive schemes based mainly on case studies. By investigating the cognitive activities of designers in the process, Cross (1982, 2006) emphasizes design thinking as a visual and spatial thinking method rooted in representations like sketches, diagrams, and prototypes. On the other hand, Rowe (1987) considers design thinking as an iterative process centered on the visualization and testing of ideas, encompassing various phases from problem definition to the concrete realization of the design solution. These references mark early recognition of the role of agents in design thinking, later expanded through computer-aided, computational, and AI-based models (McCullough et al., 1990; R. Oxman, 2004; R. E. Oxman & Oxman, 1992; R. Oxman & Gero, 1987).

3. Computational Design Thinking

The capacity of certain digital representation media to formulate more intricate parametric correlations and to present their formal counterparts in contrast to conventional representation media offers a suitable opportunity to observe the role of actors in the process. This expansion enriches the experimental field of design within the context of measurable parameters of the design process. In the modernization process, the increasing movement of time-space-information leads to a greater variety and relationality of parameters encountered during the act of designing. Emerging trends will challenge the ability of representation to cope with growing complexity, prompting a search for designs capable of responding to the unpredictable and complex by leveraging their mediation capacity. As such, computational design thinking incorporates generative algorithms and computational design tools into the creative processes, extending the boundaries of modern design activity beyond the static, object-based use of conventional representational techniques previously employed. The evolving epistemological context and the techniques that emerge from it affect the design process in a way that cannot be reduced to a straightforward tool or intermediary change. This shift, which Schumacher (2009) labeled as "parametricism," marks not merely a technical alteration but rather a completely new way of designing. The techniques that computational design employs, including animation, simulation, form-finding tools, parametric modeling, and scripting, have given rise to a new collective movement with distinct aspirations and principles. Lynn (1999) argues that the concept of "animate form" was absent in architectural theory until the simplest CAD software system was incorporated into the field of architecture. It was only with the advent of new technological tools, the issues related to motion and force became integrated into architectural design and practice. In a media-technical reading, this shift requires privileging the mediation ability created by the techniques (Siegert & Winthrop-Young, 2015). As the mediation ability of these techniques prioritizes and inevitably transforms the subject-agent-object relations, it becomes possible to discuss the emergence of a new architectural design methodology and significance of understanding the roles of computational design tools, which profoundly impact the design process and the form of the object. Thus, it is essential to interpret the characteristics of CDT within the context of mediation processes, which imply the inseparability of the subject-agent-object relation.

The term computational design is used interchangeably and refers to a range of methodologies, including algorithmic, generative, and parametric design approaches (Caetano et al., 2020). Although the term denotes the use of digital tools in the design process, its roots date back to a period preceding the emergence of computer-aided design (CAD), evident in the works of pioneers such as Frei Otto and Antoni Gaudí (Schumacher, 2016; Xie et al., 2005). These works employed simulations made through physical models and design thinking that prioritize the design with material input and structural behavior. CDT as a cognitive model focuses on not the digital tools or design itself, but rather on the design of the design process which depends on the algorithmic schemas and parameters. Although, the emergence of digital design tools only benefited the CDT as its computational capabilities were increased exponentially as redefined the way of thinking. The coordination of parameters employs tools that provide visualization of the script and form of the scripted structure of the parametric schema and the 3D geometric model of the design object. Oxman (2017)

summarizes the principles of parametric design thinking in three stages: an algorithmic parametric schema; a versioning medium exploring parametric variations of associative relationships and topological structures; and an automatic algorithmic reediting mechanism supporting models of re-representation. Designers iteratively refine and adapt their designs by using algorithmic parametric schema and visualize their designs' different associative relationships and topological structures with the mediation of computational tools that enable designers to generate and manipulate geometries and thus revise the parameters. Its algorithmic re-editing mechanism enables designers to re-edit and modify their designs automatically and simultaneously on a model. Designers make decisions within the designs, which are controlled by the operations and parameters that are chosen in parametric schema, quickly and efficiently. The 3D representation is obtained in accordance with the algorithmic parametric schema. Sometimes in these studies, parameters and their interrelationships are re-evaluated and the algorithm schema, hence the three-dimensional object model, are revised. The parametric design process can be defined as a continuous re-evaluation process in which the design methods of the conventional paper-based design process leak. Different mediators multiply the mode of production of architectural practice rather than singularize it.

The revolutionary aspect of CDT, which Carpo (2016) points out and is still valid, is its integration with mass production systems, providing the opportunity to mass-produce variations with digital fabrication logic. Real-world applications of CDT also offer completely other perspectives. From a sustainability perspective, CDT offers tools for optimizing material usage and the environmental impact of producing. While the production costs associated with advanced computational designs can be substantial, potentially offsetting the economic benefits gained from material efficiency, CDT has potential for environmentally responsible design (Plevris et al., 2025). Integration of these advanced design methodologies into real-world applications often encounters practical difficulties, such as the need for specialized knowledge and the complexity of translating digital models into physical structures (Thomsen, 2022). Additionally, implementation costs and time associated with CD tools limit widespread adoption, possibly stagnating the advancement of CDT itself (Gu et al., 2021). Ethical considerations also arise, particularly concerning digital and robotic fabrication, as "responsibility gap" occurs with design process that reduces the accountability and introduces new actors that may replace manual labor (Douglas, 2021).

4. Characteristics of Computational Design Thinking

Schumacher (2009) states that parametric design is discussed in the context of themes such as continuous differentiation, versioning, iteration, and mass-customization. These themes point to a scale extending to the design process, techniques, and the object's built reality. It is possible to summarize these themes depending on relationality of parameters and relational systems; differentiation created in a limited but generative system and tectonics of digitally constructed and informed materials.

4.1. Parametric Relationality

CDT that allows the subject to control certain parameters in the design process through computational tools is basically a pragmatic tendency: it deals with the design process with the aim of optimizing the parameters and the relationality of the parameters. What is now in question is not only the appearance of the physical reality of the object but also the controllability of the parameters that play a role in the entire creation-production-consumption process within certain spaces of freedom. This is one of the reasons why the conceptual shift from part-to-whole relationships to component-system relationships as stated by Schumacher (2009) is valuable for the current context. While computational tools represent complex relationality and reveal borders, they also make the spaces of freedom visible with the manipulation opportunities they offer within these limits. Architectural representation reaches an extent that aims to define a liberating range of motion for the architect in the development of relational principles necessitated by increasing information rather than providing a set of guides, through which the architect will provide control over the form of the object. At the same time by expanding the scope of the performative space it presents to the subject to "its practical advantages, especially in the domain of social functionality" (Schumacher, 2016), the parameters "now propose to return to addressing the environmental and social issues for which these powerful generative and evolutionary techniques were originally developed" (Frazer, 2016). Undoubtedly, this is a shift that differentiates the features of the architect. Defining the relationship between the parameters and defining them within the framework of a formal notation and concepts becomes one of the basic stages of the design process. As in Woodbury's (2010) mention, designers take one step back from the direct activity of design and focus on the logic that binds the design together. Beyond the representation, re-evaluation, revision and editing processes that the subject often performs on

architectural elements, the action of the subject in CDT can be defined as the creation of relations according to the design logic which is represented through its ability to calculate.

4.2. Generative Differentiation

Cache (1995) points out that the new logic of industrial production is no longer concerned with the design of objects with a visual representation, but with the limits or intervals that make them up, which is possible through their calculatedness. Unlike in the early industrialization processes, the standard model does not imply any equality, and the norm is no longer the same as the law (Cache, 1995). On the contrary, there is a need for a design in action in the Latourian sense, which can be diversified depending on the relational parameters and contains generative logic inherently. There is a need for a design in action that always leaves the door open to a better design in the conditions in which it will be involved, and designer subjects who will create the design logic in question. Since the object is now an objectile, that is, in Aristotelian terms, a generic object instead of an object as a static and defined entity (Carpo, 2011), the subject becomes the person who creates and controls relations between parameters and conditions. Thus, CDT, which enables the design of complex forms and non-standard modes of production, can adapt this generative system and the demand for design in action directly.

Non-static and non-standard modes of design in CDT can be summarized with the strategy of differentiation and present themselves, especially in the formal creation process that is based on the limitations of geometric codes. The concept of differentiation is not just variation, instances that are parametrically varied within a larger group, curve or field retain their connection to preceding and subsequent instances while also adapting distinctly local circumstances. The concept of differentiation is applied to versioned, iterative and mass-customized parametric work, highlighting its ability to introduce diversity within a seamless and harmonious framework (Jabi, 2013). This generative quality of computational design, which is based on differential, makes it suitable for experiments to blur the boundaries between the built environment and the natural world. In this respect, it can be said that a design based on differentiation is considered a form-finding process based on structural and geometric logic. While the object from digital reality to adaptable mass fabrication reality presents differentiated logic in its form, the subject models, modifies and chooses the best option with the help of an algorithmic schema that involves new issues such as motion and force from this generative system that is based on differentiation. The process is now more rapid, and temporal efficiency is at a high level. This is how CDT provides experimental processes about the architectural objects' realization that respond to the parameters continuously changing. The change in quality of the elements is notable only because it transforms the mediation. Parametric design is a field of design thinking that enables the subject to perform actions such as folding, crossing, overlapping, and layering in a spectrum ranging from the smallest fine-structure connection detail scale to the urban scale, with their rapid structural counterparts on the plane of representation. It inevitably erodes the definition of the transcendent subject and the finite static object, as it defines the mystified genius subject in the indefinable nature of the design, depending on its field of action and the representational geometry is replaced by a differentiated topology.

4.3. Informed Tectonics

The convergence of form generation and materialization processes is leading to new realms of architectural speculation and experimentation (Menges, 2016). Thus, it can be said that the relations of the parameters also exist in relation to 3D modelling simultaneously, and this embedded information in 3D digital materiality manifests the formal creation process both in casual explanation and without limitation of the designer's imagination about possible differentiation. Oxman (2017) indicates that traditional visual representations are non-explicit with respect to presenting the structural logic that underlies processes of form generation and the logic of making the object under design. One of the reasons is that formal engineering knowledge did not rely on simulations to predict structures' behavior before the industrial revolution as it does in computational design today. While they learned through intuition, by creating and testing through trial and error, the designers in computational design create a large number of variations based on material, geometrical, and tectonic knowledge, in other words digital simulations, in an iterative process to achieve a successful outcome (Carpo, 2017). In computational design this structural logic, as well as the other formal logical approaches that designers built with algorithmic schema, is explicit in the process. This is mainly linked to the advent of emergent simulation technologies and a deeper comprehension of materials and structural principles. This radical shift in the fundamental priorities and elements that inform design, gives rise to the advent of a novel tectonic culture (Menges, 2015; R. Oxman, 2012) and requires a re-evaluation of the limited roles of structural

design, fabrication, and construction in a design workflow and the integration of material, weight, behavior, forces, environmental factors, movement, and time into the design process (Fleischmann et al., 2012; Menges, 2012). Through the simulation of material behavior (N. Oxman, 2009; Yazici and Tanacan, 2020), engaging how the material acts on the forces and responds to changes, creates a more performative design. Thus, effectively creating a new understanding between designer and material, and make ways of efficiently using material to its fullest potential (Holstov et al., 2015). Digitally materiality, somewhat paradoxically, makes the design more physically-oriented. This results in the elimination of the abstract representational elements and a design based on the intrinsic material characteristics. The integration process continues with the deployment of digital fabrication tools (N. Oxman, 2007), whereby the fabrication process is integrated into the design workflow and informed by designers operated by digital tools (Caetano and Leitão, 2024). This results in the removal of the foreman from the equation, thereby facilitating an uninterrupted data flow. This is supported by an informed and integrated system that controls the construction process and traces digital data to their physical counterparts, thereby ensuring complete synchrony between the its as-built reality (Hamidavi et al., 2020). The digitization of the design renders it suitable for collaboration with multiple disciplines and supplementation from emerging computational tools, including genetic algorithms (Dasari et al., 2023), particle swarm algorithms, knowledge-based systems (e.g., fuzzy logic), and artificial neural networks (Liao et al., 2024), as well as multi-objective optimization strategies (Ilter et al., 2020). CDT facilitates the examination of design from a multitude of perspectives, with design responsibility and sustainability becoming integral elements of the discourse. Though CDT utilizes digital design tools, it must be differentiated from other design methods such as Generative and AI-Assisted Design which incorporates artificial intelligence to augment the design process, relying on existing dataset of the tool. This approach can enhance efficiency and creativity but may also distance designers from the design process. In contrast, CDT maintains the designer's central role, using computational tools as collaborators rather than replacements (Sreenivasan and Suresh, 2024).

5. Case of Adaptive Structure, Ningen

Concrete is a widely utilized and versatile construction material, ranking among the most consumed materials on Earth and holding a dominant position in the construction industry. Concrete has a long history of utilization, spanning from the Roman era to the present and has demonstrated significant potential in both architectural aesthetics and construction technology. This is exemplified by the works of notable architects such as Nervi, Candela, and Isler (Tang, 2015). However, in recent times, there has been a negative perception of concrete among the general public, largely due to its association with dense urbanization and significant environmental impact. The demand for concrete continues to increase due to the phenomenon of rapid urbanization and population growth, which have the effect of exacerbating the environmental footprint of this material. In response, the construction industry is actively pursuing more sustainable practices, the development of performance-based mixes, and innovative application with the objective of unlocking the full potential of concrete. The case study, entitled "Ningen," was developed by the authors to illustrate innovative use of concrete that challenges its negative associations.

In the context of this project, designers concentrated their efforts on "junkspaces" (Koolhaas, 2002), residual spaces that result from the development of large-scale construction projects that disrupt the existing urban fabric, such as the erection of new viaducts or motorways. These emerging residual spaces lack the essential spatial qualities, land value, user profile, and management structures required to function, creating land that is unused and wasted. As a result, the urban fabric is left with voids that is mostly inhabited by illicit activities. In order to address this situation, the authors set out to repurpose these junkspaces into functioning public areas that can be used by communities. This was done through the use of architectural interventions that are temporary structures, which could transform the perception of space and bring attention to these areas. A considerable number of urban centers will inevitably encounter similar scenarios, and the phenomenon of junk spaces is likely to persist, given its universal prevalence. This entailed the adoption of CDT as a means of driving the design process, facilitated by CD tools and the formulation of design problems. The focus was not on a specific site, but rather on understanding the underlying causes of the problem and creating a generic schema that could generate unique solutions tailored to each and every context, with the same identical materials. A modular system was proposed that would utilize identical pre-cast fiber-reinforced lightweight concrete (FRLC) modules named "Ningens" capable of being deployed in a way that creates self-supporting structures, and can be assembled, disassembled, transported, and reused for new applications.

The design adheres strictly to a performative design (bottom-to-top) approach, generating from a single point, controlled by a set of clearly established rules, parameters and boundary conditions that serve to isolate and reflect the specific characteristics inherent to CDT. The design process is narrated following these characteristics established in the previous chapters. It was conducted exclusively using algorithms created with a visual scripting (Grasshopper) using non-uniform rational B-spline (NURBS) geometry (Rhinoceros). NURBS geometry accurately creates the geometry with precision, can be scalable and can be transferable to digital fabrication tools without decrease in precision. To gain further insight into the adaptability and applicability of Ningen in response to site-specific conditions and to visualize the design, the Ningen was proposed for a site comprising a section of the historical neighborhood that was demolished during the construction of a metro bridge project. The site is circumscribed by neighboring blind walls of remaining buildings, and clearance is constrained by the bridge. The area was simply modeled to ensure an accurate representation of the spatial features of the digital environment regarding the design process.

5.1. Relationality in Ningen

The design process is based on a performative logic, whereby the geometry of individual elements and the global form is generated entirely using an algorithm with parametric relationality. An arbitrary point on the ground plane is defined for a starting point. As the next points are generated from the initial point, the relationship between two points is determined with a length parameter. As a result, the relationship between each three points creates an equilateral triangle and a reference plane, which is used for creation of guide vectors. The generation of subsequent points is governed by a set of rules that stipulate that they should adhere to the same rule as the third point, but that their orientation in the third dimension is controlled by a further set of rules. These rules pertain to the angle located on the corresponding symmetry plane. A discrete aggregation model (Rossi and Tessmann, 2019) is employed to generate points continuously within specified boundary planes **(Figure 1)**. Algorithm runs until the all-possible points are generated. Additional connection points can be assigned to one of the naked vertices, with a new set of boundary conditions, to expand the structure further. Geometry of structural modules were computed using the same three points. Three vertical circles, where the connection to the joints will eventually occur, facing the center of mass are used to construct a soap bubble model. Based on these circles, a subdivided triangular bipyramid volume is generated with equally spaced closed loop segments. The volume is then optimized with a physics-based component (Kangaroo) simulating a soap bubble and shrinking the surface area and minimizing the volume **(Figure 2)**. Relationality in Ningen can be represented as a series of synchronous and iterative operations in an algorithmic schema **(Figure 3)**.

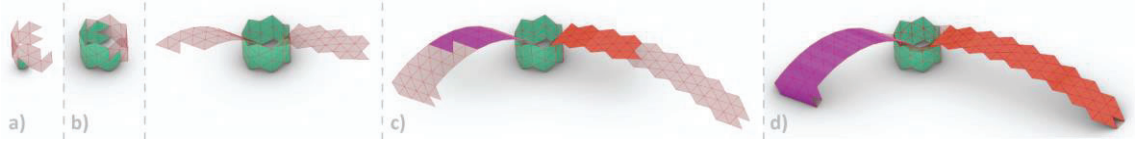


Figure 1: Discrete aggregation model, articulating step-by-step according to geometrical rule

Figure 2: A soap bubble film simulation was used for topology optimization of the structural element

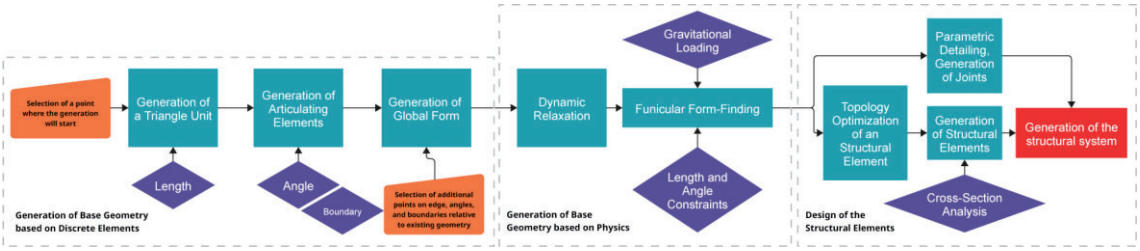


Figure 3: Algorithm, showing the operations that occur synchronously in Grasshopper to generate the structural system

5.2. Differentiation in Ningen

After multiple connected structures are generated together, the points on the entire geometry are analyzed and necessary connections are made based on distances within the range of tolerances. Entire geometry with is then reorganized to the principle of dynamic relaxation with reverse gravitational force (beneficial for compression-only system), fixed length and angle condition (Kangaroo). This method is an iterative approach that simulates dynamic processes, it runs until each vertex reaches the equilibrium position of the system (Chen et al., 2024). This creates an optimized force flow while preserving the point relations, updating their locations with harmoniously differentiated values in the topology **(Figure 4)**. The versatility of the triangle as a geometric shape allows for the creation of a multitude of surfaces with varying Gaussian curve values through the use of these aggregations. Geometries are generated through the algorithm, inside the defined boundary conditions and parameters, in a differentiated manner. Differentiation in the early design phase provides valuable information to the designer as the decision maker, as each change in the parameters, effect the structure and create slightly new variations. Algorithm creates a diverse array of results is elicited by inputs such as ground and enclosing surfaces, steep angle, and parameters like the size of the elements and material properties. Optimization goals are assigned to parameters to increase structural stability. Every element, structural modules and joints can be individually identified inside the system and related information are embedded on them. Meaning that modules can be traced from data to fabrication. Modules can be readily analyzed, can be modified or replaced with other modules according to new input, such as a result of a cross-section optimization. The size and weight of the components would also affect the fabrication and construction methods. It is aimed for these structures to be built without heavy machinery, in narrow spaces, and with a minimal number of people. During fabrication, the goal was to reduce waste material and use fewer molds. Arguably, larger sizes would affect the feasibility and application of molding. Therefore, an optimum size that best reflected the initial curvature and shape of the surfaces is chosen. Additionally, modules can be reused in new configurations.

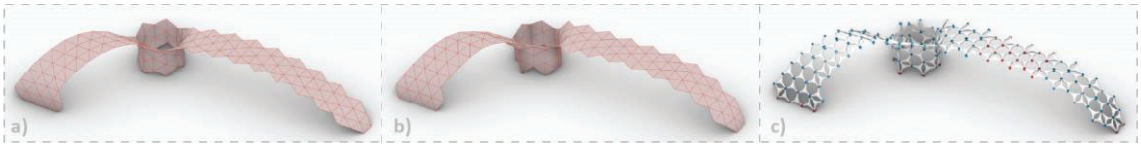


Figure 4: **(a)** Discrete geometries generated through parametric relationality, **(b)** differentiated geometry generated through dynamic relaxation and form-finding, **(c)** generation of structural elements according to reference planes and orientation

5.3. Tectonics in Ningen

Design process follows a material-based approach with a strong emphasis on the fabrication and construction. Geometry has served as a fundamental basis for establishing the basic relationships between elements. Furthermore, physics-based models were employed to comprehend and optimize structural behavior. Materials were selected based on their intrinsic properties and the fabrication processes employed. For the main structural elements, fiber-reinforced lightweight concrete was employed due to the ease of fabrication of molds for the amorph geometry. The main structural joints are made of steel due to the necessity for higher strength in joints. The structural connections are generated using the geometric relationships between elements, as the angles are varied for each connection. Points are designated as joints and hexagons are extruded perpendicular to the plane connecting center of masses of adjacent planes of the structural modules. Connections to the joint are generated between each element using the reference planes of elements and joint. Established modules were prototyped with scaled elements and details using 3D printing (3DP). FDM is renowned for its ability to produce functional parts and prototypes in a rapid and cost-effective manner, utilizing an array of thermoplastic materials. In recent years, polylactic acid (PLA) has emerged as a popular biodegradable thermoplastic material for use in 3DP via the FDM method (Joseph et al., 2023; Tümer and Erbil, 2021). The components were printed individually and subsequently affixed to one another. The structure and its structural behavior were subjected to testing, and the design was found to be viable under its own weight. The structural system was deemed to be reliable and joints to be functional, rigid and allowing configurations **(Figure 5a)**. For the case, a complete structure for site is generated with structural elements, joints and details **(Figure 5b)**. Based on the pre-dimensioning, in relation to form-finding, module of a Ningen has a circumradius of 70 cm. FEA structural analysis and performative optimization has been conducted in Karamba3D (Preisinger et al., 2018). Since Ningen is temporary structure, structural design algorithm in elastic conditions is implemented under specific boundary conditions. Modules are connected with moment-resisting (MR) steel joints. The support points are fixed on the ground and under the surface of bridge, and the structure is subjected to its self-weight along with an additional live

load of 1 kN/m. The generated system uses a fiber reinforced lightweight concrete (CEN, 2021) as the structural material which is engineered specifically for high tensile strength (Deng et al., 2023). Material properties are assumed as Young's Modulus (E) of 25 GPa, density (ρ) of 1900 kg/m³, tensile Strength (f_{ctm}) of 6 Mpa, compressive Strength (f_{ck}) of 30 MPa. Feasibility and the material optimization of design is assessed through the evaluation of stress/strength ratio (smaller than %100) and maximum displacements (smaller than L/250) **(Figure 6)**. Optimized cross-sections vary from 12 cm to 24 cm in diameter. Based on the assumptions and numerical results obtained, it is deemed that the proposed configuration is structurally reliable.

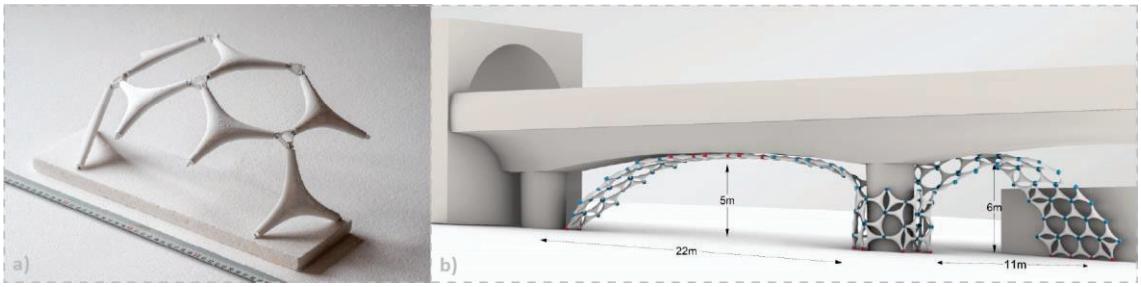


Figure 5: (a) Functional prototype of structural system, **(b)** generated structural elements, joints (blue), supports (red) and detailing according to geometric relations and environmental boundaries

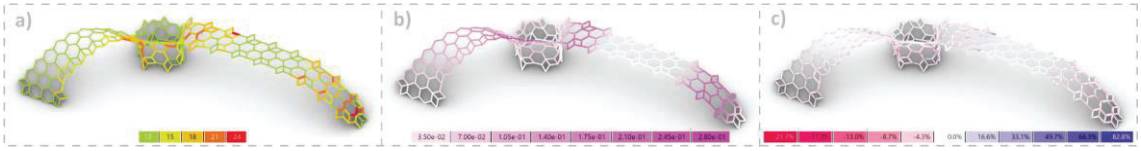


Figure 6: (a) Optimized material distribution based on analysis data, **(b)** displacement analysis, **(c)** stress/ strength ratio analysis

6. Conclusion

CDT and its characteristics have been analyzed through a mediation-oriented reading for the design process of Ningen. In this manner, parametric relationality, generative differentiation, and informed tectonics are determined as the decisive concepts for the design process, techniques, and construction in the context of CDT.

Parametric relationality, refers the CDT's ability of corresponding the principles necessitated by increasing information of the current economic, social, and epistemological context. CDT provides an operational space for designers in which they can develop the limits and intervals of complex information on an algorithmic schema with simultaneous 3D modelling. In the case Ningen, relationality was employed to construct both the individual structural elements and complex structural system with articulated design elements. The algorithm uses geometric rulesets and physics to generate an optimal form from basic points and distance parameters.

Generative differentiation, cannot be summarized as mere variation, and the resulting imaginative objects present diversity in an uninterrupted and harmonious way while remaining within a defined relationality within defined limits. Therefore, differentiation points to a fundamental quality in CDT, a diversity that creates harmony. Generations allows to experiment with all potential variations generated by parameters controlled by the designers. Element size and cross-section parameters were assigned as optimization goals, and the design was regenerated, by redistributing materials and iteratively form-finding. As a result, both form and deflections changed accordingly, accommodating changes in real-times both visually and physically. Effects provided a better understanding of the causality of changes, thereby enhancing the effectiveness of discussions and feedback.

Informed tectonics allows the designers to generate based on material properties, simulating behavior and forces with embedded fabrication workflows. CDT has a pivotal role in our understanding and designing based on material. Design process included physics-based simulations, reflecting the behavior of the structure and integrated real-time structural analysis (FEA) and optimization. Fabrication schemes were directly generated from the algorithm based on material choices and generated instantly in response to changes.

As observed in design process, designers utilized the characteristics of CDT to adopt a holistic approach to design, from conception to construction, effectively transforming digital models into built reality. Computational design tools were extensively employed to construct and calculate complex relations throughout the process in order to create a variety of solution sets adapting to evolving needs and environments, demonstrating the flexibility and adaptability of this design approach. While analysis of CDT and its characteristics shed light on design process, it definitively highlights the transformative potential of computational design thinking and computational design tools in shaping the built environment responsively and responsibly.

Acknowledgments

Concept of Ningen, was proposed for a national architectural competition named “Innovative Approaches in Urban Space” that took place in 2020 organized by CEIS (Cement Industry Employers' Association) and was awarded the 2nd Place Prize by the jury in Student’s category. Concept team comprised of, then undergraduate students, Furkan Berke Çilesizoğlu, Yeliz Kaya, İlayda Ömer and advised by Dr. Kurtuluş Atasever.

REFERENCES

Cache, B. (1995). *Earth moves: The furnishing of territories*. The MIT Press.

Caetano, I., & Leitão, A. (2024). Connecting design and fabrication through algorithms: Current and future prospects for AEC. *Automation in Construction*, *164*, 105445. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105445

Caetano, I., Santos, L., & Leitão, A. (2020). Computational design in architecture: defining parametric, generative, and algorithmic design. *Frontiers of Architectural Research*, *9*(2), 287–300. https://doi.org/10.1016/j.foar.2019.12.008

Carpo, M. (2011). *The alphabet and the algorithm*. The MIT Press.

Carpo, M. (2016). Parametric Notations: The Birth of the Non-Standard. *Architectural Design*, *86*(2), 24–29. https://doi.org/10.1002/ad.2020

Carpo, M. (2017). *Second digital turn*. The MIT Press.

Chen, B., Liu, H., & Ren, M. (2024). A modified dynamic relaxation form-finding method for symmetrical tensegrity structures with group theory and fuzzy clustering. *Mechanics Research Communications*, *139*, 104310. https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2024.104310

Cross, N. (1982). Designerly ways of knowing. *Design Studies*, *3*(4), 221–227. https://doi.org/10.1016/0142-694X(82)90040-0

Cross, N. (2006). *Designerly ways of knowing*. Springer.

Daalhuizen, J., & Cash, P. (2021). Method content theory: Towards a new understanding of methods in design. Design Studies, 75, 101018. https://doi.org/10.1016/j.destud.2021.101018

Dasari, S. K., Fantuzzi, N., Trovalusci, P., Panei, R., & Pingaro, M. (2023). Optimal design of a canopy using parametric structural design and a genetic algorithm. *Symmetry*, *15*(1). https://doi.org/10.3390/sym15010142

Deng, B.-Y., Yan, K.-T., Tang, Z.-M., Liu, G.-R., Qi, F., Li, X.-Y., & Li, L.-Z. (2023). Ultra-low carbon lightweight engineered cementitious composite: Design and material characterization. *Case Studies in Construction Materials*, *19*, e02436. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02436

Douglas, D. M., Howard, D., & Lacey, J. (2021). Moral responsibility for computationally designed products. *AI and Ethics*, *1*(3), 273–281. https://doi.org/10.1007/s43681-020-00034-z

European Committee for Standardization. (2021). *EN 206:2013+A2:2021: Concrete — Specification, performance, production and conformity.* Brussels: CEN.

Fleischmann, M., Knippers, J., Lienhard, J., Menges, A., & Schleicher, S. (2012). Material behaviour: Embedding physical properties in computational design processes. *Architectural Design*, *82*(2), 44–51. https://doi.org/10.1002/ad.1378

Frazer, J. (2016). Parametric computation: History and future. *Architectural Design*, *86*(2), 18–23. https://doi.org/10.1002/ad.2019

Gu, N., Yu, R., & Behbahani, P. A. (2021). Parametric design: Theoretical development and algorithmic foundation for design generation in architecture. In *Handbook of the Mathematics of the Arts and Sciences* (pp. 1361–1383). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-57072-3_8

Hamidavi, T., Abrishami, S., & Hosseini, M. R. (2020). Towards intelligent structural design of buildings: A BIM-based solution. *Journal of Building Engineering*, *32*. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101685

Hassan, I. (1977). Prometheus as performer: Toward a posthumanist culture? *The Georgia Review*, *31*(4), 830–850.

Hauberg, J. (2011). Research by Design - a research strategy. *AE... Revista Lusófona de Architectura e Educacao*.

Holstov, A., Bridgens, B., & Farmer, G. (2015). Hygromorphic materials for sustainable responsive architecture. *Construction and Building Materials*, *98*, 570–582. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.136

Ilter, E., Celik, O. C., & Unlu, A. (2020). Multi-criteria performance evaluation of a glass panel system using full-scale experimental data. *Architectural Science Review*, *63*(6), 507–525. https://doi.org/10.1080/00038628.2020.1774861

Jabi, W. (2013). *Parametric design for architecture*. Laurence King Publishing.

Joseph, T. M., Kallingal, A., Suresh, A. M., Mahapatra, D. K., Hasanin, M. S., Haponiuk, J., & Thomas, S. (2023). 3D printing of polylactic acid: recent advances and opportunities. In *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (Vol. 125, Issues 3–4, pp. 1015–1035). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. https://doi.org/10.1007/s00170-022-10795-y

Koolhaas, R. (2002). Junkspace. *October*, *100*, 175–190. https://doi.org/10.1162/016228702320218457

Latour, B. (2005). *Reassembling The Social - An Introduction The Actor-Network-Theory*. New York: Oxford University Press.

Lawson, B. (1980). *How designers think*. Architectural Press.

Liao, W., Lu, X., Fei, Y., Gu, Y., & Huang, Y. (2024). Generative AI design for building structures. *Automation in Construction*, *157*, 105187. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105187

Lynn, G. (1999). *Animate Form*. Princeton Architectural Press.

McCullough, M., Mitchell, W., & Purcell, P. (1990). *The electronic design studio: Architecture, media and knowledge in the computer era*. The MIT Press.

Menges, A. (2012). Material computation: Higher integration in morphogenetic design. In *Architectural Design* (Vol. 82, Issue 2, pp. 14–21). https://doi.org/10.1002/ad.1374

Menges, A. (2015). Fusing the computational and the physical: Towards a novel material culture. In *Architectural Design* (*Vol. 85*, Issue 5, pp. 8–15). Conde Nast Publications, Inc. https://doi.org/10.1002/ad.1947

Menges, A. (2016). Computational material culture. *Architectural Design*, *86*(2), 76–83. https://doi.org/10.1002/ad.2027

Menges, A., & Ahlquist, S. (2011). Computational Design Thinking. In A. Menges & S. Ahlquist (Eds.), Computational design thinking (pp. 10–29). John Wiley and Sons.

Oxman, N. (2007). FAB Finding. *25th eCAADe Conference Proceedings*, 785–792. https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2007.785

Oxman, N. (2009). Material-Based Design Computation: Tiling Behavior. *Proceedings of the 29th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA)*, 122–129. https://doi.org/10.52842/conf.acadia.2009.122

Oxman, R. (2004). Think-maps: teaching design thinking in design education. *Design Studies*, *25*(1), 63–91. https://doi.org/10.1016/S0142-694X(03)00033-4

Oxman, R. (2012). Informed tectonics in material-based design. *Design Studies*, *33*(5), 427–455. https://doi.org/10.1016/j.destud.2012.05.005

Oxman, R. (2017). Thinking difference: Theories and models of parametric design thinking. *Design Studies*, *52*, 4–39. https://doi.org/10.1016/j.destud.2017.06.001

Oxman, R., & Gero, J. S. (1987). Using an expert system for design diagnosis and design synthesis. *Expert Systems*, *4*(1), 4–14. https://doi.org/10.1111/j.1468-0394.1987.tb00407.x

Oxman, R. E., & Oxman, R. M. (1992). Refinement and adaptation in design cognition. *Design Studies*, *13*(2), 117–134. https://doi.org/10.1016/0142-694X(92)90259-D

Plevris, V., Almutairi, A., & Rios, A. J. (2025). Advancing Sustainability Through Structural Optimization: Innovations in Material Efficiency and Environmental Impact Reduction. In Kioumarsi, M., Shafei, B. (Eds.), *The 1st International Conference on Net-Zero Built Environment. NTZR 2024.* (pp. 1611–1623). https://doi.org/10.1007/978-3-031-69626-8_134

Preisinger, C., Hemmerling, M., Lemberski, D., Sotomayor, M., Velasco, R., & Günther, P. (2018). Karamba. In Hemmerling, M., Cocchiarella, L. (Eds.), *Informed Architecture* (pp. 157–162). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-53135-9_18

Ramsgaard Thomsen, M. (2022). Computational design logics for bio-based design. *Architectural Intelligence*, *1*(1), 13. https://doi.org/10.1007/s44223-022-00015-8

Roggema, R. (2016). Research by design: Proposition for a methodological approach. *Urban Science*, *1*(1), 2. https://doi.org/10.3390/urbansci1010002

Rossi, A., & Tessmann, O. (2019). From Voxels to Parts: Hierarchical Discrete Modeling for Design and Assembly. In Cocchiarella, L. (Ed.) *ICGG 2018 - Proceedings of the 18th International Conference on Geometry and Graphics. ICGG 2018,* pp. 1001–1012. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95588-9_86

Rowe, G. P. (1987). *Design thinking*. The MIT Press.

Schumacher, P. (2009). Parametricisim – A new global style for architecture and urban design. In H. Castle (Ed.), *Digital Cities. Architectural Design (AD) : Vol. 79(4)* (pp. 14–23). Wiley and Sons.

Schumacher, P. (2016). Parametricism. In P. Schumacher (Ed.), *Parametrism 2.0., Architectural Design (AD): Vol. 86(2)* (pp. 8–17). Wiley and Sons.

Siegert, B., & Winthrop-Young, G. (2015). Introduction. In G. Winthrop-Young (Ed.), *Cultural Techniques* (pp. 1–18). Fordham University Press. https://doi.org/10.5422/fordham/9780823263752.003.0001

Sreenivasan, A., & Suresh, M. (2024). Design thinking and artificial intelligence: A systematic literature review exploring synergies. *International Journal of Innovation Studies, 8*(3), 297–312. https://doi.org/10.1016/j.ijis.2024.05.001

Tang, G. (2015). An Overview of Historical and Contemporary Concrete Shells, Their Construction and Factors in Their General Disappearance. *International Journal of Space Structures*, *30*(1), 1–12. https://doi.org/10.1260/0266-3511.30.1.1

Tümer, E. H., & Erbil, H. Y. (2021). Extrusion-Based 3D Printing Applications of PLA Composites: A Review. *Coatings*, *11*(4), 390. https://doi.org/10.3390/coatings11040390

Visser, V. W. (2010). Visser: Design as construction of representations. *Art + Design & Psychology*, *2*, 29–43.

Woodbury, R. (2010). *Elements of parametric design*. Routedge.

Xie, Y. M., Felicetti, P., Tang, J. W., & Burry, M. C. (2005). Form finding for complex structures using evolutionary structural optimization method. *Design Studies*, *26*(1), 55–72. https://doi.org/10.1016/j.destud.2004.04.001

Yazici, S., & Tanacan, L. (2020). Material-based computational design (MCD) in sustainable architecture. *Journal of Building Engineering*, *32*, 101543. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101543

MSTAS 2025 MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Mimari Çizimin Olanaklılığının Fiziksel Hesaplama ve Araçlaştırma ile Zenginleştirilmesi

Görkey Gürel[1]; Çağın Tanrıverdi Çetin[2]; Sema Alaçam[3]
[1]İstanbul Teknik Üniversitesi ve Biruni Üniversitesi; [2]Manisa Celal Bayar Üniversitesi; [3]İstanbul Teknik Üniversitesi
[1]gurelg17@itu.edu.tr; [2]cagin.cetin@cbu.edu.tr; [3]alacams@itu.edu.tr

Özet

Bu proje, güncel dijital ve fiziksel temsil teknikleriyle mimari çizimin dinamik karakterinin ortaya çıkarılması hakkındadır. Mimari temsil üzerine yapılan çalışmalar, çizimin soyut fikirler ile somut formlar arasında köprü kurmadaki aktif rolünü vurgulamaktadır. Mimari çizimin dinamik karakteri, gözlemcinin zihnindeki değişken soyut karşılığı olabilmekle beraber, mimaride hareket, akış ve değişim hissi yaratma özelliğidir. Dinamik çizgiler mekanın statik (durağan) bir unsur olmadığını, çevresiyle ve kullanıcılarıyla etkileşim içerisinde bir ekosistem olduğunu hissettirmektedir. Mimari çizimin dinamik karakterini araştırmak amacıyla çeşitli çizgi yapma biçimleri denenmiş olup, bu yapma biçimleri farklı düşünce setlerini açığa çıkarabilme potansiyeline sahiptir. *Bu motivasyon ile ele alınan çalışma, elektronik sistemleri dijital tekniklerle harmanlayarak özgün çizimler üretmeyi ve mimari çizim yöntemlerinde yenilikçi bir yaklaşım ortaya koymayı hedeflemektedir. Hem teorik hem de deneysel yöntemlerle, kodlama ve mekanik hareket tabanlı çizimler incelenmektedir. Bu süreç üç ana modülden oluşmaktadır: (i) Grasshopper yazılımı aracılığıyla oluşturulan dijital çizimler, (ii) Arduino IDE (Integrated Development Environment) yazılımı kullanılarak mekanik hareketler sonucu oluşturulan fiziksel çizimler, (iii) Arduino IDE ve Rhino Grasshopper etkileşimi ile oluşturulan dijital çizimler. Ayrıca TinkerCAD gibi simülasyon programlarından da faydalanılmıştır. Çalışmanın, mimari fikirleri dinamik ve etkileşimli bir şekilde keşfetmeye olanak tanıyan çeşitli dijital ve fiziksel yöntemler sunması beklenmektedir. Bu yaratıcı süreç ile birlikte çizimin temsiliyet gücünün artırılması ve fiziksel mekanizmaların dijital araçlarla entegrasyonu aracılığıyla mimari çizim ve temsiliyette yenilikçi çizim yöntemleri sunarak modern teknolojilerin bu alana nasıl katkı sunabileceği sorusuna cevap aranmaktadır.*

Anahtar Kelimeler: *Mimari Çizim, Mimari Temsil, Çizgi Üretimi, Bilgisayar Destekli Çizim, Fiziksel Hesaplama.*

2025 MSTAS MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Augmenting The Affordances of Architectural Drawing Through Physical Computing and Tooling

Görkey Gürel[1]; Çağın Tanrıverdi Çetin[2]; Sema Alaçam[3]
[1]Istanbul Technical University and Biruni University; [2]Manisa Celal Bayar University; [3]Istanbul Technical University
[1]gurelg17@itu.edu.tr; [2]cagin.cetin@cbu.edu.tr; [3]alacams@itu.edu.tr

Abstract

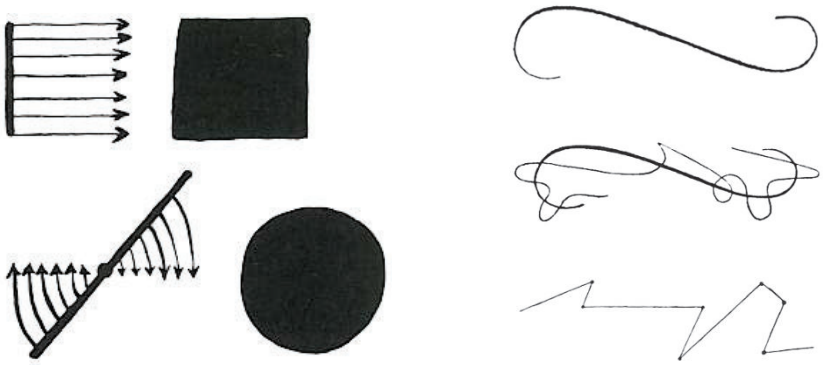
This project is about revealing the dynamic character of architectural drawing through modern digital and physical representation techniques. Studies on architectural representation emphasize the active role of drawing in bridging abstract ideas and tangible forms. The dynamic being of architectural drawing can be understood as the unpredictable abstract counterpart in the observer's mind, while also having the ability to create a sense of movement, flow, and change in architecture. Dynamic lines convey that space is not a static (fixed) element but rather an ecosystem in interaction with its surroundings and users. In an effort to explore the dynamic character of architectural drawing, various methods of line-making have been experimented with, each possessing the potential to reveal distinct sets of thought processes. Motivated by this inquiry, the study aims to generate unique drawings by integrating electronic systems with digital techniques, thereby proposing an innovative approach to architectural drawing methods. Both theoretical and experimental methods are employed to investigate drawings based on coding and mechanical motion. This process consists of three main modules: (i) digital drawings generated through the Grasshopper, (ii) physical drawings produced by the random movements of a mechanism programmed via the Arduino IDE (Integrated Development Environment), (iii) digital drawings created through the interaction between the Arduino IDE and Rhino Grasshopper. Additionally, platforms like TinkerCAD, which simulate the process, have also been utilized. The study aims to offer various digital and physical methods that allow for the dynamic and interactive exploration of architectural ideas. Through this creative process, the goal is to enhance the representational power of drawing and explore how the integration of physical mechanisms with digital tools can provide innovative drawing methods in architectural drawing and representation, thus answering the question of how modern technologies can advance this field.

Keywords: *Architectural Drawing, Architectural Representation, Line Generation, Computer Aided Drawing, Physical Computing.*

1. Giriş

Mimari çizimi oluşturan günümüz modern temsil tekniklerine odaklanan bu çalışma, mimari çizimin statik ve edilgen bir olgudan ziyade dinamik ve etken bir sürecin ürünü olduğu hipotezinden yola çıkarak, çizimin örtük katmanının açığa çıkarılması ve geleneksel yöntemlerle kıyaslanmasını içermekle birlikte "Yeni ve değişmekte olan araçlar mimari çizimin olanaklarını nasıl açar?" sorusuna yanıtlar arayan keşifsel bir çalışma niteliğindedir.

Çizgiyi aktif ve pasif olmak üzere iki gruba ayıran Klee (1953, 1972), pasif çizgileri düzlemlerin harekete geçmesiyle beliren, ilerleyişin izlerini taşıyan edilgen çizgiler; aktif çizgileri ise yalnızca yürümek için yola çıkan, özgürce ve amaçsızca ilerleyen çizgiler olarak tanımlamaktadır (**Şekil 1**). Klee'nin (1953, 1972) "Çizgi, yürüyüşe çıkan bir noktadır." (*A line is a dot that went for a walk*) sözünden ilham alan bu çalışma aracılığıyla, kodlama tabanlı çeşitli teknikler kullanılarak üretilen ve üreyen çizimler arasındaki ilişkinin sorgulanması gözetilmektedir.



Şekil 1: Solda pasif, sağda aktif çizgiler (Klee, 1953, 1972)

Klee'nin çizgiye dair tanım ve sınıflandırmalarından ilham alınarak çizginin kodlama ve mekanik hareket ile yeniden üretilmesi çalışmanın omurgasını oluşturmaktadır. Böylece, hem çizim pratiğine hem de mimari düşünceye dair alternatif okuma biçimlerinin mümkün hale gelmesi düşünülmektedir. Ayrıca bu yaklaşımın, mimari çizimin dönüşen doğasını daha derinlikli bir şekilde kavramaya olanak tanıması beklenmektedir.

2. Amaç

Bu çalışma, mevcut mimari çizim metodolojilerini genişletmeyi ve özellikle çizim eylemi üzerinden mimari temsiliyetin bir tasarım ve düşünme yöntemi olabileceğine dair yeni bakış açıları sunmayı hedeflemektedir. Bu bağlamda çizim, yalnızca bir temsil aracı olarak değil, aynı zamanda mekansal düşüncenin üretildiği bir eylem alanı olarak ele alınmaktadır. Ayrıca bu çalışma, mevcut dijital ve fiziksel temsil teknikleri ışığında mimari çizimin mevcut potansiyellerini derinlemesine inceleyerek, mimari çizimi statik bir üretim süreci olmaktan çıkararak dinamik (etken) bir tasarım aracına dönüştürmeyi hedeflemekte ve literatürdeki bu boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır.

3. Kapsam

Bu proje, güncel hesaplamalı ve fiziksel temsil teknikleri kullanılarak mimari çizimin dinamik karakterini ortaya çıkarmayı konu edinmektedir. Dinamik ve etkileşimli araçların tasarlanması ve bu araçlar üzerinden kodlama ve mekanik hareket tabanlı yöntemler kullanılarak mimari temsiliyetin üretilmesi çalışmanın özgün değerini oluşturmaktadır. Ayrıca bu çalışma, mimari çizimi bitmiş (sabit) bir olgu olmaktan çıkararak enerji, hareketlilik ve sürekli gelişim hissi uyandırmasını sağlayacak bir yaklaşımı temsil etmektedir. Böylece, tasarım süreçlerine ilişkin alternatif güzergah ve yöntemlerin keşfedilmesi öngörülmektedir. Proje, mimari çizim alanındaki geleneksel anlayışları sorgularken, özgün ve modern bir bakış açısı sunarak mimari temsiliyetin sınırlarını sorgulamaktadır. Ayrıca, çizim eyleminin mimari temsiliyet üzerindeki rolünü de sorgulayan yeni bakış açılarının, mimarlık eğitimi ve uygulamalarında özgün bir etki yaratabileceği düşünülmektedir. Bu bağlamda, çizim yalnızca bir anlatım aracı değil, aynı zamanda düşünsel bir üretim süreci olarak ele alınmaktadır. Fiziksel ve dijital ortamlar arasında kurulan etkileşimin mimari temsiliyete çok katmanlı bir derinlik kazandırmasının yanı sıra, mimari çizimin dinamik karakterinin vurgulanması ile mimari çizim pratiğinin geleceğinde etkileşimli ve yenilikçi çizim yöntemlerinin teşvik edilmesi beklenmektedir.

4. Literatür Özeti

Mimari çizim tarihsel süreç içinde teknolojik gelişmelerle birlikte sürekli evrilmeye devam etmiştir (**Tablo 1**).

Tablo 1: Literatür taramasına göre çizim yöntemlerinin kronolojik gelişimi

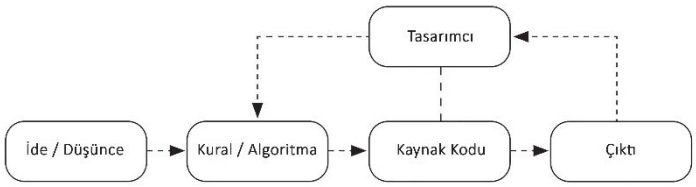
Tarihsel Dönem	Çizim Teknolojisi (Ortam)	Araçlar	Teknikler
20. yy öncesi	Elle çizilmiş eskizler ve parşömen üzerine mürekkep	Pusula, cetvel, kalem, mürekkep kalemi	Geometrik hassasiyetle elle çizim, perspektif çizim
Geç 20. yy	Bilgisayar destekli çizim (CAD)	CAD yazılımı (Autocad), yazıcılar	Dijital iki boyutlu çizim, temel üç boyutlu modelleme
Erken 2000'ler	Bina bilgi modellemesi (BIM)	BIM araçları (Revit, ArchiCAD)	Entegre üç boyutlu modelleme, gerçek zamanlı ortak çalışmalar
2010'lar	Sanal gerçeklik (VR), Artırılmış gerçeklik (AR)	VR başlıkları, AR uygulamaları, dokunsal cihazlar	Kapsayıcı üç boyutlu görselleştirme, işbirliğine dayalı sanal ortamlar
2020'ler	Yapay zeka, robotik çizim sistemleri ve fiziksel prototipleme	Yapay zeka destekli araçlar, Arduino tabanlı sistemler, CNC makineleri	Otomatik tasarım yinelemeleri, bulut tabanlı işbirliği, fiziksel çizim üretimi, kodlama ve hareket tabanlı çizim süreçleri

Edgerton'a (1975) göre çizim, *De Architectura* ile Greko-Romen Dönemi'nde mimari fikirlerin iletilmesi için kritik bir araç haline gelmiştir. Schön (1992) ve Emmons (2014), çizimi tasarımın erken aşamalarında ortaya çıkan bilişsel bir süreç olarak tanımlamaktadır. Rönesans ile birlikte Alberti ve Brunelleschi doğrusal perspektifi (*linear perspective*) geliştirerek çizimi daha gerçekçi mekansal temsiller için kullanmıştır (**Tablo 2**).

Tablo 2: Doğrusal perspektif (*linear perspective*) alanındaki gelişmeler (Edgerton, 1975)

Yıl	Olay
M.Ö. 300	Öklit'in *Optica*'yı yazması
M.Ö. 25	Vitruvius'un *De architectura*'yı yazması
M.S. 140	Ptolemy'nin *Geographi*'yi yazması
M.S. 175	Galen'in *De usu partium*'u yazması
M.S. 1000	Alhazen'in *Perspectiva*'yı yazması
M.S. 1260	Roger Bacon'un *Opus Majus*'u yazması
M.S. 1270	John Pecham'ın *Perspectiva communis*'i yazması
M.S. 1390	Blasius of Parma'nın *Quaestiones perspectiva*'yı yazması
M.S. 1400	Ptolemy'nin *Geographia*'sının Batı Hristiyanlığı'nda ortaya çıkması
M.S. 1425	Brunelleschi'nin ilk lineer perspektif resimlerini yapması
M.S. 1435	Alberti'nin lineer perspektif üzerine ilk yazılı eserini yazması

Yirminci yüzyıl başlarında modernist mimarlar çizimi minimalist bir anlayışla ele almış ve işlevselliği ön plana çıkarmıştır. Le Corbusier'in "Ev, içinde yaşanacak bir makinedir." (*A house is a machine for living in*) sözü, Colomina (1994) için çizimdeki netlik ve sadeliğin sanayi çağına uygun bir dil oluşturduğunu vurgulamaktadır. Evans (1995), bu dönemde çizginin soyut fikirleri temsil eden bir role büründüğünü savunurken, Mitchell (1995) *Computer Aided Design* (*CAD*) ve *Building Information Modeling* (*BIM*) gibi güncel teknolojilerin çizimi nasıl dönüştürdüğünü vurgulamaktadır. Frascari ise (2011) çizimin kendine özgü ifade gücüne dikkat çekmektedir. Günümüzde ise Goodfellow vd. (2016), derin öğrenme modellerinin geçmişte üretilmiş mimari çizimleri analiz ederek yeni çizimler üretebilmesine ve tasarım sürecini destekleyici bir araç olmasına dikkat çekmiştir. Son yıllarda mimarlık, kodlama ve makine öğrenmesi etkileşiminin mimari çizim alanında yenilikçi bir bakış açısı ortaya koymasıyla birlikte üretken tasarım (*generative design*) kavramı ortaya çıkmıştır. Menges'e göre (2012) üretken tasarım yaklaşımları, tasarımcıların yeni biçimsel ve mekânsal olanakları keşfetmelerini sağlamaktadır. Lazzeroni vd. (2012), üretken tasarımı basit bir soyut fikir etrafında dönen ve bu fikri bir kural veya algoritmaya dönüştüren bir süreç olarak tanımlamaktadır (**Şekil 2**).



Şekil 2: Üretken tasarım süreç diyagramı (Lazzeroni vd., 2012)

Banzi'ye göre (2011), özellikle *Arduino* gibi sistemler, mimari temsilde etkileşimli modellerin geliştirilmesine imkan tanımaktadır. Lynn ise (1999) mekanik sistemlerin tasarıma entegrasyonunu dijital ile fiziksel arasındaki sınırları bulanıklaştıran bir araç olarak görmektedir. Son zamanlarda ise kodlama, makine öğrenmesi ve mimarlık arasındaki etkileşimi inceleyen çalışmalar yaygınlaşmıştır. Buna örnek olarak Eindhoven Teknoloji Üniversitesi Endüstriyel Tasarım Bölümü'nde yapılan bir çalışma gösterilebilir. Çalışmanın ilk aşamasında katılımcılara temel teorik eğitimler verilmiştir. Teorik sürecin ardından, katılımcılardan *Lego NXT* parçaları kullanarak *The Crawler* ve *Johnny Q* isimli robotları üretmeleri istenmiştir (**Şekil 3**). Vlist vd. (2008), *Lego NXT* parçalar kullanılarak oluşturulan mekanik araçların, mimari temsilin bir biçimi olan çizgiyi dinamik ve katılımcı bir süreç sonunda üretmeyi başardığını vurgulamıştır.

Şekil 3: Solda The Crawler, sağda Johnny Q robot (Vlist vd., 2008)

5. Metodoloji

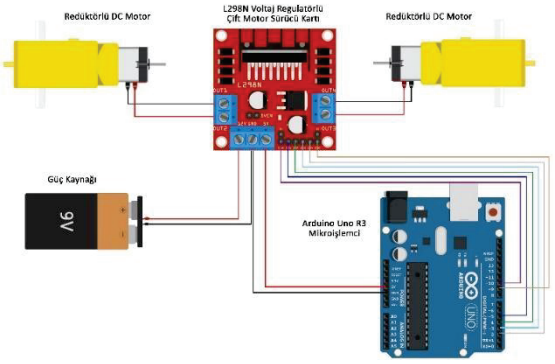
Çalışma dahilinde, ilgili literatür taranarak mekanik sistemler ve *Arduino* yazılımları üzerine kapsamlı bir araştırma yapılmış, makine bileşenleri bir araya getirilerek çizim üreten bir mekanizmaya dönüştürülmüştür. Çizim uygulamaları kapsamında; kodlama tabanlı algoritmalar aracılığıyla hem dijital hem de mekanik hareketlerle oluşturulan çizimler üretilmiştir. Bu süreç, dijital ve fiziksel temsil tekniklerinin etkileşimini inceleyerek mimari çizim pratiğine yeni bir bakış açısı sunmayı hedeflemektedir. Bu bağlamda çalışma süresince izlenen adımlar, her bir adımın girdileri, süreçleri ve elde edilen çıktıları sistematik bir biçimde ortaya konmuştur (**Tablo 3**).

Tablo 3: Projenin iş akışına ait girdi, süreç ve çıktılar

Adım	Girdi	Süreç	Çıktı
Literatür araştırması ve hazırlık	Makine parçalar ve Arduino yazılımları	- Mekanik sistemler ve Arduino sistemlerinin kullanımı üzerine araştırma	Bilgi tabanı (mekanik ve yazılım altyapısı)
Makine sistemlerinin toplanması	Makine parçaları, elektronik sistemler	- Uygun makinelerin parçalarının belirlenmesi - Parçaların estetik ve işlevsel olarak değerlendirilmesi	Çizim üreten mekanizmanın fiziksel bileşenleri
Özelleşmiş Çizim Aracının Tasarımı ve Geliştirilmesi	Makine parçaları, Arduino bileşenleri	- Çizim üreten mekanizmanın tasarımı - Arduino ile mekanik sistemin kontrolü	Çizim üreten mekanizma
Kod tabanlı çizimler	Arduino IDE, Rhino Grasshopper	- Algoritmalar ile makine hareketlerinin kontrolü - Algoritmalar ile dijital süreçler	Dijital ve fiziksel çizimler

5.1. Arduino ve Makine Sistemlerinin Simülasyonu

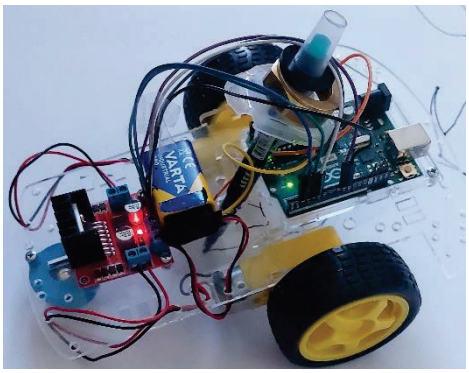
Simülasyon yazılımları, fiziksel sistemlerin dijital ortamda modellenerek test edilmesini sağlamaktadır. Bu yazılımlar, gerçek dünyadaki süreçlerin sanal ortamda simüle edilmesine imkan tanıyarak tasarım süreçlerinin daha verimli hale gelmesine yardımcı olmaktadır. Bunlardan biri olan *TinkerCAD* uygulaması kullanılarak *Arduino Uno R3* mikroişlemci, redüktörlü DC motorlar, *L298N* motor sürücü kartı ve güç kaynağı bağlantı kabloları (*jumper*) aracılığıyla entegre edilerek sanal ortamda bir simülasyonu oluşturulmuştur (**Şekil 4**). Motor sürücü devresi kurulumunda, A motorundan çıkan kablolar *L298N* motor sürücü kartının *OUT1* ve *OUT2* pinlerine, B motorundan çıkan kablolar ise *OUT3* ve *OUT4* pinlerine bağlanarak motorlar ile sürücü arasındaki iletişim sağlanmıştır. Motor sürücü kartında yer alan *ENA* pini A motorunun dönüş hızını kontrol ederken *ENB* pini ise B motorunun dönüş hızını kontrol etmektedir. Sürücü kartındaki *IN1* ve *IN2* pinleri A motorunun, *IN3* ve *IN4* pinleri ise B motorunun çalışmasını sağlamaktadır. Bu pinler motorların hareketini kontrol eden *Arduino UNO R3* mikroişlemcisinin dijital pinlerine bağlanmıştır. Ayrıca, sürücü kartının *5V* ve *GND* pinleri mikroişlemcinin *5V* ve *GND* pinlerine bağlanmıştır. Son olarak, motor sürücü kartını besleyen güç kaynağındann çıkan kırmızı kablo (+) sürücü kartının *12V* pinine, siyah kablo (-) ise *GND* pinine bağlanarak devreye gerekli akım sağlanmıştır. Çizim aracının mekanik hareketlerini kontrol eden bileşenler, fiziksel bir prototip oluşturmadan önce dijital ortamda simüle edilmiş ve gerekli bağlantılar kurulduktan sonra DC motorların düzgün çalıştığı *TinkerCAD* ortamında gözlemlenmiştir.



Şekil 4: *TinkerCAD* uygulamasında oluşturulan elektronik devre simülasyonu

5.2. Özelleşmiş Bir Çizim Aracının Tasarlanması (*Recomposition*)

Bir sonraki aşama, elektronik parçalardan ve *Arduino* bileşenlerinden oluşan, çizgiyi üreten mekanizmanın tasarım ve geliştirilmesini içermektedir. Bu mekanizma, mekanik hareketlerle özgün görsel çıktılar üreten bir çizgi üreticisi (*line-maker*) olarak kullanılmıştır (**Şekil 5**). Mekanizma; Arduino Uno mikroişlemci, L298N motor sürücü kartı, şase, metal kör tekerlek, 2 adet robot tekerlek, 2 adet redüktörlü DC motor, 9V alkalin pil, bağlantı kabloları (*jumper*), kalem, kalemi tutan plastik ve somundan meydana gelmektedir.



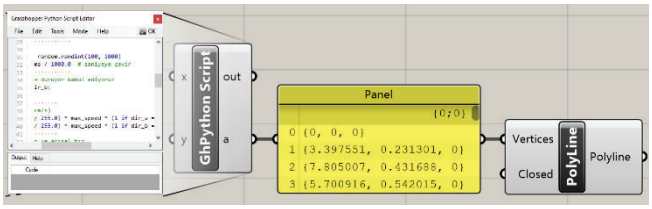
Şekil 5: Çizim üreten hareketli mekanizma

5.3. Kod Tabanlı Çizimler

Bu aşama, *Arduino Integrated Development Environment* (*Arduino IDE*) ve *Rhino Grasshopper* gibi yazılım araçları kullanılarak makinenin hareketlerini yöneten algoritmalar aracılığıyla rastlantısal çizimlerin oluşturulmasını içermektedir. İlk olarak hesaplamalı tasarım ortamı *Grasshopper* kullanılarak *Python* dilinde yazılan kod yardımıyla rastlantısal dijital çizimler oluşturulmuştur. Daha sonra ise fiziksel çizim oluşturmak amacıyla *Arduino IDE* yazılımında üretilen kod, motorları yöneten mikroişlemciye aktarılmış ve motorların her yinelemede farklı süre, yön ve hızlarda hareket etmesiyle eşsiz (*unique*) çizimler elde edilmiştir. Son olarak ise *Arduino IDE* ve *Rhino Grasshopper* yazılımlarının etkileşimi ile rastlantısal çizimler oluşturulmuştur. Bu yöntemlerin mekanik sistemlerdeki öngörülemezlik ve rastlantısallığı ön plana çıkarması, dijital kodlama ile fiziksel üretim arasındaki ilişkiyi tartışmaya açarak yenilikçi yaklaşımlar ortaya koyması beklenmektedir.

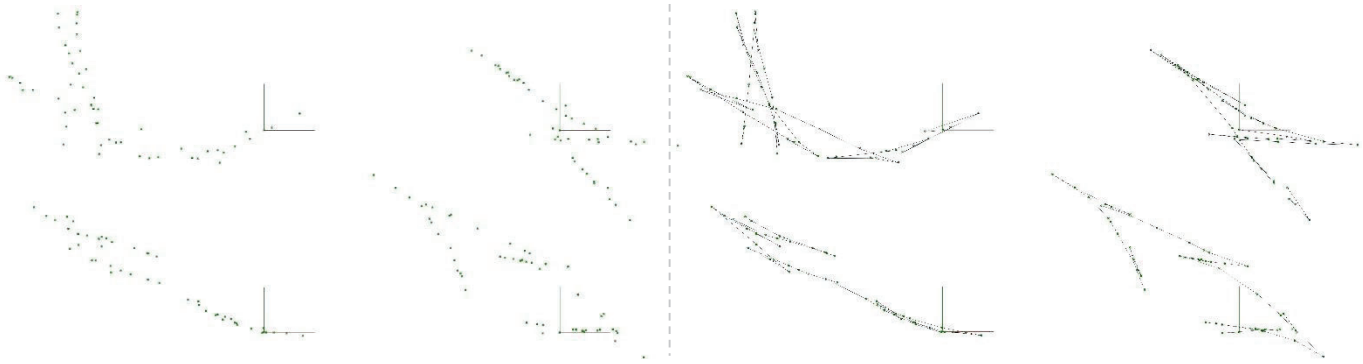
5.3.1. *Rhino Grasshopper* Hesaplamalı Tasarım Ortamında Dijital Çizimlerin Üretilmesi

Grasshopper hesaplamalı tasarım ortamında *GhPython Script*, *Panel* ve *Polyline* bileşenleri kullanılmıştır (**Şekil 6**). *GhPython Script* içerisinde yazılan kod diferansiyel sürüşe sahip bir robota bağlı iki farklı redüktörlü DC motorun rastlantısal yön, süre ve hızlarla hareketini simüle etmektedir. Motorların hızı ve yönü, her defasında farklı değerler alacak şekilde hesaplanmış, hareket boyunca değişen konum (koordinat) bilgisi noktalar kümesi olarak bir listeye eklenmiş ve son olarak bu noktalar çoklu çizgiler (*polyline*) oluşturmak amacıyla birleştirilmiştir. Dijital olarak oluşturulan bu çizgiler kümesi robotun hareket süresince izlediği yolu temsil etmektedir.



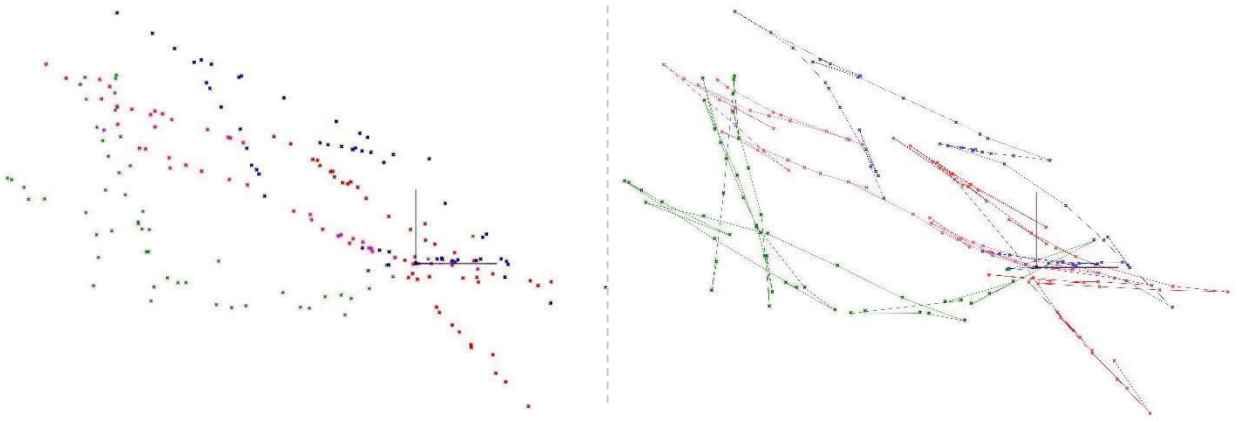
Şekil 6: Rastlantısal robot hareketlerini içeren *Grasshopper* algoritması

GhPython Script bileşeni, motorların hareketleri sonucu değişen konuma ait noktaları vermektedir. Bu noktalar sayısal modelleme ortamı *Rhino* aracılığıyla oluşturulmuş ve daha sonra *Grasshopper* yazılımı aracılığıyla kodun içerisinde yer alan koordinat değerleri *Panel* bileşenine aktarılmıştır. Bu veriler ise *Polyline* bileşenine aktarılarak *Rhino* ortamında dijital çizimler oluşturulmuştur (**Şekil 7**).



Şekil 7: *Rhino* sayısal modelleme ortamında oluşturulan noktalar ve çizgiler

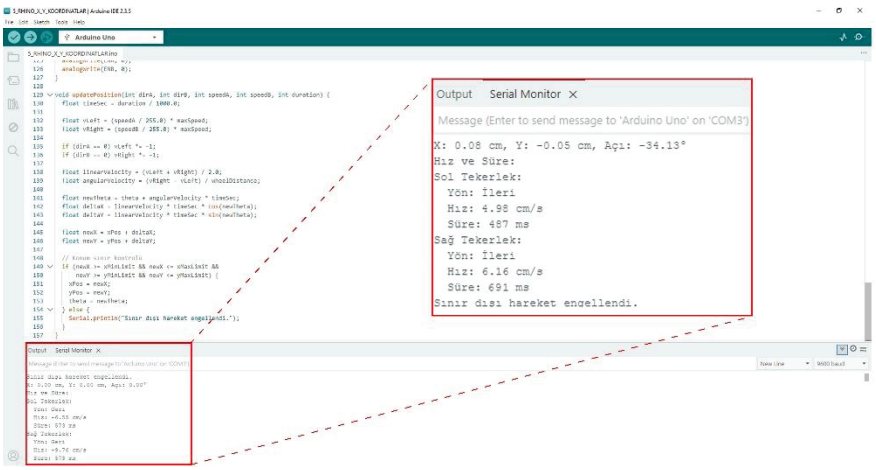
Rastlantısal olarak oluşturulan noktalar ve bu noktaların birleştirilmesiyle oluşturulan çizgiler başlangıç noktaları referans alınarak üst üste bindirilmiştir (**Şekil 8**). Bu örnek üzerinden bakıldığında, dört ayrı çizimin de koordinat düzleminin ikinci bölgesinde yoğunlaştıkları görülmektedir.



Şekil 8: Oluşturulan noktaların ve çizgilerin çakıştırılmış hali (*superposition*)

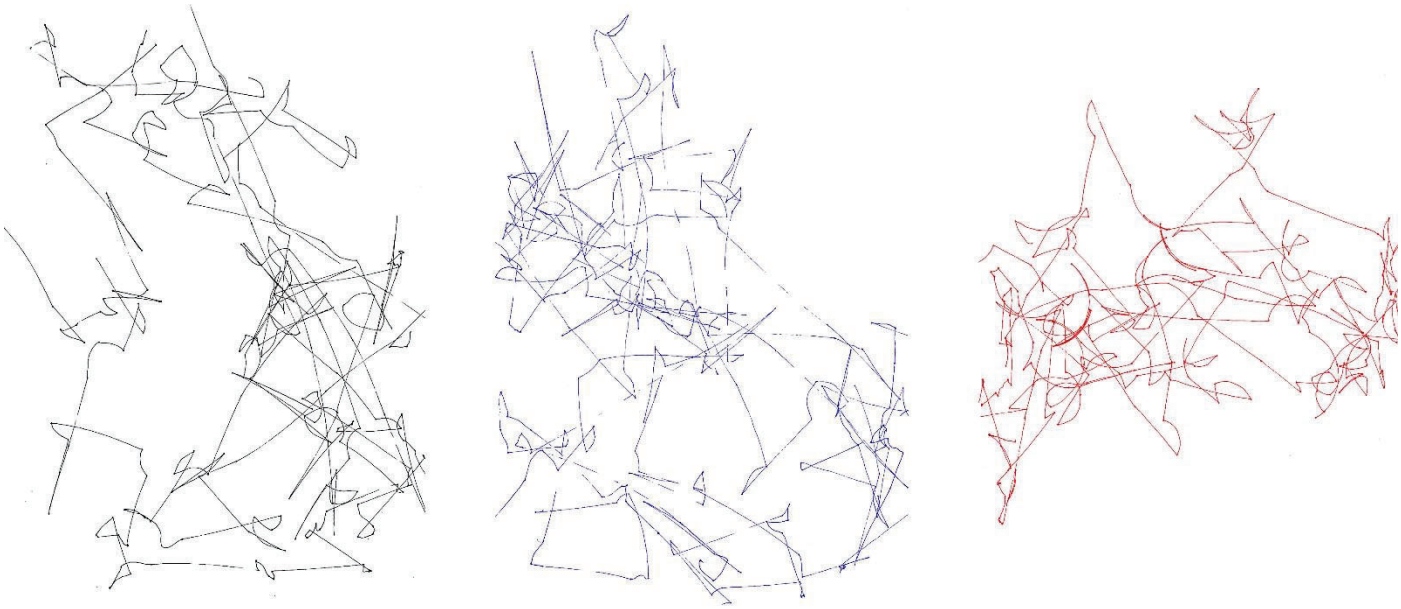
5.3.2. *Arduino IDE* Yazılımı ile Programlanan Hareketli Mekanizma Aracılığıyla Fiziksel Çizimlerin Üretilmesi

Bu adımda, *Arduino* sistemleriyle entegre çalışan *Arduino IDE* yazılımı aracılığıyla üretilen kod test edildikten sonra mikroişlemciye aktarılmış ve böylece mekanizmanın rastlantısal hareketleri sonucunda fiziksel çizimler elde edilmiştir. *Arduino IDE* ortamında *C++* dilinde yazılan ve tekerlek yarıçapı, tekerlekler arası mesafe ve rastlantısal hareketlere ait bilgileri içeren kod aracılığıyla çizim üreten mekanizma programlanmıştır. Simüle edilen her bir rastlantısal hareket sonucu mekanizmaya ait konum bilgisi ve dönme açısı ile tekerleklere ait yön, hız ve çalışma süreleri elde edilmiştir (**Şekil 9**). Ayrıca mekanizma belirlenen sınırlar dışına çıkacağında hareketi engellenecek şekilde programlanmıştır.



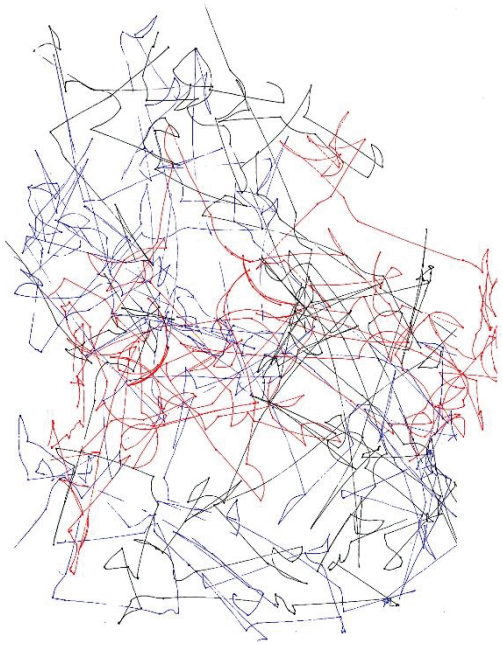
Şekil 9: *Arduino IDE* ortamında *DC* motorların aktivitelerini kontrol eden kod ile elde edilen veriler

Arduino IDE ortamında geliştirilen kod, çizim üreten mekanizmanın mikroişlemcisine yüklenmiş; ardından sistem güç kaynağına bağlanarak rastlantısal hareketler sonucunda fiziksel çizimlerin üretilmesi sağlanmıştır (**Şekil 10**). Her bir çizim, sistemin başlangıç parametrelerine bağlı olarak özgün bir rota izleyerek farklı desenlerin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu bağlamda elde edilen çizimler, hem hesaplamalı tasarım sürecinin hem de fiziksel üretim pratiğinin bir çıktısı olarak değerlendirilmektedir. Üretilen çizimler incelendiğinde, bazı rotaların tekrar ettiği ve aralarında belirli benzerliklerin olduğu görülebilmektedir. Çizim (vaka) sayısının artırılmasıyla birlikte, benzer yönelimlerin daha net biçimde ortaya çıkması ve bu rastlantısal hareketlerin belirli örüntüler oluşturup oluşturmadığının daha sağlıklı bir biçimde analiz edilebilmesi mümkün hale gelecektir.



Şekil 10: Mekanizmanın rastlantısal hareketleriyle üretilen fiziksel çizimler

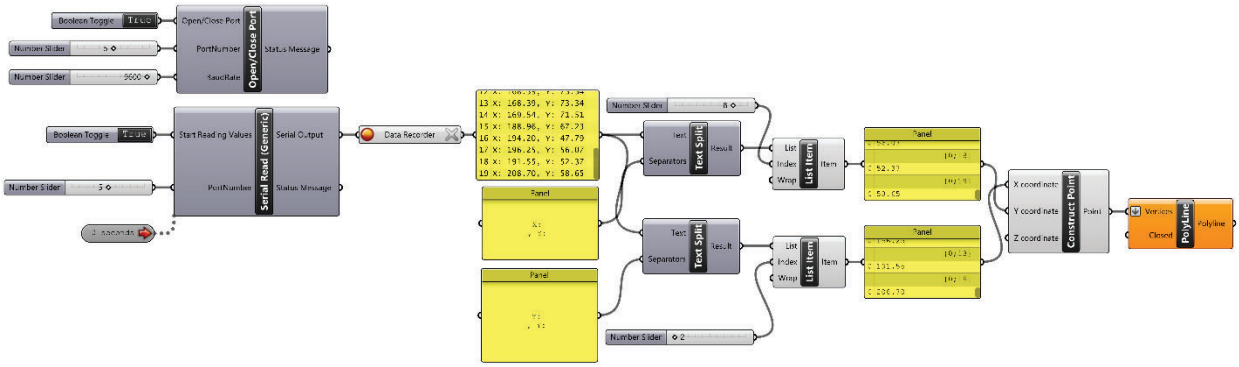
Oluşturulan fiziksel çizimlerin başlangıç noktaları referans alınarak üst üste bindirilmesiyle aralarındaki benzerlik ve farklılıklar daha net görülebilmektedir (**Şekil 11**).



Şekil 11: Oluşturulan fiziksel çizimlerin çakıştırılmış hali (*superposition*)

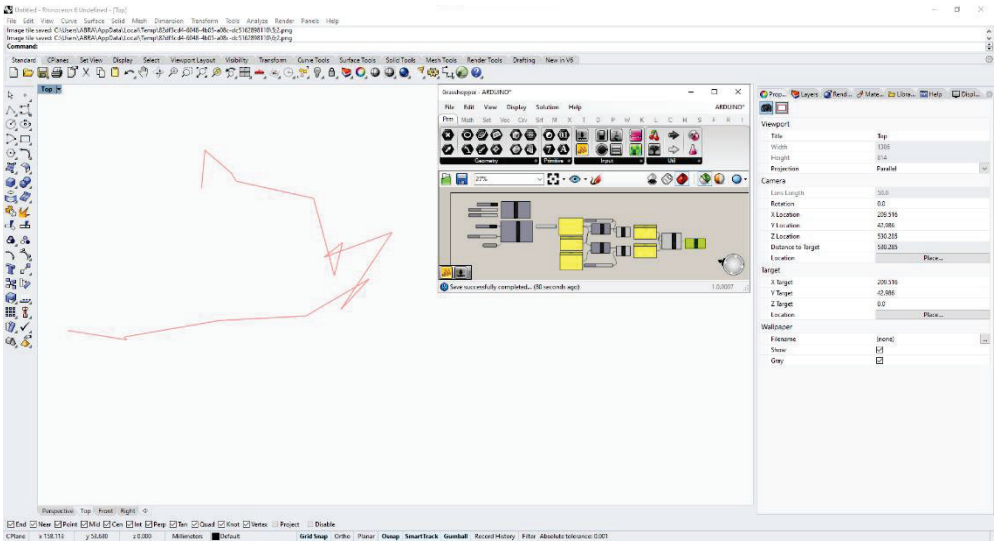
5.3.3. *Arduino IDE* ve *Rhino Grasshopper* Etkileşimi ile Dijital Çizimlerin Üretilmesi

Söz konusu kod *Firefly* eklentisi (*plugin*) kullanılarak *Grasshopper* yazılımına aktarılmıştır. Bu eklentiye ait *Open/Close Port* bileşeni ile mikroişlemcinin bağlı olduğu porttan gerekli veri alınarak *Arduino IDE* ile *Grasshopper* arasındaki bağlantı sağlanmıştır. Bir diğer bileşen *Serial Read (Generic)* aracılığıyla gelen veriler belirli aralıklarla gerçek zamanlı olarak kaydedilmiş ve *Panel* bileşenine aktarılmıştır. Bu veriler daha sonra *Text Split* bileşeni ile apsis (x) ve ordinat (y) olmak üzere iki ayrı gruba ayrılmıştır. Bu değerler mekanizmanın üç boyutlu uzaydaki anlık konumunu temsil etmektedir. Apsis değerleri *Construct Point* bileşeninin *X coordinate* girdisine, ordinat değerleri ise Y *coordinate* girdisine bağlanarak noktalar oluşturulmuştur. Son olarak bu noktalar *Polyline* bileşenine bağlanmıştır (**Şekil 12**).



Şekil 12: *Grasshopper* ortamında *Firefly* eklentisi ile oluşturulan algoritma şeması

Grasshopper yazılımından gerçek zamanlı olarak alınan konum verisiyle çizgiler *Rhino* sayısal modelleme ortamında anlık olarak oluşturulmuştur (**Şekil 13**). Algoritma yeniden başlatıldığında konum verisi rastlantısal olarak değişeceğinden dolayı ortaya çıkacak çizim de bir öncekinden farklı olacaktır.



Şekil 13: *Grasshopper* yazılımı aracılığıyla *Rhino* ortamında gerçek zamanlı olarak oluşturulan çizgiler

6. Bulgular ve Yorum

Bu çalışmada, dijital ve fiziksel çizim üretim süreçlerine yönelik üç farklı yöntem uygulanmıştır. İlk yöntemde, *Grasshopper* ortamında *GhPython Script* bileşeni aracılığıyla yazılan kodlar kullanılarak dijital çizimler üretilmiştir. İkinci yöntemde, *Arduino IDE* yazılımı ile programlanan hareketli bir mekanizmanın rastlantısal hareketleri sonucunda fiziksel çizimler elde edilmiştir. Üçüncü yöntemde ise *Arduino IDE* ile *Rhino Grasshopper* arasında kurulan etkileşim aracılığıyla dijital çizimler oluşturulmuştur.

İlk yöntemde, *Grasshopper* ortamında üretilen kod aracılığıyla rastlantısal (öngörülemez) hareketlerle oluşturulan çizimlerin, örneklem sayısı her ne kadar sınırlı olsa da bir örüntü oluşturmaya yatkın oldukları görülebilmektedir. Rastlantısal hareketlerin belirli sayıdaki tekrarı sonucu anlamlı bir örüntü oluşturup oluşturmayacağının örneklem sayısı arttıkça netlik kazanacağı düşünülmektedir.

Diğer bir yöntem olarak, *Arduino IDE* yazılımı ile programlanan hareketli mekanizma aracılığıyla dinamik bir sürecin sonucu olarak ortaya çıkan fiziksel çizimler; yoğunluk, hareket, yönelim gibi özellikler bakımından karşılaştırılmıştır (**Tablo 4**). Bu çizimler, rastlantısal hareketin her defasında benzersiz izler bırakan bir üretim aracına dönüştüğünü göstermiştir. Bu durum, sistemin tekrarlanabilirliği ve rastlantısallığın sınırlarını ortaya koymak açısından önemli veriler

sunmuştur. Her bir rastlantısal hareket özgün bir çizim ortaya çıkarmış ve her bir çizimin önceki hareketlerin bir sonucu

olarak evrimleşmesini sağlamıştır. Böylece, çizim sadece durağan (edilgen) bir sürecin ürünü olmaktan çıkarak, dinamik (etken) bir üretim sürecine dönüşmüştür. Bu bağlamda, kod ve hareketli mekanizmanın birleşimi çizimi yalnızca estetik bir ifade biçimi olarak değil, aynı zamanda süregeldiği her aşamada yinelenen, yenilenen ve gelişen bir tasarım aracı olarak konumlandırmıştır. Bu çizimler, onu üreten mekanizmanın çevresiyle kurduğu etkileşim aracılığıyla, insan müdahalesinden bağımsız bir üretim dili oluşturmuştur. Her bir çizgi, sadece fiziksel bir hareketin izi değil, aynı zamanda çizim zemini ile kurulan rastlantısal bir ilişkinin görsel kaydı haline gelmiştir. Bu noktada, rastlantısallığın doğurduğu hata, bilinçli bir estetik strateji ve kontrollü bir kaosa dönüşmüştür. Böylece çizim, yalnızca teknik birer çıktı olmaktan çıkarak, yorumlanabilir ve özgün temsil değeri olan birer araca evrilmiştir.

Tablo 4: Oluşturulan fiziksel çizimlerin karşılaştırmalı analizi

Özellikler	**Çizim 1 (Siyah)**	**Çizim 2 (Mavi)**	**Çizim 3 (Kırmızı)**
Çizgi yoğunluğu	Yoğunlaşan merkezler	Katmanlı ve girift	Yaygın dağılım
Hareket karakteri	Köşeli, ani yön değişimleri	Dairesel ve tekrarlayan	Akıcı, geniş yaylar
Yönelim	Düzensiz, çok yönlü	Düzensiz, çok yönlü	Yatayda daha baskın
Boşluk kullanımı	Yoğun merkezli, boşluklu kenarlar	Yoğun merkezli, boşluklu kenarlar	Geniş boşluklar barındırır

Üçüncü yöntem olarak, *Arduino IDE* programından *Grasshopper* yazılımına aktarılan kod aracılığıyla *Rhino* sayısal modelleme ortamında gerçek zamanlı olarak dijital çizimler üretilmiştir. Bu durum, mekanizmanın rastlantısal hareketlerinin izlerini üç boyutlu uzayda kaydeden bir sistem üretmiştir. Algoritmanın her yinelemesinde elde edilen konum verilerinin farklılaşması, üretim sürecini tekrar edilemez ve özgün bir hale getirmiştir.

Dijital olarak üretilen çizimler düzgün doğrusal çizgilerden oluşurken, fiziksel olarak üretilen çizimlerde tekerleklerin stabilizasyon sorunundan dolayı eğrisel çizgiler görülmektedir. Dijital olarak üretilen çizimler, simüle edilen mekanizmanın anlık konum bilgisini temsil eden noktaların birleştirilmesiyle oluşturulduğundan dolayı eğrisel çizgiler göz ardı edilmiştir. Çalışmanın bir sonraki adımında çizim üreten mekanizmanın hareketiyle eş zamanlı olarak dijital çizimlerin oluşturulması ve bu çizimlerin karşılaştırılması planlanmaktadır.

7. Sonuçlar

Bu çalışma, dijitalden analog süreçlere uzanan bir üretim hattı üzerinde, algoritmik rastlantısallığın yaratıcı bir araç olarak nasıl kullanılabileceğini göstermektedir. Elde edilen veriler, mimari çizimin statik değil, dinamik ve etkileşimli bir sürecin ürünü olduğunu ortaya koymaktadır. *Arduino* yazılımı, hesaplamalı tasarım ve simülasyon araçlarıyla birleşen çizim pratiği ile mimari temsilin dinamik karakterinin açığa çıkarılması hedeflenmiştir. Geleneksel çizimlerle karşılaştırıldığında, hesaplamalı yöntemlerle oluşturulan çizimler rastlantısallık, tekrar edilebilirlik ve parametrik değişkenlik açısından farklılıklar sunmaktadır. Sonuç olarak, mekanik hareketlerin oluşturduğu çizimler, mimari temsiliyetin sınırlarını yeniden tanımlayarak, tasarım sürecinde farklı bir düşünsel yaklaşımın kapılarını aralamaktadır.

İleriye dönük bakıldığında, çeşitli yöntemlerle elde edilen verilerin hesaplamalı ortamda analiz edilmesi, rastlantısallığın çok sayıda tekrarı ile örüntü oluşturabilecek bir eşiğe sahip olup olmadığı ve sistem performansının değerlendirilmesi planlanmaktadır. Bu sayede, hem tasarım süreçlerinin hem de üretim sistemlerinin geliştirilmesine katkı sağlayacak daha kapsamlı bir derin öğrenme destekli çizim mekanizması tasarlanması hedeflenmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, İstanbul Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından MYL-2024-46376 kodlu proje kapsamında desteklenmektedir.

KAYNAKLAR

Banzi, M. (2011). *Getting started with arduino*. O'Reilly Media.

Colomina, B. (1994). *Privacy and publicity: Modern architecture as mass media*. MIT Press.

Edgerton, S. Y. (1975). *The renaissance rediscovery of linear perspective*. Basic Books.

Emmons, P. (2014). Demiurgic lines: Line-making and the architectural imagination. *The Journal of Architecture, Vol. 19*. No. 4. (pp.536–559). https://doi.org/10.1080/13602365.2014.949822.

Evans, R. (1995). *The projective cast: Architecture and its three geometries*. MIT Press.

Frascari, M. (2011). *Eleven exercises in the art of architectural drawing: Slow food for the architect's imagination*. Routledge.

Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep Learning*.MIT Press. https://doi.org/10.1007/s10710-017-9314-z

Klee, P. (1972). *Pedagogical sketchbook*. (S. Moholy-Nagy, Trans.). New York: Frederick A. Preager, Inc. (Original work published in 1953).

Lazzeroni, C., Bohnacker, H., Gross, B. & Laub, J. (2012). *Generative design: Visualize, program, and create with processing*. Princeton Architectural Press. Princeton.

Lynn, G. (1999). *Animate form*. Princeton Architectural Press.

Menges, A. & Hensel, M. U. (2006). *Morpho-ecologies*. AA Publications.

Mitchell, W. J. (1995). *The reconfigured eye: Visual truth in the post-photographic era*. MIT Press.

Schön, D. (1992). Designing as reflective conversation with the materials of a design situation. *Research in Engineering Design, Vol 3*, pp. 131-147. https://doi.org/10.1007/BF01580516.

Vlist, B. v. d., Westelaken, R., Bartneck, C., Jun, H., Ahn, R., Barakova, E., Delbressine F., Feijs, L. (2008). Teaching Machine Learning to Design Students. In Z. Pan, X. Zhang, A. E. Rhalibi, W. Woo & Y. Li (Eds.), *Technologies for E-Learning and Digital Entertainment, LNCS*. Vol. 5093/2008, pp. 206-217. Berlin: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-69736-7_23.

MSTAS 2025 MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Hesaplamalı Tasarımda Malzeme Etmenliğinin Dokuma Yoluyla Araştırılması

Asude Sena Kösebaş Yıldız[1]; Sevil Yazıcı[2]
[1,2]İstanbul Teknik Üniversitesi
[1]kosebas15@itu.edu.tr; [2]sevilyazici@itu.edu.tr

Özet

Tasarım etmenliği, tasarım sürecine katılan insan ve insan-dışı aktörlerin süreç üzerinde yönlendirici etkiler yaratma kapasitesini ifade etmektedir. Güncel tasarım kuramları, geleneksel tasarımcı merkezli modelleri eleştirerek çok aktörlü ve dağıtılmış etmenlik anlayışlarını öne çıkarmıştır. Bu çerçevede malzeme etmenliği, malzemelerin yalnızca edilgen birer öge değil, süreçte etkin rol oynayan aktörler olduğu fikrini temellendirmektedir. Literatürde, malzeme etmenliğini görünür kılmaya yönelik çalışmaların sınırlı olduğu ve mevcut yaklaşımların hesaplamalı düşünce ilkeleriyle yapılandırılmış analog üretim pratikleri ile ele alınmadığı görülmektedir. Bu bağlamda, araştırmanın temel amacı, malzemelerin tasarım sürecindeki rolünü irdelemek ve malzeme etmenliğini sistematik biçimde açığa çıkarmaktır. Bu doğrultuda, çalışma analog dokuma pratiğini deneysel araştırma yoluyla ele alarak, malzemeyi tasarım sürecinin kural üreten bir bileşeni olarak yeniden konumlandırmakta ve malzeme etmenliğinin işleyişini incelemektedir. Dokuma pratiği malzeme ile tasarımcı arasındaki karşılıklı etkileşim yoluyla bilgi üretiminin dinamik bir arayüzü olarak değerlendirilmiştir.

Çalışmada, öncelikle literatürdeki temel dokuma tipleri incelenmiş ve daha dengeli bir yapısal dağılım sağlamasından dolayı prototipleme aşamasında bezayağı dokumanın seçilmesine karar verilmiştir. Ardından, form-izleyen, form-dirençli, form-hatırlayan ve form-bozucu kategorileri altında sınıflandırılan malzemelerin tekli, ikili ve çoklu kombinasyonlarla kullanıldığı üç aşamalı bir prototipleme yapısı kurgulanmıştır. Bu yapı malzemenin üretim sırasındaki davranışlarının gözlemlenmesini ve tasarımcı müdahalelerine etkisini analiz etmeyi mümkün kılmıştır. Araştırmada Tasarım Yoluyla Araştırma (Research through Design) yaklaşımı benimsenmiş; üretilen çıktılar, reflection-on-action kavramı doğrultusunda yansıtıcı analiz ile değerlendirilmiştir. Dokuma pratiği, üretimden sistematik yapısal analize geçiş sağlayan yapma grameri ile formalize edildikten sonra süreçteki malzeme davranışları ile tasarımcı müdahaleleri arasındaki ilişkileri açığa çıkaran kural-temelli bir yapma denklemi yapısı geliştirilmiştir. Bu denklem G = {T, M, D, R} yapısında biçimlendirilmiş; burada dokuma tipi (T), malzeme seti (M), malzeme davranışları (D) ve tasarımcı müdahaleleri (R) kavramsal olarak modellenmiştir. Bu yapı, yalnızca üretim çıktılarının değil, üretim sürecindeki malzeme-tasarımcı ilişkilerinin de sistematik olarak temsil edilmesine imkân tanımıştır.

Bu çalışma, analog dokuma pratiğini hesaplamalı ilkelerle ele alarak, malzeme davranışlarının üretim sürecinde kurallar oluşturabileceği ve tasarım bilgisinin malzeme–tasarımcı etkileşimi üzerinden yapılandırılabileceği özgün kuramsal ve deneysel bir çerçeve sunmaktadır. Elde edilen bulgular, analog üretim tekniklerinin, malzeme geri bildirimleri ve tasarımcı müdahaleleri aracılığıyla sistematik olarak analiz edilebileceğini göstermektedir. Analizler sonucunda, malzemenin tasarım süreci içerisinde pasif bir sistem girdisi olmaktan çıkarak, kendi içsel özellikleriyle tasarımı biçimlendiren aktif bir tasarım aktörü haline geldiği görülmüştür. Tasarımcı ise mutlak bir karar verici olmak yerine, geri beslemeleri yapılandırarak süreci yönlendiren esnek bir arabulucu rolü üstlenmektedir. Çalışma, malzeme etmenliğinin tasarım epistemolojisinde yeniden tanımlanabileceği ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: *Malzeme Etmenliği, Dokuma, Analog Üretim, Hesaplamalı Tasarım, Yapma Grameri.*

2025 MSTAS MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Weaving as a Method for Investigating Material Agency in Computational Design

Asude Sena Kösebaş Yıldız[1]; Sevil Yazıcı[2]
[1,2]İstanbul Technical University
[1]kosebas15@itu.edu.tr; [2]sevilyazici@itu.edu.tr

Abstract

Design agency, forming the theoretical foundation of the study, refers to the capacity of human and non-human actors to exert directive influence on the design process. Contemporary theories critique traditional human-centered agency models, instead emphasizing multi-actor and distributed understandings of agency. Material agency posits that materials are not merely passive elements but active participants shaping the design process. Existing literature includes limited studies focused on revealing material agency, and current approaches rarely address it through systematic analog production practices framed by computational thinking. Thus, this research aims to examine the role of materials within the design process and systematically uncover material agency. Through experimental weaving practice, the study repositions materials as rule-generating components and investigates their agency. Weaving is evaluated as a dynamic interface for knowledge generation through the reciprocal interaction between material and designer.

In the study, fundamental weaving types in literature were first examined, with plain weave selected for prototyping due to its balanced structural distribution. A three-stage prototyping process is structured, incorporating single, dual, and multiple material combinations categorized as form-following, form-resisting, form-remembering, and form-distorting. This structure enabled observation and analysis of material behaviors and their impacts on designer interventions. Employing the Research through Design (RtD) methodology, the outputs are evaluated through reflective analysis based on reflection-on-action. Following the formalization of the weaving into a making grammar that facilitated the transition to systematic analysis, a rule-based making equation structured as G = {T, M, D, R} is developed to reveal the relationships between material behaviors and designer interventions throughout the process. In the equation, weaving type (T), material set (M), material behaviors (D), and designer interventions (R) are conceptually modeled. This structure enabled not only the systematic representation of design outputs but also the material–designer interactions that occurred during the process.

By integrating analog weaving practice aligned with computational principles, this study presents an original theoretical-experimental framework demonstrating how material behaviors can generate procedural rules and how design knowledge emerges through material-designer interaction. The findings demonstrate that analog production techniques can be systematically analyzed through material feedback and designer interventions. The analyses show materials transition from being passive system inputs into active design agents shaping processes via intrinsic properties. The designer assumes a flexible mediator role, structuring feedback mechanisms, rather than acting as an absolute decision-maker. Ultimately, the research redefines material agency within design epistemology, offering new pathways for systematic inquiry.

Keywords: *Material Agency, Weaving, Analog Production, Computational Design, Making Grammar.*

1. Giriş

Tasarım süreci, çeşitli aktörlerin etkileşimiyle sürekli evrilen dinamik bir yapıya sahiptir. Tasarımcı, araçlar, malzemeler ve hesaplamalı sistemler gibi çeşitli unsurlarla etkileşim halinde çalışarak tasarımın nihai biçimini oluşturur. Tasarım etmenliği (design agency), bu süreçte hem insan hem de insan-olmayan aktörlerin nasıl rol aldığını ve tasarımın yönünü nasıl etkilediğini inceleyen bir kavramdır. Geleneksel tasarım yaklaşımlarında, etmenlik büyük ölçüde insan merkezli ele alınmış ve tasarımcı sürecin tek yönlendiricisi olarak kabul edilmiştir. Ancak güncel tasarım eleştirileri etmenlik kavramını yeniden sorgulamış ve Actor-Network Theory (Latour, 2005) ve posthümanist düşünce sistemleri (Bennett, 2010; Malafouris, 2013), etmenliği birden fazla aktör arasında dağıtan çok merkezli yapılara dikkat çekmiştir. "Etmenlik" artık yalnızca tasarımcıya atfedilmeyip, malzeme gibi insan-olmayan aktörler de kendi içsel özellikleri aracılığıyla sonuçların oluşumunda etkin rol oynayabilen etmenliğe sahip etkin özneler olarak tanınmaktadır (Bennett, 2010; Ingold, 2013; Malafouris, 2013). Pickering (1993), bilimsel üretimde dahi bu tür etmenliğin nasıl ortaya çıktığını açıklamıştır. Bu bağlamda, çalışmanın temel kavramlarından biri olan malzeme etmenliği, malzemelerin tasarım sürecini etkileme, diğer aktörlerle etkileşime girme ve tasarım sonucunu şekillendirme yeteneğini araştırmaktadır (Tholander vd., 2012; Aktaş, 2018).

Bu bağlamda, özellikle analog üretim pratikleri ve zanaat temelli üretim biçimleri, bu etkileşimi görünür kılmak için verimli bir zemin sunmaktadır. Analog üretimlerle yapma, tasarımcının malzeme ile doğrudan etkileşimine olanak sağlayarak, malzemenin tasarımın erken aşamalarından itibaren sürece aktif bir katılımcı olarak dahil olmasına katkı sağlamaktadır. “Yapmaya Yönelik Tasarım" (making for) yaklaşımı, çizimden fiziksel yapım sürecine geçişi temsil eden bir çerçeve sunar (Gürsoy, 2016). Bu yaklaşım, malzemelerin analog keşif sürecini öne çıkararak, tasarım fikrinin gelişimi, temsili ve fiziksel forma dönüşmesi aşamalarında malzemenin etmenliğine katkıda bulunur.

Aktaş ve Mäkelä (2019) malzemenin tasarımcı ile arasındaki ilişkiyi bir müzakere şeklinde yorumlar. Tasarımcı, malzemenin verdiği tepkileri yalnızca izlemekle kalmaz; bu tepkilere yanıt vererek kararlarını yeniden şekillendirir. Bu yaklaşım özellikle keçe yapımı gibi zanaat pratiklerinde belirginleşmektedir. Analog üretim teknikleriyle çalışan zanaatkârların çalışma biçimleri, araçlar, malzemeler ve teknikler arasındaki karmaşık çalışma ilişkilerini ortaya koymaktadır (Loh vd., 2016). Yaratıcı süreçte tasarımcılar, malzemenin davranışını etmenlik perspektifinden ele alarak malzemeleri daha iyi anlayabilir ve onlarla daha etkili bir şekilde iş birliği yapabilirler (Aktaş, 2019).

Malzeme etmenliği bağlamında yapılan deneysel çalışmalar, malzemenin davranışına duyarlı üretim biçimlerinin yalnızca teknik değil, aynı zamanda epistemolojik bir dönüşüm sunduğunu göstermektedir. Bu bağlamda, tasarım sürecinde bilgi üretimi, yalnızca tasarımcının zihinsel yönlendirmeleriyle değil; malzemenin tepkileriyle şekillenen etkileşimsel ilişkiler aracılığıyla da inşa edilmekte ve böylece bilgi üretiminin öznesi tekil değil, çoğul bir yapıya evrilmektedir. Bu dönüşüm, dijital araçlara dayalı hesaplamalı tasarım yaklaşımlarının dışında, analog ortamlarda da sistematik düşünme biçimleri geliştirilebileceğini ortaya koymaktadır. Bu dönüşüm, dijital araçlara dayalı hesaplamalı tasarım yaklaşımlarının dışında, analog ortamlarda da sistematik düşünme biçimleri geliştirilebileceğini ortaya koymaktadır.

Son yıllarda yapılan çalışmalar, tasarım süreçlerinde malzeme etmenliğinin önemini vurgulayarak, el becerisine dayalı üretim deneyimlerinin tasarım düşüncesini nasıl şekillendirdiğini ortaya koymaktadır (Nimkulrat, 2021; Aktaş, 2018). Ancak, bu analog tasarım pratiklerinin malzeme etmenliğini araştırmakta bir aracı olarak kullanılabileceğini tartışan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bu çalışma, zanaat pratiklerinin analog üretim yöntemleriyle hesaplamalı tasarım süreçlerine entegre edilmesiyle malzeme etmenliğini sistematik bir şekilde araştırmayı amaçlamaktadır. Araştırma, malzeme etkileşimine izin veren bir zanaat olan dokumayı hesaplamalı bir çerçevede, tasarımcıların analog iş akışları aracılığıyla malzemenin etmenliğiyle nasıl ilişki kurduğuna yeni bir açılım getirmeyi hedeflemektedir. Dokuma pratiği, malzemelerin birbirleriyle ve tasarımcıyla arasındaki dinamik ilişkiyi anlamak için bir arayüz olarak kullanılmaktadır. Deneysel prototipleme sürecinde elde edilen gözlemler, malzemeler arası etkileşimlerin belirli davranış örüntülerine dönüştüğü ve bu örüntülerin tasarım kararlarını yönlendiren kurallara evrildiği bir "yapma grameri" aracılığıyla temsil edilmiştir. Bu doğrultuda, çalışma hesaplamalı tasarımın dijital araçlarla sınırlı olmayan bir düşünsel çerçeveye kavuşabileceğini öne sürmekte; sezgisel zanaat pratikleriyle çalışan analog üretim biçimlerinin, algoritmik düşünceye özgü sistematiklik ve tekrarlanabilirlik potansiyeli taşıdığını ortaya koymaktadır.

2. Metodoloji

Bu çalışmada, deneysel tasarım sürecinin hem bilgi üretimi hem de analiz yöntemi olarak kullanıldığı Tasarım Yoluyla Araştırma (Research through Design – RtD) yaklaşımı benimsenmiştir (Frayling, 1993). RtD, "yaparak düşünme" anlayışıyla, özellikle analog üretim süreçlerinde bilgi üretimini doğrudan üretim eylemiyle ilişkilendiren ve tasarımcının sezgisel bilgisiyle birlikte malzemenin katkısını da araştırmaya dâhil eden bir yöntemdir.

Bu yaklaşım kapsamında, özellikle yansıtıcı analiz (reflective analysis) önemli bir rol oynamaktadır. Çalışmada uygulanan analiz süreci, Schön'ün (1983) tanımladığı reflection-on-action kavramı doğrultusunda yapılandırılmıştır. Reflection-on-action, üretim süreci tamamlandıktan sonra tasarımcının geriye dönük düşünmesini ve karar alma süreçlerini değerlendirmesini ifade eder. Bu yöntem, üretim sürecindeki deneyimlerin sonradan analiz edilerek bilgiye dönüştürülmesini sağlar.

Prototip üretim sürecinde, farklı malzeme kombinasyonları kullanılarak çeşitli dokuma örüntüleri üretilmiş ve üretim sırasında malzeme davranışları doğrudan gözlemlenmiştir. Her üretim aşamasında malzemenin verdiği tepkiler, tasarımcının sezgisel görüleriyle karşılık bulmuş ve bu etkileşimler sistemli bir şekilde kayıt altına alınmıştır. Bu aşamada elde edilen gözlemler doğrultusunda üretim sürecine ilişkin olası tasarımcı müdahaleleri yorumlanmış ve kural tabanlı denklemler geliştirilmiştir. Üretim süreci boyunca gerçekleşen tasarımcı-malzeme etkileşimleri, Schön'ün modeli (1983) doğrultusunda analitik bir çerçevede değerlendirilmiş ve sürecin kural tabanlı denklemleri üretilmiştir.

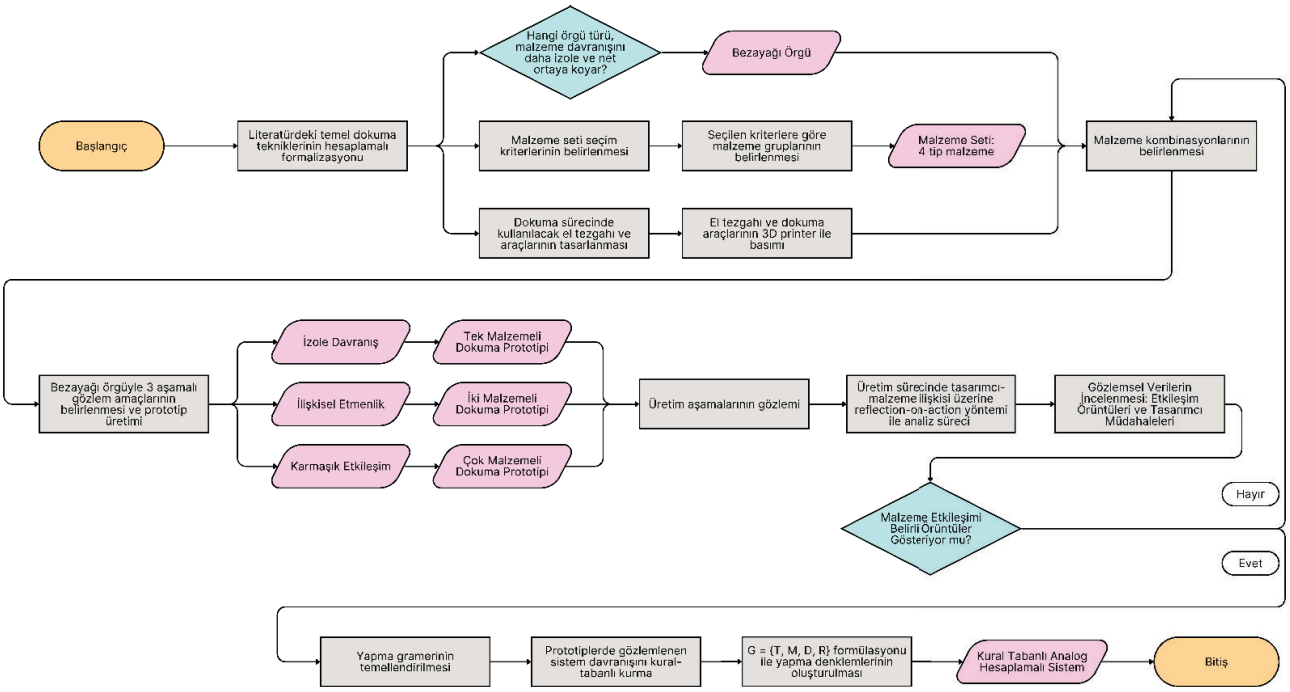
Bu bağlamda çalışmanın kuramsal temelini, biçim üretiminde görsel bir kurallar sistemi sunan "shape grammar" (Stiny ve Gips, 1972) yaklaşımını, üretim süreçlerine genişleten "making grammar" (Knight ve Stiny, 2015) kavramı oluşturmaktadır. Making grammar, insanların maddelerle (stuff) doğrudan algılayarak (sensing) ve eylemde bulunarak (doing) nesneler (things) ürettikleri süreçleri hem fiziksel hem algısal dönüşümlerle kural tabanlı bir sistem içerisinde hesaplayan bir yaklaşım sunar. Bu çerçevede belirtilen "stuff" bileşeni, fiziksel malzemelerin yanı sıra görsel tasarım malzemesini de ifade eden kapsayıcı bir kavram olup çalışmada "madde" olarak ele alınmıştır. Yapma grameri kuramı, üretim sürecini yalnızca sonuç odaklı bir etkinlik olmaktan çıkararak, yapımın kendisini hesaplamaya açan kuramsal bir çerçeveye dönüştürmektedir. Çalışma dört temel aşamada yapılandırılmıştır:

1) Dokuma Tekniklerinin Formalizasyonu
Dokuma eylemi, malzemenin davranışını görünür kılan ve aynı zamanda biçimlendiren bir etkileşim düzlemi olarak ele alınmıştır. Dolayısıyla ilk aşamada, temel dokuma tekniklerin incelenmesi ile bu tekniklerin farklı özellikler üretme potansiyeli değerlendirilmiştir.

2) Prototip Geliştirme Süreci
Malzemenin formal davranışlarını gözlemlemek amacıyla farklı fiziksel özelliklere ve davranış potansiyellerine sahip bir malzeme seti belirlendikten sonra çalışma için tasarlanıp 3B baskı ile üretilen bir el tezgâhında tek, ikili ve çok malzemeli kural tabanlı dokuma prototipleri geliştirilmiştir.

3) Veri Toplama ve Yansıtıcı Analiz
Her prototip, ortaya çıkan davranışlar ve malzemeler arası etkileşimleri değerlendirmek üzere kaydedilmiştir. Prototiplerin üretim süreci, yalnızca fiziksel çıktı üzerinden değil, aynı zamanda üretim anındaki tasarımcı–malzeme etkileşimi üzerinden yansıtıcı analiz yöntemiyle değerlendirilmiştir. Yansıtıcı analiz, malzemenin davranışlarının yalnızca biçimsel değil, karar verici süreci etkileyen bir bilgi üretimi biçimi olduğunu ortaya koymayı amaçlamıştır.

4) Kural Tabanlı Çerçevenin Oluşturulması
Üretim süreci yapma gramerinin çeşitli kurallarıyla formalize edilmiş, ardından elde edilen gözlemler kural-tabanlı denklemlere dönüştürülmüştür. Bu çerçevede, belirli malzeme eşleştirmelerinin gösterdiği davranış türleri, bu davranışlara karşılık olası tasarımcı müdahaleleri ve elde edilen form karakteristikleri sistematik bir kurallar dizisi olarak önerilmiştir. Bu sayede malzeme etmenliği dokuma temelli analog hesaplama çerçevesiyle sistemleştirilmiştir.



Şekil 1: Çalışmanın Metodolojisi

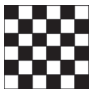
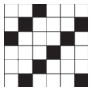
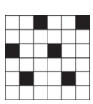
Bu çalışma doğrudan dijital hesaplama araçlarıyla çalışan bir üretim süreci sunmamakla birlikte, hesaplamalı tasarımın temelini oluşturan kural dizileri, parametreli karar sistemleri ve üretim mantığını analog bir bağlamda yeniden üretmektedir. Bu yönüyle, önerilen yapma grameri; hesaplamalı tasarım düşüncesinin araçsız, sezgisel ve zanaat temelli bir yansıması olarak değerlendirilebilir. Böylece tasarım sürecinde yalnızca dijital platformlara bağlı kalmadan, hesaplamalı düşünce biçimiyle çalışan alternatif üretim stratejilerinin geliştirilebileceği gösterilmektedir.

2.1. Farklı Dokuma Teknikleri

Dokuma yapıları, çözgü ve atkı ipliklerinin belirli kurallara göre birbirleriyle kurduğu bağlantılar üzerinden tanımlanır. Bu bağlamda, bezayağı (plain weave), dimi (twill weave) ve saten (satin weave), temel örgü tiplerini oluşturmakta ve diğer çoğu örgü tipi bu temel örgülerin türetilmesi ile oluşmaktadır (Adanur, 2001).

Tablo 1'de, temel örgülerin yapısal özelliklerine, mekanik davranışlarına ve bağlantı sıklığı ve yüzey etkilerine dair özet bir tablo sunulmuştur:

Tablo 1: Örgü Türleri ve Yapısal Özellikleri

Desen	Dokuma	Yapısal Dokuma Mekaniği	Mekanik Davranış	Bağlantı Sıklığı ve Yüzey Etkisi
	Bezayağı (Plain)	Her atkı ipliği bir çözgü ipliğinin üstünden ve altından düzenli geçiş yapar. (1:1 bağlantı).	Dengeli yüzey, yüksek mukavemet ve stabilite.	Yüksek bağlantı sıklığı; yoğun, sert ve dokulu yüzey oluşur.
	Dimi (Twill)	Atkı iplikleri çözgü iplikleriyle belirli bir kayma oranıyla çapraz bağlanır. Satırdan satıra belirli bir kaymayla diyagonal örgü deseni oluşturur.	Düşük rijitlik, artırılmış esneklik ve form alabilme.	Orta bağlantı sıklığı; diyagonal görünümlü, esnek ve daha yumuşak yüzey oluşturur.
	Saten (Satin)	Atkı veya çözgü iplikleri uzun atlamalarla ilerler. Bağlantı noktaları uzun yüzey atlamalarıyla sıçramalı şekilde dağılarak minimize edilir.	Düşük mukavemet, deformasyon eğilimi, zayıf bağlantı stabilitesi	Düşük bağlantı sıklığı; diğer dokumalara oranla daha kesintisiz ve homojen yüzey elde edilir.

Temel dokuma sistemleri kendi içlerinde oldukça farklı yapısal karakteristikler sergiler. Bezayağı, her atkı ipliğinin bir çözgü ipliğinin üstünden ve ardından altından geçmesiyle oluşan en temel bağlantı sistemidir. Dimi örgüde, atkı ve çözgü iplikleri çapraz şekilde ilerleyerek yüzeyde diyagonal bir yapı oluşturur. Saten örgü ise, ipliklerin daha uzun

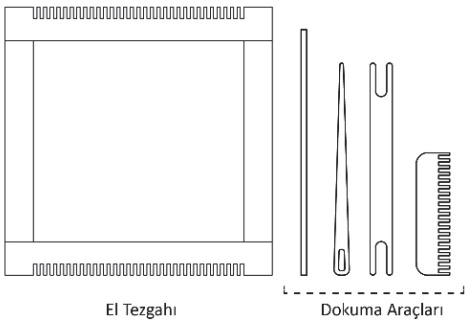
atlamalarla ilerlemesini sağlayarak düz, pürüzsüz ve daha parlak yüzeyler elde edilmesine olanak tanır. Bu temel yapılar üzerine geliştirilen türev sistemler, daha karmaşık yüzey davranışları ve performans çeşitliliği sunar.

Bu değerlendirme, üretilecek prototipler için teorik bir davranış haritası işlevi görmektedir. Farklı dokuma tekniklerinin çözümlenmesi, yapma gramerinin ilk bileşenini kurarak, mimari form üretiminde karşılaşılan çeşitli tasarımsal değişkenlerin ön değerlendirmesini sağlamıştır. Böylece, analog teknikler üzerinden geliştirilen bu analiz, ilerleyen fiziksel üretim aşamalarında gözlemsel olarak test edilecek davranış senaryolarına kuramsal zemin kurmuştur.

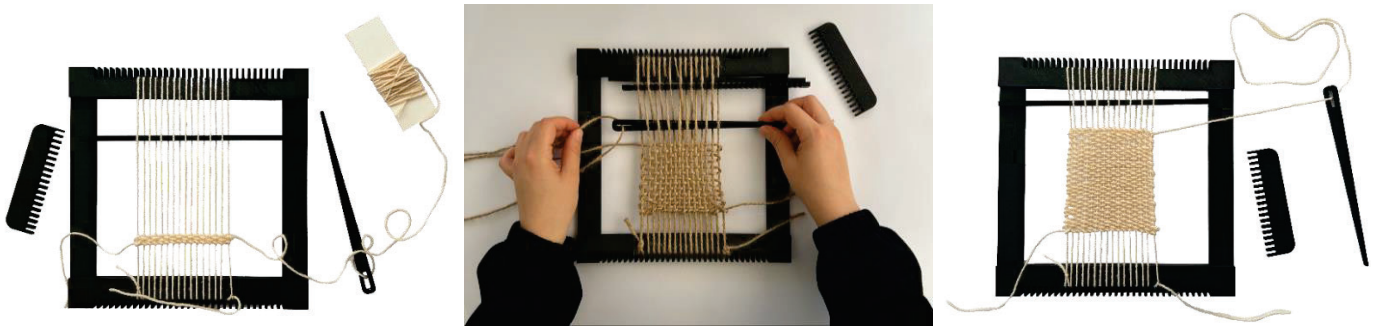
Çalışma kapsamında prototip üretiminde bezayağı örgü kullanılmasına karar verilmiştir. Bezayağı örgü, çözgü ve atkı ipliklerinin her geçişte birbirlerinin üzerinden ve altından sıralı biçimde ilerlediği en temel ve dengeli dokuma yapısıdır. Bu örgü sisteminin homojen yapısı, malzeme etkileşimlerini doğrudan ve yalın bir biçimde gözlemleme olanağı tanımakta ve böylece malzemeye ait davranışların örgüden bağımsız olarak daha net ayırt edilmesi mümkün olmaktadır. Böylece örgü tipinden kaynaklı karmaşık etkilerden arınarak, malzemenin yapıya kattığı etkiler daha net ve izole biçimde değerlendirilebilmektedir. Bu seçim, hem gözlem sürecinin kontrol edilebilirliğini artırmakta hem de gramer sisteminin üretimsel doğruluğunu desteklemektedir.

2.2. Dokuma Altyapısı: El Tezgâhı Tasarımı ve Malzeme Setinin Belirlenmesi

Deneysel prototiplerin üretimi için tasarlanan el tezgâhı, 24x24 cm boyutlarında 3D yazıcı ile üretilmiş bir çerçeveden oluşmaktadır. Tasarımda çözgü ipliklerinin düzgün yerleşebilmesi amacıyla kenarlarında 3 mm genişliğinde ve 10 mm derinliğinde çentikler oluşturulmuştur (**Şekil 2**)**.** Prototip geliştirme süreci, kullanılan el tezgâhı sayesinde sezgisel karar alma anlarını ve malzeme temelli geri bildirimleri önceleyen analog bir üretim yaklaşımıyla yapılandırılmıştır (**Şekil 3**).



Şekil 2: Çalışma kapsamında üretilen el tezgâhı (handloom) ve araçları



Şekil 3: Örnek Prototip Geliştirme Süreci

Çalışmada kullanılan malzeme seti, biçim oluşturma kapasitesine göre dört temel kategoriye ayrılarak sınıflandırılmıştır (**Tablo 2**). Bu sınıflama, malzemelerin yalnızca fiziksel özelliklerini değil, aynı zamanda üretim süreci boyunca tasarım kararlarını nasıl şekillendirdiğini anlamaya yöneliktir. Her grup, farklı bir davranış biçimi ve üretim senaryosu oluşturarak yapma gramerinin gelişiminde belirleyici rol oynamaktadır.

Tablo 2: Malzeme Seti Sınıflandırması

Malzeme Grubu	Özellikler	Temsilci Malzeme
Form-İzleyen (Elastik)	Esnek, kontrolsüz biçimlenen, yönlendirilmeye açık	Pamuk
Form-Dirençli (Rijit)	Biçimi sabit tutan, yönlendiren, deformasyona karşı koyan	Kalın tel
Form-Hatırlayan (Yarı-rijit)	Biçim alıp geri dönen, spiral veya yönsel deformasyonlar üreten	İnce tel
Form-Bozucu (Lifli / Kaygan)	Sürtünen, çözülen, yapısal belirsizlik oluşturan	Jüt ip

Bu gruplandırma, üretim sürecindeki gözlemlerin sistematik olarak analiz edilmesine olanak sağlamış ve her malzemenin belirli davranış tiplerini temsil eden birer aktör olarak işlev görmesine imkân tanımıştır. Böylece tasarımcı müdahalesini tetikleyen durumlar ile malzemenin kendiliğinden yönlendirdiği formlar birbirinden ayırt edilebilir hale gelmiş; yapma grameri içerisindeki kurallar bu malzeme etkileşimlerine dayalı olarak yapılandırılmıştır.

3. Bulgular ve Değerlendirme

Bu bölümde, analog dokuma pratiği yoluyla gerçekleştirilen deneysel çalışmanın bulguları sunulmakta ve değerlendirilerek yorumlanmaktadır. Dokuma pratiği yapma grameri ile formalize edilerek sistematik bir gözlem düzlemine geçiş sağlanmıştır. Ardından, prototipleme süreci boyunca gözlemlenen malzeme davranışlarına bağlı olarak geliştirilen kural-tabanlı yapma denklemleri üzerinden malzeme etmenliği değerlendirilmiştir.

3.1. Örnek Vaka Prototip Analizleri

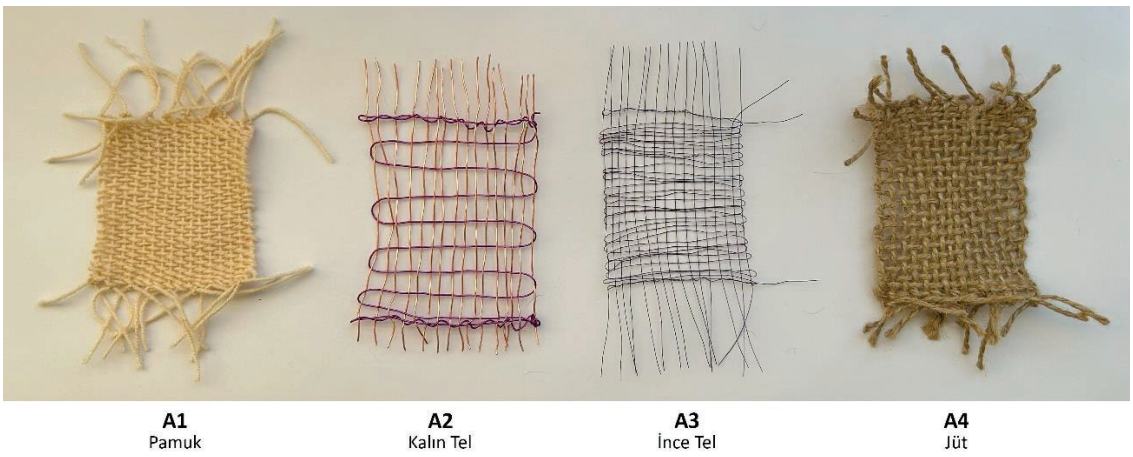
Bu çalışmada dokuma prototipleri, malzeme etmenliğini sistematik olarak analiz edebilmek amacıyla üç aşamalı bir prototipleme stratejisi doğrultusunda yapılandırılmıştır.

3.1.1. Tek Malzemeli Referans Prototipler

İlk aşamada, tek malzemeli prototipler ile her bir malzemenin yapısal tepkileri izole şekilde incelenmiş; bu bağlamda farklı özelliklere sahip tekil malzemeler değerlendirilmiştir (**Tablo 3**). Bu yaklaşım, her malzemenin bağımsız davranışını gözlemleyerek referans veriler oluşturmayı amaçlamıştır.

Tablo 3: Tek Malzemeli Referans Prototipleri

Prototip	Malzeme	Grup	Gözlem
A1	Pamuk	Form-izleyen	Elastik, dengeli yüzey, esnek dağılım
A2	Kalın tel	Form-dirençli	Sıkı yapı, yapıda sıkışma, biçimi sabitleme
A3	İnce tel	Form-hatırlayan	Geri tepme, yönlü deformasyon, spiral eğilim
A4	Jüt	Form-bozucu	Yüksek sürtünme, bağlantı direnci, yüzeyde kabarma eğilimi



Şekil 4: Tek Malzemeli Referans Prototipleri

A1 prototipinde kullanılan pamuk ipliği, esnek ve yüzeyle uyumlu yapısı sayesinde dokuma boyunca dengeli bir dağılım sağlamıştır. Bu durum, pamuk ipliğin hem yapısal denge hem de uygulama kolaylığı açısından karşılaştırmalı analizlerde referans malzeme olarak seçilmesine olanak tanımıştır. Malzemenin form-izleyen karakteri, prototip boyunca

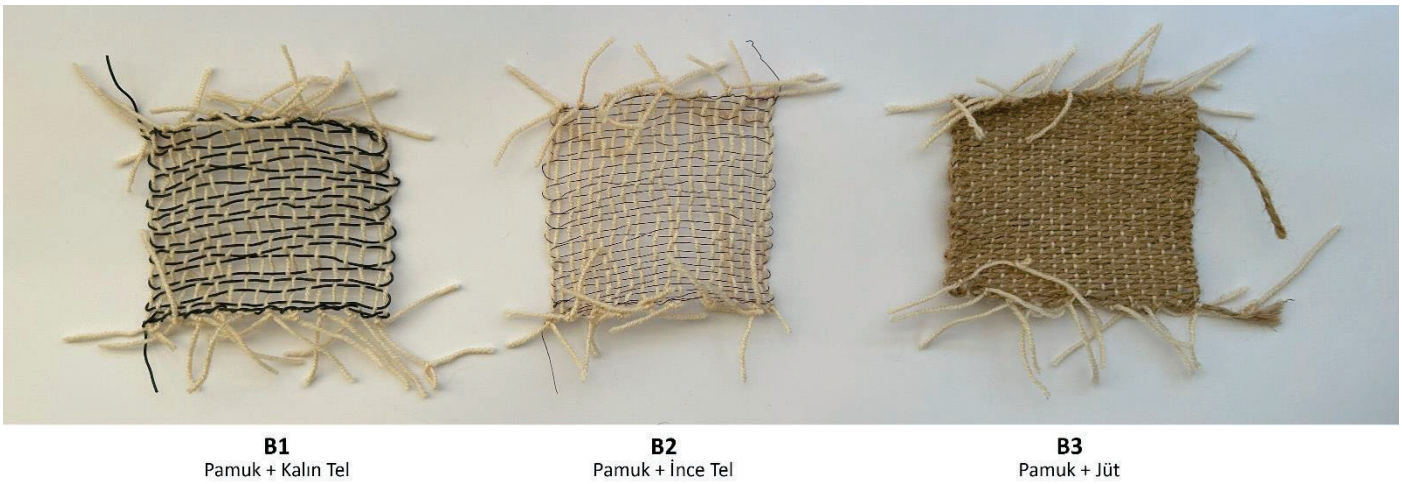
deformasyon üretmeden örgü sistemine uyum göstermiştir. A2 prototipinde yer alan kalın tel, örgü üzerinde belirgin bir baskı ve yönlendirme etkisi oluşturmuştur. Malzemenin rijitliği, atkı ipliklerinin örgü boyunca ilerlemesini sınırlamış; bu durum örgüde yapıdaki sıkışma, deformasyon ve çizgisel yönlenme gibi davranışlarla kendini göstermiştir. Telin sertliği, düğüm noktalarında yüksek direnç oluşturarak atkı sıklığını azaltmış ve dokuma yüzeyinde gerilim odaklı deformasyon bölgeleri ortaya çıkarmıştır. A3 prototipi, ince telin form-hatırlayan yapısı nedeniyle, özellikle örgü sırasında yönlü deformasyonlar üretmiştir. Telin doğal olarak spiral bir eğilim göstermesi, yüzeyde döngüsel bükülmeler ve lokal deformasyon alanları oluşturmuştur. Bu özellik, malzemenin sadece pasif bir taşıyıcı değil, aynı zamanda biçimlendirici bir aktör olarak değerlendirilmesini mümkün kılar. A4 prototipinde kullanılan jüt iplik ise, lifli ve yüksek sürtünmeli yapısıyla dikkat çekmiştir. Özellikle bağlantı noktalarında yoğun yüzey direnci oluşturarak örgü sürecinde ilerlemeyi zorlaştırmış, çözgü-atkı ilişkisini kesintiye uğratmıştır. Bu durum, yüzeyde düzensiz kabarmalar ve düğüm noktalarında deformasyon birikimi ile sonuçlanmıştır. Jüt ipliğin bu yapısal direnci, tasarımcının müdahalesini gerektiren yüksek etmenlikli bir senaryo sunarak denklem içinde kuralları zorlayıcı bir malzeme davranışına işaret etmiştir.

3.1.2. İkili Kontrollü Prototipler

İkinci aşamada, ikili kombinasyonlar ile malzemeler arası etkileşimler test edilmiştir (**Tablo 4**). Bu doğrultuda çözgü malzemesi sabit tutularak, değişken atkı malzemeleriyle karşılaştırmalı prototipler üretilmiştir. Bu kombinasyonlar, malzeme özelliklerinin karşılıklı etkileşimini değerlendirmeyi mümkün kılmıştır.

Tablo 4: İkili Kontrollü Prototipler

Prototip	Çözgü	Atkı	Gözlem
B1	Pamuk	Kalın tel	Rijit atkının elastik çözgü üzerindeki baskısı sonucu eksenel deformasyon ve yönlenmiş sıkışma
B2	Pamuk	İnce Tel	Telin form-hatırlayan doğası, çözgü ekseninde deformasyonlar
B3	Pamuk	Jüt	Lifli ve sert atkı nedeniyle yüzeyde düzensiz kabarma ve yerel bozulmalar



Şekil 5: İkili Kontrollü Prototipler

B1 prototipinde, elastik karakterli pamuk çözgü ile rijit yapılı kalın telin etkileşimi sonucunda, çözgü hattı boyunca yönlenmiş sıkışma ve eksenel deformasyonlar gözlemlenmiştir. Rijit atkının örgü üzerinde oluşturduğu baskı hem atkıların sıklığını azaltmış hem de örgünün lineer yönelimini belirginleştirmiştir. Bu durum, rijit malzemelerin örgü üzerindeki yapı-yönlendirme potansiyelini göstermesi bakımından önemlidir. Aynı zamanda tasarımcının müdahalesini sınırlayan malzeme baskısına örnek oluşturur. B2 prototipinde, çözgü yine pamuk olarak sabit kalmış; ancak atkı olarak bu kez form-hatırlayan karakterli ince tel tercih edilmiştir. Telin yüzeye uyguladığı spiral deformasyon eğilimi, örgü boyunca doğrusal olmayan ve yönsüz deformasyonlara neden olmuştur. Bu yapısal sonuç, yüzeyin kontrolsüz bükülmelere açık hâle geldiğini göstermektedir. Bu prototipte, örgü geometrisi malzemenin davranışına göre şekillenmiş; yani form, malzeme kaynaklı olarak evrimleşmiştir. B1 ve B2 prototiplerinde tellerin formal hafızaya sahip olması ve pamuğa göre daha rijit olmaları sebebiyle ortak olarak yüzeyde atkı doğrultusunda kabuk hareketi gözlemlenmiştir. B3 prototipinde, çözgü yine pamuk, atkı ise yüksek sürtünmeli, lifli yapısıyla bilinen jüt iplik olarak belirlenmiştir. Jütün düzensiz yüzey ve sürtünmeli ve sabitlenmesi zor yapısı, çözgü ipliklerinin arasına girmesini

zorlaştırarak örgüde bağlantı sorunlarına neden olmuştur. Bu da jüt gibi malzemelerin örgü homojenliğini bozarak tasarımcının müdahale ihtiyacını artırabileceğini göstermektedir.

3.1.3. Üçlü/Çoklu Prototip

Son aşamada geliştirilen üçlü prototip, farklı form davranışlarına sahip malzemelerin aynı örgü yapısı içinde bir araya getirilerek karmaşık etkileşim senaryolarının gözlemlenmesini amaçlamıştır. Bu üretim biçimi, malzemeler arasındaki etmenlik ilişkilerinin yalnızca ikili düzlemde değil, çok aktörlü bir sistematik içinde nasıl işlediğini değerlendirmek için önemli bir zemin oluşturur. Üçlü kombinasyonlarda, her bir malzemenin yapısal karakterine bağlı olarak farklı düzeyde etkileşimler oluşmuş ve bu etkileşimler, örgünün yönelimi, yüzey deformasyonu ve bağlantı düzeni üzerinde eşzamanlı etkiler yaratmıştır. Bu durum, tasarımcının müdahalesini zorunlu kılan yüksek etmenlikli durumların oluşmasına neden olmuştur. Aynı zamanda bu tür prototipler, birden fazla kuralın eşzamanlı test edilmesine olanak sağlamaktadır

Tablo 5: Üçlü/Çoklu Prototip

Prototip	Çözgü	Atkı 1	Atkı 2	Atkı 3	Gözlem
C	Pamuk	Kalın Tel	Jüt	İnce Tel	Rijit (kalın tel) etki yapısal stabilite sağlarken ve spiral (ince tel) etki uçlarda yoğun deformasyon üretmiştir. Merkezde yer alan jüt malzeme ise bağlantı zayıflığına ve kabarmaya neden olmuştur. Bu çoklu etkileşim yüzeyde dengesiz bir yapı oluşturmuştur.

Şekil 6: Üçlü/Çoklu Prototip

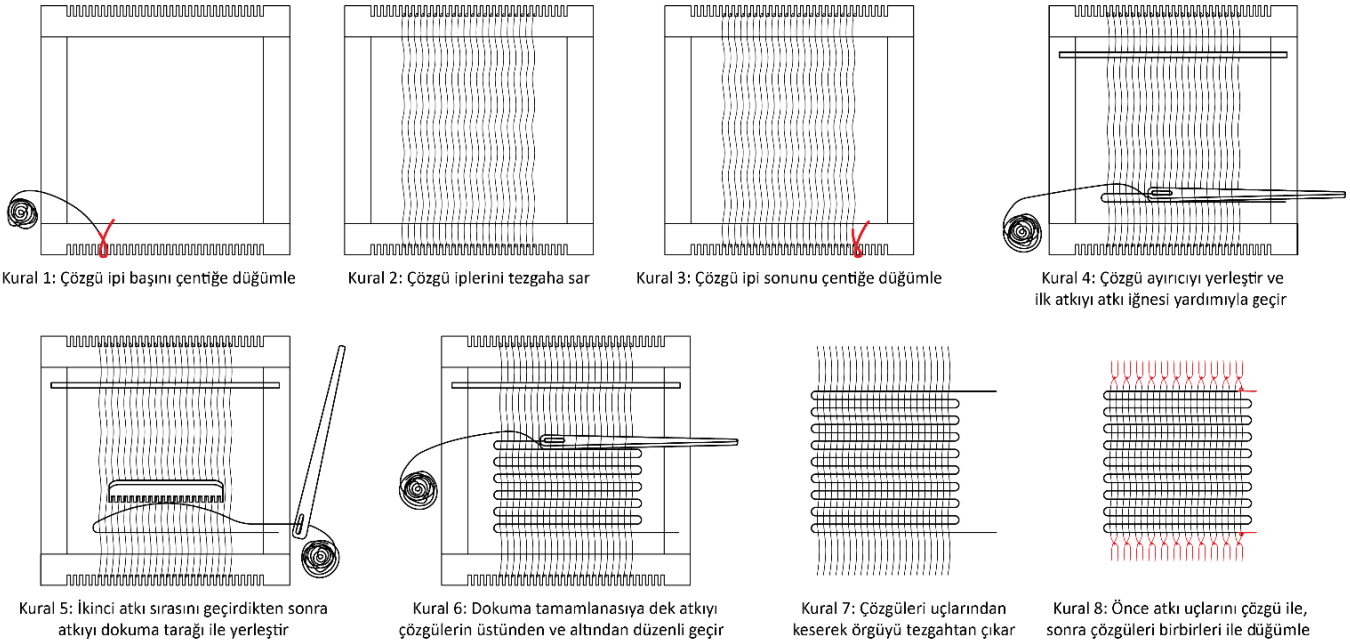
C prototipinde form-izleyen karaktere sahip pamuk çözgüye karşılık üç farklı atkı malzemesi kullanılmıştır (**Tablo 5**). Bu kombinasyon, malzeme karakterlerinin mekânsal olarak bölgelere dağıtıldığı bir üretim senaryosu sunmaktadır. Kalın telin örgü yüzeyinin bir yanında yer alması, çözgü ipliklerini sıkıştırarak lineer deformasyon ve yönsel sıkışma yaratırken aynı zamanda kendi doğrultusunda yapısal eğilim de göstermiştir. Diğer uçta kullanılan ince tel, kendi eğilimi doğrultusunda spiral ve yönsüz deformasyonlar üretmiş, örgüde farklı bir gerginlik tipi oluşturmuştur. Merkezde yer alan jüt ise lifli yapısı nedeniyle bağlantı noktalarında direnç oluşturmuş, bu da hem kalın hem ince telin etkilerinin kırılmasına ve yüzeyde düzensiz kabarmalara neden olmuştur. Bu üç yönlü müdahale, örgüde bölgesel gerilim farkları, yön değiştiren deformasyon alanları ve kontrolsüz deformasyon merkezleri ortaya çıkarmıştır. Bu durumda tasarımcının yalnızca bağlantı düzenini değil, malzeme yerleşimini de stratejik olarak düzenlemesi gerekmiştir. Prototip hem yüksek düzeyde müdahale ihtiyacı hem de lokal karar anları içeren bir örnek teşkil etmektedir.

Bu üç aşamalı prototipleme yaklaşımı, malzeme etmenliğini karşılaştırmalı gözlemler yoluyla sistematik olarak açığa çıkarmayı hedeflemektedir. Aynı zamanda, belirli davranışları tetikleyen malzeme özelliklerinin tasarım sürecindeki karar anlarını nasıl etkilediği de değerlendirilmektedir. Böylece her bir üretim yalnızca bir dokuma formu değil, tasarımcının müdahalesiyle biçimlenen bir üretim senaryosu olarak okunabilir hâle gelmektedir.

3.2. Analiz ve Sentez: Gözlemlerle Kurulan Kural-Tabanlı Yapma Grameri ve Denklemi

Bu çalışma, analog dokuma pratiğini hesaplamalı tasarım düşüncesiyle buluşturan özgün bir çerçeve ortaya koyarak, malzeme etmenliğini kural-temelli bir yapma grameri ve denklemi aracılığıyla tanımlamaktadır. Üretim aşamasından sistematik analiz aşamasına geçmek için öncelikle dokuma süreci kural-temelli yapma grameri temellendirilmiştir ve formalize edilmiştir. Bu doğrultuda üretim süreci aşağıdaki temel bileşenlerle kurgulanmıştır:

- Madde: Pamuk, kalın tel, ince tel, jüt
- Nesne: Bezayağı dokuma birimleri, prototip yüzey segmentleri
- Yapma: İplik yerleştirme, sıkma, yön değiştirme gibi dokuma eylemleri
- Algılama: Malzeme gerginliği, kabarma, spiral deformasyon gibi fiziksel tepkilerin algılanması



Şekil 7: Dokuma Sürecinin Formalizasyonu

Şekil 7'de temellendirildiği gibi dokuma süreci; tasarımcının malzeme ile doğrudan ilişki kurmasını sağlayarak, malzemenin prototip üretim sürecinde gösterdiği davranışları algılamasına ve müdahalede bulunmasına olanak sağlamaktadır. Bu çerçevede tasarımcı her algısal geri bildirim doğrultusunda yeni müdahaleler geliştirerek süreci yönlendirebilmektedir. Analog dokuma pratiği, bu çok katmanlı yapıda yalnızca biçimsel bir sonuç üretmekle kalmayıp, aynı zamanda malzeme–tasarımcı ilişkisini sürekli yeniden yapılandıran bir hesaplama alanı oluşturmaktadır. Devamında geliştirilen yapma denklemi ise, yalnızca biçimsel çıktıları değil; bu çıktılara yol açan malzeme davranışlarını ve tasarımcı görülerini kapsayan katmanlı bir analiz sistematiği sunmaktadır. Bu sistematik yapı, analog üretim süreçlerinde hesaplamalı düşüncenin nasıl işler hâle getirilebileceğini göstermektedir. Örnek olarak seçilen iki prototip üretim süreci aşağıdaki sembolik denklem bileşenleri ile tanımlanmıştır:

$G = \{T,M,D,R\}$

- T: Dokuma tipi (örn. bezayağı),
- M: Malzeme seti (çözgü ve atkı),
- D: Malzeme davranışları (elastikiyet, rijitlik, deformasyon yönelimi),
- R: Olası tasarımcı müdahaleleri (geçiş sıklığı ayarı ρ, gerginlik ε vb.)

Her bir ΔR müdahalesi, üretim süreci boyunca gözlemlenen malzeme davranışlarına bağlı koşul-tetiklemeli bir karar yapısı içinde seçilmiştir. Tasarımcı, malzemenin oluşturduğu deformasyon yönelimi, gerginlik değişimi veya bağlantı zayıflığı gibi belirli gözlemler doğrultusunda müdahale tipini belirlemektedir. Böylece yapma grameri yalnızca serbest kural uygulamaları değil, gözlemlenen duruma özgü sistematik müdahaleler içermektedir.

- **Prototip B1: Pamuk (çözgü) + Kalın Tel (atkı)**

Davranış: Form izleyen + form dirençli çatışması

Yapma Grameri Denklemi:
G(B1) = {
T = Bezayağı Örgü

M_Çözgü = pamuk ($f_1(x)$),
M_Atkı = tel ($f_2(y)$),

D_{B1}: $f_2(y) > f_1(x)$ → yönsel sıkıştırma ve çözgü çizgisi deformasyonu,

R_{B1} (ΔR_{B1}):
ΔR_{B1} = {
$R_1 = f_1(x)$ gerginliği arttırılır ($\varepsilon \uparrow$),
$R_2 = f_2(x)$ geçiş sıklığı arttırılır ($\rho_x \uparrow$),
$R_3 = f_2(y)$ geçiş sıklığı seyreltilir ($\rho_y \downarrow$),},

Sonuç:
$f_1(x) + f_2(y) + \Delta R_{B1}$ → dengelenmiş yönlenme, kontrollü deformasyon
}

- **Prototip C: Pamuk (çözgü) + Kalın Tel (atkı) + Jüt (atkı) + İnce Tel (atkı)**

Davranış: Asimetrik çoklu yüzey davranışları

Yapma Grameri Denklemi:
G(C)= {
T = Bezayağı Örgü

M_Çözgü = pamuk ($f_1(x)$)
$M_Atkı_1$ = kalın tel ($f_3(z)$) → yüzeyin sol bölgesi
$M_Atkı_2$ = ince tel ($f_4(w)$) → yüzeyin sağ bölgesi
$M_Atkı_3$ = jüt ($f_5(q)$) → yüzeyin merkez bölgesi

D_C: $(f_3(z) + f_4(w)) > f_5(q)$ → kenarlarda yönlenmiş deformasyon, merkezde kabarma ve bağlantı zayıflığı

R_C (ΔR_C):
ΔR_C = {
R_4 = bağlantı sıklığı merkezde artırılır ($\rho_c \uparrow$),
R_5 = uç bölgelerde atkı sıklığı azaltılır ($\rho_u \downarrow$),
R_6 = atkı geçiş sırası düzenlenir ($f_2 \rightarrow f_4 \rightarrow f_3$)
},

Sonuç:
$f_1(x) + f_3(z) + f_4(w) + f_5(q) + \Delta R_C$ → dengelenmiş kenar-gerilim yapısı, müdahale gerektiren merkez alan
}

Bu formülasyon, her prototipin bir tür karar ağacı olarak ele alınmasını sağlar; burada malzeme davranışları, tasarımcının yapma sürecinde belirli müdahale kararlarını tetiklemekte, bu müdahaleler ise çıktının yapısal örüntüsünü şekillendirmektedir. B1 prototipinde, pamuk (form-izleyen) çözgü ile kalın telin (form-dirençli) oluşturduğu etkileşim, çözgü ekseninde çizgisel deformasyon ve sıkışma üretmiştir. Bu durum: $f_2(y) > f_1(x) \Rightarrow$ yönsel deformasyon şeklinde ifade edilmiştir. Bu davranışa karşılık olarak geliştirilen tasarımcı müdahaleleri ise çözgü gerginliğini arttırma ($\varepsilon \uparrow$), çözgü sıklığını arttırma ($\rho \uparrow$) veya atkı sıklığını azaltma ($\rho \downarrow$) gibi kararlarla sistemi yeniden dengelemiştir. Böylece, malzeme yalnızca pasif bir unsur değil, sistemin kurallarını aktif olarak belirleyen bir etmen olarak konumlanmıştır. C prototipi çoklu malzeme içerdiği için her bir malzemenin sistem üzerindeki etkisi bir parametre olarak değerlendirilmiş, davranış alanları belirlenmiş ve bu alanlar üzerinden bölgesel müdahale algoritmaları önerilmiştir. Bu çoklu müdahale yapısı, tasarımcının sürecin içinden kural üreten bir aktör olduğunu göstermektedir. Böylece ortaya çıkan denklem yalnızca üretimi betimleyen değil, üretimi yöneten ve yeniden yapılandırılabilir kılan bir hesaplamalı kurguya dönüşmektedir.

4. Sonuç

Bu çalışma, analog dokuma pratiği ile geliştirilen deneysel prototipler aracılığıyla, hesaplamalı tasarım düşüncesi bağlamında malzeme etmenliğinin sistematik olarak araştırılabileceğini ortaya koymuştur. Dokuma sürecindeki liflerin döngüsel ve birbirine geçmeli yapısı, çeşitli malzemelerin etkileşimini ve gözlemini mümkün kılmıştır. Dokuma, yalnızca fiziksel bir üretim yöntemi değil, aynı zamanda tasarım sürecinde malzemenin etkin bir aktör olarak rol aldığı ilişkisel bir düşünme alanı ve bilgi üretim düzlemi olarak ele alınmıştır. Prototipleme süreci üç aşamalı olarak yapılandırılmış ve elde edilen gözlemler, her bir malzemenin yalnızca fiziksel değil, karar süreçlerini etkileyen bir aktör olduğunu ortaya koymuştur. Özelliklerine göre sınıflandırılan malzeme tipleri, dokuma sisteminde farklı yapma denklemlerini tetiklemiş ve bu süreçlerin tasarımcı müdahalesiyle yeniden düzenlenebilir olduğu gösterilmiştir. Böylece malzeme davranışı, gramerin pasif girdisi değil, kural üretiminin doğrudan kaynağı olarak konumlanmıştır. Tasarımcı ise bu etkileşimlerin ortasında karar verici değil, kararları biçimlendiren geri-beslemeli bir yapı geliştirici olarak yeniden tanımlanmıştır.

Çalışmada üretilen yapma grameri ve denklemi, tasarım sürecinin içsel bilgi üretimini görünür ve kodlanabilir hâle getirmiştir. Bu durum, hesaplamalı tasarım düşüncesinin yalnızca dijital araçlarla değil, analog üretim süreçlerinin davranışsal analizi ve kural-temelli soyutlaması yoluyla da gerçekleştirilebileceğini ortaya koymuştur. Dokuma pratiği bu bağlamda algoritmik düşünmenin analog bir yansıması olarak değerlendirilmiş; geliştirilen sistematik yaklaşım, form üretiminin geleneksel teknikler üzerinden de mantıksal ve hesaplamalı biçimde çeşitlenebileceğini göstermiştir. Tasarımcı, malzeme ile doğrudan etkileşim kurarak malzemenin içsel özelliklerine dair içgörüler geliştirmiş ve sezgisel müdahalelerle kurallar üretebilmiş; üretim süreci süreç odaklı, geri beslemeli ve tekrarlanabilir bir sistem haline gelmiştir. Çalışmada benimsenen uygulamalı üretim sürecinin tekrarlamalı doğası ise, malzemelerin tasarımcıya sürekli bir "geri bildirimde bulunmasını" sağlayarak, malzemelerin tasarım kararlarını etkileyerek alternatif yönelimler sunmasına olanak tanır. Bu süreçte, dokuma stratejilerinde veya malzeme seçimlerinde yapılan her ayarlama, insan yönelimselliği ile malzemenin etmenliği arasında bir ilişki kurar. Araştırma sonuçları, farklı malzemelerin dokuma sürecindeki davranışlarını inceleyerek, malzeme seçiminin tasarım kararları üzerindeki belirleyici rolünü vurgulamıştır.

Malzeme davranışlarını analiz edilebilir hale getiren bir gözlem sistematiği sunması, malzeme etkileşimlerini kural-temelli üretim stratejilerine dönüştüren bir gramer yaklaşımı önermesi, analog dokuma pratiğini, hesaplamalı düşünme biçimiyle buluşturan bir tasarım araştırma yöntemi geliştirmesi çalışmanın özgün katkılarıdır. Gelecekte bu yaklaşımın, farklı zanaat teknikleri ve malzeme çeşitlerini de kapsayacak biçimde genişletilmesi ve kural temelli çerçevenin diğer uygulama alanlarına ölçeklendirilmesi mümkündür. Ayrıca analog hesaplamaların, zanaata dayalı geliştirilen ve bilgilendirilen dijital iş akışlarını güçlendirebileceği fikri de gelecekteki araştırmalar için önemli bir odak noktası sunmaktadır. Sonuç olarak bu makale, zanaat ile hesaplamalı tasarım arasında bir diyalog önererek, malzeme etmenliğini hem fiziksel hem kavramsal bir üretim düzlemine taşımakta; bu etkileşimi sistemleştiren yapma grameri üzerinden, tasarımcıyı süreç boyunca yeniden konumlandıran bir yaklaşım sunmaktadır.

KAYNAKLAR

Adanur, S. (2001). *Handbook of weaving*. Technomic Publ.

Aktaş, B. M. (2018). Material as the Co-designer: Exploring a new practice in the nature and at the studio. *Research in Arts and Education*, *2018*(3), 332-348. https://doi.org/10.54916/rae.118873

Aktaş, B. M. (2019). Using wool's agency to design and make felted artefacts. *RUUKKU - Studies in Artistic Research*, *10*. https://doi.org/10.22501/ruu.453632

Aktaş, B., & Mäkelä, M. (2019). Negotiation between the maker and material: Observations on material ınteractions in felting studio. *International Journal of Design*, *13*(2), 55-67.

Bennett, J. (2010). *Vibrant matter: A political ecology of things*. Duke University Press. https://doi.org/10.1215/9780822391623

Frayling, C. (1993). Research in art and design. *Royal College of Art and Design Papers 1*(1).

Ingold, T. (2010). The textility of making. *Cambridge Journal of Economics*, *34*(1), 91-102. https://doi.org/10.1093/cje/bep042

Knight, T. W., & Stiny, G. (2015). Making grammars: From computing with shapes to computing with things. *Design Studies, 41*, 8–28. https://doi.org/10.1016/j.destud.2015.08.006

Latour, B. (2007). *Reassembling the social: An introduction to Actor-Network-Theory*. Oxford University Press.

Loh, P., Burry, J., & Wagenfeld, M. (2016). Reconsidering Pye's theory of making through digital craft practice: A theoretical framework towards continuous designing. *Craft Research*, *7*(2), 187-206. https://doi.org/10.1386/crre.7.2.187_1

Malafouris, L. (2013). *How things shape the mind: A theory of material engagement*. MIT Press.

Nimkulrat, N. (2021). Experiential craft: Knowing through analog and digital materials experience. In O. Pedgley, V. Rognoli & E. Karana (Eds.), *Materials Experience 2*, pp. 33–52. Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819244-3.00026-0

Pickering, A. (1993). The mangle of practice: Agency and emergence in the sociology of science. *American Journal of Sociology, 99*(3), 559–589.

Schön, D. A. (1983). *The reflective practitioner: How professionals think in action*. Basic Books.

Stiny, G., & Gips, J. (1972). Shape grammars and the generative specification of painting and sculpture. In O. R. Petrocelli (Ed.), *The best computer papers of 1971* (pp. 125–135). Auerbach.

Tholander, J., Normark, M., & Rossitto, C. (2012). Understanding agency in interaction design materials. In *CHI '12: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM. https://doi.org/10.1145/2207676.2208417

MSTAS 2025 MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Hesaplamalı Tasarım Araçlarıyla Mukarnaslı Kubbelerdeki Zanaat ve Geometri İlişkisinin İncelenmesi

Enes Karakaya[1]; Mine Özkar[2]
[1,2]İstanbul Teknik Üniversitesi
[1]karakayae18@itu.edu.tr; [2]ozkar@itu.edu.tr

Özet

Hesaplamalı tasarım araçları kural tabanlı zanaati anlamaya, yorumlamaya ve yapım sürecindeki örtük bilgileri açığa çıkarmaya katkı sağlamaktadır. Bu araçlar, arkasında belirli birtakım kuralların olduğunu sezdiğimiz işlerdeki yapım ve geometri ilişkisini yalnızca anlamamızı sağlamamakta ayrıca bu ilişkiyi daha açık bir şekilde ifade etmemize de imkan tanımaktadır. Mimaride yapım-geometri ilişkisi bölgesel yapım tekniklerine, malzemeye, yapıya ve çeşitli etmenlere bağlı olarak şekillenmekte ve çeşitlenmektedir. Bu çalışma kapsamında Doğu Anadolu'daki 13-14. yüzyıl yapılarında bulunan taş mukarnaslı kubbelerde yapım pratiği ve bununla ilişkili geometri ele alınmıştır. Bu örneklerdeki stereotomik üretimler; geometrik kurallar ve bu kuralların malzeme, biçim ve strüktürle kurduğu ilişki bağlamında değerlendirilmiştir. Her ne kadar üç boyuttaki gelişimleri farklılıklar gösterse de plan düzlemindeki ortaklık bu yapılardaki geometrinin kurucu rolünü göstermektedir. Ayrıca bu örneklere tekil yapılar olarak bakıldığında her birinde birtakım farklılıklar görülse de üç boyutlu geometrik biçimlerinin arkasındaki mantık aynıdır. Bu anlamda bu örnekleri üretken tasarım bağlamında ele almak hem geometrik ortaklıkları anlamamızı hem de tasarım süreçlerine yönelik ortaklaşan unsurları görmemizi sağlamaktadır. Bu çalışmada, literatürdeki yapım bilgisine dayalı kural tabanlı modelleme ile ideal bir model üretimi ve üretilen bu ideal model ile örneklerin karşılaştırmalı kıyaslanmasıyla yapım mantığının açığa çıkarılması hedeflenmiştir. Ele alınan örneklerdeki geometrik şema ve bu şemanın yapısal elemanlarla kurduğu ilişkiler incelenerek geometrik kompozisyon anlamlı parçalara ayrılmıştır. Bu örneklerdeki geometrinin soyutlanarak ardındaki parametrelerin açığa çıkarılmasıyla tekil yapılar arasındaki farklılaşmaları açıklamak mümkün olmuş ve tümel bir söylem üretebilme -bir diğer deyişle mukarnas yapım bilgisi denebilecek bir alan açma- imkanı bulunmuştur. Ayrıca, parametrelerin tanımlanması ve her bir yapı için parametrelerdeki değerlerin uyarlanmasıyla yapıların soyutlanmış geometrileri üretilmiş ve bahsedilen ortak mantık ortaya konmuştur. Sonuç olarak; kural tabanlı modeli üretilen kubbelerin geçmişteki bir yapım pratiğine gömülü, örtük tasarım bilgisi belirli yönleriyle ortaya konmuş, bu süreçteki yapım-geometri arasındaki hesaplanabilir ilişki tartışılmıştır. Her bir mukarnas elemanının etrafındaki elemanların geometrisi tarafından ilişkili olduğu kısımlarda tanımlandığı görülmüştür. Ayrıca bu geometrilerin bu şekilde olmasının ardında ne gibi sebepler olduğu kural tabanlı modelden edinilen çıkarımlarla açıkça ortaya konmuştur. Bu sayede örneklerin yapısal özelliklerinin ötesinde bunlara içkin yapım bilgisine yönelik derinlikli bir anlayış geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Yapım Gramerleri, Zanaatin Sayısallaştırılması, Geometri, Mukarnas.*

MSTAS 2025 MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Examining Relation Between Craft and Geometry in Muqarnas Domes

Enes Karakaya[1]; Mine Özkar[2]
[1,2]İstanbul Teknik Üniversitesi
[1]karakayae18@itu.edu.tr; [2]ozkar@itu.edu.tr

Abstract

Computational design tools contribute to understanding, interpreting, and uncovering the tacit knowledge embedded in rule-based craftsmanship and its construction processes. These tools not only allow us to comprehend the relationship between geometry and making in works that appear to be governed by specific rules, but also help express this relationship more explicitly. In architecture, the making-geometry relationship is shaped and diversified by regional building techniques, materials, structural systems, and various contextual factors. This study focuses on the making practices and related geometric principles found in stone muqarnas domes of 13th–14th century structures in Eastern Anatolia. The stereotomic productions in these examples are evaluated in the context of geometric rules and their interaction with material, form, and structure. Although the three-dimensional developments of these forms vary, the commonality observed in the plan layout underlines the constitutive role of geometry in these buildings. Moreover, even though each structure exhibits certain differences when considered individually, the underlying logic behind their three-dimensional geometric forms remains consistent. In this regard, analyzing these examples within the context of generative design enables both an understanding of shared geometric principles and a recognition of common elements in their design processes. In this study, it is aimed to reveal the underlying making logic through the production of an ideal model based on rule-based parametric modeling, grounded in construction knowledge drawn from the literature. This is followed by a comparative analysis between the ideal model and the selected examples. In each case, the geometric schemes and their relationship with structural elements are examined and decomposed into meaningful subcomponents. Through abstraction and identification of the underlying parameters, the variations among individual structures are clarified, enabling the development of a holistic discourse—essentially opening a field that can be referred to as "muqarnas construction knowledge." Furthermore, by defining these parameters and adapting their values for each structure, abstracted geometries were generated to demonstrate a shared underlying logic. In conclusion, the rule-based models of the domes demonstrate certain aspects of the tacit design knowledge embedded in specific historical making practices, and the computable relationship between geometry and making within this process is discussed. In this way, a deeper understanding of the making knowledge inherent in the examples—beyond their structural characteristics—has been developed.

Keywords: *Making Grammars, Digitization of Craft, Geometry, Muqarnas.*

1. Giriş

Günümüzde mimarlık pratiğinde çoğunlukla temsilden yapıma giden bir süreçten söz edilebilir, bu durum tarihsel bir süreç sonucunda şekillenmiştir. Tarihin çeşitli zamanlarındaysa farklı şekillerde bir mimarlık yapma biçiminden bahsedilebilir. Tasarlama ve yapma arasındaki ilişki de durumdan duruma çeşitlenmektedir, vakaya özgüdür (Turnbull, 2003). Mevcut çalışmaların büyük bir kısmı tarihi yapıları incelerken günümüz anlayışı ile dönem üretimlerini ele almaktadır fakat böylesi tutumlar hatalı yorumlar yapmaya sebep olabilmektedir. Bu problem aslında yöntemsel bir problemdir. Bu konuya yönelik etraflı bir eleştiri Birkett ve Jurgenson (2001) tarafından yapılmış ve ele alınan dönemin araçları ile düşünmek gerektiği vurgulanmıştır.

Yapım-Geometri ilişkisi oldukça geniş bir alana işaret etmektedir, konunun mimari bağlamda incelenebilmesi için belirli bir tür inşa pratiği üzerinden konu ele alınacaktır: Doğu Anadolu'daki 13-14. yüzyıl yapılarındaki taş mukarnasların yapımı. Bu dönemin seçilme sebebi yapıma yönelik kısıtların ve yönlendirici unsurların nispeten daha açık şekilde görülebiliyor olmasıdır. Mukarnas örnekleri ise yapım-geometri ilişkisi bağlamında ayrıcalıklı bir yere sahip olduğu için tercih edilmiştir. Bu yapılardaki mukarnaslı kubbelerin taş dizilişleri ve mukarnas elemanları arasındaki ilişkiler ilk bakışta bütünsel bir izlenime düşüldüğü için gözden kaçmaktadır. Detaylı bir inceleme sonucunda böylesi karmaşık geometrik bir düzenin arkasında son derece yalın kurallar olduğu görülmektedir. Ele alınan örneklerin katı geometrileri soyutlanarak modellenmiş, bu sayede yapılar arası ortaklaşan unsur ve bunların arkasındaki kurallar daha açık şekilde görünür hale gelmiştir. Çalışmada yapılar arası farklılaşmaların kısıtlı bir şekilde gözetildiği -tekil yapılar özelinde durumun daha farklı gelişmiş olabileceğinin göz ardı edildiği- bir yaklaşımla tümele dair bir şey söyleyebildiğimiz bir alan açılarak bu anlamda tarihin belirli dönemindeki pratiğe içkin bir yapım bilgisinden söz edilmektedir. Herhangi bir yapım tekniğinin uygulanırken bu tekniğin kurallarına katı bir şekilde uyulmayabileceği, yerinde çözümler geliştirilmiş olabileceği bilinmektedir. Yani, örneklerden hareketle geliştirilecek sav bu tartışmanın dışında bir alanda söylem üretmekte, bu örneklerdeki yapısal detayların nasıl geliştiği yapının kendisinden edinilmedilir.

Bu çalışma kapsamında yalnızca Erzurum Ulu Camisi, Erzurum Yakutiye Medresesi, Ani Apostol Kilisesi, Astvataynkal Manastırı ve Geğard Manastırı incelenmiştir. Bu seçimin arkasında bu yapıların kesit ve plan çizimlerine ulaşılabilmemiz gibi pratik bir sebep yatmaktadır. Ele alınan örnekler günümüz Türkiye ve Ermenistan sınırlarında bulunmaktadır. Bu yapılar haricinde bu türdeki mukarnaslı kubbelere Ermenistan'daki Ortaçağ kilise ve manastırlarında sıkça rastlanmaktadır. Gavit denilen ve genellikle daha eski tarihli yapılara eklemlenen giriş hacminin 13-14. yüzyıllarda eklenmiştir (Vardanyan, 2015). Gavit hacminin ortasındaki üst örtü ise genellikle ışıklıkla bitmekte ve mukarnaslı kubbe burada görülmektedir. Benzer bir şekilde 1179 tarihli Erzurum Ulu Camisi'nin mukarnaslı kubbesinin Yakutiye Medresesi'nin yapımı sırasında inşa edildiği düşünülmektedir (Karamağaralı, 1981). Bu kubbenin özgün hali günümüze ulaşamasa da Karamağaralı'nın (1981) belirttiği üzere mukarnaslı kubbe çeşitli dönüşümler geçirmiştir. Özgün halinin dikdörtgen bir alanı çerçevelediği düşüncesiyse bu türden mukarnaslı kubbelerin üretken bir sistem olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir. Nitekim farklı açıklıklar, kesitler, malzeme, katman sayısı ve yapısal özelliklerine karşın örneklerde de görülebileceği üzere bağlama uygun çözümlerin rahatlıkla geliştirilebileceği bir sistem karşımıza çıkmaktadır.

Bu tür mukarnaslı kubbelerin belirli bir dönem ve coğrafyada karşımıza çıkmasının sebebiyse dönem İpek Yolu'nun bir kolunun bu coğrafya üzerinden geçmesi ve gezici taş ustalarının ticaret yolları boyunca faaliyet göstermeleri olarak açıklanabilir (Belli, 2019). Bu süreçte taş ustalarının tasarım dağarcığı ve bölgesel yapım pratiklerinin etkili olduğu söylenebilir. Geğard Manastırı'nda aynı geometrik şemaya sahip biri yığma şekilde inşa edilen diğeriyse kaya yontusu olan iki kubbe, daha çok bezeme niteliği gösteren mukarnas elemanlarının heykel yontar gibi yontulması (Tanyeli, 2018), farklı malzemelerde aynı geometrinin uygulanması ve bu gibi daha birçok örnek ustanın tasarım dağarcığının da bu süreçte ne kadar etkili olduğunu göstermektedir. Fakat bu çalışmada tarihsel bir gerçeklik değil, bu gerçekliğin bu şekilde olmasının arkasındaki geometri ve zanaatin rolü incelenecektir. Buna koşut olarak tasarım dağarcığının bu süreçte etkili olması da bu çalışma kapsamında değildir, daha çok bu dağarcığın sonucunda ortaya çıkan geometrinin bu şekilde olmasını gerektiren esas unsurlar incelenecektir.

2. Mevcut Çalışmalar

Literatürdeki çalışmaların bir kısmı mevcut mukarnaslı yapıları tümüyle görsel ilişkilere indirgeyerek anlamaya çalışmışlardır. Elbette böylesi bir temellendirme de yorumlama açısından zenginlik sunsa da bu türden çalışmalar bu gelişimin gerçekte nasıl olduğunu gözden kaçırmakta ve kusurlu yorumlar üretmektedir.

Gökmen vd. (2022) çalışması mukarnas plan çizimlerinin üçüncü boyuttaki gelişimini açıklayan bir algoritma geliştirmişlerdir. Bu iki boyutlu bir çizimin oldukça karmaşık bir yüzeye nasıl dönüştüğünü ortaya koyması bakımından son derece kıymetlidir. Fakat çalışmanın örnekleriyle ortaya konan algoritma arasında problemli bir ilişki mevcuttur. Ele aldıkları örnekler taş yapılar olup bu yapılardaki gelişim çini benzeri malzemelerdeki gibi yalnızca yüzeyin üç boyuttaki gelişimi ile bir çırpıda açıklanamayacak bir inşa sürecine sahiptir, malzeme de yönlendirici bir unsur olarak kritik bir rol oynamaktadır. Plan çizimlerinden, temsillerden, yapıya giden süreç böylesi bir yoruma pekâlâ sahip olabilir fakat bu yorum bu gelişimin gerçekte nasıl olduğunu açıklayamamaktadır.

Yine bu hususta Özdural (1990, 2000) yapım ve geometri arasındaki ilişkinin izini sürmüş, dönem kaynakları üzerinden bir okuma ile mukarnas örneklerini açıklamaya çalışmıştır. Mukarnas birimlerinin geometrik kuruluşu üzerine dönemin matematikçisi El-Kaşi'nin tarifi ve Özdural'ın katkısı oldukça kıymetlidir. Fakat El-Kaşi yalnızca mukarnas elemanlarının geometrisinin nasıl geliştiğini açıklar, bunlar arasındaki ilişkiler ve bütünün nasıl şekillendiğine dair bir bilgi vermez, literatürde buna yönelik başka bir dönem kaynağına da rastlanmamıştır.

Ödekan (1975, 1977) çalışmalarında mukarnaslı yapıların gelişimini rasyonel bir şekilde ortaya koymayı amaçladığını belirtir. Mevcut yapıdaki taş bloklarını da gözeten bir anlayış ortaya koyar. Burada malzeme bilgisinin de gözetildiği bir anlayıştan bahsedebiliriz. Yine bu hususta Notkin (1995) de istisnai bir yere sahiptir. Çalışmasında yapım tekniği ve malzemeyi de gözeterek alçı malzemeli mukarnas yapılarını incelemiştir. Daha farklı bir malzeme ve yapım tekniği incelendiği için bu çalışmada Notkin'le benzer kaygılar güdülmüş fakat farklı bir yöntem geliştirilmiştir.

Literatürdeki çalışmaların büyük bir kısmı mukarnaslı yapıların yüzeydeki gelişimi üzerinden bir inceleme-üretim yapmış ve bunu yaparken anakronizm sorunu ile karşılaşmış, kısıtlı bir anlayış sunmuşlardır. Dinçe ve Yazar (2021) mukarnasın dijital inşası üzerine yaptıkları çalışmada bu hususta yeni bir açılım getirmişlerdir. Ele aldıkları yapının yapım ile ilişkisini, bahsedilen problemlerin büyük bir kısmından sıyrılan, malzemenin de gözetildiği makul bir anlayışla ortaya koymuşlardır. Daha geniş alanlara açılabilecek türden bir yaklaşım geliştirilmiş olsa da incelemelerinde taş bloklarının dizilişleri ve bunlar arası ilişkilerin ne şekilde tanımlandığı açıkça ortaya konmamıştır. Yapım ve malzeme ile ilişkilenmeyi sağlayan blok tabanlı modelleme önerileri ise çalışmalarının literatürdeki diğer çalışmalardan ayrılmasını sağlamaktadır. Yine bu hususta, Efendioğlu (2021), mukarnas örneklerini incelerken yapımı da gözeten geometri temelli bir çalışma yapmış, pratikten edinilen birtakım bilgiler ile bu süreç anlamlandırılmaya çalışılmıştır. Yöntemi bakımından o da diğer çalışmalardan sıyrılmakta ve fakat yapım sürecinin nasıl gerçekleştiğini, geometrinin süreçteki rolünü açıklamak bakımından yeni bir katkı sağlamamaktadır.

Ghazarian ve Ousterhout (2001) çalışmasında Astvatsankal Manastırı'ndaki mukarnaslı kubbeyi incelenmiştir. Mukarnaslı kubbedeki elemanların katmanlardaki konumlarına göre dizilişleri ve bu elemanların geometrisi tariflenmiştir. Fakat, ölçüm ve temsil hassasiyeti problemlerinden ötürü üç boyutlu gelişimde karşılaşılacak problemler bu çalışmada görülememiştir. Ortaçağ'da temsil ve yapım ilişkisine odaklanılan çalışmada, kaynakların son derece kıt olması sonucu mukarnas temsili ve yapısı üzerine çalışılması anlaşılır görülmektedir. Bu tür mukarnaslı kubbelere başka yapılarda da rastlandığı belirtilmiştir fakat bu benzerliğin sebepleri çalışmanın kapsamında olmadığı için yalnızca değinilmiştir.

Bu çalışmaysa mukarnas elemanlarını malzeme özelliklerini, yapım sürecini, yapısal anlamda anlamlı parça-bütün ilişkilerini incelemesi bakımından özgündür. Ayrıca mukarnas elemanları üzerine yapılan sınıflandırmada ele alınan vakalara özgü bir sınıflandırma geliştirilmiş ve malzemede karşılık bulduğu geometrilerine göre elemanlar tanımlanmıştır.

3. Vakaların İncelenmesi

Bu çalışma Erzurum Ulu Camisi, Erzurum Yakutiye Medresesi, Ani Apostol Kilisesi, Astvatsankal Manastırı ve Geğard Manastırı yapılarında bulunan aynı geometrik kuruluşa sahip mukarnaslı kubbeler incelenecektir. Bu yapılar arasındaki

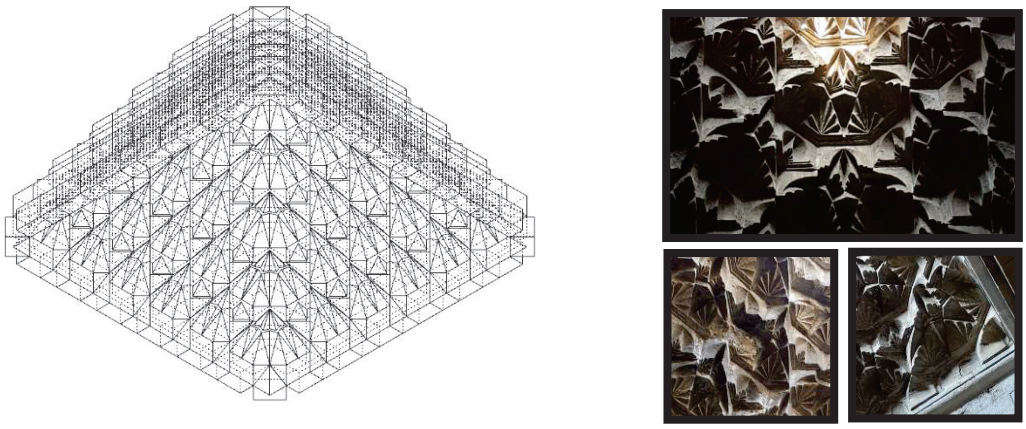
esas ortaklık mukarnas geometrilerinin kuruluşundaki, birim elemanlardaki ve bu elemanların dizilişindeki ortak yanlardır. Bu ortaklaşma sayesinde diyebiliriz ki, aralarındaki zaman farkına ve coğrafi mesafeye rağmen, yapımlarında bir tür ortaklaşma mevcuttur. Bu ortaklaşmaya sebep olan unsurlar arasında elbette gezici taş ustaları (McClary, 2017), kültürel etkileşimler ve yapılar arası esinlenme gibi etmenler ilk etapta akla gelse de bu raddede bir ortaklaşmayı sağlayacak esas unsurun yapım-geometri ilişkisi bağlamında ortaya çıkarılabileceğini düşünüyoruz.

Bu ilişkiyi incelerken bu yapılarda bir şekilde sezilen mantığın açıkça ortaya konmasında yardımcı olduğu için hesaplamalı tasarım araçlarından faydalanılmıştır. Dahası, bu gibi durumların ifadesi her mecrada farklı niteliklerde karşılık bulduğundan yazılı ve görsel ifadeler arasında epistemik anlamda hassasiyet farklılığı olduğu açıktır. Hesaplamalı tasarım araçlarıyla bu temsillerin ifade edilmesiyse ele alınan örneklerde olduğu gibi bir mantık barındırmakta, bir yanıyla sonuç ürünün diğer yanıyla da bu ürünün şekillenmesindeki etmenlerin ifade edilmesine imkan tanımaktadır.

Bu araçlarla yapım sürecindeki kısıtlar ve yönlendirici unsurlar gözetilerek kurallar-parametreler tanımlanıp yapı modellenmiştir. Modelleme iki aşamadan oluşmaktadır: mukarnas elemanlarının geometrisinin tanımlandığı parametrik model ve bu elemanlar arası ilişkilerin tanımlandığı kural tabanlı model. Her ne kadar bu model bir son ürün ortaya koysa da burada önemli olan nokta bu modelin yapım sürecini, bu süreçteki yapım-geometri ilişkisini ortaya koymasıdır.

4. Kubbelerin Modellenmesi

Mukarnaslı kubbenin ideal modeli, plan düzlemindeki geometrik ilişkilerin çizimiyle başlayarak katmanlar ve birim elemanların tariflenmesi ve aralarındaki ilişkilerin tanımlanmasıyla mevcut plan çizimleri, fotoğraflar ve literatürdeki yapım bilgisi esas alınarak oluşturulmuştur. Modelleme sürecine ilkin yorumlama ve anlamlı çıkarımlar sonucu geometrik şemanın çizimiyle başlanmıştır.



Şekil 1: Kubbenin ideal modeli ve Yakutiye Medresesi mukarnaslı kubbesinden fotoğraflar

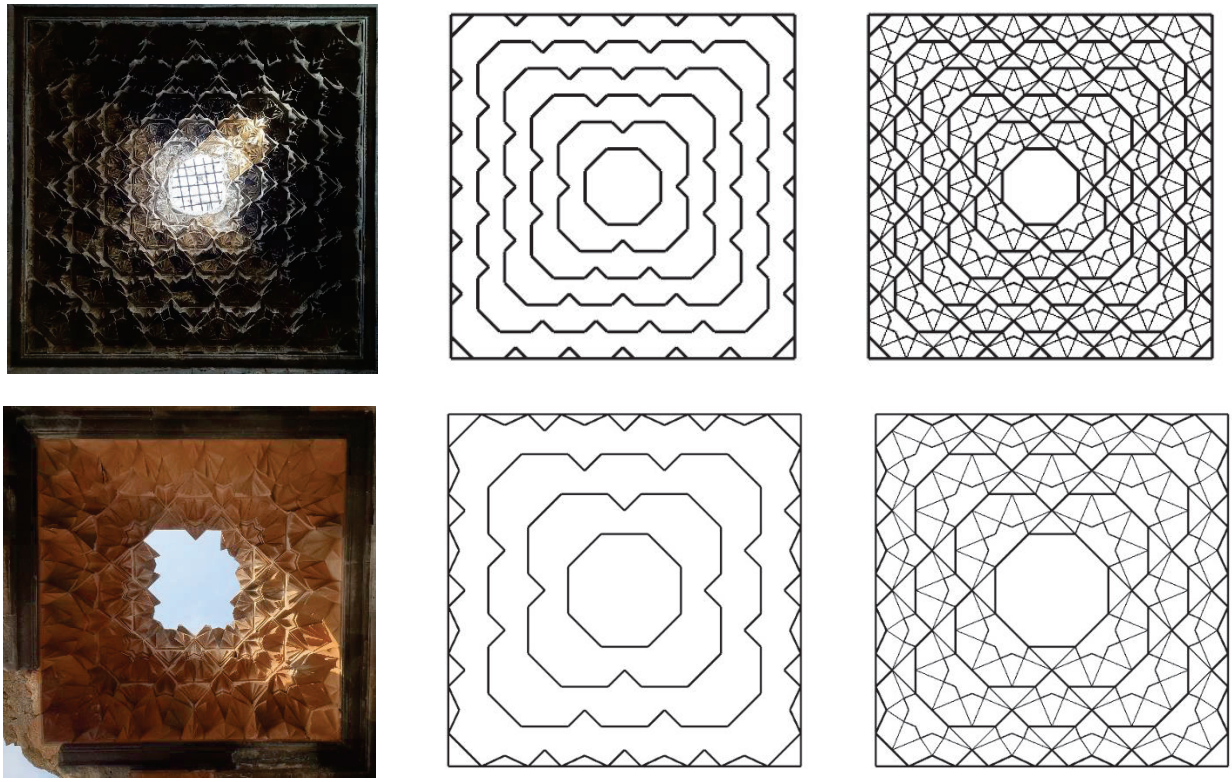
4.1. Plan Çizimlerinin Üretilmesi-Yorumlanması

Yapıların plan ve kesit çizimleri ölçekli bir şekilde modelleme ortamına aktarılmış ve fotoğraf verileri altlık olarak kullanılacak şekilde çakıştırılarak plan düzlemindeki geometrik kompozisyon çizilmiştir. Geometrik elemanlar yapıda nasıl karşılık bulduğu ve bu kubbelerde görülen yapım tekniği gözetilerek anlamlı ilişkiler kuracak şekilde yorumlanmıştır. Bu kubbelerde taş blokların her bir kademede bir miktar konsol çıkacak şekilde yerleştirilmesi ile oluşturulmuştur ve bu yüzden katmansal dizilim gösterdikleri görülmüştür. Bu katmansal dizilimin plan düzlemindeki geometrik kompozisyondaki karşılığı incelenmiş ve bu geometrik kompozisyon üçüncü boyuttaki katmansal dizilişe göre katmanlara ayrılmıştır. Bu süreçte her bir katmanda tekrar eden belirli tekrarlar ortaya çıkarılmış, plan düzleminde kenarlardaki ve köşelerdeki gelişimde başka türlü tekrarların olduğu görülmüştür.

4.2. Katmanların Tanımlanması

Katmanların tespitiyle birlikte çalışmanın bundan sonraki aşamalarında her bir katmandaki öğelerin aralarındaki ilişkiler incelenmiştir. Öncelikle, plan çiziminde yapılan çıkarımlar ve bunun yapıdaki karşılığı incelenmiştir. Her bir katmanda ortaklaşan şeyin köşede bulunan geometrik birimler olduğu ve aşağı katmanlarda kenar uzunluğu arttıkça

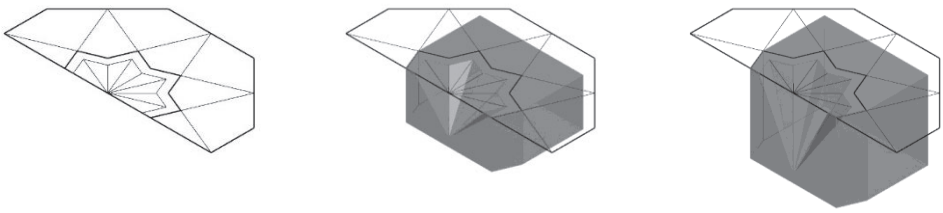
kenarda bulunan geometrik birimlerin tekrar edildiği görülmüştür. Bu köşede ve kenarda olma hali gözetilerek hem plan çizimindeki geometrik elemanlar hem de mukarnaslı yapıdaki üç boyutlu geometrik elemanlar arasındaki ilişki işlenmeye başlanmıştır. Elemanların sınıflandırılması için katmanlar "kasnak", "sıra 1" ve "sıra 2" olarak üçe ayrılmıştır. Bu katmanların dizilişleri aşağıdan yukarıya "kasnak, sıra 1, sıra 2, sıra 1, sıra 2 ..." şeklindedir.



Şekil 2: Kubbelerin fotoğrafları ve geometrik şemalarının çizimleri (yukarıda Yakutiye Medresesi, aşağıda Ani Apostol Kilisesi)

4.3. Elemanlar

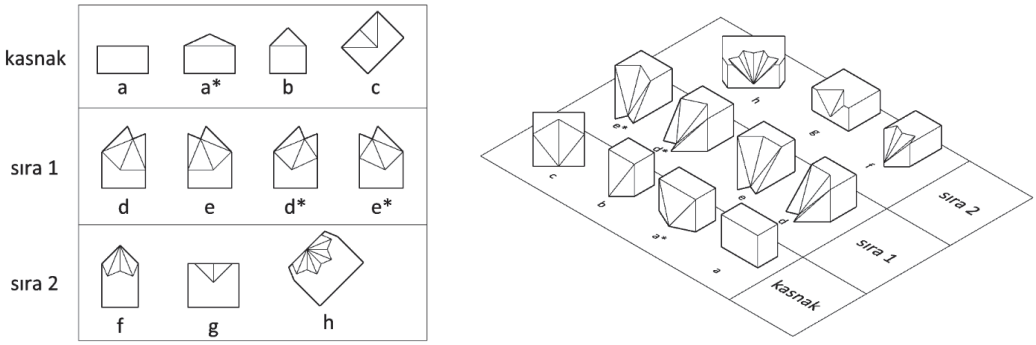
Üç boyutlu modelleme programı olan Rhinoceros ortamında bu birim elemanlar ilkin plan düzleminde çizilmiş, sonrasında hangi parametreler sonucu üç boyutlu elemanlara dönüştükleri incelenmiştir. Geometrik şema aynı olsa dahi taş bloklarının yüksekliğine bağlı olarak birim elemanlarda farklılaşmalar olduğu görülmüştür. Ayrıca, bu geometrik birimlerin şekillenişinde stürüktürel bağlamdaki kısıtların önemli rol oynadığı görülmüştür. Konsol olarak gelişim gösteren bu bütün yapı, birim elemanlarında belirli bir miktar taşma ile bunu sağlamaktadır. Bu taşma, taş bloklarının gördüğümüz yüzeyini oluşturur. Yığma yapının içerisinde kalan kısım strüktürel ihtiyacı karşılayacak kadar uzanır, bu kısım taş bloklarının inşa sürecinde taşınmasının güçlüğünü de gözeterek (ve ayrıca metruk haldeki diğer örneklerde bütün olarak görebildiğimiz boyutlardan referansla) makul bir çıkarım yapılarak uzunluğu tayin edilip modellenmiştir. Dahası, buradaki konsol olarak çalışan kısımlar tümüyle plan düzlemindeki geometriden esas alınarak geliştirilmiştir. Burada kayda değer kısım, plan düzlemindeki geometrik kuruluşta yapıma yönelik bir tür bilginin içkin oluşudur.



Şekil 3: Mukarnas elemanının parametrik modellenmesi

Birim elemanların literatür ve fotoğraf verileriyle tutarlı bir şekilde modellenmesi sonucunda görülmüştür ki bu elemanlar üç tür katmanda tekrar etmektedir: "kasnak", "sıra 1" ve "sıra 2". Mukarnas elemanları bu katmanlara

göre incelendiğinde belirli bir dağılım göstermektedirler. Her bir katmanda bu katmanın elemanları arasında belirli ilişkiler olduğu görülmüştür.

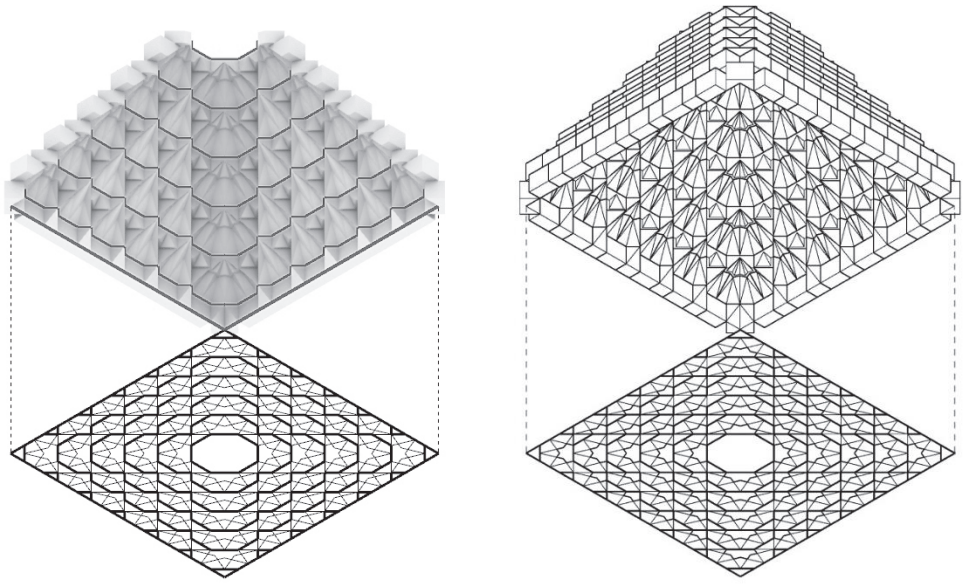


Şekil 4: Mukarnas elemanları

Şekil 4'te adlandırması * ile biten elemanlara Ani Apostol Kilisesi, Astvatsankal Manastırı ve Geğard Manastırı yapılarında rastlanmıştır. Kasnakta bulunun "a" elemanı yerine bu yapılarda "a*" elemanı kullanıldığı görülmüştür. Benzer şekilde kasnağın hemen üzerindeki katmanda bulunan "sıra 1" katmanı elemanlarından "d*" ve "e*" de benzer bir şekilde kullanılmışlardır. Fakat takip eden katmanlarda "d" ve "e" elemanları diğer yapılarda olduğu gibi "d" ve "e" elemanı olarak devam etmektedir. "d*" ve "e*" elemanlarının farklılaşma sebebi "a*" elemanıdır. Bu elemanların üç boyutlu geometrileri göz önüne alındığında aşağıda kalan kısımlarını tayin eden geometri "a*" elemanı olduğu için bu elemanlar bu katmanda farklılık göstermektedirler.

4.4. İlişkiler

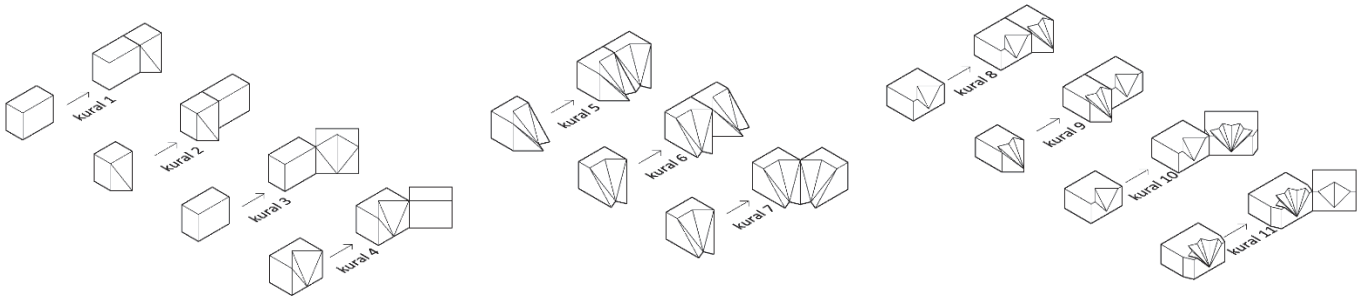
Elemanların kendi arasındaki ve geometri ile ilişkisi üzerinden, yapım geometri ilişkisi incelenmiştir. Her bir elemanının geometrisi etrafındaki elemanların geometrilerince tanımlanmaktadır. Bu anlamda her bir parça kendi geometrisini tanımlarken aynı zamanda ötekinin geometrisini de tanımlamaktadır. En alt sırada "kasnak" katmanı elemanları bulunurken yukarıya çıktıkça "sıra 1" ve "sıra 2" katmanlarına ait elemanlar sırasıyla tekrar etmekte ve kubbe bir oculus ile sonlanmaktadır. Mukarnas elemanlarından "f" ve "g" sıralı bir dizilişe sahiptirler ve "f" diş yaparak bir üst kademedeki taşın basacağı yeri oluştururken "g" bir miktar geri çekilerek yuva oluşturur ve "d" ile "e" elemanlarının arasındaki boşluğu düşeyde karşılar. İlk bakışta "d" ve "e" elemanları arasındaki boşluk anlamsız gibi görünse de bu boşluğa sebep olan geometrinin 45 derece ile gelen kısmının "sıra 1" katmanına özgü olarak köşe elemanına ihtiyaç duyulmamasını sağladığı görülür. Yani, Bu 45 derecelik açı köşede bu iki elemanın hemyüz bir şekilde yanaşmalarını sağlamaktadır. Bu da geometriye içkin bir yapım bilgisi olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 5: Mukarnas elemanlarının plan düzlemi ve kendi aralarında kurdukları ilişkiler

4.5. Kuralların Tanımlanması

Elemanların ve ilişkilerin tanımlanması sonucu kurallar da açık bir şekilde ortaya çıkmıştır. Düşey düzlemde katman dizilişlerine göre bir kuraldan bahsedilebilirken, yatay düzlemdeki kurallar incelendiğinde 11 adet kural çıkarılmıştır. Bu kurallar ilgili katmanın geometrik şemasına göre uygulanırlar ve her bir katman kendi içerisinde tamamlandıktan sonra bir sonraki katmana geçilir. Örneğin, "kasnak" katmanından başlanırsa, "c" elemanına uygulanan "kural 4" sonucu kenar hattında ilerleyecek diziliş başlar. Bunu takiben, "kural 1" ve "kural 2" sonraki köşeye dek devam eder ve "kural 3" ile sonraki kenara geçilir ve aynı kuralların tekrarıyla kasnak katmanı tamamlanır. Sonraki katmandaysa, "sıra 1" elemanları (yani "d" ve "e") kenar hattı boyunca "kural 5" ve "kural 6" nın sıralı tekrarıyla devam ederken köşeye gelindiğinde "d" elemanına "kural 7" uygulanır ve diğer kenara geçilir. Benzer bir şekilde "sıra 1" katmanı da tamamlandıktan sonra "sıra 2" katmanına geçilir. Burada da "kasnak" katmanındakine benzer bir şekilde elemanlara kurallar uygulanır ve katman tamamlanır. En yukarıdaki katmana dek bu kurallar uygulanarak katmanlar modellenir ve yapı tamamlanır.



Şekil 6: Mukarnas elemanlarının diziliş kuralları (sırasıyla "kasnak", "sıra 1", "sıra 2" elemanları)

4.6. Model ve Çıktıları

Belirtmek gerekir ki bu çalışmada altlık olarak kullanılan çizimlerin hassasiyetleri son derece düşüktür. Daha doğru ve tutarlı bir veri edinmek için yapıların detaylı ölçümleri gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında bunlar arasındaki ortaklaşmanın ve arkasındaki mantığın açığa çıkarılması amaçlandığı için bu verilerin değişmesi bu anlamda ciddi bir değişikliğe sebep olmayacaktır.

Tablo 1: Yapıların modellerine göre eleman yükseklikleri (h), katman sayısı (n) ve kubbelerin kenar uzunluğu (x) verileri

	Erzurum Ulu Camisi	Yakutiye Medresesi	Ani Apostol Kilisesi	Astvatsankal Manastırı	Geğard Manastırı
$h_{kasnak}, h_{sıra1}, h_{sıra2}$ (cm)	40,40,29	42,42,30	30,30,30	52,52,52	46,46,46
n_{katman}	11	11	7	7	7
x_{kenar} (cm)	670	607	290	530	460

Karamağaralı (1981) Erzurum Ulu Camisi'ndeki mukarnaslı kubbenin Yakutiye Medresesi'nin mimarı tarafından yapıldığını söyler. Ayrıca bu iki yapıdaki mukarnaslı kubbelerin kesit açıları arasındaki fark belirtilmiş ancak sebebine yönelik açıkça bir açıklama getirilmemiştir. Üretilen modeller sonucu, bu iki yapının plan şemasının ortaklığına karşın kesit açılarının farklılaşmasının sebibinin bu kubbelerde kullanılan taşların yüksekliğinden ve kenar uzunlukları farkından kaynaklandığı görülmüştür.

5. Sonuç

Çalışma, hesaplamalı tasarım olarak son yıllarda çokça ele alınan mukarnas yapım tekniğinin kubbe olarak inşa edildiği belirli bir coğrafya ve döneme ait taş örnekler üzerinden yapıma dair örtük bilgilerin açığa çıkarılması yönüyle özgündür. Hassas bir ölçüm-veri olmadan mukarnaslı kubbeler modellenmiş ve ideal geometrik modeller arasında yapılan kıyaslamalar sonucu birbirine yakın coğrafyalarda katman sayısı bakımından bir ortaklaşma olduğu görülmüştür. Ayrıca coğrafyaya bağlı olarak kasnağa yakın kısımlardaki birim elemanların farklılaştığı görülmüştür. Erzurum'daki örneklerde "kasnak" sırasında kesme taş kullanılırken ("a" elemanı), Ani ve Ermenistan'daki örneklerde bu kesme taşın bulunduğu yerde başka bir mukarnas elemanına (a*) rastlanmıştır. Buna bağlı olarak bir üst katmandaki

elemanlar da değişmiştir fakat takip eden katmanlarda elemanlar diğer örneklerdekiyle aynı şekilde kullanılmıştır. Bu elemanlardaki değişiklik ne yapısal anlamda ne de uygulanan kurallar açısından bir değişikliğe sebep olmuştur.

Taş bloklarının izdüşümü hepsinde ortak bir geometrik kuruluşa sahipken, her bir mukarnas elemanının yüksekliği yapıda kullanılan taş boyutuna göre belirlenmiş olup kesitte çeşitlilik görülmektedir.

Katmanlar arasında "sıra 1" ve "sıra 2" katmanına ait mukarnas elemanlarının dönüşümlü tekrar ettiği, taş blokların strüktürel gereksinimleri karşılamak üzere şaşırtmalı dizildiği ve üst sıralarda aynı birim elemanlarla bu düzenin sürdürüldüğü gözlemlenmiş, bu durum geometriye içkin bir yapım bilgisi olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca "d" ve "e" elemanlarının 45 derece ile içe kapanan kenarları böylesi yekpare etki uyandıran bir yapıda anlamsız boşluklar olarak algılansa da bu geometri sayesinde köşelerde yeni bir elemana ihtiyaç duymadan bir elemanın 90 derece döndürülmesiyle hemyüz şekilde birbirlerine yanaştırılmalarına imkan sağlamaktadır, bu da geometriye içkin bir yapım bilgisi olarak değerlendirilebilir.

Üretken sistem olduğu vurgusu yapılan bu yapım tekniğine, bu çalışma kapsamında örnekleme dahil edilmese de, Harichavank Manastırı'nda diğer örneklerde ışıklığın olduğu kısıma fazladan elemanlar eklenmiş ve çok daha küçük bir ışıklık bırakılmış şekilde rastlanmıştır. Burada en içteki elemanların sekiz köşeli yıldız oluşturmaları da plan şemasında ve birim elemanlarda gördüğümüz sekizgen motifin tekrarı ve uzantısı olarak üretken sistem olması savını desteklemektedir.

Gelecek çalışmalarda tüm bu yapısal özelliklerin yanı sıra strüktürel açıdan nasıl bir davranış gösterdikleri kıyaslanarak incelenebilir. Ayrıca taş ustaları ile çalışılarak geometrinin malzemeye uygulanması bağlamında da zanaat eylemlerindeki örtük bilgiler açığa çıkarılabilir.

KAYNAKLAR

Belli, O. (2019). *Her Yönü İle Ani*. Türkiye Turing ve Otomobil Kurumu Yayınları, 71-73.

Birkett, S., & Jurgenson, W. (2001). Why didn't historical makers need drawings? Part 1 - Practical geometry and proportion. *The Galpin Society Journal, 54*, pp. 242–284. https://doi.org/10.2307/842456

Dinçer, S. G., & Yazar, T. (2021). A comparative analysis of the digital re-constructions of muqarnas systems: The case study of Sultanhanı muqarnas in Central Anatolia. *International Journal of Architectural Computing, 19*(3), 360–385. https://doi.org/10.1177/1478077121992487

Efendioğlu, G. (2021). Muqarnas construction techniques with geometrical background. *Nexus Network Journal: Relationships Between Architecture and Mathematics, 20/21,* 265–270.

Ghazarian, A., & Ousterhout, R. (2001). A muqarnas drawing from thirteenth-century Armenia and the use of architectural drawings during the Middle Ages. *Muqarnas, 18*, 141–154. Brill. https://doi.org/10.2307/1523305

Gökmen, S., Basık, A., Aykin, Y., & Alacam, S. (2022). Computational modeling and analysis of Seljukid muqarnas in Kayseri. *Journal on Computing and Cultural Heritage, 15*(2), Article 27, 19 pages.

Karamağaralı, H. (1981). Erzurum Ulu Cami. *Yıllık Araştırmalar Dergisi, 3,* 137-177.

McClary, R. P. (2017). Craftsmen in medieval Anatolia: Methods and mobility. In P. Blessing & R. Gashgorian (Eds.), *Architecture and Landscape in Medieval Anatolia, 1100-1500* (pp. 27-58). Edinburgh University Press.

Notkin, I. I. (1995). Decoding sixteenth-century muqarnas drawings. *Muqarnas: An Annual on Islamic Art and Architecture, 12*, 148–171. Leiden: E. J. Brill.

Ödekan, A. (1975). *Bir mukarnaslı portal kubbesi geometrik semadan 3. boyuta geçiş örneği* (2. basım). Ankara: Türk Tarih Kurumu Basımevi.

Ödekan, A. (1977). *Osmanlı Öncesi Anadolu Türk Mimarisinde Mukarnaslı Portal Örtüleri* [Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. İstanbul Teknik Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Baskı Atölyesi.

Özdural, A. (1990). Gıyaseddin Jemshid El-Kashi and stalactites. *METU Journal of the Faculty of Architecture, 10*(1–2), 31–49.

Özdural, A. (2000). Mathematics and arts: Connections between theory and practice in the Medieval Islamic world. *Historia Mathematica, 27*, 171–201.

Vardanyan, E. (2015). The žamatun of Hoṙomos and the žamatun/gawit' structures in Armenian architecture. In E. Vardanyan (Ed.), *Hoṙomos Monastery: Art and History* (pp. 207–236). Centre de recherche d'histoire et civilisation de Byzance – Collège de France – CNRS.

Tanyeli, G. (2018). *Hiçbir üstâd böyle kâr etmemişdir: Osmanlı inşaat teknolojisi tarihi*. Akın Nalça Kitapları.

Turnbull, D. (2003). Talk, templates and tradition: How the masons built Chartres Cathedral without plans. In D. Turnbull (Ed.), *Masons, tricksters and cartographers* (pp. 55–90).

2025 MSTAS

OTURUM 4

YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK

2025 MSTAS MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Çevresel Ürün Beyanları Kapsamında Alüminyum Profilin Yaşam Döngüsü Analizi ve Malzeme Seçimi İçin Karar Destek Sistemlerinin İncelenmesi

Damla Yıldırım Mutlu[1]; Yiğit Güller[2]
[1,2]Çuhadaroğlu Metal Sanayi ve Pazarlama A.Ş. Ar-Ge Merkezi
[1]damla_yildirim@cuhadaroglu.com; [2]yigit_guller@cuhadaroglu.com

Özet

Mimari uygulamalarda alüminyum, cephe kaplamaları ve doğrama sistemleri gibi çeşitli ürünlerde yaygın olarak tercih edilmektedir ve kullanım ömürleri boyunca çeşitli çevresel etkilere sahiptir. Bu bağlamda, Çevresel Ürün Beyanları (EPD belgeleri), malzemelerin çevresel performansını şeffaf bir şekilde ortaya koyarak sürdürülebilir malzeme seçim süreçlerine önemli katkılar sağlamaktadır. Bu çalışma, Türkiye'de üretilen alüminyum profillerin yaşam döngüsü boyunca ortaya çıkan çevresel etkilerini, iki farklı veri erişim yöntemiyle elde edilen EPD belgeleri üzerinden analiz etmeyi ve yapı malzemesi seçim süreçlerinde bu yöntemlerin farklılıklarını ve avantajlarını incelemeyi amaçlamaktadır. Çalışmada, literatür taraması, belge incelemesi ve yazılım araştırmalarını kapsayan karma bir metodoloji yaklaşımı benimsenmiştir. Altı farklı üreticiye ait EPD belgelerine, açık kaynaklı EPD veri tabanından manuel yöntemle erişilerek analizler gerçekleştirilmiştir. Fosil kaynaklı küresel ısınma potansiyeli, ozon tüketme potansiyeli, asidifikasyon potansiyeli ve ötrofikasyon potansiyelleri gibi çevresel etki kategorilerinde belirgin farklılıklar tespit edilmiştir. Bu durum, hammadde temini ve üretim süreçlerindeki farklılıkların çevresel etkiler üzerinde önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Diğer bir veri erişim yöntemi olarak, yazılım teknolojilerinin yapı sektöründe sürekli gelişmesiyle birlikte BIM tabanlı Autodesk Revit programına entegre edilen OneClickLCA ve Tally gibi yaşam döngüsü analizi eklentilerinin, EPD verileriyle entegrasyonu incelenmiştir. Bu entegrasyon, çalışma içerisinde yarı otomatik yöntem olarak adlandırılmıştır. BIM sistemlerinin, yapı bileşenlerine ilişkin detaylı verileri merkezi bir modelde dijital olarak yönetip güncelleyebilmesi, EPD verilerinin tasarım sürecine entegrasyonunu kolaylaştırmakta; böylece malzeme seçim süreçlerini daha verimli hale getirmektedir. BIM yazılımlarına entegre edilen OneClickLCA ve Tally gibi araçlar, alüminyum gibi enerji yoğun malzemelerin çevresel etkilerinin ileri tasarım aşamasında ve LOD 400 detay seviyesinde hesaplanmasına olanak tanıyarak, farklı malzemelerin çevresel etkilerinin karşılaştırılmasını mümkün kılmaktadır. Ancak, mevcut durumda BIM yazılımlarına entegre edilen yaşam döngüsü analizi eklentilerinin veri tabanında tüm EPD belgelerinin yer almaması, bu entegrasyonun etkinliğini sınırlamaktadır. Ayrıca, BIM modellerinin detay seviyesinin yüksek olması ve malzeme tanımlamalarının doğru yapılması gerektiği de önemli bir bulgu olarak ortaya çıkmıştır. Sonuç olarak, EPD belgeleri, yapı malzemesi seçim süreçlerinde şeffaf ve karşılaştırılabilir veri sunma işleviyle sürdürülebilir yapı tasarımı açısından stratejik bir rol oynamaktadır. Bu belgelerin BIM yazılımlarıyla entegre şekilde kullanılabilmesi, tasarım sürecinin ileri aşamalarında çevresel etki analizlerinin hesaplanmasını sağlamaktadır. Gelecek çalışmalarda, BIM tabanlı karar destek sistemlerinin geliştirilmesi ve EPD veri tabanlarının genişletilmesi, yapı sektöründe sürdürülebilir malzeme seçim süreçlerini erken tasarım aşamasında önemli ölçüde iyileştirebilir.

Anahtar Kelimeler: *Aluminyum Profil, Çevresel Ürün Beyanları (EPD), Yaşam Döngüsü Analizi (LCA), Yapı Bilgi Modellemesi (BIM), OneClickLCA.*

2025 MSTAS MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Life Cycle Analysis of Aluminium Profile within the Scope of Environmental Product Declarations and Investigation of Decision Support Systems for Material Selection

Damla Yıldırım Mutlu[1]; Yiğit Güller[2]
[1,2]Çuhadaroğlu Metal Sanayi ve Pazarlama A.Ş. Ar-Ge Merkezi
[1]damla_yildirim@cuhadaroglu.com; [2]yigit_guller@cuhadaroglu.com

Abstract

In architectural applications, aluminum is widely preferred in various products such as facade cladding and joinery systems, and has various environmental impacts throughout its lifetime. In this context, Environmental Product Declarations (EPDs) provide important contributions to sustainable material selection processes by transparently revealing the environmental performance of materials. This study aims to analyze the lifecycle environmental impacts of aluminum profiles produced in Turkey through EPD documents obtained by two different data access methods and to examine the differences and advantages of these methods in building material selection processes. The study adopts a mixed methodology approach, including literature review, document review, and software research. EPD documents of six different manufacturers were manually accessed and analyzed from the open-source EPD database. Significant differences were identified in environmental impact categories such as fossil-based global warming potential, ozone depletion potential, acidification potential, and eutrophication potential. This shows that differences in raw material supply and production processes play an important role in environmental impacts. As another data access method, the integration of life cycle analysis plug-ins such as OneClickLCA and Tally, which are integrated into the BIM-based Autodesk Revit programme, with the continuous development of software technologies in the construction sector, with EPD data, was examined. This integration is named as semi-automatic method in the study. The ability of BIM systems to digitally manage and update detailed data on building components in a centralized model facilitates the integration of EPD data into the design process and thus has the potential to make material selection processes more efficient. Tools such as OneClickLCA and Tally, which are integrated into BIM software, enable the environmental impacts of energy-intensive materials such as aluminum to be calculated at the advanced design stage and the LOD 400 detail level, making it possible to compare the environmental impacts of different materials. However, the fact that not all EPD documents are included in the database of life cycle analysis plug-ins currently integrated into BIM software limits the effectiveness of this integration. In addition, it has been revealed as an important finding that the level of detail of BIM models should be high, and material definitions should be made correctly. In conclusion, EPD documents play a strategic role in sustainable building design by providing transparent and comparable data in building material selection processes. The integrated use of these documents with BIM software enables the calculation of environmental impact analyses at advanced stages of the design process. In future studies, developing BIM-based decision support systems and expanding EPD databases can significantly improve sustainable material selection processes in the construction sector at the early design stage.

Keywords: *Aluminum Profile, Environmental Product Declarations (EPD), Life Cycle Assessment (LCA), Building Information Modeling (BIM), OneClickLCA.*

1. Giriş

Döngüsel ekonomi, kaynakların daha verimli kullanılmasını, atıkların azaltılmasını ve malzemelerin yeniden kullanımını hedefleyen bir ekonomi modelidir. Yapılı çevrede döngüsel ekonominin uygulanması, sürdürülebilir yapı malzemelerinin seçimini ve kullanımını teşvik ederken, yaşam döngüsü değerlendirmesi (Life Cycle Assessment - LCA), bu süreçlerin çevresel etkilerinin ölçülmesinde kritik bir rol oynamaktadır (Geissdoerfer vd., 2017). Çevresel ürün beyanları (EPD), yapı malzemelerinin yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerini şeffaf bir şekilde ortaya koyarak sürdürülebilir malzeme seçim süreçlerine katkı sağlamaktadır (ISO 14025, 2006).

Yapı malzemeleri, üretim süreçleri, kullanım ömrü ve geri dönüşüm potansiyelleri bakımından önemli çevresel etkilere sahiptir. Malzeme seçiminde sürdürülebilirlik kriterlerinin dikkate alınması, karbon ayak izinin azaltılması ve enerji verimliliğinin artırılması açısından kritik bir unsurdur (Bribián vd., 2011).

Alüminyum profiller, özellikle hafifliği, dayanıklılığı ve geri dönüştürülebilirliği nedeniyle yapı sektöründe yaygın olarak tercih edilmektedir. Mimari uygulamalarda alüminyum; giydirme cepheler, cephe kaplamaları, doğrama sistemleri (kapı ve pencere çerçeveleri), güneş kırıcı paneller, korkuluk sistemleri, iç mekân bölme elemanları, çatı kaplamaları ve taşıyıcı yapı elemanları gibi çeşitli yapı bileşenlerinde kullanılmaktadır. Ancak, hammadde çıkarımından üretim süreçlerine, kullanım ömrü boyunca enerji tüketimine ve geri dönüşüm potansiyeline kadar farklı aşamalarda çeşitli çevresel etkileri bulunmaktadır.

Bu çalışma, Türkiye'de üretilen alüminyum profillerin yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerini, farklı veri erişim yöntemleri aracılığıyla elde edilen çevresel ürün beyanları (Environmental Product Declarations - EPD) üzerinden karşılaştırmayı ve yapı malzemesi seçim süreçlerinde karar destek sistemlerinin malzeme seçimine etkilerini incelemeyi amaçlamaktadır.

Çalışma kapsamında, çevre etiketleri tanımlanmış, alüminyum profil üretiminin çevresel etkileri ISO 14040/ISO 14044 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilen yaşam döngüsü değerlendirme verileri sayesinde ilgili EPD belgelerinden elde edilmiştir. Her bir belgede “1 kg alüminyum profil üretimi için” ürün aşamasındaki süreçlerde ortaya çıkan çevresel etkiler karşılaştırılmıştır.

Çalışmada, literatür taraması, belge incelenmesi ve yazılım analizlerini içeren karma bir metodoloji yaklaşımı benimsenmiştir. EPD belgeleri, açık kaynaklı EPD veri tabanı olan EPD Turkey (URL-1) sayfasından temin edilmiştir. BIM tabanlı karar destek sistemlerinin etkilerinin araştırıldığı bölümde ise Scopus bilimsel veri tabanı kullanılmış; elde edilen veriler, VOSviewer yazılımı aracılığıyla görselleştirilmiştir.

2. Çevresel Ürün Beyanları ve Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi

Yaşam döngüsü değerlendirmesi, hammaddenin çıkarımından geri dönüşüme kadar olan süreçte, bir ürünün tüm çevresel etkilerini analiz eden bir yöntemdir. Bu süreç; hedef ve kapsam tanımlama, envanter analizi, etki değerlendirmesi ve sonuç yorumlama olmak üzere dört aşamadan oluşur (ISO 14040, 2006).

Çevresel etiketler, yaşam döngüsü değerlendirme yaklaşımı temelinde oluşturularak ürün veya hizmetlerin çevre üzerindeki etkilerine dair yanıltıcı olmayan, doğru ve kanıtlanabilir bilgiler sunmayı amaçlar. Bu tür etiketlerin temel hedefi, çevresel açıdan daha az olumsuz etki yaratan ürün ve hizmetlere olan talebi artırmak ve bu ürünlerin teşvik edilmesini sağlamaktır. Aynı zamanda bu uygulamalar, sürekli çevresel iyileştirme fırsatlarının değerlendirilmesine olanak tanımaktadır (Kaya, 2011).

Çevresel etiketleme sistemine yönelik ilkeler ve uygulamalar ISO standartları aracılığıyla düzenlenmiştir. ISO 14000 serisi standartlar, bir ürünün hammadde temininden son kullanımına kadar geçen süreçte çevresel etkilerin belirlenmesini ve bu etkilerin uygun kontrol ve önlemlerle minimize edilmesini hedefleyen bir yönetim sistemi sunar. Bu standartlar, ürünün kendisinden ziyade üretim süreçlerine odaklanmakta; dolayısıyla ürünün ne olduğundan çok, nasıl üretildiğiyle ilgilenmektedir. Çevresel performansın sürekli izlenmesi ve iyileştirilmesi amacıyla geliştirilen bu standartlar, aynı zamanda yasal düzenlemelere uyum sağlamayı esas alır.

Çevresel etiketleme ile ilgili dünya genelinde standartlaşmış uygulamalar mevcuttur. Bu uygulamalar, özellikle yapı sektöründe, malzeme ve ürünlerin çevresel özelliklerini değerlendirmede yaygın olarak kullanılmaktadır (TS EN ISO 14020, 2002). ISO 14020 standardına göre çevresel etiketler ve beyanlar Tip I, Tip II ve Tip III olmak üzere üç kategoriye ayrılır. Bu sınıflandırmalar sırasıyla ISO 14024, ISO 14021 ve ISO 14025 standartları temelinde yapılmıştır (Sayın, 2020). Tip I çevre etiketi, gönüllülük esasına dayanan ve belirli bir ürün kategorisinde yaşam döngüsü yaklaşımıyla çevresel açıdan tercih edilebilirliği gösteren bir etikettir. Bu etiketleme, üçüncü taraflarca yürütülen bir program kapsamında gerçekleştirilmekte olup birçok çevresel kritere dayanmaktadır (Kaya, 2011). Tip II çevre etiketi ise, çevresel etkilerin firmalar tarafından kendi teknik bilgileri doğrultusunda yapılan öz beyanlarla belirlendiği bir etikettir. Tip III çevre etiketi olarak bilinen Çevresel Ürün Beyanı (EPD), ISO 14025 standardı kapsamında hazırlanan ve bir ürünün çevresel performansını şeffaf bir biçimde belgeleyen dokümanlardır. EPD belgeleri; hammaddenin kaynağından çıkarılmasından başlayarak üretim, kullanım süreci ve yaşam sonu bertarafına kadar olan aşamaları, çalışma kapsamında seçilen süreçlere dayalı olarak bilimsel bir yöntemle doğru, açık ve sayısal biçimde değerlendirir. Bu belgelerin sonuçları, yetkilendirilmiş kuruluşlarca onaylanarak yayımlanır (Kalkan, 2020).

Bu çalışmada, Tip III çevre etiketi olarak bilinen EPD belgeleri üzerinden alüminyum profilin yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerinin karşılaştırmalı bir analizi yapılmıştır.

3. Alüminyum Profilin Yaşam Döngüsü Analizi ve Çevresel Etkileri

Bu çalışma kapsamında, Türkiye'de alüminyum profil üretim süreçleri ele alınmış, çevresel etki değerleri EPD belgeleri aracılığıyla analiz edilmiştir. Altı farklı üreticiye ait EPD belgeleri değerlendirilerek, sektörel bazda çevresel etkiler karşılaştırılmıştır. Rekabet hassasiyeti göz önünde bulundurularak belge isimleri A-B-C-D-E-F şeklinde harflerle kodlanmıştır. Her bir belgede "1 kg alüminyum profil üretimi için" ürün aşamasındaki (hammadde temini, nakliye, üretim) süreçlerde ortaya çıkan çevresel etkiler karşılaştırılmıştır.

EPD çalışmalarında "sistem sınırının" mutlaka belirtilmesi gereklidir. Sistem sınırı ile sisteme dahil edilecek birim süreçler tanımlanır. EPD belgeleri, tüm yaşam döngüsü için beşikten kapıya, beşikten mezara, beşikten beşiğe gibi süreçler için hazırlanabilir (Kalkan, 2020).

"Beşik", yapı malzemesinin üretiminde kullanılan hammaddenin çıkarılması ve üretilmesindeki gerekli olan enerjinin, hammaddenin ve kaynakların sistem içerisine alındığı yer ve zamanı, "Mezar", kullanılan kaynakların doğaya geri döndüğü yer ve zamanı, "Kapı" ise üretilen yapı malzemesinin kullanılmak üzere, inşaat alanına götürüldüğü yer ve zamanı ifade eder (Curran, 2006). EPD çalışmalarındaki sistem sınırları, **Tablo 1**'de gösterilmiştir.

Tablo 1: Ürün Yaşam Döngüsü Sistem Sınırları

Bina / Ürün Yaşam Döngüsü

<table>
<tr><th>A1-A3</th><th>A4-A5</th><th>B1-B7</th><th>C1-C4</th><th>D</th></tr>
<tr><td>Ürün Aşaması</td><td>İnşa Aşaması</td><td>Kullanım Aşaması</td><td>Yaşam Sonu Aşaması</td><td>Sistem Sınırları Dışında Potansiyel</td></tr>
<tr><td>A1: Hammadde Temini</td><td>A4: İnşaat Alanına Nakliye</td><td>B1: Kullanım</td><td>C1: Yıkım</td><td>Tekrar kullanım ve geri dönüşüm</td></tr>
<tr><td>A2: Nakliye</td><td>A5: İnşa</td><td>B2: Bakım</td><td>C2: Nakliye</td><td rowspan="7"></td></tr>
<tr><td>A3: Üretim</td><td rowspan="6"></td><td>B3: Onarım</td><td>C3: Atık Ayırımı</td></tr>
<tr><td rowspan="5"></td><td>B4: Yenileme</td><td>C4: Bertaraf</td></tr>
<tr><td>B5: İyileştirme</td><td rowspan="4"></td></tr>
<tr><td>B6: Enerji Tüketimi</td></tr>
<tr><td>B7: Su Tüketimi</td></tr>
<tr><td>Zorunlu (Beşikten Kapıya)</td><td colspan="3">Opsiyonel</td><td rowspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="4">Zorunlu (Beşikten Mezara)</td></tr>
<tr><td colspan="5">Zorunlu (Beşikten Beşiğe)</td></tr>
</table>

EPD belgesinin "beşikten kapıya" modülü; yapı malzemesinin üretimi için gerekli olan hammaddenin doğadan elde edilmesinden başlayarak, hazırlanması, işlenmesi, bazı durumlarda; birkaç hammaddenin birleşerek ara ürün oluşturması ve oluşan nihai yapı malzemesinin inşaat sahasına taşınması sürecini kapsamaktadır (Domone ve Illston, 2010). Standarda göre A1 (Hammadde temini), A2 (Nakliye) ve A3 (Üretim) modüllerinin beyanı zorunlu olup, diğer modüllerin beyanı tercihe bağlı olmaktadır. A1'den A3'e kadar olan modüllerin beyanı beşikten kapıya sistem sınırını oluşturmaktadır.

EPD belgesinin "beşikten mezara" modülü; yapı malzemesi üretimi için gerekli olan hammaddenin doğadan elde edilmesiyle başlayıp, faydalı hizmet ömrünün sona erip, doğaya geri dönmesiyle biten süreci kapsamaktadır (Curran, 2006). Standarda göre, A1'den C4'e kadar olan modüllerin zorunlu beyanı beşikten mezara sistem sınırını oluşturmaktadır.

EPD belgesinin "beşikten beşiğe" modülü; yapı malzemesi ölçeğinde, kapalı malzeme ve enerji döngüsü olarak tanımlanmaktadır. Gerekli olan kaynakların, doğadan elde edilme sürecinden başlayıp, yapı üretimine katılmasını, yapıdaki işlevi sona erdikten sonra ise geri dönüştürülerek veya mevcut haliyle başka bir yapıda tekrar kullanılmasını içerir (Günaydın, 2011). Standarda göre A1'den D'ye kadar olan modüllerin beyanı beşikten beşiğe sistem sınırını oluşturmaktadır.

Çalışma kapsamında, Türkiye'de 1 kg alüminyum profil üretimi için EPD sertifikasına sahip firmaların bina yaşam döngüsü seviyeleri **Tablo 2**'de gösterilmiştir. Altı belge de "beşikten kapıya" kapsam sınırlılıklarında modüllerini beyan etmektedir.

Tablo 2: Erişilen EPD Belgelerinin Kapsamları

Alüminyum Profil için EPD Sertifikası Alan Firmalar (Tr)	EPD Kapsamı	Deklere Edilen Başlıklar
BELGE A	Beşikten Kapıya	A1-A2-A3-C1-C2-C3-C4-D
BELGE B	Beşikten Kapıya	A1-A2-A3-A4-A5-C1-C2-C3-C4-D
BELGE C	Beşikten Kapıya	A1-A2-A3-C1-C2-C3-C4-D
BELGE D	Beşikten Kapıya	A1-A2-A3-C1-C2-C3-C4-D
BELGE E	Beşikten Kapıya	A1-A2-A3-A4-C1-C2-C3-C4-D
BELGE F	Beşikten Kapıya	A1-A2-A3-A4-C1-C2-C3-C4-D

Tablo 3'te, Türkiye'de altı farklı üreticiye ait 1 kg alüminyum profil üretiminin ürün aşaması çevresel etki değerleri EPD belgeleri aracılığıyla analiz edilmiştir. Çevresel etki değerlerinin karşılaştırılmasında yeşil renk, mavi renge kıyasla daha düşük çevresel etkiyi temsil etmektedir. Yapı elemanlarının çevresel beyanları EN 15804 standardına göre hazırlanır. Bu standart, ürünlerin yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerinin şeffaf ve karşılaştırılabilir bir şekilde sunulmasını amaçlar (CEN, 2019). EN 15804, belirli çevresel etki kategorileri için mutlak minimum performans değerleri veya eşik değerler tanımlamamaktadır. Standardın temel amacı, ürünlerin çevresel performansının standart bir metodoloji ve raporlama formatıyla beyan edilmesini sağlamaktır.

Tablo 3: Ürün aşaması sınırlılıklarında çevresel etki parametrelerinin karşılaştırılması

Çevresel Etki	Birim	Belge A	Belge B	Belge C	Belge D	Belge E	Belge F
Fosil Kaynaklı Küresel Isınma- GWP	kg CO_2 eşd.	13.9	18.6	12.8	6.07	11.4	9.70
Ozon Tüketme - ODP	kg CFC 11 eşd.	5.39E-07	4.47E-07	5.94E-07	0.16E-06	808E-09	766E-09
Asidifikasyon - AP	mol H+ eşd.	0.089	0.0991	0.087	0.0329	0.090	0.076
Tatlı Su Ötrofikasyon-EP	kg PO_4^{3-} eşd.	0.007	0.000439	0.006	0.002	0.004	0.004
Deniz Ötrofikasyonu-EP	kg N eşd.	0.013	0.0137	0.013	0.0045	0.012	0.010
Kara Ötrofikasyonu - EP	kg N eşd.	0.146	0.155	0.138	0.0446	0.120	0.103
Fotokimyasal Oksidasyon - POCP	kg NMVOC eşd.	0.043	0.0632	0.048	0.0205	0.038	0.034
Fosil Kaynak Tüketimi-ADP	MJ	146	232	130	62.3	110	95.6
Su Yoksunluğu - WDP	m^3 eşd.	2.17	2	2.28	5.73	4.48	3.50

Fosil kaynaklı küresel ısınma potansiyeli, fosil yakıtların kullanımı sonucu atmosfere salınan sera gazlarının küresel ısınmaya etkisini ölçen bir göstergedir (URL-2). Ozon tüketme potansiyeli, bir maddenin stratosferdeki ozon tabakasını inceltme kapasitesini ölçen bir metriktir (URL-3). Asidifikasyon potansiyeli, atmosfere salınan sülfür dioksit (SO_2), azot oksitler (NO_x) ve amonyak (NH_3) gibi asidik gazların çevrede asit birikimine neden olma kapasitesini ölçen bir metriktir (URL-4). Tatlı su ötrofikasyon potansiyeli, su ekosisteminde aşırı besin girişi nedeniyle aşırı alg büyümesi, oksijen tükenmesi ve sonuç olarak ekosistem dengesinin bozulması riskidir (URL-5). Deniz ötrofikasyon potansiyeli, deniz ekosistemlerinde aşırı besin girişi nedeniyle aşırı alg büyümesi, oksijen tükenmesi ve sonuç olarak su kalitesinin düşmesi riskidir (URL-6). Kara ekosistemi ötrofikasyon potansiyeli, karasal ortamlarda besin maddelerinin, özellikle azot ve fosfor bileşiklerinin, aşırı birikimi sonucu bitki örtüsünde ve toprak yapısında meydana gelen değişiklikleri ifade eder (URL-7). Fotokimyasal oksidasyon oluşma potansiyeli, güneş ışığı veya diğer ışık kaynaklarının varlığında, atmosferdeki kirleticilerin kimyasal reaksiyonlara girerek ozon, peroksiasetil nitrat ve diğer zararlı bileşikler oluşturma eğilimidir (Seinfeld vd., 2016). Fosil kaynak tüketimi, kömür, petrol ve doğalgaz gibi fosil yakıtların enerji üretimi amacıyla kullanılmasıdır. Bu tüketim, hem kaynakların tükenmesine hem de sera gazı salımları yoluyla çevresel sorunlara yol açmaktadır (URL-8). Su yoksunluğu potansiyeli, su kaynaklarının, mevcut ve gelecekteki talepleri karşılayamama riskini ifade eder (URL-9).

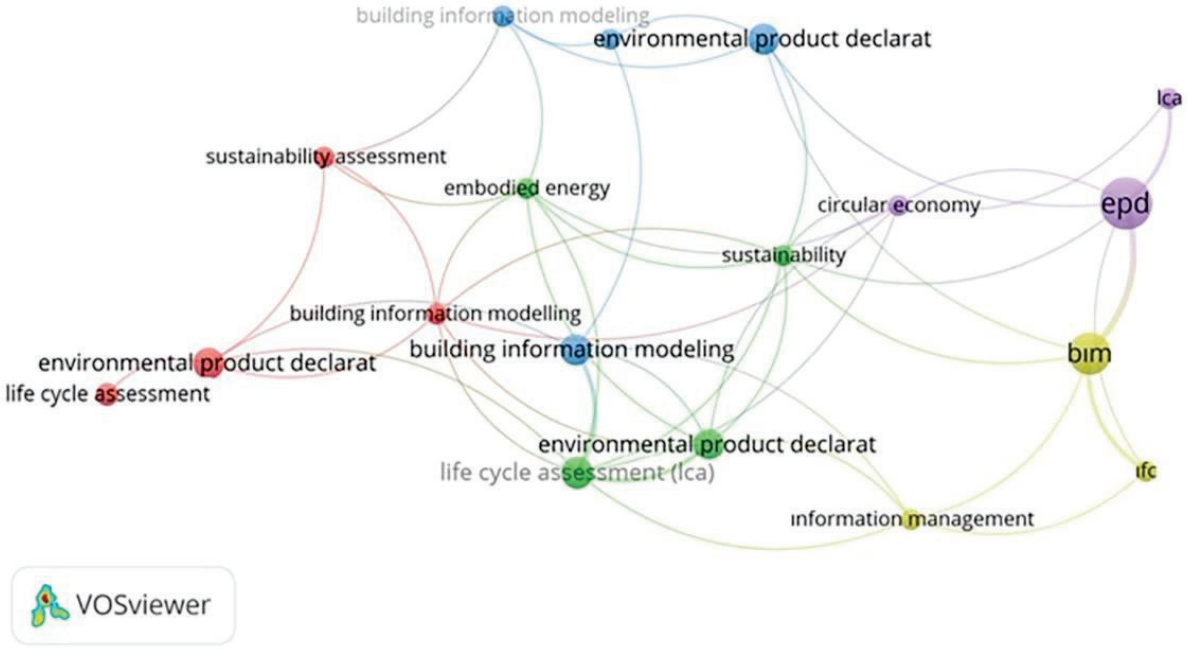
Yapı malzemesi seçim süreçlerinde çevresel etkilerin dikkate alınması, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada büyük önem taşımaktadır. EPD belgeleri, yapı sektöründe malzeme seçimi için karşılaştırılabilir veri setleri sunarak tasarım kararlarını yönlendirebilmektedir. Bu belgeler, mimarlar ve mühendisler için önemli bir karar destek aracı olarak kullanılır ve sürdürülebilir bina sertifikasyon sistemlerinde önemli bir rol oynar. LEED v4.1 sürdürülebilir bina sertifikasyonu kapsamında **"**Malzemeler ve Kaynaklar" başlığı, yapı malzemelerinin yaşam döngüsü etkilerinin azaltılmasını ve çevreye duyarlı ürün kullanımının teşvik edilmesini hedeflemektedir. Bu kapsamda, EPD belgesine sahip malzemelerin tercih edilmesi, sistem puanlamasına katkı sağlamaktadır (URL-10).

Bu çalışma kapsamında, altı farklı EPD belgesine ait veriler manuel olarak tablolaştırılmış ve karşılaştırmalı analiz gerçekleştirilmiştir. **Tablo 3** verileri, Belge D'nin hammadde temini ve üretim süreçlerindeki farklılıklar nedeniyle iki çevresel etki dışında minimum değerler sergilediğini ve en düşük çevresel etkiyi temsil ettiğini ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, bu profilin kullanıldığı yapı bileşenlerinde çevresel etkinin minimize edilmesi beklenmektedir.

4. EPD Tabanlı Karar Destek Sistemlerinin BIM Entegrasyonu

Yapı sektörünün yüksek düzeyde kaynak tüketimi ve çevresel etkisi, sürdürülebilir ve döngüsel uygulamalara geçişi zorunlu kılmaktadır. Bilgi teknolojileriyle desteklenen Yapı Bilgi Modellemesi (BIM), tasarımdan yıkıma kadar uzanan süreçte yaşam döngüsü verilerinin yönetimini sağlayarak bu dönüşümde önemli bir rol üstlenmektedir. Ancak mevcut BIM modelleri, gömülü yaşam döngüsü ve döngüsellik verilerinden büyük ölçüde yoksundur ve bu durum, sürdürülebilirlik entegrasyonunun etkinliğini sınırlamaktadır (Pibal vd., 2025).

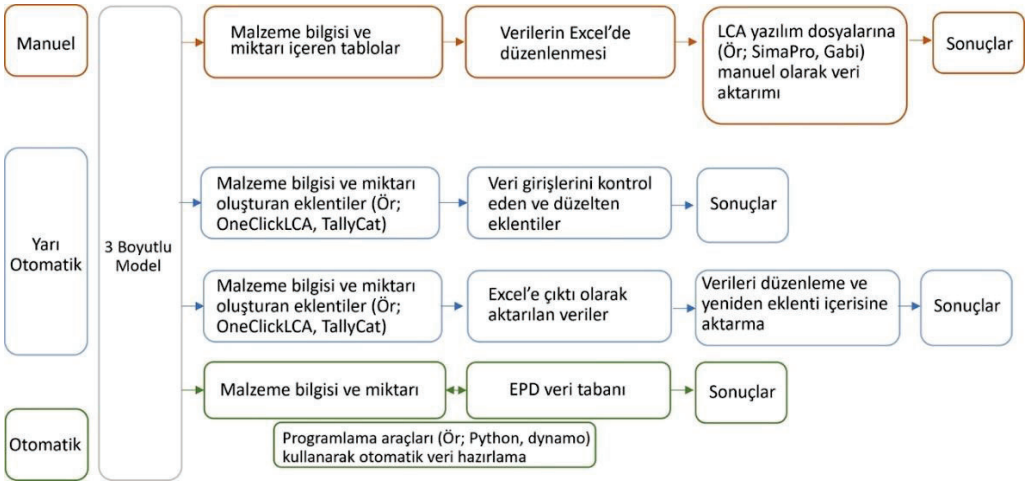
Yazılım teknolojilerinin yapı sektöründe sürekli olarak gelişmesiyle birlikte, BIM tabanlı programlara (Revit) entegre edilebilen çeşitli eklentiler aracılığıyla yapı malzemelerinin çevresel etki analizleri daha etkin biçimde gerçekleştirilebilmektedir. Bu bağlamda, EPD tabanlı karar destek sistemlerinin BIM ile entegrasyonunun incelendiği bu bölümde, Scopus veri tabanı kullanılarak "BIM" ve "EPD" anahtar kelimeleriyle başlık, özet ve anahtar kelime alanlarında tarama yapılmış ve herhangi bir sınırlama uygulanmaksızın toplam 27 bilimsel yayına ulaşılmıştır. Elde edilen literatür, 2009–2025 yılları arasındaki dönemi kapsamaktadır. Elde edilen veriler, VOSviewer yazılımı ile anahtar kelime haritalama yöntemi kullanılarak görselleştirilmiştir (**Şekil 1**). Scopus veri tabanından elde edilen bibliyografik veriler temelinde yapılan analizde, toplam 89 anahtar kelime değerlendirilmiş, minimum iki kez kullanılmış olan 18 anahtar kelime üzerinden kümelenmeler oluşturulmuştur. Bu kümeler, renklerine göre beş farklı gruba ayrılmıştır.



Şekil 1: VOSviewer şeması

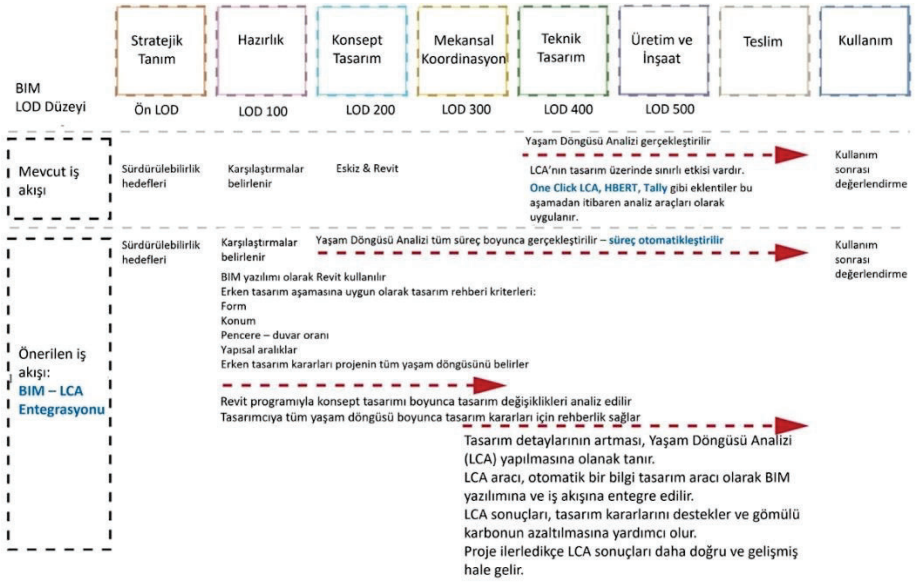
İncelenen 27 yayın içerisinde, yalnızca iki çalışmada BIM tabanlı Autodesk Revit programına entegre edilen OneClickLCA ve Tally gibi yaşam döngüsü analizi (LCA) eklentilerine yer verildiği tespit edilmiştir (Sinclair vd., 2024; Lima vd., 2024). Bu eklentiler, yapı projelerinin çevresel etkilerini analiz etmeye yönelik olarak Revit ile uyumlu geliştirilmiş yazılım araçlarıdır. Tally veri tabanı, Kuzey Amerika'daki malzeme üreticilerinin beyan ettiği belgeleri içermektedir. OneClickLCA, Ecoinvent yaşam döngüsü analizi veri tabanına ve malzeme üreticilerinin beyan ettiği EPD belgelerine erişim sağlayan bir veri altyapısı sunmaktadır (Lima, 2024). Bu çalışma kapsamında incelenen EPD belgelerinden Belge F, One Click LCA eklentisinin veri tabanında yer almakta olup, Revit programı aracılığıyla belge içerisinde yer alan çevresel verilere doğrudan erişim sağlanabilmektedir. Eklentiler, Revit modeli üzerinden yarı otomatik biçimde yaşam döngüsü analizlerinin gerçekleştirilmesine olanak tanımaktadır. **Şekil 2**'de, OneClickLCA ve Tally eklentileri aracılığıyla yürütülen bilgi akışı "yarı otomatik" olarak sınıflandırılmıştır. Revit modeli üzerinde seçilen malzemelere ait çevresel etkiler, miktar ve malzeme bilgileriyle eşleştirilerek ilgili eklentiler aracılığıyla elde edilebilmektedir. Ancak doğru veri aktarımının sağlanabilmesi, Revit modelinin detay seviyesine (LOD) doğrudan bağlıdır. Modeldeki geometrik detay eksiklikleri ile malzeme tanımlamaları ve etiketlendirmeleri nedeniyle bazı uyumsuzluklar yaşanmakta, bu da elde edilen verilerin manuel olarak kontrol edilmesini ve düzeltilmesini zorunlu kılmaktadır. Örneğin, bir alüminyum çerçevenin eklenti ile doğru eşleştirilebilmesi için Revit modelinde tanımının "Mullion_Frame_length×width×height(depth)" şeklinde detaylı bir biçimde tanımlamasının yapılması gerekmektedir. Bu tür düzenlemeler nedeniyle bilgi akışı süreçleri "yarı-otomatik" olarak tanımlanmıştır (Lima, 2024). Mevcut durumda BIM'in farklı LOD seviyelerinde eklenti aracılığıyla EPD verilerinin kullanımının doğrudan uygulanamadığı, ancak çevresel göstergeler ve malzeme/ürün performanslarına ilişkin bilgilerin uygulanmadan önce uygun şekilde işlenmesi gerektiği görülmektedir (Palumbo vd., 2020).

Dunant vd. (2021), erken aşamada alınan doğru tasarım kararlarının gömülü karbonu yarı yarıya azaltabileceğini belirtmektedir. Bu hedefe ulaşmak için tasarımcıların, bir binanın çevresel etkisini en çok hangi malzeme ve boyutlandırma kararlarının belirlediğini ve hangi kararların daha az etkili olduğunu daha iyi anlamaları gerektiği ifade edilmektedir (Basbagill vd., 2013). Revit eklentileri (OneClickLCA - Tally) ile günümüzde gelinen noktada analizler detaylı tasarım aşaması tamamlandıktan sonra gerçekleştirilmektedir. Bunun temel nedeni, BIM modelinin erken aşamalarında düşük detay seviyesine (LOD 200) sahip olmasıdır; bu aşamalarda yalnızca genel yapı elemanları kullanıldığından, doğru bir yaşam döngüsü karbon analizi yapılması mümkün olmamaktadır (Röck vd., 2018).



Şekil 2: BIM-LCA yaklaşımını kullanarak bilgi alışverişi için olasılıklar (Lima vd., 2024)

Sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda oluşturulan mevcut iş akışı şeması, OneClickLCA, HBERT, Tally gibi eklenti araçlarının LOD 400 seviyesinden itibaren analiz aracı olarak kullanıldığını göstermektedir (**Şekil 3**). Sinclair ve arkadaşlarının önerdiği iş akışı modelinde, LOD 100 konsept tasarım aşamasından itibaren Revit yazılımı kullanılması durumunda, gömülü karbon analizlerinin tasarım süreci boyunca gerçekleştirilebilmesi mümkün hale gelmektedir. Tasarımın erken aşamalarında yapılan analizler, bilgilerin sürekli gözden geçirilmesine olanak tanıyarak tasarım sürecine yön verme kapasitesini artırmaktadır. Bu bağlamda, yarı otomatikleştirilmiş analiz süreçlerinin erken aşamalarda tasarım sürecine entegre edilmesi, karar alma mekanizmalarını destekleyerek gömülü karbon salımlarının azaltılmasına katkı sağlamaktadır. LOD 300 seviyesinden itibaren artan tasarım detayları, yaşam döngüsü analizi (LCA) yapılmasını mümkün kılmaktadır. Bu analiz aracı, yarı otomatik tasarım karar destek sistemi olarak BIM yazılımı iş akışına entegre edilmektedir. Elde edilen LCA sonuçları, tasarım kararlarını yönlendirerek gömülü karbonun azaltılmasına katkı sunmaktadır. Proje ilerledikçe, LCA sonuçları daha doğru ve kapsamlı hale gelmekte, böylece karar destek süreçlerinin etkinliği artmaktadır. Mevcut durumda ise, bu analiz araçlarının yalnızca yüksek detay seviyesine (LOD 400) sahip projelerde kullanılabildiği belirlenmiştir (Sinclair vd., 2024).

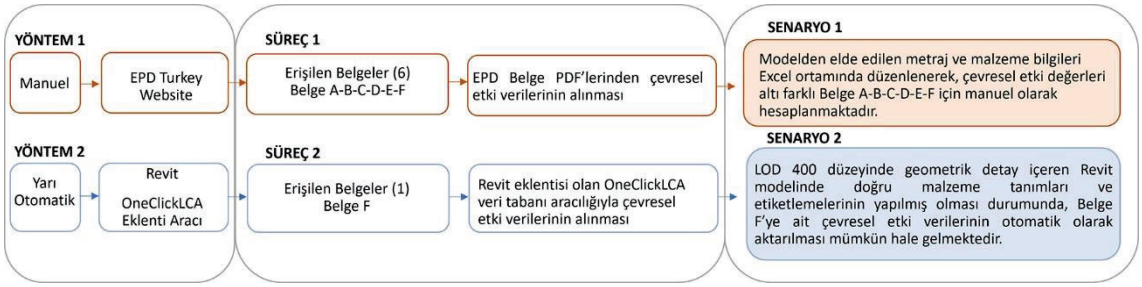


Şekil 3: Mevcut ve önerilen iş akışı (Sinclair vd., 2024)

5. Bulgular

Bu çalışmada, Türkiye'deki alüminyum profil üretiminin çevresel etkilerinin analizi ve malzeme seçimi amacıyla iki farklı veri erişim yöntemi incelenmiştir. Yapı malzemesi seçim süreçlerinde, bu yöntemlerin farklılıkları ve avantajları değerlendirilmiştir. Teknolojik gelişmelerin sağladığı faydalar sayesinde, çevresel verilere ilişkin içerikler içerik

değişmemekle birlikte, bu verilere erişim yöntemlerinin gelişmişliği; verilerin dijital ortamda daha etkin bir biçimde yönetilmesine ve güncellenmesine olanak tanımaktadır. Araştırma bulguları, yapı sektöründe EPD belgelerinin kullanılabilirliğini ve LCA eklenti araçlarının BIM yazılımlarıyla entegrasyon potansiyelini ortaya koymaktadır. Teknolojik gelişmelerin sunduğu imkanlarla mevcut eklenti araçları yapı malzemesi seçim süreçlerini dijital ortamda kolaylaştırmasına rağmen, bazı zorluklar içerdiği de belirtilmiştir. Çalışmada elde edilen bulgular ışığında, iki farklı veri erişim yöntemi ve ilgili süreçler senaryolar halinde tasarlanmıştır (**Şekil 4**). Revit programında çizilmesi öngörülen bir mimari projede yer alan alüminyum cephe kaplamaları ve doğrama sistemlerinin çevresel etkilerinin hesaplanabilmesi için iki farklı senaryo sunulmuştur. Veri alışverişinin doğru bir şekilde ilerleyebilmesi için Sinclair ve diğerleri mevcut iş akışı çalışmasında, BIM modelinde LOD 400 detay seviyesinde teknik tasarım aşamasından itibaren eklenti araçlarının kullanılabildiğini belirtmiştir. Bu senaryo kapsamında, alüminyum cephe kaplamaları ve doğrama sistemlerine ait Revit modelinin LOD 400 detay seviyesinde olması esas alınarak çıkarımlar yapılmıştır.



Şekil 4: Veri erişim yöntemleri ve tasarlanan senaryolar

Senaryo 1 kapsamında, manuel veri toplama yöntemi kullanılarak EPD belgelerine erişim sağlanmıştır. Bu senaryoda, alüminyum cephe kaplamaları ve doğrama sistemlerinin metraj verileri Revit modelinden otomatik olarak elde edilmesine karşın, bu verilere ait çevresel etki değerleri altı farklı EPD belgesinden manuel olarak alınmıştır. Sürecin yüksek düzeyde zaman gerektirmesi ve kullanıcı kaynaklı hata olasılığı, bu yöntemin etkinliğini sınırlamaktadır. Manuel veri toplama yöntemiyle oluşturulan **Tablo 3**'e göre, Belge D'nin çevresel etki parametreleri açısından en düşük çevresel zarara sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Senaryo 2 kapsamında, Lima vd.'nin önerdiği yarı otomatik bilgi alışverişi süreci üzerinden ilerletilmiştir (**Şekil 2**). Çevresel etkilere ilişkin veri tabanına ve malzeme üreticilerinin beyan ettiği EPD belgelerine, Revit programına entegre edilen OneClickLCA eklenti aracı aracılığıyla erişim sağlanabilmektedir. Çalışma kapsamında incelenen belgelerden yalnızca Belge F'ye ait verilere bu entegrasyon sayesinde yarı otomatik yöntem ile erişim sağlanabilmektedir. Bu senaryoda OneClickLCA yazılımı sayesinde, Revit modeli üzerinden alüminyum cephe kaplamaları ve doğrama sistemlerinin malzeme ve miktar bilgileri Belge F'ye ait çevresel etki verileriyle eşleştirilerek hızlı bir şekilde çevresel etki analizi yapılabilir. Bu dijital araç sayesinde, birkaç işlem adımıyla Revit mimari projesindeki tüm alüminyum cephe kaplamaları ve doğrama sistemlerinin yaşam döngüsüne ilişkin karbon ayak izi, küresel ısınma potansiyeli ve diğer çevresel etkiler kolaylıkla görüntülenebilmektedir. Bununla birlikte, bu yöntemin etkinliği, seçilen malzemelere ait EPD belgelerinin yazılım veri tabanında bulunmasıyla sınırlıdır. Mevcut çalışmada, yalnızca bir EPD belgesine ulaşılabilirken, diğer beş belge yazılımda yer almadığı için senaryo kapsamında değerlendirilememiştir. Tüm ilgili EPD belgelerinin entegrasyonu durumunda ise, LOD 400 detay seviyesinde modellenmiş bir BIM projesinde, doğru malzeme etiketleri aracılığıyla tüm alüminyum cephe kaplamaları ve doğrama sistemlerinin çevresel etkileri kapsamlı ve hızlı bir şekilde analiz edilebilecek, farklı belgeler arasında karşılaştırma yapılması ve malzeme seçimi süreçleri dijital ortamda önemli ölçüde iyileştirilebilecekti. BIM ortamının sunduğu olanaklar sayesinde, tasarım sürecinde gerçekleştirilen geometrik ve geometrik olmayan revizyonlar modele eş zamanlı olarak entegre edilebilmekte, böylece yapı bileşenlerine ilişkin veriler, merkezi bir dijital model üzerinden etkin biçimde yönetilebilmektedir.

Bu bulgular, yarı otomatik veri erişim yöntemlerinin veri doğruluğu, hız ve verimlilik açısından manuel yöntemlere göre önemli avantajlar sunduğunu, ancak mevcut veri tabanlarının sınırlı olması nedeniyle henüz tam etkinlik sağlanamadığını göstermektedir. Ayrıca, BIM tabanlı analizlerde kullanılan modellerin yüksek detay seviyesinde olması gerekliliği, veri entegrasyonunun zorluklarından biri olarak öne çıkmaktadır. Örneğin, düşük detay seviyesine sahip (LOD 200) modellerde yapılan analizler, eksik veya hatalı sonuçlar üretebilirken, yüksek detay seviyesinde (LOD 400) hazırlanan modeller, daha doğru ve kapsamlı sonuçlar sağlayabilir.

6. Sonuçlar

Bu çalışmada, Türkiye'de üretilen alüminyum profillerin yaşam döngüsü boyunca ortaya çıkan çevresel etkileri, EPD belgeleri aracılığıyla karşılaştırılmış ve malzeme seçimi için iki farklı veri erişim yöntemi incelenmiştir. Teknolojik ilerlemelerin sunduğu avantajlar sayesinde, çevresel verilere ait içerikler değişmese de, bu verilere erişim yöntemlerinin dijitalleşmesi, verilerin dijital ortamda daha verimli yönetilmesine ve güncellenmesine olanak sağlamaktadır.

Çalışmada, sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda EPD belgelerinin yapı malzemesi seçim süreçlerinde önemli bir karar destek aracı olduğu vurgulanmaktadır. BIM sistemlerinin EPD verileriyle entegrasyonu, malzeme seçim süreçlerinin dijital ortamda yönetilebilirliğini artırma potansiyeline sahiptir. BIM yazılımlarına entegre edilen OneClickLCA gibi araçlar, alüminyum gibi enerji yoğun malzemelerin çevresel etkilerinin ileri tasarım aşamasında hesaplanmasına olanak tanıyarak, farklı malzemelerin çevresel etkilerinin karşılaştırılmasını mümkün kılmaktadır. Ancak, mevcut durumda BIM yazılımlarına entegre edilen LCA eklentisinin veri tabanında çalışma kapsamında incelenen tüm EPD belgelerinin yer almaması, bu entegrasyonun etkinliğini sınırlamaktadır. Ayrıca, BIM modellerinin yüksek detay seviyesinde (LOD 400) olması ve malzeme tanımlamalarının doğru yapılması gerekliliği de bir zorunluluk olarak karşımıza çıkmaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışma, çevresel ürün beyanlarının yapı malzemesi seçim süreçlerinde şeffaf ve karşılaştırılabilir veri sunma işlevinin, sürdürülebilir yapı tasarımı açısından stratejik bir rol oynadığını ve BIM entegrasyonunun bu potansiyeli artırdığını göstermektedir. Bu belgelerin BIM yazılımlarıyla entegre şekilde kullanılabilmesi, tasarım sürecinin ileri aşamalarında çevresel etki analizlerinin hesaplanmasını sağlamaktadır.

Gelecek çalışmalarda, yapı sektörünün döngüsel ekonomi hedeflerine ulaşabilmesi için OneClickLCA gibi BIM eklentilerinin kapasitelerinin artırılması ve veri tabanlarının daha fazla EPD belgesiyle genişletilmesi, farklı malzemeler için kapsamlı, doğru ve hızlı çevresel analizlerin yapılmasına olanak tanıyacaktır. Revit modellerindeki malzeme tanımlamaları ile EPD belgelerinde yer alan malzeme isimlerinin doğru eşleştirilmesi için ortak bir isimlendirme standardı oluşturulması gereklidir. Bu durum, veri uyumsuzluğunun önlenmesine ve analiz süreçlerinin hızlanmasına katkı sağlayacaktır. LOD 100 ve LOD 200 seviyelerinde daha kapsamlı çevresel değerlendirme yapılabilmesi için erken aşama analiz araçlarının geliştirilmesi ve tasarım sürecine entegre edilmesi faydalı olacaktır.

KAYNAKLAR

Basbagill, J., Flager, F., Lepech, M., & Fischer, M. (2013). Application of life-cycle assessment to early stage building design for reduced embodied environmental impacts. *Building and Environment, 60*, 81–92. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.11.009

Bribián, I. Z., Capilla, A. V., & Usón, A. A. (2011). Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. *Building and Environment, 46*(5), 1133–1140. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.12.002

CEN. (2019). *EN 15804:2012+A2:2019 Sustainability of construction works - Environmental Product Declarations - Core rules for the product category of construction products*. European Committee for Standardization

Curran, M. A. (2006). *Life cycle assessment: Principles and practice (EPA/600/R-06/060)*. U.S. Environmental Protection Agency.

Domone, P., & Illston, J. (2010). *Construction materials: Their nature and behaviour*. Spon Press, Taylor & Francis Group. https://doi.org/10.1201/9781315272436

Dunant, C. F., Drewniok, M. P., Orr, J. J., & Allwood, J. M. (2021). Good early stage design decisions can halve embodied CO_2 and lower structural frames' cost. *Structures, 33*, 343–354. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.04.033

Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The circular economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production, 143*, 757–768. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048

Günaydın, G. (2011). *Sürdürülebilirlik kapsamında çevresel ürün bildirgelerinin yapı sektöründe uygulanması: Türkiye için öneri* [Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. http://hdl.handle.net/11527/8119

International Organization for Standardization. (2006). *ISO 14025: Environmental labels and declarations — Type III environmental declarations — Principles and procedures*. https://www.iso.org/standard/38131.html

International Organization for Standardization. (2006). *ISO 14040: Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework*. International Organization for Standardization. https://www.iso.org/standard/37456.html

Kalkan, N. (2020). *Metro istasyonlarında kullanılan kaplama malzemelerinin, üretim ve kullanım süreci çevresel etkilerinin değerlendirilmesi: Çırçır İstasyonu örneği* [Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi].

Kaya, K. (2011). *Sürdürülebilir binalar için çevresel ürün bildirimine sahip yapı malzemeleri konusunda Türkiye'de mevcut durumun irdelenmesi* [Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi].

Lima, M. S. S., Duarte, S., Exenberger, H., Fröch, G., & Flora, M. (2024). Integrating BIM-LCA to enhance sustainability assessments of constructions. *Sustainability, 16*(3), 1172. https://doi.org/10.3390/su16031172

One Click LCA®. (n.d.). *World's fastest Building Life Cycle Assessment software - One Click LCA* [Computer software]. https://www.oneclicklca.com/ (Erişim Tarihi: 23.03.2025)

Palumbo, E., Soust-Verdaguer, B., Llatas, C., & Traverso, M. (2020, August 26). *How to obtain accurate environmental impacts at early design stages in BIM when using Environmental Product Declaration: A method to support decision-making*. *Sustainability 12*(17), 6927. https://doi.org/10.3390/su12176927

Pibal, S. S., Bittner, R., & Kovacic, I. (2025). A BIM-Based Framework for Life Cycle, Cost, and Circularity Data Integration in Environmental Impact Assessment. *Sustainability, 17*, 2656. https://doi.org/10.3390/su17062656

Röck, M., Hollberg, A., Habert, G., & Passer, A. (2018). LCA and BIM: Visualization of environmental potentials in building construction at early design stages. *Building and Environment, 140*, 153–161. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.05.006

Sayın, M. (2020). *Yeşil bina üretiminde yaşam döngüsü değerlendirmesi yöntemi kapsamında çevresel ürün beyanlarının yapılarda uygulanması* [Yüksek lisans tezi, Kocaeli Üniversitesi].

Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2016). *Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change* (3rd ed.). John Wiley & Sons.

Sinclair, C., & Alwan, Z. (2024). The integration of early stage life cycle analysis into architectural practice through an IT supported process. In *Proceedings of the 2024 European Conference on Computing in Construction*, Chania, Crete, Greece.

TS EN ISO 14020. (2002). *Çevre etiketleri ve beyanları - Genel prensipler*, Ankara.

United Nations Environment Programme, & International Resource Panel (2013). *Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure*. https://wedocs.unep.org/20.500.11822/8423.

URL1. EPD Turkey. https://epdturkey.org/tr (Erişim Tarihi: 22.02.2024)

URL2. Semtrio. *Fosil Yakıtlar: Tanımı, Kullanım Alanları ve Zararları*. https://www.semtrio.com/blog/fosil-yakitlar-tanimi-kullanim-alanlari-ve-zararlari (Erişim Tarihi: 13.03.2025)

URL3. DCCEEW. Ozone depleting substances.https://www.dcceew.gov.au/environment/protection/ozone/ozone-science/ozone-depleting-substances (Erişim Tarihi: 10.04.2024)

URL4. Yılmaz, Ö. (2023). Türkiye'nin Döngüsel Ekonomiye Geçiş Potansiyelinin Değerlendirilmesi için Teknik Destek Projesi https://webdosya.csb.gov.tr/db/dongusel/icerikler/yasam-dongusu-anal-z--yda-ned-r__tr-20231213163833.pdf (Erişim Tarihi: 13.03.2025)

URL5. Yiğit, S. (2004). Göllerde ötrofikasyon problemleri ve çözüm yolları. *JMO Haber Bülteni*, (09). https://www.jmo.org.tr/resimler/ekler/d8a50ec3ae01661_ek.pdf (Erişim Tarihi: 10.04.2024)

URL6. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2022). Deniz kalitesi bülteni: Marmara Denizi. Çevresel Etki Değerlendirmesi, İzin ve Denetim Genel Müdürlüğü. https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/den-z-kal-tes--bulten--2022_marmara_den-z--20230720163728.pdf (Erişim Tarihi: 10.04.2024)

URL7. Omu. Çevre Bilimi Ders Notları. https://avys.omu.edu.tr/storage/app/public/eomca/53186/%C3%87evre-Bilimi-Ders-Notlar%C4%B1.pdf (Erişim Tarihi: 10.04.2024)

URL8. International Energy Agency. (2023). World Energy Outlook 2023. https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023 (Erişim Tarihi: 10.04.2024)

URL9. Tarım ve Orman Bakanlığı Su Yönetimi Genel Müdürlüğü. (2021). *İçme Suyu Sektöründe Su Verimliliğine İlişkin Rehber Dokümanı*. Ankara, Türkiye. https://www.suverimliligi.gov.tr/wp-content/uploads/2023/01/Icme-suyu-sektoru-Su-Verimliligi-Rehber-Dokumani.pdf (Erişim Tarihi: 10.04.2024)

URL10. Carroll, A. (2024, October 8). *Review of LEED v4.1 EPD credits*. One Click LCA. *LEED v4.1 EPD Credits*. https://oneclicklca.com/en/resources/articles/leed-v4-1-epd-credits/ (Erişim Tarihi: 03.04.2024)

MSTAS 2025 MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Yapı Malzemesi Seçiminde Sürdürülebilirlik, Karbon Emisyonu ve Yapay Zekâ: Sistematik Literatür Taraması ve Meta Analizi

Elif Basumli[1]; Beyza Nur Yelten[2]; Melek Obak[3]; Gizem Can[4]
[1,2,3,4]İstanbul Medipol Üniversitesi
[1]elifbasumli@gmail.com; [2]beyzayltn@gmail.com; [3]melekobak@gmail.com; [4]gizem.can@medipol.edu.tr

Özet

İnşaat sektörü hem alt yapı hem üst yapı kapsamında insan hayatında pek çok olumlu etkiye sahip olan ve ekonomik açıdan da pek çok ülkede etki değeri yüksek bir sektördür. Aynı zamanda inşaat sektörü, özellikle yapım ve yıkım süreçlerinde doğası gereği enerji tüketimi, atık üretimi, kaynak tüketimi ve karbon emisyonu gibi olumsuz çevresel etkilerine de oldukça açık bir sektördür. Bu nedenle, bu olumsuz etkilerin farkına vararak ve gerekli tespitler yaparak bu etkilerin minimize edilmesi çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlayabilme açısından gereklidir. Günümüzde teknolojik gelişmelerin giderek hızlanması ve aynı zamanda da doğal kaynakların giderek tükenmesi de her sektörde olduğu gibi inşaat sektöründe de çözüme yönelik yeni arayışları ortaya çıkarmıştır. İnşaat sektöründe, bina yaşam döngüsü süreçlerinde çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması ve bu durumun gelişen teknolojilerle entegre edilebilmesi de bir ihtiyaç haline gelmeye başlamıştır. Tasarım süreçlerinden başlayarak, yapım ve yıkım süreçleri dâhil olmak üzere tüm projeyi bütüncül bir yaklaşımla ele almak sürdürülebilirliğin sağlanması için de önemlidir. Yapı malzemelerinin de bu noktada etkisi oldukça kritiktir. Seçimi doğru yapılan bir yapı malzemesinin, bina yaşam döngüsü boyunca, çevresel sürdürülebilirliğe katkısı da büyük olacaktır. Bu çalışmanın esas amacı da yapı malzemesi seçiminde sürdürülebilirlik ve karbon emisyonu gibi çevresel etkiler ile teknolojik bir gelişme olan yapay zekânın mevcut güncel literatürdeki yerini tespit etmek ve bu üç parametreyi bütünleşik biçimde değerlendirebilmektir. Bu kapsamında, Scopus ve Web of Science veri tabanlarındaki son 10 yıla ait çalışmalar incelenmiştir. Yapılan bu çalışma, araştırma sorusunun belirlenmesi, her iki veri tabanında ilgili ve tekrar eden çalışmaların bulunması ve tanımlanması, çalışmaların seçilmesi ve değerlendirilmesi, seçilen çalışmaların meta analizi ile incelenmesi ve bu çalışmaların değerlendirilmesi olmak üzere beş adımda tamamlanmıştır. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, yapı malzemesi seçiminde hem sürdürülebilirlik ve karbon emisyonu hem de yapay zekânın etkisine yönelik doğrudan çalışmaların henüz olmadığı belirlenmiş ve literatürde bu alandaki boşluk ortaya konmuştur. Bu çalışmanın bulgularının, bina yaşam döngüsü boyunca yapı malzemesi seçimindeki güncel ihtiyaçlar ve gelişen teknolojiler kapsamında mevcut çalışmaların tespit edilmesi ve gelecek çalışmalardaki potansiyellerin belirlenmesi açısından faydalı olacağına inanılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Bina Yaşam Döngüsü, Karbon Emisyonu, Çevresel Sürdürülebilirlik, Yapay Zekâ, Yapı Malzemesi.*

MSTAS 2025 MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Sustainability, Carbon Emissions, and Artificial Intelligence in Building Material Selection: A Systematic Literature Review and Meta-Analysis

Elif Basumli[1]; Beyza Nur Yelten[2]; Melek Obak[3]; Gizem Can[4]
[1,2,3,4]Istanbul Medipol University
[1]elifbasumli@gmail.com; [2]beyzayltn@gmail.com; [3]melekobak@gmail.com; [4]gizem.can@medipol.edu.tr

Abstract

The construction industry, encompassing both infrastructure and superstructure, is an industry that has significant positive impacts on human life and plays a major role in the economy of many countries. However, it is also an industry inherently prone to negative environmental impacts, such as energy consumption, waste production, resource depletion, and carbon emissions, particularly during construction and demolition. Therefore, recognizing these adverse effects and making necessary assessments to minimize them is crucial in contributing to environmental sustainability. The rapid advancement of technological developments and the increasing depletion of natural resources have, as in every industry, led to the emergence of new solutions in the construction industry. In this context, ensuring environmental sustainability throughout the building life cycle processes and integrating these efforts with evolving technologies has become essential. To ensure sustainability, it is essential to adopt a holistic approach to the entire project, starting with the design processes and including construction and demolition processes. The choice of building materials plays a critical role in this regard. Selecting appropriate building material can significantly contribute to environmental sustainability throughout the building's life cycle. The main aim of this study is to identify the position of artificial intelligence, technological development, in the current literature concerning environmental impacts, such as sustainability and carbon emissions in the selection of building materials, and to assess these three parameters in an integrated manner. In this context, studies from the last 10 years in the Scopus and Web of Science databases were reviewed. This study was completed in five steps: identifying the research question, locating and defining relevant and repetitive studies in both databases, selecting and evaluating the studies, analyzing the selected studies through meta-analysis, and evaluating the findings of these studies. As a result of the evaluations, it was determined that there are currently no direct studies addressing both sustainability and carbon emissions, as well as the impact of artificial intelligence in building material selection, highlighting a gap in literature. The findings of this study are believed to be useful for identifying current needs and emerging technologies in building material selection throughout the building life cycle, as well as for recognizing existing studies and determining the potential for future research in this area.

Keywords: *Artificial Intelligence, Building Life Cycle, Building Material Selection, Carbon Emissions, Environmental Sustainability.*

1. Giriş

İnşaat sektörü, enerji tüketimi, doğal kaynakların tükenmesi ve karbon ayak izi gibi çevresel etkilerin büyük bir payına sahip olduğu için, sürdürülebilir inşaat çözümleri bulmak büyük bir gereklilik haline gelmiştir (UNEP, 2020). GlobalABC (2020) raporları ve verileri inşaat sektörünün toplam CO_2 salınımının %38'inden sorumlu olduğunu ortaya koymaktadır. Aynı kaynaklara göre, önümüzdeki 30 yıl içinde dünya nüfusunun yaklaşık 2,5 milyar kişi daha artarak 10 milyarı aşacağı tahmin edilmektedir. Bu büyüme, insanların büyük ölçüde şehirlerde yaşayacağı bir geleceği öngörmektedir (Akça, 2021). Bu sürecin de binaların ve inşaat sektörünün çevreye ve iklim değişikliğine olan olumsuz etkisini büyük ölçüde artıracağını göstermektedir. Günümüzde inşa edilen her bina, gelecek nesillerin karbon salınım mirasının bir parçası olacağını ortaya koymaktadır. Bu durumda, inşaat sektörünün ve özellikle binaların sürdürülebilir nitelikte olan malzemelere, minimum seviyede atık üretimine, enerji verimliliği standartlarına ve sıfır karbonlu tasarım/yapım/yıkım tekniklerine odaklanması gerekmektedir. Akça (2021)'e göre, sektörün bu hedeflere yönelik bir dönüşümü, çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik öneme sahip olmakla birlikte yeşil malzemelerin kullanımı, enerji verimli binaların inşa edilmesi, karbon ayak izinin azaltılması ve çevre dostu uygulamaların benimsenmesi, inşaat sektörünün gelecekte daha sürdürülebilir ve çevre dostu bir yol izlemesini sağlayacaktır. Son yıllarda, yapay zekâ teknolojilerinin de hızla gelişmesi, inşaat sektöründe sürdürülebilirlik çabalarına olumlu açıdan önemli katkılar sağlamış ve yenilikçi çözümler geliştirilmesine olanak tanımıştır. Yapay zekâ, günümüzde bilimsel ve teknolojik gelişmelerin öncüsü olarak kabul edilmektedir. Bu disiplin, bilgisayar sistemlerini öğrenme, problem çözme ve karar verme yetenekleri ile donatma amacını taşımaktadır. Bu doğrultuda inşaat sektörünün, bu teknolojik ilerlemelerin avantajlarından yararlanarak daha verimli, sürdürülebilir ve akıllı çözümler geliştirebileceği düşünülmektedir (Varnalı, 2024).

Günümüzde bina yaşam döngüsünde ekonomik ve çevresel sürdürülebilirliğin sağlanabilmesi, bu kapsamda kaynakların etkin kullanımı, atık oluşumu ve olumsuz çevresel etkilerin minimize edilmesi amacıyla çözüm arayışları ortaya çıkmıştır. Bu çözüm arayışlarında ise, sürdürülebilirlik anlayışı ve yeni teknolojilerin entegre edilmesi önemli bir yere sahip olmaya başlamıştır. Bu nedenle, bu çalışmada binalarda yapı malzemesi seçiminde karbon salınımı ve sürdürülebilirlik ile yapay zekâ teknolojilerinin güncel literatürdeki yerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Böylece, gelecekte yapılacak çalışmalar için potansiyel çalışma alanlarının ortaya konması hedeflenmiştir. Söz konusu hedefe ulaşabilmek için ise, "yapı malzemesi seçiminde sürdürülebilirlik ve karbon salınımı" ve "yapı malzemesi seçiminde yapay zekâ" olmak üzere binalarda yapı malzemesi seçiminde çevresel etki ve teknolojinin ele alındığı iki kısımda incelenmiş ve sonuçları ayrı ayrı ve bütünleşik olarak ele alınmıştır. Bunun için ise, Scopus ve Web of Science veri tabanlarındaki İngilizce dilde, 2015-2024 yılları arasında yayımlanmış makaleler incelenmiştir.

2. Yöntem

Bu çalışmada sürdürülebilirlik ve karbon salınımı gibi çevresel etkiler ile teknolojik bir gelişme olan yapay zekanın mevcut güncel literatürdeki yerinin tespit edilmesi amacıyla PRISMA tekniği ile sistematik bir literatür taraması gerçekleştirilmiştir (Macquarie University, 2025). Bu taramanın ardından, meta analizi yapılmıştır. Yapılan bu çalışma toplamda beş adımdan oluşmaktadır. Bu adımlar aşağıdaki gibidir:

1. Çalışmanın ilk adımında araştırma sorusu ve çalışmanın amacı belirlenmiştir.
2. İkinci adımda; Scopus ve Web of Science veri tabanlarında "construction material and sustainability and carbon emission (yapı malzemesi ve sürdürülebilirlik ve karbon emisyonu)" ve "construction material and artificial intelligence (yapı malzemesi ve yapay zekâ)" anahtar kelimeleri kullanılarak İngilizce dilde ayrı ayrı tarama gerçekleştirilmiştir. Bu literatür taraması, sadece İngilizce dilinde, 2015-2024 yılları arasında yayınlanmış / basılmış makaleler kapsamında yapılmıştır. Her iki anahtar kelime grubunda elde edilen verilerin csv formatında dışarı aktarımı sağlanarak Microsoft Excel'e aktarılmıştır. Her iki anahtar kelime grubunda yapılan tarama için, araştırma amacı ve sorusuna göre seçilecek çalışmaları değerlendirmede önce tekrar eden kayıtları kaldırmak amacıyla iki veri tabanındaki toplam çalışmalar tespit edilmiştir. Son olarak, her iki anahtar kelime grubunda yapılan taramada tekrar eden çalışmalar Web of Science veri tabanından kaldırılmıştır.
3. Araştırmanın üçüncü adımı araştırma kapsamına uygun çalışmaların belirlenmesine yönelik olup, her iki anahtar kelime grubunda yapılan tarama için ayrı ayrı başlık taraması yapılmış ve yapılan bu çalışmanın kapsamına uygun çalışmalar tespit edilmiştir. Başlık taramasından sonra her iki anahtar kelime grubundaki çalışmaların, bu çalışmanın amacına uygun olarak "malzeme" odaklı ve "malzeme seçimi" odaklı çalışmalar olarak gruplandırılmış ve "malzeme seçimi" odaklı olan çalışmalar belirlenmiştir. "Malzeme seçimi" odaklı çalışmaların özetleri incelenerek bu çalışmanın amacına uygun makaleler tespit edilmiş ve seçilmiştir.

4. Bu adımda, "yapı malzemesi ve sürdürülebilirlik ve karbon emisyonu" ve "yapı malzemesi ve yapay zekâ" anahtar kelime gruplarında "malzeme seçimi" odağındaki çalışmalar "meta analizi yöntemi" ile incelenmiştir.
5. Araştırmanın son adımında ise; meta analizi yapılan ve "yapı malzemesi ve sürdürülebilirlik ve karbon emisyonu" ve "yapı malzemesi ve yapay zekâ" anahtar kelime gruplarına odaklanan çalışmalar ayrı konu başlıkları altında ve bütünleşik biçimde iki açıdan sentezlenmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

İnşaat sektöründe da yapı malzemesi seçiminde sürdürülebilirlik ve karbon emisyonu gibi çevresel etkiler ile yapay zekânın güncel literatürdeki yeri tespit edilmiş ve bu üç parametre bütünleşik biçimde ele alınmıştır. Buna göre;

1. Çalışmanın ilk adımı için genel bir literatür araştırması ve güncel çalışmaların incelenmesi sonucunda ortaya konan "yapı malzemesi seçiminde güncel ihtiyaç ve teknolojilerin yeri nedir?" ve "karbon salınımı ve sürdürülebilirlik ile yapay zekânın yapı malzemesi seçimindeki güncel durumu ne şekildedir?" araştırma soruları oluşturulmuştur. Bu araştırma sorularına ise bilimsel ve sistematik bir yanıt aranmıştır.
2. İkinci adımda, belirlenen anahtar kelime grupları sonucunda "yapı malzemesi ve sürdürülebilirlik ve karbon emisyonu" ile yapılan araştırmaya ilişkin Scopus'ta 831, Web of Science'ta 946 makale tespit edilmiştir. "Yapı malzemesi ve yapay zekâ" ile yapılan araştırmaya ilişkin ise Scopus'ta 581, Web of Science'ta 645 makale belirlenmiştir. "Yapı malzemesi ve sürdürülebilirlik ve karbon emisyonu" ile yapılan tarama sonucunda 391, "yapı malzemesi ve yapay zekâ" ile yapılan tarama sonucunda 239 adet tekrar eden makale Web of Science veri tabanından kaldırılmıştır.
3. Üçüncü adımda, kalan çalışmalar araştırma sorusu ve amacına ilişkin incelenmiş ve toplamda "yapı malzemesi ve sürdürülebilirlik ve karbon emisyonu" anahtar grubu için 179 ve "yapı malzemesi ve yapay zekâ" anahtar grubu için 38 sayıda çalışma listelenmiştir. "Malzeme" odaklı ve "malzeme seçimi" odaklı çalışmalar başlıklara göre gruplandırılmıştır. Sonuçta, "yapı malzemesi ve sürdürülebilirlik ve karbon emisyonu"na ilişkin 37, "yapı malzemesi ve yapay zekâ"ya ilişkin 12 çalışma tespit edilmiş ve özetleri incelenmiştir. "Yapı malzemesi ve sürdürülebilirlik ve karbon emisyonu"na ilişkin 16, "yapı malzemesi ve yapay zekâ"ya ilişkin 3 makale "Meta Analizi Yöntemi" ile incelenmek üzere belirlenmiştir.
4. Çalışmanın dördüncü adımında, toplamda 19 çalışmanın yayın isimleri, yayın yılı, yazarları, anahtar kelime grupları, atıf sayıları gibi başlıklar altında **Tablo 1'**de aktarılmıştır. Söz konusu 19 çalışmaların amacı, kapsamı ve yöntemi gibi başlıklar altında incelenmesi ise **Tablo 2'**de gösterilmiştir.
5. **Tablo 1'**e göre, özellikle 2021 yılından sonra yapılan bu çalışmanın amaç ve kapsamına uygun çalışmalarda artış olduğu belirlenmiştir. 2021 yılından önce ise her yıla ait birer çalışma bulunmaktadır. Böylece, sürdürülebilirlik ve karbon emisyonu ile yapay zekânın günümüzdeki güncelliği ve potansiyeli açıkça görülmüştür. Tespit edilen 19 çalışma içerisinden ise sadece bir çalışma Türkiye'de gerçekleştirilmiştir (Morales vd., 2023). Araştırmaların yaklaşık olarak yarısı Asya ülkelerinde yapılmıştır. Bu durum Asya'daki ülkelerin, çalışmanın kapsamına daha eğilimli olduğunu göstermektedir. Çalışmaların çoğunlukla "yapı malzemesi ve sürdürülebilirlik ve karbon emisyonu" kapsamında, "yaşam döngüsü değerlendirme", "sürdürülebilirlik", "building information modelling (BIM)", "gömülü karbon" ve "gömülü enerji" gibi anahtar kelimelere odaklandıkları tespit edilmiştir. Bununla birlikte; "yapı malzemesi ve yapay zekâ" kapsamında, "beton" üzerine çalışmaların yapıldığı görülmüştür **(Tablo 1)**. Ayrıca; **Tablo 1**'e göre, "yapı malzemesi ve sürdürülebilirlik ve karbon emisyonu" kapsamında tespit edilen ve değerlendirilen Lavercombe vd. (2021)'un çalışmalarının çimento ikame malzemeleri içeren betonların basınç dayanımı ve gömülü karbon değerlerini tahmin etmek amacıyla, derin sinir ağları (DNN), destek vektör regresyonu (SVR), gradyan artırma regresyonu (GBR), rastgele orman (RF), k-en yakın komşu (kNN) ve karar ağacı regresyonu (DTR) gibi çeşitli makine öğrenimi algoritmalarına odaklandığı belirlenmiştir.

Tablo 1: 1. Kısım Meta Analizi

No	Veri Tabanı	Dergi	Orijinal Makale Adı	Yayın Yılı	Anahtar Kelimeler	Yazar	Ülke (ler)	Atıf
A1	Scopus	GMSARN International Journal (18), 482-491	Assessment of Cost and Sustainability of Building Materials in Residential Buildings of Bhutan	2024	Gömülü enerji, gömülü karbon dioksit (CO2), ahşap kütle yapı inşaatı, sürdürülebilirlik değerlendirmesi, maliyet analizi	Jigme Thinley, Sirimas Hengrasmee	Butan	0
A2	Scopus	Journal of Building Pathology and Rehabilitation, (6),	Building information modeling (BIM) incorporated green building analysis: an application of local construction materials and sustainable practice in the built environment	2021	Yapı bilgi modelleme, yeşil bina, yerel malzemeler, enerji, karbon ve sürdürülebilirlik	M. N. Uddin, H. H. Wei, H. L. Chi, Meng Ni, P. Elumalai	Çin	19
A3	Scopus	Buildings 14(2), 374	Green Innovation for Carbon Footprint Reduction in Construction Industry	2024	Yeşil inovasyon, karbon ayak izi, inşaat sektörü, sürdürülebilir kuru harç	López-Malest, A., Gabor, M. R., Panait, M., Brezoi, A., & Veres, C.	Romanya	5
A4	Scopus	Engineering, Construction and Architectural Management	A life cycle assessment–based case study analysis of the sustainability of “vernacular” versus contemporary construction techniques	2024	Yerel yapı, sınırlı yığma, uygun maliyetli konut, gecekondu rehabilitasyon projesi, sürdürülebilirlik, yaşam döngüsü değerlendirmesi, gömülü enerji, gömülü karbon	Francis, A., Padmanabhan, V., & Thomas, A.	Hindistan	0
A5	Web of Science	Sustainability, 14(6), 3370	A Parametric Approach to Optimizing Building Construction Systems and Carbon Footprint: A Case Study Inspired by Circularity Principles	2022	Döngüsel bina, çevresel etki değerlendirmesi, yaşam döngüsü analizi, çok kriterli yaklaşım, ahşap yapı, karbon emisyonları	Al-Obaidy, M., Courard, L., & Attia, S.	Belçika, Mısır	54

Tablo 1: 1. Kısım Meta Analizi (devamı)

No	Veri Tabanı	Dergi	Orijinal Makale Adı	Yayın Yılı	Anahtar Kelimeler	Yazar	Ülke (ler)	Atıf
A6	Web of Science	Sustainability, 14(20), 13064	BIM-Based Multi-Objective Optimization of Low-Carbon and Energy-Saving Buildings	2022	Düşük karbon, BIM, NSGA-II, bina performansı, çok amaçlı optimizasyon	Zhao, L., Zhang, W., & Wang, W.	Çin	35
A7	Web of Science	Journal of Building Engineering (23), 324-333	Changing significance of embodied energy: A comparative study of material specifications and building energy sources	2019	Bina enerji analizi, gömülü emisyon, işletme emisyonu, yenilenebilir enerji, yaşam döngüsü değerlendirmesi	Ajayi, S. O., Oyedele, L. O., & Ilori, O. M.	Birleşik Krallık	79
A8	Web of Science	Sustainability, 14(10), 5914	Environmental and Energy-Efficiency Considerations for Selecting Building Envelopes	2022	Yapı malzemeleri, bina inşaatı, enerji verimliliği, karbon dioksit emisyonları, üretici çevresel ürün beyanı (EPD), yaşam döngüsü değerlendirmesi, gömülü enerji	Zaborova, D., & Musorina, T.	Rusya	12
A9	Web of Science	Energy and Buildings (140), 236-244	Environmental benefits of renewable building materials: A case study in Taiwan	2017	Kalıp mühendisliği, ormansızlaşma, plastik kalıplar, çevresel sürdürülebilirlik	Lo, C. L.	Tayvan	27
A10	Web of Science	Sustainability, 10(8), 2715	Evaluating the Link between Low Carbon Reductions Strategies and Its Performance in the Context of Climate Change: A Carbon Footprint of a Wood-Frame Residential Building in Quebec, Canada	2018	Karbon ayak izi, sürdürülebilir binalar, iklim değişikliği, düşük karbonlu malzemeler	Padilla-Rivera, A., Amor, B., & Blanchet, P.	Kanada	74

Tablo 1: 1. Kısım Meta Analizi (devamı)

No	Veri Tabanı	Dergi	Orijinal Makale Adı	Yayın Yılı	Anahtar Kelimeler	Yazar	Ülke (ler)	Atıf
A11	Web of Science	Sustainability 2021, (13), 12950	Factors Influencing the Sustainability of Wood-Based Constructions' Use from the Perspective of Users	2021	Ahşap inşaat, sürdürülebilirlik, temiz teknolojiler, ahşap, kullanıcı tercihleri, konut	J Švajlenka, M Kozlovská	Slovakya	14
A12	Web of Science	Journal of Cleaner Production, (254),120046	Integrating life-cycle assessment and life-cycle cost analysis to select sustainable pavement: A probabilistic model using managerial flexibilities	2020	Yaşam döngüsü değerlendirmesi, yaşam döngüsü maliyet analizi, zemin yönetimi, sürdürülebilir	MR Heidari, G Heravi, AN Esmaeeli	İran	90
A13	Web of Science	Sustainability (13), 4411	Life Cycle Cost Analysis Comparison of Hot Mix Asphalt and Reclaimed Asphalt Pavement: A Case Study	2021	Yaşam döngüsü maliyet analizi (LCCA), geri dönüşüm, CO2, geri kazanılmış asfalt kaplama, yaşam döngüsü performansı, hareketlilik, sürdürülebilir kalkınma, altyapılar, sürdürülebilir malzemeler, asfalt	W Rafiq, MA Musarat, M Altaf, M Napiah, MH Sutanto, WS Alaloul, MF Javed, A Mosavi	Malezya, Pakistan, Almanya, Macaristan	51
A14	Web of Science	Sustainability (13), 13663	Machine Learning Application to Eco-Friendly Concrete Design for Decarbonisation	2021	Makine öğrenimi destekli tasarım, çevre dostu beton, çimento ikame malzemeleri, gömülü karbon, K-katlı çapraz doğrulama	A Lavercombe, X Huang, S Kaewunruen	İngiltere	15
A15	Web of Science	Sustainability (15), 7273	Redesigning for Disassembly and Carbon Footprint Reduction: Shifting from Reinforced Concrete to Hybrid Timber–Steel Multi-Story Building	2023	Gömülü karbon, binalar, yapısal tasarım, inşaat teknolojisi, mimari malzemeler, yaşam döngüsü değerlendirmesi, sismik performans, Türkiye	M Morales-Beltran, P Engür, ÖA Şişman, GN Aykar	Türkiye	9

Tablo 1: 1. Kısım Meta Analizi (devamı)

No	Veri Tabanı	Dergi	Orijinal Makale Adı	Yayın Yılı	Anahtar Kelimeler	Yazar	Ülke (ler)	Atıf
A16	Web of Science	Buildings (12), 486	Selection of Low-Carbon Building Materials in Construction Projects: Construction Professionals' Perspectives	2022	İnşaat sektörü, düşük karbonlu yapı malzemeleri, sürdürülebilirlik, varyans analizi (ANOVA)	M Chan, MAN Masrom, SS Yasin	Avustralya, Malezya	46
A17	Scopus	Asian Journal of Civil Engineering, (25), 5939–5954	Applications of computational intelligence for predictive modeling of properties of blended cement sustainable concrete incorporating various industrial by products towards sustainable construction	2024	Beton dayanımı, yardımcı çimentolu malzemeler, hibrit makine öğrenimi, derin öğrenme, sürdürülebilirlik	NP Mungle, DM Mate, SH Mankar, VT Tale, VS Vairagade, SD Shelare	Hindistan	3
A18	Web of Science	Scientific Data, 2022, 9:42	A construction classification system database for understanding resource use in building construction	2022	Anahtar kelime bulunmamaktadır	G Guven, A Arceo, A Bennett, M Tham, B Olanrewaju, M McGrail, K Isin, AW. Olson, S Saxe	Kanada	36
A19	Web of Science	Automation in Construction (145), 104644	Generating integrated bill of materials using mask R-CNN artificial intelligence model	2023	Beton kalıp malzeme listesi (BoM), Mask R-CNN nesne tespiti ve segmentasyonu, maliyet veri tabanı entegrasyonu	AM Chowdhury, S Moon	Güney Kore	12

Tablo 2: 2. Kısım Meta Analizi

No	Amaç	Kapsam	Yöntem	Sonuç
A1	Bhutan'daki konut inşaatlarında kullanılan temel yapı malzemelerinin maliyet ve sürdürülebilirlik, gömülü enerji ve karbon emisyonları açısından değerlendirilmesi	Thimphu'daki dört katlı tipik bir konut binasının yapı malzemeleri	Üç adımlı süreç tabanlı analiz/nicel analiz ve gömülü enerji ve karbon hesaplamaları	İnşaat malzemelerinin yüksek maliyetlerinin ve sürdürülebilirlik eksikliklerinin Thimphu'daki kentsel yapı stoğunu ekonomik ve çevresel olarak sürdürülemez hale getirmesi
A2	BIM'in dijital inşaat yaklaşımını kullanarak, yerel inşaat malzemelerinin sürdürülebilir bina modellerine entegrasyonunu ve tasarım aşamalarında yeşil bina değerlendirmelerini desteklenmesi	Yerel inşaat malzemeleri	BIM tabanlı dijital inşaat yöntemleri ile sürdürülebilir bina modelleri oluşturulması	BIM'in dijital inşaat yaklaşımı sayesinde, sürdürülebilir bina modellerinin daha kolay elde edilebilmesi ve tasarım aşamalarında yeşil bina değerlendirmelerini desteklemek için gerekli bilgilerin üretilebilmesi
A3	İnşaat sektöründe karbon ayak izini azaltmak için yeşil inovasyonların uygulanması/ bu uygulamaların çevresel etkilerini değerlendirilmesi	Harici ısı yalıtım kompozit sistemleri (ETICS) için kullanılan çimento bazlı karışımlar	Deneysel /kimyasal yöntemler ile daha düşük karbon ayak izine sahip, daha hafif ve enerji yoğunluğu düşük malzemelerin incelenmesi	Yeşil inovasyonların uygulanmasıyla, inşaat malzemelerinin çevresel etkilerinin azaltılabilmesi ve Avrupa Birliği'nin sürdürülebilirlik kriterlerine daha iyi uyum sağlanabilmesi
A4	Konut inşaatında kullanılan "geleneksel" ve "modern" yapı tekniklerinin sürdürülebilirliğinin analizi	Bir vaka çalışması üzerinden, farklı inşaat tekniklerinin çevresel etkilerinin, gömülü karbon ve enerji miktarlarının karşılaştırılması	Yaşam döngüsü analizi (LCA) ile hem "geleneksel" hem de "modern" inşaat yöntemleri için gömülü karbon ve enerji miktarlarının detaylı bir tahmininin yapılması	Vernaküler tekniklerle inşa edilen binanın, çağdaş kapalı duvarcılık teknikleriyle tasarlanan diğer kümelere kıyasla, %30'dan fazla daha düşük gömülü karbon ve enerjiye sahip olması
A5	Karbon nötrlüğüne ulaşmak için döngüsellik ilkeleriyle, bina inşaat sistemlerini ve karbon ayak izini optimize etmeye yönelik parametrik bir yaklaşım sunulması	Geliştirilen parametrik yaklaşımın Belçika'nın Westerlo kentinde yeni inşa edilen ve döngüsellik ilkelerine göre tasarlanan bir ofis binasında uygulanması	One Click LCA yazılımı ve Microsoft Excel kullanılarak 21 alternatif tasarım ve 630 yineleme ile parametrik bir inşaat-tipolojik analizi	Yerel biyolojik kaynaklı malzemelerin, özellikle ahşabın, binaların çevresel etkisini önemli ölçüde azaltabileceği & duyarlılık analizi, malzeme ağırlığı, malzemelerin yeniden kullanım potansiyeli ve inşaatın sökülebilirliğinin, karbon nötr binalar için en etkili faktörler olması
A6	Binaların düşük karbon salınımı, enerji tasarrufu ve aydınlatma performansı arasında denge sağlayan çok amaçlı bir optimizasyon yönteminin geliştirilmesi	Bina çevresi, geometrisi ve işletme bilgilerinin entegrasyonuyla, enerji tasarrufu ve aydınlatma performansı ilişkisinin kurulması	Parametrik tasarım ve gelişmiş genetik algoritmalar ile, BIM tabanlı bir düşük karbonlu bina tasarım optimizasyon çerçevesiyle performans simülasyonu, çok amaçlı optimizasyon tasarımı, Pareto sınır analizi ve enerji tasarrufu karar verme ve değerlendirme yöntemleri	Önerilen çerçevenin bina enerji tasarrufunu etkili bir şekilde sağlaması ve aynı zamanda bina aydınlatma performansını maksimize etmesi

Tablo 2: 2. Kısım Meta Analizi (devamı)

No	Amaç	Kapsam	Yöntem	Sonuç
A7	Binaların yaşam döngüsü boyunca gömülü karbonun değişen öneminin araştırılması	Bir ofis binasının modelini kullanarak, malzeme spesifikasyonları ve enerji kullanım desenlerindeki değişikliklerin gömülü enerji üzerindeki etkilerin incelenmesi	Revit, BIMWASTE aracı, ATHENA Impact Estimator ve Green Building Studio kullanılarak sekiz farklı bina tipolojisi için karşılaştırmalı yaşam döngüsü analizleri	Binaların gömülü etkilerinin, işletme aşamasında daha enerji verimli hale geldikçe, yaşam döngüsü etkilerinin %60'ına kadar katkı sağlaması
A8	Bina cephelerinin çevresel etkilerini değerlendirerek, malzeme üretimi sırasında ortaya çıkan CO_2 emisyonları, toplam enerji tüketimi ve atık miktarının analiz edilmesi	Bina cephelerinin çevresel etkilerini değerlendirmek için malzeme üretimi sırasında ortaya çıkan CO_2 emisyonları, toplam enerji tüketimi ve atık miktarı gibi üç temel parametre	Gerçek üreticilerin belgelerinin analizi ve ana çevresel parametrelerin hesaplamalarının niteliksel analizi	En büyük karbon dioksit emisyonlarının donatılı beton içeren yapılar tarafından üretilmesi, en büyük miktarda yenilenemeyen enerji, kil tuğla ve donatılı beton içeren yapılar tarafından tüketilmesi, en büyük miktarda atığın ise, çimento içeren genişletilmiş polistiren ve donatılı beton içeren yapılar tarafından üretilmesi
A9	İnşaat sektöründeki malzemelerin sera gazı emisyonlarını azaltma ve orman kaynaklarını koruma potansiyelinin değerlendirilmesi	Tayvan'da yenilenebilir inşaat malzemeleri	Tayvan'da yenilenebilir inşaat malzemelerinin çevresel faydalarını inceleyerek, bu malzemelerin sera gazı emisyonlarını azaltma ve orman kaynaklarını koruma potansiyelini değerlendirmek için bir vaka çalışması yapılmıştır.	Özellikle plastik kalıpların, önemli ölçüde geliştirilmiş yeniden kullanılabilirlik, düşük üretim maliyetleri ve uygun geri dönüşüm özellikleri sergilemesi
A10	Binaların karbon ayak izini değerlendirerek, düşük karbon stratejilerinin iklim değişikliği üzerindeki etkilerinin incelenmesi	Quebec City'de çok katlı bir ahşap çerçeveli konut binasını temel alarak, malzeme üretimi ve inşaat süreçlerinin değerlendirilmesi	Dört düşük karbon stratejisine ayrılan sekiz eylemi kapsayan bir Karbon Ayak İzi değerlendirilmesi.	Prefabrike tekniklerin binalarda kullanımının, Quebec bağlamında binaların Karbon Ayak İzi (CFP) azaltılması için bir alternatif olması
A11	Ahşap yapıların sürdürülebilirliğini etkileyen faktörleri kullanıcı perspektifinden incelenmesi	İnşaat işçiliği standardı ve inşaat süresi gibi faktörlerin ahşap yapıların sürdürülebilirliği üzerindeki etkilerini analizi	Analiz için istatistiksel araç olarak, Spearman korelasyon yöntemini kullanan Statistica 12 yazılımı & kümeleme analizi	Konutların sürdürülebilirliğini belirleyen ana unsurların, inşaat sisteminin seçimine bağlı olarak inşaat işçilik standardı ve inşaat süresi, kullanım maliyet etkinliği, malzeme bileşimi ve kat planı tasarımı olması
A12	Karbon emisyonları ve enerji tüketimi gibi iki kriteri göz önünde bulundurarak sürdürülebilir yol yapımında karar verme süreçlerinin iyileştirilmesi	İran'daki bir otoyol projesinde asfalt ve beton yüzeylerin çevresel ve ekonomik etkilerini değerlendirilmesi	Yaşam döngüsü maliyet analizi ve yaşam döngüsü değerlendirme entegrasyonu & Monte Carlo simülasyonu ve TOPSIS yöntemi	En iyi asfalt alternatifinin daha düşük yaşam döngüsü maliyetlerine ancak daha fazla karbon emisyonuna ve çok daha fazla enerji tüketimine sahip olması

Tablo 2: 2. Kısım Meta Analizi (devamı)

No	Amaç	Kapsam	Yöntem	Sonuç
A13	RAP kullanılmadan önce, yerel iklim altında yaşam döngüsü performansı dikkate alınarak hâlâ ekonomik olup olmadığının araştırılması	Geleneksel HMA ile %20 RAP içeren bir vaka çalışması ile malzemelerin üretim, taşıma, inşaat, bakım ve rehabilitasyon süreçlerini kapsayan yaşam döngüsü maliyetlerinin incelenmesi	Her iki malzemenin (geleneksel HMA ve RAP) üretim ve inşaat süreçlerini farklı tesislerde gerçekleştirilmesi ile yaşam döngüsü maliyetlerinin incelenmesi	Analiz sonuçları, %20 RAP içeren asfalt karışımının, konvansiyonel HMA'ya kıyasla toplam yaşam döngüsü maliyetlerinde %14 oranında bir azalma sağlaması
A14	Çimento ikame malzemeleri içeren betonların basınç dayanımı ve gömülü karbon değerlerini tahmin edilmesi	Çimento ikame malzemeleri içeren betonların basınç dayanımı ve gömülü karbon değerlerini tahmin etmek için çeşitli makine öğrenimi algoritmalarının [derin sinir ağları (DNN), destek vektör regresyonu (SVR), gradyan artırma regresyonu (GBR), rastgele orman (RF), k-en yakın komşu (kNN) ve karar ağacı regresyonu (DTR) gibi] performansını değerlendirilmesi	367 deneysel veri seti ile, 12 değişkeni giriş olarak alarak ve GSA hiper parametre ayarlama yönteminin kullanılması	GBR modellerinin basınç dayanımı ve gömülü karbon değerlerini tahmin etmede en iyi performansı göstermesi ve bu modellerin çimento ikame malzemeleri içeren betonların tasarımında yardımcı olabileceğini göstermesi
A15	Betonarme yapıları hibrit ahşap-çelik çok katlı binalara dönüştürerek, yeniden söküm ve karbon ayak izi azaltımı konularında tasarım stratejilerinin geliştirilmesi	Mevcut bir 9 katlı betonarme konut binasının, çapraz lamelli ahşap döşemeler ve yapıştırılmış lamelli ahşap çerçeveler kullanılarak yeniden tasarlanması	Yapısal analiz ile malzeme seçimlerinin yaşam döngüsü analizi	Hibrit ahşap-çelik yapıların, betonarme yapılara kıyasla daha düşük karbon ayak izi ve daha kolay söküm potansiyeli sunması
A16	İnşaat profesyonelleri arasında düşük karbonlu yapı malzemelerinin kullanımını teşvik edilmesi & inşaatın erken aşamalarında karbon emisyonlarını ve sera gazı salınımlarının azaltılması	İnşaat profesyonellerinin bu malzemeleri seçerken karşılaştıkları zorluklar ve teşvik edici faktörleri	Anket & tek yönlü ANOVA testi	İnşaat profesyonellerinin düşük karbonlu malzemeler konusunda sınırlı bilgiye sahip olması & bu malzemelerin kullanımının yaygın olmaması
A17	Endüstriyel yan ürünleri içeren çimentolu sürdürülebilir betonun mekanik özellik tahmini için hesaplamalı zekâ tekniklerinin uygulanması	Farklı endüstriyel yan ürünlerin beton karışımlarına dahil edilmesinin betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin incelenmesi	Beton karışımlarına çeşitli endüstriyel yan ürünler eklenmiş ve bu karışımların mekanik özellikleri deneysel olarak belirlenmesi & verilerin, hesaplamalı zekâ teknikleriyle analiz edilerek betonun performansı tahmin edilmesi	Hesaplamalı zekâ tekniklerinin, endüstriyel yan ürünler içeren harmanlanmış çimentolu betonun mekanik özelliklerini tahmin etmede etkili olması

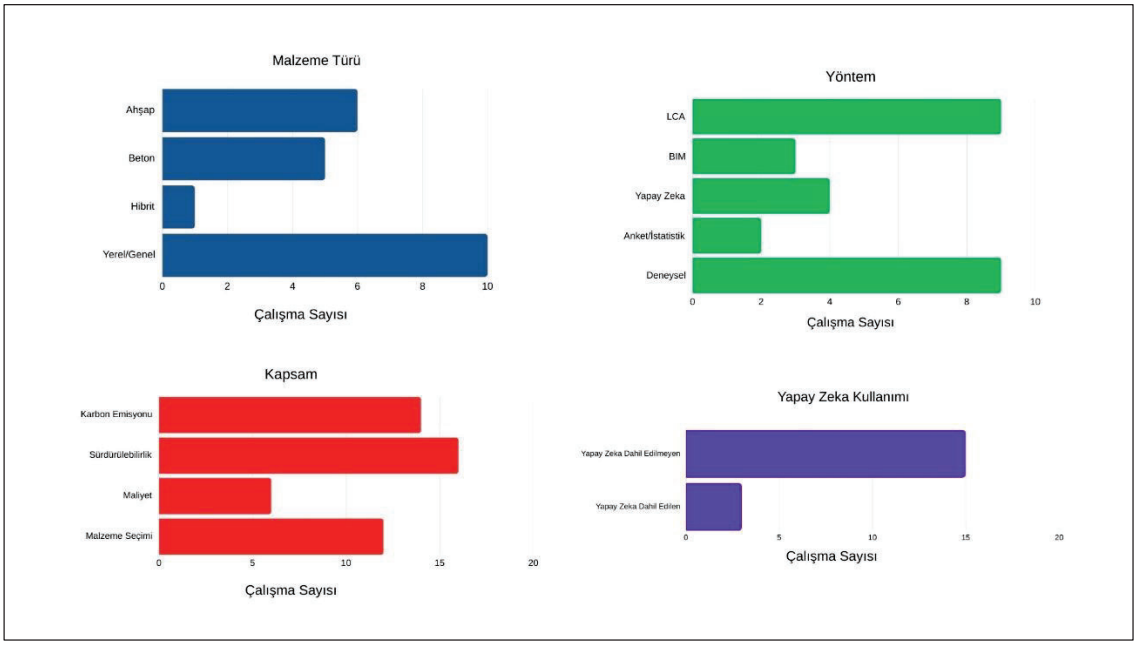
Tablo 2: 2. Kısım Meta Analizi (devamı)

No	Amaç	Kapsam	Yöntem	Sonuç
A18	Kuzey Amerika'daki yaygın kullanılan UniFormat ve MasterFormat sınıflandırma sistemlerinden türetilen bir yapı malzemesi veri yapısını geliştirilmesi	Kuzey Amerika'dan 70 binanın tasarım veya inşaat çizimlerini ile ayrıntılı yapı malzemesi verileri	İnşaat veya tasarım çizimlerinden malzeme çıkarımları yapılması ve bu bilgiler UniFormat ve MasterFormat ontolojisi temelinde düzenlenmesi	İnşaat malzeme tüketimini azaltma fırsatlarını incelemek, bina tasarımının kaynak kullanımına etkisini anlamak ve malzemelerin binalarda nasıl kullanıldığını analiz etmek için değerli bir veri kaynağı sunması
A19	Beton kalıp malzeme listelerinin (BoM) otomatik olarak oluşturulması için yapay zekanın bir maliyet veritabanı ile entegrasyonu	Bir BoM oluşturma yapay zekâ modeli (BoM-GAIM) sunulması ile, bu modelin Mask R-CNN ve görüntü segmentasyon tekniğine dayalı olarak BoM oluşturması	Mask R-CNN ile 2D CAD çizimlerinden bileşenlerin tanınması ve OCR ile sayısal verilerin çıkarılması	BoM-GAIM modeli %98 doğruluk ile BoM oluşturmayı otomatikleştirerek tasarım verimliliğini artırması

Tablo 2'de yer alan çalışmaların içerikleri incelendiğinde, yapı malzemelerinin gömülü enerji ve karbon emisyonları, yeşil bina sistemlerinde BIM'in rolü, inşaat sistemleri ve yapı malzemelerinin çevresel etkileri, BIM tabanlı ve enerji tasarruflu optimizasyonlar, standardizasyon ile sürdürülebilirliğin ilişkisi gibi konuların ele alındığı görülmüştür. Sadece iki çalışmanın yapı malzemesi seçiminde karar verme süreçleri ve bu süreçlerde yaşanan zorluklar gibi konuları ele aldığı belirlenmiştir (Heidari vd., 2020; Chan vd., 2022). "Yapı malzemesi ve sürdürülebilirlik ve karbon emisyonu" kapsamında çalışmaların genellikle yaşam döngüsü analizi (LCA), BIM, anket ve vaka çalışması yöntemleri kullandıkları tespit edilmiştir. Buna göre; inşaat sektöründe daha verimli enerji kullanımı, malzeme tüketiminin azaltılması ve atıkların minimize edilmesi amacıyla, yapı malzemesi seçiminde karar verme parametrelerinin karbon salınımı ve diğer çevresel sürdürülebilirlik etkilerinin de ele alındığı daha kapsamlı çalışmaların yapılabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Bununla birlikte; pek çok malzemenin üretimden tüketime ve yeniden döngüye katılmasına kadar, kısacası döngüselliği sağlamak amacıyla bu malzemelerin tüm ilgili süreçlerde karbon emisyonlarını azaltmak için alternatif malzemeler ve üretim yöntemleri üzerine yoğunlaşılarak malzeme seçimindeki etki düzeylerinin daha etkin biçimde ele alınması gerektiği düşünülmektedir. Böylece, yapı malzemesi seçiminde sürdürülebilirlik ve karbon emisyonu parametrelerinin etkileri ve sonuçlarının incelendiği çalışmalar artırılarak, enerji verimli binalar ve düşük karbon salınımına sahip malzemelerin kullanıldığı ve karbon emisyonlarının azaltıldığı projelerin oluşturulmasına katkı sağlanabilir.

Tablo 2, yapay zekâ ile yapılan çalışmalar açısından incelendiğinde ise; "yapı malzemesi ve yapay zekâ" kapsamında, 2022, 2023 ve 2024 yıllarında yapılan toplam 3 çalışma tespit edilmiştir (Mungle vd. 2024, Guven vd. 2022, Chowdhury ve Moon, 2023). Mungle vd. (2024) farklı endüstriyel yan ürünlerin beton karışımlarına dâhil edilmesinin betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini hesaplamalı yapay zekâ teknikleriyle analiz ederek betonun performans tahminini yapmışlardır. Chowdhury ve Moon (2023) ise, yapay zekâ ve maliyet veri tabanını entegre ederek, beton kalıbı malzeme listesi (BoM) oluşturma sürecini otomatikleştirmeyi hedefleyerek BoM-GAIM modeli geliştirmişlerdir. Yapılan bu çalışmanın kapsamına en uygun çalışma ise Guven vd. (2022)'nin çalışmasıdır. Çalışma, Kuzey Amerika'dan 70 binanın tasarım veya uygulama projelerini temel alarak oluşturulmuş ayrıntılı yapı malzemesi verilerini kapsamaktadır. Çalışma, Kuzey Amerika'daki yaygın kullanılan UniFormat ve MasterFormat sınıflandırma sistemlerinden türetilen bir yapı malzemesi veri yapısını geliştirmeyi hedeflemektedir. Makale, inşaat malzeme tüketimini azaltma fırsatlarını incelemek, bina tasarımının kaynak kullanımına etkisini anlamak ve malzemelerin binalarda nasıl kullanıldığını analiz etmek için değerli bir veri kaynağı sunmaktadır. Çalışmada veriler "Python" da yazılan bir kod aracılığı ile analiz edilmiş olup, yapay zekâ ve makine öğrenmesine ait bir yöntem tespit edilmemiştir. Bu çalışmada anahtar kelime olmaması ancak konu ile ilişkisi olması nedeni ile son elemeye kaldığı tespit edilmiştir. Tüm bu üç çalışma bir arada değerlendirildiğinde, yapı malzemesi seçiminde yapay zekânın henüz çok aktif kullanıldığı çalışmaların olmadığı sonucuna varılmıştır. Bu teknolojik gelişmenin çok güncel olması, sonraki çalışmaların bu alanda geliştirilmesine oldukça açıktır. Bu nedenle yapay zekânın yapı malzemeleri ile olan ilişkisinin, yapı malzeme seçimindeki etkileri ve kolaylaştırıcı kararları, yapı malzemelerinin ve projelerin tüm yaşam döngüsü süreçleri, maliyet analizleri ve kullanım alanlarının artırılması inşaat sektöründeki en güncel ve en potansiyel barındıran alanlardan biri

olduğu görülmüştür. Bu nedenle, özellikle yapay zekânın döngüsel ekonomi açısından, malzeme maliyet analizlerinin yapılması ya da çevresel sürdürülebilirlik açısından döngüselliğin sağlanabilmesi için malzeme performans ve karbon emisyonları, enerji tüketimi, atık üretimi gibi malzeme çevresel etkilerinin olumlu/olumsuz yönlerinin değerlendirildiği disiplinler arası çalışmaların planlanması ve artırılması oldukça değerlidir.



Şekil 1: Meta Analizi Yapılan Çalışmaların Malzeme Türü, Yöntem, Kapsam, Yapay Zekâ Açısından Dağılımları

Şekil 1'de sunulan çubuk grafikler, yapı malzemesi seçiminde sürdürülebilirlik, karbon emisyonu ve yapay zekâ konularını ele alan 19 çalışmanın içeriksel dağılımını özetlemektedir. Grafiklerde, çalışmaların büyük çoğunluğunun sürdürülebilirlik (%84) ve karbon emisyonu (%74) gibi çevresel etkiler üzerine yoğunlaştığı; yöntem olarak yaşam döngüsü analizi (LCA) ve deneysel çalışmaların öne çıktığı görülmektedir. Malzeme türü açısından ise en çok yerel/genel malzemeler incelenmiş olup, ahşap ve beton da dikkat çeken diğer türler arasındadır. Yapay zekâ ise yalnızca sınırlı sayıda çalışmada (%21) doğrudan kullanılmıştır; bu durum, alandaki teknolojik entegrasyon eksikliğini ve gelecekteki araştırmalara yönelik önemli bir boşluğu ortaya koymaktadır.

4. Sonuçlar

Günümüzde ortaya çıkan ihtiyaçlar doğrultusunda çok fazla sayıda ve büyük ölçekte projeler hayata geçirilmektedir. İnşaat sektörünün olumlu pek çok etkisi ile birlikte olumsuz yöndeki çevresel etkilerinin de olması, yüksek miktarda kaynak tüketimi yapması, atık malzeme oluşturması ve karbon emisyonu üretmesi nedeni ile bu kapsamdaki çalışma ve girişimlerin geliştirilmesine ihtiyaç bulunmaktadır. Ayrıca, inşaat sektöründe daha verimli enerji kullanımı, malzeme tüketiminin azaltılması ve atıkların minimize edilmesi gibi farklı unsurlara olan ihtiyacın da olması nedeniyle, projelerin sadece yapım sürecinde değil, projenin tüm yaşam döngüsü boyunca döngüsellik kapsamında değerlendirilmesi ve yönetilmesi ihtiyacını da ortaya koymaktadır. Bu nedenle, yapı malzemesi seçiminin tüm proje yaşam döngüsünü göz önünde bulunduracak şekilde çok farklı parametrelerin bir arada ele alınarak yapılması önem kazanmaktadır. Yapay zekâ teknolojileri de inşaat sektöründeki bu ihtiyaç ve sorunları çözebilmek ve yönetebilmek için güçlü araçlar sunarak, inşaat projelerinin daha sürdürülebilir ve çevre dostu hale gelmesine katkı sağlayabilir.

Yapı malzemesi seçiminde sürdürülebilirlik ve karbon emisyonu gibi çevresel etkiler ile teknolojik bir gelişme olan yapay zekânın mevcut güncel literatürdeki yerini tespit etmek ve bu üç parametreyi bütünleşik biçimde değerlendirilmek amacıyla gerçekleştirilen bu çalışmada da bu alanlarda yapılan çalışmaların günümüze yaklaştıkça artış gösterdiği ancak yine de çok sınırlı sayıda olduğu görülmüştür. Yapı malzemelerinin sürdürülebilirlik ve karbon emisyonu bağlamında yapılan çalışmalarda genellikle, gömülü enerji ve karbon emisyonları, yeşil bina sistemlerinde BIM'in rolü, inşaat sistemlerinin ve yapı malzemelerinin çevresel etkileri, BIM tabanlı enerji tasarruflu optimizasyonlar ile standardizasyonun sürdürülebilirlik ile ilişkisi gibi konularla öne çıktığı tespit edilmiştir. Çok az sayıdaki çalışmanın ise, sadece yapı malzemesi seçiminde karar verme süreçleri ve bu süreçlerde yaşanan zorluklar gibi konuları ele aldığı

belirlenmiştir. Öte yandan, yapı malzemesi seçiminde yapay zekanın henüz çok aktif kullanıldığı çalışmaların olmadığı da yapılan bu çalışma ile belirlenmiştir. Böylece bu çalışma ile yapı malzemesi seçiminde hem sürdürülebilirlik ve karbon emisyonu hem de yapay zekanın etkisine yönelik doğrudan çalışmaların henüz olmaması bu alandaki boşluğu ortaya koymaktadır. Bu konularda yapılan çalışmalara olan eğilim ise, yine bu alanda yapılabilecek çalışmalara olan ihtiyacı da göstermektedir. Yapay zekânın derin öğrenme, yapay sinir ağları ve farklı regresyon teknikleri gibi farklı teknikleri kullanılarak ve yapay zekânın sunduğu hızdan faydalanarak, olumsuz çevresel etkileri minimize etmek ve döngüselliğe katkı sağlayabilecek sürdürülebilir malzeme seçimi üzerine çalışmalar ve araştırmalar gerçekleştirilebilir. Bununla birlikte, yapı malzeme seçiminde maliyet ve emisyon tahminleme gibi çalışmalar da ortaya konabilir. Böylece, teknolojik gelişmeler ile çevresel sürdürülebilirlik bir arada ele alınarak inşaat sektörünün gelişmesine katkı sağlanabilir.

Teşekkür

Bu çalışma, yazarların 2024 yılında ortaya koydukları "Karbon Ayak İzi Azaltımında Yapay Zekâ Destekli Yapı Malzeme Seçimi ve Tasarım Stratejileri Araştırması" başlıklı projeden alınan belirli kısımların yeniden işlenmiş ve geliştirilmiş versiyonudur. Söz konusu proje, TÜBİTAK Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlığı (BİDEB) tarafından yürütülen, 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı 2023 yılı 2. dönemi kapsamında desteklenmiştir. İlgili projeye uzmanlık alanları ile katkı sağlayan uzman katılımcılara tekrar teşekkür ederiz. Ayrıca, bu çalışmaya değerli ve yapıcı geri bildirimde bulunmak için zaman ayıran hakemlere içten teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

Ajayi, S. O., Oyedele, L. O., & Ilori, O. M. (2019). Changing significance of embodied energy: A comparative study of material specifications and building energy sources. *Journal of Building Engineering*, *23*, 324-333. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.02.008

Akça, C. (2021). Neden orman ve ahşap? *Hendese, 8*(10), 18. http://www.hendesedergisi.com/hendese-sayilar/HENDESE_SAYI_10.pdf

Al-Obaidy, M., Courard, L., & Attia, S. (2022). A parametric approach to optimizing building construction systems and carbon footprint: A case study inspired by circularity principles. *Sustainability*, *14*(6), 3370. https://doi.org/10.3390/su14063370

Chan, M., Masrom, M. A. N., & Yasin, S. S. (2022). Selection of low-carbon building materials in construction projects: Construction professionals' perspectives. *Buildings*, *12*(4), 486. https://doi.org/10.3390/buildings12040486

Chowdhury, A. M., & Moon, S. (2023). Generating integrated bill of materials using mask R-CNN artificial intelligence model. *Automation in Construction*, *145*, 104644. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104644

Francis, A., Padmanabhan, V., & Thomas, A. (2024). A life cycle assessment–based case study analysis of the sustainability of "vernacular" versus contemporary construction techniques. *Engineering, Construction and Architectural Management*. https://doi.org/10.1108/ECAM-12-2023-1255

GlobalABC (Global Alliance for Buildings and Construction) (2020). 2020 Global Status Report for Buildings and Construction. https://globalabc.org/sites/default/files/2021-03/Buildings-GSR-2020_Report_24-03-21_0.pdf

Guven, G., Arceo, A., Bennett, A., Tham, M., Olanrewaju, B., McGrail, M., ... & Saxe, S. (2022). A construction classification system database for understanding resource use in building construction. *Scientific Data*, *9*(1), 42. https://doi.org/10.1038/s41597-022-01141-8

Heidari, M. R., Heravi, G., & Esmaeeli, A. N. (2020). Integrating life-cycle assessment and life-cycle cost analysis to select sustainable pavement: A probabilistic model using managerial flexibilities. *Journal of Cleaner Production*, *254*, 120046. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120046

Lavercombe, A., Huang, X., & Kaewunruen, S. (2021). Machine learning application to eco-friendly concrete design for decarbonisation. *Sustainability*, *13*(24), 13663. https://doi.org/10.3390/su132413663

Lo, C. L. (2017). Environmental benefits of renewable building materials: A case study in Taiwan. *Energy and Buildings*, *140*, 236-244. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.02.010

López-Malest, A., Gabor, M. R., Panait, M., Brezoi, A., & Veres, C. (2024). Green Innovation for Carbon Footprint Reduction in Construction Industry. *Buildings*, *14*(2), 374. https://doi.org/10.3390/buildings14020374

Macquarie University (2025, January 25). *PRISMA Flow Diagram & Diagram Generator Tool.* Subject and Research Guides. Retrieved 01,19, 2025, from https://libguides.mq.edu.au/systematic_reviews/prisma_screen

Morales-Beltran, M., Engür, P., Şişman, Ö. A., & Aykar, G. N. (2023). Redesigning for disassembly and carbon footprint reduction: Shifting from reinforced concrete to hybrid timber–steel multi-story building. *Sustainability*, *15*(9), 7273. https://doi.org/10.3390/su15097273

Mungle, N. P., Mate, D. M., Mankar, S. H., Tale, V. T., Vairagade, V. S., & Shelare, S. D. (2024). Applications of computational intelligence for predictive modeling of properties of blended cement sustainable concrete incorporating various industrial

byproducts towards sustainable construction. *Asian Journal of Civil Engineering*, *25*(8), 5939-5954. https://doi.org/10.1007/s42107-024-01155-0

Padilla-Rivera, A., Amor, B., & Blanchet, P. (2018). Evaluating the link between low carbon reductions strategies and its performance in the context of climate change: A carbon footprint of a wood-frame residential building in Quebec, Canada. *Sustainability*, *10*(8), 2715. https://doi.org/10.3390/su10082715

Rafiq, W., Musarat, M. A., Altaf, M., Napiah, M., Sutanto, M. H., Alaloul, W. S., Javed, M. F., & Mosavi, A. (2021). Life cycle cost analysis comparison of hot mix asphalt and reclaimed asphalt pavement: A case study. *Sustainability*, *13*(8), 4411. https://doi.org/10.3390/su13084411

Švajlenka, J., & Kozlovská, M. (2021). Factors influencing the sustainability of wood-based constructions' use from the perspective of users. *Sustainability*, *13*(23), 12950. https://doi.org/10.3390/su132312950

Thinley, J., & Hengrasmee, S. Assessment of Cost and Sustainability of Building Materials in Residential Buildings of Bhutan. *GMSARN International Journal* 18 (2024) 482-491. http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4291773

Uddin, M. N., Wei, H. H., Chi, H. L., Ni, M., & Elumalai, P. (2021). Building information modeling (BIM) incorporated green building analysis: An application of local construction materials and sustainable practice in the built environment. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, *6*, 1-25. https://doi.org/10.1007/s41024-021-00106-5

UNEP (UN Environment Programme) (2020). UNEP Annual Report 2019. https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/32374/AR2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Varnalı, T. (2024). İnşaat Sektöründe Teknolojik Dönüşüm: Yapay Zekâ ve Robotik ile Yenilikçi Çözümler. *Journal of Management Theory and Practices Research,* 5(2), 173-200.

Zaborova, D., & Musorina, T. (2022). Environmental and energy-efficiency considerations for selecting building envelopes. *Sustainability*, *14*(10), 5914. https://doi.org/10.3390/su14105914

Zhao, L., Zhang, W., & Wang, W. (2022). BIM-based multi-objective optimization of low-carbon and energy-saving buildings. *Sustainability*, *14*(20), 13064. https://doi.org/10.3390/su142013064

2025 MSTAS MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Mimarlıkta Sayısal Tasarımın Gelişiminin Doğadan Esinlenme Açısından Analitik İncelenmesi

Umay Karakaş[1]; Şule Taşlı Pektaş[2]
[1,2]OSTIM Teknik Üniversitesi
[1]umaykarakas1@gmail.com; [2]sule.taslipektas@ostimteknik.edu.tr

Özet

Doğa, tarih boyunca mimarlık pratiğinde temel bir ilham kaynağı olmuş; estetik ve işlevsellik açısından önemli bir model teşkil etmiştir. Doğadaki formlar, yapılar ve organizasyonlar, mimarlık anlayışını şekillendiren temel referanslardan biri olarak kabul edilmiş; bu etkileşim antik çağlardan günümüze kadar kesintisiz biçimde devam etmiştir. Mimarlık disiplini, tarihsel süreç boyunca doğayla kurduğu ilişkiyi sürekli olarak yeniden tanımlamış; doğadaki formlar, sistemler ve süreçlerden ilham alarak tasarım anlayışını estetikten işlevselliğe kadar pek çok boyutta zenginleştirmiştir. Son yıllarda gelişen sayısal teknolojilerle birlikte bu etkileşim daha derin ve analitik bir düzleme taşınmıştır. Özellikle doğadan esinlenmeye dayalı tasarım anlayışları, sayısal tasarım araçları sayesinde yalnızca metaforik düzeyde kalmamakta; aynı zamanda yapısal, biçimsel ve sistemsel düzeyde uygulanabilir hâle gelmektedir. Bu çalışma, mimarlıkta sayısal tasarımın tarihsel gelişimini doğadan esinlenme ekseninde değerlendirerek, bu iki alan arasındaki yapısal ve kavramsal ilişkileri ortaya koymayı amaçlamaktadır.

Çalışmanın temel hipotezi, sayısal tasarımın gelişiminin doğadan esinlenme yaklaşımlarıyla güçlü biçimde kesiştiği yönündedir. Bu bağlamda, özellikle biyomimikri kavramı çerçevesinde, mimaride kullanılan hesaplamalı araçların; doğadaki organizmaların, süreçlerin ve ekosistemlerin işleyişine dayalı tasarım modellerinin oluşturulmasına nasıl olanak tanıdığı incelenmiştir. Araştırma kapsamında, Mollie Claypool'un The Digital in Architecture: Then Now and in The Future (2019) başlıklı raporu ile Mario Carpo'nun A Short but Believable History of the Digital Turn in Architecture (2023) adlı çalışması temel alınarak, mimarlıkta sayısal tasarım açısından öncü nitelikte değerlendirilen projeler belirlenmiş; bu projeler biyomimikri türleri (form, süreç, sistem) açısından matris tabanlı bir yöntemle analiz edilmiştir. Analiz sonucunda, sayısal tasarımın doğadan esinlenmeyi yalnızca estetik bir ilke olmaktan çıkararak; sürdürülebilirlik, adaptasyon, esneklik ve çevresel verimlilik gibi çok boyutlu hedeflerle bütünleştirdiği görülmüştür. Özellikle form ve süreç düzeyinde doğadan yoğun esinlenmeler tespit edilmiş; ancak sistem düzeyindeki biyomimikri uygulamalarının sınırlı olduğu gözlemlenmiştir. Buna karşılık, sistem düzeyinde başarılı örneklerin genellikle disiplinler arası ekipler tarafından üretildiği ve tasarım-yapım süreçlerinin bütünleşik bir şekilde ele alındığı anlaşılmıştır.

Bu çalışma, mimarlıkta sayısal tasarım ile doğadan esinlenme arasındaki ilişkinin ampirik ve sistematik bir analizini sunarak, mevcut literatürde sıklıkla rastlanan anekdotal yaklaşımların ötesine geçmeyi hedeflemektedir. Elde edilen bulgular, doğadan esinlenmeli tasarımın sayısal mimarlık anlayışıyla bütünleşerek çağdaş mimarlık pratiğinde giderek daha merkezi bir rol üstlendiğini göstermektedir. Bununla birlikte, bu ilişkinin daha geniş ölçekli ve sürdürülebilir mimari üretim süreçlerine taşınabilmesi için biyomimikrinin sistem düzeyinde daha derinlemesine ele alındığı, ölçülebilir ve uygulanabilir stratejilere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda çalışma, mimarlıkta doğa temelli ve teknoloji destekli tasarım yaklaşımlarının geleceğine dair yeni açılımlar sunmayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Sayısal Tasarım, Doğadan Esinlenmeli Tasarım, Biyomimikri, Mimarlık Tarihi, Bilgi Görselleştirme.*

2025 MSTAS MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

An Analytical Study of the Digital in Architecture from the Perspective of Nature-Inspired Design

Umay Karakaş[1]; Şule Taşlı Pektaş[2]
[1,2]OSTIM Technical University
[1]umaykarakas1@gmail.com; [2]sule.taslipektas@ostimteknik.edu.tr

Abstract

Throughout history, nature has served as a fundamental source of inspiration in architectural practice and has provided an important model for both aesthetics and functionality. The forms, structures, and organizations found in nature have been regarded as primary references that shape architectural understanding, and this interaction has continued from ancient times to the present day. Over the course of history, the discipline of architecture has continuously redefined its relationship with nature; drawing inspiration from natural forms, systems, and processes, it has enriched its design philosophy across various dimensions, from aesthetics to functionality. With the advent of digital technologies in recent years, this interaction has evolved to a deeper and more analytical level. In particular, nature-inspired design approaches, thanks to digital tools, no longer remain solely at a metaphorical level but have become applicable at structural, formal, and systemic levels.

This study aims to explore the structural and conceptual relationships between these two fields by examining the historical development of digital design in architecture through the lens of nature-inspired design. The main hypothesis of the study is that the evolution of digital design is closely intertwined with nature-inspired approaches. Within this context, and especially through the framework of biomimicry, the study investigates how computational tools in architecture facilitate the development of design models that emulate the functioning of organisms, natural processes, and ecosystems. The research draws on Mollie Claypool's The Digital in Architecture: Then Now and in the Future (2019) and Mario Carpo's A Short but Believable History of the Digital Turn in Architecture (2023) to identify pioneering projects in the realm of digital architectural design. These projects are analyzed using a matrix-based method according to the three types of biomimicry: form, process, and system. The analysis reveals that digital design has transformed nature-inspired design from a primarily aesthetic pursuit into a multidimensional strategy targeting sustainability, adaptability, flexibility, and environmental efficiency. Strong nature-inspired influences were particularly evident at the form and process levels. However, system-level applications of biomimicry were found to be less prevalent. Notably, successful implementations at the system level were generally the result of interdisciplinary collaborations, where design and construction processes were integrated holistically.

By offering an empirical and systematic examination of the relationship between computational design and nature-inspired architecture, this study aims to move beyond the anecdotal accounts often found in the literature. The findings indicate that nature-inspired design is playing an increasingly central role in contemporary architectural practice, especially as it merges with computational methods. However, to translate this relationship into large-scale, sustainable architectural production, there is a need for more deeply integrated, measurable, and practicable strategies at the system level. In this regard, the study seeks to contribute new perspectives on the future of nature-based and technologically supported design approaches in architecture.

Keywords: *Digital Design, Nature-Inspired Design, Biomimicry, Architectural History, Information Visualization.*

1. Giriş

Doğa, özellikle esinlenme ve metafor söz konusu olduğunda insan hayatında merkezi bir rol oynar ve her türlü araştırma ve keşifte görülebilir (Antoniades, 1990). Mimarlık disiplini, tarihsel süreç boyunca yalnızca fiziksel mekân üretimiyle değil, aynı zamanda insan-doğa-teknoloji üçgeninde gelişen düşünsel paradigma dönüşümleriyle de şekillenmiştir. Bu dönüşümler, kimi dönemlerde doğaya yönelik biçimsel bir taklit düzeyinde kalırken, kimi zaman ise doğanın işleyiş biçimlerinin yapılı çevreye aktarılmasına yönelik daha bütüncül bir anlayışa evrilmiştir. Dört milyara yakın yıl içinde doğa, insanlar tarafından icat edilenlere eşdeğer veya daha üstün teknolojiler yaratmıştır, ancak bu teknolojiler sürdürülebilir ve verimli yollarla gerçekleştirilmiştir (Gruber, 2011). Özellikle 20. yüzyılın ikinci yarısından itibaren ivme kazanan dijitalleşme süreci, mimarlık pratiğinde yeni araçların, tekniklerin ve epistemolojik yaklaşımların ortaya çıkmasına neden olmuş; bu da doğa ile kurulan ilişkinin sadece estetik bir referans düzleminde değil, aynı zamanda yapısal, süreçsel ve sistemsel boyutlarda yeniden yorumlanmasına imkân tanımıştır.

Bu bağlamda, mimarlıkta doğadan esinlenme olgusu günümüzde yalnızca ilham verici metaforlar üretmekle sınırlı kalmayıp, hesaplamalı modelleme, parametrik tasarım, üretken algoritmalar ve robotik üretim gibi dijital araçlar üzerinden yapılı çevrenin tasarlanmasında doğanın stratejik bilgi kaynağı olarak kullanılmasına dönüşmektedir. Böylece doğa, mimarlıkta bir form kaynağı olmanın ötesinde, organizasyonel ilkeleri, çevresel adaptasyon kabiliyeti ve sürdürülebilirlik potansiyeli ile doğrudan tasarıma yön veren bir sistem olarak ele alınmaktadır. Bu yaklaşım, özellikle "doğadan esinlenme" kavramı altında teorik ve pratik bir çerçeveye oturmaktadır. Canlı organizmaların milyonlarca yıl süren evrimsel süreçler sonucunda geliştirdiği çözüm stratejilerinden ilham alarak, insan yapımı sistemlerde bu stratejilerin yeniden yorumlanmasını önererek tasarım sürecinin şekillenmesinde rol oynar. Bu çerçevede mimarlıkta formdan yapım süreçlerine, enerji kullanımından malzeme döngüselliğine kadar pek çok ölçekte uygulanabilen bir tasarım yaklaşımı olarak öne çıkmaktadır.

Bu çalışmanın temel amacı, mimarlıkta sayısal tasarımın tarihsel gelişimini, doğadan esinlenme perspektifiyle birlikte analitik ve karşılaştırmalı bir biçimde değerlendirmektir. Bu amaç doğrultusunda, günümüz dijital mimarlık üretiminde öncü olarak kabul edilen projeler üzerinden, dijital araçların doğa temelli düşünceyle nasıl bütünleştirildiği sistematik olarak incelenmektedir. Araştırma, özellikle doğadaki form, süreç ve sistem kavramlarının sayısal ortama nasıl aktarıldığını ve bu aktarımın mimari tasarıma ne tür yenilikçi açılımlar sağladığını ortaya koymayı hedeflemektedir. Bu bağlamda, biyomimikri yalnızca bir gözlem ya da taklit pratiği olarak değil; aynı zamanda dijital çağın sunduğu hesaplama gücüyle birlikte yeniden inşa edilen ve mimarlık pratiğini dönüştüren bir düşünme biçimi olarak ele alınmaktadır.

Mimarlıkta dijital tasarım ile doğadan esinlenme arasındaki ilişkiyi kuramsal bir zeminde ele almanın ötesine geçilerek, bu ilişkinin güncel mimarlık pratiğindeki izdüşümlerini somut projeler üzerinden analiz etmek amaçlanmaktadır. Bu doğrultuda, temel alınan araştırmalarda mevcut olan ve dijital tasarım açısından öncü nitelik taşıyan seçili projeler, biyomimikri bağlamında çok düzeyli bir değerlendirmeye tabi tutulmuştur. Çalışmada, doğadan esinlenmenin biçimsel, süreçsel ve sistemsel düzeylerde dijital araçlarla nasıl bütünleştiği araştırılmış; bu ilişkinin mimarlık disiplininde ne tür dönüşümlere işaret ettiği irdelenmiştir. Projelerde tasarımın dört ana düzeyi olan form, süreç, sistem ve yöntem üzerinden karşılaştırma yapılmıştır. Böylece çalışma, doğa-dijital kesişiminde oluşan yeni tasarım dilini niteliksel verilerle haritalandırmayı ve bu haritalama üzerinden mimarlıkta doğa temelli dijital dönüşümün izlerini sürmeyi amaçlamaktadır.

Çalışmanın özgün katkısı, mimarlık literatüründe sıklıkla sezgisel ya da anekdotal olarak ele alınan "doğadan esinlenme" olgusunu, dijital tasarım bağlamında somut projeler üzerinden analitik bir yaklaşımla incelemesidir. Aynı zamanda, mimarlık eğitiminden profesyonel pratiğe kadar geniş bir etki alanına sahip olan dijital araçların, doğa temelli düşünme biçimleriyle nasıl bütünleştiğine dair sistemli bir kavrayış sunmayı hedeflemektedir. Bu bağlamda araştırma, yalnızca mevcut örnekleri sınıflandırmakla kalmayıp, aynı zamanda gelecekte doğa ile teknoloji arasındaki tasarım ilişkisini daha sürdürülebilir, esnek ve hesaplanabilir biçimlerde kurgulamak isteyen tasarımcılar ve araştırmacılar için kuramsal ve yöntemsel bir çerçeve sunmaktadır.

2. Yöntem

Bu çalışma, mimarlıkta dijital tasarımın gelişimi ile doğadan esinlenme arasındaki ilişkinin çok katmanlı yapısını ortaya koymak amacıyla tasarlanmış nitel bir araştırmadır. Çalışma hem kavramsal düzeyde kuramsal yaklaşımları hem de uygulama düzeyinde projelere ilişkin somut verileri birlikte değerlendiren bütüncül bir yöntemsel çerçeveye sahiptir. Araştırmanın amacı yalnızca doğadan esinlenmenin dijital mimarlık bağlamında nasıl tezahür ettiğini göstermek değil, aynı zamanda bu ilişkinin hangi hesaplamalı araçlar ve yöntemlerle gerçekleştirildiğini sistemli bir biçimde analiz etmektir.

Araştırmanın veri kaynağı olarak, dijital mimarlık alanında çağdaş literatürde öne çıkan iki temel kaynak seçilmiştir: Mollie Claypool'un The Digital in Architecture: Then Now and in the Future (2019) başlıklı kapsamlı raporu ve Mario Carpo'nun A Short but Believable History of the Digital Turn in Architecture (2023) adlı eseri. Bu iki kaynak, dijital tasarımın tarihsel gelişimini belgelemeleri, belirli projeleri içeriksel ve kavramsal bağlamda irdelemeleri ve farklı dönemlere ait örnekleri barındırmaları bakımından bu araştırma için anlamlı bir örneklem çerçevesi sunmaktadır. Söz konusu kaynaklarda yer alan projeler, dijital araçların kullanımı ve doğa ile kurdukları ilişkiler bakımından değerlendirilmek üzere seçilmiştir. Veri setinde yer alan projeler, biyomimikri türlerine göre üç ana başlık altında incelenmiştir: form, süreç ve sistem. Bu sınıflama, Janine Benyus'un (1997) biyomimikri kuramında yer verdiği ve doğadan ilham alma biçimlerini tanımlayan üç temel düzeyden esinlenerek yapılandırılmış, "Hesaplamalı Araçlar ve Yöntemler" adlı bir başlık daha eklenmiştir.

Matrisdeki inceleme başlıklarının içerikleri aşağıda sunulmuştur:

- Form Düzeyi: Projelerde doğadan türetilen görsel ve yapısal biçimlerin ne ölçüde taklit edildiği veya yeniden yorumlandığı değerlendirilmiştir. Bu başlık altında, doğal morfolojilere, organik geometrilere ve doğadaki yapısal örüntülere benzer biçimsel stratejiler dikkate alınmıştır.
- Süreç Düzeyi: Tasarımın ve üretim sürecinin doğadaki süreçlerle ilişkisi irdelenmiştir. Özellikle üretken algoritmalar, büyüme mantıkları, adaptif sistemler ve canlı organizmalardaki evrimsel davranış biçimlerinin mimari süreçlere nasıl aktarıldığı bu başlıkta değerlendirilmiştir.
- Sistem Düzeyi: Projelerin doğadaki sistemsel işleyişlerle (ekosistemler, döngüsel enerji kullanımı, sürdürülebilirlik ilkeleri) ne ölçüde ilişki kurduğu analiz edilmiştir. Kullanıcı etkileşimi, çevresel duyarlılık, iklimsel adaptasyon gibi çok boyutlu parametreler bu düzeyin kapsamına girmektedir.
- Hesaplamalı Araçlar ve Yöntemler: Projede kullanılan sayısal teknolojiler ve dijital üretim teknikleri, bu başlık altında bağımsız bir analiz boyutu olarak ele alınmıştır. Parametrik tasarım, üretken algoritmalar, robotik üretim sistemleri, sensör tabanlı sistemler ve veri odaklı modelleme gibi araçların hangi bağlamlarda ve nasıl kullanıldığı değerlendirilmiştir.

Her proje, bu dört boyut kapsamında dörtlü Likert tipi bir ölçek kullanılarak şöyle puanlanmıştır: 1: Çok zayıf, 2: Zayıf, 3: Güçlü, 4: Çok güçlü. Bu ölçek, nötr bir orta değer içermemesi sayesinde değerlendirmelerin yönünü netleştirmiş ve analizler arasında karşılaştırma yapılmasına imkân tanımıştır (Hopper, 2024). Ölçütlerin yorumlanmasında nitel araştırmalarda sıklıkla kullanılan konsensüse dayalı niteliksel araştırma (consensual qualitative research) (Hill & Knox, 2021) yöntemi benimsenmiştir. Değerlendirmeler araştırmacıların ortak görüşü doğrultusunda gerçekleştirilmiş; sürecin güvenilirliğini artırmak adına dış bir uzman görüşü alınarak analiz sonuçları yeniden gözden geçirilmiştir.

Elde edilen bulgular, matris temelli bir yapı içerisinde derlenmiş ve bilgi görselleştirme teknikleri yardımıyla analiz edilmiştir. Her proje, dört analiz boyutuna göre yatay eksende, projeye ait değerlendirmeler ise dikey eksende tablolaştırılmıştır. Bu yapı, projelerin yalnızca içeriksel niteliklerini değil, aynı zamanda doğadan esinlenme düzeyleri ile dijital araç kullanımları arasındaki korelasyonları da görünür kılmayı hedeflemiştir. Bu yöntemsel yaklaşım, dijital mimarlıkta doğadan esinlenmenin yalnızca kavramsal veya estetik düzeyde değil; süreçsel, sistemsel ve teknolojik bağlamlarda nasıl bütünleştiğini ortaya koymaya olanak tanımaktadır. Böylece çalışma, projelerin bireysel niteliklerinden çok daha ötesinde, disiplinler arası bir tasarım dili ve bilgi üretim biçimi olarak doğa-dijital ilişkisini kapsamlı biçimde analiz etmiştir.

2. Bulgular

Bu araştırma kapsamında incelenen projeler, doğadan esinlenmenin dijital mimarlık bağlamında nasıl tezahür ettiğini anlamaya yönelik olarak form, süreç, sistem ve hesaplamalı araçlar başlıkları altında analiz edilmiştir. Bulgular, doğadan esinlenmenin dijital tasarımın farklı düzeylerine nasıl yansıdığına dair açık örüntüler sunmaktadır. Genel olarak, projelerin büyük çoğunluğunun form ve süreç düzeylerinde yoğunlaştığı; sistem düzeyinde ise daha sınırlı ancak yüksek nitelikli uygulamalar bulunduğu tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra, hesaplamalı araçların çeşitliliği ve bu araçların projelere entegrasyon biçimi, doğadan esinlenmenin hangi düzeyde gerçekleştiği ile doğrudan ilişkilidir (**Tablo 1**).

Analiz sonucunda her bir inceleme düzeyinde ulaşılan bulgular aşağıda sunulmuştur. Form düzeyinde doğadan esinlenen biçim, analiz edilen projelerin en baskın özelliği olarak öne çıkmaktadır. Projelerin yaklaşık %80'i bu düzeyde "güçlü" veya "çok güçlü" değerlendirmesi almıştır. Doğal örüntülerin, geometrik ilişkilerin ya da canlı organizmaların dış biçimlerinin dijital ortamda yeniden üretilmesi, mimarların hem estetik hem de strüktürel olarak doğaya yakın çözümler geliştirmesini sağlamıştır. Özellikle Frei Otto'nun yapılarında görülen ağsı ve zar benzeri yapılar, doğadaki biyolojik gerilim sistemlerinin doğrudan mimariye aktarılmasına olanak tanımıştır. Benzer biçimde, Frank Gehry'nin Guggenheim Bilbao yapısı, kompleks organik formların CATIA gibi ileri dijital modelleme araçlarıyla üretilebileceğini göstermiştir. Ancak, biyomimikri yaklaşımı bazı projelerde form düzeyindeki görsel benzerlik ile sınırlı kalmış; işlevsel veya sistemsel bir devamlılık göstermemiştir.

Süreç düzeyindeki doğadan esinlenme, projelerin yaklaşık üçte ikisinde "güçlü" ya da "çok güçlü" olarak değerlendirilmiştir. Buradaki en belirgin özellik, doğadaki üretim, büyüme, dönüşüm ve adaptasyon gibi dinamik süreçlerin dijital simülasyonlarla modellenerek tasarımın kurgulanmasında etkin rol oynamasıdır. Özellikle üretken algoritmalarla geliştirilen projelerde bu durum daha net bir biçimde izlenebilmektedir. Örneğin, Embryological House projesi, tasarımın parametrik varyasyonlarla evrimsel biçimde çoğaltılabildiği bir süreç olarak kurgulanmıştır. Aynı şekilde Hylozoic Ground projesi, sensörler ve etkileşimli sistemler aracılığıyla biyolojik tepkime süreçlerine yakın bir davranış sergilemektedir. Bu düzeyde doğadan esinlenme, artık yalnızca biçimsel değil, zaman içinde gelişebilen ve çevresel etkenlere tepki verebilen sistemler kurmayı hedeflemektedir.

Sistem düzeyindeki biyomimikri, incelenen projeler arasında daha az temsil edilmekle birlikte, içeriği bakımından en yüksek potansiyeli barındıran düzeydir. Projelerin yalnızca %20'si bu başlık altında "güçlü" veya "çok güçlü" olarak değerlendirilmiştir. Ancak bu sınırlı sayıdaki projeler, doğayı yalnızca bir biçim veya üretim modeli değil, bir yaşam sistemi olarak ele almış; dolayısıyla mimari tasarımı ekolojik döngüler, enerji ilişkileri, kaynak kullanımı ve toplumsal etkileşim gibi çok katmanlı bir bağlama yerleştirmiştir. The African Fabbers Project, yerel malzeme ve topluluk temelli üretim süreçlerini entegre ederek ekosistemsel yaklaşımı mekânsal tasarıma dönüştürmüştür. BUGA Fibre Pavilion ise doğadaki lifli organizasyonlardan ilham alarak, sürdürülebilir, hafif ve esnek yapı sistemlerinin robotik üretimle nasıl inşa edilebileceğini göstermektedir. Bu tür projelerde sistemsel biyomimikri, yalnızca tasarım nesnesine değil, tasarım sürecine ve toplumsal etkilerine de dokunmaktadır.

Hesaplamalı araçlar ve yöntemler açısından analiz edilen tüm projeler, dijital teknolojilerin doğayla kurulan ilişkinin yeniden tanımlanmasında vazgeçilmez bir rol oynadığını göstermektedir. Parametrik tasarım araçları, üretken algoritmalar, çevresel simülasyon yazılımları, sensör entegrasyonu ve robotik üretim sistemleri gibi araçlar, form ve süreç düzeylerindeki biyomimetik uygulamaların etkin biçimde hayata geçirilmesini mümkün kılmıştır. Wikihouse projesinde açık kaynaklı CAD platformları, biyolojik iş birliği modellerinden esinlenen topluluk tabanlı bir üretim süreci ile birleşmiştir. Galaxia Temple ise parametrik formların, dijital fabrikasyon teknikleri ile hızlı ve yerinde üretilebilmesini göstermiştir. Hesaplamalı araçların çeşitliliği arttıkça, doğadan esinlenmenin yalnızca daha karmaşık biçimlere değil, aynı zamanda daha anlamlı süreç ve sistem örüntülerine dönüştüğü gözlemlenmiştir.

Tablo 1. Mimarlıkta sayısal tasarımın gelişiminin doğadan esinlenme açısından incelenmesi

Proje Adı Mimarı	Form	Süreç	Sistem	Hesaplamalı Araçlar ve Yöntemler
Prairie Houses Frank Lloyd Wright (1900'ler)	Çok Güçlü – Doğayla uyumdan esinlenen organik mimarlık formları içerir.	Güçlü – Doğal çevreyle bütünleşme süreçlerini taklit eder.	Güçlü – Arazi ve çevre ile ekosistem seviyesinde bütünleşme hedefler.	El çizimi, sistematik arazi ve çevre analizi
Fun Palace Cedric Price (1962)	Zayıf- Biyomimetik form üzerinden adapte olabilirlik ilkesini minimal seviyede kullanır.	Çok Güçlü – Sibernetik üzerinden adapte olma süreçlerini uygular.	Güçlü – İnsan-makine etkileşimi sistemlerine odaklanır.	Sibernetik, erken dönem sistem düşüncesi
Munich Olympic Stadium Frei Otto (1972)	Çok Güçlü – Balon köpüğü ve örümcek ağları gibi doğal formlardan esinlenen formlar içerir.	Çok Güçlü – Doğanın gergi strüktür oluşturma süreçlerini taklit eder.	Güçlü – Ekosistem seviyesinde etkileşim ve malzeme etkin tasarım düşünülmüştür.	Erken dönem fiziksel hesaplamalı sistemler
Institut du Monde Arabe Jean Nouvel (1987)	Çok Güçlü – İslam mimarlığı ve doğal ışıkla şekillenmiş geometrik örüntüler içerir.	Güçlü – Doğadaki dinamik süreçleri taklit eden mekanik sistemler kullanır.	Zayıf – Ekosistem seviyesinde çevresel tepkimeye minimal vurgu yapar.	Cephe tepkimesi için mekanik hesaplama
Yokohama International Port Terminal FOA (1995)	Güçlü – Kıvrımlı, doğal topoğrafyayı taklit eden formlar içerir.	Güçlü – doğal sistemlere benzer akışlar ve dolaşım içerir.	Zayıf– Ekosistem seviyesinde biyomimikri sınırlıdır.	Hesaplamalı akış analizi, parametrik tasarım
Guggenheim Bilbao Frank Gehry (1997)	Çok Güçlü – Sayısal araçlarla yaratılmış karmaşık, organik formlar içerir.	Zayıf – Yenilikçi ama doğrudan biyomimetik olmayan süreçler içerir.	Çok Zayıf – Ekosistem seviyesinde biyomimikri yoktur.	CATIA, parametrik modelleme
Embryological House Greg Lynn (1998)	Çok Güçlü – Son derece organik, evrilen formlar içerir.	Çok Güçlü – Doğal büyüme süreçlerini taklit eden üretken sistem kullanır.	Güçlü – Doğadan esinlenen modüler özelleştirme sistemi kullanır.	Üretken sistemler, sayısal morfogenez
Aegis Hyposurface dECOi Architects (2001)	Zayıf – Doğal dinamik formlardan esinlenen kinetik formları minimal düzeyde içerir.	Çok Güçlü – Çevresel değişkenlere karşı doğal tepkime süreçlerini taklit eder.	Çok Zayıf – Eko-sistem seviyesinde biyomimikri yoktur.	Gerçek zamanlı etkileşim için kodlama
Kartal Pendik Masterplan Zaha Hadid Architects (2006)	Çok Güçlü – Doğal topoğrafyadan esinlenen akışkan, organik formlar içerir.	Çok Güçlü – Adaptif kentsel sistemler için üretken sistem süreçleri kullanır.	Güçlü – Ekosistem seviyesinde kentsel planlama prensipleri hedefler.	Parametrik tasarım, GIS
Olzweg R&Sie(n) (2006)	Güçlü – Doğal karmaşıklıktan esinlenen standart dışı, organik formlar içerir.	Güçlü- Doğal büyüme süreçlerini taklit eden üretken sistem kullanır.	Zayıf – Deneysel, lokal sistemlere sınırlı vurgu yapar.	Üretken sistemler, çevresel simülasyon
The Programmed Wall Gramazio Kohler Research (2006)	Zayıf – Doğadaki kinetik sistemlerin formlarını düşük seviyede taklit eden hareketli duvar içerir.	Çok Güçlü – Doğal adepte olma süreçlerini taklit eden robotik süreçler kullanır.	Çok Zayıf- Eko-sistem seviyesinde biyomimikri yoktur.	Robotik üretim, kinetik modelleme
Hylozoic Ground Philip Beesley (2010)	Çok Güçlü – Canlı organizmalara benzeyen formlar kullanır.	Çok Güçlü – doğal süreçleri taklit eden, etkileşimli, kendi kendine organize olan sistemler içerir.	Çok Güçlü – Eko-sistem seviyesinde entegrasyon ve kullanıcı etkileşimi içerir.	Arduino, sensörler, parametrik modelleme
The African Fabbers Project Paolo Cascone (2011)	Güçlü – Yerel malzemeleri ve biyomimetik prensipleri yansıtan formlar içerir.	Çok Güçlü – doğal kaynakların optimizasyonundan esinlenen üretim süreçleri kullanır.	Çok Güçlü – Yerel, sürdürülebilir eko-sistemlere güçlü vurgu yapar.	Sayısal üretim, katılımcı tasarım
Wikihouse Architecture 00 (2014)	Güçlü – Doğal formların basitliğinden esinlenen modüler, erişilebilir formlar içerir.	Çok Güçlü – Biyolojik iş birliğinden esinlenen açık kaynak, komünite-tabanlı süreçler kullanır.	Güçlü – Sürdürülebilir, kaynakları verimli kullanan sistemlere odaklanır.	Açık kaynak CAD araçları, CNC
Galaxia-Burning Man Temple Mamou-Mani (2018)	Çok Güçlü – Galaksi geometrisi ve radyal simetriden esinlenen parametrik formlar içerir.	Çok Güçlü – doğal form üretme süreçlerini taklit eden sayısal üretim teknikleri kullanır.	Zayıf – Geçici, insan merkezli sistemlere öykünür.	Parametrik tasarım, robotik üretim
BUGA Fibre Pavilion ICD (Achim Menges) (2019)	Çok Güçlü – Doğadaki formlardan esinlenen hafif, lifli formlar içerir.	Çok Güçlü – Hesaplamalı üretim sistemi biyolojik büyüme süreçlerini taklit eder.	Çok Güçlü – Etkin malzeme kullanımına ve sürdürülebilirliğe sistem seviyesinde vurgu yapar.	Robotik üretim, üretken strüktürel simülasyon

Bulgular, dijital mimarlıkta doğadan esinlenmenin güçlü biçimde var olduğunu, ancak bu esinlenmenin ağırlıklı olarak form ve süreç düzeylerinde yoğunlaştığını ortaya koymuştur. Form düzeyindeki uygulamalar, dijital araçların biçim üretme kapasitesi sayesinde daha erişilebilir hale gelmiş; organik geometriler, doğal örüntüler ve biyomorfik biçimler parametrik tasarımla kolayca ifade edilebilmiştir. Süreç düzeyinde ise üretken algoritmalar, çevresel simülasyonlar ve etkileşimli sistemler aracılığıyla doğadaki büyüme ve adaptasyon süreçleri mimari tasarıma aktarılmıştır. Buna karşın, sistem düzeyindeki biyomimikri sınırlı sayıda projede temsil edilmiştir. Bu düzeyde doğa, yalnızca biçimsel ya da süreçsel değil; kaynak kullanımı, döngüsellik, enerji verimliliği ve toplumsal etkileşim gibi çok katmanlı sistemler olarak ele alınmıştır. Hesaplamalı araçlar, bu üç düzey arasında bir köprü kurmakta ve doğadaki bilgi ve örüntülerin dijital ortamda yeniden üretilmesini mümkün kılmaktadır. Parametrik modelleme, robotik üretim, sensör entegrasyonu ve veri odaklı tasarım yöntemleri hem biçim hem de süreç temelli biyomimikri uygulamalarını desteklemekte; sistem düzeyine geçişte de önemli bir potansiyel sunmaktadır. Genel olarak, analizler doğa temelli yaklaşımların dijital mimarlık içinde kabul gördüğünü, ancak form ve süreç odaklı uygulamaların daha kolay benimsendiğini, sistem düzeyinin ise daha karmaşık yapısı nedeniyle hâlâ sınırlı kaldığını göstermektedir. Bu da dijital araçların olanakları kadar, mimarlık pratiğinin dönüşümüne yönelik yapısal ve kavramsal ihtiyaçları da işaret etmektedir.

4. Sonuçlar

Bu çalışma, dijital tasarım ile doğadan esinlenme arasındaki çok katmanlı ilişkiyi, biyomimikri kavramı çerçevesinde inceleyerek, çağdaş mimarlıkta bu ilişkinin nasıl biçimlendiğini ve hangi düzeylerde temsil edildiğini tartışmıştır. Çalışma kapsamında elde edilen bulgular, dijital mimarlığın doğaya yöneliminde zamanla belirgin bir artış olduğunu ortaya koymakla birlikte, bu yönelimin büyük ölçüde biçimsel ve süreçsel düzeylerde yoğunlaştığını; sistem düzeyinde ise hâlen sınırlı ve seçici bir temsilin var olduğunu göstermektedir. Bu durum, doğadan esinlenmenin dijital tasarım araçlarıyla kolaylıkla bütünleşebilen yönlerinin öne çıktığını; buna karşılık daha karmaşık, çok ölçekli ve bütünleşmiş sistem kurgularının hâlen istisnai kaldığını ortaya koymaktadır.

Biçim düzeyindeki uygulamaların dijital araçların geometrik manipülasyon yeteneklerinden beslendiği, bu nedenle doğanın görsel ve yapısal örüntülerinin sıklıkla yeniden üretildiği gözlemlenmiştir. Ancak bu yaklaşım, doğayı sadece biçimsel bir kaynak olarak gören sınırlı bir perspektifin ürünüdür. Görsel benzerlik üzerinden kurulan bu ilişki, doğanın sistemsel, döngüsel ve işlevsel boyutlarını yeterince içselleştirmemektedir. Bu bağlamda, doğadan esinlenmenin estetik bir stratejiye indirgenmesi, biyomimikrinin sunduğu potansiyeli sınırlandırmakta ve mimari düşünceyi yüzeysel seviyede tutmaktadır.

Süreç düzeyindeki yaklaşımlar ise doğanın evrimsel, adaptif ve tepkisel niteliklerinin dijital araçlarla modellenmesine olanak tanımaktadır. Üretken algoritmalar, çevresel veriye dayalı simülasyonlar ve parametrik varyasyonlar, tasarım sürecini daha esnek ve bağlamsal hâle getirmektedir. Ancak bu tür yaklaşımların da çoğunlukla son çıktının biçimsel çeşitliliğine odaklanması, doğadaki süreçlerin ardındaki sistemsel ilkelerin yeterince derinlemesine anlaşılmadığını göstermektedir. Doğanın süreçsel işleyişi yalnızca görsel form üretmek için değil; tasarımın zamanla gelişen, çevreye uyum sağlayan ve sürdürülebilir yapılar kurmasını mümkün kılacak biçimde ele alınmalıdır.

Araştırmanın en çarpıcı sonuçlarından biri, sistem düzeyindeki biyomimikri uygulamalarının mimarlık pratiğinde oldukça sınırlı bir yer kaplamasıdır. Sistem düzeyi, yalnızca mimari nesnenin değil, onun çevresiyle kurduğu ilişkiler bütününün yeniden düşünülmesini gerektirmektedir. Bu düzeydeki uygulamalar; enerji döngüleri, iklimsel adaptasyon, kullanıcı etkileşimi, sürdürülebilir malzeme kullanımı, yerel bağlamla bütünleşme gibi çok katmanlı stratejiler içerdiğinden, yalnızca dijital araçlarla değil, aynı zamanda disiplinler arası iş birlikleri, yönetsel planlama ve sistemsel düşünme ile geliştirilebilir. Çalışma kapsamında bu düzeyde değerlendirilen sınırlı sayıdaki proje, mimarlıkta doğa temelli düşünmenin yalnızca biçimsel bir yenilik değil, yapılı çevrenin organizasyonel olarak yeniden kurgulanmasını gerektiren bir dönüşüm süreci olduğunu göstermektedir.

Hesaplamalı araçlar ise, bu üç düzeyi birbirine bağlayan epistemolojik bir arayüz işlevi görmektedir. Bu araçlar, doğadaki bilgi örüntülerinin yalnızca görselleştirilmesini değil, analiz edilmesini, dijital ortamda yeniden yapılandırılmasını ve tasarım süreçlerine entegre edilmesini mümkün kılmaktadır. Ancak bu araçların potansiyeli, yalnızca teknik beceri düzeyinde değil; onları tasarımsal araştırmanın bir parçası olarak konumlandırma yeteneği ile

tam anlamıyla açığa çıkabilir. Bu bağlamda dijital mimarlık, sadece yeni formlar üretmenin değil, doğanın örgütlenme ilkelerine dayalı sistemlerinin yeniden düşünülmesinin de bir aracı olabilir.

Dijital mimarlık ile doğadan esinlenme arasındaki ilişki, kuramsal düzeyde giderek daha fazla kabul görse de uygulamada bu ilişkinin hâlâ yüzeysel ve parçalı kaldığı söylenebilir. Form ve süreç düzeyindeki uygulamalar, dijital araçlarla kolaylıkla temsil edilebilirken; sistem düzeyindeki yaklaşımlar daha bütüncül, sürdürülebilir ve çok boyutlu tasarım stratejileri gerektirmektedir. Bu nedenle, doğadan esinlenmenin mimarlıkta daha etkin ve dönüştürücü bir yaklaşım haline gelebilmesi için, sistem düzeyinde kavramsal bir derinleşmeye, yaratıcı dijital araştırmalara ve disiplinler arası örgütlenmeye ihtiyaç vardır.

Bu çalışma, dijital tasarım ile doğa temelli düşünme biçimlerinin kesişiminde yer alan ilişkileri görünür kılarak, mimarlıkta sadece teknik bir dönüşüm değil, aynı zamanda entelektüel ve metodolojik bir dönüşümün de zeminini tartışmaya açmıştır. Bu bağlamda, gelecekte yapılacak daha kapsamlı ve bütüncül araştırmaların, mimarlığın doğa ile olan ilişkisinin daha derin, sürdürülebilir ve sistemsel bir düzleme taşınmasına katkı sağlayacağı öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

Antoniades, A.C. (1990). *Poetics of architecture: Theory of design*. Van Nostrand Reinhold.

Benyus, J. M. (1997). *Biomimicry: Innovation inspired by nature*. Morrow.

Carpo, M. (2023, March). A Short but Believable History of the Digital Turn in Architecture. E-Flux. https://www.e-flux.com/architecture/chronograms/528659/a-short-but-believable-history-of-the-digital-turn-in-architecture

Claypool, M. (2019). *The digital in architecture: Then now and in the future*. Space 10.

Gruber, P. (2011). *Biomimetics in architecture: Architecture of life and buildings*. Springer.

Hill, C. E., & Knox, S. (2021). *Essentials of Consensual Qualitative Research*. American Psychological Association.

Hopper, J. (2024, January 15). *Why you need 4-Point scales*. Versta Research. Retrieved 2025, March 30, from https://verstaresearch.com/blog/why-you-need-4-point-scales

MSTAS 2025 MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

The Case Study of Bamboo Form-Finding based on the Material Passport

Yusra Ekin
Samsun University and Istanbul Technical University
yusra.ekin@samsun.edu.tr

Abstract

In an era of increasing consumption and resource depletion, transitioning from a linear economy, characterized by the 'take, make, waste' approach, to a circular economy has become essential for sustainable development. A crucial step in facilitating this transition is gaining a comprehensive understanding of material life cycles, which allows for their prolonged use and effective reuse strategies. The material passport emerges as a vital tool, providing a digital identity that documents detailed material properties, quantities, and environmental impacts. This digital documentation enables stakeholders to make proactive decisions based on specific sustainability, performance, and regulatory requirements. By supporting a bottom-up approach, material passports allow stakeholders to optimize design decisions and material management from the outset, moving away from reactive solutions. Additionally, material passports function as tools for design optimization by clearly presenting the materials' characteristics and capabilities to users.

This study specifically explores the life cycle and application of bamboo, a renewable and biobased material, by developing a comprehensive material passport highlighting its unique properties. Depending on stakeholder requirements, this passport can emphasize specific attributes of bamboo, such as its mechanical strength, flexibility, or ecological benefits. Bamboo's inherent mechanical and physical properties were utilized through a form-finding study to explore its structural potential. The study aimed to design and evaluate a bending-active bamboo gridshell structure, specifically analyzing bamboo's elastic and bending behavior to determine structural performance and feasibility.

The initial form generation process was carried out using Grasshopper and Kangaroo, which allowed iterative exploration of bamboo's structural forms. Subsequently, structural optimization values were determined according to material-specific characteristics and behaviors, employing Millipede for detailed deflection analyses through finite element methods (FEM) and Karamba for comprehensive structural analyses and digital optimization simulations. The final design integrates hand-tied bamboo connections inspired by traditional Cantonese scaffolding techniques, enhancing the structure's cultural relevance and practicality. By this means, unlike previous works that rely solely on either simulations or craft traditions, this research proposes a hybrid material-informed methodology that acknowledges the limitations and potentials of each domain. Furthermore, the structure incorporates a custom white tensile fabric covering, complementing the overall architectural design.

This study underscores bamboo's considerable potential as a sustainable construction material by effectively combining material passports with advanced digital optimization tools. It demonstrates how incorporating circular economy principles into lifecycle management and design processes can significantly contribute to sustainability and innovation in contemporary construction practices.

Keywords: *Circular Economy, Material Passport, Bamboo Structures, Bamboo Standards, Form-Finding, Optimization, Elastic and Bending Material Behaviour.*

2025 MSTAS MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Malzeme Pasaportuna Dayalı Bambu Form Arayışı Vaka Çalışması

Yusra Ekin
Samsun Üniversitesi and İstanbul Teknik Üniversitesi
yusra.ekin@samsun.edu.tr

Özet

Tüketimin ve kaynak tükenmesinin giderek arttığı bir çağda, "al, üret, at" yaklaşımıyla tanımlanan doğrusal ekonomiden döngüsel ekonomiye geçiş, sürdürülebilir kalkınma için vazgeçilmez hale gelmiştir. Bu geçişi kolaylaştırmanın önemli adımlarından biri, malzeme yaşam döngülerinin kapsamlı bir şekilde anlaşılmasıdır. Bu sayede malzemelerin kullanım ömrü uzatılabilir ve etkili yeniden kullanım stratejileri geliştirilebilir. Bu bağlamda malzeme pasaportu, dijital bir kimlik sunarak malzemelerin detaylı özelliklerini, miktarlarını ve çevresel etkilerini belgeleyen hayati bir araç olarak öne çıkar. Bu dijital belgeleme, paydaşların belirli sürdürülebilirlik, performans ve mevzuat gerekliliklerine dayalı olarak bilinçli ve proaktif kararlar almasını mümkün kılar. Malzeme pasaportları, tabandan yukarıya doğru bir yaklaşımı destekleyerek, paydaşların daha sürecin başında tasarım kararlarını ve malzeme yönetimini optimize etmelerine olanak tanır; bu da reaktif çözümlerden uzaklaşmayı sağlar. Ayrıca, malzeme pasaportları, malzemelerin özelliklerini ve yetkinliklerini kullanıcıya açık bir şekilde sunarak tasarım optimizasyonu araçları olarak da işlev görür.

Bu çalışma, yenilenebilir ve biyotabanlı bir malzeme olan bambunun yaşam döngüsünü ve uygulamasını, onun benzersiz özelliklerini vurgulayan kapsamlı bir malzeme pasaportu geliştirerek ele almaktadır. Paydaş gerekliliklerine bağlı olarak bu pasaport, bambunun mekanik dayanımı, esnekliği ya da ekolojik faydaları gibi belirli niteliklerini öne çıkarabilir. Bir form arayışı çalışması aracılığıyla, bambunun doğal mekanik ve fiziksel özelliklerinden yararlanılarak onun yapısal potansiyeli araştırılmıştır. Çalışmada, bambunun elastikiyetini ve eğilme davranışını analiz ederek, eğilme-aktif bir bambu kafes kabuk yapısı tasarlanması ve yapısal performansının değerlendirilmesi hedeflenmiştir.

İlk form üretim süreci, Grasshopper ve Kangaroo kullanılarak gerçekleştirilmiş ve bambunun yapısal formları yinelemeli olarak keşfedilmiştir. Ardından, malzeme özelindeki özellik ve davranışlara göre yapısal optimizasyon değerleri belirlenmiş; ayrıntılı sehim analizleri için Millipede (sonlu elemanlar yöntemi - FEM) ve kapsamlı yapısal analizler ile dijital optimizasyon simülasyonları için Karamba kullanılmıştır. Nihai tasarımda, geleneksel Kanton iskele tekniklerinden esinlenen elle bağlanmış bambu bağlantıları kullanılmış; bu da yapının kültürel bağlamını ve uygulanabilirliğini güçlendirmiştir. Bu sayede, sadece simülasyonlara veya sadece zanaat geleneklerine dayanan önceki çalışmalardan farklı olarak, bu araştırma her iki alanın da sınırlılıklarını ve potansiyellerini dikkate alan hibrit, malzeme odaklı bir yöntem önermektedir. Ayrıca, yapının genel mimari tasarımını tamamlayan özel üretim beyaz germe kumaş kaplama da entegre edilmiştir.

Malzeme pasaportlarının gelişmiş dijital optimizasyon araçlarıyla etkili bir şekilde birleştirilmesiyle, bu çalışma bambunun sürdürülebilir bir yapı malzemesi olarak önemli potansiyelini vurgulamaktadır. Döngüsel ekonomi ilkelerinin yaşam döngüsü yönetimi ve tasarım süreçlerine entegre edilmesinin, çağdaş inşaat uygulamalarında sürdürülebilirlik ve yenilikçiliğe önemli katkılar sağlayabileceğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Döngüsel Ekonomi, Malzeme Pasaportu, Bambu Yapılar, Bambu Standartları, Form Arayışı, Optimizasyon, Elastik ve Eğilme Malzeme Davranışı.*

1. Introduction

Recently, the term “circular economy” has become popular since it focuses on sustainable growth and regenerative approaches in product design and the service supply chain. In fact, it means continuing to use materials and products without producing waste (Van Der Lugt & King, 2019). This demonstrates that "circular economy" should be preferred instead of "linear economy", which is known as the use of "take, make, waste", which brings about the termination of resources and corresponds to consumption today (Liu & Ramakrishna, 2021). Otherwise, the linear economy will result in environmental problems, endanger the human community and ecosystem, and deplete the resources of finite materials. In this respect, the circular economy is presented as a solution to environmental problems. At the same time, the circular economy requires knowledge of materials to deduce the life cycle stages of materials (Van Der Lugt & King, 2019). Thus, using the circular economy, the materials can stay longer (Liu & Ramakrishna, 2021).

When structures are defined with the circular system, the life cycles of buildings can be inferred to define reusable components or to use biodegradable materials. In this sense, biological and technological loops and immaterial practices, including locality, knowledge, management, skills, and expertise, are specified. The separation of buildings with a biological or technological cycle basically consists of the combination of biobased material with reusable material.

Biobased materials are defined as materials derived from living organisms. Such materials establish a biological cycle, absorb carbon for a long time, or can be reused (Hubmann & van Maaren, 2022). Bamboo, a biobased material, has various potentials with its elastic and bending material behavior and sustainable and renewable aspects through its fast-growing and carbon-capturing features. It has the potential for both a circular economy and structurally constructing buildings. The bamboo construction industry can be evaluated with several points, such as digital modeling, digital fabrication, and other advanced tools (Van Der Lugt & King, 2019; Estrada Meza et al., 2022). It can be observed in terms of bamboo’s specific properties.

1.1. Bamboo

Bamboo is a fast-growing, naturally renewable tree-like grass material that grows mainly in Southeast Asia, Africa, Latin America, and the southern region of the USA. It is included in the circular economy as a biological cycle. The bamboo circularity has a high potential to contribute to the economy. Bamboo is a material with regenerative, low-carbon, and zero-waste alternative uses and has a long lifespan. It has features such as rapidly self-regenerating, fast growth, and harvesting without the need to replant. Bamboo matures quickly in 3-5 years, and deliberate and regular annual harvesting of bamboo makes it resistant to clear-cutting and deforestation. It is an edible resource, making it suitable for the circular economy (Van Der Lugt & King, 2019).

1.2. Bamboo Circularity and Usages

Bamboo can be used in many industrial products and has diverse uses. It has traditionally been utilized in various fields such as handicrafts, construction, food, building, pulp, and paper industry, and medicine. Using technology, bamboo can be separated and turned into particles, fibers, slivers, strips, and manifold construction materials such as aluminum, PVC, and steel (**Figure 1**). It is also an excellent substitute for creating plastic. It can be used in many products such as phones, watches, laptops, glasses, kitchenware, sports, health, and beauty products. Bamboo products can be repurposed and recycled. Besides, it can be burned into different types of biomass-based energy such as gas, pellets, and charcoal through cooking, heating, and generating electricity (Van Der Lugt & King, 2019; Kaur et al., 2022; Eco & Beyond, n.d.; Climate Action Africa, n.d.).

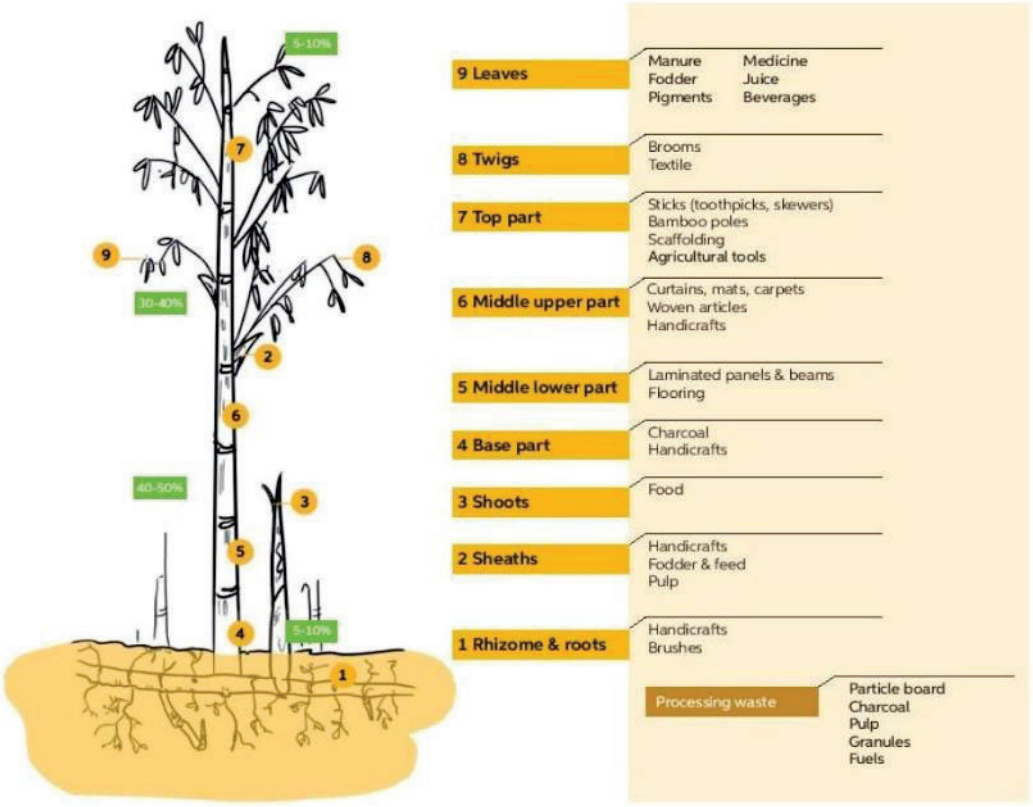


Figure 1: Full utilisation of the bamboo resources (Van Der Lugt & King, 2019)

1.3. Material Passport

The material passport is used to centralize all data, as a transition from a linear economy to a circular economy. It is a system where information about the characteristics of materials and a particular material can be obtained. Thus, the material is included in the circular economy to be used for a long time that ensures recycling and reuse without becoming waste. It becomes an eco-collaborative tool that stakeholders can access depending on their needs. The digital identity of the material is created. The material passport also provides building optimization at different stages of design (Panza et al., 2022; Liu & Ramakrishna, 2021; Luscuere, 2017; Honic et al., 2019a; Heisel & Rau-Oberhuber, 2020; Honic et al., 2019b; Munaro et al., 2019).

The purpose of this study is to evaluate the form-finding process of bamboo, considering its features taken from the material passport. Hence, the study starts with creating a material passport for bamboo (**Table 1**).

Table 1: Material Passport of the Bamboo

MATERIAL PASSPORT	Analyzed Parameters and Dimensions	Remarks
Material Digital Code:	NSR-10 Colombian code	
Material Name:	Bamboo	
Material Type:	A grass / the Gramineae family	
Location:	Asia, Africa, South, Central and North America, European countries, Indonesia, Vietnam	
Climate:	Tropical, subtropical, and mild temperature zones	
Manufacturer:	User defined	
Product Price:	User defined	
General Material Properties		
• Rapidly self-regenerating • Fast growth rate • Harvested without the need to replant • Matures quickly, within 3 to 5 years	• Being able to store more carbon than certain species of tree • Low cost, abundance • Low weight-to-height ratio • Load-bearing abilities	• Carbon-capture • Feasible • Bio-based alternative • Endless circular economy
Physical Properties		
Element length	4, 5 or 6 m	The three lengths are tested with three different joists spacing.
Joist spacing	40, 50 or 60 cm	
Exterior diameter of the culm (De) Wall THICKNESS of the culm (t)	10 cm 1.5 cm	Guadua a. K., in diameters of 9 cm to 12 cm, and internal wall greater than 15% of the culms diameter, is sold in Colombia to be used as beams and columns. In this work, a 10 cm diameter is used.
Specific WEIGHT (γ)	700 kg/m3	
Density:	700-800 kg/m3	

Mechanical Properties		
Modulus of elasticity E	9500 Mpa = 95,000 kg/cm2	According to the NSR-10, the percentile modulus—E0.5,
Shear modulus G	G = element analysis. E/25	G0.5 should be used for structural element analysis.
Poisson's Ratio:	0.4	
Live load (L)	35 kg/m2	Applied to >15 sloping roofs
Dead load (D)	Joists spacing = 0.4 m D = 17 kg/m2 Joists spacing = 0.5 m D = 15.6 kg/m2 Joists spacing = 0.6 m D = 12.8 kg/m2	First, the weight per linear meter was calculated with: w = V. The result was then multiplied by the number of culms in a square meter. Finally, 10 kg/m2 weight was added, which corresponds to a bamboo slat as a covering for the shell.
Load combination	D + L	D = dead load L = live load
Ultimate compressive strength:	User defined	
Ultimate tensile strength:	28,000 PSI	
K	240	deflection factor
Reuse Potential / Circularity		
Turn a bamboo into:	Biomass-based energy (Burned as energy):	
• Fibers • Strips Particles • Slivers • Many construction Materials • Plastic	• Gas • Charcoal • Pellets • Being able to be used for heating, cooking, generating electricity	
Contributions of the Material to the Global World		
• Poverty reduction • Employment generation	• Less deforestation • Reducing climate change	

2. Method

In this section, after choosing bamboo, which is a biobased material, the form-finding process of bamboo is created by using certain data according to the material's properties and behavior. In this study, it is aimed to create a bending-active bamboo gridshell structure in line with bamboo's elastic and bending behaviors by utilizing bamboo's mechanical and physical properties. The lengths of the elements, the distances between them, the weight of the material, the density value, the modulus of elasticity, the poisson's ration value, the load and deflection values are crucial in their mechanical and physical properties. The workflow of the study consists of 4 stages. After obtaining the required properties of the material from the material passport, the study starts with creating the form in Grasshopper. Three dimensions are given to the curves according to strength and load values in Kangaroo, and the surfaces are divided into panels in terms of the characteristics of the bamboo in Weaverbird. Thereafter, the specific values of the material are given to the three-dimensional modelling of the selected bamboo structure in Millipede, and deflection analysis is performed in Millipede. Lastly, Karamba 3D, a digital simulation, is created to monitor the structural behavior of the bamboo structure, and an optimization study is carried out (**Figure 2**).

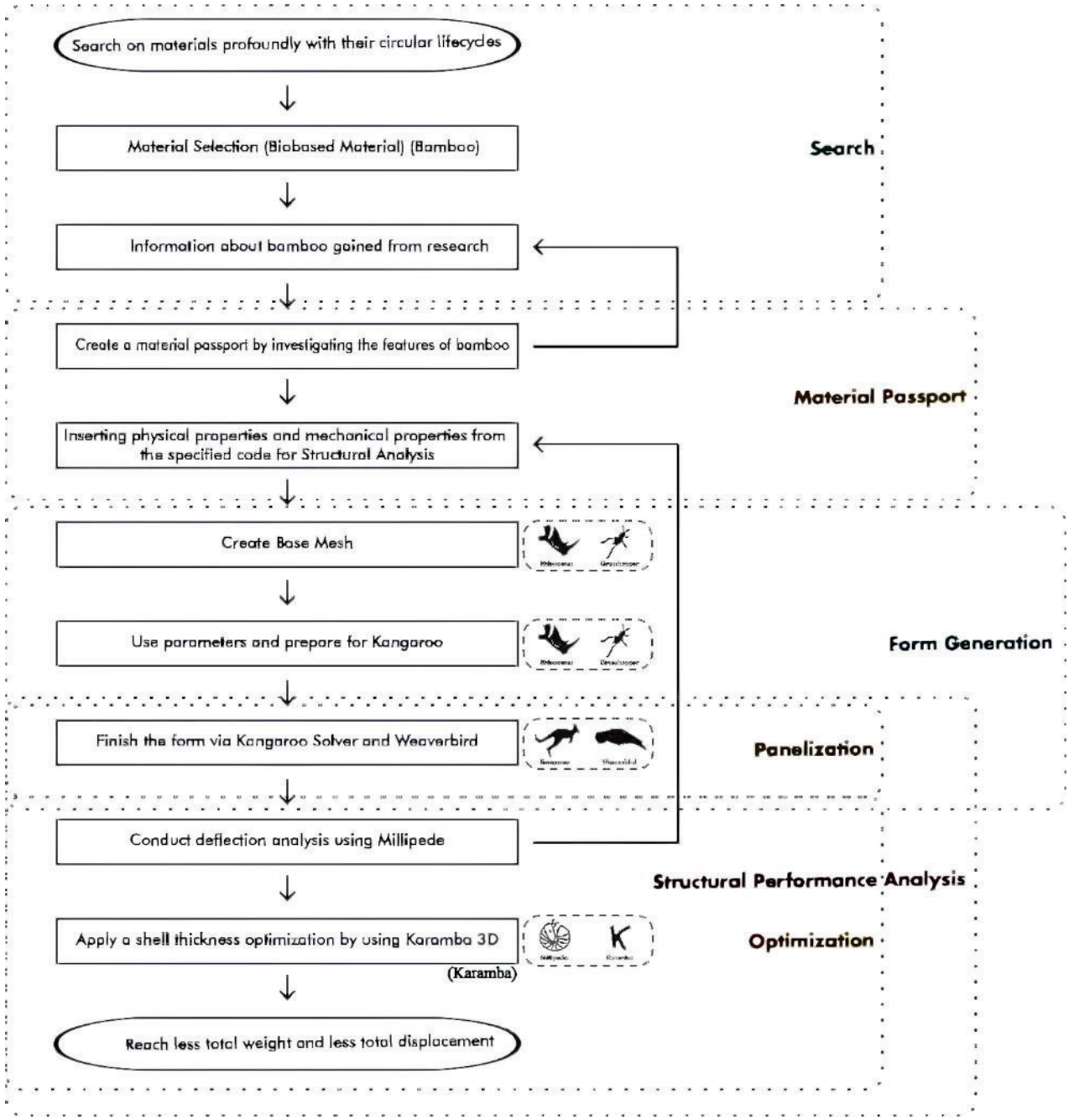


Figure 2: Flowchart of the Study

2.1. Form Generation

The study first started by defining the form of the Grasshopper. In order to create the form, to begin with, an area inside the triangle was defined on the ground, then this object was turned into a three-legged mesh with mirror and polar array commands. Then, the mesh was refined, naked vertices emerged, support points, loads, and strength values were constituted, and the model was prepared in Kangaroo Solver in a way that would define three dimensions. The panels were defined by determining the mesh thickness created with the Weaverbird add-on. The length of the bamboo used is considered to be 4m, 5m, and 6m. The diameter of the bamboo is 10 cm, and the thickness is 1.5 cm; the parameter is accessed in Weaverbird (**Figure 3**).

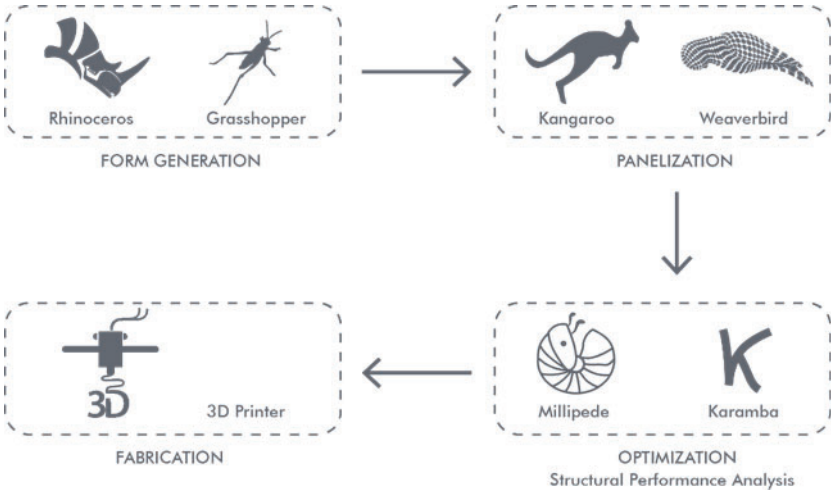


Figure 3: Programs Used

2.2. Calculations Based on the Material Passport and Structural Performance and Optimization Analysis

According to the specified code in the material passport, the modulus of elasticity and poisson's ratio, thickness, and deflection value are used in Millipede. By means of the Mesh Visualization command, “Bending Moment”, “Principal Stress”, and “Deflection” simulations are demonstrated. Millipede was chosen as a tool for deflection analysis and the finite element method(FEM). As for Karamba 3D, loads and supports are adjusted, and structural analyses are done. In order to provide digital optimization, less total weight and less total displacement were tried to be provided (**Figure 4 and Figure 5**).

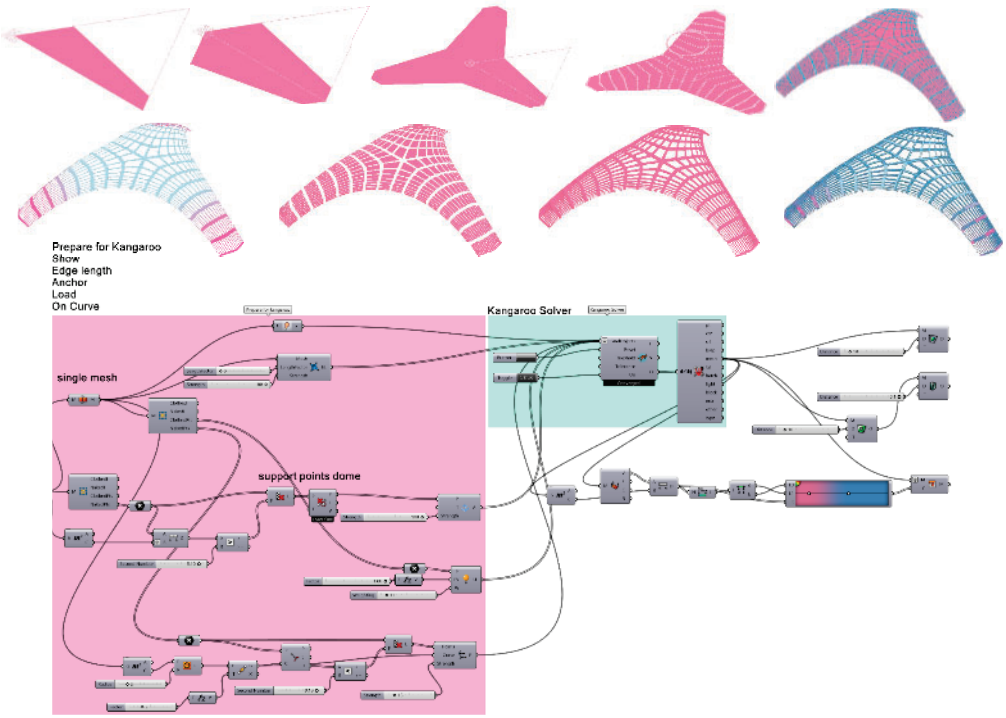


Figure 4: Form Generation

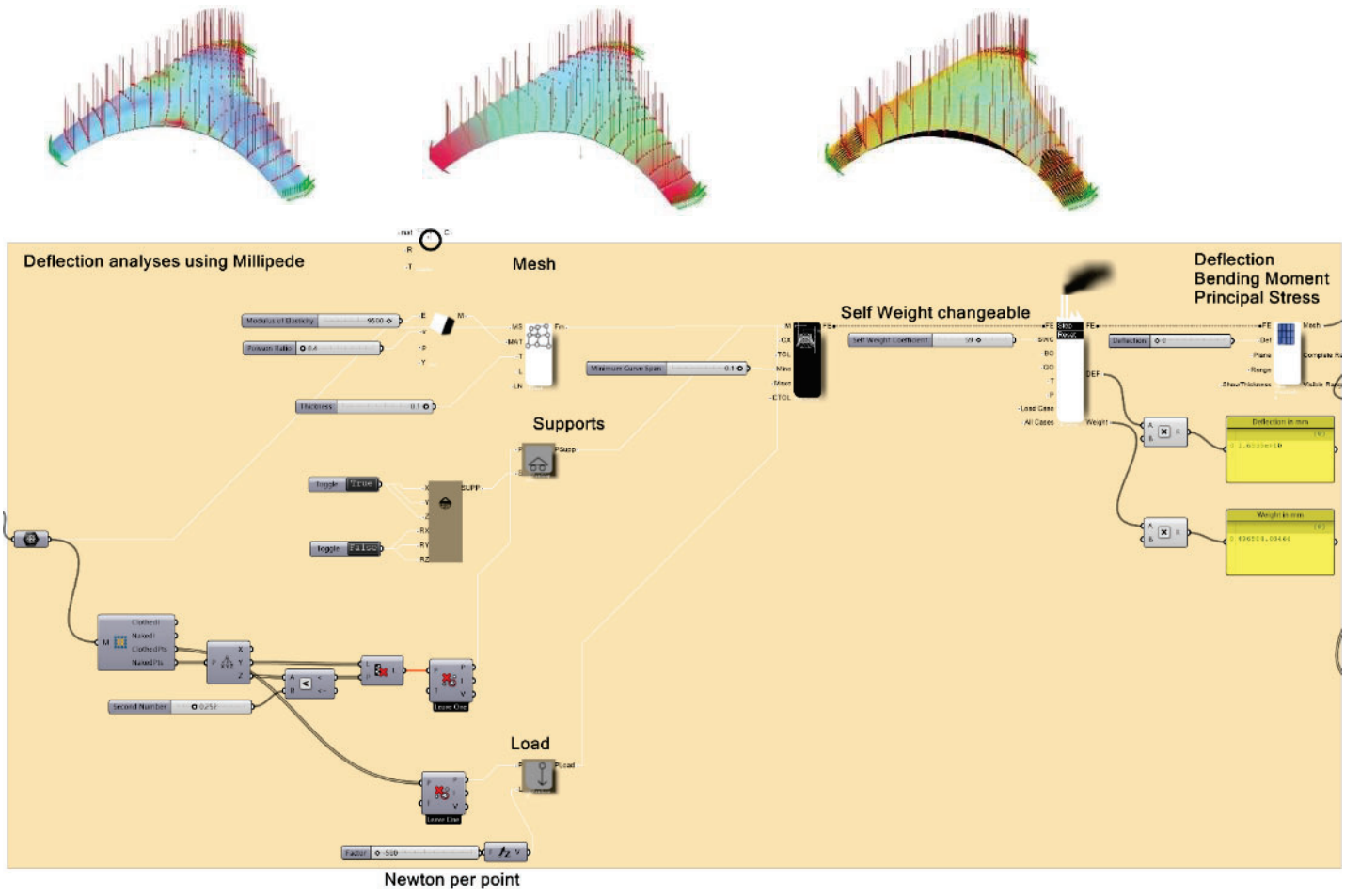


Figure 5: Calculations Based on the specified code in the Material Passport, Structural Performance, and Optimization Analysis

2.3. Digital Fabrication with 3d Printer

The 1/50 scale digital fabrication model was not intended to reflect structural performance, but to verify spatial configuration, node distribution, and connection feasibility at a reduced scale. It served as a geometric validation tool for the digital design and a bridge between digital abstraction and physical implementation. The model's limitations in material behavior representation are acknowledged, yet its role in pre-assembly communication and form verification remains critical. The digital model obtained in this study was produced in 1/50 scale as digital fabrication with a 3d printer. After the digital model is completed in Rhinoceros and its add-on including Grasshopper, Kangaroo, and Weaverbird, the model is transferred into Cura and necessary adjustments have been made to print from the 3d printer (**Figure 6**).

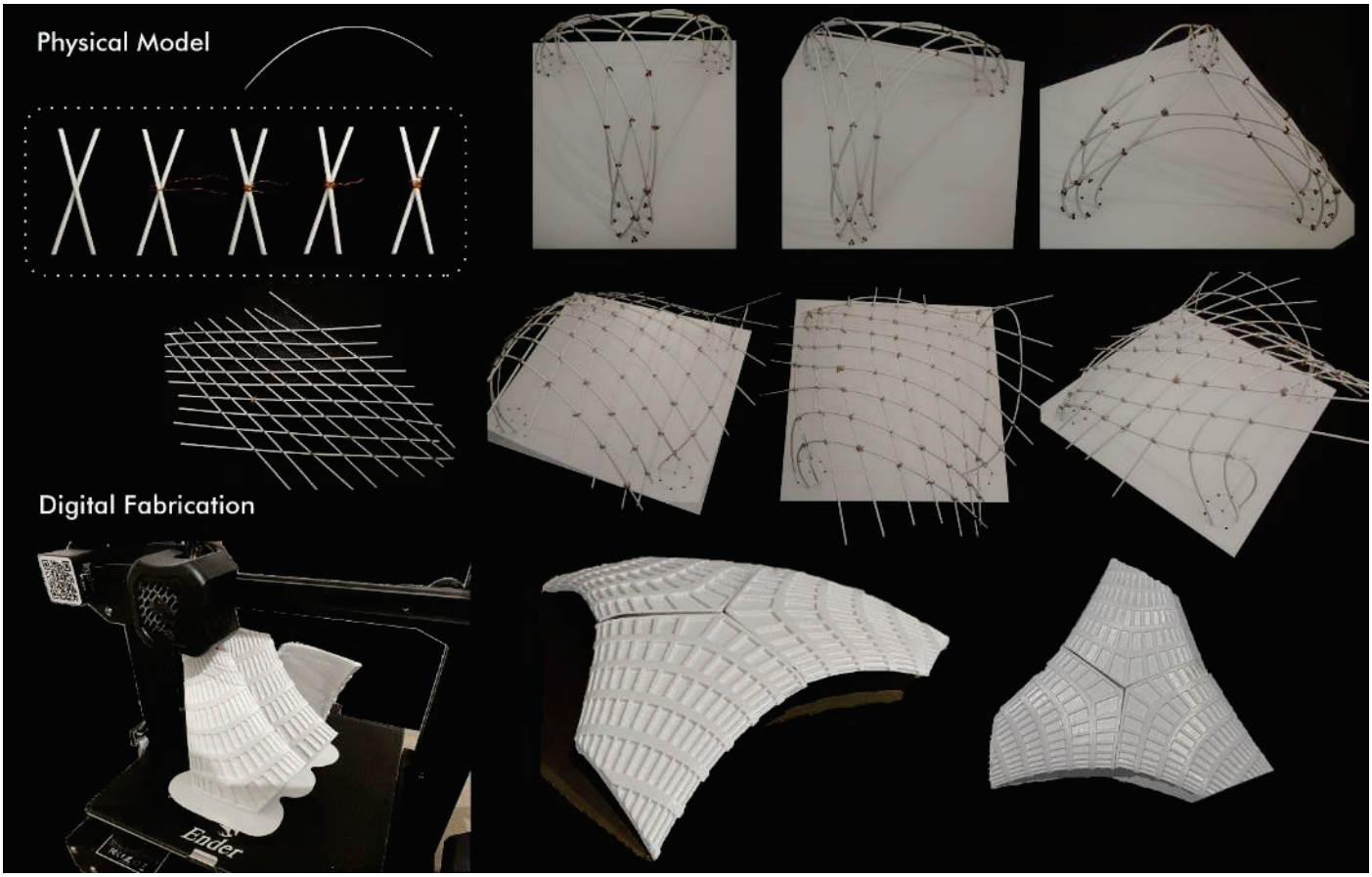


Figure 6: Comparative Study of Physical and Digital Prototyping in Gridshell Construction

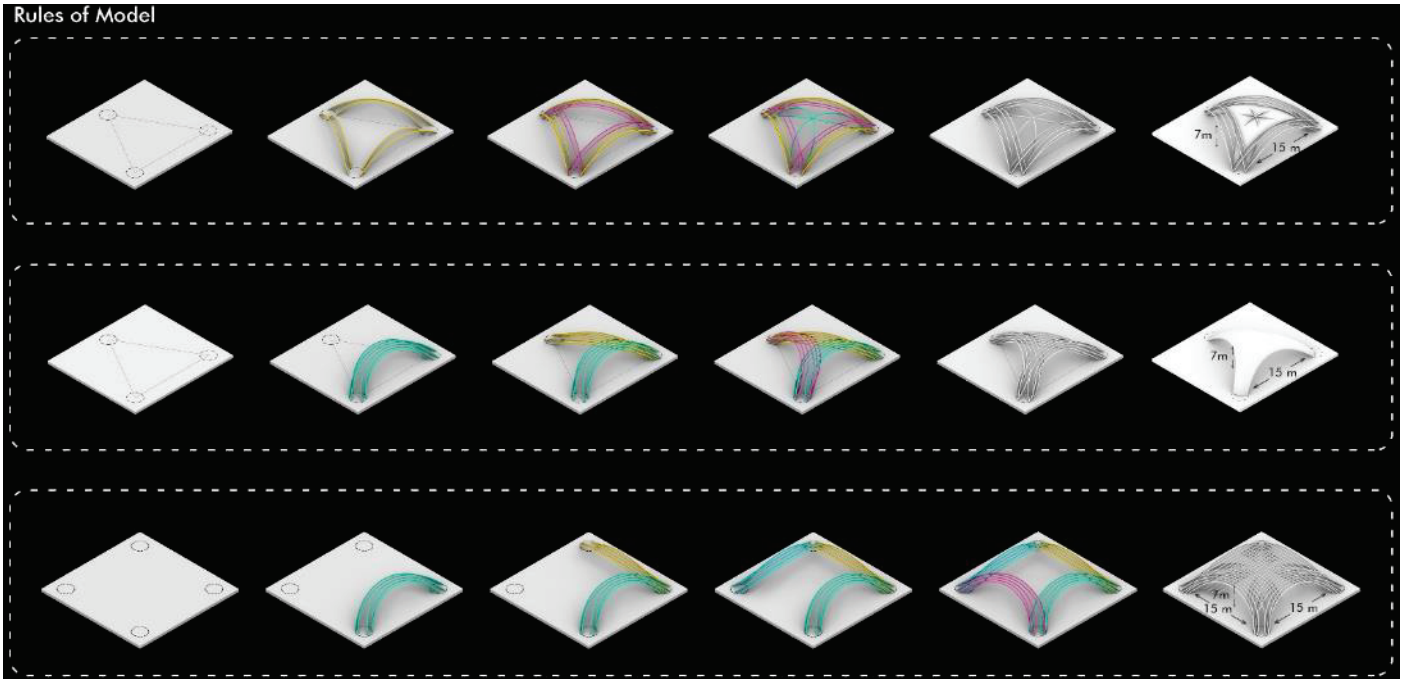


Figure 7: Structural Design Variations Informed by Parametric Rule-Based Modeling

2.4. Physical Modelling Process and Rules

In the physical model, plastic sticks were chosen not to replicate the full mechanical behavior of bamboo, but to represent its geometrical flexibility and joining potential. As shown in the "Bamboo Circularity and Usages" section, since plastic can be produced from bamboo, studying bamboo behavior at 1/50 scale with plastic material is a comprehensible study in terms of producing different prototypes. It is a representative model, and geometry and

connection structure are analyzed rather than behavioral similarity. While plastic lacks the compressive and tensile strength of bamboo, its ease of manipulation in small scale allowed testing of connection rules, such as node ordering, angle precision, and form-stabilization. The traditional Cantonese tying technique was applied by crossing plastic members at defined node points and securing them with thread, imitating the friction-based joint principle used in actual bamboo scaffolding. This method enabled the observation of geometric behavior and connection density, crucial for early-stage prototyping.

Structural studies were implemented with different rules to physically test the behavior of bamboo. Just like in real life the bamboo is attached to the foundation with concrete, an equal number of holes were drilled on the MDF wooden block at a distance of 30 cm (really 15 meters) between the three legs in the form at 1/50 scale, and plastic sticks selected as a model representing the bamboo were placed in the holes (**Figure 7**). Each hole is numbered and placed to meet the same number of points on the opposite foot, and at the intersections of bamboo, they are tied using the traditional Chinese hand-tying method, the Cantonese bamboo scaffolding craftsmanship method. In this grid system, it is crucial to number the holes, meet each other in a certain order, and form a connection with the nearest neighbor plastic bars. It is also significant to place the plastics on a stable floor (MDF block) so that the distances between the plastics are equal.

3. Results and Discussion

What differentiates this study from existing bamboo form-finding research is the integration of material passport data into both digital and physical workflows, allowing material behavior to guide not only the structural form but also the prototyping strategy. Unlike previous works that rely solely on either simulations or craft traditions, this research proposes a hybrid material-informed methodology that acknowledges the limitations and potentials of each domain. Moreover, it positions the material passport not just as a documentation tool but as a design driver, bridging sustainability intelligence with parametric design thinking. As a consequence of the studies, it has been revealed that when the digital model, digital fabrication, prototyping, and physical model are compared, it offers different findings in terms of establishing rules and exploring deeply the material by considering it from different aspects. The physical model contributed to uncovering new spatial relationships and connection logics that were not evident in the digital environment. For instance, the node hierarchy established during manual construction revealed potential areas of stress concentration, which can later be incorporated into digital analysis loops. Additionally, although the 3D printed model provided a tangible understanding of form, it did not contribute significantly to evaluating structural performance. The hybrid approach, however, revealed the necessity of combining material-informed digital simulation with hands-on craft-based intuition, especially for materials like bamboo that exhibit anisotropic and nonlinear behaviors. Thanks to the physical model, different rules and connection details, and structures specifically for bamboo can be created. While in the digital model, certain panels are defined by only looking at the properties of the material, and optimization is simulated with the limitations of the model and the idea, in the physical model, new rules can be discovered by finding similar materials representing the material and by making different frame and structure studies at different scales with the prototype method, unlike the digital model. These kinds of outcomes are also reached in Chinese studies because it is quite common in their culture to use bamboo in their structure. To exemplify, the ZCB Bamboo Pavilion which is an inspiration for this study is built by means of prototyping. The relationship between elements is firstly investigated on a different scale such as 1/50, 1/20, and 1/10, after that it is erected in real without any digital modeling. The structure is built as an art and craft by investigating the behavior of the bamboo in the construction yard by being hand-tied together with metal wire using techniques based on Cantonese bamboo scaffolding craftsmanship. Therefore, it can be concluded by way of a physical model, several new techniques can be discovered by taking into consideration material behavior. Indeed, digital models and simulations give precise results. As it is observed in the article, “Design Exploration of Bamboo Shells Structures by Using Parametric Tools” in which international specified codes and simulations in Karamba 3D are matched considerably. By making many model trials with digital models and simulations, tests suitable for the behavior of the material can be examined rapidly and easily. Nonetheless, these can only be limited by the model and thought, and remain within the limits of digital information in terms of discovering new rules. As regards the digital fabrication model created with a 3d printer, it is considered to not constitute a new finding for research apart from giving the opportunity to see the digital model in reality. It may be asked, can we define a certain method for the discovery of new methods and rules, or is this an experimental process that complements each other? Maybe the new discoveries we have reached in the digital model as well as the physical model are emerging experimentally thanks to the studies we have done.

4. Conclusions

Taking all the explanations into consideration, this study demonstrates that material passports, when used as active design inputs rather than passive documentation tools, can reframe how we approach early-stage structural form-finding with renewable materials like bamboo. It can be concluded that the process of producing form according to the behavior of the material is an experimental and exploratory process that includes many processes such as digital model, simulation, and physical model. It will be useful to start this way by learning the properties of the material in the material passport, in terms of the correct operation of the study. It can be concluded that both digital simulation and physical model are needed to observe the behavior of the material.

Acknowledgement

This study was conducted under the guidance of the Assoc. Prof. Dr. Sevil Yazıcı in the MBL 557E Material-Based Computational Design in Architecture course at ITU Architectural Design Computing Graduate Program.

REFERENCES

Crolla, K. (2017). Building indeterminacy modelling–the 'ZCB Bamboo Pavilion' as a case study on nonstandard construction from natural materials. *Visualization in Engineering, 5*(1), 1–12.

Crolla, K. (2018). *Building simplexity: The 'more or less' of post-digital architecture practice* [Doctoral dissertation, RMIT University].

Crolla, K., & Fingrut, A. (2016). Building indeterminacy modelling–computational design and low-tech construction of a Hong Kong bamboo gridshell. In N. Yabuki & K. Makanae (Eds.), *Proceedings from the 16th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering, Japan*.

Estrada Meza, M. G., González Meza, E., Chi Pool, D. A., and McNamara Trujillo, J. S. (2022). Design exploration of bamboo shells structures by using parametric tools. *Applied Sciences, 12*(15), 7522. https://doi.org/10.3390/app12157522

Heisel, F., and Rau-Oberhuber, S. (2020). Calculation and evaluation of circularity indicators for the built environment using the case studies of UMAR and Madaster. *Journal of Cleaner Production, 243*, 118482. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118482

Honic, M., Kovacic, I., & Rechberger, H. (2019a). BIM-based material passport (MP) as an optimization tool for increasing the recyclability of buildings. *Applied Mechanics and Materials*, *887*, 327–334. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.887.327

Honic, M., Kovacic, I., & Rechberger, H. (2019b). Improving the recycling potential of buildings through material passports (MP): An Austrian case study. *Journal of Cleaner Production, 217*, 787–797. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.212

Hubmann, G., & van Maaren, V. (2022, September). Circular material systems: Anticipating whole-system design in architecture and construction. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1078, No. 1, p. 012002). IOP Publishing. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1078/1/012002

Jayasinghe, L. B., and Waldmann, D. (2020). Development of a BIM-based web tool as a material and component bank for a sustainable construction industry. *Sustainability, 12*(5), 1766. https://doi.org/10.3390/su12051766

Kaur, P. J., Yadav, P., Gupta, M., Khandegar, V., and Jain, A. K. (2022). Bamboo as a source for value-added products: Paving way to global circular economy. *BioResources, 17*(3), 5437–5463. https://doi.org/10.15376/biores.17.3.Kaur

Liu, L., and Ramakrishna, S. (Eds.). (2021). *An introduction to circular economy*. Springer Singapore.

Luscuere, L. M. (2017, February). Materials passports: Optimising value recovery from materials. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Waste and Resource Management 170*, No. 1, pp. 25–28. Thomas Telford Ltd. https://doi.org/10.1680/jwarm.16.00016

Munaro, M. R., Fischer, A. C., Azevedo, N. C., and Tavares, S. F. (2019). Proposal of a building material passport and its application feasibility to the wood frame constructive system in Brazil. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 225*, No. 1, p. 012018. IOP Publishing. https://doi.org/10.1088/1755-1315/225/1/012018

Panza, L., Bruno, G., and Lombardi, F. (2022). A collaborative architecture to support circular economy through digital material passports and internet of materials. *IFAC-PapersOnLine, 55*(10), 1491–1496. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.601

Rippmann, M., and Block, P. (2013). Rethinking structural masonry: Unreinforced, stone-cut shells. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials, 166*(6), 378–389. https://doi.org/10.1680/coma.12.00033

Schützenhofer, S., Honic, M., & Kovacic, I. (2020). Design optimisation via BIM supported material passports. In L. C. Werner & D. Koering (Eds.), *eCAADe 2020 Anthropologic - Architecture and Fabrication in the cognitive age Volume 1* (pp. 289–296). Technische Universität Berlin. http://hdl.handle.net/20.500.12708/62890

Van Der Lugt, P., and King, C. (2019). *Bamboo in the circular economy* (Policy Synthesis Report, No. 6).

Climate Action Africa. Viewing bamboo from a circular economy perspective. *Climate Action Africa*. https://climateaction.africa/viewing-bamboo-from-a-circular-economy-perspective

Eco and Beyond. (n.d.). Truth or trend: Is bamboo sustainable? *Eco and Beyond*. https://www.ecoandbeyond.co/articles/is-bamboo-sustainable

MSTAS 2025 MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Çok Katlı Konut Yapılarına Yönelik BIM-LCA Tabanlı Çevresel Değerlendirme ve Tasarım İyileştirme Stratejileri: Bir Vaka Çalışması

Yiğit Yardımcı[1]; Yasemin Erbil[2]; Özgür Ediz[3]; İlker Karadağ[4];
[1]Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi; [2,3]Bursa Uludağ Üniversitesi; [4]Sakarya Üniversitesi;
[1]yardimciyigitcan@gmail.com; [2]yaseminerbil@uludag.edu.tr; [3]ozgur@uludag.edu.tr; [4] ikaradag@sakarya.edu.tr

Özet

Yapı sektörünün artan çevresel etkileri, sürdürülebilirlik odaklı değerlendirme ve iyileştirme çalışmalarını giderek daha önemli hale getirmektedir. Bu bağlamda, özellikle çok katlı konut yapılarının çevresel etkilerinin detaylı bir şekilde incelenmesi kritik öneme sahiptir. Bu çalışma, tünel kalıp sistemiyle inşa edilen çok katlı bir konut yapısının çevresel etkilerini değerlendirmek ve tasarım sürecine sürdürülebilir iyileştirmeler önermek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Metodolojik yaklaşım, Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) ve Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA) entegrasyonunu esas alarak, Türkiye'nin Bursa ilinde bulunan, 3 bodrum kat ve 23 normal kat olmak üzere toplam 26 katlı betonarme bir toplu konut bloğu üzerinde uygulanmıştır. Çalışmada, üretim ve inşaat (A1-A5), kullanım sonrası süreçler (C1-C4) ve yeniden kullanım (D) modülleri değerlendirilirken, kullanım ve operasyonel enerji tüketimini kapsayan B modülü kapsam dışında bırakılmıştır. Analiz sonuçları, yapının çevresel etkilerinin özellikle üretim aşamasında (A1-A3 modülü) yoğunlaştığını ve döşeme ile duvar sistemlerinin toplam karbon salımı ve enerji tüketiminin yaklaşık %90'ından fazlasını oluşturduğunu göstermiştir. Bu yüksek çevresel etkinin temel nedenleri arasında, katkısız yüksek dayanımlı beton ve geleneksel çelik donatının kullanımı belirlenmiştir. Ayrıca, balkon ve cephe sistemlerinin tasarımındaki betonarme çözümlerinin, yapı genelindeki malzeme tüketimini ve çevresel yükleri artırdığı tespit edilmiştir. Çalışmada, çevresel performansı artırmak amacıyla hem malzeme hem de tasarım temelli iyileştirme senaryoları önerilmiştir. Malzeme bazlı olarak uçucu kül katkılı beton, geri dönüştürülmüş çelik, doğal yalıtım malzemeleri ve düşük karbonlu cephe kaplamaları gibi alternatifler değerlendirilmiştir. Tasarım odaklı öneriler arasında ise hafif modüler balkon sistemlerinin kullanımı, kaset veya prefabrik döşeme panellerine geçiş ve düşük katlı blok çözümlerinin benimsenmesi bulunmaktadır. Bu önerilerin uygulanmasıyla gömülü karbon ve enerji tüketiminde önemli azalmalar sağlanabileceği öngörülmektedir. Çalışma ayrıca literatürde sunulan çeşitli iyileştirme stratejileri ve bilimsel bulgularla desteklenmiş olup, önerilen senaryoların yalnızca yapı özelinde değil, genel anlamda benzer projeler için de geçerli ve uygulanabilir olduğunu ortaya koymaktadır. Bu çalışma, BIM-LCA entegrasyonunun yapı tasarımının erken aşamalarında çevresel etkileri nicel olarak değerlendirme ve sürdürülebilir karar alma süreçlerini destekleme açısından kritik bir araç olduğunu vurgulamakta; ancak önerilen çözümlerin, Türkiye'nin deprem riski ve ekonomik öncelikler gibi yerel kısıtlamalar nedeniyle dikkatlice ele alınması gerektiğini belirtmektedir.

Anahtar Kelimeler: *Yapı Bilgi Modelleme (BIM), Yaşam Döngüsü Değerlendirme (LCA), Konut Yapısı, Optimizasyon, Çevresel Etki.*

2025 MSTAS MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

BIM-LCA-Based Environmental Assessment and Design Improvement Strategies for a Multi-Storey Residential Buildings: A Case Study

Yigit Yardimci[1]; Yasemin Erbil[2]; Ozgür Ediz[3]; Ilker Karadag[4];
[1]Zonguldak Bulent Ecevit University; [2,3]Bursa Uludag University; [4]Sakarya University;
[1]yardimciyigitcan@gmail.com; [2]yaseminerbil@uludag.edu.tr; [3]ozgur@uludag.edu.tr; [4] ikaradag@sakarya.edu.tr

Abstract

The increasing environmental impact of the construction sector has made sustainability-focused assessment and improvement studies more critical than ever. In this context, the detailed evaluation of multi-storey residential buildings is particularly important. This study aims to assess the environmental impacts of a multi-storey residential building constructed using the tunnel formwork system and to propose sustainable improvements for the design process. The methodological approach is based on the integration of Building Information Modeling (BIM) and Life Cycle Assessment (LCA), applied to a reinforced concrete residential block located in Bursa, Türkiye, consisting of 3 basement floors and 23 standard floors (total 26). The analysis covers production and construction stages (A1–A5), end-of-life stages (C1–C4), and benefits beyond the system boundary (D). At the same time, the use phase (B module) and operational energy consumption are excluded from the scope. The results show that most environmental impacts are concentrated in the production stage (A1–A3), with slab and wall systems accounting for over 90% of total carbon emissions and energy demand. The main causes of this high impact are the use of unblended, high-strength concrete and conventional steel reinforcement. Additionally, the use of cast-in-place reinforced concrete for balconies and façades was found to significantly increase both material consumption and environmental load. The study proposes both material- and design-based improvement scenarios to address this. Material-oriented alternatives include fly ash blended concrete, recycled steel, natural insulation products, and low-carbon façade claddings. Design-based strategies involve replacing monolithic balconies with lightweight modular systems, adopting ribbed or prefabricated slab panels, and exploring low-rise block alternatives with equivalent usable area. These proposed interventions are supported by findings in the academic literature and are expected to significantly reduce embodied carbon and energy use. The study demonstrates that BIM-LCA integration can be a critical tool for quantifying environmental impacts during the early design stages and supporting informed, sustainability-driven decisions. However, the feasibility of these proposals should be considered within the context of Turkiye's local constraints, including seismic risks and economic priorities, which may affect the direct applicability of such strategies in practice.

Keywords: *Building Information Modeling (BIM), Life Cycle Assessment (LCA), Residential Building, Optimization, Environmental Impact.*

1. Giriş

Yapı sektörü, küresel ölçekte en yüksek çevresel etkiye sahip sektörlerden biridir. Bina ve inşaat faaliyetlerinin dünya genelindeki enerji tüketiminin %34'ünü, karbon emisyonlarının ise %37'sini oluşturduğu belirtilmektedir (Erdogan, 2021; Namaki vd., 2024). Bu durum, karbon yoğun malzemelerin yaygın kullanımı ve sürdürülebilir olmayan inşaat yaklaşımlarından kaynaklanmaktadır (Dsilva vd., 2023; Pomponi vd., 2017). Kentleşme baskısı ve sınırlı arazi, metropollerde çok katlı konut yapılarını yaygınlaştırmakta; ancak bu yapılar, düşük katlılara kıyasla birim alanda daha fazla malzeme ve enerji tüketerek çevresel etkileri artırmaktadır (Fantilli vd., 2019; Trabucco vd., 2015). Bu bağlamda, sürdürülebilirlik değerlendirmelerinin yapı tipiyle sınırlı kalmayıp, tasarım kararları, malzeme seçimi ve yapım teknolojilerini de kapsaması önem kazanmaktadır (Barbhuiya & Das, 2023).

Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA), yapıların tüm yaşam evrelerindeki çevresel etkileri sistematik biçimde inceleyen bir yöntemdir (Rebitzer vd., 2004; Yardımcı vd., 2024). Ancak geleneksel uygulamalar, yoğun veri gereksinimi ve zaman-maliyet kısıtları nedeniyle sınırlı kalmaktadır (Teng vd., 2022). Bu noktada Yapı Bilgi Modellemesi (BIM), yapı bileşenlerinin dijital temsili üzerinden analiz yapmaya imkân tanıyarak LCA süreçlerini kolaylaştırmaktadır (Sepasgozar vd., 2020). BIM, tasarım ve üretim süreçlerinde verimliliği artırmakta, hata ve israfı azaltarak karbon emisyonlarının düşürülmesine katkı sunmaktadır (Sarıgul ve Günaydın, 2025). Ayrıca, BIM modelleri üzerinden malzeme ve bileşen verilerine hızlı ve doğru erişim, LCA'nın etkinliğini artırmaktadır (Rezaei vd., 2019). Son yıllarda yapılan çalışmalar, BIM-LCA entegrasyonunun çevresel etkilerin erken aşamada değerlendirilmesini ve performans iyileştirmelerini mümkün kıldığını göstermektedir (Röck vd., 2018; Yardımcı & Kurucay, 2024).

Bu çalışmada, tünel kalıp sistemiyle inşa edilen çok katlı bir konut yapısının çevresel etkileri, BIM tabanlı LCA yöntemiyle analiz edilmiş; literatür destekli tasarım ve malzeme iyileştirme senaryoları geliştirilmiştir. Çalışma, Bursa ilinde yer alan bir toplu konut bloğu üzerinden yürütülmüş ve benzer projelere de yol gösterebilecek bilimsel çıktılar üretilmiştir. Yaşam döngüsü analizi yalnızca üretim ve inşaat (A1–A5), yıkım ve bertaraf (C1–C4) ile yeniden kullanım (D) modüllerini kapsamaktadır. Kullanım aşaması (B modülü) dışarıda bırakılmıştır; bu, çalışmanın odaklandığı gömülü çevresel etkilerin değerlendirilmesini geçerli kılmakla birlikte, operasyonel etkilerin kapsam dışında kaldığını da göstermektedir.

2. Literatür İncelemesi

BIM ile entegre yaşam döngüsü değerlendirmesi (BIM-LCA), sürdürülebilir konut tasarımında öne çıkan bir araştırma alanıdır (Duru ve Koç, 2021). BIM tabanlı LCA uygulamaları, farklı tasarım senaryolarının çevresel etkilerini dijital modeller üzerinden karşılaştırmalı olarak incelemeyi mümkün kılmakta, genellikle Autodesk Revit gibi araçlarla yürütülmektedir (Morsi vd., 2022). Literatürde, çok katlı yapılar için gerçekleştirilen çalışmalar giderek artmakta; taşıyıcı sistem, cephe ve malzeme tercihlerinin yaşam döngüsüne etkileri vaka analizleriyle ele alınmaktadır.

Namaki ve arkadaşları (2024), Kanada'da üç farklı taşıyıcı sistemin (sıcak haddelenmiş çelik, geri dönüştürülmüş çelik ve ahşap) çevresel etkilerini BIM-LCA ile karşılaştırmış ve geri dönüştürülmüş çeliğin sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sunduğunu ortaya koymuştur. Benzer şekilde, Ma ve diğerleri (2024), Chicago'daki bir projede betonun GWP'nin %74'üne neden olduğunu, çeliğin ise %26 oranında katkı sunduğunu belirterek her iki malzemenin çevresel etkilerini detaylı biçimde raporlamıştır. Cephe sistemlerinin seçimi de gömülü etkiler üzerinde belirleyicidir. Ansah ve arkadaşları (2020), Gana'daki sosyal konutlarda dört farklı dış cepheyi karşılaştırmış; Tushar ve diğerleri (2022) ise tuğla duvar yerine sandviç beton panel kullanımının GWP'de %54,7, enerji tüketiminde ise %75,9 oranında azalma sağladığını tespit etmişlerdir. Llantoy ve arkadaşları (2020) ise taş yünü, XPS ve poliüretan gibi yalıtım malzemelerinin etkilerini karşılaştırarak, taş yününün en düşük gömülü karbon ayak izine sahip olduğunu tespit etmiştir. Ayrıca yalıtım kalınlığının artmasının her zaman fayda sağlamadığı, belirli bir eşik noktadan sonra çevresel yükün arttığı vurgulanmıştır. Bina formu, kat sayısı ve geometrik oranlar da çevresel performansı etkileyen önemli tasarım değişkenleridir. Pomponi ve Moncaster (2016), tasarım kararlarının gömülü karbon üzerinde belirleyici olduğunu; Lotteau vd. (2017) ise yapı ayak izi ve kompaktlığın gömülü enerji üzerindeki etkisinin %90'a kadar çıkabildiğini tespit etmişlerdir. Treloar ve diğerleri (2001) ile Foraboschi vd. (2014) ise çok katlı yapılarda gömülü enerjinin daha fazla olduğunu ancak bu etkinin tasarım optimizasyonuyla azaltılabileceğini ifade etmiştir.

Özetle, çok katlı konut yapılarında taşıyıcı sistem, cephe malzemesi, yalıtım stratejisi ve yapı formu gibi tasarımsal kararlar, gömülü çevresel etkiler üzerinde belirleyicidir. BIM-LCA entegrasyonu, bu parametrelerin tasarım aşamasında

çok yönlü biçimde analiz edilmesini sağlayarak, çevresel performansın iyileştirilmesine katkı sunmaktadır. Bu çalışmada da benzer biçimde birçok katlı konut yapısında tasarım ve malzeme temelli çevresel etkiler değerlendirilmiştir.

3. Materyal ve Yöntem

Bu çalışma, Türkiye'nin Bursa ilinde yer alan ve toplu konut üretimi kapsamında tünel kalıp sistemiyle inşa edilmiş birçok katlı konut bloğu üzerinden gerçekleştirilmiştir. Söz konusu yapı, üç bodrum kat ve 23 normal kat olmak üzere toplam 26 katlıdır. Taşıyıcı sistemi betonarme olan yapının kat yükseklikleri 3.20 metre olup, net kullanım alanı yaklaşık 824 m², toplam brüt alanı ise 17.240 m²'dir. Yapının döşeme, temel ve perde sistemlerinde katkısız yüksek dayanımlı beton; duvar ve bölme sistemlerinde ise tuğla, EPS, sıva ve çeşitli yüzey kaplama malzemeleri kullanılmıştır. Pencere ve kapı sistemleri cam, PVC ve alüminyumdan; çatı sistemi ise hafif beton, ısı yalıtımı ve şap malzemelerinden oluşmaktadır. **Tablo 1**'de incelenen yapıya ait temel bilgiler gösterilmiştir.

Tablo 1: İncelenen yapıya ait temel bilgiler

Özellik	Açıklama
Yapı tipi	Çok katlı konut
Yapım yılı	2006–2012
Kat sayısı	3 bodrum + 23 normal kat
Kat yüksekliği	3.20 m
Net kullanım alanı	824 m²
Brüt alan	17.240 m²
Taşıyıcı sistem	Betonarme
Temel/döşeme malzemeleri	Beton, şap, seramik, doğal taş
Dış duvarlar	Betonarme, tuğla, sıva, EPS, boya
İç bölmeler	Tuğla, sıva, seramik, boya
Pencereler	Cam, PVC, alüminyum
Çatı	Hafif beton, ısı yalıtımı, şap

Yapının çevresel etkileri, bina bilgi modellemesi (BIM) ile entegre yaşam döngüsü değerlendirme (LCA) yaklaşımıyla analiz edilmiştir. Autodesk Revit ortamında modellenen yapı, KT Innovations ve Autodesk iş birliğiyle geliştirilen Tally eklentisi aracılığıyla çevresel veri tabanlarıyla ilişkilendirilmiştir. Bu entegrasyon sayesinde yapı bileşenlerine ait miktar verileri doğrudan BIM modelinden elde edilerek LCA analizi için işlenmiş ve uluslararası standartlarla uyumlu sonuçlar üretilmiştir (Autodesk Tally, 2025). Malzeme verileri, Tally veri tabanından alınarak ISO 14040-14044, EN 15804, ISO 21930:2017, ISO 21931:2010 ve EN 15978:2011 standartları doğrultusunda modellenmiştir (ISO 14040-14044- 21930, 2006; ISO 21931, 2010; EN 15978,2011; EN 15804, 2012). LCA hesaplamaları GaBi 8.5 yazılımında gerçekleştirilmiş ve GaBi 2018 veri setleri kullanılmıştır. TRACI 2.1 yöntemi kullanılarak sera gazı salımı (GWP), asitleşme potansiyeli (AP), ötrofikasyon (EP), ozon tabakası incelmesi (ODP), smog oluşumu (SFP) ve enerji tüketimi (PED) gibi çevresel etki kategorileri değerlendirilmiştir. Yapının kullanım ömrü 50 yıl olarak kabul edilmiş ve A1–A5, C1–C4 ile D modülleri kapsam altına alınmıştır (Autodesk Tally, 2024). Bu yöntemsel yaklaşım, sadece analiz edilen yapıya özgü sonuçlar sunmakla kalmayıp, benzer konut projeleri için de tekrarlanabilir ve karşılaştırılabilir bir metodolojik çerçeve oluşturmaktadır. Böylece BIM-LCA entegrasyonu, mimari karar süreçlerine entegre edilebilecek çevresel performans verilerinin sistematik olarak üretilebilmesine olanak sağlamaktadır. **Şekil 1**'de çok katlı konut yapısının BIM tabanlı dijital modeli gösterilmiştir.

Şekil 1: Bursa ilinde yer alan çok katlı konut bloğunun BIM tabanlı dijital modeli

4. Bulgular

Bu bölümde, çok katlı konut yapısına ait yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) sonuçları sunulmaktadır. **Tablo 2**, çok katlı konut yapısının yaşam döngüsü modülleri (A1–A3, A4, A5, C1–C4 ve D) kapsamında hesaplanan toplam çevresel etkileri ortaya koymaktadır. Sekiz farklı çevresel etki kategorisinin değerlendirildiği tabloda, özellikle küresel ısınma potansiyeli (GWP), birincil enerji tüketimi (PED), asitleşme potansiyeli ve duman oluşumu potansiyeli öne çıkmaktadır. Sonuçlar, çevresel etkilerin modüller arasında dengesiz dağıldığını ve özellikle A1–A3 modülünün, yani yapı malzemelerinin hammadde temini, üretimi ve fabrikasyonunu kapsayan ürün aşamasının, açık ara en büyük etkiyi oluşturduğunu göstermektedir. Bu modülde GWP değeri 12.940.613 $kgCO_2$ eşdeğeri, PED değeri ise 132.415.284 MJ olarak hesaplanmıştır. C1 (yıkım), C2 (atık taşıma), C3 (atık işleme) ve C4 (nihai bertaraf) aşamalarından oluşan C modülü, tüm etki kategorilerinde düşük seviyelerde kalmıştır. Özellikle C3 ve C4'ün etkilerinin ihmal edilebilir düzeyde olması, kullanım ömrü sonrasındaki çevresel yükün görece sınırlı olduğunu ortaya koymaktadır. D modülü, sistem dışı faydaları temsil eden yeniden kullanım, geri dönüşüm ve enerji geri kazanımı süreçlerini içermekte olup, GWP açısından –101.440 $kgCO_2$ eşdeğeri gibi negatif bir değerle sistemsel bir kazanım sağlamaktadır. Bu durum, yapıdan geri kazanılan malzemelerin çevreye katkı sunduğunu ve başka sistemlerde daha düşük karbon salımına olanak tanıdığını göstermektedir. Ancak bu pozitif katkıya rağmen, A1–A3 modülünün etkileri o kadar baskındır ki, genel karbon ayak izini dengeleme potansiyeli sınırlı kalmaktadır. Genel olarak değerlendirildiğinde, **Tablo 2** verileri A1–A3 aşamasının, yapının çevresel etkilerinin ana kaynağı olduğunu ortaya koymaktadır. Bu nedenle, söz konusu yapı türü için sürdürülebilirlik stratejileri öncelikle malzeme üretim süreçlerine ve bu aşamada kullanılan girdilere odaklanmalıdır. Bu bağlamda malzeme türü, üretim yeri ve enerji kaynağı gibi değişkenlerin çevresel etki üzerindeki belirleyici rolü göz önünde bulundurulmalıdır.

Tablo 2: Yaşam döngüsü aşamalarına göre çevresel etki değerlendirmeleri

Satır Etiketleri	Asitleşme Potansiyeli (AP)	Ötrofikasyon Potansiyeli (EP)	Küresel Isınma Potansiyeli (GWP)	Ozon Tabakasını İncelme Potansiyeli (ODP)	Duman Oluşumu Potansiyeli (POCP)	Birincil Enerji Tüketimi (MJ) (PED)	Yenilenemez Enerji Tüketimi (PENRE)	Yenilenebilir Enerji Tüketimi (PERE)
[A1-A3] Ürün	3,93E+04	2,11E+03	1,29E+07	-3,40E-03	6,64E+05	1,32E+08	1,22E+08	1,06E+07
[A4] Taşıma	8,51E+02	6,93E+01	1,84E+05	6,29E-09	2,81E+04	2,67E+06	2,61E+06	6,46E+04
[C2-C4] Yaşam Sonu	4,24E+03	3,43E+02	1,52E+06	2,12E-07	7,43E+04	1,36E+07	1,27E+07	8,94E+05
[D] Modül D	1,19E+03	5,91E+01	7,12E+05	-5,12E-03	2,47E+04	5,07E+06	6,20E+06	-1,13E+06
Genel Toplam	4,72E+04	2,74E+03	1,57E+07	-7,75E-03	8,19E+05	1,60E+08	1,49E+08	1,15E+07

Tablo 3, yapı malzemelerinin hammadde temininden üretim aşamasına kadar olan süreci kapsayan A1–A3 modülü kapsamında, farklı yapı bileşenlerinin çevresel etki kategorilerine göre değerlendirmesini sunmaktadır. Literatürde de yaygın biçimde vurgulandığı üzere, bu aşama bir yapının yaşam döngüsündeki en yüksek çevresel yükleri içermektedir. **Tablo 2**'nin bulgularıyla tutarlı olarak, A1–A3 modülündeki en yüksek etkilerin yapıdaki taşıyıcı sistem bileşenlerinden kaynaklandığı görülmektedir. Özellikle döşeme ve duvar bileşenleri, hem küresel ısınma potansiyeli (GWP) hem de birincil enerji tüketimi (PED) kategorilerinde baskın etkilere sahiptir. Döşeme bileşeni, yaklaşık 6.476.047 $kgCO_2$ eşdeğeri GWP ile toplam karbon salımının %50'sinden fazlasını oluştururken, duvar bileşeni ise 6.241.598 $kgCO_2$ eşdeğeri ile ikinci sırada yer almakta; bu iki bileşen toplam GWP'nin yaklaşık %96'sını oluşturmaktadır. Aynı şekilde, bu iki bileşenin birlikte neden olduğu 127 milyon MJ'lik enerji tüketimi, üretimlerinde kullanılan malzemelerin enerji yoğunluğunu yansıtmaktadır. **Tablo 4**, bu bileşenlerde ağırlıklı olarak katkısız beton ve çelik kullanıldığını göstermektedir. Diğer bileşenlerle kıyaslandığında, pencere bileşeni, toplamda daha düşük miktarda kullanılsa da, 1.616.209 $kgCO_2$ eşdeğeri GWP değeriyle yüksek birim etkiye sahiptir. Bu durum, alüminyum ve cam gibi malzemelerin üretim

süreçlerinin enerji tüketimi açısından yoğun olduğunu göstermektedir. Kapı, çatı, merdiven ve korkuluklar gibi bileşenlerin katkıları ise çevresel etkiler açısından marjinal düzeydedir. Diğer çevresel etki kategorilerinde de benzer bir dağılım söz konusudur. Asitleşme (acidification), ötrifikasyon (eutrophication) ve duman oluşumu (smog formation) gibi etkiler, yine yoğun olarak döşeme ve duvar bileşenlerinde toplanmaktadır. Bunun temel nedeni, bu sistemlerin hem yüksek miktarda malzeme içermesi hem de üretim süreçlerinin fosil yakıt ağırlıklı enerji kaynaklarına dayanmasıdır. Sonuç olarak, **Tablo 3** yalnızca çevresel yükün hangi bileşenlerde yoğunlaştığını değil, aynı zamanda tasarım düzeyinde yapılabilecek etkili müdahale alanlarını da ortaya koymaktadır. Döşeme ve duvar sistemleri, yapının hem yapısal hem de çevresel performansı açısından kritik öneme sahiptir. Bu nedenle, sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda bu bileşenlere yönelik alternatif malzeme kullanımı, yapısal sistem optimizasyonu ve tasarımsal sadeleştirme gibi stratejiler dikkate alınmalıdır.

Tablo 3: Yapı bileşenlerinin yaşam döngüsü aşamalarına göre dağılımı

Satır Etiketleri	Asitleşme Potansiyeli (AP)	Ötrofikasyon Potansiyeli (EP)	Küresel Isınma Potansiyeli (GWP)	Ozon Tabakasını İncelme Potansiyeli (ODP)	Duman Oluşumu Potansiyeli (POCP)	Birincil Enerji Tüketimi (MJ) (PED)	Yenilenemez Enerji Tüketimi (PENRE)	Yenilenebilir Enerji Tüketimi (PERE)
[A1-A3] Ürün Aşaması	3,93E+04	2,11E+03	1,29E+07	-3,40E-03	6,64E+05	1,32E+08	1,22E+08	1,06E+07
Kapılar	5,31E+02	7,04E+01	6,43E+04	1,27E-03	5,99E+03	1,96E+06	1,37E+06	5,89E+05
Döşemeler	2,11E+04	1,10E+03	6,48E+06	5,80E-04	3,59E+05	6,70E+07	6,10E+07	5,99E+06
Merdivenler ve Korkuluklar	1,53E+01	7,44E-01	3,53E+03	-2,02E-06	2,70E+02	3,68E+04	3,31E+04	3,79E+03
Duvarlar	1,68E+04	8,95E+02	6,24E+06	-5,88E-03	2,88E+05	6,10E+07	5,73E+07	3,76E+06
Pencereler	8,32E+02	4,01E+01	1,55E+05	6,34E-04	1,03E+04	2,43E+06	2,17E+06	2,59E+05
[A4] Taşıma Aşaması	8,51E+02	6,93E+01	1,84E+05	6,29E-09	2,81E+04	2,67E+06	2,61E+06	6,46E+04
Kapılar	6,33E+00	5,16E-01	1,37E+03	4,68E-11	2,09E+02	1,99E+04	1,94E+04	4,81E+02
Döşemeler	4,30E+02	3,50E+01	9,27E+04	3,18E-09	1,42E+04	1,35E+06	1,32E+06	3,26E+04
Merdivenler ve Korkuluklar	1,84E-01	1,50E-02	3,98E+01	1,36E-12	6,09E+00	5,78E+02	5,64E+02	1,40E+01
Duvarlar	4,03E+02	3,28E+01	8,69E+04	2,98E-09	1,33E+04	1,26E+06	1,23E+06	3,06E+04
Pencereler	1,25E+01	1,01E+00	2,69E+03	9,21E-11	4,12E+02	3,91E+04	3,82E+04	9,46E+02
[C2-C4] Yaşam Sonu Aşaması	4,24E+03	3,43E+02	1,52E+06	2,12E-07	7,43E+04	1,36E+07	1,27E+07	8,94E+05
Kapılar	8,36E+01	2,21E+01	2,02E+04	3,04E-10	3,43E+02	2,43E+04	2,28E+04	1,54E+03
Döşemeler	2,32E+03	2,21E+02	8,65E+05	1,19E-07	3,77E+04	6,78E+06	6,34E+06	4,47E+05
Merdivenler ve Korkuluklar	9,96E-01	5,08E-02	3,98E+02	3,15E-10	1,98E+01	3,68E+03	3,44E+03	2,42E+02
Duvarlar	1,82E+03	9,53E+01	6,35E+05	9,22E-08	3,60E+04	6,70E+06	6,27E+06	4,43E+05
Pencereler	1,97E+01	5,16E+00	2,34E+03	4,30E-10	2,47E+02	4,01E+04	3,75E+04	2,64E+03
[D] Modül D	1,19E+03	5,91E+01	7,12E+05	-5,12E-03	2,47E+04	5,07E+06	6,20E+06	-1,13E+06
Kapılar	-1,34E+02	-3,38E+00	-1,48E+04	-9,81E-06	-1,30E+03	-3,98E+05	-2,71E+05	-1,27E+05
Döşemeler	2,35E+03	9,71E+01	1,21E+06	-8,35E-03	3,65E+04	9,89E+06	1,09E+07	-1,05E+06
Merdivenler ve Korkuluklar	-2,28E-01	-8,26E-03	-1,42E+02	1,06E-06	-1,47E+00	-1,24E+03	-1,30E+03	6,32E+01
Duvarlar	-7,81E+02	-3,03E+01	-4,36E+05	3,18E-03	-8,52E+03	-3,81E+06	-4,05E+06	2,40E+05
Pencereler	-2,42E+02	-4,30E+00	-4,28E+04	5,83E-05	-1,98E+03	-6,01E+05	-4,03E+05	-1,98E+05
Genel toplam	4,72E+04	2,74E+03	1,57E+07	-7,75E-03	8,19E+05	1,60E+08	1,49E+08	1,15E+07

Tablo 4, çok katlı konut yapısındaki ana yapı bileşenlerinin yaşam döngüsünün tamamı boyunca neden olduğu çevresel etkileri sekiz farklı kategori üzerinden detaylandırmaktadır. Daha önce yalnızca A1-A3 aşamasına odaklanan değerlendirmeler bu tabloda genişletilerek, taşıma (A4), uygulama (A5), kullanım sonrası süreçler (C1–C4) ve geri kazanım (D) gibi modüller de dâhil edilmiştir. Bu yönüyle tablo, yapı bileşenlerinin tüm yaşam döngüsü içindeki yükünü daha gerçekçi biçimde yansıtmaktadır.

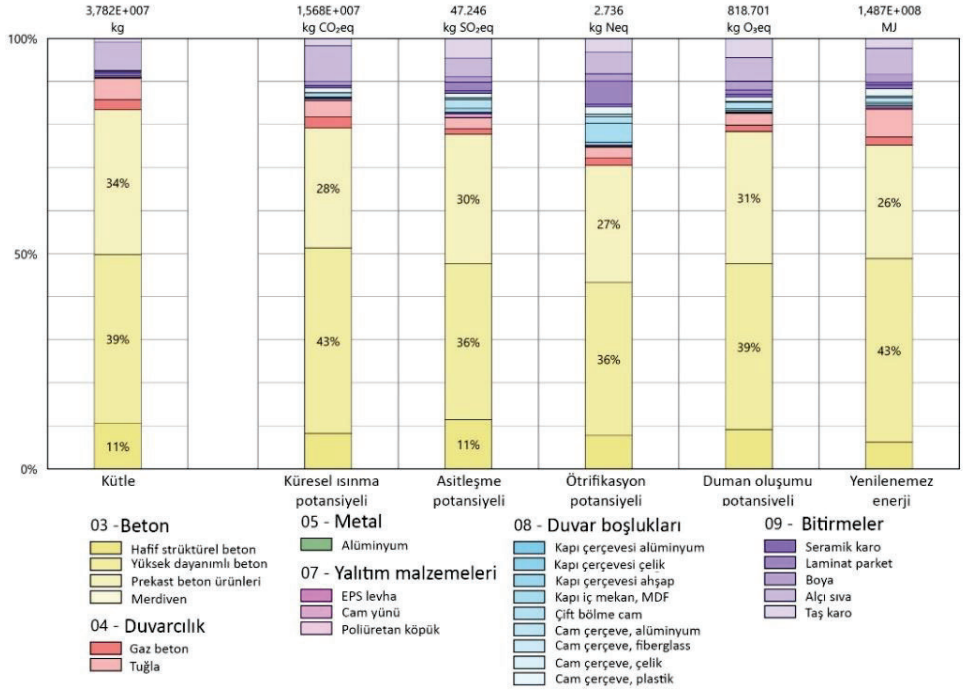
Tablo 4, çok katlı konut yapısındaki ana yapı bileşenlerinin yaşam döngüsü boyunca (A1–A3, A4, A5, C1–C4 ve D modülleri) neden olduğu çevresel etkileri kapsamlı biçimde sunmaktadır. Önceki değerlendirmelerde yalnızca üretim aşaması (A1–A3) ele alınmışken, bu tabloda taşıma, uygulama, kullanım sonrası ve geri kazanım süreçleri de dâhil edilerek daha bütüncül bir analiz sağlanmıştır. Veriler, çevresel etkilerin yine büyük ölçüde döşeme ve duvar bileşenlerinde yoğunlaştığını ortaya koymaktadır. Döşemeler, 8.640.519 $kgCO_2$ eşdeğeri GWP ile toplam karbon ayak izinin yaklaşık %55'ini oluştururken, duvarlar ise 6.638.631 $kgCO_2$ eşdeğeri ile ikinci sıradadır. Bu iki bileşen birlikte yapının toplam 15.671.931 $kgCO_2$ eşdeğeri GWP değerinin %97'sine karşılık gelmektedir. Duman oluşumu potansiyeli ve birincil enerji tüketimi gibi kategorilerde de benzer bir dağılım söz konusudur: döşemelerde 447.551 kgO_3 eşdeğeri, duvarlarda ise 342.316 kgO_3 eşdeğeri değerine ulaşılmış; enerji tüketimi sırasıyla 85 milyon MJ ve 67 milyon MJ olarak hesaplanmıştır. Bu tablo, tamamlayıcı yapı bileşenlerinin çevresel katkılarını da görünür kılmaktadır. Örneğin kapılar, düşük GWP (140.835 $kgCO_2$ eşdeğeri) ve PED (3.407.240 MJ) değerlerine rağmen, yüksek asitleşme potansiyeli (937,91 $kgSO_2$ eşdeğeri) ve ötrifikasyon etkisi (168,15 kgNeq) göstermektedir. Bu durum, metal kaplama veya plastik içerikli yüzey malzemelerinin toksik çevresel etkilerinin altını çizmektedir. Benzer şekilde, pencereler nispeten düşük karbon salımına sahip olsa da, 1.329 $kgSO_2$ eşdeğeri ile asitleşme kategorisinde öne çıkmaktadır. Bu bulgular, yalnızca karbon ve enerji odaklı değerlendirmelerin yetersiz kaldığını, ekosistem etkilerini içeren kategorilerin de dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

Genel toplamda yapının PED değeri 160.104.086 MJ, GWP değeri ise 15.671.931 $kgCO_2$ eşdeğeri olarak hesaplanmıştır. Bu değerlerin büyük ölçüde döşeme ve duvar sistemlerinden kaynaklandığı göz önüne alındığında, yaşam döngüsü boyunca çevresel etkileri azaltmak için en etkili stratejiler bu iki bileşene odaklanmalıdır. Ancak bu müdahaleler yalnızca hacimsel değil, aynı zamanda malzeme temelli çözümlerle desteklenmelidir. Bir sonraki aşamada sunulacak iyileştirme stratejileri, bu bulgular temel alınarak geliştirilecektir.

Tablo 4: Yapı bileşenlerinin çevresel etki değerlendirmesi

Satır Etiketleri	Asitleşme Potansiyeli (AP)	Ötrofikasyon Potansiyeli (EP)	Küresel Isınma Potansiyeli (GWP)	Ozon Tabakasını İncelme Potansiyeli (ODP)	Duman Oluşumu Potansiyeli (POCP)	Birincil Enerji Tüketimi (MJ) (PED)	Yenilenemez Enerji Tüketimi (PENRE)	Yenilenebilir Enerji Tüketimi (PERE)
Kapılar	9,38E+02	1,68E+02	1,41E+05	2,03E-03	1,08E+04	3,41E+06	2,42E+06	9,95E+05
Döşemeler	2,62E+04	1,46E+03	8,64E+06	-7,77E-03	4,48E+05	8,50E+07	7,96E+07	5,43E+06
Merdivenler ve Korkuluklar	1,62E+01	8,02E-01	3,83E+03	-9,54E-07	2,94E+02	3,98E+04	3,58E+04	4,10E+03
Duvarlar	1,88E+04	1,03E+03	6,64E+06	-2,70E-03	3,42E+05	6,76E+07	6,29E+07	4,72E+06
Pencereler	1,33E+03	8,14E+01	2,48E+05	6,97E-04	1,77E+04	4,02E+06	3,71E+06	3,11E+05
Genel Toplam	4,72E+04	2,74E+03	1,57E+07	-7,75E-03	8,19E+05	1,60E+08	1,49E+08	1,15E+07

Şekil 2, özellikle **Tablo 4**'te çevresel etkileri en yüksek çıkan döşeme ve duvar bileşenlerinin neden bu denli yüksek değerlere sahip olduğunu açıklamak açısından kritik bilgiler sunmaktadır. Yapı bileşenlerinin yalnızca toplam çevresel etkileriyle değil, bu etkilerin ardındaki malzeme temelli nedenlerle birlikte değerlendirilmesi, sürdürülebilir tasarım kararlarının daha isabetli biçimde alınmasına olanak tanımaktadır. Şekilde, başta küresel ısınma potansiyeli (GWP) ve birincil enerji tüketimi (PED) olmak üzere sekiz temel çevresel etki kategorisine göre öne çıkan malzeme türleri detaylandırılmıştır. Veriler, çevresel etkilerin büyük ölçüde iki ana yapı malzemesinden kaynaklandığını göstermektedir: katkısız yüksek dayanımlı beton ve betonarme çelik donatı. "Yüksek dayanımlı beton" türü, yaklaşık 6.535.902 $kgCO_2$ eşdeğeri GWP ve 51.727.600 MJ PED değeriyle en yüksek çevresel yüke sahip malzeme olarak öne çıkmaktadır. Bu karışımın içinde uçucu kül veya yüksek fırın cürufu gibi bağlayıcı katkı maddelerinin bulunmaması, karbon ayak izini artıran temel etkendir. Ayrıca yüksek dayanımı nedeniyle çimento oranı da yüksektir; bu da fosil yakıtla çalışan üretim süreçlerinde daha fazla enerji tüketimine neden olmaktadır. İkinci sırada yer alan betonarme çelik donatı, döşeme ve duvarlarda yaygın biçimde kullanılmakta olup, 3.402.182 $kgCO_2$ eşdeğeri GWP ve 39.140.670 MJ PED değeri ile çevresel etki açısından betonu takip etmektedir.



Şekil 2: Yapı bileşenlerini oluşturan malzemelerin çevresel etki değerlendirmeleri

Katkısız beton ve geleneksel çelik, A1–A3 aşamasındaki toplam çevresel etkilerin büyük bölümünü oluşturmaktadır. Nitekim **Tablo 4**'te en değerlere sahip olan döşeme ve duvar bileşenlerinin bu iki malzemeyle inşa edilmiş olması, çevresel yükün kaynağını açık biçimde ortaya koymaktadır. Özellikle döşeme sistemlerindeki toplam küresel ısınma potansiyelinin yaklaşık %75'inden fazlası bu iki malzemenin üretimine dayanmaktadır. Buna ek olarak, bazı ikincil malzemeler de daha sınırlı kullanıma rağmen dikkate değer etkiler oluşturabilmektedir. Özellikle alüminyum ve cam içeren bileşenler, dış cephe ve pencere sistemlerinde yüksek enerji tüketimiyle çevresel yükü artırabilmektedir. Ancak mevcut tabloda bu malzemelere dair veriler sınırlı olduğundan, ürün bazlı

Çevresel Ürün Beyanları (EPD) üzerinden daha ayrıntılı değerlendirmeler yapılması önerilmektedir. Sonuç olarak, yapı bileşenlerinin çevresel etkilerinin yalnızca geometrik özelliklerine göre değil, malzeme içeriği temelinde de ele alınması gerekmektedir. Katkılı beton karışımlarına geçiş, geri dönüştürülmüş çelik kullanımı ve üretimde yenilenebilir enerji kaynaklarının tercih edilmesi, bu malzemelere bağlı çevresel yükü azaltmak için somut stratejiler sunmaktadır. Bu sayede, sürdürülebilir yapı tasarımı, yalnızca biçimsel değil, malzeme temelli kararlarla da desteklenmiş bir yaklaşıma dönüşebilir.

5. Tartışma

Bu çalışmanın bulguları, çok katlı bir konut yapısının yaşam döngüsü analizinde özellikle üretim ve inşaat aşamalarında (A1–A5) malzeme türlerinin ve tasarım kararlarının çevresel etkiler üzerindeki belirleyici rolünü açıkça ortaya koymuştur. Çevresel etkiler, belirli yapı bileşenlerinde yoğunlaşmakta olup, bu durum hem malzeme seçimi hem de mimari organizasyonla doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle, tartışma bölümünde bulgular iki düzlemde ele alınmıştır: İlki, yapı bileşenlerinde kullanılan malzemelerin çevresel performansını analiz eden ve iyileştirme önerileri sunan malzeme bazlı değerlendirme; ikincisi ise mimari ve yapısal kararların etkisini inceleyen tasarım temelli çözümlemedir. Her iki düzlemde önerilen senaryolar, güncel literatürle karşılaştırılarak değerlendirilmiş; benzer projelerde uygulanan stratejiler ışığında önerilerin geçerliliği sorgulanmıştır. Bu çerçevede, aşağıdaki alt başlıklarda ilgili tablo sonuçlarına dayalı olarak ayrıntılı analizlere yer verilmiştir.

Güncellenmiş Malzeme Bazlı Bulgular ve Öneriler Tablosu

Yaşam döngüsü değerlendirme sonuçları, çevresel etkilerin belirli malzeme türlerinde yoğunlaştığını açıkça ortaya koymaktadır. Özellikle katkısız ve yüksek dayanımlı beton, pencere-doğrama sistemleri, kaplama malzemeleri ve geleneksel yalıtım ürünleri, en yüksek gömülü karbon değerlerine sahip gruplar arasında yer almaktadır.

Bu bulgular, A1–A3 modülündeki etkilerin büyük ölçüde malzeme kaynaklı olduğunu doğrulamaktadır. Katkısız beton sistemlerinden kaynaklanan yüksek küresel ısınma potansiyeli (GWP) değeri, literatürle örtüşmektedir. Olsson vd. (2023), uçucu kül veya yüksek fırın cürufu katkısının CO_2 salımını %20–30 oranında azaltabildiğini belirtmiştir. National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA) (2022) raporunda da benzer şekilde, katkılı beton kullanımının karbon ayak izini belirgin ölçüde düşürdüğü vurgulanmaktadır. Doğrama ve cam sistemleri, yapı içinde sınırlı hacme sahip olsalar da, yüksek enerji tüketimli üretim süreçleri nedeniyle çevresel etkiyi artırmaktadır. Pomponi ve Moncaster (2017), geri dönüştürülmüş alüminyum ya da FSC sertifikalı ahşap sistemlerin çevresel açıdan daha avantajlı olduğunu ortaya koymuştur. Kaplama sistemlerinde, çimento esaslı malzemeler yerine kireç sıva ya da doğal taş kaplama kullanımı ile yüzey bazında %30–40 oranında iyileştirme sağlanabileceği, AIA California kaynaklarında belirtilmiştir. Yalıtım ürünleri açısından ise mineral yün yerine selüloz veya kenaf gibi doğal malzemeler, birincil enerji tüketimi ve yenilenemeyen enerji ihtiyacı açısından daha düşük değerlere sahiptir. Ayrıca, geri dönüştürülmüş çelik kullanımı, hurda çelikten üretim yoluyla %50–80 daha az emisyona neden olmakta; bu da A1–A3 modülü üzerindeki etkilerin azaltılmasında önemli bir iyileştirme yöntemi olarak sunulmaktadır (AIA California, 2024; NRMCA, 2022; Webster, 2022). Tüm bu öneriler, yalnızca mevcut çevresel etkilerin azaltılmasını değil, aynı zamanda gelecekteki malzeme seçim stratejileri açısından sürdürülebilir bir yaklaşım geliştirilmesini de mümkün kılmaktadır. **Tablo 5**, bu iyileştirme stratejilerinin malzeme bazında özetini sunmaktadır.

Tablo 5: Yapı malzemesi bazında iyileştirmeler

Kategori	Mevcut Durum	Önerilen Çözüm	Beklenen Kazanım
Beton Malzemesi	Katkısız dayanımlı beton kullanılmaktadır.	%30 oranında uçucu kül veya cüruf katkılı beton	GWP'de %20–30 azalma (Olsson et al., 2023; NRMCA, 2022)
Cam ve PVC Pencere Sistemleri	Cam ve PVC doğramalar yüksek PED ve GWP değerlerine sahip.	Geri dönüştürülmüş alüminyum veya ahşap çerçeve sistemleri	%20–30 daha az gömülü karbon (Pomponi & Moncaster, 2017)
Kaplama Malzemeleri	Çimento sıva yaygın şekilde kullanılmaktadır.	Kireç esaslı sıva, doğal taş, biyobazlı kaplamalar	Yüzey başına %30–40 karbon azaltımı (AIA California, 2024)
Yalıtım Malzemeleri	EPS ve mineral yün enerji yoğun üretime sahiptir.	Selüloz, kenaf gibi doğal yalıtım ürünleri	PED ve yenilemez enerji tüketimi değerlerinde %15–25 arası düşüş (Lausselet vd., 2023)
Geri Dönüştürülmüş Malzeme Kullanımı	Yeni üretim çelik ve PVC malzeme kullanılmaktadır.	Geri dönüştürülmüş çelik, alüminyum, cam	Çelikte %50–80 CO_2 azalışı (Webster, 2022; AIA California, 2024)
Tasarım sürecinde malzeme farkındalığı	Malzeme kararları genelde maliyet ya da teknik gereklilik odaklı verilmektedir.	BIM + LCA entegrasyonu, AI destekli malzeme öneri sistemleri	Ön tasarımda %20+ karbon azaltımı potansiyeli (Kanyilmaz vd., 2023)

Tasarım Temelli Bulgular ve Öneriler Tablosu

Yapının tasarım özellikleri değerlendirildiğinde, çevresel etkilerin yalnızca kullanılan malzemeden değil, aynı zamanda mimari organizasyondan ve yapım tekniğinden de etkilendiği görülmektedir. Özellikle 26 katlı tünel kalıplı sistemin, döşeme sistemi, tekrarlayan balkonları ve yüksek açıklıklı kurgusuyla çevresel yükleri artırdığı gözlenmektedir.

Literatürde, bina yüksekliğinin artmasıyla gömülü karbon miktarının doğrusal değil, katlanarak arttığı vurgulanmaktadır. Pomponi ve Moncaster (2017), aynı alanı sağlayan az katlı blok çözümlerinin çok yapılara göre %20–50 daha düşük gömülü karbon değerine sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Bu bağlamda önerilen "az katlı blok çözümü" literatürle desteklenmektedir. Balkon sistemlerinde döşemeye entegre dökme betonarme plaklar yerine hafif çelik veya kompozit balkon sistemleri önerilmektedir. Zhang vd. (2022), betonarme balkonlar yerine GFRP destekli veya hafif çelik balkon sistemlerinin toplam malzeme kullanımını %50–60 oranında düşürebileceği sonucuna varmışlardır. Sadowska ve Bieranowski (2021), bağımsız hafif balkon sistemlerinin doğrusal ısı köprüsünü %85'e kadar azalttığını ve gömülü enerji açısından daha düşük etkiye sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Döşeme sisteminde tünel kalıp yerine kaset döşeme ya da prefabrik plak döşemeler kullanılarak, beton hacminde %15–25 azalma sağlanabilmektedir. Li vd. (2022) bu sistemlerin hem malzeme hem de şantiye süresi kaynaklı çevresel etkileri azalttığını kanıtlamıştır. Ayrıca yapıdaki geniş açıklıkların taşıyıcı sistem üzerindeki yükü artırdığı, buna karşılık açıklık boylarının kısa tutulması ile yapıdaki toplam karbon ayak izinin %25–35 oranında azaltılabileceği, Kanyilmaz vd.'nin (2023) çalışmasıyla ortaya konmuştur. Son olarak, sökülebilir sistem detayları kullanılarak yapı ömrü sonunda malzemelerin tekrar kullanımı planlanabilmektedir. Bu yaklaşım EN 15804 standardına göre Modül D kapsamında pozitif çevresel katkı sağlamaktadır. Lausselet vd. (2023), tasarımda sökülebilirlik ilkesinin yapıların döngüsel değerini artırdığını ve LCA hesaplamalarına bu kazanımın yansıtılabileceğini belirtmişlerdir. Tablo 6'da yapı geometrisi açısından iyileştirmeler göstermiştir.

Tablo 6: Yapı geometrisi açısından iyileştirmeler

Kategori	Mevcut Durum	Önerilen Çözüm	Beklenen Kazanım
Kat Sayısı ve Yapı Kütlesi	26 katlı yapı; yüksek taşıyıcı elemanlar, yüksek yoğunluklu döşemeler	5–6 katlı yaygın plan alternatifleriyle aynı alanın yaygın çözümü	Gömülü karbon emisyonunda %20–50 azalma (Pomponi & Moncaster, 2017)
Balkon Sistemi	Her katta entegre betonarme balkonlar	Hafif çelik/ahşap balkon modülleri	Malzeme kullanımında %50–60 azalma Zhang vd., 2022; Sadowska & Bieranowski, 2021
Döşeme Sistemi	Tünel kalıpta tam döşeme plak sistemi uygulanıyor	Kaset döşeme veya prefabrik döşeme panelleri	Malzeme tüketiminde %15–25 azalma, şantiye etkisinde iyileşme (Li et al., 2022)
Cephe Tasarımı ve Açıklık Oranı	Yüksek açıklık oranı ve büyük doğramalar	Cephe yönüne göre pencere optimizasyonu	Cam ve doğrama kaynaklı GWP'de %20–30 düşüş (Kanyilmaz et al., 2023)
Kütle Kompozisyonu ve Cephe Düzeni	Girintili çıkıntılı cephe, yüksek yüzey alanı	Kompakt kütle düzeni ve sade cephe tasarımı	Kaplama malzemesi tüketiminde %15–20 azalma (AIA California, 2020)
Sökülebilirlik / Geri Kullanılabilirlik	Monolitik sistemler, sökme imkanı yok	Kuru montajlı, demonte sistemler	D modülünde pozitif çevresel etki; malzeme tekrar kullanımı ile %30'a kadar tasarruf (Lausselet et al., 2023)
Açıklık Oranları ve Taşıyıcı Izgara	Geniş açıklıklar, kalın kiriş ve döşeme kesitleri	Kısa açıklıklar, sıklaştırılmış taşıyıcı ızgara	Yapı başına gömülü karbon emisyonunda %25–35 azalma (Kanyilmaz et al., 2023

Yukarıda detaylandırılan malzeme ve tasarım temelli bulgular, sürdürülebilirlik değerlendirmesinin yalnızca yapı malzemeleri ya da yapım teknikleriyle sınırlı kalmaması gerektiğini; karar alma sürecinde mimari organizasyon, taşıyıcı sistem seçimi ve detay çözümlerinin de yaşam döngüsü üzerindeki etkiler bakımından dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, bu çalışma belirli bir yapının A1–A5 ve D modüllerine odaklanmış, kullanım süreci (B modülü), bakım-onarım döngüsü ve hizmet ömrü sonrası aşamalar kapsam dışında bırakılmıştır. Özellikle deprem riski yüksek ve kentleşme baskısının yoğun olduğu ülkelerde, taşıyıcı sistemlerin yüksek dayanım gereklilikleri nedeniyle beton ve çelik gibi çevresel yükü yüksek malzemelerin kullanımı kaçınılmaz olabilmektedir. Bu nedenle önerilen iyileştirme stratejileri, her projede mimari bağlam, mühendislik gereksinimleri ve yerel mevzuatlar doğrultusunda yeniden değerlendirilmelidir. Çalışma aynı zamanda, daha kapsamlı yaşam döngüsü analizleri için yönlendirici niteliktedir. Farklı yapı sistemlerinin karşılaştırmalı değerlendirilmesi, BIM tabanlı karar destek araçlarının geliştirilmesi, sökülebilirlik ve yeniden kullanım temelli tasarım yaklaşımlarının Modül D katkısıyla modellenmesi ve yerel üretim sistemlerine dayalı sürdürülebilirlik senaryolarının sahada test edilmesi, bu alandaki araştırmaları derinleştirme potansiyeli taşımaktadır. Ayrıca LCA tabanlı geri bildirim mekanizmalarının tasarımın erken safhalarına entegre edilmesi, yalnızca çevresel değil; ekonomik ve işlevsel karar süreçlerine de çok boyutlu veri desteği sağlayarak sürdürülebilir tasarımı bütüncül biçimde destekleyebilir.

6. Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen yaşam döngüsü değerlendirmesi, tünel kalıp sistemiyle inşa edilen çok katlı bir konut yapısının çevresel etkilerinin hem yapı malzemesi tercihleri hem de mimari ve yapısal kararlar doğrultusunda nasıl şekillendiğini ayrıntılı biçimde ortaya koymuştur. Analiz sonuçları, yapının toplam karbon salımı ve enerji tüketiminin büyük oranda döşeme ve duvar sistemleri kaynaklı olduğunu göstermiş; bu yapı bileşenlerinde kullanılan katkısız, yüksek dayanımlı beton ve geleneksel üretim yöntemiyle elde edilen çelik donatının, özellikle A1-A3 modülünde belirleyici çevresel yükleri oluşturduğu belirlenmiştir. Tünel kalıp sisteminin karakteristik olarak gerektirdiği sürekli döşeme ve perde duvarlar, taşıyıcı sistem dayanımını artırırken, beraberinde ciddi bir malzeme tüketimi ve buna bağlı olarak gömülü karbon yoğunluğu getirmektedir. Bu bulgular, yalnızca malzeme türünün değil, aynı zamanda üretim tekniği ve taşıyıcı sistem seçiminin de çevresel performans üzerinde etkili olduğunu

açıkça göstermektedir. Benzer şekilde, yapının mimari organizasyonunda yer alan her katta tekrar eden balkonlar ile betonarme sistemle çözülmüş cephe düzenlemeleri, hem malzeme miktarını artırmakta hem de dış cephe alanını genişleterek açıklık oranlarını ve yalıtım ihtiyacını artırmakta; bu da çevresel etkileri çoğaltmaktadır. Bu tasarımlar, pasif enerji kontrol olanaklarını sınırladığı gibi, üretim kaynaklı karbon salınımını da yükseltmektedir. Bu bağlamda, cephe açıklık oranı, balkon sistemleri, kat yüksekliği ve açıklık uzunlukları gibi tasarım parametrelerinin çevresel etkiler göz önünde bulundurularak yeniden değerlendirilmesi, yapının yaşam döngüsü performansında anlamlı iyileştirmeler sağlayacaktır. Bu analizler doğrultusunda önerilen malzeme ve tasarım bazlı senaryolar, yapıdaki üretim kaynaklı çevresel yüklerin %20'nin üzerinde azaltılabileceğini göstermektedir. Katkılı beton kullanımı, geri dönüştürülmüş çelik donatıların tercih edilmesi, balkon sistemlerinin hafif modüler elemanlara dönüştürülmesi ve cephe açıklıklarının tasarıma göre optimize edilmesi gibi iyileştirme stratejileri, hem malzeme bazlı emisyonlarda hem de enerji tüketiminde önemli kazanımlar sunmaktadır. Ayrıca, yapı bileşenlerinin sökülebilir ve yeniden kullanılabilir şekilde detaylandırılması, sistemin döngüsel ekonomi ilkelerine yaklaşmasını sağlayarak Modül D kapsamında çevresel kazanımları artırabilecektir. Bu senaryolar, yapı sistemine, proje ölçeğine ve yerel üretim koşullarına göre farklılaşabilse de, kavramsal düzeyde çevresel performans iyileştirmesi açısından güçlü ve uygulanabilir bir çerçeve sunmaktadır. Bununla birlikte, çalışmanın belirli sınırlılıkları da mevcuttur. Türkiye'nin aktif bir deprem kuşağında yer alması, çok katlı konut yapılarında taşıyıcı sistem tasarımlarını büyük ölçüde sınırlandırmakta ve yüksek dayanım gereksinimi, çevresel etkisi yüksek olan beton ve çelik kullanımıyla doğrudan ilişkilidir. Ayrıca, hızla artan nüfus ve kentleşme baskısı, hızlı ve maliyet odaklı üretim süreçlerinin yaygınlaşmasına neden olmakta ve sürdürülebilirlik hedeflerinin çoğu zaman ikinci planda kalmasına yol açmaktadır. Bu durum, önerilen stratejilerin tümünün doğrudan uygulamaya aktarılmasını zorlaştırabilir. Ancak çalışma, mevcut sistemin çevresel yüklerinin nerelerde yoğunlaştığını göstererek, bu alanlara yapılabilecek müdahaleler konusunda sistemli ve bilimsel temelli bir yol haritası sunmaktadır.

Gelecekte gerçekleştirilecek araştırmaların, farklı yapı sistemlerinin (çelik, ahşap, hibrit) yaşam döngüsü etkilerini karşılaştırmalı biçimde analiz etmesi; LCA hesaplamalarının tasarımın erken aşamalarına entegre edilebilmesi için karar destek sistemlerinin geliştirilmesi ve bu sistemlerin yerel malzeme ve üretim koşullarına göre optimize edilmesi önemli katkılar sağlayacaktır. Ayrıca kullanım aşamasındaki enerji performansı, bakım-onarım döngüleri ve kullanıcı davranışı gibi etkenlerin de dahil edildiği bütüncül bir yaşam döngüsü yaklaşımı benimsenerek, yapıların tüm yaşam evrelerine yayılmış çevresel etkileri daha gerçekçi şekilde hesaplanabilecektir. Bu doğrultuda, Türkiye'de konut üretimi sürecine entegre edilecek yerel ve uyarlanabilir LCA tabanlı araçlar, sürdürülebilirlik hedeflerinin sahada uygulanabilirliğini güçlendirecek önemli bir adım olacaktır.

KAYNAKLAR

Ansah, M. K., Chen, X., Yang, H., Lu, L., & Lam, P. T. (2020). An integrated life cycle assessment of different façade systems for a typical residential building in Ghana. *Sustainable Cities and Society*, *53*, 101974.

Autodesk Tally. (2024). Choose Tally BIM entegrasyonlu LCA eklentisi. https://choosetally.com/ (Erişim tarihi: 07.02.2025).

Barbhuiya, S., & Das, B. B. (2023). Life Cycle Assessment of construction materials: Methodologies, applications and future directions for sustainable decision-making. *Case Studies in Construction Materials, 19*, e02326.

Dsilva, J., Zarmukhambetova, S., & Locke, J. (2023). Assessment of building materials in the construction sector: A case study using life cycle assessment approach to achieve the circular economy. *Heliyon, 9*(10).

Duru, M. O., & Koç, İ. (2021). Sürdürülebilir Yapı Üretiminde Yaşam Döngüsü Değerlendirme (LCA) Hesaplamalarının Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) İle Entegrasyonuna Yönelik Bir Araştırma. *STAR Sanat ve Tasarım Araştırmaları Dergisi, 2*(3), 107-121.

Erdogan, S. (2021). Dynamic nexus between technological innovation and building sector carbon emissions in the BRICS countries. *Journal of Environmental Management, 293*, 112780.

Fantilli, A. P., Mancinelli, O., & Chiaia, B. (2019). The carbon footprint of normal and high-strength concrete used in low-rise and high-rise buildings. *Case Studies in Construction Materials, 11*, e00296.

Foraboschi, P., Mercanzin, M., & Trabucco, D. (2014). Sustainable structural design of tall buildings based on embodied energy. *Energy and Buildings, 68*, 254-269.

ISO 14040, (2006). *Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principles and Framework.* ISO: Geneva, Switzerland, 2006.

ISO 14044, (2006). *Environmental Management—Life Cycle Assessment—Requirements and Guidelines.* ISO: Geneva, Switzerland, 2006.

ISO 21930, (2006). *Sustainability in Buildings and Civil Engineering Works, In Core Rules for Environmental Product Declarations of Construction Products and Services*. ISO: Geneva, Switzerland, 2006.

ISO 21931, (2010). *Sustainability in Building Construction—Framework for Methods of Assessment of the Environmental Performance of Construction Works*. ISO: Geneva, Switzerland, 2010.

EN 15978, (2011). *Sustainability of Construction Works–Assessment of Environmental Performance of Buildings–Calculation Method.* CEN: Brussels, Belgium, 2011.

EN 15804, (2012). *Sustainability of Construction Works—Environmental Product Declarations—Core Rules for the Product Category of Construction Products*. CEN: Brussels, Belgium, 2019.

Kanyilmaz, A., & Kondratenko, A. (2023, December). How does conceptual design impact the cost and carbon footprint of structures?. *In Structures, 58*, 105102.

Lausselet, C., Dahlstrøm, O. A., Thyholt, M., Eghbali, A., & Schneider-Marin, P. (2023). Methods to account for design for disassembly: Status of the building sector. *Buildings, 13*(4), 1012.

Li, X. J., Xie, W. J., Xu, L., Li, L. L., Jim, C. Y., & Wei, T. B. (2022). Holistic life-cycle accounting of carbon emissions of prefabricated buildings using LCA and BIM. *Energy and Buildings, 266*, 112136.

Llantoy, N., Chàfer, M., & Cabeza, L. F. (2020). A comparative life cycle assessment (LCA) of different insulation materials for buildings in the continental Mediterranean climate. *Energy and Buildings, 225*, 110323.

Lotteau, M., Loubet, P., & Sonnemann, G. (2017). An analysis to understand how the shape of a concrete residential building influences its embodied energy and embodied carbon. *Energy and Buildings, 154*, 1-11.

Ma, L., Azari, R., & Elnimeiri, M. (2024). A building information modeling-based life cycle assessment of the embodied carbon and environmental impacts of high-rise building structures: A case study. *Sustainability, 16*(2), 569.

Malinowski, M. (2023, September 5). Calgreen mandatory measures for embodied carbon reduction. AIA California. https://aiacalifornia.org/news/calgreen-mandatory-measures-for-embodied-carbon-reduction/ (Erişim tarihi: 07.02.2025).

Morsi, D. M., Ismaeel, W. S., Ehab, A., & Othman, A. A. (2022). BIM-based life cycle assessment for different structural system scenarios of a residential building. *Ain Shams Engineering Journal, 13*(6), 101802.

Namaki, P., Vegesna, B. S., Bigdellou, S., Chen, R., & Chen, Q. (2024). An Integrated Building Information Modeling and Life-Cycle Assessment Approach to Facilitate Design Decisions on Sustainable Building Projects in Canada. *Sustainability, 16*(11), 4718.

NRMCA, (2022). *Beton karbon ayakizi raporu*. https://www.nrmca.org/wp-content/uploads/2022/07/RES_Sustainability20-21.pdf?utm_source=chatgpt.com (Erişim tarihi:07.02.2025)

Olsson, J. A., Miller, S. A., & Alexander, M. G. (2023). Near-term pathways for decarbonizing global concrete production. *Nature communications, 14*(1), 4574.

Pomponi, F., & Moncaster, A. (2016). Embodied carbon mitigation and reduction in the built environment–What does the evidence say?. *Journal of Environmental Management, 181*, 687-700.

Pomponi, F., & Moncaster, A. (2017). Circular economy for the built environment: A research framework. *Journal of cleaner production, 143*, 710-718.

Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., Rydberg, T., Schmidt, W. P., Suh, S., Weidama, B. P., & Pennington, D. W. (2004). Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. *Environment international, 30*(5), 701-720.

Rezaei, F., Bulle, C., & Lesage, P. (2019). Integrating building information modeling and life cycle assessment in the early and detailed building design stages. *Building and Environment, 153*, 158-167.

Webster, T (2022). *How to bring steel into a green circular economy by Tom Webster*. https://www.ribaj.com/intelligence/reuse-steel-building-elements-circular-economy-embodied-carbon (Erişim tarihi:07.02.2025)

Röck, M., Hollberg, A., Habert, G., & Passer, A. (2018). LCA and BIM: Visualization of environmental potentials in building construction at early design stages. *Building and environment, 140*, 153-161.

Sadowska, B., & Bieranowski, P. (2021). Efficiency of Different Balcony Slab Modernization Method in Retrofitted Multi-Family Buildings. *Energies, 14*(20), 6666.

Sarigul, F. H., & Gunaydin, H. M. (2025). Integrated BIM, GIS and interoperable digital technologies in lifecycle management of building construction projects: systematic literature review. *Smart and Sustainable Built Environment*.

Sepasgozar, S. M., Hui, F. K. P., Shirowzhan, S., Foroozanfar, M., Yang, L., & Aye, L. (2020). Lean practices using building information modeling (Bim) and digital twinning for sustainable construction. *Sustainability, 13*(1), 161.

Teng, Y., Xu, J., Pan, W., & Zhang, Y. (2022). A systematic review of the integration of building information modeling into life cycle assessment. *Building and Environment, 221*, 109260.

Trabucco, D., Wood, A., Vassart, O., Popa, N., & Davies, D. W. (2015). *Life cycle assessment of tall building structural systems.* Council on Tall Buildings and Urban Habitat.

Treloar, G. J., Fay, R., Ilozor, B., & Love, P. E. (2001). An analysis of the embodied energy of office buildings by height. *Facilities, 19*(5/6), 204-214.

Tushar, Q., Zhang, G., Bhuiyan, M. A., Navaratnam, S., Giustozzi, F., & Hou, L. (2022). Retrofit of building façade using precast sandwich panel: an integrated thermal and environmental assessment on BIM-based LCA. *Buildings, 12*(12), 2098.

Yardımcı, Y., Colak Demirel, B. B., & Ertosun Yıldız, M. (2024). Climatic Influences on the Environmental Performances of Residential Buildings: A Comparative Case Study in Turkey. *Buildings, 14*(12), 4015.

Yardimci, Y., & Kurucay, E. (2024). LCA-TOPSIS Integration for Minimizing Material Waste in the Construction Sector: A BIM-Based Decision-Making. *Buildings, 14*(12), 3919.

Zhang, X., Jung, G. J., & Rhee, K. N. (2022). Performance evaluation of thermal bridge reduction method for balcony in apartment buildings. *Buildings, 12*(1), 63.

2025 MSTAS

OTURUM 5

SAYISAL ÜRETİM VE ROBOTİK

2025 MSTAS MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

BIM ve 3D Yazıcıların Entegrasyonu; BIM+3D Kavramına Yönelik Bir Yaklaşım Önerisi

Mehmet İnceoğlu [1]; Bircan İnan[2]
[1]Eskişehir Teknik Üniversitesi/Akdeniz Üniversitesi; [2] Eskişehir Teknik Üniversitesi
[1] mehmeti@eskisehir.edu.tr/mehmetinceoglu@akdeniz.edu.tr; [2]bircan.inan993@gmail.com

Özet

Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) ile 3D inşaat yazıcısı teknolojisinin entegrasyonu, inşaat sektöründe üretkenliği, hassasiyeti ve sürdürülebilirliği artırmak adına önemli fırsatlar sunmaktadır. 3D yazıcı teknolojisi, geleneksel kalıp veya iskele ihtiyacını ortadan kaldırarak yapı bileşenlerinin katman katman üretimini mümkün kılarken; BIM, tüm proje aşamalarını malzeme, zamanlama ve maliyet bilgileriyle birlikte dijital ortamda koordine eden iş birliğine dayalı bir platform görevi görür. Bu iki teknolojinin bir araya gelmesi, otomatik üretim ve özelleştirilmiş tasarım açısından yeni bir dönüşüm alanı yaratmaktadır. Ancak mevcut literatürde, bu teknolojilerin sistematik bir biçimde nasıl entegre edileceğine dair kapsamlı bir yaklaşım henüz yeterince geliştirilememiştir. Mevcut çalışmalar genellikle kod üretimi ya da geometri dilimleme gibi teknik unsurlara odaklanmakta; tasarımdan üretime uzanan süreçlerin bütüncül yönetimini ihmal etmektedir. Ayrıca, birlikte çalışabilirlik, geri bildirim döngüleri, üretim sınırlamaları ve gerçek zamanlı izleme gibi önemli zorluklar çoğunlukla göz ardı edilmektedir. Bu eksiklikleri gidermek amacıyla Veri Döngülü Üretim Sistemi (VDÜS) adlı bütüncül bir model önerilmektedir. VDÜS, BIM ortamı ile 3D yazıcılar arasında çift yönlü veri akışını esas alarak üretim süreci boyunca dijital modelin gerçek zamanlı olarak güncellenmesini sağlar. Bu yapı, üretim sürecindeki sorunlara anlık müdahale imkânı sunarken; zamanlama doğruluğu, maliyet tahmini ve hata yönetiminde önemli avantajlar yaratır. Model, yazıcıdan gelen geri bildirimlerle malzeme tüketimini optimize ederken iş gücü planlamasını da dinamik biçimde yönlendirmeyi mümkün kılar. Yazıcı sınırlamalarının BIM modeliyle entegre edilmesi sayesinde, üretilebilirlik açısından daha gerçekçi tasarımlar elde edilir. VDÜS modeli, dijital tasarım ile fiziksel üretimi bütünleştirerek gelecekte yapay zekâ, robotik ve dijital ikiz gibi teknolojilerle daha da geliştirilerek inşaat sektöründe dijital dönüşümün önünü açmaktadır.

Anahtar Kelimeler: *BIM, 3D yazıcılar, Entegrasyon*

MSTAS 2025 MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Integration of BIM and 3D Printers; A Proposed Approach to the BIM+3D Concept

Mehmet İnceoğlu [1]; Bircan İnan[2]
[1]Eskişehir Teknik Üniversitesi/Akdeniz Üniversitesi; [2] Eskişehir Teknik Üniversitesi
[1] mehmeti@eskisehir.edu.tr/mehmetinceoglu@akdeniz.edu.tr; [2]bircan.inan993@gmail.com

Abstract

The integration of Building Information Modeling (BIM) and 3D construction printing presents a promising direction for increasing efficiency, precision, and sustainability in the construction industry. While 3D printing technology enables the layer-by-layer production of complex structural components without the need for traditional formwork or scaffolding, BIM serves as a collaborative digital platform that coordinates design, material, scheduling, and cost data across all project phases. Their convergence opens new opportunities for innovation in automated construction and customized design.

Despite this potential, the literature addressing the systematic integration of these technologies remains limited. Existing studies often focus on isolated technical aspects such as code generation or geometric slicing, without offering a comprehensive framework for managing design-to-production workflows. Moreover, challenges related to interoperability, feedback loops, production constraints, and real-time monitoring are frequently overlooked. To address these limitations, a Data-Driven Manufacturing System (DDMS) is proposed as a holistic approach. DDMS allows two-way data flow between BIM environments and 3D printers, enabling continuous updates to the digital model based on real-time input from the printing process. This not only enhances adaptability during production but also improves scheduling accuracy, cost forecasting, and error management.

The system supports better decision-making through real-time feedback, helping optimize material usage and detect faults during fabrication. It also enables dynamic planning of labor resources and production timing, making it especially useful in complex or large-scale projects. Additionally, DDMS helps align printed outputs with design intentions by incorporating the printer's technical constraints directly into the BIM model. By connecting digital design environments with physical manufacturing processes, this model facilitates a shift toward smarter, more sustainable, and more automated construction practices. It lays the groundwork for future enhancements using AI, robotics, and digital twin technologies, ultimately contributing to the evolution of Construction 4.0. The proposed framework provides both theoretical insight and practical direction for bridging current gaps in the integration of BIM and 3D printing.

Keywords: *BIM, 3D printing, Integration*

1. Giriş

İnşaat Sektörü içerisinde artan 3D inşaat yazıcısı kullanımı, katmanlı üretim teknolojisinden yararlanarak üretkenlik, sürdürülebilirlik ve yapı uygulamalarında hassasiyet açısından önemli yenilikler vadetmektedir (García-Alvarado vd., 2021). Aynı zamanda, Yapı Bilgi Modellemesi (BIM), dijital ve iş birliğine dayalı bir inşaat yönetimi paradigması olarak, inşaat sürecinin her aşamasını entegre bir dijital temsille koordine etmeyi mümkün kılar (Forcael vd., 2022; Olanrewaju vd., 2022). Bu iki teknolojinin birleşimi, inşaat süreçlerinde kayda değer bir ilerleme potansiyeline işaret etmektedir.

3D inşaat yazıcısı teknolojisi, genellikle hızlı priz alan akışkan malzemelerin yatay katmanlar hâlinde ekstrüzyonu ile yapı elemanlarının şantiye ortamında veya fabrikada üretilmesini içerir. Bu yöntem, Contour Crafting (Khoshnevis, 2004) ve Concrete Printing (Buswell vd., 2007) teknikleriyle başlatılmış olup, malzemenin bir hortum aracılığıyla dijital olarak yönlendirilen bir sistem (robotik kol veya köprü sistem) üzerinden iletilmesini içerir. Bu teknolojinin doğal avantajları arasında iskele ve kalıba duyulan gereksinimin azalması, görevlerin sadeleştirilmesi, tasarım ve yapım aşamalarının iç içe geçmesi ve artan esneklik yer alır (Jayathilakage vd., 2022; Žujović vd., 2022).

BIM ise, farklı disiplinlerden aktörlerin katkılarını entegre eden bütüncül bir dijital 3D model üzerinden çalışır. Bu kapsamlı entegrasyon, veri yönetimi, çakışma tespiti, bileşen miktarlandırması ve inşaat planlaması gibi süreçleri kolaylaştırır. Her ne kadar BIM'in uygulanması titiz bir koordinasyon gerektirse de, sunduğu faydalar arasında artan üretkenlik ve maliyet etkinliği öne çıkar.

Güncel araştırmalar, 3D inşaat yazıcısı teknolojisinde daha çok malzeme geliştirme ve pilot projelere odaklanmaktadır. Ancak bu teknolojinin inşaat süreçlerine entegrasyonu ve sunduğu tasarım çeşitliliği hâlâ yeterince araştırılmamıştır. Bazı çalışmalar, yazım için geometrik bilgi aktarımını ön plana çıkarırken (Smarsly vd., 2021), bazıları organize faaliyetlerin yürütülmesini önermektedir (Sven vd., 2020). Az sayıda çalışma ise BIM'in 3D yazıcıyla entegrasyonuna dair ipuçları sunmakta, ancak bu entegrasyonu derinlemesine incelemekten uzaktır.

2. BIM+3D'nin Potansiyeli Ve Zorlukları

Yapı Bilgi Modellemesi için literatürlerde birçok farklı tanımlama bulunmaktadır. Ancak BIM'in en temel ve ilk tanımlarından birini Eastman "bir binanın, yaşam boyunca bütün ana aktivitelerini destekler nitelikte elektronik temsilini/modelini geliştirmek" şeklinde yapmıştır. BIM'in temel amacı, bir projenin tüm yaşam döngüsü boyunca inşaat süreçlerinin bütünleşik bir şekilde yönetilmesini sağlamaktır (Arayici vd. 2011). BIM, inşaat sektöründe verimlilik sorunlarına, yenilik eksikliğine ve yetersiz iş birliğine çözüm sunabilecek bir araç olarak görülmektedir (Arayici vd. 2012). Daha az koordinasyon hatası, kısalmış süreç süreleri ve enerji verimliliği sağlayan tasarım çözümleriyle daha bütüncül bir tasarım ve inşaat süreci gerçekleştirilebilir (Sakin & Kiroğlu, 2017).

BIM, yalnızca geometrik verileri değil, aynı zamanda ekipman, kaynaklar, malzemeler ve üretimle ilgili bilgileri de işleyebilir (Wu vd., 2016). Bu da otomasyon uygulamalarının, özellikle de üç boyutlu yazıcı teknolojilerinin uygulanmasını kolaylaştırmaktadır (Tay vd., 2017).

Geleneksel yöntemlerle 2D çizimlerin 3D modellere dönüştürülmesi genellikle verimsizlik, düşük kalite ve yetersiz doğruluk gibi sorunlara yol açmaktadır (Canessa, Fonda & Zennaro, 2013). BIM, bu sorunlara çözüm sunarak tasarımdan üretime geçiş sürecini iyileştirebilir (Clevenger & Khan, 2013) ve inşaat sektöründe üç boyutlu yazıcı teknolojilerinin benimsenmesini kolaylaştırabilir (Arayici vd., 2012). BIM ile 3D yazıcı teknolojisinin sinerjisi, yeniden modelleme ve tekrar yazdırma sürelerinin azaltılmasını mümkün kılar (Wu vd., 2016). Buna ek olarak, projeye dâhil olan farklı paydaşlar, iş birliğine açık bir platform aracılığıyla kendi uzmanlıklarını sunabilir ve bu sayede bileşen tasarımı optimize edilebilir (Elmualim & Gilder, 2013). Dolayısıyla, Yapı Bilgi Modellemesinin yükselişi, 3D yazıcı teknolojileri için yeni fırsatlar sunmakta ve inşaat sektöründe katmanlı üretim uygulamalarının benimsenmesini teşvik etmektedir (Wu vd., 2016).

Son on yıl, dijitalleşme, otomasyon ve entegre inşaat yöntemlerine dayanan "İnşaat 4.0" (Construction 4.0) kavramıyla birlikte inşaat sektöründe köklü dönüşümlere sahne olmuştur (Perrier vd., 2020). Bu dönüşüm; inşaat verimliliğini

artırmayı, süreçleri iyileştirmeyi ve sürdürülebilir binalar çağını başlatmayı amaçlamaktadır (Begic & Galić, 2021). Bu devrimin merkezinde dijital tasarım tekniklerinin ve otomatikleştirilmiş inşaat sistemlerinin ortaya çıkışı ve benimsenmesi yer almaktadır. Modern proje yönetimi bu dönüşüme uyum sağlamış; disiplinler arası iş birliğini ve gerçek zamanlı, veriye dayalı karar süreçlerini ön plana çıkarmıştır (Perrier vd., 2020).

BIM (Yapı Bilgi Modellemesi), bu teknoloji odaklı evrimin ön saflarında yer almaktadır. BIM'in önemi iki yönlüdür: Bir yandan kavramsal tasarımdan bakım aşamasına kadar proje yönetimini geliştirmekte, diğer yandan da proje temsiline hassasiyet katarak veri çıkarımı ve karar alma süreçlerini desteklemektedir (Begic & Galić, 2021; Perrier vd., 2020). İnşaat 4.0 kapsamında birçok teknoloji farklı gelişim aşamalarındadır. Bu teknolojilerden biri olan 3D inşaat yazıcısı (3D baskı ile inşaat), son yıllarda dikkate değer bir yükseliş göstermiştir. Bu noktada BIM, 3D inşaat yazıcısı teknolojisi ve diğer çağdaş yöntemlerle arayüz oluşturan birleştirici bir unsur olarak kilit rol üstlenmektedir (Forcael vd., 2020).

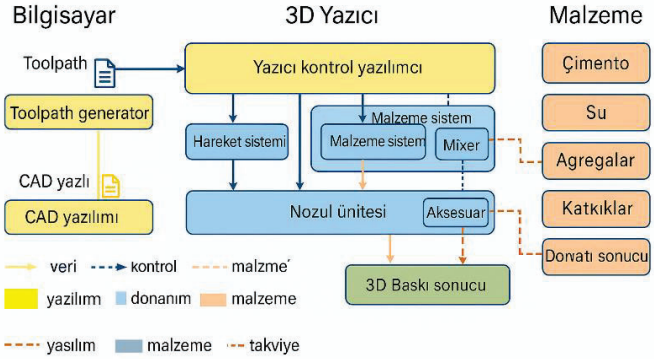
Bu alandaki özellikle dikkat çekici bir kesişim noktası, BIM ile 3D inşaat yazıcısı teknolojisinin oluşturduğu sinerjidir. BIM modellerinden doğrudan 3D yazdırma komutlarının türetilmesi olasılığı, bu alandaki araştırmaları teşvik etmiştir (Lee vd., 2019). Bu modelleri etkileyen faktörler çok çeşitlidir; baskı süresi, birleşim noktalarının analizi, duvar içindeki boşlukların konumlandırılması ve yazdırma yollarının optimizasyonu gibi unsurlar (Mechtcherine vd., 2019), nihai çıktıyı ve yazdırma sürecinde kullanılan malzeme miktarını doğrudan etkilemektedir (Cao vd., 2022).

3. BIM+3D'nin Entegrasyonuna Yönelik Yaklaşımlar

Konu oldukça zengin olmasına rağmen, literatür henüz Building Information Modeling (BIM) ile 3D inşaat yazıcısı (3DCP) arasındaki ilişkiyi kapsamlı şekilde incelemeye yeni başlamıştır. Birçok çalışma, binaların 3DCP ile tasarım ve uygulama süreçlerine değinse de, genellikle BIM modelinin geliştirilmesi veya yazdırma kodlarının oluşturulması gibi incelikleri göz ardı etmektedir. Örneğin, Mechtcherine ve arkadaşları (2019), Almanya'da inşa edilen iki katlı bir ev örneğini ele alarak duvar üretimi için genel bir iş akışı önermiştir. Öte yandan, Cao ve arkadaşları (2022), yazdırma yolu sorunlarını analiz etmiş, ancak bu verilerin BIM modelini nasıl bilgilendirebileceğini tartışmamışlardır. Ayrıca, yazıcı ekipmanının çalışma alanı ve/veya beton pompalama hacmi gibi sınırlamalar da yazdırılacak yapı elemanlarının geometrik kısıtlarını belirleyebilir.

Literatürde, 3D baskıya yönelik tasarımları hazırlamak için temel iş akışı üç ana görevle tanımlanmaktadır: geometrik şeklin tanımlanması, yatay dilimleme işlemi ve baskı yolunun üretilmesi. Bu yol, çoğunlukla sayısal kontrol makineleri için standart bir metin formatı olan G-code ile ifade edilmektedir (Anane et al., 2021; Shi et al., 2021; Weng et al., 2021). ISO/ASTM 52950:2021 standardı (International Organization for Standardization [ISO], 2021), 3D baskı için model oluşturma koşullarını belirlemekte; ISO/ASTM FDIS 52939:2023 standardı (ISO, 2023) ise duvar kalınlığı gibi tasarım şartlarının doğrulanmasını amaçlamakta ve 3DCP için veri ön işleme aşamalarını vurgulamaktadır.

Tasarım aşaması genellikle CAD veya BIM ortamında yürütülmekte olup, makine ve malzeme etkileriyle ilişkili potansiyel zorluklarla karşılaşmaktadır. Bu faktörlerin BIM modellemesindeki karmaşıklıkları dikkat çekici olsa da büyük oranda keşfedilmemiştir. Al-Tamimi ve arkadaşları (2023), baskı kodu üretimine odaklanarak bu sürecin bir kısmına ışık tutmakta, ancak ön aşamalar arasındaki bağımlılıklara çok az değinmektedir (bkz. **Şekil 1**).



Şekil 1: CAD ve 3D yazıcılar arasında entegrasyon yaklaşımı

Bunun aksine, bazı araştırmacılar projelerdeki farklı disiplinlerin koordinasyonu ve yapısal optimizasyon gibi çeşitli yönleri entegre eden daha kapsamlı modeller önermiştir (Anane et al., 2021; Breseghello & Naboni, 2022).

Son dönem çalışmaları bu karmaşık yapıyı çözmeye çalışmıştır. Peralta-Abadía ve arkadaşları (2021), Industry Foundation Classes (IFC) serbest formatı aracılığıyla yapılan geometrik aktarım süreçlerine odaklanarak 3DCP için BIM modelleme aşamalarını incelemiştir. Sven ve arkadaşları (2020), yazdırma desenleri ve malzeme odaklı tasarım iş akışlarına değinmiştir. Diğer yandan Weger ve arkadaşları (2022), 3D baskı ile inşa edilen evlerde borulama sistemlerine yönelik BIM'in kullanılabilirliğini ve gerekli ayarlamaları araştırmış; Wang ve arkadaşları (2023), 3DCP'de görev yönetimi için dijital ikiz kullanımını önermiştir. Kamel ve Kazemian (2023) ise enerji analizi için BIM ile 3DCP entegrasyonunu geliştirmiştir.

Yazdırma süreci bağlamında, Davtalab ve arkadaşları (2018), yazdırma robotları ve beton malzeme sorunlarını tartışmış; Al-Tamimi ve arkadaşları (2023) ise robotun yazdırma yolunu belirleyen tasarım ve kod üretim aşamalarını ele almıştır. Benzer şekilde, Forcael ve arkadaşları (2021) ile Weng ve arkadaşları (2021), Revit ortamında yer alan Dynamo aracılığıyla baskı kodu üretimini tartışmış; Anane ve arkadaşları (2021) ise BIM modelinin Revit'ten Rhino/ Grasshopper'a aktarılması sırasında karşılaşılan sorunlara farklı bir bakış açısıyla değinmiştir. Sonuç olarak, 3DCP'ye yönelik çalışmalar ivme kazanmış olsa da, bu teknolojinin BIM platformlarıyla entegrasyonunun tam anlamıyla anlaşılması için daha derinlemesine araştırmalara ihtiyaç vardır.

BIM ve 3D yazıcı teknolojilerinin entegrasyonu, zamanlama (4D) ve maliyet tahmini ile iş takibini kapsayan (5D) süreçlerle senkronize çalışarak inşaat projelerinde önemli avantajlar sunmaktadır. BIM modeli üzerinden oluşturulan detaylı verilerin 3D yazıcılara doğrudan aktarılması, üretim ve montaj süreçlerini zamanlama açısından daha hassas bir şekilde yönetmeyi mümkün kılar. Bu senkronizasyon, yalnızca maliyetlerin daha etkili bir şekilde yönetilmesini sağlamakla kalmaz, aynı zamanda iş gücü verimliliğini artırarak projelerde kaynak kullanımını daha sürdürülebilir hale getirir. BIM ve 3D yazıcıların bu uyumlu çalışması, özellikle karmaşık projelerde hataları minimize ederek, projelerin zamanında ve bütçe dahilinde tamamlanmasını sağlar.

Bu entegrasyon, aynı zamanda mimari tasarımın sınırlarını da genişletmektedir. Parametrik tasarım araçlarıyla oluşturulan karmaşık formlar, BIM modeli aracılığıyla analiz edilebilir ve 3D yazıcılarla kolayca üretilebilir. BIM ve 3D yazıcı teknolojilerinin sağladığı bu avantajlar, inşaat sektöründe dijitalleşme ve otomasyon sürecinin hızlanmasına önemli katkılar sağlamaktadır. Bununla birlikte, literatürdeki yetersizlikler, bu entegrasyonun tam potansiyeline ulaşmasını engelleyen önemli bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır.

4. BIM+3D Entegrasyonuna Yeni Bir Yaklaşım Önerisi

BIM (Yapı Bilgi Modellemesi) ve 3D yazıcı teknolojilerinin entegrasyonu, inşaat sektöründe dijitalleşmenin ve otomasyonun temel taşı haline gelmektedir. Bu teknolojilerin birleşimi, sadece geleneksel süreçlerin optimize edilmesini değil, aynı zamanda geleceğe dönük yeni üretim yaklaşımlarının geliştirilmesini mümkün kılmaktadır. Ancak günümüzde literatürde bu entegrasyonun nasıl sistematik bir şekilde ele alınması gerektiğine dair yeterli kapsamlı yaklaşım bulunmamaktadır. Bu nedenle, BIM ve 3D yazıcı entegrasyonuna yönelik olarak yeni bir öneri olarak "Veri Döngülü Üretim Sistemi (VDÜS)" sunulmaktadır (Şekil-2).

VDÜS, yapı tasarımından üretime kadar geçen tüm süreçlerde verilerin çift yönlü akışını temel alan bütüncül bir sistemdir. Bu sistemde, BIM modeli sadece tasarım sürecini yönlendiren bir araç değil, aynı zamanda 3D yazıcılardan gelen üretim verilerinin işlendiği ve yeniden tasarımı etkileyebilecek çıktılar üreten dinamik bir platform olarak ele alınır. Böylece hem yukarıdan aşağıya (top-down) hem de aşağıdan yukarıya (bottom-up) veri akışı sağlanarak, sistem sürekli olarak kendi kendini güncelleyebilen bir yapıya kavuşur. Bu yaklaşım, özellikle üretim esnasında karşılaşılan sorunlara erken müdahale edilmesini ve adaptif tasarım süreçlerinin hayata geçirilmesini olanaklı kılar.

Sistemin ilk ayağını BIM ortamında oluşturulan parametrik ve çok boyutlu modeller oluşturmaktadır. Tasarım sürecinde yapı elemanlarının malzeme bilgisi, üretim sırası, geometrik doğruluk ve lojistik parametreleri gibi çok sayıda veri BIM modeli içerisine yerleştirilir. Bu model, aynı zamanda üretim aşamasında kullanılacak yazıcının teknik kapasitesine göre optimize edilmiştir. Üretim süreci başladığında, 3D yazıcıya gönderilen her üretim adımı, sensörler

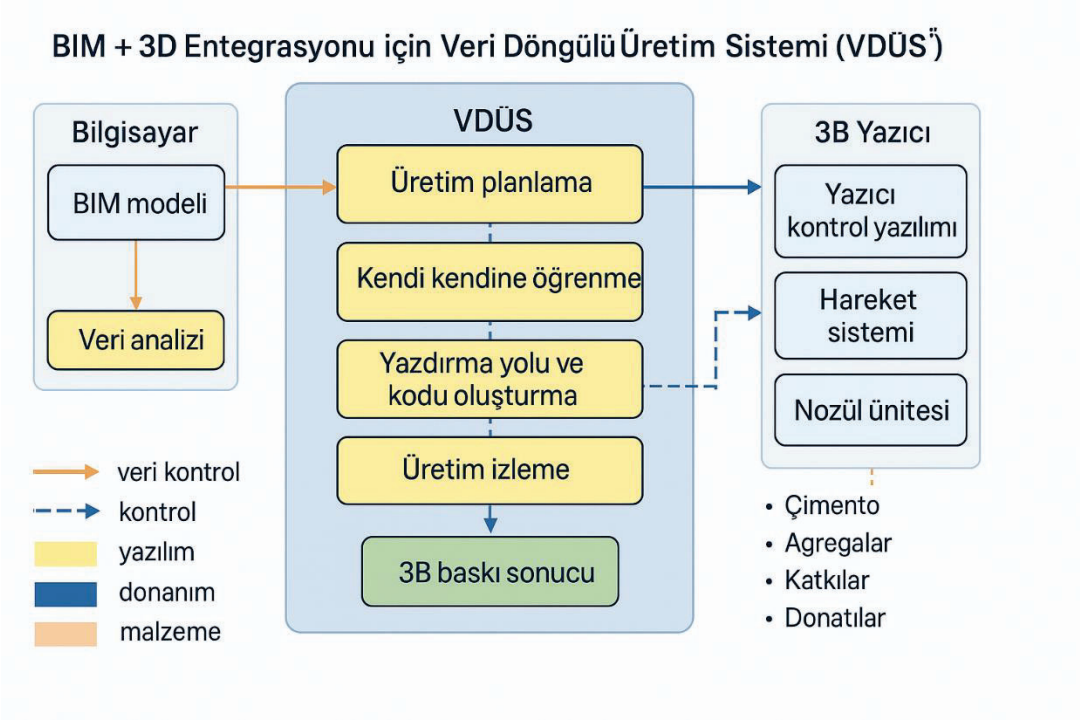
aracılığıyla anlık olarak izlenir. Isı, nem, malzeme akış hızı, nozzle konumu gibi veriler gerçek zamanlı olarak BIM modeline geri beslenir. Böylece model, üretim sahasında yaşananlara göre sürekli olarak güncellenir ve sonraki üretim kararları bu güncel veri setine göre şekillenir.

Bu yaklaşım, özellikle hata analizi ve maliyet kontrolü açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Örneğin, yazıcıdan gelen geri bildirimler sayesinde malzeme tüketimi olması gerekenden fazla ise BIM modeli bu veriyi analiz ederek malzeme tarifini yeniden düzenleyebilir. Aynı zamanda hata oranı yüksek olan tasarım elemanları, üretim esnasında yeniden modellenerek süreç içerisinde güncellenmiş versiyonlarıyla değiştirilebilir. Bu da proje süresince ortaya çıkabilecek israfı minimuma indirir ve sürdürülebilir bir üretim zinciri oluşturur.

Veri Döngülü Üretim Sistemi ayrıca iş gücü planlamasında da önemli etkiler yaratır. Üretim sırasında oluşan veriler sadece tasarımı değil, aynı zamanda iş planlamasını da etkiler. Hangi yapı elemanının üretiminin ne kadar süreceği, ne zaman hangi ekibin devreye gireceği gibi bilgiler BIM modelinden çekilerek proje takvimine yansıtılır. Bu sayede proje yönetiminde daha esnek ve öngörülebilir bir yaklaşım elde edilir.

Bu sistem, özellikle büyük ölçekli ve karmaşık projelerde tüm aktörlerin ortak bir veri havuzu üzerinden çalışmasını da sağlar. Mimarlardan mühendis ve müteahhitlere kadar tüm taraflar aynı model üzerinden çalışarak, bilgi kayıplarını ve yanlış anlamaları önleyebilir. Aynı zamanda 3D yazıcılara özgü üretim sınırlamaları (nozzle çapı, katman kalınlığı, malzeme dayanımı) gibi parametreler de BIM modeliyle doğrudan entegre edilerek daha gerçekçi ve üretilebilir tasarımlar ortaya konur.

Sonuç olarak, BIM ile 3D yazıcı teknolojilerinin entegrasyonuna yönelik olarak sunulan Veri Döngülü Üretim Sistemi (VDÜS), hem akademik hem de uygulamalı anlamda önemli bir açığı kapatmaya yönelik bütüncül bir yaklaşımdır. Bu sistem; tasarım, üretim, izleme ve yeniden tasarım döngüsünü dijitalleştirerek inşaat sektöründe verimliliği artırmakta, sürdürülebilirliği desteklemekte ve yenilikçiliği teşvik etmektedir. Gelecekte bu sistemin, yapay zeka destekli karar verme mekanizmaları ve robotik üretim sistemleriyle daha da gelişerek inşaat sektöründe standart hale gelmesi öngörülmektedir.



Şekil 2: VDÜS Entegrasyon yaklaşımı

5. Sonuçlar

BIM (Yapı Bilgi Modellemesi) ile 3D inşaat yazıcısı teknolojilerinin entegrasyonu, inşaat sektöründe dijital dönüşüm ve otomasyonun merkezinde yer alan stratejik bir eşleşme olarak değerlendirilmektedir. Bu iki teknolojinin birbirini tamamlayan yapıları, yalnızca mevcut üretim süreçlerini daha verimli hale getirmekle kalmayıp, aynı zamanda yenilikçi tasarım ve üretim yaklaşımlarının önünü açmaktadır. BIM'in sunduğu bütünleşik veri yönetimi, görselleştirme ve planlama yetenekleri; 3D yazıcıların sunduğu esneklik, malzeme tasarrufu ve iş gücü optimizasyonu ile birleştiğinde, geleneksel inşaat yöntemlerinin sınırlılıklarını aşan yeni bir paradigma ortaya çıkmaktadır.

Günümüzde yapılan araştırmaların büyük bir kısmı, bu teknolojilerin potansiyel faydalarını tartışmakla birlikte, entegrasyon sürecinin sistematik olarak nasıl yönetileceğine dair derinlikli ve kapsamlı modeller sunmaktan uzaktır. Bu bağlamda önerilen Veri Döngülü Üretim Sistemi (VDÜS), BIM ve 3D inşaat yazıcısı teknolojilerini çift yönlü veri akışı ile birleştirerek, hem tasarım hem de üretim süreçlerinin eş zamanlı ve dinamik bir şekilde yönetilmesini mümkün kılmaktadır. VDÜS modeli, sadece bilgi üretimini değil, aynı zamanda bu bilginin geri besleme mekanizmaları aracılığıyla yeniden işlenmesini ve tasarımın sahadaki gerçek koşullara adapte edilmesini sağlamaktadır. Böylece, inşaat projelerinde hata oranı düşerken, kaynak verimliliği, maliyet kontrolü ve sürdürülebilirlik parametrelerinde kayda değer iyileşmeler gözlemlenmektedir.

Ayrıca bu model, yalnızca bireysel projeler bazında değil, aynı zamanda disiplinler arası iş birliğini kolaylaştıran merkezi bir veri ekosistemi aracılığıyla tüm paydaşların ortak bir platformda buluşmasını sağlar. Bu durum, bilgi kayıplarını minimize ederken, proje süresince karar alma süreçlerini daha şeffaf ve veri odaklı hâle getirir. BIM modelleri ile entegre çalışan 3D yazıcıların, gerçek zamanlı üretim verileriyle sürekli beslenmesi, yalnızca üretim hattının değil, tasarım sürecinin de yeniden yapılandırılmasına olanak tanımaktadır. Özellikle parametrik ve adaptif tasarımların yaygınlaştığı günümüzde, VDÜS yaklaşımı üretim-tasarım etkileşimini en üst düzeyde gerçekleştiren bir çerçeve sunmaktadır.

Sonuç olarak, BIM ve 3D yazıcı teknolojilerinin birlikte kullanımı yalnızca geçici bir inovasyon değil, inşaat sektöründe kalıcı ve yapısal bir dönüşüm potansiyeli taşımaktadır. Önerilen VDÜS yaklaşımı, bu dönüşümün daha sistematik, veri odaklı ve sürdürülebilir bir zemine oturtulmasına olanak tanımaktadır. Bu bağlamda, gelecekte bu entegrasyonun yapay zeka, nesnelerin interneti (IoT) ve dijital ikiz teknolojileri ile desteklenerek daha da gelişeceği ve inşaat endüstrisinin temel yapı taşlarından biri hâline geleceği öngörülmektedir. Bu çerçevede, hem akademik araştırmaların hem de sektör uygulamalarının VDÜS gibi modeller etrafında şekillendirilmesi, dijitalleşmenin inşaat sektörü üzerindeki etkisini maksimize etmek açısından stratejik bir önem arz etmektedir.

KAYNAKLAR

Al-Tamimi, A.K., Alqamish, H.H., Khaldoune, A., Alhaidary, H., Shirvanimoghaddam, K., 2023. Framework of 3D concrete printing potential and challenges. *Buildings 13*, 827.

Anane,W., Iordanova, I., Ouellet-Plamondon, C., 2021. The use of BIM for robotic 3D concrete printing. In: *Proceedings of the Canadian Society of Civil Engineering Annual Conference 2021*. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, pp. 325e336.

Arayici Y., C. Egbu, P. Coates, Building information modelling (BIM) implementationand remote construction projects: issues, challenges, and critiques, J. Inf. Technol.Constr. 17 (2012) 75–92.

Arayici Y., P. Coates, L. Koskela, M. Kagioglou, C. Usher, K. O'Reilly, BIM adoption andimplementation for architectural practices, Struct. Surv. 29 (1) (2011) 7–25.

Ashrafi, N., Nazarian, S., Meisel, N., Duarte, J.P., 2022. A grammarbased algorithm for toolpath generation: compensating for material deformation in the additive manufacturing of concrete. Addit. Manuf. 55, 102803.

Begic, H., Galić, M., 2021. A systematic review of construction 4.0 in the context of the BIM 4.0 premise. Buildings 11, 337.

Breseghello, L., Naboni, R., 2022. Toolpath-based design for 3D concrete printing of carbon-efficient architectural structures. Addit. Manuf. 56, 102872.

Buswell, R.A., Soar, R.C., Gibb, A.G.F., Thorpe, A., 2007. Freeform construction: mega-scale rapid manufacturing for construction. Autom. ConStruct. 16, 224e231.

Canessa, E., Fonda, C., Zennaro, M., & Deadline, N. (2013). Low-cost 3D printing for science, education and sustainable development. *Low-Cost 3D Printing*, *11*(1).

Cao, X., Yu, S., Cui, H., Li, Z., 2022. 3D construction printing devices and reinforcing techniques for extruded cement-based materials: a review. Buildings 12, 453.

Clevenger, C. M., & Khan, R. (2014). Impact of BIM-enabled design-to-fabrication on building delivery. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, *19*(1), 122-128.

Davtalab, O., Kazemian, A., Khoshnevis, B., 2018. Perspectives on a BIM-integrated software platform for robotic construction through Contour Crafting. Autom. ConStruct. 89, 13e23.

Elmualim, A., & Gilder, J. (2014). BIM: innovation in design management, influence and challenges of implementation. *Architectural Engineering and design management*, *10*(3-4), 183-199.

Forcael, E., Ferrari, I., Opazo-Vega, A., Pulido-Arcas, J.A., 2020. Construction 4.0: a literature review. Sustainability 12, 9755.

Forcael, E., Pe´rez, J., Va´squez,A´., Garcı´a-Alvarado, R., Orozco, F., Sepu´lveda, J., 2021. Development of communication protocols between BIM elements and 3D concrete printing. Appl. Sci. 11, 7226.

Forcael, E., Puentes, C., Garcı´a-Alvarado, R., Opazo-Vega, A., Soto-Mun˜oz, J., Moroni, G., 2022. Profile characterization of building information modeling users. Buildings 13, 60.

Garcı´a-Alvarado, R., Moroni-Orellana, G., Banda-Pe´rez, P., 2021.Architectural evaluation of 3D-printed buildings. Buildings 11, 254.

García-Alvarado, R., Moroni-Orellana, G., Banda, P., 2022. Development of variable residential buildings with 3D-printed walls. Buildings 12, 1796.

ISO/ASTM 52950:2021 International Organization for Standardization, 2021. Additive ManufacturingdGeneral PrinciplesdOverview of Data Processing.

ISO/ASTM FDIS 52939 International Organization for Standardization, 2023. Additive Manufacturing for ConstructiondQualification Principlesd Structural and Infrastructure Elements.

Jayathilakage, R., Rajeev, P., Sanjayan, J., 2022. Rheometry for concrete 3D construction printing : a review and an experimental Comparison. Buildings 12, 1190.

Kamel, Ehsan, Ali, Kazemian, 2023. BIM-integrated thermal analysis and building energy modeling in 3D-printed residential buildings. Energy Build. 279, 112670.

Khoshnevis, B., 2004. Automated construction by contour craftingdrelated robotics and information technologies. Autom. ConStruct. 13, 5e19.

Lee, Dongyoun, Kim, H., Sim, J., Lee, Dongmin, Cho, H., Hong, D., 2019. Trends in 3D construction printing technology for construction automation using text mining. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, 20, 871e882.

Mechtcherine, V., Nerella, V.N., Will, F., Na¨ther, M., Otto, J., Krause, M., 2019. Large-scale digital concrete construction e CONPrint3D concept for on-site, monolithic 3D-printing. Autom.ConStruct. 107, 102933.

Olanrewaju, O.I., Kineber, A.F., Chileshe, N., Edwards, D.J., 2022. Modelling the relationship between Building Information Modelling (BIM) implementation barriers, usage and awareness on building project lifecycle. Build. Environ. 207, 108556.

Peralta-Abadía, P., Smarsly, K., 2021. An algorithmic BIM approach to advance concrete printing. In: Abualdenien, J., Borrmann, A., Ungureanu, L.-C., Hartmann, T. (Eds.), EG-ICE 2021 Workshop on Intelligent Computing in Engineering. Universita ¨tsverlag der TU Berlin, Berlin.

PERI Group, 2021. Germany's First Printed House Officially Opened. Perrier, N., Bled, A., Bourgault, M., Cousin, N., Danjou, C., Pellerin, R., Roland, T., 2020. Construction 4.0: a survey of research trends. ITcon 25, 416e437.

Sakin, M. ve Kiroglu,Y.C. (2017),3D Printing of Buildings: Construction of the Sustainable Houses of the Future by BIM, Energy Procedia, Volume 134, 2017, Pages 702-711.

Shi, A., Shirowzhan, S., Sepasgozar, S.M.E., Shi, A., Shirowzhan, S., Sepasgozar, S.M.E., 2021. Computational workflow for threedimension printing in construction: digital tools and methodological limitations. Advances and Technologies in Building Construction and Structural Analysis.

Smarsly, K., Peralta, P., Luckey, D., Heine, S., Ludwig, H.M., 2021. BIM-based concrete printing. Lecture Notes in Civil Engineering 98, 992e1002.

Sven, P., Dorn, T., Hirsch, T., Ehm, C., Stephan, D., Vassiliadis, D., 2020. Architectural applications and workflows for additive fabrication with concrete. In: RILEM Bookseries, vol. 28, pp. 946e955.

Wang, Y., Aslani, F., Dyskin, A., Pasternak, E., 2023. Digital twin applications in 3D concrete printing. Sustainability 15, 2124.

Weger, D., Gehlen, C., Korte, W., Meyer-Bro¨tz, F., Scheydt, J., Stengel, T., 2022. Building rethought e 3D concrete printing in building practice. Construction Robotics 5 (3), 203e210.

Weng, Y., Mohamed, N.A.N., Lee, B.J.S., Gan, N.J.H., Li, M., Tan, M.J., Li, H., Qian, S., 2021. Extracting BIM information for lattice toolpath planning in digital concrete printing with developed Dynamo script: a case study. J. Comput. Civ. Eng. 35, 05021001.

Wu, P., Wang, J., & Wang, X. (2016). A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry. *Automation in construction*, *68*, 21-31.

Xu, W., Huang, S., Han, D., Zhang, Z., Gao, Y., Feng, P., Zhang, D., 2022. Toward automated construction: the design-to-printing

workflow for a robotic in-situ 3D printed house. Case Stud. Constr. Mater. 17, e01442.
Žujović, M., Obradovi_c, R., Rakonjac, I., Milo_sevi_c, J., 2022. 3D construction printing technologies in architectural design and construction: a systematic literature review. Buildings 12,1319.

2025 MSTAS MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Mimari Tasarım Sürecinde Kavramsal Tasarım Aşamasında Dijital Üretim Araçlarının Etkisi

Ülkü Şimşek Şengül[1]; Elvan Elif Özdemir[2]; Nida Naycı[3]
[1,2,3]Mersin Üniversitesi,
[1]ulkusimsek@mersin.edu.tr, [2]elifozdemir@mersin.edu.tr, [3]nidanayci@mersin.edu.tr

Özet

Mimari pratik, dijital üretim tekniklerinin gelişmesi ve yaygınlaşması nedeniyle değişmektedir. Geleneksel tasarım araçları, fikirlerin hızlı ifade edilmesine ve geliştirilmesine olanak tanırken, hesaplamalı tasarım daha kompleks ve parametrik çözümler üretmeye imkan tanır. Mimari eskiz ve maket gibi geleneksel tasarım araçları, hesaplamalı tasarım ve dijital fabrikasyon, öğrencilerin yaratıcılığını farklı açılardan etkileyen tamamlayıcı yöntemlerdir. Bu çalışma, mimarlık eğitiminde geleneksel tasarım yöntemleri (mimari eskiz ve maket) ile dijital tasarım (parametrik tasarım) ve dijital üretim süreçlerinin öğrenci yaratıcılığı ve düşünme becerisi üzerindeki etkilerini incelemektedir. Çalışma, mimarlık lisans öğrencilerinden seçilen odak öğrenci grubu ile yürütülmüştür. Çalışmaya katılan öğrenciler kendilerine verilen kule tasarımı problemine ilişkin, hem geleneksel hem de dijital tasarım ve üretim yöntemleri kullanarak iki farklı öneri geliştirmişlerdir. Çalışma sonunda katılımcılar tarafından farklı yöntemlerle üretilen çalışmalar bağımsız bir jüri tarafından yaratıcılık, estetik ve parametrik karmaşıklık kriterlerine göre karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Estetik değerlendirme yüzey kalitesi ve ışık-gölge etkisi gibi faktörleri, parametrik karmaşıklık ise tasarım değişkenlerinin zorluk derecesini kapsamıştır. Çalışma sonunda, dijital üretim yöntemlerinin yenilikçi ve karmaşık formlar üretme kapasitesini artırdığı arttırdığı, geri bildirim süreçlerini hızlandırdığı ve tasarım kararlarını daha esnek hale getirdiğini göstermektedir. Ancak, geleneksel yöntemlerin el becerisi, malzeme farkındalığı ve mekânsal algıyı geliştirmede hâlâ önemli olduğu belirlenmiştir. Geleneksel tasarım araçları kullanılarak gerçekleştirilen eskiz ve maket çalışmalarında katılımcıların fikir geliştirme, kavramsallaştırma ve temel kütle organizasyonu becerileri öne çıkarken, dijital araçların (Grasshopper) kullanımı ile birlikte biçimsel çeşitlilik, mekânsal geçirgenlik, organik strüktürel organizasyon ve parametrik kontrol gibi ileri düzey mimari nitelikler daha belirgin bir şekilde tasarımlara yansımıştır. Katılımcıların dijital tasarım süreçleriyle birlikte yaratıcılıklarını daha özgürce geliştirebildikleri, estetik çeşitliliği artırabildikleri ve parametrik ilişkiler kurarak daha karmaşık yapılar üretebildikleri görülmüştür. Bu bulgular, dijital tasarım araçlarının özellikle parametrik tasarım ortamlarında öğrencilerin düşünme biçimlerini dönüştürerek daha yenilikçi ve dinamik tasarımlar üretmelerine olanak sağladığını göstermektedir. Bununla birlikte, geleneksel tasarım yöntemleri de malzeme farkındalığı, el becerisi ve mekânsal algının gelişimi açısından hâlâ önemli bir yere sahiptir. Gelecekteki mimarlık eğitiminde, her iki yöntemin hibrit kullanımı ile en iyi sonuçlara ulaşılabileceği önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: *Dijital Fabrikasyon, Parametrik Tasarım, Geleneksel Tasarım Yöntemi.*

MSTAS 2025 MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

The Impact of Digital Production Tools on the Conceptual Design Stage of the Architectural Design Process

Ülkü Şimşek Şengül[1]; Elvan Elif Özdemir[2]; Nida Naycı[3]
[1,2,3]Mersin University
[1]ulkusimsek@mersin.edu.tr, [2]elifozdemir@mersin.edu.tr, [3]nidanayci@mersin.edu.tr

Abstract

Architectural practice is changing due to the development and widespread use of digital production techniques. While traditional design tools enable ideas to be quickly expressed and developed, computational design allows for more complex and parametric solutions. Traditional design tools such as architectural sketches and models, computational design, and digital fabrication are complementary methods that influence students' creativity in different ways.This study examines the effects of traditional design methods (architectural sketching and model making) and digital design (parametric design) and digital production (subtractive manufacturing) processes on student creativity and thinking skills in architecture education. An experimental study was conducted with a focus group, where students attempted to solve a given design problem, by using traditional methods out of cardboard and foam models and developed parametric designs using Grasshopper and Rhino software, followed by digital fabrication.. Design proposals completed at the end of the study were comparatively evaluated by a professional jury. The results indicate that digital production methods enhance the capacity to produce innovative and complex forms, accelerate feedback processes, and make design decisions more flexible. However, it was determined that traditional methods remain important in developing manual skills, material awareness, and spatial perception. Student projects were evaluated by an independent jury based on criteria of creativity, aesthetics, and parametric complexity. Aesthetic evaluation included factors such as surface quality and light-shadow effects, while parametric complexity covered the degree of difficulty of design variables. In general, participants' idea development, conceptualization, and basic mass organization skills, while the use of digital tools (especially Grasshopper) resulted in more advanced architectural qualities such as formal diversity, spatial permeability, organic structural organization, and parametric control being reflected more clearly in the designs. It was observed that participants were able to develop their creativity more freely, increase aesthetic diversity, and produce more complex structures by establishing parametric relationships through digital design processes. These findings demonstrate that digital design tools, especially in parametric design environments, enable students to transform their ways of thinking and produce more innovative and dynamic designs. However, traditional design methods still play an important role in terms of material awareness, manual skills, and the development of spatial perception. It is suggested that the best results in future architecture education can be achieved through the hybrid use of both methods.

Keywords: *Digital Fabrication, Parametric Design, Traditional Design Method.*

1. Giriş

Dijital teknolojiler, binaların tasarlanma ve yapılma şeklini değiştirirken mimarlığın öğretilme şeklini de değiştirmiştir. Son yıllarda teknoloji ve toplumdaki hızlı değişimler nedeniyle hesaplamalı tasarım yöntemleri ve dijital araçlar yaygınlaşarak geleneksel mimari yöntemlerdeki yaratıcılığı önemli ölçüde etkilemiştir (Silva vd., 2017). Bu tasarımcıları ve üreticileri, tasarım-üretim iletişimini basitleştirmek için imalat geometrisinin mimari pratiğe nasıl dahil edilebileceğini düşünmeye itmiştir (Silva vd., 2017). O zamandan bu yana, 'dijital fabrikasyon' olarak adlandırılan yeni bir olgu, çağdaş tasarımın temel bir bileşeni olarak ortaya çıkmış; mimari pratikte bir değişim yaratmış (Díaz Valdés, 2021) ve karmaşıklık, esneklik ve yüksek verimlilik açısından mimari tasarım gereksinimlerini karşılamıştır (Žujović vd., 2022). Dijital fabrikasyon, ister minyatür modellerin oluşturulması ister gerçek ölçekli yapısal bileşenlerin inşası yoluyla olsun (Guzik, 2010), dijital bir nesneyi gerçek bir nesneye dönüştürme avantajları nedeniyle yeni bir sanayi devrimi olarak öngörülmektedir (Chancharoen & Sithiwichankit, 2019). Her dijital fabrikasyon iş akışı, kullanılan makine türlerine, malzeme seçimine ve ayrıca yazılım uygulamalarına bağlıdır (O'Leary & Peek, 2019). Dijital fabrikasyon iş akışının aşamaları 4 ana aşamada özetlenebilir: (1) tasarım aşaması, (2) hazırlık aşaması, (3) fabrikasyon aşaması (Putro & Wirasmoyo, 2020) ve (4) montaj aşaması (Leen, 2021).

Dijital üretim, Mimari Mühendislik ve İnşaat (AEC) endüstrisinde tasarım süreci taleplerini değiştiren ve buna bağlı olarak tasarımcılar ve yapımcılar arasındaki iletişimi yönetmek için yeni bir çerçeve oluşturulmasını gerektiren yeni bir teknik yeniliktir (Ng vd., 2020). Kavramsallaştırma, tasarım, malzeme işleme (Lee vd., 2019) ve simülasyondan prototipleme sürecine kadar üretim sürecinin her aşamasını yönetmekten sorumludur (Indrawan, 2017). Dijital üretim, tasarım-üretim iletişimini iyileştirmek için üretim geometrisini tasarım sürecine dahil eden bir metodolojidir (Ng vd., 2023; Orciuoli & Baquero, 2014). Daha karmaşık geometriler oluşturmak amacıyla üretim iş akışını kontrol etmek için dijital verilerin doğrudan makinelere aktarıldığı sanaldan fiziksele geçiştir (Mawas vd., 2022). Mimaride dijital fabrikasyon, sadece karmaşık formlar açısından değil, aynı zamanda malzeme ve inşaat optimizasyonu açısından da yakın zamana kadar uygulanması zor olan fırsatların önünü açmaktadır (Bayram, 2021). Son yıllarda teknolojik ilerlemeler dünyamızı şekillendirmiş ve yeni dijital üretim teknikleri çoğalarak nesnelerin tasarlanma ve inşa edilme biçiminde devrim yaratmıştır (Corsini & Moultrie, 2018). Teknolojiler sürekli genişlese de, dijital üretim temel olarak mimaride kullanılan beş yöntemi içerir: (1) eklemeli üretim , (2) eksiltici üretim , (3) biçimlendirici üretim, (4) birleştirme üretimi ve (5) robotik üretim (Bayram, 2021).

Tasarımcılar dijital üretim araçlarıyla (eklemeli, eksiltmeli ve robotik üretim araçları) tasarım prototipleri üretebilir ve bu tasarım denemelerinden geri bildirim alabilir (Klinger & Vermillion, 2006; Mohite vd., 2018; Vazquez & Jabi, 2017), böylece tasarım ve üretim süreçleri kesişir ve bütünleşir. Dolayısıyla parametrik tasarım ortamlarının mimari tasarım süreci üzerindeki etkileri, dijital imalatın etkilerinden ayrı tutulamaz. Tasarımcılar, tasarım yapmak için dijital ortamları kullanır ve bu çalışma akışı ile mimari tasarım süreci bu ortamlar içinde ve arasında bir diyaloğa dönüşür. Parametrik tasarım, tasarımcıların niyetini kodlayan parametreler ve kurallar içeren algoritmik bir yaklaşıma sahip bir yöntem olarak tanımlanmaktadır (Casini, 2021). Ayrıca, geometrik bir çözüm uzayında ilişkisel ilişkilerin keşfedilmesine ve düzenlenmesine dayanan bir süreç olarak da tanımlanmıştır (Oxman, 2010; Woodbury, 2010). Diğer araştırmacılar parametrik modelleri, sabit ve değişebilen özelliklere sahip geometrilerin tasarım temsili olarak tanımlamaktadır (Hernandez, 2006). Bu tanımların ortak noktası, geometriyi parametrelerle (sabit veya değişken) ve bunlar arasındaki kurallarla inşa etmeye dayalı bir tasarım yöntemini tanımlamalarıdır.

Yu vd. (2013) ile Yu ve Gero (2016), geometrik ve parametrik tasarım ortamlarını kıyaslarken, Lee ve Ostwald (2019) parametrik tasarım ortamlarının tasarım sürecine olan bilişsel etkilerini anlamaya yönelik bir araştırma yapmıştır. J. Lee ve ekibi (2014) ise parametrik tasarım stratejileri üzerine bir değerlendirme sunmuştur. Ancak bu çalışmalar, dijital üretim ve montaj süreçlerini kapsamamakta olup, yürütülen deneyler de Parametrik Tasarım Ortamı (PDE) ile yakından ilişkili olan üretim süreçlerinden tamamen bağımsız olarak ele alınmamıştır. Buna ek olarak, önceki araştırmaların temel odak noktası, eskiz sürecini deneysel çerçeveye dâhil etmeksizin, öncelikli olarak parametrik tasarım ortamlarına yönelmiştir. Bu çalışma, geleneksel tasarım yöntemi araçları ve dijital tasarım ile dijital fabrikasyon araçları kullanılarak elde edilen tasarım ürünlerinin öğrencinin yaratıcılığına ve düşünme becerisine olan etkisini araştırmaktadır.

2. Yöntem

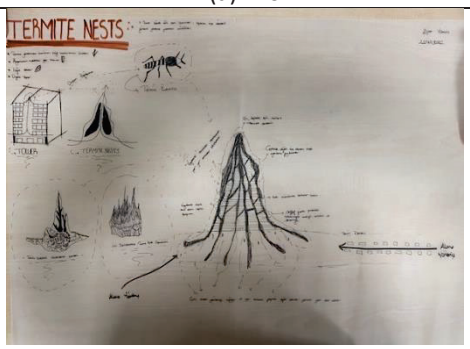
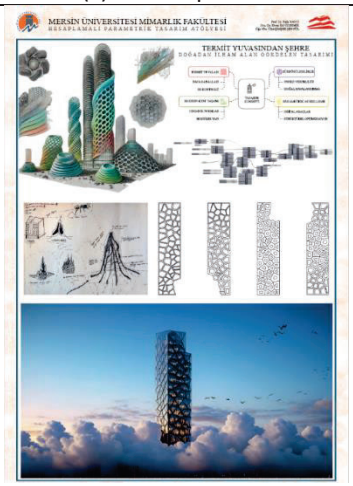
Bu çalışmada, mimarlık eğitiminde kullanılan geleneksel tasarım yöntemleri (mimari eskiz ve mimari maket) ile dijital tasarım yöntemi (parametrik tasarım) ve dijital üretimin öğrencinin yaratıcılığına ve düşünme becerisine olan etkisi

tartışılmaktadır. Çalışmanın odak noktası olarak, öğrencilerin kendilerine verilen kule tasarım problemini iki farklı yöntem ile çözmeye çalışması ve bu iki farklı yaklaşımın öğrenci yaratıcılığına, üretim sürecine ve son ürün kalitesine etkileri incelenmiştir. Araştırma kapsamında, geleneksel yöntemlerle karton ve köpük maketler üreten odak grup öğrenci ile aynı öğrencilerin Grasshoper ve Rhino programlarını kullanarak parametrik olarak tasarladıkları–mimari ürünleri dijital fabrikasyon ile ürettikleri deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışmaya seçilen odak grup öğrenciler aynı tasarım problemini iki farklı yöntem ile çözüm üretmeye çalışmışlardır. Öğrenci çalışmaları, bağımsız jüri tarafından yaratıcılık, estetik ve parametrik karmaşıklık kriterlerine göre karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Yaratıcılık kriteri, tasarımın özgünlüğü, ardındaki yaratıcı fikir ve tasarım üzerindeki etkisidir. Estetik kriteri, kulenin fiziksel üretimi sonrası yüzey kalitesi, ışık-gölge etkisi gibi fiziksel etkileşimleri ile cephede tekrar eden ve uyumlu formlar, organik ve düzenli geometrilerin dengesi gibi tasarım ilkeleridir. Parametrik karmaşıklık kriteri ise, oluşturulan parametrik tasarımın ve değişkenlerin karmaşıklığını içermektedir.

3. Bulgular ve Tartışma

Çalışma; biri 2. Sınıf öğrencisi ve üç tanesi 4. Sınıf öğrencisi olmak üzere toplam 4 kişilik Mimarlık lisans öğrencisinden oluşan odak grup ile gerçekleştirilmiştir. Katılımcılar tarafından üretilen çalışmalar, hem geleneksel hem de parametrik kule tasarımları yaratıcılık, estetik ve parametrik karmaşıklık açısından değerlendirilmiştir.

Tablo 1: A Katılımcısına ait Ürünler

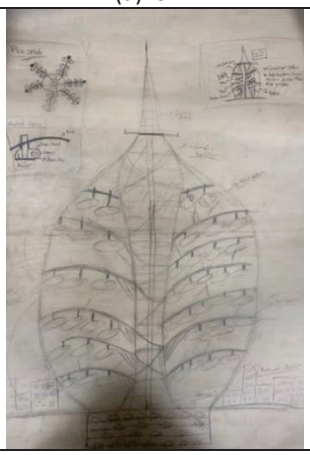
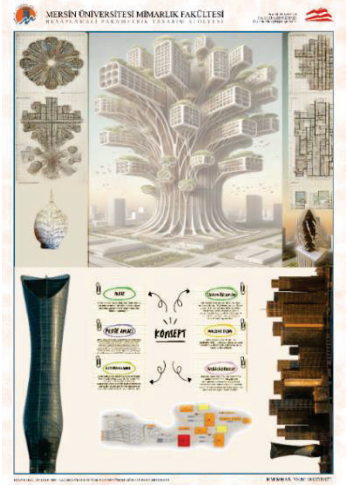
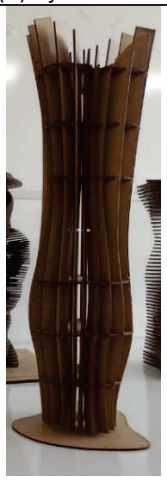
A Katılımcısı	Kule Tasarımı
Geleneksel Tasarım Yöntemi İle Üretilen Tasarım	
(a) Eskiz	(b) Maket
	
Grasshopper/ Rhino Programı Kullanılarak Üretilen Tasarım	
(c) Sunum paftası	(d) Dijital Üretim
	

A katılımcısının Geleneksel tasarım yöntemi ile elde ettiği kule tasarımına ait eskiz çalışması yaratıcılık açısından değerlendirildiğinde; doğadan ilham alınarak (özellikle termit yuvalarından) bir konsept geliştirildiği görülmektedir. Doğadan biyomimikri yaklaşımıyla fikir üretimi yaratıcı bir tutumdur. Ancak form geliştirme aşamasında henüz ilk düzeyde bir soyutlama olduğu görülmektedir. Fikirler çizimle ifade edilmiş fakat karmaşık form üretimine dönüşmemiştir. Maket çalışmasında ise temel kütle düzeni net bir biçimde ortaya konmuş ancak formun doğadan

ilhamla daha ileri soyutlanması, yaratıcı biçimsel çeşitlilik sağlanması konusunda sınırlı kalmıştır. Parametrik Karmaşıklık açısından ise parametrik bir yaklaşım ya da algoritmik bir form gelişimi burada henüz bulunmamaktadır. Daha çok doğrudan gözlem ve basit form üretimi vardır. Yani, şekil ilişkileri manuel düşünce süreciyle gelişmiştir. Katmanlı yapı ve basit modülerlik hissedilmektedir ama (birbirine bağlı değişkenlerin etkisiyle form türetme gibi) henüz yoktur. Biçim üretimi doğrudan ve deterministiktir **(Tablo 1).**

A katılımcısının Grasshopper/Rhino programı kullanarak dijital üretim ile elde ettiği kule tasarımı yaratıcılık açısından değerlendirildiğinde ise; doğadan alınan–'termit yuvaları' konseptinin parametrik bir mantığa dönüştürülmeye çalışıldığı görülmektedir. Burada yaratıcı bir sentez oluşmuş: doğal organizasyon sistemleri dijital alanda yeniden yorumlanmıştır. Sunum paftası profesyonelce hazırlanmış olup görsel anlatım dili güçlü, biçimler arasındaki görsel akış ve düzen etkileyicidir. Grasshopper aracılığıyla üretilen dijital tasarımda ise delikli strüktürde boşlukların dağılımı ve varyasyonu parametrik bir değişkenlik içermektedir. Algoritmik düşüncenin varlığı burada net bir şekilde ortaya konmaktadır **(Tablo 1).**

Tablo 2: B Katılımcısına ait Ürünler

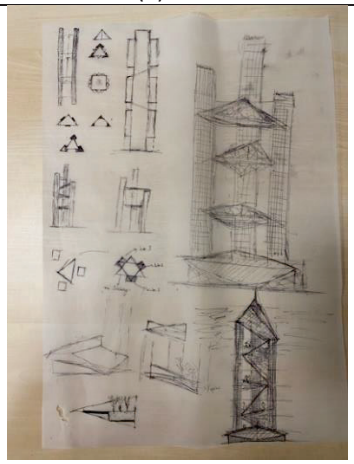
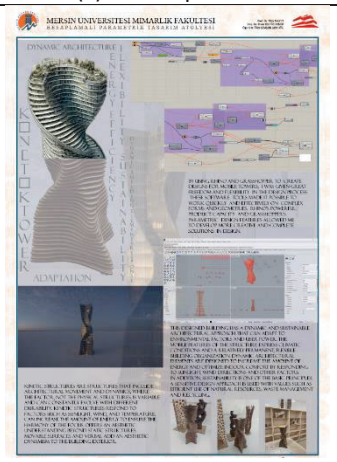
B Katılımcısı	Kule Tasarımı
Geleneksel Tasarım Yöntemi İle Üretilen Tasarım	
(a)Eskiz	(b)Maket
	
Grasshopper/ Rhino Programı Kullanılarak Üretilen Tasarım	
(c)Sunum paftası	(d)Dijital Üretim
	

B Katılımcısının geleneksel tasarım yönteminde; organik formlardan ilham alan simetrik ve dallanan bir strüktür önerilmiştir. Bu, doğadan ilham alan yaratıcı bir form arayışı olduğunu göstermektedir. Doğa metaforu başarılı bir şekilde mekânsal bir organizasyona dönüşmüştür. Eskiz estetik olarak dengeli ve detaylı bir biçim dili sunmaktadır. Parametrik karmaşıklık açısından ise belirli kurallar varmış gibi görünse de (örneğin bir merkezden dışa dallanma), bu ilişkiler algoritmik değil, sezgisel çizim yoluyla düzenlenmiştir **(Tablo 2).** Maket ise, organik ve doğal bir formu üç boyutlu olarak başarıyla yansıtmıştır. Özellikle dış kavisli taşıyıcı halkalar ve içteki doluluk-boşluk düzeni yaratıcı bir

mekânsal deneyim önermektedir. Üç boyutlu form etkileyicidir. Katmanlı yapı, formlar arasındaki geçirgenlik ve strüktürel akışkanlık estetik olarak güçlü olmakla birlikte burada da parametrik bir mantıktan çok, katmanlaşan manuel bir üretim ve sezgisel biçim organizasyonu hâkimdir **(Tablo 2).**

Katılımcının dijital yöntemle geliştirdiği öneride ise köklenme, dallanma ve yükselme gibi kavramlar parametrik bir sistemle ifade edilmiştir. Ana strüktür doğadan türetilen bir metaforla parametrik bir kurguyla yeniden biçimlendirilmiş olup organik formun parametrik bir düzene sokulması yaratıcı bir sentez sunmaktadır. Formlar arasında net bir görsel ilişki kurulmuş, yapının organik ve akıcı karakteri korunmuştur. Ritim, tekrarlayan elemanlar ve detaylarda estetik bir bütünlük yakalanmıştır. Grasshopper üzerinden yüzeylerin eğrilmesi, katmanlaşması ve yüzeylerin parametrik biçimlerle kesilmesi gibi işlemler yapılmıştır. Yani tasarım değişken parametreler tarafından yönetilmekte ve her küçük değişiklik tüm formu etkileyebilecek bir yapıya sahiptir. Dijital fabrikasyon yöntemiyle üretilen makette ise, tasarımın parametrik ilkeleri somutlaştırılmış olup dış yüzeyin akıcı, kıvrımlı formu ve iç destek sisteminin katmanlı yapısı, yaratıcılığı arttırmaktadır. Özellikle dikey yükseliş ve iç boşlukların birlikte koreografisi oldukça etkileyicidir. Fiziksel üretimde malzemenin doğallığı formun organik diline uyum sağlamış olup yapının bütünlüğü ve formlar arasındaki geçirgenlik dengeli ve estetik olarak güçlüdür **(Tablo 2).**

Tablo 3: C Katılımcısına Ait Ürünler

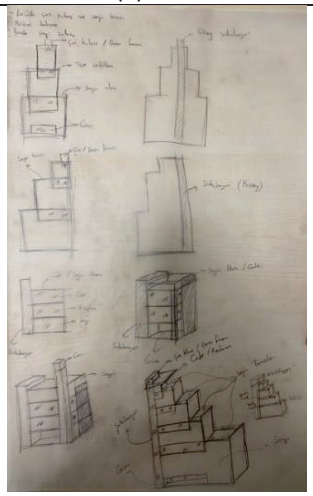
C Katılımcısı	Kule Tasarımı
Geleneksel Tasarım Yöntemi İle Üretilen Tasarım	
(a)Eskiz	(b)Maket
	
Grasshopper/ Rhino Programı Kullanılarak Üretilen Tasarım	
(c)Sunum paftası	(d)Dijital Üretim
	

C Katılımcısının Geleneksel tasarım yöntemi ile tasarladığı kule önerisine ilişkin; eskizlerde; geometrik parçaların farklı birleşim kombinasyonlarının kullanıldığı üst üste binmiş, hafif kaymış, yer yer eksilmiş kütleler üzerinde düşünüldüğü görülmektedir. Diğer iki katılımcının doğadan ilham alan tasarımlarının aksine burada, modüler parça fikri ve parçalar arası boşluk bırakılması gibi yaratıcı bir mekânsal boşluk üretimi çabası bulunmaktadır. Geleneksel doğa ilhamı yerine, soyut geometrik düşünce temel alınmış, ancak bazı formlar diğerlerine göre daha kaba ya da hacimsel ağırlıklı kalmıştır.

Eskizler, temel geometrik formların manuel varyasyonları üzerine kurulmuştur. Henüz parametrik bir sistem bulunmamaktadır; kombinasyon denemeleri tamamen sezgisel yapılmıştır. Makette farklı kütlelerin üst üste gelişigüzel konumlandırılması yerine, dengeli bir düzen kurulmuş olup boşluklu alanlar (negatif hacimler) mekânsal kaliteyi arttırmaktadır. Farklı hacimlerin düzenli aralıklarla ve bir merkez etrafında boşluk bırakılarak yükselmesi estetik bir kompozisyon sağlamıştır. Kütlelerin ilişkileri mekanik, sistematik bir varyasyon içermemektedir **(Tablo 3).**

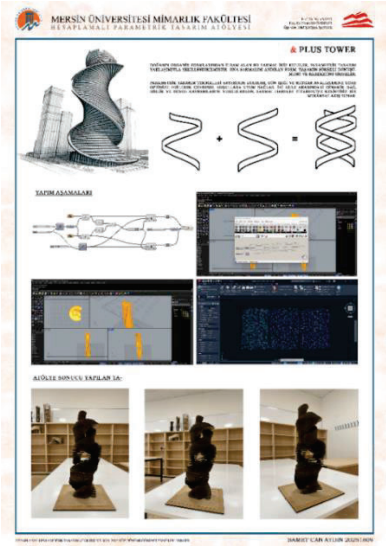
Aynı katılımcının Dijital üretimle geliştirilen tasarım önerisinde ise tamamen yeni bir yaklaşım benimsenmiştir: İnsan vücudu gibi organik bir formun parametrik katmanlaşması. Burada adaptasyon ve dinamik değişkenlik kavramları güçlü şekilde vurgulanmaktadır. Geleneksel tasarımdan farklı olarak, C katılımcısı dijital ortamda çok daha radikal bir yaratıcı sıçrama yapmış ve organik kıvrımlı yüzeyler ve yatay katmanlar arasındaki ritim, güçlü bir estetik etki yaratmıştır. Katmanların ritmik sıkışması ve gevşemesi, yapıya dinamizm kazandırmaktadır. Grasshopper üzerinde parametrik kontrol açıkça görülmektedir: yükseklik, eğrilik, katman yoğunluğu gibi parametreler üzerinde oynanarak farklı varyasyonlar türetilmiştir. Dijital üretimde katmanların birbirinden bağımsızmış gibi görünmesi ama bütün formu desteklemesi, yaratıcı bir yapısal ifade sunmaktadır. Maket sadece bir form kopyası değil, strüktürel bir mantığın fiziksel izdüşümü gibi işlemektedir Dijital fabrikasyon yöntemi ile üretilen maket ise organik bir silüet sunarken, geçişler yumuşak, katman aralıkları ritmiktir. Maket hem görsel hem dokunsal olarak güçlü bir estetik nitelik taşımaktadır. Dijital üretim, parametrik sistemin hassas bir uygulamasını yansıtmasının yanı sıra her bir katman bir parametrik algoritmanın sonucu olarak yerleşmiştir **(Tablo 3).**

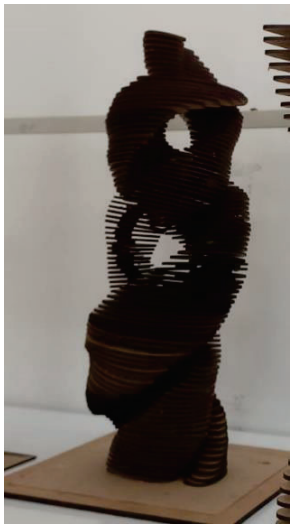
Tablo 4: D Katılımcısına ait Ürünler

D Katılımcısı	Kule Tasarımı
Geleneksel Tasarım Yöntemi İle Üretilen Tasarım	
(a)Eskiz	(b)Maket
	
Grasshopper/ Rhino Programı Kullanılarak Üretilen Tasarım	
(c)Sunum paftası	(d)Dijital Üretim

D katılımcısının Geleneksel tasarım yöntemi ile tasarladığı kule önerisi; kutu şeklinde modüllerin çeşitli kombinasyonları üzerinden çalışılmış olup, teraslı, çıkmalı ve geri çekilmiş alanlar oluşturularak katlar arası ilişki çeşitlendirilmiştir. Fikir olarak modüler büyüme ve boşluk yaratımı kavramlarına odaklanılmıştır. Bu yaklaşım sistematik ve fonksiyonel bir yaratıcılık içermekte, ama biçimsel deneyim sınırlı olmaktadır. Burada görsel bir estetik arayıştan çok, yapı elemanlarının düzenlenmesi önceliklendirilmiştir. C Katılımcısının aksine biçim üretiminde estetik akıcılık veya heykelsi bir yaklaşım bulunmamaktadır. Geleneksel yöntemle tasarlanan kule önerisinde parametrik bir sistematik bulunmamaktadır **(Tablo 4).** Maket, eskizdeki modüler büyüme ve boşluk kurgusunu iyi yansıtmakla birlikte teraslar, çıkmalar ve boşluklu alanlar kat düzeyinde farklı mekânsal deneyimler önermektedir. Ancak genel form dili daha statiktir. Mekânsal boşlukların ritmi, okunaklı ama form dili rijit ve doğrusaldır. Estetik akışkanlık bulunmamaktadır. Parametrik bir karmaşıklık yoktur **(Tablo 4).**

Tablo 4: D Katılımcısına ait Ürünler (devamı)





Katılımcının Dijital tasarım önerisinde ise çok daha radikal bir biçim değişimi yapılmıştır. Grasshopper kullanılarak organik bir dönel form geliştirilmiş olup geleneksel tasarımdaki modüler, kutu formlu sistem tamamen bırakılmış ve kıvrımlı, boşluklu, organik bir strüktüre geçilmiştir. Bu durum, bir yaratıcılık sıçraması olarak kabul edilebilir. Dijital formda akıcı bir dönüş hareketi vardır. Katmanlar arası boşluklar ve iç-dış arasındaki geçirgenlik estetik olarak güçlüdür. Özellikle hareket hissi mekânsal dinamizm katmıştır **(Tablo 4).** Makette parametrik tasarımın sonucunda oluşan organik biçim, fiziksel olarak başarılı yansıtılmıştır. Katmanlar arası değişkenlik ve eğrilik, formu sadece estetik bir obje değil, yapısal bir organizmaya dönüştürmüştür. Katmanların yumuşak dönüşü, heykelsi bir etki yaratmakla birlikte özellikle maketin üst kısmında oluşan boşluklar, yapıya hafiflik ve dramatik bir dinamizm katmaktadır Parametrik sistem, sadece şekil üretmek için değil, mekânsal geçirgenlik ve strüktürel bütünlük sağlamak için kullanılmıştır. Burada yüksek düzeyde parametrik karmaşıklık söz konusudur **(Tablo 4).**

4. Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında, A, B, C ve D katılımcılarının kule tasarımı üzerine geleneksel ve dijital tasarım süreçleri kullanarak gerçekleştirdikleri çalışmalar mimari yaratıcılık, estetik değer üretimi ve parametrik karmaşıklık düzeyleri açısından analiz edilmiştir.

Değerlendirme sonuçlarına göre:
A Katılımcısı, doğadan esinlenen bir konseptle kontrollü ve sistematik bir tasarım süreci yürütmüş, ancak hem geleneksel hem de dijital ortamda sınırlı bir yaratıcılık ve parametrik çeşitlilik sergilemiştir. Elde edilen tasarımlar net, okunaklı ve işlevseldir; ancak biçimsel deneyim açısından daha sınırlı bir yenilik sunmaktadır. Bu durum, katılımcının 2. Sınıf mimarlık lisans düzeyinde olması ile ilişkilendirilebilir.
B Katılımcısı, doğadaki organizasyon sistemlerinden ilham alarak strüktürel bir organizasyon dili geliştirmiştir. Bireysel yaratıcılık, organik form üretimi ve parametrik varyasyon üretme yeteneği, özellikle dijital ortamda önemli ölçüde artmıştır. Geleneksel formdan dijital üretime geçerken estetik kalite ve parametrik karmaşıklık açısından güçlü bir sıçrama kaydedilmiştir.

C Katılımcısı, geleneksel süreçte geometrik soyutlamalarla sınırlı kalan tasarım yaklaşımını, dijital ortamda radikal biçimde dönüştürmüş ve son derece yüksek bir organik parametrik form üretmiştir. C Katılımcısı, özellikle yaratıcılık, estetik ve parametrik karmaşıklık açısından en yüksek düzeyde başarı göstererek mimari tasarımın dijital olanaklarından maksimum ölçüde yararlanmıştır.

D Katılımcısı, geleneksel süreçte modüler ve işlev odaklı bir yapı düzeni oluşturmuşken, dijital tasarım aşamasında biçim dilini tamamen değiştirerek dinamik, kıvrımlı ve boşluklu bir parametrik strüktür üretmiştir. Bu durum, dijital

ortamın tasarımcı üzerindeki dönüştürücü etkisini açık bir biçimde ortaya koymaktadır. Yaratıcılık ve estetik kalitede dijital süreçle birlikte gözle görülür bir ilerleme sağlanmıştır.

Odak grup ile yapılan bu çalışmanın sonunda dijital üretim yöntemi ile geliştirilen tasarım süreçlerinin yenilikçi ve karmaşık formları üretme kapasitesini arttırdığı, geri bildirim süreçlerini hızlandırdığı ve tasarım kararlarını daha esnek hale getirdiği görülmektedir. Ancak, geleneksel yöntemlerin hâlâ el becerisi, malzeme farkındalığı ve mekânsal algı açısından önemli katkılar sunduğu belirlenmiştir. Genel olarak, geleneksel tasarım araçları kullanılarak gerçekleştirilen eskiz ve maket çalışmalarında katılımcıların fikir geliştirme, kavramsallaştırma ve temel kütle organizasyonu becerileri öne çıkarken, dijital araçların (özellikle Grasshopper) kullanımıyla birlikte biçimsel çeşitlilik, mekânsal geçirgenlik, organik strüktürel organizasyon ve parametrik kontrol gibi ileri düzey mimari nitelikler daha belirgin bir şekilde tasarımlara yansımıştır.

Katılımcıların dijital tasarım süreçleriyle birlikte yaratıcılıklarını daha özgürce geliştirebildikleri, estetik çeşitliliği artırabildikleri ve parametrik ilişkiler kurarak daha karmaşık yapılar üretebildikleri görülmüştür. Bu bulgular, dijital tasarım araçlarının özellikle parametrik tasarım ortamlarında öğrencilerin düşünme biçimlerini dönüştürerek daha yenilikçi ve dinamik tasarımlar üretmelerine olanak sağladığını göstermektedir.
Mimari pratik, dijital üretim tekniklerinin gelişmesi ve yaygınlaşması nedeniyle değişmektedir. Karmaşık formlar ve düzensiz geometriler bu araçlar kullanılarak kolayca üretilebilmektedir. Mimari eskiz ve maket gibi geleneksel tasarım araçlarının yanı sıra hesaplamalı tasarım ve dijital fabrikasyon üretim biçimleri, öğrencilerin yaratıcılığını farklı açılardan etkileyen tamamlayıcı yöntemlerdir. Geleneksel tasarım araçları, fikirlerin hızlı ifade edilmesine ve geliştirilmesine olanak tanırken, hesaplamalı tasarım daha kompleks ve parametrik çözümler üretmeye imkân tanımaktadır. Dijital fabrikasyon ise fiziksel prototipleme yoluyla tasarım fikirlerini gerçeğe dönüştürerek yaratıcı düşünmeye yeni bir boyut kazandırmaktadır. Bununla birlikte, geleneksel tasarım yöntemleri de malzeme farkındalığı, el becerisi ve mekânsal algının gelişimi açısından hâlâ önemli bir yere sahiptir. Gelecekteki mimarlık eğitiminde, her iki yöntemin birlikte kullanımı ile en iyi sonuçlara ulaşılabileceği önerilmektedir.

Teşekkür

Yazarlar odak grup çalışmasına katılan Mersin Üniversitesi Mimarlık Bölümü öğrencileri Alper Yılmaz, Esra Şahutoğlu, Samet Can Aydın, Emirhan Yıldız'a katkılarından dolayı teşekkürlerini sunar.

KAYNAKLAR

Bayram, A. K. Ş. (2021). *Digital fabrication shift in architecture*. Architectural Sciences and Technology, Architectural Scences, 42(May), 173-193.

Casini, M., (2021). *Construction 4.0: Advanced technology, tools and materials for the digital transformation of the construction industry*. Woodhead Publishing. 978-0128217979

Chancharoen, R. ,& Sithiwichankit, C. (2019). Digital fabrication of a 3D object using fixtureless assembly. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 635* (1), 012035. Doi:10.1088/1757-899X/635/1/012035

Corsini, L., & Moultrie, J. (2018). A review of making in the context of digital fabrication tools. *Proceedings of International Design Conference, DESIGN, 15*. 1021-1030.doi: 10.21278/idc.2018.0242.

Diaz Valdes, M. (2021). Application of parametric design and digital fabrication: The solution for the current crises and emergencies. *Nexo Revista Cientifica, 34* (05), 45-55. Doi:10.5377/nexo.v34i05.13107.

Guzik, A. (2010). Digital fabrication inspired design influence of fabrication parameters on a design process. In *Proceedings of the International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe*, May pp: 227-235, doi:10.52842/conf.ecaade.2010.227.

Hernandez, C. R. B. (2006). Thinking parametric design: introducing parametric Gaudi. *Design Studies*, *27*(3), 309-324.

Indrawan, S.E. (2017). Design for environment and form findings through digital fabrication. *DIMENSI Journal of Architecture and Built Environment, 44* (2), 171-178, doi:10.9744/dimensi.44.2.

Lee, J.S., Kwon, N., Ham, N.H., Kim, J.J., & Ahn, Y.H. (2019). BIM-Based digital fabrication process for a free-form building Project in South Korea. *Advances in Civil Engineeering*, 1-18. Doi:10.1155/2019/4163625.

Lee J, Gu N, Williams AP. 2014. Parametric Design Strategies for the Generation of Creative Designs. *International Journal of Architectural Computing* ;12(3):263-282. doi:10.1260/1478-0771.12.3.263

Leen, D. (2021). *Unitless fabrication: Measurement in digital fabrication*.

Mawas, K., Maboudi, M., & Gerke, M. (2022). Direct Co-registration of As-built and as-designed data in digital fabrication. In *42nd annual conference of the DGPF (German Society for Photogrammetry, remote Sensing and Geoinformation)* pp:14-159. Germany.

Mohite, A., & Kochneva, M. (2018). Surface Ornamentation as By-product of Digital Fabrication. In *Shapes of Logic: International Conference of Computational Design* (pp. 31-40). Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.

Ng, M.S., Bonanomi, M.M., Hall,D.M., &Hackl, J. (2020).Design for digital fabrication: An ındustry needs analysis of collaboration platforms and integrated management processes. In *Proceedings of the 37th International symposium on automation and robotics in construction, ISARC 2020:* From demonstration to practical use- to new stage of construction robot, October pp: 318-325. Doi: 10.22260/Isarc2020/0046.

Ng, M.S., Graser, K., & Hall, D.M. (2023). Digital fabrication, BIM and early contractor involvement in design in construction projects: A comparative case study. *Architectural Engineering and Design Management, 19* (1), 39-55, doi:10.1080/17452007.2021.1956417.

O'Leary, J.T., &Peak, N. (2019). Machine-o-matic: AS programing environment for prototyping digital fabrication workflows. *UIST 2019 Adjunt Publication of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, 23*, 134-136. Doi:10.1145/3332167.3356897

Orciuoli, A., & Baquero, P. (2014). Teaching strategies for Digital fabrication. *XVIII Conference of the Iberoamerican Society of Digital Graphics - SIGraDi: Design in Freedom*, 345-349. Doi:10.5151/desprosigradi2014-0069.

Oxman, N. (2010). *Material-based design computation*. MIT Press. http://hdl.handle.net/1721.1/59192

Putro, H.T., &Wirasmoyo, W. (2020). The application of digital fabrication in architecture, case study: Prototyping a scale model. *Proceedings of the EduARCHsia & Senvar 2019 International Conference (EduARCHsia 2019)*, 192, 1-7.doi:10.2991/aer.k.200214.001

Silva, D., Paio, A., & Sousa, J.P. (2017). How digital fabrication can enable new methods in the architectural practice?. *XXI Congreso Internacional de la Sociedad Iberoamericana de Gráfica Digital*, 242-248. Doi:10.5151/sigradi2017-039.

Woodbury, R. (2010). Elements of Parametric Design. Taylor and Francis, ISBN: 0-415-77986-3.

Yu R, Gero JS. An empirical basis for the use of design patterns by architects in parametric design. *International Journal of Architectural Computing*. 2016;14(3):289-302. doi:10.1177/1478077116663351

Yu, R., Gu, N., & Ostwald, M. (2013). Comparing Designers' Problem-Solving Behavior in a Parametric Design Environment and a Geometric Modeling Environment. *Buildings*, *3*(3), 621-638. https://doi.org/10.3390/buildings3030621

Vazquez, A. N.; Jabi, W. . (2017). RAF: a framework for symbiotic agencies in roboticaided fabrication. AAE Charrette 4(1) Spring 2017 ISSN: 2054-6718. https://docserver.ingentaconnect.com/deliver/connect/arched/20546718/v4n1/s6.pdf?expires=1752747907&id=0000&titleid=75008746&checksum=2B1DEF4753461FBA841DC4287525428E&host=https://www.ingentaconnect.com

Zujovic, M., Obradovic, R., Rakonjac, I., & Milosevic, J. (2022). 3D Printing Technologies in architectural design and construction: A systematic literature review. *Buildings, 12* (9), 1319. Doi:10.3390/buildings12091319

2025 MSTAS MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Hesaplamalı Dübel Tasarımı ve Biçim Bulma

Osman Gunduz[1]; Serdar Aydin[2]
[1,2]Mardin Artuklu Üniversitesi
[1]gunduzosman.arch@gmail.com; [2]serdaraydin@artuklu.edu.tr

Özet

Mimarlık ve inşaat sektöründe ahşap yapı malzemesi hem sürdürülebilirlik sağlarken hem de estetik sonuçlar ortaya çıkarmaktadır. Ahşap yapıların tasarımında bağlantı noktalarının tasarımı ve dayanımı bakımından hassaslık göstermektedir. Bu bağlantı detayları için metal malzemelerle tasarım yapmak doğallıktan uzaklaştırmaktadır. Daha sağlıklı ve ekolojik bir mekân oluşturmak için ahşap yapı malzemeleri kullanılabilmektedir. Ahşap dübeller de bu malzemelerden biridir. Fakat ahşap dübel elemanlar tasarlanırken maruz kaldıkları yüklerdeki stres dağılımları ve ortaya çıkardıkları hareketleri gereğince bilinmemektedir. Tasarlanabilecek farklı dübel formlarına ait malzeme performansının bilinmemesi bunun sebeplerinden biridir. Yapı mimarlığında ahşap tasarımların sürdürülebilirlik ve yapısal hassaslık kriterleri bakımından bağlantı detayları önemli bir rol almaktadır. Bugünkü mimarlık biliminde yapı tasarımının strüktür öğeleri sadece konstrüksiyon uygunluğu bakımından değil, bununla birlikte farklı ebatlarda üretim ve estetik bakımından yorumlanması detay tasarımını diğer bilim alanlarında da sorun haline getirmektedir. Bu bağlamda yapılan araştırmada iki adet altıgen ahşap elemanın birleştirilmesi için farklı dübel tasarımları yapılmıştır. Dübellerde oluşan stres performansları incelenerek mimari yapı tasarımına yol gösteren bilgiler vermeyi amaçlamaktadır. Rhinoceros programında bulunan Grasshopper'ın (GH) görsel kodlama dili kullanılarak parametrik modelleme ve sayısal analiz yapılmıştır. Farklı geometrik formlarda sekiz adet parametrik dübel tasarımı gerçekleştirilmiştir. Dübellerin yük altındaki davranışları GH'ye yüklenen Kiwi3D eklentisi ile simüle edilmiştir. Kiwi3D'nin, geometrik süreklilik ve sayısal doğruluk kriterlerine uyumlu, İzogeometrik Analiz (IGA) yöntemiyle yük altındaki davranışlar analiz edilmiştir. Daha sonra stres dağılımları incelenmiştir ve ahşap elemana en elverişli bağlantı noktası konumu ve formu ortaya çıkarılmıştır. Bu bağlamda dijital fabrikasyonla detay çalışması yapılıp karşılaştırmalı analizler ile tasarım çeşitliliği birleştirilerek üretim ve uygulama döngüsünün ilişkili hale getirilebileceği gösterilmektedir. Böylelikle yapılan bu çalışma, ahşap örtü, yapı ve tefrişleri kapsayan farklı ölçeklerde mimarlık ve mühendislik arasındaki tasarım ve analiz süreçlerinin birlikte ilerletilebildiği üretimlerin mümkün hale getirilerek minimum kaynak ve malzemenin harcanmasına fakat maksimum performansa dayalı verimliliği artırmaya dönük çalışmalara katkı sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Ahşap Dübeller, Parametrik Modelleme, İzogeometrik Analiz (IGA), Stres Analizi, Ahşap Konstrüksiyon.*

MSTAS 2025 MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Computational Dowel Design and Form Finding

Osman Gunduz[1]; Serdar Aydin[2]
[1,2]Mardin Artuklu University
[1]gunduzosman.arch@gmail.com; [2]serdaraydin@artuklu.edu.tr

Abstract

In the architecture, engineering and construction (AEC) industry, timber provides both sustainability and aesthetic results. The design of timber structures often relies on the design and strength of connection points. Designing with metal materials for these connections takes away from naturalness. Wooden dowels are materials that can be used to create a full-fledged healthier and ecological space out of timber. However, while designing wooden dowel elements, the stress distributions in the loads they are exposed to and the movements they produce are not properly known. One of the reasons for this is that the material performance of different dowel forms is unknown. Connection details play an important role in terms of sustainability and structural sensitivity criteria of timber designs in building architecture. In today's architectural technology, the structural elements of building design are interpreted not only in terms of construction suitability, but also in terms of production in different sizes and aesthetics, making detail design a problem in other fields of science. In this context, different dowel designs were made for joining two hexagonal wooden elements. It aims to provide information guiding architectural structure design by examining the stress performances of the dowels. Parametric modelling and numerical analysis were performed using the visual coding language of Grasshopper (GH) in the Rhinoceros program. Eight parametric dowel designs with different geometric forms were realized. The behaviour of the dowels under load was simulated with the Kiwi3D plug-in installed in GH. The behaviour under load was analysed with the Isogeometric Analysis (IGA) method of Kiwi3D, which complies with the geometric continuity and numerical accuracy criteria. Stress distributions were then analysed and the most favourable connection point location and form for the timber element were revealed. In this context, it is shown that the production and application cycle can be related by combining comparative analysis and design diversity by performing detail work with digital fabrication. In this way, this study contributes to the efforts to increase efficiency based on minimum resource and material expenditure but maximum performance by making possible productions in which design and analysis processes between architecture and engineering can be carried out together at different scales covering wooden covers, structures and furnishings.

Keywords: *Wooden Dowels, Parametric Modelling, Isogeometric Analysis (IGA), Stress Analysis, Wood Construction.*

1. Giriş

Malzeme bilgisinin ve inşa yöntemlerinin süratle geliştiği çağdaş mimarlık biliminde, tasarım süreçleri boyunca mimari temsillerin ve mühendislik hesaplarının eş zamanlı ele alınmasını mecburi hale getirmektedir. Bu bağlamda, sadeliği ve estetiği temsil eden modern örnekler içeren ahşap mimarlık, analogdan dijitale dönüşüm sürecini yaşamaya devam eden üretim süreçlerini birlikte ele almanın önemini ortaya koymaktadır (Menges, 2012). Ahşap yapı tasarımı yapılırken birleşim noktalarının uygun bir form ve konumda tasarlanması yapıların hem estetik hem de dayanıklılık özelliklerini belirlemektedir.

Ahşap yapı malzemesinin strüktür oluşturan birleşme şekilleri, taşıma kapasitesini doğrudan etkilemekte; birleşim noktalarındaki bağlantı detayları, yapısal bütünlük açısından önemli bir rol oynamaktadır. Fakat dübel gibi bağlantıların tasarımının form, konum ve miktar bilgilerinin belirlenmesi işi, karmaşık bir problem olmasının yanında dijital araçlar yardımıyla sayısal analizler yapılarak tekrardan yorumlanabilmektedir (Dietsch, 2017). Bu yaklaşımla yalnızca mühendislik disiplini bakımından değil, mimarlık disiplini ve tasarım aşamasına dahil edilebilmektedir. Mimarlık bilimi yalnızca mekânın tasarlanmasını sağlamakla kalmayıp, bununla birlikte tasarladığı mekânın üretimini, kurulumunu ve sürdürülebilir olmasını da muhakeme eden bir bilim dalıdır (Oxman, 2006). Bu araştırmanın başlangıcı, ahşap yapılarda bir araya gelen bağlantı noktalarındaki dübel formunun yapısal verimlilik üzerindeki etkisini dijital araçlarla sayısal analiz yöntemleri kullanılarak incelemek ve bunu tasarım aşamasıyla birleştirerek üretim sürecini kolaylaştırmaktır.

Ahşap yapılarda kullanımı sürekli devam eden dübeller, gelişen teknolojiyle beraber üretim yöntemleri de değişerek yalnızca klasik formda değil, parametrik yöntemlerle çeşitli geometrik şekillerde hem üretim hem de sayısal analiz performansları yapılarak optimizasyonlar elde edilebilmektedir (Kolarevic, 2004). Bu bağlamda araştırma da incelenen sekiz farklı dübel tasarımı, sadece birleşim detayı unsuru değil, bununla birlikte strüktür tutumunu da şekillendiren, mimari anlatım dilini zenginleştiren ve üretim aşamasını yönlendiren öğeler şeklinde yorumlanmıştır.

Çalışmada ele alınan farklı geometrik formlara sahip dübeller parametrik tasarımla üretilerek dijital simülasyon materyalleriyle analiz edilmiştir. Böylelikle çeşitli bağlantı şekillerindeki stres gerilimlerinin sergilediği davranışı sayısal değerlerle test edilmiştir. Stres analizini gerçekleştirmek için seçilen İzogeometrik Analiz (IGA) yöntemi, karmaşık geometriye sahip yüzeylerde hem geometrik süreklilik hem de sayısal doğruluk sağlayıp analiz hassasiyeti sergileyerek etkili bir yöntem olarak kullanılmaktadır (Nguyen vd., 2015). *Rhinoceros* programında bulunan *Grasshopper* (GH) parametrik modelleme aracında gerçekleştirilen dübeller, *Kiwi3D* (str.ucture, n.d.) eklentisiyle sayısal analiz simülasyonları yapılmıştır. Bu bağlamda mimarlık ve mühendislik disiplinlerini dijital zeminde birleştiren bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

Bir sonraki bölümde ahşap elemanların tasarımını ve performans analizlerini kapsayan alanyazın ve ilgili çalışmalar hakkında bilgi verilmektedir. Üçüncü bölümde kullanılan yöntemin aşamaları, gerçekleştirilen performans simülasyonları ve bulgular görsellerle desteklenerek detaylı bir şekilde sunulmaktadır. Değerlendirme bölümünde analiz sonucunda ortaya çıkan farklı dübel biçimlerinin karşılaştırması yapılarak kullanım alanları hakkında bilgi verilirken çalışmanın sınırlılıkları ve geliştirilebileceği kısımları tartışılmaktadır. Son kısımda ise çalışmanın sonuçları özetlenmektedir.

2. Literatür Taraması

Ahşap yapı malzemesinin dijital ortamda parametrik tasarlanması, modellenmesi, sayısal simülasyon araçlarla yapısal performans analizleri, elde edilen modellerin dijital fabrikasyonla üretilmesi ve uygulaması geçmişten günümüze devam eden bir yaklaşımdır. Bu bağlamda ele alınan çalışma bu perspektifteki çalışmalara katkı sunmaktadır. Aşağıda kronolojik bir şekilde yapılandırılmış literatürdeki çalışmalar ile ilgili bilgiler yer almaktadır.

Tang (2006) dijital araçlardan *Maya* ve *MEL Script* yazılımlarını kullanarak ahşap dübellerin birleşim detaylarını dijital fabrikasyon ile üreterek ahşap yapıların strüktürü için birleşim fikri gerçekleştirmiştir. Ahşap montajların klasik yöntemlerini analiz ederek *Maya* ve *MEL Script* yazılımları ile klasik ahşap birleşim detaylarını parametrik modellemeyle dijital ortama aktarmıştır. Sayısal modellemeyle üretim aşamasını hızlandırarak bir prototip ortaya koymuştur. “Point Joint” (nokta birleşim) ve “Edge Joint” (kenar birleşim) yöntemiyle yeni bir montaj çalışması sunmuştur.

Sass (2007) küçük bir barınak üzerinden ahşap yapı malzemesinin bağlantı noktalarını kendisine gömülü şeklinde vidasız üretimi dijital ortamda parametrik tasarlayarak tasarım ve üretim sürecinin birleşimini incelemektedir. Dijital ortamda 3B modelleri oluşturarak ahşap elemanların birleşim detaylarını tanımlamıştır ve CNC makinesine aktarılacak 2B kesim planlarını oluşturmuştur. Elde edilen içe gömülü ahşap malzemelerin uygulamasını yaparak bağlantı detaylarının formu, hassasiyeti ve gösterdiği toleransı uygulama esnasında gözlemlemiştir. Böylelikle dijital fabrikasyon ile üretim ve uygulama arasında bir bağlantı olduğunu ortaya koyarak ahşap elemanların vidasız tasarlanıp uygulanabilirliğini göstermektedir.

Kanasaki ve Tanaka (2013) ahşap bağlantı detaylarında *tugite* ve *shiguchi* tekniklerini kullanarak Japon geleneksel mimarideki yapıştırıcı ve metal kullanılmama durumunu dijital araçlarla üreterek geleneksel yöntemlerin ne kadar esnek bağlantı detaylarını çözümlemeyi ele almaktadır. Dijital ortamda parametrik tasarlanan eleman prototiplerini lego boyutlarında üreterek hem mimari alanda hem de oyuncak tasarımı alanda kullanılabilirliğinin ölçütünü kontrol ederek bunun uygulanabilirliğini ortaya koymaktadır.

Nguyen vd. (2019) karmaşık geometriye sahip ahşap-ahşap elemanların birleştirilerek tasarlanan yapıların dayanıklılığını daha hızlı ve kolay analiz etmeyi ele almaktadır. CAD ve özel Python kodu kullanarak sayısal sonlu eleman (FE) modelinin otomatik analiz edilmesini sağlayarak otomatikleştirilmiş yapısal analiz aracı amaçlanmaktadır. Analiz aracını üretilen küçük ölçekli prototiplerle test ederek dijital ortamdaki sonlu elemanlar modeliyle karşılaştırmalar yapılmıştır. Elde edilen sonuçların yüksek oranda uyumlu olduğunu, bağlantı noktalarının hesaba katılmasıyla dijital üretimin ve uygulamanın doğru tahmin edildiğini ve modelin farklı tiplerdeki yapılara da adapte olabileceği sonucunu ortaya koymaktadır.

Iuorio vd. (2024) kabuk, barınak ve kemer gibi ahşap malzemeyle oluşturulan mekânsal sistemlerin tasarımını dijital ortamda gerçekleştirerek uygulamada montajlama ve sökülebilme durumlarını ele almaktadır. “ECHO Shell” (hafif kabuk sistem), “ECHO Arch” (kemer yapısı) ve “Set in Transition" (geçmeli bağlantı) metotlarını kullanarak üç vaka çalışması gerçekleştirmiştir. Ahşap öğelerin ve bağlantı detaylarının hızlı üretimi, robotik kol ile montajlanacak elemanların yerine konulması ve sökülmesi vaka çalışmaları ile gerçekleştirilmiştir. Dijital tasarım ve robotik kol ile yapılan bu çalışma sürdürülebilir ahşap malzemesini az kullanarak elde edilen parçaların yeniden kullanılmasını, montajlama ve sökülme sistemlerinin geliştirmesini ortaya koymaktadır.

Ahşap elemanlar üzerine yapılan çalışmalarda parametrik tasarım ve yapısal incelemeler bulunmaktadır ancak modelleme ve yapısal simülasyon çalışmalarını eş zamanlı ilerleten çalışmalar kısıtlı sayıdadır. Aynı zamanda sonlu elemanlar analizine (FEA) göre daha hızlı ve daha hassas sonuçlar veren IGA yöntemi ve buna olanak tanıyan Kiwi3D çalışması da ahşap çalışmaları üzerinde görülmemektedir. Tam da bu noktada bu çalışma literatürde görülen bu eksikliği tamamlamak, dijitalle üretilen mimarlık tasarımlarını mühendislikte kullanılan analiz yöntemleriyle birleştirip farklı geometrik şekle sahip dübellerin stres gerilimlerini karşılaştırmalı olarak incelemektedir. Aynı zamanda dijital fabrikasyon çalışmalarına ve Kiwi3D eklentisinin IGA yöntemine de katkı sunarak literatürdeki alanlarına katkı sunmaktadır. Sonuç olarak bu çalışma farklı geometrik formlara sahip ahşap dübellerin yapısal güvenilirliğini etraflıca analiz ederek somut bir yöntem ortaya koymaktadır.

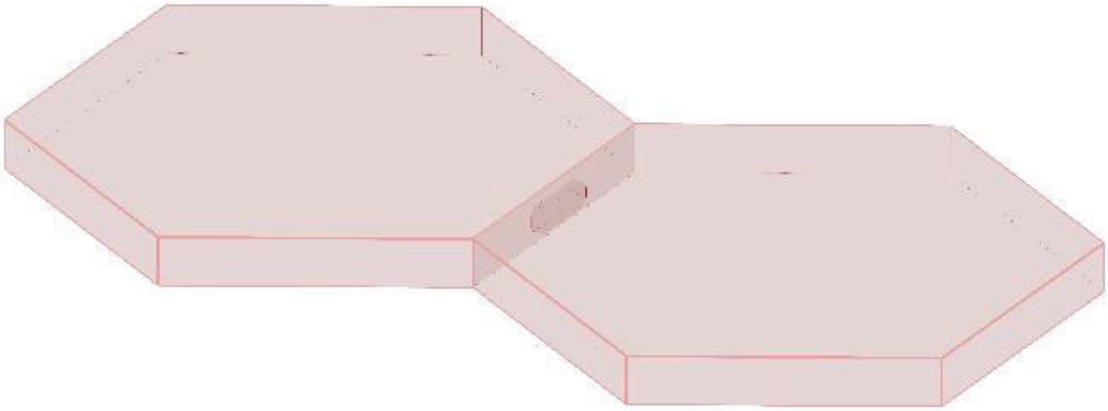
3. Yöntem

Bu çalışmada altıgen forma sahip iki ahşap elemanın bağlantısı için tasarlanan parametrik dübellerin stres dağılımları dijital ortamda tasarlanarak ölü yük altındaki yapısal performansları dijital analiz yöntemi ve görsel kodlama ile incelenerek yorumlanmıştır. Çalışmanın asıl amacı bağlantı noktasındaki dübeller parametrik tasarlanıp formu, sayısı, birleşim noktası ve kalınlığı ele alınarak ölü yük altındaki stres dağılımlarını inceleyip, tasarım ve uygulama için en elverişli olan bağlantıların çeşitli tasarımlarını bulmaktır. Çalışmanın yöntemi dört aşamadan oluşmaktadır; dijital tasarım, parametrik modelleme, sayısal analiz ve renk kontürleri ile diyagramlarla açıklanmaktadır.

3.1. Dijital Tasarım

Çalışma Rhinoceros 3D modelleme yazılımı ve içinde bulunan GH parametrik tasarım ve görsel kodlama aracı ile yapılmıştır. Program parametrik tasarıma elverişli ve form esnekliği için serbest alan sağladığından dolayı seçilmiştir. Bu zeminde oluşturulan altıgen ahşap elemanlar sabit parametrelerle, bağlantı noktalarındaki dübellerin sayısı, biçimi

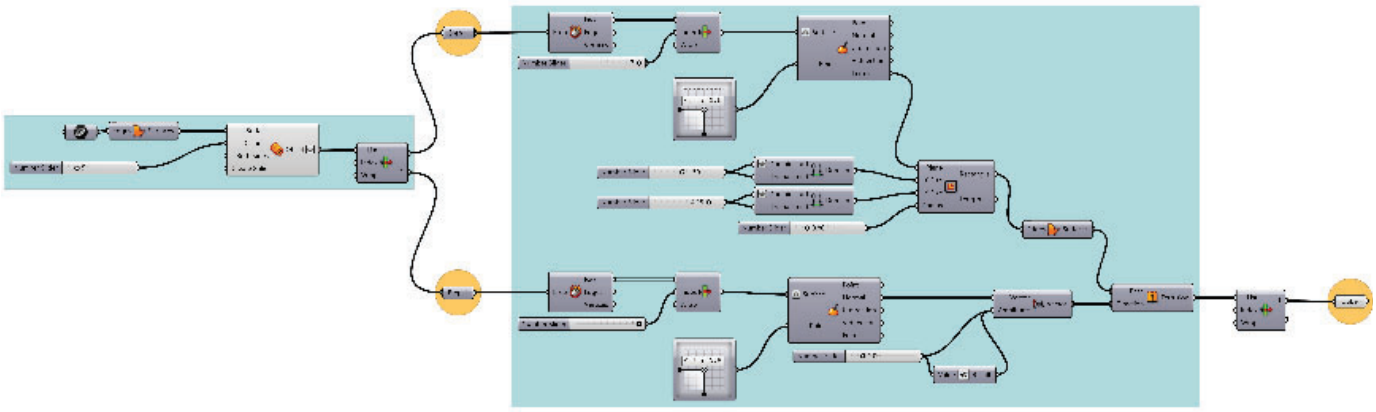
ve yerleştirilme konumları farklı parametrelerle ele alınarak tasarlanmıştır (**Şekil 1**). Dijital ortam çalışmanın kontrol edilebilmesi ve sonuçların hızlı üretilmesine olanak tanıyarak üretimlerin karşılaştırmasını sağlamıştır.



Şekil 1: Rhinoceros ve Grasshopper ile dijital ortamda oluşturan altıgen formlu eleman ve dübel çalışması

3.2. Parametrik Modelleme

Çalışmada bütün süreç parametrik olarak ilerlemiştir. GH ortamında oluşturan parametrelerle altıgen formlu ahşap elemanların ölçüleri ile bağlantı noktasındaki dübellerin formu, ölçüsü, sayısı ve yerleştirilme konumları kaydırıcı parametrelerle farklı varyasyonların incelenmesine olanak tanıyarak sistematik bir çalışma ortaya konmuştur. Altıgen formlu elemanların parametreleri (kenar uzunlukları 300 cm ve kalınlıkları 5 cm) çalışmanın başından sonuna kadar sabit tutulmuştur ancak tasarlanan dübellerin kalınlık, geometrik form ve dübel sayısı parametreleri değiştirilerek elde edilmiştir (**Şekil 2**). Parametrik modelleme ile çalışmadaki tasarım esnekliği artırılarak elde edilen çeşitli dübellerin yapısal parametreleri aynı koşullarda stres gerilimlerinin yapılmasına imkân tanımıştır. Böylelikle çalışmanın asıl amacına uyularak çeşitli dübel tasarımları karşılaştırmalı olarak yorumlanmıştır.



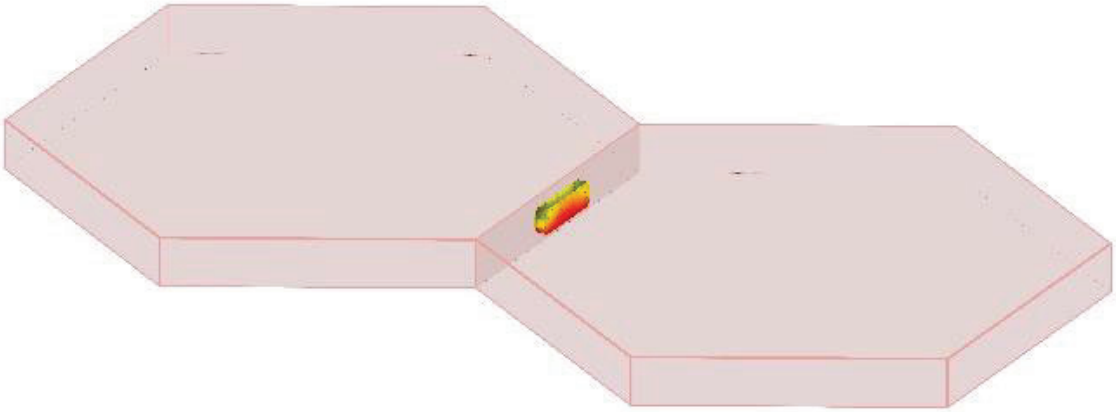
Şekil 2: Grasshopper ile oluşturulan parametrik model şeması.

3.3. Sayısal Analiz (IGA)

Model çalışmasında sekiz adet farklı dübel tasarımı hazırlanmıştır. Dübellerin geometrik formları (üçgen, silindir, kare vb.), adetleri (1, 3 ve 5), yerleştirilen konumları ve yerleştirilme biçimleri (ahşap elemana sabit olanlar ve dışarıdan ek bir parça olanlar) değişkenlik göstermektedir ancak dübel kalınlıkları marangozluk işçiliğinde kullanılan *Medium Density Fiberboard* (MDF) standart ölçü (5 cm, 6 cm, 8 cm, 12 cm, 18 cm ve 22 cm) parametrelerine göre her dübel için 6 adet analiz gerçekleştirilmiştir. Böylelikle çok sayıda analiz senaryoları elde edilmiştir.

GH'ye yüklenen Kiwi3D eklentisi ile stres gerilimleri incelenmiştir. Eklentinin alt yapısı IGA yönteminden oluşmaktadır. Bu yöntem karmaşık geometrilere sahip elemanların yapısal analizini titizlikle yapmaya imkân tanımaktadır. (Längst vd., 2017). GH ile eklentili çalışan ve parametrik modelle beraber analiz sonucunu hızlı verdiğinden simülasyon analizi için bu yöntem tercih edilmiştir. Dübellerin stres analizleri ölü yük altında 10 Kn'lik yük uygulanmıştır ve bu parametre

bütün dübellerde sabit tutulmuştur. Dübeller üzerinde belirlenen yük ve destek yönü hassasiyetle uygulandıktan sonra yüzeylerdeki iyileştirmeler için 5x5 ızagara sistemi uygulanmıştır (**Şekil 3**). Sonuç ürünü olarak analizlerin renk kontürleri ile oluşturulan stres gerilimleri detaylıca okunabilmektedir. Elde edilen analizlerle mimarlık tasarımını mühendislik sayısal analizleri yardımıyla hem yapısal hem de biçimsel hassasiyetle üretim gerçekleştirmesini sağlamaktadır.

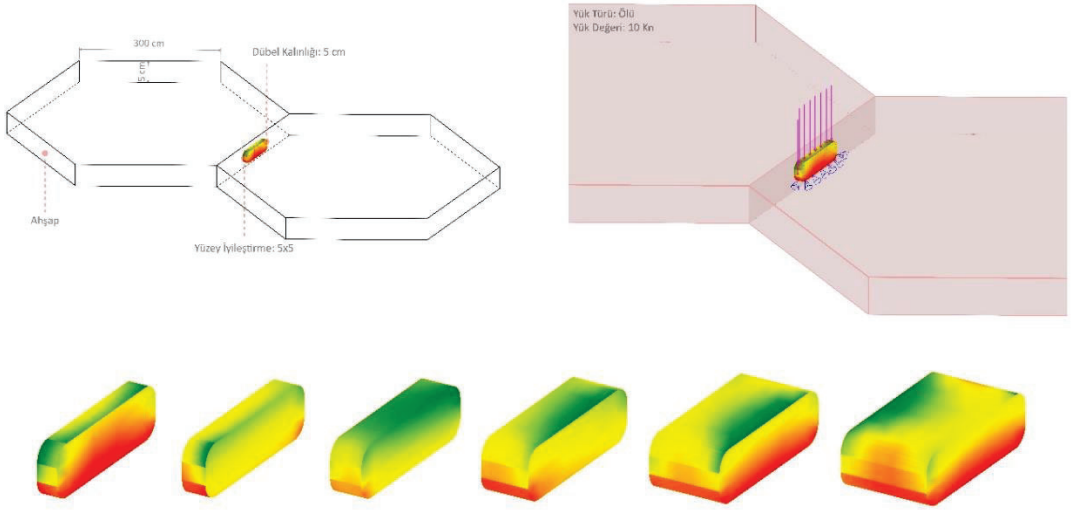


Şekil 3: Parametrik model ile üretilen sayısal analiz

3.4. Sonuçların Grafik Yorumu: Renk Kontür Diyagramı

Parametrik modelleme ve sayısal analiz sonucunda tasarlanan dübeller, GH'nin ve Kiwi3D'nin sağladığı renk kontür grafikleriyle yük gerilimlerinin analiz diyagramı elde edilmiştir. Dijital ortamda parametrik tasarımla oluşturulan renk kontür analizleri ahşap bağlantı detaylarında tasarlanması istenen dübellerin formlarını ve yapısal değerlerini karşılaştırmalı olarak değerlendirmeye olanak tanımıştır. Böylelikle mimari tasarım sürecinde mühendislik verileri hem biçimsel hem de yapısal olarak kullanmayı mümkün kılmıştır. Aşağıda *dubel_01* üzerinden gerçekleştirilen analizin diyagramları anlatılmıştır.

Ahşap dübellerin tasarımı ve belirlenen kalınlık parametrelerinde yük altında kaldıkları stres gerilimi ve yüke cevap verme kapasitesi direkt etki ettiği analizler sonucunda görülmüştür. Tek dübel olan ve kare formuna sahip köşeleri pahlanmış *dubel_01* analiz sonucunda 8 santimetre kalınlığında analiz edince altında kaldığı yük stresine en uygun cevabı verdiği görülmüştür (**Şekil 4**). Dübel kalınlığının fazla olması daha iyi sonuç vermediği ve yük koşuluna göre belirli bir kalınlıkta sabit kalması gerektiği anlaşılmıştır. Dübel kalınlığının artması fazladan yüke maruz kalacağı ve deformenin hızlanacağına sebebiyet verdiği görülmüştür.



Şekil 4: Deney düzeneğini oluşturan ahşap altıgen parçalar ile iki parçayı birbirine bağlayan ahşap dübelin konumu ve analiz sonuçları (kırmızı stresin en yoğun olduğu, yeşil ise en az olduğu kısımları göstermektedir).

4. Değerlendirme

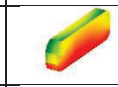
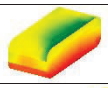
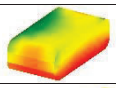
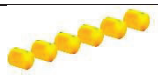
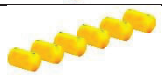
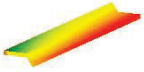
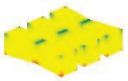
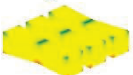
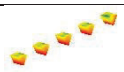
6 tane silindirik forma sahip olan *dubel_02* tasarımında ise kalınlık parametresi değişmesine rağmen yük altında kaldıkları strese benzer sonuçlar verdiği analiz sonucunda elde edilmiştir. Silindirik formda olması yüklenen yükü daha homojen bir şekilde dağıttığını bu sebepten daha kararlı olduğu görülmüştür. Silindirik dübellerin sayıca fazla olması yüklenen yükü daha tutarlı bir şekilde dağıttığından bağlantı yerlerindeki yük stres gerilimlerinin azaldığı görülmüştür. Dübelin birden fazla ve silindirik bir yapıya sahip olması yük taşıma kapasitesine her kalınlık koşulunda uygun cevap vermesi bu parametre tasarımının önemli olduğunu ortaya çıkarmıştır.

Analiz parametresi santimetre iken verilen analiz sonuçlarını metre cinsine çevirerek *dubel_03* üzerinden gerçekleştirilmiştir. Dışarıdan bir parça olarak eklenen dübel her kalınlık koşulda stresin yoğun olduğu gözlemlenmiştir. 8 santimetre kalınlığında ise yüklenen yüke daha uygun cevap vermiştir. Analiz parametresi tekrar santimetreye çevrilerek aynı dübel (*dubel_04*) üzerinden analiz tekrar gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda dübel kalınlığı 12, 18 ve 22 santimetrede yüklenen yüke daha uygun cevap verdiği görülmüştür.

3 parçadan oluşan, altıgen forma birleştirilen kenarın uzunluğu karşı kenar uzunluğundan kısa olan *dubel_05* ve dışarıdan bir parça olarak eklenen *dubel_06* üzerinden gerçekleştirilen analizlerde dübel kalınlığının artması yük altında kaldıkları strese aynı sonuçları verdiği görülmüştür. Dışarıdan ek parça olarak eklenen dübellerde kalınlık parametresi değiştiğinde dübel tasarımına ve yerleştirilme şekline göre değişken sonuçlar elde edilmiştir ve stres gerilimi bakımından belirleyici parametrelerden olduğu görülmüştür.

Üçgen formunda 6 adetli dübel tasarımında kenarları pahlanmış *dubel_07* ve kenarları sivri bırakılmış *dubel_08* analizinde farklı sonuçlar görülmüştür. Köşeleri pahlı olan dübelde kalınlık parametresi değiştirildiğinde yüklenen stres gerilimleri artmıştır ve bu dübellerin uygun koşul göstermediğinden çok çabuk deforme olabileceği görülmüştür. Köşeleri sivri olan dübelde yüklenen yüke karşılık olarak düzensiz bir dağılım göstermiştir. Yük dağılımı görülen bölgelerde deformasyonun arttığı gözlemlenmiştir. Bu sonuçlara göre üçgen forma sahip dübel tasarımında yük miktarı fazla olan ahşap yapılarda kullanılmasının olumsuz sonuçlar doğuracağı bu nedenle kullanılmaması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır (**Tablo 1**).

Tablo 1: Dübellerin karşılaştırmalı görsel analiz tablosu (kırmızı stresin en yoğun olduğu, yeşil ise en az olduğu kısımları göstermektedir).

	Dübel Kalınlığı					
ID	*5 cm*	*6 cm*	*8 cm*	*12 cm*	*18 cm*	*22 cm*
dubel_01						
dubel_02						
dubel_03						
dubel_04						
dubel_05						
dubel_06						
dubel_07						
dubel_08						

Genel olarak kare ve silindirik şeklinde ve çoklu dübel tasarımlarında yüklenen yük stresine daha kararlı sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Üçgen formlu dübellerin yük stresine karşı daha karasız olduğu ve bağlantı noktalarında deforme durumunun arttığı, dışarıdan ek parça olarak eklenen dübellerin ise şekline, kalınlığına ve yerleştirilen konuma göre değişkenlik gösterdiği görülmüştür. Dübellerin yük gerilimlerine daha doğru cevap vermesi için bu parametrelerin uygun koşulda tasarlanması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

5. Sonuçlar

Bu çalışma, parametrik model ve İzogeometrik Analiz (IGA) yöntemiyle ahşap yapı elemanlarında kullanılan ahşap dübelleri inceleyerek detaylı yaklaşım ortaya koymaktadır. Bağlantı noktalarında tasarlanan ahşap dübellerin ahşap yapılara daha kararlı cevap vermesi için tasarımda kullanılan parametrelerin en uygun hale getirilmesi ve bu noktalardaki stres gerilimlerinin dikkatlice yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Gelecekte bu konu ile ilgili yapılacak çalışmalarda çeşitli yükleme koşullarının analiz edilmesi daha etraflıca incelemelerin yapılması gerektiği önerilmektedir. Farklı ahşap malzemelerden yapılacak olan çalışmalar ahşap dübellerin bağlantıları üzerindeki stres gerilimlerini anlamak için önemlidir. Aynı zamanda dübellerin deformasyona uğrama koşullarının neler olabileceğini araştırmak ahşap dübellerin uzun vadeli dayanmasına katkı sunacaktır.

Sonuç olarak, çeşitli dübel tasarımları ve farklı parametre koşulları ahşap dübel elemanları üzerinden stres dağılımındaki etkiler etraflıca incelenmiştir. Böylelikle ahşap bağlantı detaylarına daha kararlı bir bakış açısı sunulmuştur. Dübel tasarımında yerleşim şekli, kalınlığı, adeti ve formu dikkate alındığında daha kararlı sonuçlar elde edilebileceği ve böylelikle ahşap elemanların dayanımını arttırabileceği ortaya konmuştur. Strüktürün daha dayanıklı, uzun vadeli yaşaması ve çevre dostu olması için ahşap dübellerin geliştirilmesi için parametrik tasarım ve mühendislik analizleri kullanılarak çalışmaların ve araştırmaların çoğaltılması gerektiği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

Iuorio, O., Wilcock, S., & Korkis, E. (2024). Design for Deconstruction Through Digital Fabrication of Thin Spatial Systems. Içinde V. Ungureanu, L. Bragança, C. Baniotopoulos, & K. M. Abdalla (Ed.), *4th International Conference "Coordinating Engineering for Sustainability and Resilience" & Midterm Conference of CircularB "Implementation of Circular Economy in the Built Environment"* (C. 489, pp. 262-272). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-57800-7_24

Jockwer R, Dietsch P (2017) Brittle failure of connections loaded perpendicular to grain. Cost Action FP1402, *International Conference on Connections in Timber Engineering – From Research to Standards. Graz University of Technology*, Austria, pp. 166-182. https://doi.org/10.3929/ETHZ-B-000228388

Kanasaki, K., & Tanaka, H. (2013). Traditional Wood Joint System in Digital Fabrication. In Stouffs, Rudi ve Sariyildiz, Sevil (Eds.), *Computation and Performance - Volume 1: Digital Fabrication (pp. 711–718). Proceedings of the 31st International Conference.* Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe (eCAADe). https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2013.1.711

Kolarevic, B. (Ed.). (2004). *Architecture in the Digital Age* (0 bs). Taylor & Francis. https://doi.org/10.4324/9780203634561

Längst, P., Michalski, A., Bauer, A. M., & Lienhard, J. (2017). The potentials of isogeometric analysis methods in integrated design processes. In A. Bögle & M. Grohmann (Eds.), *Proceedings of the IASS Annual Symposium 2017: Interfaces - architecture.engineering.science* (25–28 September 2017, Hamburg, Germany). International Association for Shell and Spatial Structures (IASS).

Menges, A. (2012). Material Computation: Higher Integration in Morphogenetic Design. *Architectural Design*, *82*(2), 14-21. John Wiley & Sons Ltd. https://doi.org/10.1002/ad.1374

Nguyen, A. C., Vestartas, P., & Weinand, Y. (2019). Design framework for the structural analysis of free-form timber plate structures using wood-wood connections. *Automation in Construction*, *107*, 102948. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102948

Nguyen, V. P., Anitescu, C., Bordas, S. P. A., & Rabczuk, T. (2015). Isogeometric analysis: An overview and computer implementation aspects. *Mathematics and Computers in Simulation*, *117*, 89-116. https://doi.org/10.1016/j.matcom.2015.05.008

Oxman, R. (2006). Theory and design in the first digital age. *Design Studies*, *27*(3), 229-265. https://doi.org/10.1016/j.destud.2005.11.002

Sass, L. (2007). Synthesis of design production with integrated digital fabrication. *Automation in Construction*, *16*(3), 298-310. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2006.06.002

str.ucture (n.d.). *Kiwi3D (Version Beta 0.5.0)* [Yazılım]. https://www.kiwi3d.com/ (Erişim tarihi: 28 Nisan 2025).

Tang, C.-S. (2006). Smart Structure: Designs with Rapid Prototyping. In Van Leeuwen, J.P. and H.J.P. Timmermans (Eds.), *Progress in Design & Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning, Eindhoven: Eindhoven University of Technology, ISBN-10: 90-386-1756-9, ISBN-13: 978-90-386-1756-5, p. 415-429*. https://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/Show?ddss2006-pb-415

2025 MSTAS

OTURUM 6

BİM VE DİJİTAL İKİZ

2025 MSTAS MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

BIM Integration of Material Passports in the Construction Domain

Yusra Ekin[1]; Meryem Birgül Çolakoğlu[2]
[1]Samsun University and Istanbul Technical University; [2]Istanbul Technical University
[1]yusra.ekin@samsun.edu.tr; [2]colakoglumer@itu.edu.tr

Abstract

Traditional two-dimensional documentation methods widely used in the Architecture, Engineering, and Construction (AEC) industry frequently result in fragmented and incomplete material data, causing inefficiencies such as redundant material inventories, increased waste, and inaccurate assessments of environmental impacts, lifespan, cost-effectiveness, and aesthetics. To overcome these limitations, improved data integration and systematic resource management practices are essential.
This study explores integrating Material Passports (MPs) into Building Information Modeling (BIM) as an innovative solution for enhanced management of material data. Material Passports serve as comprehensive digital records detailing material properties, quantities, and environmental impacts, thereby promoting recycling and supporting circular economy principles. BIM's advanced three-dimensional modeling capabilities dynamically and parametrically link these data. However, the absence of standardized and reliable material databases in current BIM tools limits the precision of environmental and lifecycle analyses.

The research specifically targets digitizing static material data from Turkish ceramic manufacturers, including Graniser and Kütahya Seramik, integrating this data into BIM through automated workflows utilizing Excel, Dynamo, Dynamo Player, and the DiRootsOne plugin. This method effectively transforms static material information, such as Environmental Product Declarations (EPDs) and Life Cycle Assessment (LCA) values, into dynamic BIM parameters. These dynamic parameters enable accurate lifecycle assessments, precise material takeoff calculations, and robust evaluations of environmental impacts, significantly enhancing informed decision-making and efficient material management.

Results from the proposed integration approach demonstrate substantial improvements in data accuracy, reduced redundancy in material inventories, and strengthened support for circular economy initiatives. Automated workflows enhance material data handling efficiency, facilitate advanced analytical capabilities, and foster interdisciplinary collaboration. Additionally, the study shows the benefits of structured material libraries and the adoption of classification systems such as Uniclass, ensuring consistency and reliability. Recommendations include standardized Excel-based data submissions from material suppliers, centralized online databases, and advanced tracking technologies such as barcode systems and digital twins, promising greater transparency, sustainability, and innovation in construction practices.

Keywords: *Building Information Modeling (BIM), Material Passports, Sustainability, Lifecycle Assessment, Circular Economy, Material Data Integration, Digital Transformation in Construction.*

2025 MSTAS MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

İnşaat Alanında Malzeme Pasaportlarının BIM Entegrasyonu

Yusra Ekin[1]; Meryem Birgül Çolakoğlu[2]
[1]Samsun Üniversitesi and İstanbul Teknik Üniversitesi; [2]İstanbul Teknik Üniversitesi
[1]yusra.ekin@samsun.edu.tr; [2]colakoglumer@itu.edu.tr

Özet

Mimarlık, Mühendislik ve İnşaat (AEC) sektöründe yaygın olarak kullanılan geleneksel iki boyutlu dokümantasyon yöntemleri, genellikle parçalı ve eksik malzeme verilerine yol açmakta; bu durum ise gereksiz malzeme dökümantasyonu, artan atık miktarı ve çevresel etkiler, ömür, maliyet etkinliği ve estetik açısından hatalı değerlendirmelere neden olmaktadır. Bu sınırlamaların üstesinden gelebilmek için daha iyi veri entegrasyonu ve sistematik kaynak yönetimi uygulamaları büyük önem taşımaktadır.
Bu çalışma, malzeme verilerinin daha etkin yönetimi için yenilikçi bir çözüm olarak Malzeme Pasaportlarının (MPs) Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) ile entegrasyonunu incelemektedir. Malzeme Pasaportları; malzemelerin özelliklerini, miktarlarını ve çevresel etkilerini ayrıntılı biçimde belgeleyen dijital kayıtlardır ve geri dönüşümü teşvik ederek döngüsel ekonomi ilkelerini destekler. BIM'in gelişmiş üç boyutlu modelleme yetenekleri, bu malzeme verilerini dinamik ve parametrik olarak ilişkilendirir. Ancak mevcut BIM araçlarında standartlaşmış ve güvenilir malzeme veri tabanlarının eksikliği, çevresel ve yaşam döngüsü analizlerinin doğruluğunu sınırlamaktadır.

Bu araştırma, Graniser ve Kütahya Seramik gibi Türk seramik üreticilerinden elde edilen statik malzeme verilerinin dijitalleştirilmesini ve Excel, Dynamo, Dynamo Player ve DiRootsOne eklentisi gibi araçlar kullanılarak BIM ortamına otomatik iş akışlarıyla entegrasyonunu hedeflemektedir. Bu yöntem, Çevresel Ürün Beyanları (EPD) ve Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA) gibi bilgileri dinamik BIM parametrelerine dönüştürerek yaşam döngüsü analizlerinin, doğru malzeme metraj hesaplamalarının ve çevresel etki değerlendirmelerinin yapılmasını mümkün kılmakta; böylece bilinçli karar alma süreçlerini ve etkili malzeme yönetimini desteklemektedir.

Önerilen entegrasyon yaklaşımı, veri doğruluğunda önemli iyileşmeler, fazla malzeme envanter üretiminde azalma ve döngüsel ekonomi uygulamalarına güçlü destek sağlamaktadır. Otomatikleştirilmiş iş akışları, malzeme verisi yönetimini kolaylaştırmakta, ileri düzey analiz olanaklarını artırmakta ve disiplinler arası iş birliğini güçlendirmektedir. Ayrıca, yapılandırılmış malzeme kütüphaneleri ve Uniclass gibi sınıflandırma sistemlerinin kullanımı sayesinde tutarlılık ve güvenilirlik sağlanmaktadır. Çalışmada ayrıca, malzeme tedarikçilerinin standart Excel formatında veri sunması, merkezi çevrimiçi veri tabanlarının oluşturulması ve barkod sistemleri ile dijital ikizler gibi gelişmiş izleme teknolojilerinin entegrasyonu önerilmekte; bu sayede inşaat sektöründe daha şeffaf, sürdürülebilir ve yenilikçi uygulamaların önü açılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Yapı Bilgi Modellemesi (BIM), Malzeme Pasaportları, Sürdürülebilirlik, Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi, Döngüsel Ekonomi, Malzeme Verisi Entegrasyonu, İnşaatta Dijital Dönüşüm.*

1. Introduction

The construction sector is one of the largest consumers of global resources, accounting for over 50% of raw material and energy usage, while causing significantly to waste generation and greenhouse gas emissions (Jayasinghe & Waldmann, 2020). This unsustainable pattern shows the need to track and manage materials throughout their lifecycle to enable circular economy practices.

One key challenge is the absence of structured data exchange across the construction value chain. Material manufacturers typically share information through static documents like PDFs, limiting interoperability. Additionally, traditional Computer-Aided Design (CAD) systems in the Architecture, Engineering, and Construction (AEC) industry increase inefficiencies by failing to dynamically update data, resulting in redundant inventories and disconnected workflows. Lifecycle information, such as environmental assessments, is also often stored separately, creating fragmented datasets. To address these issues, dynamic and digital tools such as Material Passports (MPs) integrated into Building Information Modeling (BIM) offer a viable solution.

1.1. Material Passports Overview

Material Passports (MPs) are detailed digital records of building materials, documenting their qualitative and quantitative attributes, recyclability, and environmental impact (Honic et al., 2019b). These passports include precise information on material types, quantities, locations, and their potential for reuse, thereby enhancing sustainability and aiding in circular economy practices (Heisel & Rau-Oberhuber, 2020; Munaro & Tavares, 2021) (**Figure 1**). MPs are essential for future recycling, waste reduction, and collaborative planning in construction (Heinrich and Lang, 2019; Honic et al.,2019a; Honic et al.,2019b; van Capelleveen et al., 2023). According to van Capelleveen et al. (2023), passports focus on product lifecycle management with key features such as digital accessibility, verified data accuracy, component-level detail, and sustainability insights. These features facilitate better transparency, environmental performance, and cost management in construction projects.

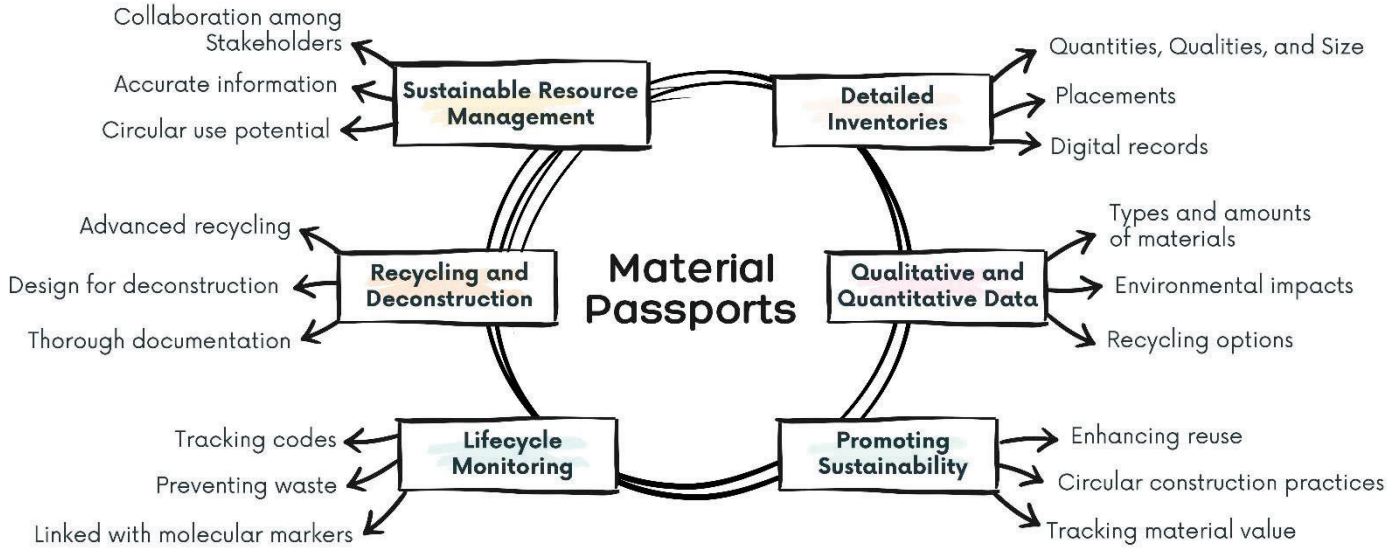


Figure 1: Material Passport definitions (Derived by the author according to Bokkinga, 2018; Chahine, 2021; Debacker et al.,2016; Heisel & Rau-Oberhuber, 2020; Honic et al.,2019b; Lützkendorf, 2019; McDonough & Braungart, 2003; Munaro & Tavares, 2021; Rudolphi, 2018)

Material Passports require systematic management of detailed product data for material reuse and recycling. Although methods and guidelines for their creation still need further standardization, initiatives like the European project BAMB have structured MPs by categorizing material data across building composition levels (Kedir et al., 2021):

- **System**: Complex assemblies (e.g., wall systems with mechanical, electrical, and plumbing components).
- **Product**: Individual manufactured items with unique IDs (e.g., wall panels, floor tiles).
- **Component**: Individual parts making up products (e.g., wood, stone).
- **Ingredients**: Chemical substances forming components or products.

Key ontology aspects include organizing material data by topology, geometry, lifecycle, and property evolution to track changes and promote circularity (Kuttantharappel Soman et al., 2022). Essential information documented in MPs covers physical, chemical, and biological properties, alongside logistical data, recyclability assessments, and health and safety documentation such as MSDS and TDS (Liu & Ramakrishna, 2021; Munaro & Tavares, 2021). Effective MP creation involves defining material types, assessing their recyclability, evaluating health and safety, and maintaining thorough documentation throughout the material lifecycle (Liu & Ramakrishna, 2021).

Steps for Effective MP Creation

Steps for MP creation include (Liu and Ramakrishna, 2021):

- Creating detailed BOMs.
- Categorizing materials by type (biological or technical).
- Collecting chemical and safety data.
- Evaluating historical use and future recyclability.
- Documenting the lifespan and recycling potential.

Stakeholders and Lifecycle Management

MPs involve various stakeholders grouped into chains (van Capelleveen et al., 2023):

- **Owners' Chain**: Managing ownership and maintenance.
- **Governance Chain**: Ensuring data accuracy and regulatory compliance.
- **Financial Chain**: Handling valuations and financial assessments.
- **Production Chain**: Documenting production to recycling processes.

Stakeholders face opportunities like improved valuation and reduced costs, alongside challenges like standardization and maintaining data quality.

Existing Platforms

Platforms like Madaster and BAMB have significantly advanced MPs in the construction industry.

Madaster

Madaster is an innovative platform launched in 2017, acting as a registry for material passports. It organizes data into categories (Druijff, 2019; Heisel and Rau-Oberhuber, 2020):

- **Building**: Location and quantity of materials.
- **Building Process**: Renovation stages.
- **Circularity**: Potential for reuse and recycling.
- **Financial**: Economic evaluations of materials (Druijff, 2019).

Madaster integrates closely with BIM, enhancing material management through standards like NLRS and EMCS, providing data accuracy and interoperability. Some challenges include the strict IFC requirements and issues with data completeness affecting circularity assessments.

Buildings as Material Banks (BAMB)

BAMB promotes circular economy in construction through reversible building designs and MPs, emphasizing collaboration among stakeholders. Key goals include reducing waste and improving resource use through comprehensive data collection and management.

BAMB has developed detailed MPs covering structured and unstructured data, standardizing and validating data formats and ensuring secure, user-friendly access. However, challenges exist regarding user interface complexity, manual data input, and integration with BIM systems, necessitating improvements in automated data management and standardization (Luscuere et al., 2019).

1.2. Building Information Modeling (BIM)

Building Information Modeling (BIM) digitally represents buildings across their entire lifecycle, integrating semantic, functional, and geometric data (Borrmann et al., 2018). BIM emerged from initial concepts in the 1970s and widely recognized following Autodesk's 2003 white paper. Unlike traditional CAD, BIM dynamically updates all information

across views, enhancing planning, design, construction, and operations (Nawari & Kuenstle, 2015). BIM models include rich data enabling structural analysis, clash detection, and quantity estimations (Volk et al., 2014). Advanced tools within BIM allow specialized tasks like energy simulation, scheduling, safety management, and progress tracking (Becerik-Gerber et al., 2012).

Popular BIM platforms include Revit for detailed modeling and analysis, ArchiCAD for architectural BIM processes, Tekla Structures for steel and concrete detailing, Bentley Architecture for collaborative workflows, and Navisworks for integrated review and clash detection (Nawari and Kuenstle, 2015).

BIM Levels and Dimensions

BIM maturity is structured into four levels (Sacks et al., 2018):

- **Level 0**: Basic 2D CAD documentation.
- **Level 1**: Combination of 2D documentation and isolated 3D modeling with limited collaboration.
- **Level 2**: Linked 3D models facilitating collaborative workflows.
- **Level 3**: Fully integrated, collaborative "Open BIM" systems, enabling real-time collaboration.

BIM also includes multiple dimensions beyond 3D (Gomes et al., 2022):

- **3D**: Spatial models with geometric and material properties.
- **4D**: Incorporates project timelines.
- **5D**: Cost estimation and budgeting.
- **6D**: Sustainability analyses like energy use and carbon emissions.
- **7D**: Lifecycle management, supporting maintenance.
- **8D**: Safety management and risk assessment.

BIM Objects and Parameters

In BIM platforms like Revit, building components are structured into families, types, and instances, allowing detailed parameter-driven modeling (Nawari and Kuenstle, 2015). Parameters control attributes such as geometry, materials, and performance characteristics. Essential parameter types include system, project-specific, global, family-based, and shared parameters, with shared parameters providing flexibility across multiple projects. Shared parameters include unique identifiers, visibility options, and data types, categorized into type parameters (consistent across all family instances) and instance parameters (specific to individual instances) (BIM-MEPAUS, 2019).

BIM Data Management and Interoperability

BIM enhances project collaboration internally through shared databases and externally through data exchange formats such as IFC, DXF/DWG, PDF, and XML (Nawari and Kuenstle, 2015). IFC, an open standard since 1996, provides interoperability across platforms by exchanging detailed metadata supporting the entire lifecycle management of buildings, from construction to facility management (Abanda et al., 2013) (**Figure 2**).

COBie (Construction Operations Building Information Exchange) complements IFC by facilitating data transfer for facility management, integrating equipment data and maintenance details into management systems, significantly reducing long-term operational costs (Sabbagh, 2019).

Classification Systems in BIM

Construction Information Classification Systems (CICS), such as Uniclass, OmniClass, MasterFormat, and UniFormat, standardize data terminology and structure across the construction lifecycle, improving cost estimation, data sharing, and project management (Afsari & Eastman, 2016; Parece et al., 2024).

These systems, aligned with international standards (ISO 12006-2), organize elements into standardized categories, enhancing information management, collaboration, and efficiency within BIM environments. Each classification system uniquely categorizes materials, products, and assemblies, enabling flexible and accurate project data (Ekholm and Häggström, 2011; Parece et al., 2024).

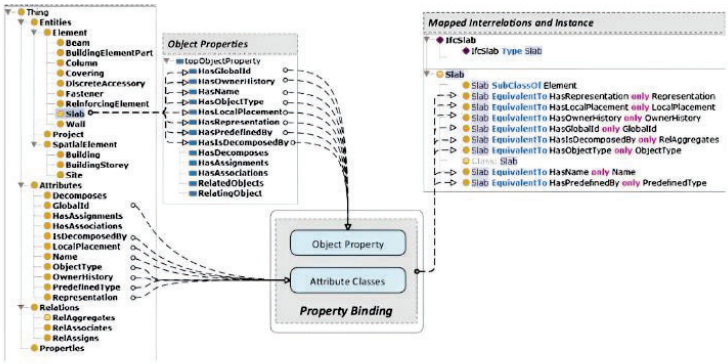


Fig. 5. A *Slab* class and its interrelationships with *Attribute* classes through object properties.

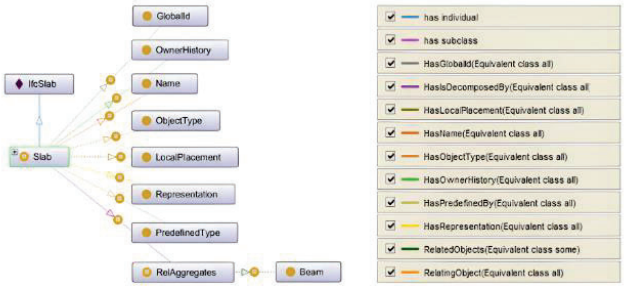


Figure 2: IFC data classification and its connections with related attribute categories (Y.-C. Lee, Eastman and Solihin, 2016)

2. Case Study

2.1. Ceramic Materials

Material Selection

Ceramic materials from Turkish companies, such as Graniser and Kütahya Seramik, were selected for integration into BIM workflows, using resources like Technical Data Sheets, catalogs, and Environmental Product Declarations (EPD) certificates. This selection aimed to incorporate a wide range of ceramic types to demonstrate practical usage scenarios and real-world applicability within BIM systems.

Material Evaluation

Ceramic materials were assessed based on TSE EN 14411 standards, focusing on essential properties like water absorption, wear resistance, and slipperiness. These properties are crucial for determining the suitability and performance of ceramic tiles in various application areas:

- **Ceramic - Wall Ceramic Tile:** Ceramic tiles designed specifically for wall applications typically feature high water absorption rates exceeding 10%, making them suitable for interior walls. Due to their high absorption, these tiles are not appropriate for flooring or outdoor applications. They often emphasize aesthetic properties, including various textures and finishes that contribute to the visual appeal of interior spaces, especially in dry environments.
- **Ceramic - Floor Ceramic Tile:** Ceramic floor tiles typically have moderate water absorption values between 0.5% and 3%, making them ideal for both residential and commercial interior flooring. These tiles are selected for their ability to withstand foot traffic, requiring suitable surface abrasion resistance to prevent premature wear. Floor tiles used in wet areas, such as kitchens and bathrooms, are chosen for their slip-resistant properties (R9-R11 ratings) to enhance user safety, minimize accidents, and maintain aesthetics and functionality over time.
- **Ceramic - Glazed Porcelain Tile:** Glazed porcelain tiles are characterized by extremely low water absorption rates (less than 0.5%), making them highly resistant to moisture penetration. This property makes glazed porcelain tiles particularly suitable for exterior surfaces exposed to harsh environmental conditions, including freeze-melting cycles. Their durability and high abrasion resistance allow these tiles to be effectively used for both indoor and outdoor flooring, walls, and façade claddings. Additionally, their chemical resistance ensures easy maintenance and suitability for wet and frequently cleaned environments.

Evaluating these characteristics ensures that the chosen materials meet specific building requirements and regulatory standards.

2.2. Case Study Building

Building Model

A hypothetical two-floor office building was designed to demonstrate the practical integration and comprehensive analysis of ceramic materials within a BIM environment. This building served as a versatile platform for exploring various applications, such as exterior cladding, internal flooring, and wall coverings, thus providing a realistic representation of how ceramic materials can be effectively utilized within a structured BIM process (**Figure 3**).

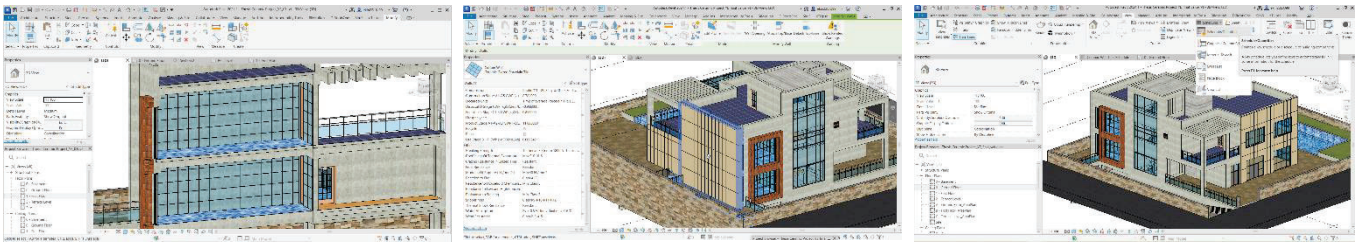


Figure 3: Conceptual office building example incorporating ceramic materials

Tools Utilized

A comprehensive set of specialized software tools and plugins was utilized to facilitate the seamless integration of ceramic materials into BIM workflows. Excel was employed extensively for organizing initial material data and performing detailed calculations. Dynamo and Dynamo Player automated repetitive and complex tasks, including importing and mapping material data from Excel to Revit, significantly simplifying the workflow. Autodesk Revit served as the central platform for creating, managing, and visualizing ceramic materials, incorporating them into detailed building models. DiRootsOne extension was utilized specifically for efficient parameter management, facilitating the systematic creation and updating of material parameters within the BIM environment. Navisworks enhanced project coordination, allowing detailed model reviews, clash detection, and improved interdisciplinary collaboration. Additionally, specialized LCA plugins were integrated directly into Revit, enabling comprehensive Life Cycle Assessment analyses to assess environmental impacts accurately, thereby supporting sustainable decision-making throughout the project lifecycle.

2.3. Digitizing Material Data

Data Management

Material data obtained from suppliers were digitized and systematically organized into structured Excel sheets, aligning precisely with the BIM material database structure. This process involved categorizing detailed material information into distinct sections, including identity (manufacturer details, cost, URL), physical properties (dimensions, water absorption), thermal characteristics (thermal conductivity, thermal expansion coefficients), and lifecycle assessment (LCA) details (Global Warming Potential, reuse, recycling options). By organizing the data into clear, defined sections, the accuracy and efficiency of transferring data from Excel to the BIM environment were significantly improved, facilitating effective management and seamless integration within the BIM platform.

BIM Integration Methodology

The BIM integration methodology implemented in this study comprised a structured, step-by-step approach to ensure smooth and efficient data handling (**Figure 4**):

- **Initial Collection and Digitization:** Material data from PDF documents and EPD certificates provided by Turkish ceramic companies were digitized into structured Excel files, creating a strong and standardized database ready for integration.
- **Automation with Dynamo:** Dynamo scripts were developed and utilized to automate the creation and assignment of materials in the Revit environment. This automation drastically reduced manual input efforts, minimized errors, and enhanced consistency in the handling of complex data sets.
- **Parameter Definition and Assignment:** Material parameters were systematically defined using the DiRootsOne plugin, ensuring data consistency and interoperability across various BIM components. This involved detailed categorization, export, editing in Excel, and re-importation back into Revit, making material parameters accurately reflective of real-world properties and enhancing their practical applicability.

- **Custom BIM Libraries:** A custom, standardized Revit library specific to Turkish ceramic materials was established. This library was designed to be easily accessible, ensuring future reusability, standardization, and consistent application across multiple projects. The library also facilitated collaborative workflows and efficient data management across teams.

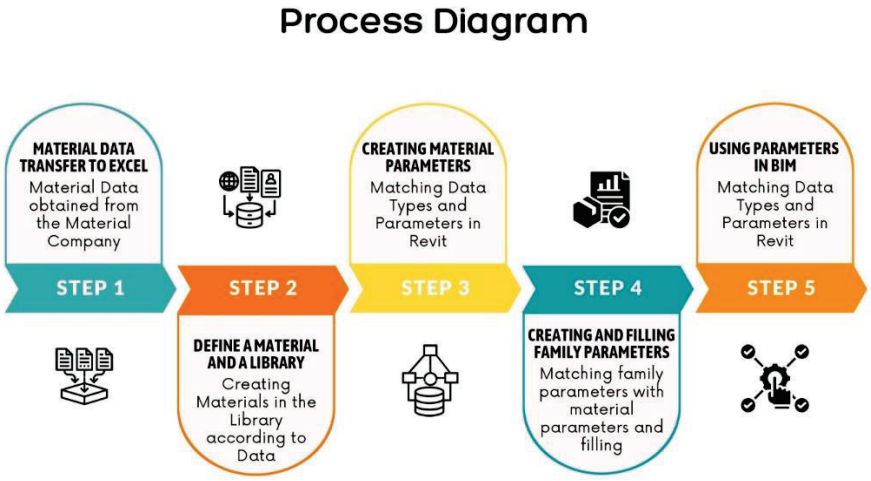


Figure 4: Process stages for integrating material data into BIM

This structured methodology not only simplified the data integration process but also significantly enhanced the efficiency, consistency, and accuracy of material management within BIM. This approach ultimately supported informed decision-making, ensuring improved environmental performance and project outcomes.

3. Results and Discussion

The integration of Material Passports with BIM demonstrated systematic management of ceramic material properties, providing significant improvements in data handling, material tracking, and sustainability analyses. Key results included automated material takeoff, efficient visual filtering, and structured lifecycle assessments (LCA). By using Dynamo and Excel, material data was easily imported and standardized, enhancing accuracy and consistency. The creation of dynamic material libraries and utilization of classification systems such as Uniclass further simplified material management and decision-making processes.

This study highlights the systematic integration of material properties into BIM, offering critical benefits:

- **Material Takeoff and Scheduling:** Automation provided accurate and consistent quantity calculations.
- **Visual Filtering:** Effective categorization and visualization of materials based on their properties.
- **Information Management:** Following standards enabled systematic tracking, facilitating efficient project management.
- **Life Cycle Assessment (LCA):** Precise environmental impact calculations supported informed sustainability decisions.
- **Advanced Analyses:** Accurate material data enhanced structural and energy performance analyses.

Current literature shows platforms like BAMB and Madaster support circularity but face adoption barriers due to complexity and costs. BIM-based Material Passports offer integration into construction processes, yet existing studies primarily address limited tasks without fully embracing all BIM dimensions (Atta et al., 2021; Parece et al., 2024).

This research shows creating accessible, user-friendly systems with standardized manufacturer data. Recommendations include suppliers providing standardized Excel sheets for seamless BIM integration, establishing centralized online databases with Dynamo scripts, and developing continually updated material libraries in BIM. Introducing digital twins and assigning barcode numbers could enhance real-time lifecycle tracking and management. Overall, the study proposes a structured, scalable approach that significantly enhances efficiency, sustainability, and innovation within the construction industry.

4. Conclusions and Recommendations

This research addresses key industry challenges such as high resource consumption, environmental impacts, and inefficient data handling by integrating Material Passports into BIM workflows. Through digitizing and parameterizing

ceramic material data from Turkish manufacturers, the study demonstrated automated processes reducing errors and improving data consistency.

The integration of BIM and Material Passports bridges static data limitations, creating dynamic, accessible, and interconnected systems. Material data facilitated enhanced interdisciplinary collaboration, lifecycle management, and sustainability analyses through integration with LCA tools. Classification standards like Uniclass and TSE EN 14411 ensured reliability, while tools such as Navisworks, Dynamo, and DirootsOne offered future expansion opportunities. Future research should expand material inclusion, explore cloud-based collaboration platforms, and develop adaptable BIM tools. Embracing technologies like Blockchain, IoT, GIS, AI, and digital twins will further enhance transparency, traceability, and efficiency, driving the construction sector towards sustainable and innovative practices (Liu and Ramakrishna, 2021; Heinrich and Lang, 2019; Mêda et al., 2024).

Acknowledgement
This study is derived from a part of the master's thesis titled *"Creating Material Passports Library within Building Information Modeling"* conducted under the supervision of Prof.Dr.Meryem Birgül Çolakoğlu in the Architectural Design Computing Master's Program at Istanbul Technical University.

REFERENCES

Abanda, F. H., Tah, J. H. and Keivani, R. (2013). Trends in built environment semantic web applications: where are we today? *Expert Systems with Applications, 40* (14), 5563-5577. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.04.027

Afsari, K. and Eastman, C. M. (2016). A comparison of construction classification systems used for classifying building product model. *The 52nd ASC Annual International Conference Proceedings.* Atlanta, Georgia.

Atta, I., Bakhoum, E. S., & Marzouk, M. M. (2021). Digitizing material passport for sustainable construction projects using BIM. *Journal of Building Engineering*, *43*, 103233. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103233

Becerik-Gerber, B., Jazizadeh, F., Li, N. and Calis, G. (2012). Application areas and data requirements for BIM-enabled facilities management. *Journal of Construction Engineering and Management, 138* (3), 431-442. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000433

BIM-MEPAUS. (2019). *Shared Parameters Guideline*. Retrieved from https://www.bimmepaus.com.au/wp-content/uploads/2021/05/03.-BMA-Shared-Parameters-Guideline-2019-03.pdf

Bokkinga, D. (2018). *The influence of a material passport on the value of real estate within the circular built environment* [Master's thesis, Eindhoven University of Technology].

Borrmann, A., König, M., Koch, C. and Beetz, J. (2018). *Building Information Modeling Technology Foundations and Industry Practice*. Springer International Publishing.

Chahine, J. (2021). *Investigating responsibility arrangements for project delivery methods to retain optimal re-use value* [Master's thesis, Delft University of Technology].

Debacker, W., Manshoven, S. and Denis, F. (2016). *D1 Synthesis of the State-of-the-Art: Key Barriers and Opportunities for Materials Passports and Reversible Building Design in the Current System*. Retrieved from https://www.bamb2020.eu/wp-content/uploads/2016/03/D1_Synthesis-report-on-State-of-theart_20161129_FINAL.pdf

Druijff, B. (2019). *BIM-based material passport in Madaster during the operational and maintenance phase of a building* (Thesis). University of Twente.

Ekholm, A. and Häggström, L. (2011). Building classification for BIM–Reconsidering the framework. *The CIB W78-W102 2011: International Conference.*

Gomes, A. M., Azevedo, G., Sampaio, A. Z. and Lite, A. S. (2022). BIM in structural project: interoperability analyses and data management. *Applied Sciences, 12* (17), 8814. https://doi.org/10.3390/app12178814

Heinrich, M. and Lang, W. (2019). Materials Passports—best practice innovative solutions for a transition to a Circular Economy in the built environment. *Technische Universität München, Association with BAMB: Fakultät für ArchitekturArcisstr, München, Germany*. https://doi.org/10.3390/app12178814

Heisel, F. and Rau-Oberhuber, S. (2020). Calculation and evaluation of circularity indicators for the built environment using the case studies of UMAR and Madaster. *Journal of Cleaner Production, 243*. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118482

Honic, M., Kovacic, I. and Rechberger, H. (2019a). BIM-based Material Passport (MP) as an optimization tool for increasing the recyclability of buildings. *Applied Mechanics and Materials, 887*, 327-334. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.887.327

Honic, M., Kovacic, I. and Rechberger, H. (2019b). Concept for a BIM-based Material Passport for buildings. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 225*. https://doi.org/10.1088/1755-1315/225/1/012073

Jayasinghe, L. B. and Waldmann, D. (2020). Development of a BIM-based web tool as a material and component bank for a sustainable construction industry. *Sustainability, 12* (5). https://doi.org/10.3390/su12051766

Kedir, F., Bucher, D. F. and Hall, D. M. (2021). A proposed material passport ontology to enable circularity for industrialized construction. *The EC3 Conference 2021.*

Kuttantharappel Soman, R., Kedir, F. N. and Hall, D. (2022). Towards circular cities: directions for a material passport ontology. *The Proceedings of the 2022 European Conference on Computing in Construction.*

Lee, Y.-C., Eastman, C. M. and Solihin, W. (2016). An ontology-based approach for developing data exchange requirements and model views of building information modeling. *Advanced Engineering Informatics, 30* (3), 354-367. https://doi.org/10.1016/j.aei.2016.04.008

Liu, L. and Ramakrishna, S. (2021). *An Introduction to Circular Economy*. Springer.

Luscuere, L., Zanatta, R., Mulhall, D., Boström, J. and Elfström, L. (2019). *D7-Operational-Materials-Passports*. Retrieved from https://www.bamb2020.eu/wp-content/uploads/2019/02/D7-Operational-materials-passports.pdf

Lützkendorf, T. P. (2019). Product data and building assessment – flow of information. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 225*. https://doi.org/10.1088/1755-1315/225/1/012038

Mêda, P., Hjelseth, E., Calvetti, D., & Sousa, H. (2024). Exploring the significance and priority of digital product passports implementation in building renovation projects targeting circular economy. *Smart and Sustainable Built Environment*. https://doi.org/10.1108/SASBE-05-2024-0193

McDonough, W. and Braungart, M. (2003). Towards a sustaining architecture for the 21st century: the promise of cradle-to-cradle design. *Industry and Environment, 26* (2), 13-16.

Munaro, M. R. and Tavares, S. F. (2021). Materials passport's review: challenges and opportunities toward a circular economy building sector. *Built Environment Project and Asset Management, 11* (4), 767-782. https://doi.org/10.1108/bepam-02-2020-0027

Nawari, N. O. and Kuenstle, M. (2015). *Building Information Modeling: Framework for Structural Design*. CRC Press.

Parece, S., Resende, R. and Rato, V. (2024). A BIM-based tool for embodied carbon assessment using a Construction Classification System. *Developments in the Built Environment, 19*. https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100467

Rudolphi, J. (2018). *Blockchain for a circular economy: Explorative research towards the possibilities for blockchain technology to enhance the implementation of material passports* [Master's thesis, Eindhoven University of Technology Eindhoven], The Netherlands.

Sabbagh, M. (2019). BIM and COBie for Facility Management. *Yapı Bilgi Modelleme, 1* (1), 10-20.

Sacks, R., Eastman, C., Lee, G. and Teicholz, P. (2018). *BIM Handbook: A Guide to Building İnformation Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers*: John Wiley and Sons.

Volk, R., Stengel, J. & Schultmann, F. (2014). Building Information Modeling (BIM) for existing buildings—literature review and future needs. *Automation in Construction, 38*, 109-127. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.023

2025 MSTAS MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Mimarlık Eğitiminde Yapı Bilgi Modelleme: Kritik Başarı Faktörlerinin Belirlenmesi

Handan Aş Çemrek[1] ; Ümit Işıkdağ[2]
[1,2]Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi;
[1]20242109002@ogr.msgsu.edu.tr; [2]umit.isikdag@msgsu.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, Mimarlık lisans düzeyinde Yapı Bilgi Modelleme (BIM) eğitiminin etkinliğini artırmaya yönelik bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Araştırmanın temel odağı, BIM'in mimarlık eğitiminde nasıl konumlandırıldığı ve bu yöntemin değiştirdiği süreçler göz önüne alındığında öğrencilere kazandırılması gereken bilgi ve becerilerin tanımlanması olmuştur. Bu bağlamda, Delphi yöntemi kullanılarak lisans seviyesinde BIM eğitimine dair kritik başarı faktörleri belirlenmiş, bu kapsamda uzmanların görüşleri detaylı bir şekilde temsil edilmiştir. Araştırmanın ilk aşamasında, BIM destekli Mimarlık eğitim programlarının gereksinimleri literatür taramasıyla belirlenmiş ve Delphi yöntemi ile uzman görüşlerine dayalı bir faktör listesi oluşturulmuştur. Delphi yöntemi sonucunda elde edilen veriler ışığında, BIM destekli eğitim programlarının geliştirilmesi için kritik faktörler ve uygulama önerileri ortaya konmuştur. Araştırmanın nihai hedefi, BIM uygulaması için gerekli becerilerin mimarlık eğitimi programlarına etkili şekilde entegrasyonuna katkı sağlamaktır. Bu doğrultuda yürütülen literatür analizi, BIM entegrasyonunun yalnızca teknik değil, pedagojik ve yönetsel boyutları da içeren çok katmanlı bir süreç olduğunu göstermiştir. Eğitimde uygulamalı öğrenme, disiplinler arası işbirliği, öğrenci merkezli stüdyo ortamları ve dijital pedagojik yaklaşımlar BIM'in başarısında belirleyici unsurlar öne çıkmaktadır. Araştırmanın özgün yönlerinden biri, BIM eğitimine dair belirlenen bu faktörlerin, Delphi panelinde üç turlu değerlendirme süreciyle geçerlilik ve güvenilirlik ölçütleri dikkate alınarak yapılandırılmış olmasıdır. Uzmanlardan toplanan veriler SPSS aracılığıyla analiz edilmiş; çeşitli ölçütlerle istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Bu sayede, güçlü fikir birliği oluşan alanlar ile tartışmalı kalan noktalar ayrıştırılarak raporlanmıştır. Elde edilen sonuçlar, BIM entegrasyonunun yalnızca yazılım kullanımı ile sınırlı kalmaması; bunun yerine stratejik planlama, eğitici yetkinliklerinin güçlendirilmesi ve sektörle kurulacak iş birlikleri temelinde yeniden ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. Çalışma, mimarlık fakülteleri için kanıta dayalı, bağlamsal ve sürdürülebilir öneriler sunarak dijital dönüşüm bağlamında BIM destekli eğitimin yeniden yapılandırılmasına katkı sağlamaktadır.

Bu çerçevede elde edilen bulgular, BIM'in mimarlık eğitimine entegrasyonunun yalnızca dijital araç öğretimiyle sınırlı olmadığını; aynı zamanda yaratıcı problem çözme, işbirliği, karar alma ve proje yönetimi gibi çok yönlü beceriler kazandırmayı hedeflediğini göstermektedir. Özellikle uygulamalı stüdyo ortamlarında yürütülen proje temelli BIM uygulamaları, öğrencilerin gerçek dünya senaryolarına hazırlanmasını kolaylaştırmakta ve mesleki yeterliliklerini artırmaktadır. Disiplinler arası etkileşim imkânı sunan bu ortamlar, farklı mühendislik ve tasarım alanlarıyla ortak üretimi desteklemekte, öğrencilerin takım çalışmasına dayalı süreçlere katılımını teşvik etmektedir. Ayrıca dijital araçların entegrasyonu sayesinde soyut kavramların daha kolay kavranması, üç boyutlu düşünme becerilerinin gelişmesi ve yapı ilişkilerinin görselleştirilmesi mümkün hâle gelmektedir. BIM destekli eğitimin başarısı; altyapı olanakları, eğitmen yeterliliği, öğrenci motivasyonu ve sektörle bağların güçlendirilmesiyle yakından ilişkilidir. Dolayısıyla çalışma, mimarlık okullarında dijital dönüşüme uygun, pedagojik olarak tutarlı ve sektörel beklentilere yanıt veren bir BIM entegrasyon modeline katkı sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: *BIM, Yapı Bilgi Modelleme, Delphi Yöntemi, Dijital Tasarım Araçları, BIM Eğitimi, Eğitim Metodolojisi, Mimarlık Eğitimi, BIM Destekli Tasarım Stüdyosu.*

2025 MSTAS MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Building Information Modeling (BIM) in Architectural Education: Determining Critical Success Factors

Handan Aş Çemrek[1]; Ümit Işıkdağ[2]
[1,2]Mimar Sinan Fine Arts University
[1]20242109002@ogr.msgsu.edu.tr; [2]umit.isikdag@msgsu.edu.tr

Abstract

This study, investigates how to enhance the effectiveness of Building Information Modeling (BIM) education at the undergraduate level in architecture. The main focus of the research was to define the knowledge and skills that students should gain, considering how BIM is positioned in architectural education and the processes that this method changes. In this context, critical success factors for undergraduate BIM education were identified through a Delphi method, which incorporated expert insights and was preceded by a literature review to determine the fundamental requirements of BIM-supported architectural programs. As a result of the Delphi method, critical factors and application suggestions for the development of BIM-supported education programs were presented. The ultimate goal of the research is to contribute to the effective integration of the skills required for BIM application into architectural education programs. The literature analysis conducted in this direction showed that BIM integration is a multi-layered process that includes not only technical but also pedagogical and managerial dimensions. Success in BIM education depends on applied learning, interdisciplinary collaboration, student-centered studio environments, and digital pedagogical approaches. One of the study's contributions is its use of a three-round Delphi process, ensuring validity and reliability in determining the critical factors. Expert responses were statistically analyzed using SPSS, allowing for the identification of both consensus areas and points of disagreement. Results indicate that BIM education should go beyond software training, emphasizing strategic planning, educator development, and collaboration with the professional sector. The study contributes to the restructuring of BIM-supported architectural education by offering evidence-based and context-sensitive suggestions aligned with digital transformation. BIM education is shown to foster versatile skills such as creative problem solving, teamwork, decision-making, and project management. Project-based BIM applications, particularly those conducted in applied studio settings, help students prepare for real-world scenarios and enhance their professional competencies. These environments also support interdisciplinary interaction, encouraging collaboration between architecture and other design or engineering disciplines. Furthermore, digital tools enhance spatial thinking, visualization, and comprehension of abstract concepts The success of BIM-supported education is closely related to infrastructure facilities, instructor competence, student motivation and strengthening ties with the sector. Therefore, the study contributes to a BIM integration model that is suitable for digital transformation in architecture schools, pedagogically consistent and responds to sectoral expectations.

Keywords: *BIM, Building Information Modeling, Delphi Method, Digital Design Tools, BIM Education, Educational Methodology, Architectural Education, BIM-Integrated Design Studio.*

1. Giriş

Mimarlık eğitiminde Yapı Bilgi Modellemesi (Building Information Modeling - BIM) kullanımı, inşaat sektöründeki dijital dönüşümle paralel olarak önem kazanmaktadır. BIM, mimarlık mühendislik ve inşaat (AEC) disiplinlerinde işbirliğini ve verimliliği artıran bir süreçtir. Son on yılda dünya genelinde pek çok mimarlık okulu BIM'i müfredatlarına dahil etmiştir. Geleneksel mimarlık eğitiminde ayrık dersler ve kopuk içerikler, öğrencilerin farklı bilgi alanları arasında bağ kurmasını zorlaştırmakta, işbirliği ve yaratıcılığı sınırlamaktadır (Açıkgöz, 2018). Dijital çağda mimarlık eğitiminin endüstri uygulamalarıyla uyumlu, bütünleşik ve öğrenci merkezli bir yapıya evrilmesi gereği vurgulanmaktadır. Bu raporda, yayımlanmış güncel literatüre dayanarak, mimarlık eğitiminde BIM kullanımının kritik başarı faktörleri ele alınmıştır. Özellikle Delphi yöntemi ile belirlenen başarı kriterleri, dijital pedagojik stratejiler ve eğitimde başarının artırılmasında BIM'in rolü incelenmektedir. İlgili çalışmalardan elde edilen bulgular alt başlıklar halinde, referanslarıyla birlikte sunulmuş; ayrıca Delphi yöntemiyle elde edilen faktörlerin analizi ve yöntem bölümünün kurgusuna ilişkin akademik örnekler verilmiştir. Bu bağlamda, BIM'in mimarlık eğitimi içerisindeki yeri, sadece teknik becerilerle sınırlı olmayan, pedagojik, yönetsel ve dijital dönüşüm ekseninde yeniden değerlendirilmeye ihtiyaç duyan çok katmanlı bir alan olarak öne çıkmaktadır. Aşağıda sunulan literatür değerlendirmesi, bu dönüşümün bileşenlerini örneklerle açıklamakta ve BIM destekli öğrenme ortamlarının mimarlık öğrencilerinin mesleki gelişimine katkılarını ortaya koymaktadır. BIM, mimarlık, mühendislik ve inşaat sektöründe, tasarım süreçlerinde şeffaflık ve işbirliği sağlayarak projelerde zaman ve maliyet kayıplarını azaltan önemli bir teknolojik dönüşüm unsuru olarak öne çıkmıştır (Ofluoğlu, 2016). Bununla birlikte, artırılmış gerçeklik (AR), sanal gerçeklik (VR) ve LiDAR gibi dijital araçların sağladığı etkileşimli deneyimler, BIM'in eğitim süreçlerindeki uygulanabilirliğini arttırmış öğrenme ortamlarına yeni fırsatlar sunmuştur. Dijital teknolojilerin mimarlık eğitimindeki etkileri üzerine yapılan çalışmalar, BIM'in AR ve VR gibi teknolojilerle entegre edilmesinin, öğrencilerin mekânsal algılarını ve tasarım süreçlerini geliştirdiğini göstermektedir (Guray & Kısmet, 2023). Eğitimde AR teknolojilerinin kullanımı, öğrencilerin tasarım süreçlerini zenginleştirerek BIM entegrasyonunu desteklemektedir (Değirmenci & İnel, 2020). VR teknolojilerinin BIM ile entegrasyonu, yalnızca tasarım süreçlerini değil, aynı zamanda eğitimde uygulamalı öğrenmeyi güçlendiren bir araç olarak değerlendirilmektedir.

Literatürde BIM'in tasarım süreçlerini güçlendirdiği ve öğrencilerin tasarım becerilerini geliştirmede uygulamalı projelerle desteklenmesi gerektiği belirtilmiştir. BIM'in öğrenci merkezli öğrenme süreçlerinde başarıyı destekleyen bir araç olarak öne çıktığı ve öğrencilerin teknolojiye yönelik algılarının bu süreçlerde önemli bir faktör olduğu belirtilmiştir (Çapkın vd. 2020). Eğitimde uygulamalı öğrenme yöntemleri, öğrencilerin BIM'e olan bağlılıklarını artırmakta ve teknolojiyi etkin bir şekilde benimsemelerine yardımcı olmaktadır. Parametrik tasarım araçları ise öğrencilerin yaratıcı fikirlerini ifade etmelerine ve karmaşık tasarım problemlerini çözmelerine olanak sağlamaktadır (Çakır ve Uzun, 2020). Bu bağlamda bilgisayar destekli tasarım (CAD) araçlarının deneysel mimari projelere sağladığı katkılar, BIM'in tasarım eğitimindeki rolünü güçlendirmektedir. Ayrıca, vaka çalışmalarına dayalı BIM öğrenme ortamlarının, öğrencilerin hem teorik hem de pratik becerilerini geliştirdiği ve profesyonel hayattaki yeterliliklere hazırlanmasını sağladığı ortaya konulmuştur (Yıldırım, 2021). Öğrenci merkezli senaryo tasarımı ve etkileşimli öğrenme ortamları, BIM'in yaratıcı problem çözme becerilerini ve mesleki yeterlilikleri geliştirme potansiyelini ortaya koymaktadır (Çapkın, 2020).

BIM, sürdürülebilir tasarım süreçlerini destekleyen ve çevresel farkındalık kazandıran bir eğitim platformu olarak da değerlendirilmektedir (Ofluoğlu, 2017). Kültürel miras projelerinde BIM ve Lidar teknolojilerinin entegrasyonu, öğrencilerin tasarım süreçlerinde daha etkileşimli bir deneyim kazanmalarına katkı sağlamakta ve dijitalleşme araçlarıyla zenginleştirilmiş bir öğrenme ortamı sunmaktadır (Akbaylar vd. 2024). BIM, disiplinlerarası işbirliğini kolaylaştıran ve farklı meslek gruplarının aynı platformda etkin çalışmasına olanak tanıyan güçlü bir araç olarak öne çıkmaktadır (Ofluoğlu & Alkawi, 2016). Ancak araştırmalar, BIM'in mimarlık eğitimine entegrasyonunun akademik müfredatlarda yeterince yer bulmadığını ve mevcut programların dijital dönüşüm gereksinimlerini karşılamada yetersiz kaldığını ortaya koymuştur (Ünsaçar, 2023). Türkiye'de yapılan çalışmalarda, BIM'in entegrasyonunun teknolojik altyapı eksiklikleri, yazılım erişimi ve insan kaynaklarının sınırlı teknik bilgisi gibi zorluklarla karşılaştığını göstermektedir (Tan vd., 2022). Bunun yanı sıra literatür, BIM'in uygulamalı öğrenme yöntemleriyle daha etkin bir şekilde öğretilebileceğini vurgularken, sanal mekânlarla ve dijital teknolojilerin eğitime entegrasyonunun, öğrencilerin tasarım süreçlerini anlamalarına ve mesleki yeterlilik kazanmalarını desteklediğini göstermiştir. Eğitim senaryoları, teorik bilgi ile uygulama arasındaki bağı güçlendirirken, BIM yalnızca teknik beceri kazandırmakla kalmayıp, öğrenciler arasında etkileşimi ve işbirlikçi öğrenmeyi de artırmaktadır. Takkeci ve Erdem 'e (2024) göre de dijital teknolojiler ve bağlantıcı pedagoji sayesinde eğitmenler, öğrenme sürecini yönlendiren kolaylaştırıcılara dönüşmekte; sanal ve fiziksel ortamların entegrasyonu, öğrencilerin BIM araçlarını daha etkin kullanmalarına olanak tanımaktadır. Buna dayanarak,

öğrenci geri bildirimleri BIM entegrasyonunun eğitim süreçlerindeki etkilerini daha derinlemesine anlamayı sağlamıştır. Ayrıca, projelere dayalı işbirlikçi atölyelerin, öğrencilerin hem teorik bilgi birikimlerini hem de uygulama yetkinliklerini artırmada etkili olduğu gözlemlenmiştir. Bu bağlamda, eğitmenlerin dijital becerilerinin geliştirilmesi de BIM'in eğitimdeki etkisini artırmada kritik bir öneme sahiptir.

Çalışma kapsamında, Delphi yöntemi kullanılarak BIM eğitiminde kritik başarı faktörleri belirlenmiş ve bu faktörlerin öğrenci ile eğitmen rollerine etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu çerçevede, BIM'in mimarlık eğitimine entegrasyonu yalnızca yazılım öğretimi değil; çok katmanlı bir dönüşüm süreci olarak ele alınmalıdır. Eğitimdeki bu dönüşüm, pedagojik yaklaşımların, yönetsel stratejilerin ve dijital teknolojilerin birlikte değerlendirilmesini gerektirir. Aşağıdaki alt başlıklarda, literatüre dayalı olarak BIM destekli eğitimin farklı boyutları detaylandırılmakta ve bu süreçte belirleyici olan kritik başarı faktörleri sistematik bir şekilde ele alınmaktadır.

1.1. BIM Eğitimi ve Kritik Başarı Faktörleri

BIM'in eğitim ortamlarına entegrasyonu, sadece bir yazılım öğretiminden öte, öğrencilerin süreç, işbirliği ve yönetim becerilerini geliştirmeyi hedefler. Güncel çalışmalar, başarılı bir BIM eğitimi için hem teknolojik altyapıya hem de pedagojik yaklaşıma ilişkin kritik faktörleri ortaya koymaktadır. Örneğin, Olowa vd. (2023) çalışması, adaptif yapısallaşma kuramı (Adaptive Structuration Theory) merceğinden BIM eğitimindeki kritik etkenleri analiz etmiştir. Sonuçlar, "grup içi sistem", "BIM'in yapısı" ve "görev ve örgütsel çevre" bileşenlerinin, AEC/FM (mimarlık, mühendislik, inşaat ve tesis yönetimi) disiplinlerinde BIM'in eğitime entegrasyonunda önemli rol oynadığını göstermektedir. Bu faktörler kısaca; eğitim kurumlarındaki ekiplerin iç yapısı ve kültürü (yani öğretim kadrosunun BIM'e bakışı ve işbirliği düzeyi), BIM teknolojisinin özellikleri ve sunulma biçimi ve eğitim ortamının görev beklentileri ile kurumsal desteği şeklinde açıklanabilir. Araştırmacılar, BIM eğitimini geliştirmek için politika yapıcıların ve akademisyenlerin bu unsurlara dikkat etmesi gerektiğini, hatta bu faktörleri göz önünde bulunduran kapsamlı bir BIM eğitim çerçevesi geliştirilmesi gerektiğini vurgulamışlardır.

Benzer şekilde, Liu ve diğerlerinin 2025 tarihli çalışmasında (inşaat yönetimi öğrencileri üzerinde), BIM eğitiminin etkililiğini artıran faktörler sosyal bilişsel kuram temelinde modellenmiştir. 351 öğrenciden anket yoluyla toplanan verilerle yapılan analiz, öğrencinin öz-yeterliği, öğrenme ortamının kalitesi ve uygulamalı BIM eğitimi imkânları gibi unsurların BIM eğitim başarısı üzerinde belirleyici olduğunu göstermektedir. Bu bağlamda, öğrencilerin BIM teknolojilerine güven duyması (Bandura'nın öz-yeterlik kavramı), okulun donanım/yazılım ve müfredat desteği (öğrenme ortamı) ve pratik BIM deneyimleri sunulması (stüdyo/proje çalışmaları) önemli başarı kriterleridir. Literatürde, dijitalleşen inşaat sektörüne yanıt verecek şekilde öğrencilerin gerekli becerilerle donatılmasını sağlamak için eğitim sistemlerinin esnek ve çevik olması gerektiği de sıkça vurgulanmaktadır (Olowa vd., 2023). Uluslararası pek çok kaynak, BIM eğitiminde başarının anahtarını müfredat entegrasyonu ve öğrenci motivasyonunun artırılmasında bulmaktadır. Örneğin, Özener (2024) tarafından yapılan bir çalışma, duruma dayalı öğrenme yaklaşımı ile BIM öğretimini ele almıştır. İTÜ'de doktora düzeyinde yürütülen bu çalışmada, öğrencilerin gerçek dünya BIM süreçlerini simüle eden rol yapma temelli vaka çalışmalarına katılması sağlanmıştır. Bulgulara göre, endüstri profesyonellerinin de dâhil olduğu gerçekçi BIM senaryolarının değerlendirilmesi, öğrencilerin BIM'in değerini derinlemesine kavramasını kolaylaştırmıştır. Ayrıca sektör temsilcilerinin stüdyo sürecine katılımı, öğrencilerin stratejik ve işlevsel BIM yeterliliklerinin gelişimini hızlandırmıştır. Bu çalışma, BIM eğitiminin başarılı olabilmesi için endüstri ile akademi arasındaki bağın güçlendirilmesi ve öğrencilerin teorik bilgiyi pratik bağlamda uygulamasına imkân veren öğrenme deneyimlerinin tasarlanması gerektiğini ortaya koymaktadır.

1.2. Delphi Yöntemiyle Belirlenen BIM Eğitimi Başarı Kriterleri

Kritik başarı faktörlerinin kuramsal temellerini ortaya koyan bu yaklaşım, söz konusu faktörlerin hangi ölçütlere göre önceliklendirileceği sorusunu da gündeme getirmektedir. Bu noktada, çoklu uzman görüşlerinin sistematik biçimde değerlendirildiği Delphi yöntemi, BIM eğitimi bağlamında anlamlı ve güvenilir veri elde etmenin etkili bir yolu olarak öne çıkmaktadır. Delphi yöntemi, uzman görüşlerinin sistematik ve yinelemeli biçimde alınması yoluyla belirli bir konuda fikir birliği (konsensüs) oluşturmayı amaçlayan güçlü bir araştırma tasarımıdır. BIM eğitimi bağlamında doğrudan Delphi uygulamalarına rastlamak nispeten sınırlıysa da BIM'in işletme ve proje uygulamalarındaki başarı faktörlerini belirlemek üzere yapılan Delphi çalışmaları yol gösterici olabilir. Örneğin, Hussien vd. (2025) İran'daki KOBİ'lerde BIM uygulamasının kritik başarı faktörlerini tespit etmede bu yöntemden faydalanmıştır. Bu araştırmada BIM alanında uzman kişilerden oluşan bir panel, ilk turda literatürden derlenen faktörleri değerlendirmiş; yapılan turlarda faktörler üzerinde uzlaşı düzeyi artırılarak 27 kritik başarı faktörü belirlendiği raporlanmıştır. Çalışma, Delphi tekniğinin metodolojik katılığı sayesinde güvenilir ve geçerli sonuçlar verdiğini vurgulamaktadır. Çok turlu geri bildirim

mekanizması uzmanların görüşlerini yeniden değerlendirmesine olanak tanımış ve tutarlı bir fikir birliği oluşmasına katkı sağlamıştır. BIM eğitimi özelinde benzer bir Delphi yaklaşımı, müfredat geliştirme veya öğrenme çıktıları için başarı ölçütlerini tanımlamada kullanılabilir. Nitekim, eğitim araştırmalarında Delphi yöntemi müfredat geliştirme, standart oluşturma ve trend öngörüsü konularında başarıyla uygulanmıştır (Green, 2014). Örneğin, Kish'in (2023) çevrimiçi eğitimde öğrenci bağlılığını artırmaya yönelik stratejiler Delphi ile belirlenmiş ve uzmanların en çok mutabık kaldığı öneriler raporlanmıştır. Bu tür örnekler, yürütülen BIM eğitimi araştırmasına metodolojik bir temel sağlamakta ve Delphi tasarımının yapılandırılması açısından yol gösterici nitelik taşımaktadır.

1.3. BIM Eğitiminde Dijital Teknolojilerin Entegrasyonu ve Başarı Kriterleri

Hajirasouli vd. (2024), Avustralya'da bir yüksek lisans stüdyosunda uygulanan BIM destekli VR tabanlı pedagojik çerçevenin, öğrenci ve paydaş katılımını artırdığını ve öğrencilerin derse daha aktif katıldığını ortaya koymuştur. Katılımcılar, birlikte bilgi üretmiş, yaratıcılık ve motivasyon düzeylerinde artış göstermiştir. Ayrıca VR ortamında tasarımlarını deneyimleyen öğrenciler, tasarım kararlarını anında test etme imkânı bularak daha derin bir anlayış geliştirmiştir. Benzer şekilde, Grant ve Mairn (2020), VR/AR teknolojilerinin BIM eğitiminde proje koordinasyonu ve görselleştirme becerilerini geliştirdiğini belirtmiştir. Ancak, VR/AR uygulamalarının yaygınlaşmasındaki başlıca engel donanım altyapısıdır; yüksek performanslı cihazların ve ekipmanların sınırlı erişimi nedeniyle, kurumların bu kaynaklara yatırım yapması önemli bir başarı kriteri olarak değerlendirilmektedir.

Oyun tabanlı öğrenme stratejileri, mimarlık eğitiminde yaratıcılığı ve katılımı teşvik eden yenilikçi yöntemler arasındadır. Torun ve Tatar (2023), mimari tasarım sürecine oyunlaştırmayı entegre ettikleri çalışmalarında, bu yöntemin işbirliğini teşvik edici ve ortak düşünmeyi destekleyici bir ortam sunduğunu ortaya koymuşlardır. Akbaylar vd. (2024) aynı şekilde oyunlaştırmanın öğrenmede etkili bir rolü olduğunu vurgulamıştır. İçerik analizine dayanan bu çalışmada, dijital tasarım araçlarının sunduğu olanaklarla oyunlaştırmanın temel kriterlerini birleştiren bir model geliştirilmiştir. Modelin, geleneksel yöntemlere kıyasla daha yenilikçi olduğu ifade edilmektedir. Soysal ve Yamaçlı'nın (2024) çalışması da dijital oyunların öğrencilerin yaratıcı düşünme, işbirliği ve pratik becerilerini geliştirme potansiyeline işaret etmektedir. Özellikle stüdyolarda oyun senaryoları kullanımı, öğrencilerin problem çözme ve karar alma becerilerini eğlenceli bir ortamda geliştirmelerine olanak tanıdığı vurgulanır. Bu bağlamda, BIM öğrenimini destekleyen bir oyunlaştırma stratejisi benimsendiğinde, başarı, öğrenci katılım oranları, proje çıktılarının niteliği ve motivasyona yönelik geri bildirimler aracılığıyla değerlendirilebilir.

Bağlantıcı pedagoji, bilgi ve öğrenmenin bireyler arası ve kaynaklar arası ağlar yoluyla gerçekleştiğini öne sürer. Bu yaklaşımda öğrencilerin çeşitli bilgi kaynakları ve kişilerle bağlantı kurma becerisi kritik bir yeterlik olarak görülür Disiplinler arası ve işbirliğine dayalı yapısıyla BIM eğitimi, bağlantıcı öğrenme ilkeleriyle örtüşmektedir. BIM projelerinde öğrenciler; mimar, mühendis, danışman ve yazılım araçlarıyla sürekli etkileşim içindedir. Çevrimiçi platformlar, BIM kütüphaneleri ve profesyonel ağlar üzerinden bilgiye bu öğrenme modelini desteklemektedir. Siemens'in kuramına göre "farklı alanlar ve kavramlar arasında bağlantı kurabilme", güncel ve doğru bilgiye ulaşmak için temel bir beceridir (Espinoza, 2016). Bu kapsamda, başarı kriterleri arasında dijital okuryazarlık, çevrimiçi topluluklara katılım ve yaşam boyu öğrenme motivasyonu yer almaktadır. Chuaphun ve Samanchuen'in (2024) çalışması, sanal öğrenme ortamlarında başarıyı etkileyen on faktörü belirlemiştir; bunlar arasında öğrenen yetkinliği, kaynak desteği, yönetim desteği, teknolojik altyapı, kurumsal destek ve öğrenme ortamı öne çıkmaktadır. BIM eğitimi giderek dijital platformlara taşınırken bu faktörler BIM uygulamaları için de geçerlidir. Güçlü altyapı ya da yönetimsel teşvikler olmadan, BIM entegrasyonu yüzeysel kalabilmektedir.

1.4. İşbirlikçi Uygulamalı ve Öğretici Merkezli BIM Öğrenme Ortamları

Tasarım stüdyosu, mimarlık eğitiminin merkezinde yer almakta; BIM eğitimi de stüdyo ile bütünleştiğinde en etkili sonuçları vermektedir. Kritik başarı faktörlerinden biri, BIM öğrenme sürecinin işbirlikçi ve uygulamalı bir ortama oturtulmasıdır. BIM projeleri mimarlık, inşaat, makine ve elektrik gibi disiplinlerarası etkileşim gerektirir. Bu nedenle, eğitimde de disiplinler arası işbirliği tecrübesi başarı için kritiktir. Lee vd. (2023) Avustralya'daki uzaktan eğitim BIM uygulamalarında, görselleştirme, iletişim, koordinasyon, teknik/teknik olmayan operasyonlar gibi altı temel kategori belirlemiş; bu unsurların özellikle uzaktan işbirliğinde kritik olduğunu vurgulamışlardır. Eğitim bağlamında, öğrencilerin proje temelli BIM çalışmalarına dâhil edilmesi, takım çalışması ve koordinasyon becerilerini geliştirmektedir. Örneğin, bir tasarım stüdyosu projesinde öğrenciler mimari model, strüktürel model ve tesisat modellerini ayrı ayrı oluşturup BIM ortamında birleştirerek çakışmaları birlikte çözebilir. Bu tür deneyimler, öğrencilerin rol dağılımı, koordinasyon ve kolektif çözüm arama yeteneklerini geliştirir (Karimi ve Farivarsadri, 2024; Çapkın, 2022). BIM, yalnızca yazılım bilgisi değil, süreç tasarımı ve karar alma pratiği gerektirir. Bu nedenle teorik bilgi ile uygulama arasında güçlü bir bağ

kurulmalıdır. 4D BIM gibi teknolojilerin kullanımı, inşaat yönetimi öğrencilerinin planlama ve süreç öngörüsü becerilerini geliştirmektedir (Rocha vd., 2025; Abouelkhier vd., 2024). Öğrenci merkezli stüdyolarda, eğitmen rehber rolünde kalırken, öğrenciler proje sürecinin sorumluluğunu alır ve aktif öğrenenler olurlar. Özener'in (2024) çalışması, deneyimsel öğrenme yöntemlerinin BIM stratejilerini kavramada etkili olduğunu göstermektedir. Yapılan çalışmalara dayanarak, BIM eğitiminde başarı; proje, atölye ve laboratuvar temelli deneyimsel öğrenme ortamlarının önceliklendirilmesiyle artırılabileceği önerilebilir.

2. Metodoloji

Bu araştırmada, mimarlık lisans eğitiminde Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) için kritik başarı faktörlerini belirlemek amacıyla Delphi yöntemi kullanılmıştır. Delphi, belirsiz veya karmaşık konularda uzmanların anonim geri bildirimler yoluyla fikir birliğine ulaşmasını amaçlayan yapısal bir süreçtir (Graham vd., 2021). Bu çalışmada Delphi süreci üç turlu olarak planlanmış, her turda elde edilen veriler doğrultusunda faktör listesi güncellenmiştir.

2.1. Araştırma Yöntemi ve Delphi Tasarımı Faktör Listesinin Belirlenmesi

Araştırmanın ilk aşamasında kapsamlı bir literatür taraması gerçekleştirilmiş ve BIM eğitiminin gerektirdiği altyapı koşulları, yazılım erişimi, dijital teknolojilerin entegrasyonu ve uygulamalı öğrenme yöntemlerine dair ana temalar belirlenmiştir. Türkiye'deki uygulamalara yönelik araştırmalar, teknolojik altyapı eksiklikleri, lisans erişimi ve insan kaynağı gibi sorunlara dikkat çekmektedir. Ayrıca, sanal gerçeklik (VR) gibi teknolojilerin BIM ile entegrasyonu, öğrencilerin mekânsal düşünme ve problem çözme becerilerini olumlu yönde etkileyebilmektedir (Bozkurt vd., 2024). Ofluoğlu ve Alkawi (2016), BIM'in ortak veri ortamı yoluyla ekip çalışmasını ve iletişim becerilerini geliştirdiğini vurgulamıştır. Bu literatür temelli bulgular doğrultusunda, Delphi sürecinin ilk turu için ön faktör listesi oluşturulmuştur. Liste, sektörel başarı kriterleri ile eğitim alanındaki pedagojik göstergeleri bir araya getirerek, mimarlık eğitiminin dinamiklerine özgü bir içerikle yapılandırılmıştır. Araştırmada kapsamlı bir literatür taramasına ilişkin mimarlık eğitiminde BIM entegrasyonunda potansiyel başarı faktörleri belirlenmiştir. Bu ön liste, Delphi'nin **1. turunda** uzman paneline sunularak her bir faktörün önem derecesini değerlendirmeleri istenmiştir.

Tablo 1: Delphi Yöntemi Kapsamında Uygulanan Araştırma Süreci ve Aşamalar

Aşama	Açıklama
Literatür Taraması	BIM eğitimiyle ilgili çalışmalar incelenerek ön faktör havuzu oluşturuldu.
Faktör Listesi Geliştirme	Sık tekrarlanan temalar temel alınarak **33 maddelik Delphi anketi** oluşturuldu.
1. Tur Uygulaması	Uzman paneline çevrim içi anketi 5'li Likert ölçeğiyle puanlanarak uygulandı.
1. Tur Analizi	SPSS ortamında medyan, ortalama, IQR ve uzlaşı yüzdesi hesaplandı. %80 uzlaşı eşiği uygulandı.
1. Tur Geri Bildirim	Katılımcılara ilk tur sonuçları ve grup eğilimleri sunuldu.
2. Tur Uygulaması	Aynı panelden elenerek gruplanmış **17 maddelik liste** için yeniden değerlendirme istendi.
2. Tur Analizi	SPSS ile medyan, ortalama, IQR ve uzlaşı yüzdesi hesaplandı, eşik altındaki maddeler elendi.
2. Tur Geri Bildirim	Katılımcılara **11 maddede güçlü konsensüs** sağlandığı raporlandı, yeniden değerlendirme istendi.
3. Tur Analizi	Son turda **11 madde** üzerinden SPSS ortamında nihai istatistiksel analiz gerçekleştirildi.
Nihai Değerlendirme	**Kendall's W katsayısı** ile genel görüş birliği, **Cronbach's Alpha** ile iç tutarlılık değerlendirildi.

Bu tablo, izlenen Delphi metodolojisinin her adımını sistematik özetlemekte; literatür taraması, 3 tur Delphi ve aşamaları şematik olarak sunmaktadır. Araştırmanın yapısını anlamak ve tutarlılığını izlemek için temel bir referanstır.

2.2. Uzman Panellerinin Oluşturulması

Mimarlık eğitimi ve BIM alanında uzman kişilerden oluşan bir panel oluşturulmuş ve bu uzmanlar Delphi turlarına katılmıştır. Uzmanların değerlendirmeleri, BIM eğitimi için kritik başarı faktörlerinin detaylı bir şekilde analiz edilmesine olanak sağlamıştır. Delphi süreci başlatılmadan önce, panelistlere çalışmanın amacı, Delphi Tekniği ve süreci hakkında bilgilendirme yapan bir e-posta gönderilmiş; ayrıca değerlendirme yapacakları sistemin bağlantısı paylaşılmıştır. Panelistler çalışmaya katılmayı kabul ettikten sonra, değerlendirme süreci başlatılmıştır.

Uzman paneli, mimarlık eğitimi ve BIM konusunda deneyimli akademisyenler ile sektörde BIM uygulamalarına hâkim profesyonellerden oluşan **20 kişilik** bir gruptur. Panelistler alanlarında mesleki deneyime ve BIM eğitimi konusunda uzmanlık veya yayınlara sahiptir. Çalışmanın I. Delphi Oturumuna 20, II. Delphi Oturumuna 17 kişi katılım sağlamıştır. III. Delphi Oturumunda ise panelistlerle nihai faktör listesi paylaşılmış, ikinci ankete verdikleri cevapları gruba ilişkin istatistiklerle karşılaştırmaları ve kararlarını yeniden gözden geçirmeleri istenmiştir. Bu aşamada herhangi bir panelistin görüşünde değişiklik olmadığı, önceki değerlendirmelerin korunduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen bulgular, Delphi Panelist Grubunun süreç boyunca tutarlı ve istikrarlı bir değerlendirme eğilimi sergilediğini ve grubun heterojen yapısına rağmen yüksek düzeyde uzlaşı sağlandığını göstermektedir. Çalışmada her Delphi turunda panelist verileri

SPSS yazılımı kullanılarak analiz edilmiş elde edilen sonuçlar doğrultusunda kritik başarı faktörleri güncellenmiştir. Medyan, ortalama, çeyrekler arası açıklık (IQR) ve uzlaşı yüzdesi gibi ölçütlerle değerlendirme yapılmış; %80 uzlaşı oranı eşik değeri olarak benimsenmiştir.

2.3. Delphi Turlarının Akışı

Delphi süreci, üç tur hâlinde yürütülmüştür:

Delphi Birinci Tur: Araştırmada, çevrimiçi anketler aracılığıyla katılımcıların görüşleri toplanmış ve veriler dijital ortamda güvenli bir şekilde saklanmıştır. Gerçek Zamanlı Delphi tekniğinin tercih edilmesi, araştırmacıya düşük maliyet, zaman tasarrufu, kolay veri erişimi ve hızlı analiz gibi önemli avantajlar sağlamıştır (Skulmoski vd., 2007). Birinci Delphi oturumu, Google Forms platformu üzerinden düzenlenerek başlatılmış ve katılımcıların değerlendirmeleri çevrimiçi olarak alınmıştır. Literatür taraması sonucunda oluşturulan 33 ön faktör, uzman panelistlere sunulmuş, her bir faktörün önemi 1 (hiç katılmıyorum) ile 5 (tam katılıyorum) arasında Likert ölçeğiyle derecelendirilmiştir. SPSS 30 yazılımı kullanılarak elde edilen ortalama, medyan ve IQR değerleri, panelistlerin genel eğilimleri belirlenmiştir. Maddelerin büyük çoğunluğunda **medyan değerinin 5, ortalamanın ise 4,25 ile 4,85 aralığında** olması; yüksek düzeyde uzlaşıya işaret etmektedir. Özellikle KBF1, KBF3 ve KBF16 gibi maddelerde ortalamanın yüksek, **IQR'nin ise 0,00 veya 0,25** gibi düşük düzeylerde olması, güçlü fikir birliğini desteklemektedir. Buna karşılık, KBF7, KBF18 ve KBF27 gibi bazı maddelerde ortalamanın düşmesi ve IQR'nin 1,50'nin üzerine çıkması, panelistler arasında görüş ayrılığına işaret etmektedir. Ters kodlanan maddelerde (KBFN28–KBFN33) de benzer bir eğilim gözlenmiş; özellikle klasik başarı algısıyla çelişen ifadelerde uzlaşının daha zayıf olduğu ve dağılımın arttığı görülmüştür. Birinci turda, 33 maddeden 25'i %80 ve üzeri uzlaşı sağlayarak güçlü konsensüsle kabul edilirken; yalnızca 8 madde yeterli uzlaşı sağlayamayarak bir sonraki aşama için elenmeye aday gösterilmiştir. Bu bulgular, teknik altyapı, yazılım erişimi ve uygulamalı öğrenmeye dair faktörlerde yüksek fikir birliği olduğunu; buna karşın pedagojik sınırları zorlayan ve klasik eğitim anlayışının dışına çıkan önerilerde daha temkinli yaklaşıldığını göstermektedir.

Delphi İkinci Tur: Uzman görüşleri değerlendirilmiş, düşük öneme sahip faktörler elenmiş ve ilk tur verileri analiz edilerek, ortalama, medyan ve IQR değerleri hesaplanmıştır. Uzmanların görüşlerine dayanarak içerik açısından benzer faktörler birleştirilmiş ve toplamda **17 maddelik güncellenmiş bir liste** oluşturulmuştur. Panelistlere bu liste, ilk turdaki grup istatistikleri ile birlikte sunulmuş ve değerlendirmelerini revize etmeleri istenmiştir. İkinci turda elde edilen veriler, SPSS ortamında analiz edilerek her bir madde için ortalama, medyan ve IQR değerleri hesaplanmış; bununla birlikte her maddenin uzlaşı yüzdesi değerlendirilmiş ve güçlü konsensüs sağlayan ifadeler belirlenmiştir. Tabloya göre, KBF-A1 (Üst yönetim desteği), KBF-A3 (Kaynak ve finansman desteği), KBF-B1 (Donanım ve yazılım altyapısı), KBF-B3 (Dijital veri ve içerik erişimi), KBF-C1 (Müfredatta BIM entegrasyonu), KBF-C3 (Disiplinlerarası iş birliği), KBF-C4 (Yeterli öğrenme süresi planlaması), KBF-D1 (Eğitmen BIM yetkinliği), KBF-D2 (Eğitmenlere yönelik BIM eğitimi), KBF-F1 (Sektör işbirliği ve geri bildirimi) ve KBF-F2 (Staj ve gerçek proje deneyimi) maddeleri %80 ve üzeri uzlaşı oranı ile güçlü konsensüs sağlanan faktörler arasında yer almıştır. Bu ifadelerin çoğunda medyan değeri 5.00 veya 4.00 ve IQR değeri 1.00 veya daha düşük bulunmuş, bu durum panelistlerin önemli ölçüde görüş birliğine vardığını göstermektedir.

Tablo 2: Delphi Yöntemi Kapsamında Uygulanan Araştırma Süreci ve Aşamalar

Kod	Kritik Başarı Faktörü	Medyan	IQR	Uzlaşı Yüzdesi
KBF-A1	Üst yönetim desteği	4.0	0,5	82,35%
KBF-A3	Kaynak ve finansman desteği	5.0	0	100%
KBF-B1	Donanım ve yazılım altyapısı	4.0	1.0	100%
KBF-B3	Dijital veri ve içerik erişimi	5.0	1.0	100%
KBF-C1	Müfredatta BIM entegrasyonu	5.0	1.0	94.12%
KBF-C3	Disiplinlerarası iş birliği	4.0	1.0	82.35%
KBF-C4	Yeterli öğrenme süresi planlaması	4.0	1.0	100%
KBF-D1	Eğitmen BIM yetkinliği	4.0	1.0	82,35%
KBF-D2	Eğitmenlere yönelik BIM eğitimi	4.0	1.0	88,24%
KBF-F1	Sektör işbirliği ve geri bildirimi	5.0	0	100%
KBF-F2	Staj ve gerçek proje deneyimi	5.0	0	100%

Bu aşamada toplamda 11 maddenin katılımcılar arasında yüksek fikir birliği sağlanarak ikinci turda Delphi sürecinin başarılı çıktıları olarak kabul edilmiştir. Buna karşın, bazı kurumsal düzey ve uygulamalı öğrenme ile akademik kültür gibi faktörlerde uzlaşı yüzdesi %80'in altında kalmış, dolayısıyla güçlü konsensüs sağlanamamıştır. Bu durum, panelistlerin bireysel ve öğrenen merkezli başarı faktörlerinde yüksek fikir birliğine sahip olduğunu, ancak kurumsal, yapısal ve soyut nitelikteki faktörlerde görüş farklılıklarının sürdüğünü göstermektedir. Bu aşamada panelistlerden elde edilen homojen görüşler, üçüncü ve son tur için belirleyici olacak şekilde değerlendirilmeye hazır hâle getirilmiştir. İkinci tur anket sürecine ilişkin olarak, Delphi araştırmalarında, çoklu turların zaman alıcı yapısı nedeniyle panelist kaybı veya anketlerin zamanında yanıtlanmaması literatürde sıkça karşılaşılan bir sorun olarak belirtilmektedir (Gordon, 1994; Hung vd., 2008). Bu çalışmada, söz konusu riski azaltmak amacıyla, panelistlere belirli aralıklarla, nazik ve teşvik edici bir dil kullanılarak hatırlatma iletileri gönderilmiştir (Hsu & Sandford, 2007). Bu yaklaşım sayesinde, oturumlar boyunca panelist kaybı minimum düzeyde tutulmuştur. Bununla birlikte, ikinci tur anket süreci de birinci turda da olduğu gibi bazı panelistlere ulaşım güçlükleri nedeniyle bir hafta içerisinde tamamlanmış; toplamda 17 uzman panelist anketi eksiksiz şekilde doldurmuş, 3 panelist ise ikinci oturuma katılamamıştır.

Delphi Üçüncü Tur ve İstatistiksel Değerlendirme: Üçüncü turda, ikinci turda elde edilen bulgular doğrultusunda oluşturulan 11 maddelik nihai faktör listesi panelistlerle yeniden paylaşılmış ve faktörlerin önem düzeyi yeniden değerlendirilmiştir. Panelistlere, ikinci turda verdikleri yanıtların gruba ait istatistiksel sonuçları gösterilerek kendi cevaplarını yeniden gözden geçirmeleri istenmiştir. Bu turda, panel görüşlerini son kez değerlendirerek güçlü bir konsensüs sağlanmasına odaklanmıştır. Üçüncü turda panelistlerin önceki yanıtlarında herhangi bir değişiklik olmamış, tüm faktörler için ikinci turdaki uzlaşı korunmuştur. Böylece, üçüncü oturum 17 panelistin katkılarıyla 11 maddelik nihai listeyle başarıyla tamamlanmıştır. Delphi araştırmalarında tur sayısı, panelistlerin uzlaşı düzeyine bağlı olarak belirlenmekte olup, genellikle üç turun yeterli olduğu kabul edilmektedir (Skulmoski vd., 2007). Bu nedenle, çalışma üçüncü turda sonlandırılarak BIM eğitimine yönelik kritik başarı faktörleri net bir biçimde belirlenmiştir. Turların ilerleyişi sırasında konuya ilgi duyan panelistlerin daha hızlı ve istikrarlı dönüş yaptığı, kişisel yakınlığın olduğu panelistlerin ise süreç boyunca ankete devam etme oranlarının daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

Nihai analiz aşamasında, uzman görüşleri arasındaki sıralı tutarlılığı belirlemek üzere **Kendall's W** (Kendall's Coefficient of Concordance) **katsayısı** hesaplanmıştır. Elde edilen **W = 0.316 değeri**, panelistler arasında çok yüksek düzeyde görüş birliği bulunduğunu göstermektedir. Bu katsayı 0 ile 1 arasında değişmekte olup, 0.7 üzeri değerler güçlü uzlaşıya işaret etmektedir (Legendre, 2005). Ayrıca, tüm maddelerin ölçüm ölçeği üzerindeki içsel bütünlüğünü değerlendirmek amacıyla **Cronbach's Alpha katsayısı** hesaplanmış ve **α = 0.825** olarak bulunmuştur. Bu oran, 11 maddelik nihai formun güvenilir olduğunu ve maddelerin aynı kavramsal yapıyı ölçtüğünü ortaya koymaktadır. Panelistler bağımsız puanlama yaptığı için **Cohen's Kappa** analizine gerek duyulmamıştır. Aşağıdaki tabloda, üçüncü ve son turda panelistlerden alınan değerlendirmelere ilişkin nihai analiz sonuçları sunulmaktadır.

Tablo 3: Delphi 3. Tur Nihai Değerlendirme

Analiz Türü	Değer	Yorum
Kendall's W	0.316	Orta düzeyde uzlaşı sağlanmıştır.
Cronbach's Alpha	0.825	İç tutarlılık güçlü; maddeler homojendir.
Cohen's Kappa	-	Kullanılmadı (bağımsız, ikili sınıflama yok).

2.4. Veri Analizi ve Güvenilirlik Analizleri

Delphi turlarında elde edilen veriler, SPSS 30 yazılımıyla betimsel istatistikler ve faktör analiz yöntemleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Delphi süreci boyunca uzman panelinin yapılandırılması, veri toplama ve analiz adımlarının sistematik bir şekilde yürütülmesi, yöntemin geçerliliği ve güvenilirliği açısından kritik öneme sahiptir (Bahar ve Demir, 2021). Her bir Delphi turunda; Ortalama ve Medyan Değerleri, IQR, Uzlaşı Yüzdesi (≥%80=güçlü konsensüs), Kendall's W (panel içi görüş birliği) ve Cronbach's Alpha katsayısı (ölçüm ölçeği güvenilirliği) dikkate alınmıştır. Bir maddenin uzlaşıya ulaşmış sayılmasında, **medyan≥4.0, IQR≤1.0 ve uzlaşı oranı≥%80** koşulları aranmıştır. 2. ve 3. turda bu kriterlere uymayan maddeler elenmiştir. Yöntemsel güvenirlilik sağlamak amacıyla; anonim anket uygulamaları, geri bildirimli tekrarlar, veri temizliği, tematik kodlama ve çoklu karşılaştırmalar gibi önlemler alınmıştır. Panelistlerin kimlik

bilgileri gizli tutulmuş, her turda gönüllü katılım ilkesi gözetilmiştir. Ayrıca her turun sonunda elde edilen sonuçlar, önceki tur verileriyle karşılaştırılarak panelist görüşlerinde tutarlılık olup olmadığı kontrol edilmiştir.

Tablo 4: Delphi'de Kullanılan İstatistiksel Teknikler ve Amaçları

Aşama	Kullanılan Teknik(ler)	Amaç
1. Tur	Uzman paneli, Ortalama, Medyan, IQR, Uzlaşı Yüzdesi	İçerik geçerliliğini sağlamak; faktörleri değerlendirmek
2. Tur	Uzman paneli, Ortalama, Medyan, IQR, Uzlaşı Yüzdesi	Görüş birliği ile maddelerin tutarlılığını test etmek
3. Tur	Kendall's W, Cronbach's Alpha	Nihai uzlaşı ve ölçek içi güvenilirliği belirlemek

3. Bulgular

Delphi çalışmasından elde edilen bulgular, mimarlık eğitiminde BIM entegrasyonunun başarısı için hangi unsurların öne çıktığını ve uzmanlarca hangi konularda mutabakat sağlandığını ortaya koymaktadır. Başlangıçta belirlenen **33 faktör**, ilk tur sonunda **17'ye indirilmiş** ve bu maddeler için panelistlerin en az %80'i "önemli" değerlendirmesinde bulunmuştur. Özellikle üst yönetim desteği, müfredat uyumu, sektörel işbirliği ve teknolojik altyapı sağlanması hem yüksek ortalama hem de uzlaşı oranlarıyla öne çıkmıştır. Bu bulgu, BIM'in etkin uygulanabilmesi için kurumsal strateji ile operasyonel yeterliğin birlikte olması gerektiğini göstermektedir. Literatürde de yönetsel destek, eğitim programı revizyonu ve insan kaynağı geliştirme gibi unsurların kritik olduğu vurgulanmaktadır (Olowa vd., 2023; Maina, 2018). Buna karşın bazı faktörler, yüksek puanlara rağmen uzlaşı kriterlerini karşılayamamıştır. Örneğin, **Akademik kültür ve tutum** faktörü son turda 4.06 ortalama puan almış ancak %64,71 uzlaşı oranında kaldığı için nihai listeden çıkarılmıştır. Böylece Delphi yöntemi, yalnızca ortaklaşa "kritik" kabul edilen unsurlara odaklanmayı sağlamıştır. Bu çok katmanlı analiz, yalnızca önem düzeyini değil, uzmanlar arasındaki tutarlılığı da değerlendirme olanağı sunmuştur. Bu doğrultuda yüksek uzlaşıya sahip maddeler mimarlık eğitim programlarında temel girdi olarak ele alınabilirken, uzlaşı düzeyi düşük olanlar ikincil öncelikler olarak değerlendirilebilir. Üçüncü tur sonunda 11 madde üzerinde yüksek düzeyde görüş birliği sağlanmış; istatistiksel analizler (Kendall's W = 0.316, Cronbach's Alpha = 0.825) bu uyumu doğrulamıştır.

4. Sonuçlar

Bu çalışma, mimarlık eğitiminde BIM entegrasyonunun başarısı için gerekli kritik faktörleri Delphi yöntemiyle sistematik biçimde ortaya koymuştur. Panelistlerin yüksek uzlaşı sağladığı 11 temel faktör; yönetim desteği, kaynak ve finansman, yazılım altyapısı, dijital veri erişimi, müfredatta BIM, disiplinlerarası işbirliği, eğitmen BIM yetkinliği, sektör işbirliği, staj ve gerçek proje deneyimi imkânlarıdır. Bu faktörler, yalnızca teknolojik altyapıyı değil; kurumsal vizyon, pedagojik planlama ve sektörle etkileşim gibi çok boyutlu bileşenleri kapsamaktadır. Elde edilen bulgular, mevcut literatürle yüksek düzeyde örtüşmektedir. Örneğin, "eğitmen BIM yetkinliği" faktörüne panelistlerin yüksek uzlaşı atfetmesi, Abdirad ve Dossick'in (2016) vurguladığı gibi, BIM müfredatının başarısında öğretim kadrosunun beceri ve deneyiminin kritik rolünü teyit etmektedir. Benzer şekilde, müfredata entegre edilen uygulamalı öğrenme fırsatlarının önemi, Kocaturk ve Kiviniemi'nin (2013) BIM'in eğitimde kültürel, entelektüel ve profesyonel dönüşüm gerektirdiğine dair bulgularıyla uyumludur. Bu bağlamda literatürle uyumlu ilerleyen çalışmamız, yalnızca teknik düzenlemelerin değil, aynı zamanda bir akademik kültür dönüşümünün de gerekli olduğunu göstermektedir (Olowa vd., 2023).

Bulgular, aynı zamanda mimarlık eğitiminde sektörle işbirliği, disiplinlerarası proje deneyimi ve staj imkânlarının önemini de ortaya koymuştur. Bu tür uygulamalı öğrenme biçimleri, Maina'nın (2018) da belirttiği gibi, öğrencilerin sektöre daha hazırlıklı mezun olmalarını sağlamaktadır. Panelistlerin görüş birliği, BIM eğitiminin sadece yazılım öğretimi değil; sektörel pratik, iletişim becerileri ve işbirliği dinamikleriyle birlikte ele alınması gerektiğini göstermiştir. Özetle, Delphi yöntemiyle ulaşılan bulgular, mimarlık eğitiminde BIM entegrasyonunun başarılı olabilmesi için çok yönlü bir strateji gerektirdiğini ortaya koymaktadır. Üst yönetim desteği, eğitmen kapasitesi, teknik altyapı, öğrenci odaklı öğrenme desteği ve sektörle kurulan etkili iş birlikleri, bu stratejinin temel bileşenleri arasında yer almaktadır. Bu kapsamda, mimarlık okulları ve ilgili kurumlar; BIM eğitimini sadece bir yazılım öğretimi olarak değil, stratejik, pedagojik ve kurumsal düzeylerde ele almalıdır. Sonraki çalışmalar, bu faktörlerin sahada nasıl uygulandığını ve eğitim çıktılarına etkisini inceleyerek, BIM tabanlı mimarlık eğitiminin sürekli gelişimine katkı sunabilir.

KAYNAKLAR

Abdirad, H. and Dossick, C. S. (2016). BIM Curriculum design in Architecture, Engineering and Construction Education: A Systematic Review. *Journal of Information Technology in Construction, 21*, 250-271.

Abouelkhier, N., Shafiq, M. T., Rauf, A., & Alsheikh, N. (2024). Enhancing Construction Management Education through 4D BIM and VR: Insights and Recommendations. *Buildings, 14*(10), 3116.

Açıkgöz , E. K. (2018). Catching Up With BIM: A Curriculum Re-Design. *Journal of Contemporary Urban Affairs, Vol. 2*, No. 3., 2018, 2(3), 40-48.

Akbaylar Hayreter, İ., Güleç Özer, D., & As Cemrek, H. (2024). Enhancing cultural heritage digitalization and visitor engagement through lidar scanning and gamification. In *The 29th Annual Conference for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA)*. The Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia.

Bahar, M., & Demir, N. S. (2021). Delphi tekniği uygulama sürecine yönelik örnek bir çalışma: çok fonksiyonlu tarım okuryazarlığı. Abant İzzet Baysal Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi, 21(1), 35-53.

Bozkurt, G., Ersoy, S., & Yaşa, E. (2024). Yapı Üretim Süreçlerinde BIM ve VR Uygulamalarının Entegrasyonunun Değerlendirilmesi. *Turkish Journal of Civil Engineering, XLIV*, 117–144. DOI:10.18400/tjce.1244122.

Chuaphun, P., & Samanchuen, T. (2024). Exploring success factors and relationships in virtual learning using ISM and fuzzy MICMAC analysis. *Heliyon, 10*(7).

Çakır, H. S., & Uzun, T. İ. (2020). Building Information Modelling in Architectural Education: Contribution of Bim in Design Process. *Turkish Online Journal of Design Art and Communication*, *10*(4), 452-467.

Çapkın, D. F., Işıkdağ, Ü., & Tong, T. (2020). Design Students Viewpoint on BIM: a Preliminary Assessment of the Indicators. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 44*, 143-150.

Çapkın, H. (2020). *Development of BIM learning scenarios for architectural education*. [Doktora tezi]. İTÜ İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimari Tasarım Bilim Dalı, İstanbul.

Çapkın, H. (2022). Meeting Professional Development Needs of Architects: Models for Integrating bIM into Education Programs. *" Obrazovanje odraslih"-Časopis za obrazovanje odraslih i kulturu, 22*(1-2), 91-108.

Değirmenci, N., & İnel, Y. (2020). Sosyal Bilgiler Öğretim Programına Yönelik Mobil Artırılmış Gerçeklik Uygulamalarının Öğretmen Adaylarıyla Geliştirilmesi: Bir Eylem Araştırması. *Journal of Innovative Research in Social Studies*, *3*(2), 90-113.

Espinoza, V. P. R. (2016). The Importance of Connectivism in Architectural Design Learning: Developing Creative Thinking. *CAADence in Architecture*, 127-131.

Gheni Hussien, I., Saeed Rasheed, Z., Asaadsamani, P., & Sarvari, H. (2025). Perceived Critical Success Factors for Implementing Building Information Modelling in Construction Small-and Medium-Sized Enterprises. *CivilEng, 6*(1), 5.

Gordon, T. J. (1994). The delphi method. *Futures research methodology, 2*(3), 1-30.

Graham-Clarke, E., Rushton, A., & Marriott, J. (2021). A Delphi study to explore and gain consensus regarding the most important barriers and facilitators affecting physiotherapist and pharmacist non-medical prescribing. *PLoS One, 16*(2), e0246273.

Grant, C., & Mairn, C. (2020). 3D, virtual, augmented, extended, mixed reality, and extended content forms: The technology and the challenges. *Information Services and Use, 40*(3), 225-230.

Green, R. A. (2014). The Delphi technique in educational research. *Sage Open, 4*(2), 2158244014529773.

Hajirasouli, A., Banihashemi, S., Sanders, P., & Rahimian, F. (2024). BIM-enabled virtual reality (VR)-based pedagogical framework in architectural design studios. *Smart and Sustainable Built Environment, 13*(6), 1490-1510.

Guray, T. S., & Kısmet, B. (2023). Mimarlıkta Yapı Dersleri Müfredatı Dijital Dönüşüm Modeli. *Mimarlık ve Yaşam, 8*(2), 493-501.

Hung, H. L., Altschuld, J. W., & Lee, Y. F. (2008). Methodological and conceptual issues confronting a cross-country Delphi study of educational program evaluation. *Evaluation and program planning, 31*(2), 191-198.

Hsu, C. C., & Sandford, B. A. (2007). The Delphi technique: making sense of consensus. *Practical assessment, research, and evaluation, 12*(1).

Karimi, H., & Farivarsadri, G. (2024). Exploring the Collaboration Skills among Architecture Students: A Quantitative Study in North Cyprus. *Buildings, 14*(7), 1984.

Kish, D. (2023). Recommendations to increase online student retention: A Delphi study. *American College Personnel Association (ACPA)*. https://myacpa.org/recommendations-to-increase-online-student-retention-a-delphi-study-by-dr-danielle-kish/

Kocaturk, T., & Kiviniemi, A. (2013). Challenges of integrating BIM in architectural education.

Lee, J. H., Ostwald, M. J., Arasteh, S., & Oldfield, P. (2023). BIM-enabled design collaboration processes in remote architectural practice and education in Australia. *Journal of Architectural Engineering, 29*(1), 05022012.

Legendre, P. (2005). Species associations: the Kendall coefficient of concordance revisited. *Journal of agricultural, biological, and environmental statistics, 10*, 226-245.

Liu, Y., Ao, Y., Peng, P., & Martek, I. (2025). Factors impacting BIM educational effectiveness: Evidence from construction management students. *Journal of Green Building, 20*(1), 133-152

Maina, J. J. (2018). Barriers to effective use of CAD and BIM in architecture education in Nigeria. *International Journal of built environment and sustainability, 5*(3).

Ofluoğlu, S. (2016). BIM-based interdisciplinary collaborations in a student project competition. In *X. Mimarlıkta Sayısal Tasarım Ulusal Sempozyumu*.

Ofluoğlu, S. (2017). BIM-enabled sustainable architectural design education. A*+ Arch Design International Journal of Architecture and Design, 3*(1).

Ofluoğlu, S., & Alkawi, G. (2016). Bir Öğrenci Proje Yarışması Üzerinden Disiplinlerarası Birlikte Çalışma ve BIM Kullanımı. *Mimarlıkta Sayısal Tasarım Ulusal Sempozyumu*.

Olowa, T., Witt, E., Lill, I., Rasheed, A., Abdulmumin, A., & Adebiyi, R. (2023). Critical Factors for Effective BIM-Enabled Education: An Adaptive Structuration Theory Perspective. *Buildings, 13*(12), 3044.

Özener, O. Ö. (2024). Context-based learning for BIM: simulative role-playing games for strategic business implementations. *Smart and Sustainable Built Environment, 13*(4), 908-933. https://doi.org/10.1108/SASBE-08-2022-0184

Rocha, L. S., Krassmann, A. L., Notare, M. R., & Vidotto, K. N. S. (2025). BIM associated with virtual and augmented reality resources in an educational context: a systematic literature review. *Interactive Learning Environments, 33*(1), 452-465.

Skulmoski, G. J., Hartman, F. T., & Krahn, J. (2007). The Delphi method for graduate research. *Journal of Information Technology Education: Research, 6*(1), 1-21.

Soysal, A., & Yamaçlı, R. (2024). Mimarlık eğitiminde dijital oyunların rolü: Yaratıcı öğrenmeyi desteklemek. *GSI Journals Serie C: Advancements in Information Sciences and Technologies, 7*(2), 58-72.

Takkeci, M. S., & Erdem, A. (2024). McLuhan's Tetrad as a Tool to Interpret the Impact of Online Studio Education on Design Studio Pedagogy. *Trends in Higher Education, 3*(2), 273-296.

Tan, S., Gumusburun Ayalp, G., Tel, M. Z., Serter, M., & Metinal, Y. B. (2022). Modeling the critical success factors for BIM implementation in developing countries: sampling the Turkish AEC industry. *Sustainability*, *14*(15), 9537. 20.

Torun, T., & Tatar, E. (2023). Mimarlık Eğitiminde Oyunlaştırmaya Dayalı Bir Tasarım Süreci Modeli Önerisi. *Bodrum Journal of Art and Design, 2*(1), 128-148.

Ünsaçar, A. S. (2023). Mimarlık Disiplininin Sanal Mekân Araştırmalarındaki Yerinin Bibliyometrik Analizi. [Yüksek lisans tezi]. KTO Karatay Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı, Konya.

Yıldırım, M. (2021). Sanal mekânda kültür coğrafyası çalışmaları ve artırılmış gerçeklik teknolojisinin kullanılması. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, *23*(3), 861-874.

2025 MSTAS MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Dijital İkiz Uygulamaları ve IoT Entegrasyonu Üzerine Bir Literatür İncelemesi

Beyza Muş[1]; Meryem Birgül Çolakoğlu[2]
[1,2]İstanbul Teknik Üniversitesi
[1]mus23@itu.edu.tr; [2]colakoglumer@itu.edu.tr

Özet

*İnşaat sektörü, diğer endüstrilere kıyasla dijitalleşme ve inovasyon açısından geride kalmıştır. Bu bağlamda teknolojik gelişmelere entegre olma süreci, sektör özeline özgü bir dizi zorluk barındırmaktadır. Bununla birlikte, Bina Bilgi Modellemesi (BIM) ve Dijital İkiz (DT) teknolojileri, dijital entegrasyon sürecine ivme kazandıran yenilikçi araçlar olarak ön plana çıkmaktadır. Bu teknolojik altyapılar, enerji optimizasyonu, maliyet tahminleri ve yapı performans analizleri gibi çeşitli uygulama alanlarında çok boyutlu veri üretimini mümkün kılmakta; fiziksel ortamların sanal temsilleri yoluyla karar verme süreçlerinde dönüşüm yaratmaktadır. Özellikle DT sistemleri, çevresel veriler, kullanıcı davranışları ve sistem dinamikleri gibi çok katmanlı bileşenleri gerçek zamanlı olarak izleyip analiz ederek, yapıların mevcut durumuna dair sürekli değerlendirme yapılmasını ve geleceğe yönelik senaryoların oluşturulmasını olanaklı kılmaktadır (*Eneyew vd., 2022*). Bu doğrultuda yürütülen bu çalışma, DT kavramını kavramsal bir çerçevede tanımlamayı; BIM gibi ileri düzey üç boyutlu modelleme teknolojilerinde verinin yapısal rolünü tartışmayı ve bu teknolojilerin profesyonel pratikteki potansiyel yansımalarını değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Literatür incelemesine dayalı olarak yürütülen araştırmada, DT ve veri entegrasyonuna ilişkin temel yaklaşımlar sistematik olarak analiz edilmiş; kavramlar, teknolojik uygulamalar ve mesleki etkiler tematik olarak incelenmiştir. Nitel araştırma stratejisi kapsamında, terimsel ve kavramsal düzeyde derinlemesine analiz gerçekleştirilmiş; bu süreçte PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses) protokolü esas alınarak sistematik bir literatür taraması yürütülmüştür. Çalışmanın odak noktası, dijital ikiz sistemlerinde kullanılan veri entegrasyon yöntemlerini ve bu süreçte karşılaşılan sınırlılıkları tespit ederek, alandaki mevcut fırsat alanlarını ortaya koymaktır.*

Anahtar Kelimeler: *Dijital İkiz, Yapay Zekâ, IoT Entegrasyonu, BIM, Mimarlık.*

2025 MSTAS MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

A Literature Review on Digital Twin Applications and IoT Integration

Beyza Mus[1]; Meryem Birgul Colakoglu[2]
[1,2]Istanbul Technical University
[1]mus23@itu.edu.tr; [2]colakoglumer@itu.edu.tr

Abstract

*The construction sector has lagged behind in terms of digitalization and innovation compared to other industries. In this context, the process of integrating with technological developments poses a number of challenges specific to the sector. However, Building Information Modeling (BIM) and Digital Twin (DT) technologies stand out as innovative tools that accelerate the digital integration process. These technological infrastructures enable multi-dimensional data production in various application areas such as energy optimization, cost estimations and building performance analyses; and transform decision-making processes through virtual representations of physical environments. In particular, DT systems enable continuous assessment of the current status of buildings and the creation of future scenarios by monitoring and analyzing multi-layered components such as environmental data, user behavior and system dynamics in real time (*Eneyew et al., 2022*). In this regard, this study aims to define the concept of DT in a conceptual framework; discuss the structural role of data in advanced three-dimensional modeling technologies such as BIM and evaluate the potential reflections of these technologies in professional practice. In the research conducted based on the literature review, the basic approaches to DT and data integration were systematically analyzed; concepts, technological applications and professional impacts were examined thematically. Within the scope of the qualitative research strategy, an in-depth analysis was carried out at the terminological and conceptual level; in this process, a systematic literature review was conducted based on the PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses) protocol. The focus of the study is to identify the data integration methods used in digital twin systems and the limitations encountered in this process, and to reveal the current opportunity areas in the field.*

Keywords: *Digital Twin, Artificial Intelligence, IoT Integration, BIM, Architecture.*

1. Giriş

Son yıllarda dijitalleşmenin inşaat sektörüne etkisi giderek belirginleşmekte, Yapı Bilgi Modellemesi (Building Information Modelling – BIM) ve Dijital İkiz (Digital Twin – DT) gibi teknolojiler sektörde dönüşümün öncüsü konumuna gelmektedir. BIM ve DT uygulamaları, yalnızca fiziksel varlıkların dijital temsillerini üretmekle kalmayıp; enerji verimliliği, maliyet optimizasyonu, bakım süreçlerinin yönetimi ve yapı performansının sürekli takibi gibi çok boyutlu çıktılar sağlayarak bütüncül bir karar destek mekanizması sunmaktadır. Bu bağlamda DT sistemleri, çevresel faktörler, kullanıcı etkileşimleri ve sistem davranışlarına dair gerçek zamanlı veri toplayarak, yapıların mevcut durumunu izlemeye ve gelecekteki olası senaryoları simüle etmeye olanak tanımaktadır (Eneyew vd., 2022).

Özellikle akıllı bina uygulamalarında, fiziksel ve sanal sistemler arasındaki çift yönlü etkileşim, statik ve dinamik özelliklerin eş zamanlı takibiyle yapıların performans değerlendirmesini daha öngörülebilir kılmaktadır. Ancak bu potansiyele rağmen, DT sistemlerinin yapı ortamına entegrasyonu çeşitli teknik, finansal ve etik engellerle karşı karşıyadır. Özellikle BIM ile Nesnelerin İnterneti (Internet of Things – IoT) arasındaki veri bütünlüğünü sağlama süreci, çok kaynaklı ve heterojen verilerin standart formatlara dönüştürülmesini gerektirmekte; bu durum uygulama süreçlerini karmaşık ve maliyetli hale getirmektedir. Ayrıca büyük hacimli veri setlerinin işlenmesi ve yönetimi için gerekli olan yüksek performanslı altyapı ihtiyacı, uygulama yaygınlığını sınırlayan bir diğer faktördür. Buna ek olarak, sürekli veri akışı gerektiren bu sistemlerde kişisel verilerin toplanması ve analiz edilmesi, mahremiyetin ihlali ve siber güvenlik riskleri gibi önemli etik ve hukuki tartışmaları da beraberinde getirmektedir.

Bu bağlamda, DT teknolojilerinin mesleki uygulamalardaki rolünü ve veri entegrasyonu süreçlerine dair mevcut yaklaşımları daha kapsamlı şekilde değerlendirebilmek adına, konuyla ilgili literatürün sistematik olarak incelenmesi gerekmektedir. Literatürde BIM ve DT tabanlı veri paylaşım ve entegrasyon yöntemlerine dair çeşitli modeller geliştirilmiş, aynı zamanda bu yöntemlerin uygulanabilirliğini etkileyen sınırlayıcı faktörler de ele alınmıştır. Bu çalışmada, mimarlık disiplini bağlamında, DT sistemlerinin veri temelli işleyişi ve BIM ile olan ilişkisi derinlemesine analiz edilerek, mevcut mesleki uygulamalara etkisi değerlendirilmiştir. Çalışma sürecini görselleştiren şematik diyagram **Şekil 1**'de sunulmaktadır.

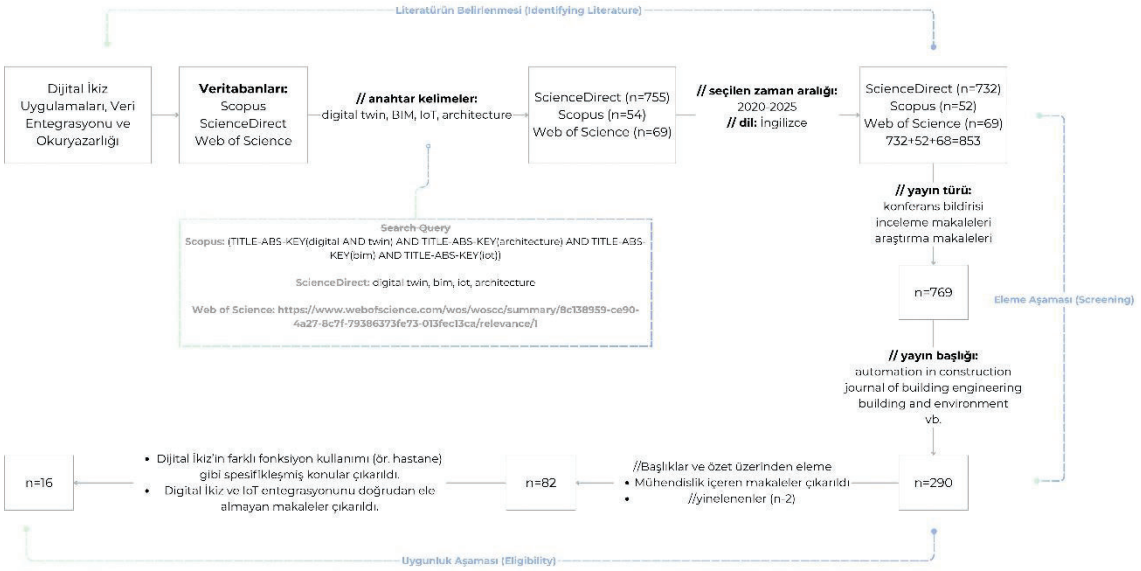
Şekil 1: Çalışma sürecine dair diyagram

2. Yöntem

Bu çalışma, DT uygulamaları ile veri entegrasyonu süreçlerini sistematik bir şekilde analiz etmek amacıyla yapılandırılmıştır. Nitel araştırma yaklaşımı çerçevesinde yürütülen çalışma, mevcut literatürün kapsamlı bir şekilde taranarak tematik olarak analiz edilmesini hedeflemektedir. Bu doğrultuda, temel kavramlar, terimler, kuramsal yaklaşımlar ve güncel araştırmalar karşılaştırmalı biçimde incelenmiş; disiplinler arası bir bakış açısıyla kavramsal bütünlük gözetilerek değerlendirme yapılmıştır.

Araştırma süreci, PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) protokolü esas alınarak yürütülmüştür **(Şekil 2)**. PRISMA yöntemi, sistematik literatür taramasında izlenen tanımlama, tarama ve uygunluk değerlendirmesi olmak üzere üç aşamalı bir metodolojik çerçeve sunmaktadır. İlk aşamada, tanımlama süreci kapsamında MPDI, Scopus, CumInCAD, Web of Science ve ScienceDirect gibi uluslararası akademik veri tabanları üzerinden kapsamlı bir literatür taraması gerçekleştirilmiştir. Odak noktası olarak özellikle Scopus, ScienceDirect ve

Web of Science veri tabanlarına yoğunlaşılmıştır. Tarama sürecinde, "Digital Twin", "BIM", "IoT", "Artificial Intelligence" ve "Architecture" gibi anahtar kelimeler kullanılmış; yayın dili olarak yalnızca İngilizce seçilmiştir. Çalışmalarda yayın tarihi kriteri açısından son beş yıla (2020-2025) öncelik verilmiş; ancak konunun tarihsel gelişimini daha iyi yorumlayabilmek amacıyla son on yıla (2015-2025) ait bazı temel çalışmalar da geriye dönük olarak incelemeye dahil edilmiştir. Araştırma kapsamında toplam 853 akademik yayın değerlendirilmiş; içerik, bağlam ve kapsam açısından yapılan uygunluk değerlendirmeleri sonucunda bu sayı 82 yayınla sınırlandırılmıştır.



Şekil 2: PRISMA yaklaşımı akış şeması

Literatürde DT kavramının yıllara göre gelişimi, mevcuttaki DT kavramının ne olduğu ve ideal DT nedir gibi araştırmalar yapılmıştır. Literatür seçiminde yalnızca DT teknolojisinin bina ve şehir ölçeğinde veri entegrasyonu ve modelleme bağlamında ele alındığı çalışmalar dikkate alınmıştır. Hastane yönetimi, derin mühendislik uygulamaları gibi DT'nin özel uzmanlık alanlarına odaklanan veya IoT ile entegrasyonunu doğrudan incelemeyen çalışmalar kapsam dışı bırakılmıştır. Öne çıkan yayınlar, özet ve içerik üzerinden değerlendirilmiş olup; metodolojik kapsamı geniş olan, güncel olan, konuya net bir şekilde odaklanmış, öneri veya model geliştiren ve uygulama örneği içeren çalışmalar olarak seçilmiştir. Bu değerlendirmelerle seçilen 16 makale odak noktası olmuş ve öne çıkan makaleler **Tablo 1**'de gösterilmiştir.

Tablo 1: Literatür incelemesinde öne çıkan makaleler

	Yayın Türü	Yazar, Yayın Yılı	Başlık	Konu Alanı	Yöntem	Dergiler/ Konferanslar
1	Bilimsel Dergi Makalesi	Nguyen vd., (2023)	The Role of BIM in Integrating Digital Twin in Building Construction: A Literature Review	Sürdürülebilirlik	Literatür İncelemesi	MDPI
2	Bilimsel Dergi Makalesi	Eneyew vd., (2022)	Toward Smart-Building Digital Twins: BIM and IoT Data Integration	Veri Entegrasyonu	Vaka Çalışması	IEEE Access
3	Bilimsel Dergi Makalesi	Hauer vd., (2024)	Integrating Digital Twins with BIM for Enhanced Building Control Strategies: A Systematic Literature Review Focusing on Daylight and Artificial Lighting Systems	Binalar	Literatür İncelemesi	MDPI
4	Kitap Bölümü	Biagini vd., (2024)	BIM and Data Integration: A Workflow for the Implementation of Digital Twins	Kültürel Miras	Vaka Çalışması	Kitap Bölümü

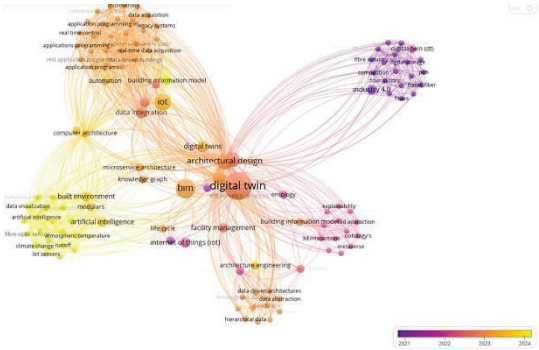
Tablo 1: Literatür incelemesinde öne çıkan makaleler (devamı)

5	Bilimsel Dergi Makalesi	Boukaf vd., (2024)	A Comprehensive Review of Digital Twin Technology in Building Energy Consumption Forecasting	Enerji Tüketimi	Literatür İncelemesi	IEEE Access
6	Bilimsel Dergi Makalesi	Huang vd., (2023)	BIM and IoT data fusion: The data process model perspective	İnşaatta Otomasyon	Vaka çalışması	Scopus
7	Bilimsel Dergi Makalesi	Villa vd., (2021)	Iot open-source architecture for the maintenance of building facilities	Uygulamalı Bilimler	Vaka Çalışması	Scopus
8	Bilimsel Dergi Makalesi	Pan vd., (2021)	A BIM-data mining integrated digital twin framework for advanced project management	İnşaatta Otomasyon	Vaka çalışması	ScienceDirect
9	Bilimsel Dergi Makalesi	Moshood vd., (2024)	Infrastructure digital twin technology: A new paradigm for future construction industry	Toplumda Teknoloji	Literatür İncelemesi	ScienceDirect
10	Bilimsel Dergi Makalesi	Negri vd., (2017)	A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems	İnşaat ve Yapı Mühendisliği	Literatür İncelemesi	ScienceDirect
11	Konferans Bildirisi	Boje vd., (2021)	A 4D BIM System Architecture for the Semantic Web	Bina Mühendisliği	Literatür İncelemesi	Springer International Publishing
12	Bilimsel Dergi Makalesi	Ikudayisi vd., (2023)	Integrated practices in the Architecture, Engineering, and Construction industry: Current scope and pathway towards Industry 5.0	Procedia Üretim	Bibliyometrik tarama	ScienceDirect
13	Bilimsel Dergi Makalesi	Fuller vd., (2020)	Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research	İnşaatta Otomasyon	Literatür İncelemesi	IEEE Access
14	Bilimsel Dergi Makalesi	Ghansah vd., (2024)	Major opportunities of digital twins for smart buildings: a scientometric and content analysis	Akıllı Binalar İçin Dijital İkiz	Bilimsel Ölçüm	Research Gatte
15	Bilimsel Dergi Makalesi	Osama, (2024)	The digital twin framework: A roadmap to the development of user- centred digital twin in the built environment	Dijital İkizler	Vaka Çalışması	ScienceDirect
16	Bilimsel Dergi Makalesi	Charitonidou, (2022)	Urban scale digital twins in data-driven society: Challenging digital universalism in urban planning decision-making	Kentsel Planlama	Vaka Çalışması	International Journal of Architectural Computing

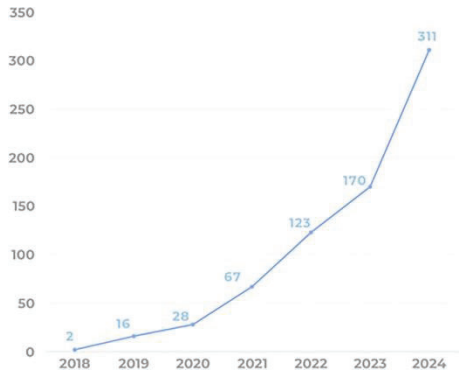
Sonuçlar, bir ''.RIS'' dosyası olarak bibliyografik verileri ve ilgili araştırma materyallerini yönetmek için referans yönetimi yazılımı olan Zotero aracılığıyla listelenmiştir. VOSviewer yazılımı aracığıyla makalelerdeki anahtar kelime ağları kümeleri ve kelimelere göre kümelenmesi **Şekil 3** ve **Şekil 4** 'de gösterilmiştir. ScienceDirect'de yıllara göre bu anahtar kelimelerle 2022 yılında bu konularda yayınlanan makalelerde ciddi bir artış yaşanmış olup 2024 yılında bu sayıda zirve yaşanmıştır **(Şekil 5)**.

ScienceDirect'de yıllara göre bu anahtar kelimelerle 2022 yılında bu konularda yayınlanan makalelerde ciddi bir artış yaşanmış olup 2024 yılında bu sayıda zirve yaşanmıştır **(Şekil 5)**. Literatürde DT kavramının yıllara göre gelişimi

mevcuttaki DT kavramının ne olduğu ve ideal DT nedir gibi araştırmalar yapılmıştır. Bu incelemeler kavramların özetlenmesini sağlamıştır. Günümüzde veri entegrasyonu nasıl yapıldığına dair incelemeler yapılmıştır.



Şekil 3: Yıla göre anahtar kelime eş-oluşum haritası. **Şekil 4:** 'digital twin' anahtar kelime kümesi.



Şekil 5: ScienceDirect üzerinden belirtilen anahtar kelimelerle yapılan aramada çıkan yıllara göre yayın sayısı.

3. Literatür Analizi

3.1. Dijital İkiz'in (DT) Kavramsal ve Tarihsel Gelişimi

DT teknolojisi, endüstriyel dijitalleşmenin farklı evreleri ile evrilerek çok boyutlu bir yapıya ulaşmıştır. DT kavramı, özellikle Endüstri 4.0 bağlamında şekillenmiş; fiziksel sistemlerin dijital ortamda temsili yoluyla operasyonel süreçlerin izlenmesi, simülasyonu ve optimizasyonunu hedefleyen bütüncül bir yaklaşım olarak tanımlanmıştır (Moshood vd., 2024). Bununla birlikte, kavramın kökeni daha önceki dijitalleşme aşamalarına, yani Endüstri 3.0'a kadar uzanmakta olup; burada veri üretimi ve dijital kontrol sistemleri ile sınırlı bir çerçevede ele alınmaktaydı.

Endüstri 4.0 ile, IoT, yapay zekâ, büyük veri analitiği, artırılmış gerçeklik ve bulut bilişim gibi teknolojilerin gelişmesiyle birlikte DT'nin işlevsel kapsamı genişlemiştir (Ikudayisi vd., 2023). Gerçek zamanlı veri akışına dayalı olarak fiziksel ve dijital sistemler arasında çift yönlü bir etkileşim sağlanmakta; bu sayede dinamik analiz, kestirimci bakım, enerji yönetimi ve kullanıcı deneyimi odaklı çözümler geliştirilebilmektedir (Nguyen vd., 2023).

Endüstri 5.0, insan-merkezli yaklaşımıyla yapay zekâ ve insan iş gücünün birlikte çalıştığı hibrit sistemleri öne çıkarırken, DT'yi yalnızca teknik bir araç değil, kişiselleştirilebilir ve sürdürülebilir tasarım süreçlerine entegre edilebilen bir yapı olarak konumlandırır. Kavramsal düzeydeki Endüstri 6.0 ise Yapay Süper Zekâ, biyoteknoloji, kuantum bilişim ve IoE (Internet of Everything) gibi ileri teknolojilerle tamamen otonom, sıfır atıklı ve tümüyle bağlantılı DT sistemlerini öngörmektedir.

3.2. Dijital İkiz Tanımlarının Evrimi

Negri vd. (2017) tarafından yapılan kapsamlı incelemede, 2010–2016 yılları arasında DT kavramına ilişkin tanımların büyük ölçüde havacılık ve mühendislik odaklı olduğu; bu tanımlarda fiziksel varlığın yüksek gerçeklik düzeyinde dijital bir temsili olduğu vurgulanmaktadır. İlk dönem tanımlar, daha çok sistemin geçmiş performans verilerini içeren sensör destekli modelleri kapsamaktaydı. 2013 yılından itibaren tanımlar IoT ve bütünleşik veri modellerine yönelmiş;

simülasyon ve çoklu veri kaynaklarının entegrasyonu gündeme gelmiştir. 2016 sonrası tanımlarda ise DT, mimarlık, yazılım, elektrik ve mekanik gibi disiplinler arası alanlarda uygulanabilir bir araç olarak konumlandırılmıştır.

Fuller vd. (2020) ise, 2012–2020 yılları arasındaki DT tanımlarında anlamlı bir değişim gözlemlenmediğini; ancak kavramın çoğu zaman yalnızca dijital model veya dijital gölge ile karıştırıldığını belirtmiştir. Bu bağlamda, DT'nin salt 3B geometrik bir temsil olmadığı; fiziksel ve dijital sistemler arasında çift yönlü, gerçek zamanlı ve otonom veri alışverişini temel alan bütüncül bir yapıyı ifade ettiği vurgulanmaktadır. Negri ve Fuller'ın çalışmalarında yer verdiği DT tanımlarına ek olarak 2025 yılına kadar yapılmış tanımlamalara **Tablo 2**'te yer verilmiştir.

Tablo 2: Negri vd. ve Fuller vd., çalışmaları esas alınarak 2010-2024 yılları arası literatürdeki Dijital İkiz tanımları.

Esas Alınan Çalışamalar	Dijital İkiz Tanımı	Ref.
Negri vd., 2017.	En iyi fiziksel modelleri, sensör güncellemelerini, filo geçmişini vb. kullanan, ultra gerçekçi, çok ölçekli ve olasılıksal bir araç veya sistem simülasyonu. Dijital ikiz, birbirine bağlı önemli araç sistemlerini içerebilir.	Shafto vd., 2010 ve Glaessgen vd., 2012.
	Bir uçak yapısının, elektronikler, uçuş kontrolleri, tahrik sistemi ve diğer alt sistemleri içeren, görev gereksinimlerini karşılama yeteneğini modelleyen "beşikten mezara" (cradle-to-grave) dijital modelidir.	Tuegel, 2012.
	Malzeme seviyesindeki özelliklere ait nicel verileri içeren yapısal model.	Majumdar vd., 2013.
	Yorulma hasarını içeren ve ilgili yapısal sistemin eksiksiz bir dijital karşılığını sunan yüksek hassasiyetli yapısal model.	Bielefeldt vd., 2015.
	Nesnelerin interneti ve hizmetleri içinde akıllı nesneler olarak hareket eden, sanal temsillerden ve iletişim yeteneklerinden oluşan gerçek dünya nesnelerinin sanal ikameleri.	Bazilevs vd., 2016.
Fuller vd., 2020.	Dijital ikiz, tüm işlevsel özellikleri temsil eden ve çalışma elemanlarıyla bağlantı kuran fiziksel bir cihaz veya sistemin bilgisayarlaştırılmış bir modelidir.	Chen, 2017.
	Dijital ikiz, aslında fiziksel varlığın veya sistemin canlı bir modelidir; toplanan çevrimiçi veriler ve bilgiler temelinde operasyonel değişikliklere sürekli olarak uyum sağlar ve ilgili fiziksel karşılığın geleceğini tahmin edebilir.	Liu vd., 2018.
	Dijital İkiz, fiziksel sistemin yaşam döngüsü boyunca sürekli olarak performans, bakım ve sağlık durumu verileriyle güncellenen fiziksel bir sistemin sanal bir örneğidir.	Madni vd., 2019.
Muş ve Çolakoğlu, 2025.	Dijital ikiz, fiziksel ve dijital alanlar ile aralarındaki veri bağlantısından oluşur. Bu yapı, gerçek zamanlı veri akışıyla fiziksel varlığın sanal modelini güncelleyerek mevcut durumunu yansıtır ve geleceğe yönelik tahminler sunar.	Villa vd., 2021.
	Dijital ikiz, fiziksel sistemlerin dijital kopyalarını oluşturarak performans, operasyon ve bakım süreçlerini optimize etmek için kullanılan bir çerçevedir.	Charitonidou, 2022.
	Dijital ikiz, BIM ve IoT verilerinin bütünleşik şekilde kullanılarak, fiziksel yapıların operasyonel durumunu sürekli yansıtan ve çeşitli analiz, tahmin ve karar destek süreçlerine entegre edilebilen veri odaklı bir dijital modeldir.	Huang vd., 2023.
	BIM planlama sürecine kontrol stratejilerinin entegrasyonunun mevcut durumu ve bu stratejilerin inşaat ve işletme modellerine daha ileri düzeyde yansıtılması, binaların tasarımından kullanım aşamasına kadar olan süreci kolaylaştırma ve optimize etme potansiyeli taşımaktadır.	Hauer vd., 2024.

3.3. BIM ve IoT Entegrasyonu ile Dijital İkiz'e Dönüşüm

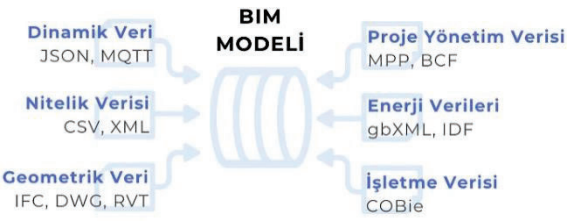
BIM, DT teknolojilerinin temel yapı taşlarından biri olarak kabul edilmekte ve fiziksel varlıkların yaşam döngüsü boyunca dijital temsilini mümkün kılan bir veri altyapısı sunmaktadır. BIM'in sunduğu 3B modelleme kapasitesi, yapısal öğelerin geometrik, malzeme ve performans bilgileriyle zenginleştirilmesine olanak tanımakta; bu sayede DT sistemlerinin oluşturulması için gerekli olan semantik taban sağlanmaktadır (Boukaf vd., 2024). BIM'in tasarım ve

yapım odaklı yapısı, DT'nin operasyonel süreçlerdeki veri ihtiyacına doğrudan katkı sağlamaktadır. Özellikle bina işletimi, enerji yönetimi, bakım senaryoları ve kullanıcı etkileşimleri gibi DT'nin temel uygulama alanları, BIM modellerinin genişletilmesi yoluyla desteklenmektedir.

Veri entegrasyonu, DT sistemlerinin gerçek zamanlı işleyişini mümkün kılan en kritik bileşenlerden biridir. Bu kapsamda BIM'e entegre edilen veri türleri çok katmanlıdır **(Şekil 6)**; Geometrik veriler (IFC, RVT, DWG gibi) yapı sistemlerinin fiziksel temsillerini sunarken, Nitelik verileri (CSV, XML) malzeme bilgisi, maliyet, performans ve kullanıcı taleplerini kapsamaktadır. Dinamik veriler (JSON, MQTT gibi formatlar), IoT sensörlerinden gelen çevresel ve operasyonel girdileri temsil etmektedir. Enerji verileri (ör. gbXML, IDF), karbon ayak izi, enerji tüketimi ve simülasyon tabanlı analizler için kullanılmaktadır. Yönetimsel veriler (BCF, MPP, COBie), proje takvimi, görev atamaları ve tesis yönetimi süreçlerine entegre edilmektedir. Bu veri tiplerinin eşgüdümlü biçimde işlenebilmesi için farklı entegrasyon stratejileri geliştirilmiştir. Bunlar arasında: API Tabanlı Yöntemler, BIM yazılımlarının sunduğu arayüzler (ör. Revit API, Dynamo, Grasshopper) kullanılarak sensör verileri ile BIM objeleri arasında bağ kurmayı sağlar. Yeni Veri Şemaları, karmaşık modellerin daha yönetilebilir hale getirilmesi için özetlenmiş veri temsilleri geliştirir; ancak bu yöntem yüksek düzeyde uzmanlık gerektirir. Semantik Web Tabanlı Yöntemler, RDF, OWL ve SPARQL gibi teknolojiler aracılığıyla verinin makine tarafından okunabilirliğini artırır; ancak veri dönüştürme süreci karmaşık ve zaman alıcıdır. Hibrit Yöntemler, sensör verilerini ilişkisel veri tabanlarında saklarken BIM ile ilgili içerikler semantik biçimde temsil edilir; performans ve esneklik açısından avantaj sağlar.

Veri senkronizasyonunda yaşanan teknik zorluklar, özellikle farklı veri formatlarının uyumlaştırılması, veri akışının kesintisiz sağlanması ve güvenli veri depolama altyapılarının oluşturulması konularında çözüm gerektirmektedir. Bu noktada buildingSMART tarafından geliştirilen Industry Foundation Classes (IFC) standardı, disiplinler arası birlikte çalışabilirlik için temel bir yapı sunmaktadır (Eneyew vd., 2022).

BIM tabanlı verinin bu şekilde çok katmanlı entegrasyonu, DT sistemlerinin yalnızca izleme ve raporlama değil, aynı zamanda kestirimci analiz, otomatik optimizasyon ve otonom karar alma gibi yeteneklere ulaşmasını mümkün kılmaktadır (Biagini vd., 2024; Nguyen vd., 2023). Yapılan literatür taramalarından çıkarılan sonuca göre DT süreci **Şekil 7**'da gösterilmiştir.



Şekil 6: BIM ve IoT entegrasyonunda kullanılan veriler. **Şekil 7:** BIM'in yapılı çevrede dijital ikiz entegrasyonuna doğru gelişimi.

Aşağıdaki tablo, araştırma makalelerinin organizasyonunu ve okunabilirliğini artırmak için daha fazla bilgi ve incelenen makalelerin temel bulgularını ve metodolojik yönlerini sunar **(Tablo 3).**

Tablo 3: Öne çıkan makalelerin içerik özeti tablosu.

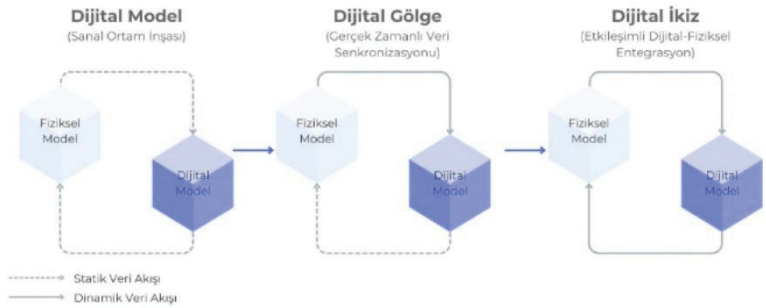
	Yazarlar, Yayın Yılı	Araştırma Metodolojileri	Temel Bulgular	Araştırma Açığı
1	Nguyen vd., (2023)	BIM ve Dijital İkiz teknolojilerinin benzerliklerini, farklarını ve entegrasyon potansiyelini inceleyen literatür taraması.	Entegrasyon, inşaat süreçlerinde sürdürülebilirlik ve verimlilik sağlar; gerçek zamanlı veri kritik rol oynar.	Teknik ve organizasyonel zorluklara yönelik ampirik çalışmalar eksik.
2	Eneyew vd., (2022)	Akıllı binalar için çok katmanlı bir BIM-IoT dijital ikiz mimarisi sunumu.	BIM, DT ve CPS arasındaki sınırlar bulanıklaşmakta, uygulamada belirsizlik yaratmaktadır.	Kavramların sınırları net değil; entegrasyonun ampirik etkileri araştırılmalı.
3	Hauer vd., (2024)	BIM'in akıllı bina kontrol sistemleriyle ilişkisini sistematik literatür analiziyle inceler.	Sensörlerle sağlanan gerçek zamanlı veri sayesinde iç mekân konforu ve enerji verimliliği iyileştirilebilir.	Uygulamalı entegrasyon örnekleri ve standart yöntemler eksik.
4	Biagini vd., (2024)	BIM-IoT entegrasyonu ile dijital ikiz oluşturma iş akışı geliştirir.	Snap4City platformu üzerinden çevresel verilerle gerçek zamanlı entegrasyon sağlanmıştır.	İş akışı kullanıcı dostu değil, veri semantiği sınırlı yansıtılıyor.
5	Boukaf vd., (2024)	Dijital ikizlerin bileşenlerini ve uygulamalarını derinlemesine inceler.	Dijital ikizler, enerji tüketimi tahmininde ve HVAC sistemlerinde başarıyla kullanılmıştır.	Tasarım aşamasında uygulamalar sınırlı; sistemler arası bütünleşme sorunlu.
6	Huang vd., (2023)	BIM-IoT veri füzyonunu, bilgi bilimi yaklaşımlarıyla analiz eder.	Bağlamsal farkındalık ve semantik çıkarımlarla karar destek sistemleri geliştirilebilir.	Veri şemaları, düşük veri kalitesi ve güvenlik sorunları entegrasyonu zorlaştırıyor.
7	Villa vd., (2021)	IoT ve BIM tabanlı dijital ikiz mimarisi geliştirir.	Kullanıcı geri bildirimi bütünleştiren çok katmanlı açık kaynak sistem önerilmiştir.	Mevcut sistemler genelde ticarî ve kullanıcı merkezli tasarımlar eksik.
8	Pan vd., (2021)	BIM, IoT ve veri madenciliğini entegre eden dijital ikiz çerçevesi sunar.	Proje yönetiminde karar alma ve operasyonel verimlilik artar.	Uzun vadeli değerlendirme ve farklı proje ölçeklerinde test eksik.
9	Moshood vd., (2024)	DT'nin inşaat sürecine entegrasyon potansiyelini inceler.	Paydaşlar arası veri paylaşımı ve koordinasyon artar, teslimat süreçleri iyileşir.	Sektördeki uygulamalara dair vaka çalışması yetersiz.
10	Negri vd., (2017)	Dijital ikiz tanımlarını literatürde kavramsal olarak analiz eder.	DT'ler üretim sistemlerinde karar destek için önemlidir.	Ortak tanım ve standart veri modeli eksikliği devam ediyor.
11	Boje vd., (2021)	4D BIM, semantik web ve kullanıcı etkileşimi odaklı prototip sistem geliştirilmiştir.	Semantik web ile çok kaynaklı veriler senkronize edilerek 4D iş birliği artırılmıştır.	Ontoloji temelli sistemler karmaşık; RDF modellerin insan girdileriyle entegrasyonu araştırılmalı.
12	Ikudayisi vd., (2023)	IPD uygulamalarını bibliyometrik olarak 573 makale üzerinden analiz eder.	IPD iş birliğini artırır, geleneksel teslimatlara göre daha verimli bulunmuştur.	Daha fazla vaka çalışması ve uzun dönemli gözlem gerek.
13	Fuller vd., (2020)	Dijital ikiz teknolojisinin mevcut literatürünü değerlendirir.	Uygulama potansiyeli yüksek ancak veri güvenliği ve model doğruluğu kritik sorunlar.	Uygulama süreçlerindeki zorlukları ele alan deneysel çalışma eksik.
14	Ghansah vd., (2024)	Scientometric analizle akıllı binalarda dijital ikiz uygulamalarını inceler.	Verimlilik ve kullanıcı etkileşimi açısından dört ana fırsat ve 24 alt tema tanımlanmıştır.	Uygulama potansiyelinin derinlemesine anlaşılması için vaka çalışmaları gerekli.
15	Osama, (2024)	Kent ölçeğinde dijital ikizleri eleştirel teori ile inceler.	İnsan-merkezli DT'ler, kullanıcı girdileriyle bağlamsal farkındalık sağlar.	Literatürde insan-merkezli uygulama rehberliği eksik.
16	Charitonidou, (2022)	Üretim verilerini kullanarak DT uygulamalarını değerlendirir.	Kent planlama için potansiyel sunar ancak sosyo-teknik katmanlar zayıf kalmaktadır.	Katılımcılığı gözeten, adil karar destek sistemlerine ihtiyaç var.

3.4. Kentsel ve Toplumsal Ölçekte Dijital İkiz

DT teknolojisi, yalnızca bina düzeyinde değil, kent ölçeğinde de önemli bir dönüşüm potansiyeli taşımaktadır. Kentsel planlama, altyapı yönetimi ve vatandaş katılımı gibi alanlarda çok katmanlı veri entegrasyonuna olanak sağlayarak,

kentleri daha akıllı ve duyarlı hale getirebilir. Bu bağlamda geliştirilen kent ölçekli DT'ler; yapı stoğu, kullanıcı davranışları, enerji tüketimi, ulaşım hareketliliği ve çevresel faktörler gibi farklı veri katmanlarını bir araya getirerek, kentsel sistemlerin izlenmesini, analiz edilmesini ve geleceğe yönelik senaryoların üretilmesini mümkün kılar. Osama (2024) tarafından önerilen kavramsal yol haritası, şehirlerin DT temsillerinin hem fiziksel hem sosyal verilerle sürekli güncellenmesi sayesinde öngörücü senaryolar üretebileceğini ve böylece kullanıcıların mekânsal ihtiyaçlarına proaktif biçimde yanıt verebileceğini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, dijital ikizler yalnızca teknolojik çözümler sunan modeller değil; aynı zamanda insan-merkezli, katılımcı ve toplumsal etkileşim temelli yapılar olarak ele alınmalıdır. Charitonidou (2022), kentsel ölçekte geliştirilen dijital ikizlerin teknik faydalarının yanı sıra, bu sistemlerin kent sakinlerinin gündelik yaşamına nasıl entegre edilebileceğini ve vatandaş katılımını nasıl teşvik edebileceğini sorgulayan öncü bir yaklaşım ortaya koymuştur. Charitonidou'nun çalışması, dijital evrenselcilik anlayışına eleştirel bir bakış geliştirerek, dijital ikizlerin toplumsal bağlamda öngörülemeyen yan etkilerine dikkat çekmektedir. Dijital modellerin sadece öngörüsel algoritmalara değil, aynı zamanda sosyo-ekonomik dinamiklere ve yerel kullanıcı verilerine dayalı olarak yeniden yapılandırılması gerektiğini savunmaktadır.

Bu yönüyle DT, dijital model (statik veri), dijital gölge (tek yönlü gerçek zamanlı veri) ve çift yönlü dinamik DT sistemleri arasında niteliksel bir farklılık taşımaktadır. DT'ler, fiziksel ve dijital sistemler arasında karşılıklı veri akışı sağlayarak yalnızca mevcut durumun yansıması değil; aynı zamanda geleceğin senaryolaştırılmasında aktif rol oynayan akıllı sistemlerdir (Fuller vd., 2020; Shepard, 2022) **(Şekil 8).** Bu da özellikle şehir planlamasında daha kapsayıcı, adaptif ve duyarlı stratejilerin geliştirilmesini mümkün kılmaktadır. Amsterdam'da inşa edilen ve 28.000 sensörüyle halen "dünyanın en akıllı binası" olarak kabul edilen *The Edge* örneğinde görüldüğü üzere, kullanıcıların günlük alışkanlıklarını öğrenebilen, enerji tüketimini optimize eden ve sürdürülebilirlik skorlarında zirveye ulaşabilen dijital yapılar, kentlerin gelecekteki dönüşümünü de şekillendirecek DT mimarisinin habercisidir (Biagini vd., 2024).



Şekil 8: Dijital Mimari Modeller

4. Tartışma ve Kısıtlar

Bu çalışma kapsamında yürütülen sistematik literatür incelemesi, DT teknolojisinin mimarlık ve yapı yönetimi alanındaki uygulama potansiyelini ortaya koyarken, veri entegrasyonu, gerçek zamanlı sistemler ve çok disiplinli iş birliği gibi alanlarda önemli ilerlemeler sağlandığını göstermektedir. Özellikle BIM tabanlı modellerin IoT altyapılarıyla bütünleştirilerek DT sistemlerine dönüştürülmesi, akıllı yapıların yaşam döngüsü boyunca izlenebilirliğini artırmakta ve karar destek mekanizmalarının kalitesini yükseltmektedir. Bununla birlikte, elde edilen bulgular; mevcut uygulamaların önemli sınırlamalar içerdiğini ve DT'nin yaygınlaşmasının önünde hem teknik hem yönetsel hem de etik engellerin bulunduğunu da açıkça ortaya koymaktadır.

Teknik açıdan, dijital ikizlerin gerektirdiği yüksek hacimli verinin toplanması, işlenmesi ve gerçek zamanlı olarak senkronize edilmesi, mevcut altyapılar açısından ciddi bir efor ve kaynak gerektirmektedir. Sensör teknolojilerinin kalibrasyonu, veri doğruluğu ve tutarlılığı gibi unsurlar, DT sistemlerinin güvenilirliği açısından belirleyici faktörlerdir. Ayrıca, BIM ve IoT verileri arasında format uyumsuzluğu, semantik modelleme eksiklikleri ve farklı disiplinler arası entegrasyon güçlükleri, operasyonel bütünlüğü olumsuz etkileyebilmektedir (Eneyew vd., 2022; Nguyen vd., 2023). Veri büyüklüğü arttıkça sorgu yanıt sürelerinde yaşanan gecikmeler ve paralel işleme gereksinimi, özellikle gerçek zamanlı uygulamalarda performans darboğazları yaratabilmektedir. Bu bağlamda, özellikle semantik web tabanlı ve hibrit veri yönetim sistemleri, yüksek performans beklentisi olan DT uygulamaları için daha verimli alternatifler sunmaktadır; ancak bu sistemlerin uygulanabilirliği halen sınırlı ölçeklidir. Etik ve yasal bağlamda, DT sistemleriyle toplanan verilerin kişisel veri kategorisinde değerlendirilebilir olması, mahremiyet ihlali risklerini beraberinde getirmektedir. Gerçek zamanlı izleme, bireylerin davranışlarının sürekli takip edilmesini olanaklı kılarken, aynı zamanda

veri gizliliği, siber güvenlik, etik denetim ve yasal regülasyon gibi alanlarda belirsizlikler yaratmaktadır. Olası siber saldırılar, yalnızca kullanıcıların verilerini değil, sistemlerin bütünlüğünü de riske atmaktadır.

Literatür ayrıca, DT teknolojisinin kentsel ve bölgesel ölçekteki uygulamalarında önemli araştırma boşluklarına işaret etmektedir. DT sistemlerinin şehir ölçeğinde uygulanmasına ilişkin çalışmalar sınırlı kalmış; toplumsal katılım, sosyal eşitsizlikler, çevresel adalet gibi boyutlar yeterince derinlemesine ele alınmamıştır. Özellikle, vatandaş odaklı geri bildirim mekanizmalarının DT modellerine entegre edilmesi, bu alanda ilerleme sağlanması için kritik bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır (Charitonidou, 2022). DT uygulamalarının yalnızca teknik değil, aynı zamanda yönetişimsel, etik ve sosyal yönleriyle birlikte değerlendirilmesi, bu teknolojinin sürdürülebilir ve kapsayıcı bir şekilde yapı sektörüne ve kent yönetimine entegre edilmesini sağlayacaktır.

5. Sonuçlar

Bu çalışma, DT teknolojisinin mimarlık, yapı yönetimi ve kentsel planlama alanlarındaki potansiyelini çok katmanlı bir bakış açısıyla değerlendirmiştir. Sistematik literatür taraması ve tematik analiz yoluyla ulaşılan bulgular, DT sistemlerinin sadece fiziksel yapıların dijital temsilleri olmanın ötesine geçerek, karar destek sistemlerinden enerji optimizasyonuna, kullanıcı etkileşiminden tahminleme algoritmalarına kadar uzanan geniş bir uygulama yelpazesinde stratejik değer sunduğunu ortaya koymaktadır.

BIM, DT oluşumunun temel yapıtaşlarından biri olarak konumlanmakta; geometrik, niteliksel ve zamansal verilerin bütünleşik biçimde işlenmesine olanak sağlayan bir çatı sistem görevi görmektedir. Bununla birlikte, DT uygulamalarının yaygınlaşabilmesi için yalnızca teknik yeterlilikler değil, aynı zamanda semantik bütünlük, veri güvenliği, çok disiplinli uyum ve kullanıcı merkezli tasarım kriterlerinin de eş zamanlı olarak geliştirilmesi gerekmektedir.

Bu bağlamda, çalışmanın ortaya koyduğu temel sonuçlar şu şekilde özetlenebilir; DT sistemlerinin operasyonel etkinliği, yüksek doğrulukta veri entegrasyonuna ve gerçek zamanlı sistem etkileşimine doğrudan bağlıdır. BIM'in sunduğu yapısal temel, DT için bir zemin teşkil ederken; veri formatlarının uyumsuzluğu, performans darboğazları ve yüksek işlem maliyetleri gibi teknik sınırlılıklar uygulama ölçeğini sınırlandırmaktadır. Etik ve hukuki boyutta, kişisel verilerin toplanması ve işlenmesine ilişkin yasal düzenlemeler ve siber güvenlik protokollerinin yeniden tanımlanması gerekmektedir. DT uygulamalarının kentsel ölçekteki entegrasyonu, sosyal katılım, toplumsal eşitsizlik ve mekânsal adalet gibi temalarla birlikte ele alınmalıdır.

Gelecek Araştırmalar İçin Öneriler

Gelecek araştırmaların aşağıdaki tematik başlıklara yönelmesi hem akademik literatürdeki boşlukları dolduracak hem de uygulama alanındaki dönüşümü hızlandıracaktır.

1. Çift Yönlü Öğrenen Sistemler: DT sistemlerinin sadece veri toplayan değil, aynı zamanda öğrenen ve karar verebilen otonom yapılara dönüşebilmesi için makine öğrenmesi ve yapay zekâ temelli modellerin geliştirilmesi.
2. Standardizasyon ve Açık Veri Formatları: BIM, IoT ve DT sistemleri arasında kesintisiz veri alışverişini mümkün kılacak yeni nesil veri şemalarının ve açık kaynak kodlu protokollerin geliştirilmesi.
3. Kentsel Dijital İkizlerin Sosyal Entegrasyonu: Vatandaş odaklı geri bildirim mekanizmalarının, sosyo-ekonomik ve çevresel göstergelerin dijital ikiz sistemlerine entegre edilerek şehir planlamasında kullanılabilirliğinin artırılması.
4. Etik Kodlar ve Regülasyonlar: DT sistemleriyle ilgili veri mahremiyeti, şeffaflık, hesap verebilirlik ve etik denetim ilkelerinin disiplinler arası bir bakışla yeniden ele alınması.
5. Disiplinler Arası İş Birliği Modelleri: Mimarlık, şehircilik, bilişim mühendisliği, etik ve hukuk gibi disiplinlerin ortak paydasında geliştirilecek çok aktörlü dijital ikiz projelerinin uygulanabilirliğinin araştırılması.

DT teknolojisi mimarlık ve yapı sektöründe yalnızca dijitalleşmenin bir aracı değil, aynı zamanda veri temelli, adaptif ve etik değerlere duyarlı yeni bir tasarım ve yönetim paradigmasının temsilcisi olarak görülmelidir. Bu bağlamda yürütülecek bütüncül ve yenilikçi çalışmalar, DT'nin sürdürülebilir yapılı çevrelerin inşasında daha güçlü ve kapsayıcı bir rol üstlenmesini mümkün kılacaktır.

KAYNAKLAR

Bazilevs, Y., Deng, X., Kor Bazilevs, Y., Deng, X., Korobenko, A., Lanza di Scalea, F., Todd, M. D., & Taylor, S. G. (2015). Isogeometric Fatigue Damage Prediction in Large-Scale Composite Structures Driven by Dynamic Sensor Data. *Journal of Applied Mechanics*, *82*(091008). https://doi.org/10.1115/1.4030795

Biagini, C., & Bongini, A. (2024). BIM and Data Integration: A Workflow for the Implementation of Digital Twins. Içinde A. Giordano, M. Russo, & R. Spallone (Ed.), *Beyond Digital Representation: Advanced Experiences in AR and AI for Cultural Heritage and Innovative Design* (ss. 821-835). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-36155-5_53

Bielefeldt, B., & Hochhalter. (2015). Computationally Efficient Analysis of SMA Sensory Particles Embedded in Complex Aerostructures Using a Substructure Approach | Request PDF. *ResearchGate*. https://doi.org/10.1115/SMASIS2015-8975

Boje, C., Kubicki, S., & Guerriero, A. (2021). A 4D BIM System Architecture for the Semantic Web. Içinde E. Toledo Santos & S. Scheer (Ed.), *Proceedings of the 18th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering* (ss. 561-573). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-51295-8_40

Boukaf, M., Fadli, F., & Meskin, N. (2024). A Comprehensive Review of Digital Twin Technology in Building Energy Consumption Forecasting. *IEEE Access*, *12*, 187778-187799. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3498107

Charitonidou, M. (2022). *Urban scale digital twins in data-driven society: Challenging digital universalism in urban planning decision-making*. https://doi.org/10.1177/14780771211070005

Chen, Y. (2017). Integrated and Intelligent Manufacturing: Perspectives and Enablers. *Engineering*, *3*(5), 588-595. https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.04.009

Eneyew, D. D., Capretz, M. A. M., & Bitsuamlak, G. T. (2022). Toward Smart-Building Digital Twins: BIM and IoT Data Integration. *IEEE Access*, *10*, 130487-130506. IEEE Access. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3229370

Fuller, A., Fan, Z., Day, C., & Barlow, C. (2020). Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. *IEEE Access*, *PP*, 1-1. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358

Ghansah, F. A., & Lu, W. (2024). Major opportunities of digital twins for smart buildings: A scientometric and content analysis. *Smart and Sustainable Built Environme*. https://doi.org/10.1108/SASBE-09-2022-0192

Glaessgen, E., & Stargel, D. (2012). *The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles | Structures, Structural Dynamics, and Materials and Co-located Conferences*. Geliş tarihi 22 Nisan 2025, gönderen https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2012-1818

Hauer, M., Hammes, S., Zech, P., Geisler-Moroder, D., Plörer, D., Miller, J., van Karsbergen, V., & Pfluger, R. (2024). Integrating Digital Twins with BIM for Enhanced Building Control Strategies: A Systematic Literature Review Focusing on Daylight and Artificial Lighting Systems. *Buildings*, *14*(3), Article 3. https://doi.org/10.3390/buildings14030805

Huang, X., Liu, Y., Huang, L., Onstein, E., & Merschbrock, C. (2023). BIM and IoT data fusion: The data process model perspective. *Automation in Construction*, *149*. Scopus. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104792

Ikudayisi, A. E., Chan, A. P. C., Darko, A., & Adedeji, Y. M. D. (2023). Integrated practices in the Architecture, Engineering, and Construction industry: Current scope and pathway towards Industry 5.0. *Journal of Building Engineering*, *73*, 106788. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106788

Liu, Z., Meyendorf, N., Blasch, E., Tsukada, K., Liao, M., & Mrad, N. (2018). The Role of Data Fusion in Predictive Maintenance Using Digital Twins. Içinde N. Meyendorf, N. Ida, R. Singh, & J. Vrana (Ed.), *Handbook of Nondestructive Evaluation 4.0* (ss. 1-23). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48200-8_65-1

Madni, A. M., Madni, C. C., & Lucero, S. D. (2019). Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering. *Systems*, *7*(1), Article 1. https://doi.org/10.3390/systems7010007

Majumdar, P., & Haider. (2024). Multi-physics Response of Structural Composites and Framework for Modeling Using Material Geometry. *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/publication/268458408_Multi-physics_Response_of_Structural_Composites_and_Framework_for_Modeling_Using_Material_Geometry

Moshood, T. D., Rotimi, J. OB., Shahzad, W., & Bamgbade, J. A. (2024). Infrastructure digital twin technology: A new paradigm for future construction industry. *Technology in Society*, *77*, 102519. https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2024.102519

Negri, E., Fumagalli, L., & Macchi, M. (2017). A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems. *Procedia Manufacturing*, *11*, 939-948. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.198

Nguyen, T. D., & Adhikari, S. (2023). The Role of BIM in Integrating Digital Twin in Building Construction: A Literature Review. *Sustainability*, *15*(13), Article 13. https://doi.org/10.3390/su151310462

Osama, Z. (2024). *The digital twin framework: A roadmap to the development of user- centred digital twin in the built environment—ScienceDirect*. Geliş tarihi 28 Şubat 2025, gönderen https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710224026494?via%3Dihub

Pan, Y., & Zhang, L. (2021). A BIM-data mining integrated digital twin framework for advanced project management. *Automation in Construction*, *124*, 103564. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103564

Shafto, M., & Conroy, M. (2010). *Modeling, Simulation, Information Technology and Processing Roadmap*. ResearchGate. Geliş tarihi 17 Nisan 2025, gönderen

https://www.researchgate.net/publication/280310295_Modeling_Simulation_Information_Technology_and_Processing_Roadmap

Shepard, J. (2022, September 13). *What's a digital shadow and how does it relate to a digital twin?* Analog IC Tips. https://www.analogictips.com/whats-a-digital-shadow-and-how-does-it-relate-to-a-digital-twin-faq/

The World's Smartest Office Building Knows How You Like Your Coffee. (2015, September 23). *Bloomberg.com*. Geliş tarihi 07 Ocak 2025, gönderen http://www.bloomberg.com/features/2015-the-edge-the-worlds-greenest-building/

Tuegel, E. (2012). The Airframe Digital Twin: Some Challenges to Realization. İçinde *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*. American Institute of Aeronautics and Astronautics. https://doi.org/10.2514/6.2012-1812

Villa, V., Naticchia, B., Bruno, G., Aliev, K., Piantanida, P., & Antonelli, D. (2021). Iot open-source architecture for the maintenance of building facilities. *Applied Sciences (Switzerland)*, *11*(12). Scopus. https://doi.org/10.3390/app11125374

MSTAS 2025 MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Atıl Endüstriyel Yapıların Yeniden İşlevlendirilmesinde Dijital İkiz Teknolojilerinin Rolü: İş Akışı Önerisi

Ecem Berna Şahin
İstanbul Teknik Üniversitesi
sahine23@itu.edu.tr

Özet

Günümüzde, yapıların yeniden işlevlendirilmesi süreçleri, kentlerde işlevsiz kalan büyük ölçekli yapıların sürdürülebilir bir şekilde tekrar kullanıma kazandırılması açısından önemli bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Özellikle endüstriyel yapılar gibi büyük açıklıklı ve geniş alanlara yayılan yapıların atıl durumda kalması, hem ekonomik hem de çevresel açıdan ciddi sorunlar doğurmaktadır. Bu yapılar, çoğu zaman yüksek enerji tüketimi ve atık üretimi gibi olumsuz çevresel etkiler yaratmaktadır. Buna ilaveten, bu yapıların mevcut durumuna ilişkin yeterli ve güncel veri eksikliği, arşiv verilerinin elde edilememesi veya verilerinin dijitalleştirilmemiş olması, yeniden işlevlendirme süreçlerinde tasarım kararlarının ve performans analizlerinin sağlıklı bir şekilde yürütülmesini güçleştirmektedir. Bu çalışmanın temel problemi, atıl endüstriyel yapıların yeniden işlevlendirilmesinde mevcut veri eksikliğinden kaynaklanan belirsizliktir. Bu eksiklik, yapılacak değişikliklerin, yapı eklentilerinin veya performans analizlerinin öngörülemez olmasına yol açmaktadır. Atıl yapıların YBM (Yapı Bilgi Modellemesi) süreçlerine sonradan entegre edilmesi ve dijital ikizlerinin oluşturulması, yeniden işlevlendirme süreçlerini daha verimli ve öngörülebilir hale getirmektedir. Dijital ikizlerin oluşturulması, yapının detaylı analizi, mevcut sorunların çözümü ve gelecekteki senaryoların simülasyonu gibi birçok alanda avantaj sağlamaktadır. Bu doğrultuda çalışmanın amacı, atıl durumdaki endüstriyel yapıların dijital ikiz teknolojisi kullanılarak mevcut durumlarının modellenmesi ve yeniden işlevlendirme süreçlerine entegrasyonunu sağlayacak sistematik bir iş akışı önermektir. Dijital ikizler, fiziksel yapı ile dijital model arasında çift taraflı veri akışı sağlayarak, yapının performansını izlemeyi, gelecekteki değişiklikleri öngörmeyi ve senaryo simülasyonları yapmayı mümkün kılmaktadır. Çalışmanın motivasyonu, dijital ikiz teknolojisinin, mevcut yapı stoğunun daha verimli, ekonomik ve sürdürülebilir bir şekilde değerlendirilmesine katkı sağlayabileceği öngörüsüdür. Bu kapsamda literatürdeki çalışmalar incelenmiş ve kavramsal içerik analizi yöntemiyle dijital ikiz oluşturma süreçleri değerlendirilmiş, tümdengelimsel bir yaklaşımla özgün bir iş akışı modeli geliştirilmiştir. Çalışma süreci devam etmekte olup önerilen iş akışı henüz vaka çalışmasıyla test edilmemiştir. Sonuç olarak, bu çalışma dijital ikiz teknolojisinin atıl yapıların yeniden işlevlendirilmesi sürecinde sunduğu fırsatları ve katkıları ortaya koyarak, aynı zamanda kısıtları da ele alarak sürdürülebilir, ekonomik ve kullanıcı odaklı tasarım stratejilerine katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Dijital İkiz, Atıl Yapılar, Yeniden İşlevlendirme, Endüstriyel Yapılar, YBM.*

2025 MSTAS MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

The Role of Digital Twin Technologies in the Re-functionalisation of Abandoned Industrial Buildings: A Workflow Proposal

Ecem Berna Şahin
Istanbul Technical University
sahine23@itu.edu.tr

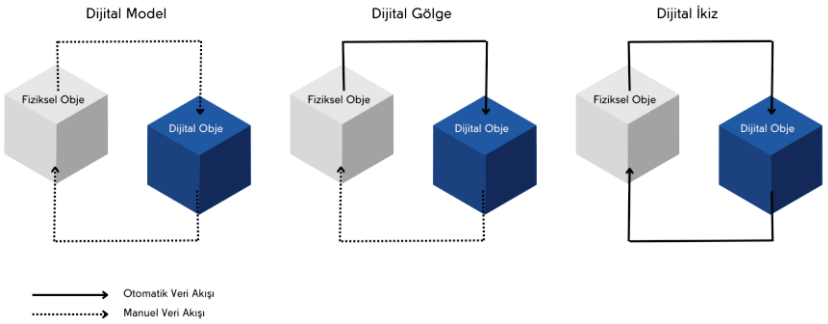
Abstract

Nowadays, the processes of building re-functionalisation has emerged as an important strategy for the sustainable reuse of large-scale buildings that have become dysfunctional in cities. In particular, the abandonment of large-span and wide-area buildings, such as industrial buildings, poses serious economic and environmental problems. These structures often have negative environmental impacts, including high energy consumption and waste generation. However, the lack of sufficient and up-to-date data on the current condition of these buildings, the unavailability of archival data or the lack of digitised data makes it difficult to make sound design decisions and performance analyses in refurbishment processes. The main problem of this study is the uncertainty arising from the lack of available data in the re-functionalisation of disused industrial buildings. This lack leads to the unpredictability of modifications, building extensions or performance analysis. The post-integration of abandoned buildings in the BIM (Building Information Modeling) processes and the creation of their digital twins makes the re-functionalisation processes more efficient and predictable. The creation of digital twins offers advantages in many areas, such as detailed analysis of the structure, solving current problems and simulating future scenarios. Accordingly, the aim of this study is to propose a systematic workflow that enables the modelling of the current conditions of disused industrial buildings using digital twin technology and their integration into the re-functionalisation processes. Digital twins provide a bidirectional data flow between the physical structure and the digital model, thus enabling the monitoring of the performance of the structure, predict future changes and perform scenario simulations. The motivation of the study is the expectation that digital twin technology can contribute to a more efficient, economical, and sustainable use of the existing building stock. In this context, relevant studies have been reviewed, digital twin creation processes have been evaluated using a conceptual content analysis method, and an original workflow model has been developed using a deductive approach. The research process is ongoing and the proposed workflow has not yet been tested with a case study. In conclusion, this study seeks to contribute to sustainable, economical, and user-oriented design strategies by demonstrating the possibilities and contributions of digital twin technology in the process of re-functionalisation of abandoned buildings, while addressing the limitations.

Keywords: *Digital Twin, Abandoned Buildings, Industrial Buildings, Refunctionalisation, Adaptive Reuse, BIM.*

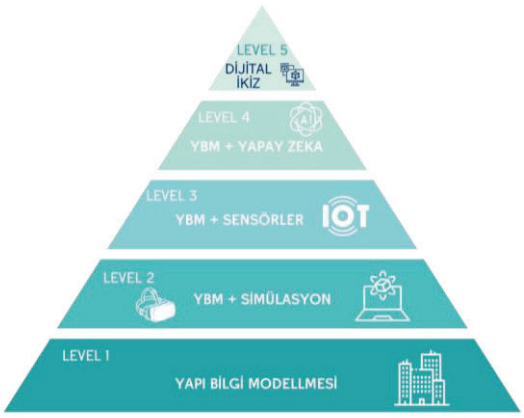
1. Giriş

Yapı Bilgi Modellemesi (YBM), farklı disiplinlerdeki kullanıcılara bilgilerin entegre edilmesini, analiz edilmesini, görselleştirilmesini, yönetilmesini ve simüle edilmesine olanak sağlar (Li, 2017). YBM konsepti ilk olarak Eastman tarafından 1975 yılında (Eastman, 1975) ortaya atılsa da, YBM terimi ilk kez 1992'de Van Nederveen ve Tolman'ın yayınlarında kullanılmıştır (Li, 2017). YBM konseptinden ortaya çıkan Dijital İkiz (Dİ) teknolojisi ise yapıların dijital platformlarda simüle edilmesi, modellenmesi ve bilgilerinin işlenmesiyle oluşmaktadır. Dİ ilk olarak 1991'de David Gelernter tarafından duyurulsa da, yeni bir terim olarak NASA'dan John Vickers tarafından 2010 yılında tanıtılmıştır (IBM, 2021). Dijital model, dijital gölge ve dijital ikiz şemaları **Şekil 1**'de gösterilmiştir. Fiziksel obje ve dijital obje arasında çift taraflı manuel veri akışının olduğu sistem, dijital modeldir. Fiziksel objeden dijital objeye otomatik veri akışının olduğu fakat dijital objeden fiziksel objeye manuel veri akışının olduğu sistem, dijital gölgedir. Fiziksel obje ve dijital obje arasında çift taraflı otomatik veri akışının olduğu sistem ise dijital ikizdir.



Şekil 1: Dijital Model, Dijital Gölge ve Dijital İkiz (Seppälä, 2020 kaynağından düzenlenmiştir.)

Şekil 2'te YBM'den dijital ikize evrimin 5 aşaması gösterilmiştir. Dijital ikiz, bir yapının konsept aşamasından inşa ve sonrasında yaşam döngüsünün son aşamasına kadar kullanılabilirken, zaten var olan bir yapıya da entegre edilerek kullanılabilir.



Şekil 2: Yapılı Çevrede YBM'den Dijital İkize Evrim (Deng vd., 2021 ve digitwin4ciue, 2025 kaynaklarından uyarlanmıştır.)

Yeniden işlevlendirme, mevcutta var olan ve kullanım amacı farklı olan bir yapıyı, kendi karakterine uygun şekilde işlevlendirmesidir ve tasarımcılar için zorluklar içeren özel bir yenileme biçimidir (Langston vd., 2008). Mevcut yapının kullanım dışı olması, işlevine artık ihtiyaç duyulmaması gibi sebepler o yapının atıl kalmasının sebeplerinden olabilir. Atıl bir yapıya ikinci bir hayat vermek ekonomik, sosyal ve çevresel açıdan yarar sağlamaktadır ve dünyada birçok örneği vardır (Gewirtzman, 2017). Ancak yeniden işlevlendirilecek olan yapının yeni kullanımı, yapının tarihi dokusuna uygun olmalıdır, müdahaleler ileride eksik ve hatalı bilgiye yol açmamalı ve yapının özgünlüğünü ve karakterini korumalıdır (Mısırlısoy & Günçe, 2016). Yeniden işlevlendirme süreçlerinde altyapı sistemlerinin mevcut yapı kabuklarına uyarlanması, termal performans, havalandırma ve ses yalıtımı gibi modern standartların sağlanmasında ciddi zorluklar yaşandığı vurgulanmıştır (Hein & Houck, 2008). Mevcut işlevsiz yapıların yeniden işlevlendirilmesi ve ikinci yaşamlara başlaması için yapıların mevcut verilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu veriler fiziksel, geometrik, malzeme, operasyonel vb. veriler olabilir. Bu süreçte statik veya dinamik birçok veri kullanılmaktadır. Yapının fiziksel modelinin yansıması olarak dijital geometrik ve fiziksel veriler, yapısal veriler, malzeme bilgileri, teknik ve mekanik sistem verileri, çevresel veriler, operasyonel veriler, tarihsel ve dokümantasyon verileri gibi veriler yeniden işlevlendirme süreçlerinde ihtiyaç

duyulabilecek veriler olabilir. Yeniden işlevlendirme, yapı için yeni bir işlev bulunması ve genellikle yapısal olarak sağlam eski binaların ekonomik olarak uygulanabilir yeni kullanımlar için geliştirildiği süreç olarak tanımlanmaktadır (Cantell, 2005). Yeniden işlevlendirilecek olan yapılar; konut, kamu, endüstri gibi farklı tipolojilere sahip olabilir. Bu çalışmada tipoloji olarak endüstriyel yapılar seçilmiştir. Sanayi yapıları, genellikle geniş alanlara ve açıklıklara sahiptir ve böylece yeni bir işleve uygundur (Cantell, 2005).

Endüstriyel yapıların dijital ortamda YBM ile temsil edilmesi pek çok sürecin benzetimini sağlayarak, karar alma süreçlerinde yardımcı olmaktadır (Ulkucu ve Alaçam, 2019). Ayrıca, endüstriyel yapılar mimari izler taşıdığı için bu yapıları korumak, tarihi mimari mirası korumak için de önem taşımaktadır. Bu yapılar geçmiş mimari mirastan izler taşırken, yapısal bakımdan da güçlü yapılardır. Şehir içinde büyük ölçekli endüstriyel yapıların işlevsiz kalması, hem ekonomik hem de çevresel anlamda sürdürülebilir olmayan bir durum oluşturmaktadır. Bu yapıların yeniden işlevlendirilmesi topluma sosyal ve kültürel katkı sağlarken, süreç içerisinde ihtiyaç duyulan mevcut veri eksikliği önemli bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu nedenle, atıl yapıların dijital ikizlerinin oluşturulması, hem mevcut durumlarının doğru analiz edilmesini hem de yeniden işlevlendirme sürecinde ihtiyaç duyulan veri akışını sağlayarak karar süreçlerini desteklemektedir. Bu çalışmada da bu problemden yola çıkılarak, atıl endüstriyel yapıların yeniden işlevlendirilmesinde dijital ikiz kullanımının rolü değerlendirilmiş ve bu doğrultuda önerilen iş akışı ele alınmıştır.

2. Yöntem

Bu çalışmada, nitel bir yöntem olarak literatür taramasına dayalı kavramsal analiz yaklaşımı benimsenmiştir. Mevcut çalışmalardan elde edilen bulgular tümdengelimsel bir yöntemle analiz edilerek ana temalar belirlenmiş ve bu temalar doğrultusunda atıl endüstriyel yapıların dijital ikizlerinin oluşturulması için sistematik bir iş akışı önerilmiştir. Çalışmanın test aşaması devam etmektedir ve örnek vaka çalışma süreci henüz başlamamıştır. Literatürde dijital ikiz çalışmaları ve dijital ikiz iş akışı çalışmaları incelenmiş ve çıkarımlar doğrultusunda ilerlenmiştir.

Literatürde Dijital İkiz Çalışmaları

Kim ve Park (2023)'ın dijital ikiz çalışmasında, Kore'nin Andong şehrinde 4 mimari miras alanında dijital ikiz oluşturma yöntemleri uygulanmış ve incelenmiştir. Çalışmada farklı ekipmanlar kullanılarak ekipmanların birbirini tamamlaması sağlanmıştır. Nesnelerin interneti (Nİ) sensörleri ve cihazları bu sürece dahil edilmiştir. Kullanılan ekipmanlar drone, lazer tarayıcı, LiDAR gibi ekipmanlardır. Mimari miras alanında karşılaşılan enerji ve altyapı eksikliği gibi sorunlar incelenmiş ve çözüm getirilmiştir.

Lei vd. (2024)'nin çalışmasında ise Ghesc Orta Çağ köyünde fotogrametri ve lazer tarama yöntemleri kullanılarak dijital ikiz oluşturulmuştur. Bu veriler doğrudan kullanılarak sanal gerçeklik ve artırılmış gerçeklik destekli bir mobil uygulama geliştirilmiştir. Böylece bölgedeki farklı zaman dilimlerindeki değişimler belgelenirken ziyaretçiler de sürece dahil edilmiştir. Çalışmada fotogrametri ve lazer tarama yöntemleri arasında karşılaştırma yapılmıştır. Aynı bölgeler her iki yöntemle de oluşturulmuş ve farklılıklar incelenmiştir. Çalışma Politecnico di Milano'nun 3D Survey grubu tarafından yapılmıştır.

Chaves vd. (2024)'nin çalışmasında Santa Ana Kilisesi (Sevilla, İspanya), KM-YBM (HBIM-Heritage Building Information Modelling)'in kültüral mirası korumadaki rolü incelenmektedir. Fotogrametri, malzeme analizi ve görsel inceleme verileriyle oluşturulan model, yapısal hasarları ve sismik zayıflıkları tespit etmek için simüle edilmiştir. Risk taşıyan noktalar tespit edilmiş ve çatlak izleme ve yapısal takibi içeren bir izleme sistemi önerilmiştir.

Russo (2020)'nun tasarım pedogijisi üzerine olan çalışmasında dijital ikiz teknolojisinin mimarlık eğitiminde kullanımı ve kentsel, sosyal, malzeme açısından ve çevresel bağlamlar üzerindeki etkileri incelenmiştir. New York, Troy'da bulunan 1843 yapımı St. Mary Kilisesi'nin yeniden işlevlendirilmesi senaryosu çalışılmıştır. Öğrenciler, kilisenin sosyal önemini de göz önüne alarak karma işlevler geliştirmiştir. Dijital ikiz, iç ve dış mekanda fotogrametri ve LİDAR tarama yöntemiyle oluşturulmuştur.

Literatürde dijital ikiz çalışmalarının büyük bir kısmı farklı tekniklerle mimari miras alanlarında koruma ve belgelenme amaçlı yapılmış olup, ağırlıklı olarak tarihi yapıların mevcut durumlarının kayıt altına alınması ve sürdürülebilir yönetimi üzerine odaklanmıştır. Bu çalışmada, atıl durumdaki endüstriyel yapıların yeniden işlevlendirilmesi sürecinde dijital ikiz teknolojisinin nasıl etkin bir araç olarak kullanılabileceği ele alınmakta ve bu alandaki boşluğa katkı sunmak amacıyla

bir iş akışı önerilmektedir. Bu sayede yalnızca var olan durumu belgelemekle kalmayıp, performans analizi, veri eksikliği yönetimi ve disiplinlerarası koordinasyon gibi yeniden işlevlendirme süreçlerine özel gereklilikler de kapsamlı şekilde değerlendirilmiştir.

Literatürde Dijital İkiz Çalışmalarında İş Akışı Örnekleri

Sousa ve Correa (2023)'nın çalışmasında tarihi yapıların dijital ikizlerine dönüştürülmesi amacıyla KM-YBM süreçlerinin nasıl geliştirilebileceği incelenmiştir. Yöntem olarak literatürün sistematik haritalaması yapılmış, ardından bir iş akışı geliştirilmiştir. Çalışmada Rhino3D, Grasshopper ve VisualARQ kullanılarak tarihi kolonların parametrik modellemesi gerçekleştirilmiştir. Bu iş akışı, tarama verilerinden otomatik profiller çıkarıp YBM nesnesine dönüştürmeyi kolaylaştırmaktadır. Çalışmada küçük ölçekli bir yapıda uygulama yapılmıştır fakat modelin küçük ölçekli olması ve sütunlardaki deformasyonun düzenli olması çalışmanın kısıtları olarak tanımlanmıştır.

Grau vd. (2021)'nin çalışmasında endüstriyel tesislerin dijital ikizlerinin oluşturulması için tarama ve yapay zeka destekli nesne tanıma yöntemleri kullanılmıştır. İş akışı tarama yapılması, verilerin güvenli aktarımı, nesne tanıma ve CAD tabanlı model üretimi adımlarını içermektedir. Yapıdaki tesisat yoğunluğundan kaynaklı tarama verilerinde eksiklikler oluşmuştur. Özellikle boru hatlarının karmaşık yapısının tanınmasında zorluklar yaşanmaktadır.

Daniotti vd. (2022)'nin çalışmasında binaların yenileme projelerinde verimliliği artırmak için YBM tabanlı, birlikte çalışabilir bir arayüz (BIMMS) geliştirilmektedir ve süreç devam etmektedir. Arayüzün, mevcut bina verilerini dijital ikiz modeline dönüştürerek, süreç boyunca enerji performansı, maliyet analizi ve planlama için destek sağlaması hedeflenmektedir. İş akışı lazer tarama, fotogrametri ve Nİ verilerinin toplanması ile başlamakta, ardından YBM ortamında modelleme ve simülasyonlarla devam etmektedir. Çalışmada mevcut veri uyumsuzlukları, sensör verisi eksiklikleri önemli kısıtlar olarak belirtilmiştir.

Literatür taraması doğrultusunda çalışmalarda kullanılan veri toplama ve işleme yöntemleri, kullanılan araçlar ve yazılımlar, entegrasyon için kullanılan araçlar, çalışmaların kısıtları **Tablo 1**'de gösterilmiştir. Sousa ve Correa'nın ve Grau vd.'nin çalışmalarında benzer yöntemlerle kolon veya boru hattına odaklanılmıştır. Bu çalışmalarda parametrik yazılımlar ve yapay zeka ile bu elemanların modellenme süreci otomatikleştirilmek hedeflenmiştir. Daniotti vd.'nin çalışmasında ise Nİ sensörleri önplanda kalmakta ve dinamik veri akışı sağlanmaktadır. Bu çalışmada tam anlamıyla bir iş akışı önerisi bulunmasa da bir akış şemasıyla işleyiş açıklanmıştır. **Tablo 1**'de de görüldüğü gibi ilk iki çalışmadaki veriseti, veriyi işleme ve kullanılan araçlar benzerlik göstermektedir. Kullanılan yazılımlar farklı da olsa, ilk çalışmada da oluşturulan parametrik sütunlar YBM tabanlı yazılımlara eklentiler ile aktarılmıştır. Tablodaki çalışmalardan endüstriyel tesis olan ikinci çalışma bu çalışma ile benzerlik oluştururken, nesne tanıma yöntemleri ve yapay zeka algoritmaları Grau vd.'nin çalışmasında ön plandadır. Çift taraflı veri akışının hedeflendiği çalışma ise üçüncü çalışmadır. Bu çalışma farklı iklimlerdeki 3 yapıda test edilmiştir fakat çalışma devam etmektedir.

Literatürde incelenen dijital ikiz çalışmaları ve iş akışları ele alınarak iş akışı önerisi için ilk olarak bir akış şeması (**Şekil 3**) oluşturulmuştur. Akış şemasında ana konseptler belirlenmiştir ve bu aşamada bu konseptler tanımlanmıştır.

Şekil 3: Akış Şeması (Yazar tarafından üretilmiştir.)

Tarama Yöntemleri

Mevcut bir yapının dijital ikizinin oluşturulabilmesi için ilk ve anahtar aşama, normal dijital ikiz süreçlerinde yer alması her zaman gerek olmayan tarama aşamasıdır. Fakat mevcut yapının geometrik ve fiziksel modeli ancak tarama yöntemleri ile mümkündür. Bu yöntemler fotogrametri, lazer tarama, LiDAR ve 360 panoramadır.

Fotogrametri, fiziksel bir objenin ve çevresinin 2B dijital görsellerden 3 modele dönüştürüldüğü ve ölçü bilgisini içerisinde barındıran bir süreçtir (Kong & Hucks, 2023). Lazer tarama, 1960'lardan beri bilinen bir veri ölçme yöntemidir ve cihazdan objeye lazerin ulaşmasıyla ölçülendirme yapabilen bu lazer tarama cihazları, saniyede milyonlarca ışık gönderebilmektedir (Borkowski & Kubrat, 2024). Böylece objenin üç boyutlu modelini ve ölçülerini çıktı olarak

Tablo 1: Literatürdeki İncelenen İş Akışı Örnekleri

	VERİ	İŞLEME	ARAÇ	YAZILIM	ENTEGRASYON	KISITLAMALAR
Sousa ve Correa (2023)	Lazer tarama ile nokta bulutları	Nokta bulutu işleme ve birleştirme, görseller oluşturma, HBIM modeli oluşturma, veri doğrulama ve kontrolü	3B lazer tarayıcılar, kodlama, KM-YBM	Trimble Realworks, Rhino, Grasshopper, VisualARQ	KM-YBM veri modeliyle kaynaklardan gelen verilerin (coğrafi, malzeme, tarihsel) birleştirilmesi ve doğruluk kontrolü	Çalışmanın küçük ölçekte test edilmesi, uygulanan sütunların deformasyonlarının bulunması, sütunlarda asimetrik süslemeleri bulunması, veri toplama zorlukları
Grau vd. (2021)	Lazer tarama ile nokta bulutları	Nokta bulutundan obje tanıma, segmentasyon, kümeleme, yapay zeka ile boru/cihaz tanımlama	3B lazer tarayıcılar, 360° kameralar, yapay zeka tabanlı obje tanıma algoritmaları, CAD yazılımları	CAD yazılımları	Nokta bulutlarının CAD modellerine ve dijital ikize aktarımı, OpenDESC veri transfer sistemi	Yoğun ortamlar, eksik/bozuk tarama verileri, veri boyutu ve işlem süresi, eğitim veri seti eksikliği
Daniotti vd. (2022)	Bina sensör verileri (sıcaklık, nem, CO_2, aydınlatma, enerji tüketimi), YBM modelleri	Verilerin YBM modeline aktarılması, gerçek zamanlı veri izleme ve analiz, prefabrik komponent tasarımı	BIM4EEB YBM Yönetim Sistemi, Nİ cihazları, enerji simülasyon araçları, IFC veri format	Bilinmiyor	BIMMS üzerinden entegrasyon	Sensör sayısı ve tipi, IFC veri modelleme limitleri, gerçek zamanlı veri doğruluğu ve güvenliği

verebilmektedir. Bu cihazlardan oluşan çıktılar ise nokta bulut modellerdir (Rocha & Mateus, 2024). Objenin her açıdan taranması, fotogrametri yönteminde olduğu gibi bu yöntemde de önemlidir. LiDAR teknolojisi, binalar, araziler veya diğer nesneler de dahil olmak üzere çeşitli yüzeylerden veri ölçmeyi ve elde etmeyi mümkün kılan bir tarama teknolojisidir ve bu taramanın ürünü x, y ve z koordinatlarında milyonlarca ölçümlerden oluşan nokta bulutlarıdır (Borkowski & Kubrat, 2024). 360 Panorama yöntemi, klasik fotoğrafa benzer olarak çıktıları olan bir yöntemdir fakat bu yöntemde çıktı eşdikdörtgensel izdüşüm (ERP) veya kübik harita projeksiyonudur (CMP) (Jiang vd., 2021).

360 panorama gibi yöntemler sonucunda ortaya çıkan örgü modeller (mesh model), daha iyi bir görsel sunmaktadırlar ve malzemeleri, dokuları daha belirgin temsil edebilirler ancak optimizasyonları sınırlıdır, lazer tarama gibi yöntemler sonucunda ortaya çıkan nokta bulut modeller ise daha soyut bir görüntü sunmaktadırlar ancak daha esnek bir çalışma imkanı tanırlar, kullanıcılar için daha özgür ve ilgi çekici bir deneyim sağlayabilirler ancak mesh modeller kadar detaylı bir görüntü sağlayamayabilirler (Lei vd., 2024).

Yapı Bilgi Modellemesi

YBM, tarama verilerinin kullanılabileceği süreçleri yönetmek için bir yöntem olarak kullanılabilmektedir. Bu görsel verilerin bir dijital modele dönüşmesi YBM ile mümkündür. Ayrıca, YBM yalnızca yapının geometrik verilerini değil, enerji, maliyet gibi verilerini de içerisinde barındıran ve farklı disiplinlerin birarada çalışmasını sağlayan bir süreçtir. Bir nokta bulutundan modelleme, binaların envanteri, tersine mühendislik, tarihi yapıların yeniden inşası veya onarımı sırasında ve bir bina üzerindeki seçilen noktaların mesafelerinin, açılarının ölçülmesinde kullanılabilir (Borkowski ve Kubrat, 2024). Bunlarla birlikte atıl yapıların modellenmesinde de YBM kullanılabilir. Ayrıca geometrik modelin yanında YBM disiplinlerarası bir çalışma ortamı sunmaktadır. Yapının dijital dokümantasyonunun, hasar haritasının, malzeme

envanterinin, yapısal, enerji, maliyet gibi verilerinin ve tahminlerinin içerisinde barındırması, yaşam döngüsü yönetiminin de bu sürece dahil olması dijital ikizi için de avantaj sağlamaktadır (Sousa ve Correa, 2023).

Simülasyon

Simülasyon, YBM ile birlikte kullanılabilecek olan bir yöntemdir. Tarama sonrası tüm verileriyle entegre edilmiş bir YBM modeli, yapının farklı simülasyonlarda test edilmesine olanak sağlamaktadır. Özellikle eski atıl yapılarda yapısal simülasyonlar yapının yeni işlevi için belirleyici rol oynayabilir. Bunun yanında sürdürülebilirlik hedeflerinin öncelikli olduğu yeniden işlevlendirme süreçlerinde, enerji simülasyonları ve testleri de yapılmalıdır (Sousa ve Correa, 2023). Simülasyon, yapının test edilerek çeşitli performans değerlendirmesi yapılabildiği aşamadır.

Sanal, Karma ve Artırılmış Gerçeklik (3G)

Sanal, karma ve artırılmış gerçeklik aşaması, disiplinler arası işbirliğini arttıran bir aşamadır (Wen ve Gheisari, 2020). Bununla birlikte dijital ikizin kullanıcılarla gerçek zamanlı interaktivite sağlayan görsel bir sunum şeklidir (Cinquepalmi & Cumo, 2022). Sürükleyici, etkileşimli ve çoklu algının etkileşim özellikleri nedeniyle, 3G, fiziksel ve sanal dünyalar arasındaki kesintisiz entegrasyonu artırmak için etkileşimli ve sürükleyici bir ortam yaratmaktadır (Johansson & Roupé, 2024). 3G, mevcut yapının yeniden işlevlendirme sürecinde simülasyon aşamasına katkı sağlamaktadır. Ayrıca, yeniden işlevlendirirken yapılabilecek tasarım değişikliklerinin tasarım aşamasında değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Yeniden işlevlendirmenin erken aşamalarında disiplinlerarası etkin rol oynayabilir, yeniden işlevlendirme sonrasında da yapının yönetiminde rol alabilmektedir ve yeni işlevdeki katılımcıları da sürece dahil edebilmektedir.

Nesnelerin İnterneti (Nİ)

Nİ, fiziksel yapı ile dijital model arasındaki çift taraflı dinamik veri akışını sağlayan ve dijital ikiz için önemli role sahip bir aşamadır. Akıllı cihazlar ve sensörlerle fiziksel yapı ile dijital ikiz arasındaki veri akışını sağlamaktadır (Souza vd., 2019). Wi-Fi, Zigbee, Bluetooth gibi kablosuz bağlantılarla nesnelerin interneti teknolojileri mobil, güvenli, kendi kendine konfigürasyon sağlamaktadır (Souza vd., 2019). Dijital ikizde, yapının durumunu izlemek ve aydınlatma, nem, sıcaklık vb. sistemler üzerinde işlem yapmak için binanın içine fiziksel olarak yerleştirilen sensörler yapıdaki fiziksel nesneler hakkında veri toplar ve bunları dijital ikize iletir (Cinquepalmi ve Cumo, 2022). Böylece nesnelerin interneti teknolojisi altyapısıyla, sahadaki sensörlerden gelen gerçek zamanlı verilerle dijital model ile fiziksel yapı arasındaki ilişki artmaktadır (Ćosović ve Maksimović, 2022).

Yapay Zeka

Yapay zeka, dijital ikiz teknolojisinde tahmin modelinin yapıldığı aşamadır. Yapay zeka, dijital ikiz modelinde tahmin ve optimizasyon için kullanılabilmektedir (Boje vd., 2020). Yapay zeka ile erken aşamalarda karşılaşılabilecek riskler ön görülebilmektedir. Yapının yaşam döngüsüyle bağlantılı faaliyetlerin işlevsel optimizasyonuna katkıda bulunabilecek yapay zeka sistemlerinin entegrasyonu, otomasyona ve yapılı çevrenin akıllı yönetimine yönelik en çeşitli operasyonlar için önemli bir destektir (Minerva vd., 2020). Atıl yapıların yeniden işlevlendirme sonrası yönetimi ve bakımı, enerji yönetimi ve verimliliği gibi konularda yapay zeka etkin rol oynamaktadır.

2.1. İş Akışı Önerisi

Çalışmanın temel amacı, dijital ikiz oluşturma süreçlerinde karşılaşılan mevcut literatür eksikliklerini gidermek ve uygulamaya dönük, sistematik bir yaklaşım geliştirmektir. Bu doğrultuda, yöntemsel olarak literatür taraması gerçekleştirilmiş, ilgili kavramlar analiz edilmiş ve elde edilen bilgiler doğrultusunda iş akışı adım adım yapılandırılmıştır.

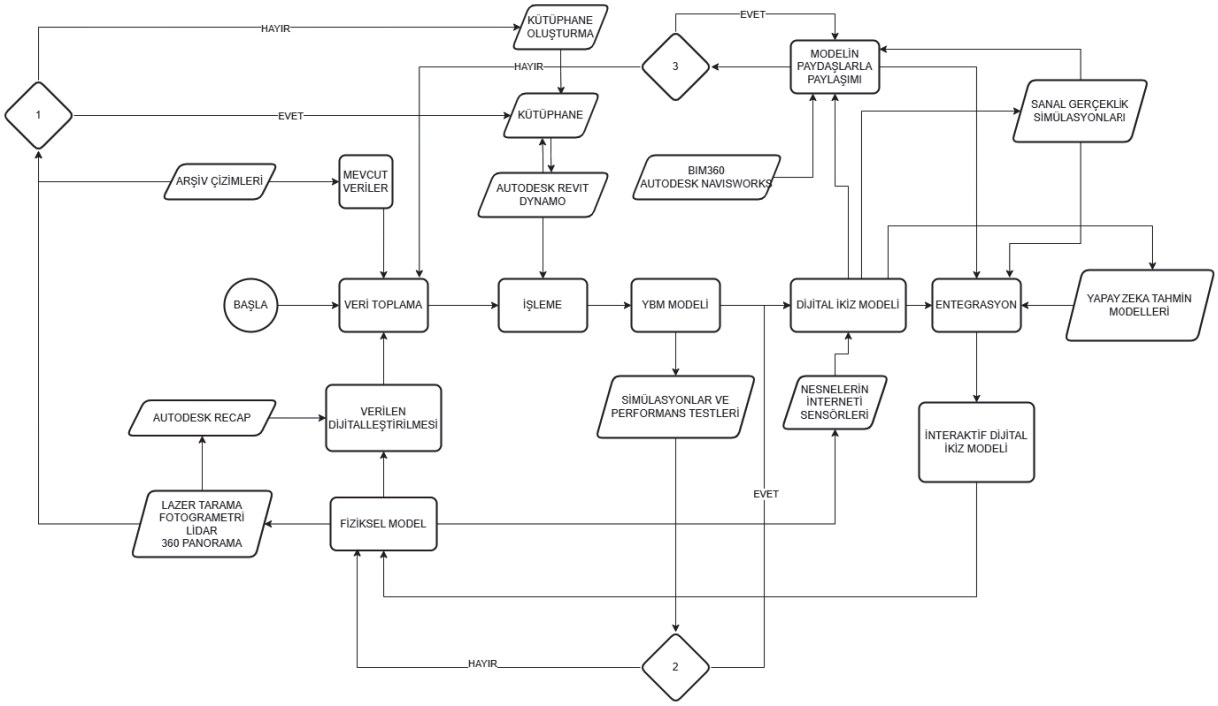
Önerilen iş akışı oluşturulurken, öncelikle dijital ikiz sürecinin ilk ve en kritik aşamaları belirlenmiştir. Bu kapsamda, veri toplama süreçleri, veri türlerinin sınıflandırılması, veri eksikliklerine yönelik önceliklendirme stratejileri gibi temel konular ele alınmıştır. Özellikle eksik veri senaryolarında izlenecek yöntemler detaylandırılmış, dijital ikiz için hangi tür verilere (geometrik, yapısal, çevresel vb.) ihtiyaç duyulacağı ve verilerin hangi ortam ve yazılımlarda depolanacağına dair kararlar alınmıştır. Bu aşamada, mevcut arşiv çizimleri ve sahadan toplanacak tarama verilerinin değerlendirilmesi gibi adımlar iş akışına entegre edilmiştir.

Toplanan verilerin işlenmesi sürecinde, kullanılan araçlar ve yazılımlar analiz edilmiş ve Autodesk Revit, Dynamo gibi araçların veri modelleme ve yönetimi aşamalarında nasıl kullanılacağı tanımlanmıştır. Literatürdeki uygulamalardan yola çıkılarak, iş akışında model doğruluğu, veri uyumluluğu ve kütüphane yönetimi gibi kritik kontrol noktaları

oluşturulmuştur. Bu noktalar, iş akışındaki "karar anları" olarak tanımlanmış ve süreç içerisinde modelin doğruluk ve bütünlük açısından değerlendirilmesi sağlanmıştır.

İş akışında ayrıca simülasyon ve yapay zeka entegrasyonlarının yeri tartışılmıştır. Simülasyonların (yapısal, enerji, kullanıcı sirkülasyonu vb.) hangi aşamalarda devreye gireceği ve yapay zeka destekli analizlerin hangi karar süreçlerini destekleyeceği belirlenmiştir. Böylece modelin sadece statik bir temsil değil, dinamik bir karar destek aracı haline gelmesi hedeflenmiştir.

Son aşamada, dijital ikiz modelinin disiplinler arası paydaşlarla entegrasyonu, veri paylaşım platformları (BIM360 vb.) üzerinden yönetimi ve sanal gerçeklik/artanmış gerçeklik ortamlarında kullanıcı deneyimi testlerinin nasıl gerçekleştirileceği gibi konular ele alınmıştır. Paydaşlar arası veri uyumluluğunun sağlanması, model güncellemeleri ve değişiklik yönetimi gibi süreçler için de çözüm önerileri geliştirilmiştir. Bu kapsamlı yaklaşım ile oluşturulan iş akışı, yalnızca teknik doğruluk ve veri bütünlüğünü sağlamakla kalmamakta; aynı zamanda işbirliği, katılımcılık, sürdürülebilirlik ve kullanıcı odaklılık ilkelerini de gözeten bütüncül bir dijital ikiz stratejisi ortaya koymaktadır.



Şekil 5: İş Akışı Önerisi (Yazar tarafından üretilmiştir.)

Bu iş akışı, atıl durumdaki endüstriyel yapıların dijital ikiz modellerinin oluşturulma sürecini sistematik bir şekilde modellemek amacıyla geliştirilmiştir. Süreç, mevcut verilerin değerlendirilmesiyle başlar. Eğer yapıya ait arşiv çizimleri veya teknik belgeler mevcutsa, bu veriler öncelikli olarak toplanır ve analiz edilir. Lazer tarama, fotogrametri, LiDAR veya 360 derece panorama yöntemleri gibi ileri veri toplama teknikleri kullanılarak fiziksel modelleme yapılır. Bu aşamada, hangi veri türlerinin öncelikli olduğu, eksik verilerin nasıl tamamlanacağı ve verilerin hangi ortamda saklanacağı gibi kritik kararlar dikkate alınmıştır. Bu aşamada tarama verilerinin lazer tarama verisi olması incelenen çalışmalar doğrultusunda müdahale edilebilmesi ve işlenebilmesi bakımından avantaj oluşturmaktadır. Ayrıca endüstriyel yapılarda yoğun tesisat elemanlarından kaynaklı lazer tarama yöntemi ve bunun için küçük cihazlar kullanılarak küçük ve dar alanların tarama verileri elde edilebilir. Bunların yanında lazer tarama cihazlarından 360 fotoğraflar da elde edilebilmektedir.

Toplanan tarama verileri, Autodesk ReCap gibi yazılımlar aracılığıyla dijital ortama aktarılırken arşiv verileri CAD yazılımları ile işlenir. İşleme aşamasında, Revit ve Dynamo gibi araçlar kullanılarak verilerin modellenmesi sağlanır ve YBM tabanlı bir dijital model oluşturulur. Bu aşamada tercih edilen yazılımlar birbirleri arasında hızlı entegrasyon sağlayabilmesi adına YBM tabanlı Revit, Dynamo ve ReCap olarak tercih edilmiştir. Diğer çalışmalarda görüldüğü gibi obje tanıma yöntemleri veya yapay zeka algoritmaları çeşitli parametrik yazılımlarla bu bölüme dahil edilebilir. Burada ilk önemli karar noktası olan **Karar 1** devreye girer: Tarama verileri mevcut kütüphane elemanlarıyla uyumlu mu? Eğer

uyumsuzluk varsa, özel bir kütüphane oluşturularak eksik parametrik nesneler tanımlanmalıdır. Bu aşamada endüstriyel yapılarda sık karşılaşılan borulama, makine yerleşimi ve altyapı bağlantıları gibi karmaşık unsurlar, kütüphane oluşturma aşamasında daha spesifik ve detaylı parametrik elemanların tanımlanmasını gerektirmektedir.

İşleme sonrası, YBM modeli üzerinde simülasyonlar ve performans testleri gerçekleştirilir. Burada ikinci kritik aşama olan **Karar 2** süreci işler: Simülasyonlar ve performans testleri başarılı mı? Eğer testler başarısızsa, fiziksel modellemeye geri dönülür; fiziksel model iyileştirmeleri hedeflenir. Testler başarılı devam ederse süreç dijital ikiz modeline devam eder. Bu aşamada performans testlerinin yanında uyum testleri de yapılmış olmalıdır. Yapı ve dijital model arasındaki uyum oranı yükseldikçe performans testlerinin doğruluğu ve güvenilirliği artmış olur. Ayrıca performans testleri ve uyum kontrolleri de yalnızca geometrik doğruluğa değil, aynı zamanda işlevsellik (örneğin enerji dolaşımı, hava akışı, altyapı entegrasyonu) gibi endüstriyel kriterlere göre yapılmak zorundadır.

Daha sonra, disiplinler arası işbirliği sağlanarak modelin diğer paydaşlarla entegrasyonu yapılır. Model paydaşlarla BIM360 gibi platformlarla paylaşılırken Autodesk Navisworks yazılımıyla çakışmalar ve uyum kontrolü sağlanır. Aynı zamanda sanal gerçeklik ortamlarında da paydaşlara interaktif ve dinamik ortamlar sunulabilir. Bu noktada üçüncü karar süreci olan **Karar 3** devreye girer: Modelin veri seti, paydaşlar arasında tutarlı mı? Eğer veri uyumsuzluğu tespit edilirse süreç tekrar veri toplama ve işleme aşamalarına yönlendirilir. Veri uyumu sağlandıktan sonra, nesnelerin interneti sensörleri kullanılarak dijital ikize dinamik veri entegrasyonu yapılır ve yapı ile model arasında dinamik bir veri akışı sağlanır. Ayrıca sanal gerçeklik simülasyonları ve yapay zeka tahmin modelleri devreye alınarak dijital ikizin hem performansı hem de yönetim süreçlerine katkı sağlayacak şekilde kullanımı desteklenir. Bu yapı ile dijital ikiz modeli, atıl endüstriyel yapıların yeniden işlevlendirilmesi sürecinde güvenilir bir dijital temsil ve yönetim aracı haline getirilmiş olur.

Sonuç olarak interaktif bir dijital ikiz modeli elde edilir ve bu model ile fiziksel yapı arasında çift taraflı dinamik bir veri akışı sürekli olarak sağlanarak hem yapı hem model geliştirilir. Endüstriyel bir yapıda dijital ikiz üretimi, yalnızca fiziksel modellemenin değil, işlevsel performansın da sürekli izlenmesini ve modellenmesini içeren çok disiplinli bir yaklaşımı zorunlu kılmaktadır. Bu nedenlerle iş akışı, veri türleri, test aşamaları ve entegrasyon süreçlerinde standart bir bina çalışmasına göre daha karmaşık ve detaylı bir şekilde yapılandırılmalıdır.

2.2. Dijital İkizin Yeniden İşlevlendirmede Rolü

Yeniden işlevlendirme süreçlerinde dijital ikizin rolü, yalnızca teknik bir araç değil; ekonomik, çevresel, sosyal ve kültürel etkiler de üretmektedir. Dijital ikiz modeli, yapıların mevcut durumunu ve olası senaryoları dinamik bir şekilde analiz ederek sürdürülebilirlik hedeflerine doğrudan katkı sağlamaktadır. Bu kapsamda, dijital ikizlerin yeniden işlevlendirme süreçlerine nasıl entegre olduğu; maliyet yönetimi, kaynak optimizasyonu, toplumsal etkileşim ve kültürel mirasın korunması gibi farklı açılardan incelenmelidir. Bu bölümde, dijital ikiz teknolojisinin yeniden işlevlendirme projelerine sağladığı çok yönlü katkılar dört temel başlık altında ele alınmıştır.

Ekonomi

Yapı stoğunda var olan bir yapının işlevsiz olarak atıl bir durumda kalması ekonomik olarak sürdürülebilir değildir. Kullanım dışı yapının işlevsiz kalması yerine, yeniden işlevlendirilmesi ekonomiye katkı sağlamaktadır. Mevcut bir yapının dijital ikizinin oluşturulması yüksek maliyetlere yol açsa da, gelecekteki müdahaleleri öngörebilmek, maddi kaynakların yönetimini sağlamak, risk analizi ve tahmini yapmak dijital ikiz ile mümkündür. Böylelikle oluşabilecek beklenmedik maliyetler ön görülebilmektedir.

Çevre

Yapıların işlevsiz olarak terk edilmesi ekonomik bir çözüm sunmazken aynı zamanda çevre açısından da sürdürülebilir bir seçenek değildir. Yeniden işlevlendirme çevresel anlamda sürdürülebilir bir yol izlemektedir. Dijital ikiz ise çevresel kaynakların verimli kullanılabileceği bir yöntemdir. Kaynakların kullanımı, enerji verimliliği ve malzeme bilgisi gibi konularda yapının dijital ikizi yapılabilecek öngörülerle ve hesaplamalarla yol gösterici olabilmektedir.

Sosyal

Atıl bir yapının yeniden işlevlendirilmesi, ekonomi ve çevre konularının yanında sosyal bir meseledir. Endüstriyel yapılar gibi şehirde büyük alanlara sahip olan yapıların, yeni işlevleri sosyal bakımdan rol oynamaktadır. Bu yapıların yeni işlevlerinin tespit edilebilmesinde dijital ikize pay düşmektedir. Toplanan verilerle yapılabilecek analizler sayesinde

yapının yeni işlevinin tespiti dijital ikiz ile yapılabilir. Ayrıca, dijital ikiz ile katılımcının da karar verme süreçlerine dahil olduğu interaktif ortamlar oluşturulabilir. Böylece dijital ikiz, yeniden işlevlendirmede katılımcının işbirliğinde olduğu kapsayıcılık sağlayan bir teknoloji olarak kullanılabilir.

Kültürel
Yeniden işlevlendirilecek olan atıl endüstriyel yapılar eski ve tarihi açıdan önem taşıyan yapılar olabilir. Bu durumda yapının özgünlüğüne zarar vermeden yeniden işlevlendirmek ve yeni işlevi buna göre tespit etmek önemlidir. Bu süreçte dijital ikiz, yapının ek müdahalelerle alabileceği hasarların öngörülebilmesine olanak sağlayabilir. Ayrıca bu yapıların dijital ikizlerinin oluşturulması kültürel mirasın geleceğe aktarılması ve korunması için bir doküman niteliği de taşımaktadır.

3. Sonuçlar

Bu çalışmada yeniden işlevlendirme kapsamında atıl endüstriyel yapıların dijital ikizlerinin oluşturulmasında bir iş akışı önerilmiştir. Bu çalışma süreci devam etmekle birlikte henüz bir vaka çalışmasında test edilmemiştir. Çalışmada literatür taraması doğrultusunda örnek vakalar ele alınmış, sonrasında literatürdeki iş akışları değerlendirilmiştir. Dijital ikiz için öncelikle bir akış şeması ile konseptler belirlenmiş ve bu doğrultuda iş akışında hangi konseptlerin ne amaçla kullanılacağı bu akış şemasına dayandırılarak iş akışı geliştirilmiştir. Dijital ikiz oluşturma süreci, literatür taraması ve kavramsal içerik analizi doğrultusunda aşamalar halinde yapılandırılmış ve atıl durumdaki endüstriyel yapılar özelinde sistematik bir iş akışı önerilmiştir.

Endüstriyel yapıların geniş açıklıklara ve büyük hacimlere sahip olması, onları diğer yapı türlerine kıyasla dijital ikiz oluşturma süreci açısından daha avantajlı kılmaktadır. Geniş ve engelsiz alanlar, tarama ve veri toplama süreçlerini kolaylaştırmakta; ayrıca bu yapıların tarihsel ve kültürel değerleri de yeniden işlevlendirme projelerine anlamlı katkılar sağlamaktadır. Bu bağlamda dijital ikiz teknolojisi, yalnızca yeniden işlevlendirme sürecinde değil, aynı zamanda yapının ikinci ömrü boyunca bakım, yönetim ve performans izleme süreçlerinde de önemli bir araç olarak öne çıkmaktadır.

Dijital ikiz teknolojisinin mevcut yapılarda kullanılması, önemli avantajlar sağlamakla birlikte bazı zorlukları da beraberinde getirmektedir. Dijital ikiz, yapının mevcut fiziksel durumunun doğru bir yansımasını dijital ortamda sunarak, yeniden işlevlendirme sürecinde mevcut durumun kapsamlı bir şekilde analiz edilmesine imkan tanımaktadır. Dijital ikizin kullanılmadığı durumlarda ise, yapı hakkında eksik veri kaynaklı yapısal problemlerle karşılaşma riski artmakta, enerji verimliliği analizleri yapılamamakta ve ileriye dönük bakım-yönetim stratejileri geliştirilememektedir. Ayrıca, senaryo testlerinin ve disiplinlerarası iş birliğinin yetersiz kalması, projelerin hem zaman hem de maliyet açısından verimsiz ilerlemesine neden olabilmektedir. Bununla birlikte, dijital ikiz oluşturma süreci; yüksek maliyetli ekipman ve altyapı gereksinimi, veri eksiklikleri ve sensör entegrasyonu gibi kısıtlar nedeniyle uygulamada zorluklar barındırmaktadır.

Bu çalışmanın test edilmesinde ve uygulanmasında bazı kısıtlamalar mevcuttur. Bu kısıtlamalar, yüksek maliyetler, yasal izinler, bu konuda yeterli uzmanın olmamasıdır. Bu çalışma sürecinde iş akışı geliştirilirken teorik tabanlı bir iş akışı önerilmiştir. İlerleyen süreçte bir uygulama çalışmasıyla iş akışı test edilerek, karşılaşılan kısıtlar ve eksiklikler doğrultusunda süreç geliştirilecektir. Uzman görüşmeleri ile birlikte bir uygulama aşaması geliştirilerek vaka çalışması yapılacaktır. Çalışmanın test ve uygulama aşamasında yapılacak olan vaka çalışmasına bağlı olarak iş akışına yeni aşamalar eklenmesi ve beklenmedik durumlara yönelik çözüm önerilerinin üretilmesi hedeflenmektedir.

Teşekkür
Bu çalışma, MBL596 Bilimsel Araştırma, Etik ve Seminer dersi kapsamında, İstanbul Teknik Üniversitesi, Bilişim Anabilim Dalı, Mimari Tasarımda Bilişim Tezli Yüksek Lisans Programı'nda ortaya çıkmıştır. Katkılarından dolayı tez danışmanım Doç.Dr. Sema Alaçam'a ve ders kapsamındaki katkılarından dolayı Doç Dr. Derya Güleç Özer, Doç. Dr. Ayşegül Akçay Kavakoğlu ve Doç. Dr. Ahmet Gün'e teşekkür ederim.

KAYNAKLAR

Boje, C., Guerriero, A., Kubicki, S., Rezgui, Y. (2020). Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research. *Automation in Construction*, *114*. Scopus. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103179

Borkowski, A. S., Kubrat, A. (2024). Integration of Laser Scanning, Digital Photogrammetry and BIM Technology: A Review and Case Studies. *Eng*, *5*(4), Article 4. https://doi.org/10.3390/eng5040125

Cantell, S. F. (2005). *The Adaptive Reuse of Historic Industrial Buildings: Regulation Barriers, Best Practices and Case Studies*. Virginia Polytechnic Institute and State University.

Chaves, E., Aguilar, J., Barontini, A., Mendes, N., Compán, V. (2024). Digital Tools for The Preventive Conservation of Built Heritage: The Church of Santa Ana in Seville. *Heritage*, *7*(7), 3470-3494. https://doi.org/10.3390/heritage7070164

Cinquepalmi F. ve Cumo F. (2022). Using Digital Twin Models (DTM) For Managing, Protecting and Restoring Historical Buildings. *Conservation Science in Cultural Heritage, 22, 425-445.* https://doi.org/10.6092/issn.1973-9494/17364

Ćosović, M., Maksimović, M. (2022). Application of The Digital Twin Concept in Cultural Heritage. *VIPERC2022.* https://ceur-ws.org/Vol-3266/paper8.pdf

Daniotti, B., Masera, G., Bolognesi, C. M., Lupica Spagnolo, S., Pavan, A., Iannaccone, G., Signorini, M., Ciuffreda, S., Mirarchi, C., Lucky, M.,Cucuzza, M. (2022). The Development of a BIM-Based Interoperable Toolkit for Efficient Renovation in Buildings: From BIM to Digital Twin. *Buildings*, *12*(2), 231. https://doi.org/10.3390/buildings12020231

Deng, M., Menassa, C. C., Kamat, V. R. (2021). From BIM to Digital Twins: A Systematic Review of the Evolution of Intelligent Building Representations in the AEC-FM Industry. *Journal of Information Technology in Construction*, *26*, 58-83. https://doi.org/10.36680/j.itcon.2021.005

digitwin4ciue, 2025. Digital Twin Infrastructures & Cities, *BIM to Digital Twins: Transforming the Architecture and Construction Landscape.* digitwin4ciue. Retrieved April 28, 2025 from https://www.digitwin4ciue.eu/2023/10/30/bim-to-digital-twins/

Eastman, C. (1975). The Use of Computers Instead of Drawings in Building Design. *AIA journal*, *63*(3), 46-50.

Gewirtzman, D. F. (2017). Adaptive Reuse Architecture Documentation and Analysis. *Journal of Architectural Engineering Technology,* 05(03*)*. https://doi.org/10.4172/2168-9717.1000172

Grau, M., Korol, W., Lützenberger, J., Stjepandić, J. (2021). Automated Generation of a Digital Twin of a Process Plant By Using 3D Scan and Artificial Intelligence. In *Transdisciplinary Engineering for Resilience: Responding to System Disruptions* (pp. 93-102). IOS Press. https://doi.org/10.3233/ATDE210087

Hein, M. F., Houck, K. D. (2008). Construction Challenges of Adaptive Reuse of Historical Buildings in Europe. *International Journal of Construction Education and Research, 4(2)*, 115–131. https://doi.org/10.1080/15578770802229466

IBM (2021, August 05). *What is a digital twin?.* IBM. Retrieved April 28, 2025 from https://www.ibm.com/think/topics/what-is-a-digital-twin

Jiang, H., Sheng, Z., Zhu, S., Dong, Z., & Huang, R. (2021). UniFuse: Unidirectional Fusion for 360° Panorama Depth Estimation. *IEEE Robotics and Automation Letters*, *6*(2), 1519-1526. IEEE Robotics and Automation Letters. https://doi.org/10.1109/LRA.2021.3058957

Johansson, M., Roupé, M. (2024). Real-World Applications of BIM and Immersive VR in Construction. *Automation in Construction*, *158*. Scopus. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105233

Kong, X., & Hucks, R. G. (2023). Preserving our heritage: A photogrammetry-based digital twin framework for monitoring deteriorations of historic structures. *Automation in Construction*, *152*, 104928. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104928

Langston, C., Wong, F. K. W., Hui, E. C. M., & Shen, L.-Y. (2008). Strategic assessment of building adaptive reuse opportunities in Hong Kong. *Building and Environment*, *43*(10), 1709-1718. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.10.017

Lei, Y., Fiorillo, F., Fassi, F. (2024). *3D Survey Point Cloud Data as Direct Rendering Assets for Visualising Complex Heritage in Virtual Applications*. *48*(2), 279-286. Scopus. https://doi.org/10.5194/isprs-Archives-XLVIII-2-W4-2024-279-2024

Li, X., Wu, P., Shen, G. Q., Wang, X., & Teng, Y. (2017). Mapping the Knowledge Domains of Building Information Modeling (BIM): A Bibliometric Approach. *Automation in Construction*, *84*, 195-206. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.09.011

Mısırlısoy, D., Günçe, K. (2016). Adaptive Reuse Strategies for Heritage Buildings: A Holistic Approach. *Sustainable Cities and Society*, *26*, 91-98. https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.05.017

Minerva, R., Lee, G. M., & Crespi, N. (2020). Digital Twin in the IoT Context: A Survey on Technical Features, Scenarios, and Architectural Models. *Proceedings of the IEEE*, *108*(10), 1785-1824. Proceedings of the IEEE. https://doi.org/10.1109/JPROC.2020.2998530

Park, E. K. J. (2023, September). Using Digital Twins for Architectural Heritages. In *Proceedings of the 41st eCAADe Conference, Graz University of Technology, Graz, Austria* (20-23). https://bit.ly/42S40Z1

Rocha, G., & Mateus, L. (2024). Using Dynamo for Automatic Reconstruction of BIM Elements from Point Clouds. *Applied Sciences (Switzerland)*, *14*(10). Scopus. https://doi.org/10.3390/app14104078

Russo, R. (2020). Design Pedagogy: Adaptive Reuse & the Digital Twin. *ACSA 110th Annual Meeting – EMPOWER* (531-537). https://bit.ly/3RDduC3

Seppälä, L., (2020, August 28). *Digital Model, Digital Shadow, Or Digital Twin – What Is At The Core Of Data-Driven Shipbuilding?.* Cadmatic. 28 Nisan 2025 tarihinde erişildi. https://www.cadmatic.com/en/resources/blog/digital-model-digital-shadow-

or-digital-twin

Sousa, M., Correa, F. R. (2023). Towards Digital Twins for Heritage Buildings: A Workflow Proposal. *International Journal of Architectural Computing*, *21*(4), 712-729. https://doi.org/10.1177/14780771231168226

Souza, V., Cruz, R., Silva, W., Lins, S., Lucena, V. (2019). A Digital Twin Architecture Based on the Industrial Internet of Things Technologies. *2019 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, 1-2. https://doi.org/10.1109/ICCE.2019.8662081

Ulkucu, Y. Alacam, S. (2019). A Decision Support Framework for FLP in the Context of Industrial Facilities by the Use of BIM. In: *Proceedings of 37 eCAADe and XXIII SIGraDi Joint Conference , Architecture in the Age of the 4th Industrial Revolution*, Porto, Sousa, José Pedro; Henriques, Gonçalo Castro; Xavier, João Pedro (eds.). São Paulo: Blucher, 2019. (269-278). ISSN 2318-6968, https://doi.org/10.5151/proceedings-ecaadesigradi2019_409

Wen, J., Gheisari, M. (2020). Using Virtual Reality to Facilitate Communication in the AEC Domain: A Systematic Review. *Construction Innovation*, *20*(3), 509-542. https://doi.org/10.1108/CI-11-2019-0122

2025 MSTAS

OTURUM 7

YAPAY ZEKA VE MİMARLIK I

MSTAS 2025 MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Erken Tasarım Evresinde İmge Üreticisi olarak Yapay Zekâ ve Yol Kronotopu

Levent Arıdağ[1]; Derya Çakır Aydın[2]; Gözde Betülay Yorulmaz[3]
[1,2,3] Gebze Teknik Üniversitesi
[1]leventaridag@gtu.edu.tr; [2]deryacakir@gtu.edu.tr; [3]g.yorulmaz2021@gtu.edu.tr

Özet

Yapay zekâ (YZ) ve ürettiği meta-evrenler, mimari tasarım süreçleri için sistematik bir tasarım araştırma alanını temsil eder. Schumacher, bu metodolojiyi ayrıntılı olarak açıklayarak, organizasyon (mekânbilim), eklemleme (fenomenoloji), anlam (semiyoloji) ve etkileşim tasarımı (dramaturji) içeren çok katmanlı bir yapı sunar (Schumacher, 2022). Schumacher'in mimari tasarıma ilişkin yaratma stratejisi, YZ'yı kontrol etmenin ve mekân atmosferini geliştirmenin bir yoluna işaret ediyor olabilir. Üretken yapay zekâ (ÜYZ), mekân etkileşimlerini sürekli olarak izler ve tasarımcının ihtiyaçlarına anında yanıt verir (Leach,2022). YZ ile görselleştirilen kronotop kurgusu ve atmosferi kelimeden imgeye ve imgeden imgeye giden bir anlatı olarak kronotopların içreğini oluşturabilir. Mekân oluşumu ve kronotop kurguları arasında yeni yaratıcı ve daha hassas olasılıklar bulunabilir. Bakhtin'e göre, "zamanı mekânda somutlaştırma" işlevine sahip kronotop, yalnızca zaman ve mekânın bir arada var olması değil, aynı zamanda sahip oldukları duygusal değerdir. Zaman ve mekânı birlikte ele aldığımızda, bu iki kavramın ortak bir duyguya sahip olması kronotop tanımını uyumlu hale getirir (Bakhtin, 2010). Kronotoplar duygusal değer üzerinden zamanı somutlaştırarak görünür kılar ve temsil ederek aktarılabilir bilgilere dönüştürür. Schumacher'in mimari tasarım için yaratma stratejisine benzer biçimde kronotoplar, ÜYZ tabanlı modellerle kontrol edilebilen ve yaratıcı imgelerin üretimini sağlayan araçlar olabilir. Bu araştırma kapsamında Gebze Teknik Üniversitesi Mimari Tasarım 7 atölyesi sürecinde, ÜYZ kullanımı üzerine bir değerlendirme yapılacak ve YZ'nin erken tasarım evresinde yol kronotopu ile ilişkili ne tür imgeler oluşturabileceğine odaklanılacaktır. Stüdyo süreçleri boyunca, öğrencilerin mimari tasarım kavramları geliştirmeleri ve yaratıcı imgeler üretmeleri amacıyla, kronotop kavramı üzerinden YZ ile simbiyotik ilişkiler kurmaları hedeflenmiştir. Bu bağlamda, ÜYZ tabanlı imge üretimi, yalnızca mekânsal ve zamansal ilişkilerin değil, aynı zamanda sezgisel boyutların da tasarım sürecine entegre edilmesini sağlayarak yeni bir paradigma sunar. Kronotop, öğrencilerin deneyimsel dönüşümlerini, mekânsal akışları ve atmosferin duygusal yoğunluğunu somutlaştırırken, YZ'nin sağladığı geri bildirim mekanizması süreç içi adaptasyonu destekler. Bu durum, tasarım yaklaşımını yeniden tanımlanmasını sağlayarak, yaratıcı süreçlerin sürekliliğini ve derinliğini artırır. YZ, yalnızca bir araç değil; aynı zamanda tasarım düşüncesini zenginleştiren ve mekânsal keşifleri derinleştiren dinamik bir işbirlikçisi konumuna evrilmektedir.

Anahtar Kelimeler: *Mimari Tasarım, YZ Tabanlı Üretken İmge, Bakhtin.*

MSTAS 2025 MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Artificial Intelligence and Road Chronotope as Image Generators in the Early Design Phase

Levent Arıdağ [1]; Derya Çakır Aydın[2]; Gözde Betülay Yorulmaz[3]
[1,2,3] Gebze Technical University, Department of Architecture
[1]leventaridag@gtu.edu.tr; [2]deryacakir@gtu.edu.tr; [3]g.yorulmaz2021@gtu.edu.tr

Abstract

Artificial intelligence (AI) and the meta-universes it produces represent a systematic design research area for architectural design processes. Schumacher explains this methodology in detail, presenting a multi-layered structure that includes organization (mechanology), articulation (phenomenology), meaning (semiology), and interaction design (dramaturgy) (Schumacher, 2022). Schumacher's creation strategy for architectural design may point to a way of controlling AI and developing the atmosphere of space. Generative artificial intelligence (GAI) continuously monitors spatial interactions and responds instantly to the designer's needs (Leach, 2022). The chronotope construction and atmosphere visualized by AI can form the content of chronotopes as a narrative that goes from word to image and from image to image. New creative and more sensitive possibilities can be found between space formation and chronotope constructions. According to Bakhtin, the chronotope, which has the function of "concretizing time in space," is not only the coexistence of time and space, but also the emotional value they possess. When we consider time and space together, the fact that these two concepts have a common emotion makes the definition of chronotope compatible (Bakhtin, 2010). Chronotopes make time visible by concretizing it through emotional value and transform it into transferable information by representing it. Similar to Schumacher's creation strategy for architectural design, chronotopes can be tools that can be controlled by GAI-based models and enable the production of creative images. Within the scope of this research, an evaluation will be made on the use of GAI during the Gebze Technical University Architectural Design 7 workshop process and the focus will be on what kind of images AI can create in relation to the road chronotope in the early design phase. Throughout the studio process, it is aimed to establish symbiotic relationships with AI through the concept of chronotope in order for students to develop architectural design concepts and produce creative images. In this context, GAI-based image production offers a new paradigm by integrating not only spatial and temporal relations but also intuitive dimensions into the design process. While the chronotope embodies students' experiential transformations, spatial flows, and the emotional intensity of the atmosphere, the feedback mechanism provided by AI supports in-process adaptation. This redefines the design approach, increasing the continuity and depth of creative processes. AI is evolving into not only a tool but also a dynamic collaborator that enriches design thinking and deepens spatial exploration.

Keywords: *Architectural Design, AI-Based Generative İmage, Bakhtin.*

1. Giriş

Yapay zekâ (YZ) tıpkı deneyimli tasarımcılar gibi, tekrar ve pratik ile zenginleştirilmiş bir şekilde bilgiyi kolayca işleyebilir, yaratıcı olasılıklar sunan anlam üretiminde hayal gücünü kullanabilir ve görselden sözel olana ve sözelden görsel olana görüntüleri çevirebilir. Bu yetkinliğin, uzak bilgileri birbirine yakınlaştıran yenilikçi bir bakış açısına sahip olmakla da ilişkili olduğu söylenebilir (Arıdağ & Uraz, 2006). YZ'nin yaratıcı süreçlerdeki rolü, yalnızca sezgisel ya da rastlantısal imgeler üretmekle sınırlı değildir; aynı zamanda biçim arayışını yönlendiren bilişsel bir işbirlikçiye dönüşür. Özellikle üretken yapay zekâ (ÜYZ) tabanlı modeller, kavramsal düşünceyi imgeler aracılığıyla mekânsal ve zamansal bağlamlara taşıyarak çok katmanlı anlatıların ortaya çıkmasını sağlar. Nitekim son dönemde yapılan araştırmalar, ÜYZ'nin soyut geometrik ve tipolojik prototipleri üretmekte kullanılabileceğini ve bu imgelerin mimari çözümlere evrilebildiğini göstermektedir. Bu bağlamda, ÜYZ'nin görsel sentez potansiyelini yaratıcı düşünceyi besleyen ve süreç odaklı tasarım metodolojileriyle bütünleşen bir araç olarak tanımlanabilir; YZ destekli görüntü sentez teknolojilerinin tasarım eğitimine dahil edilmesi, öğrencilerin yaratıcı düşünme süreçlerini güçlendirirken, karmaşık ve yenilikçi kavramsal prototipler üretmelerine olanak tanımaktadır (Agkathidis vd., 2024). ÜYZ modelleri ile tasarımda yeni anlamlar ve ilişkiler ortaya çıkarabilir. Öğrenciler, ÜYZ ile yaratıcı süreçlerde bilinmeyeni keşfetme ve seçenekleri genişletme gibi yaklaşımlar geliştirmiştir. ÜYZ, erken aşamada tasarım fikri oluştururken, bilinmeyenlere dair görsel uyarıcılar sunarak yaratıcı düşünceyi harekete geçirir. Aynı zamanda, tasarım sürecinin ilerleyen aşamalarında, alternatiflerin test edilmesi ve kararların görselleştirilmesi aşamalarında da etkili bir araç olarak kullanılabilir. Bunun yanında, ÜYZ ile elde edilen imgeler sadece yaratıcı ilham sağlamaz, mimari tasarımın sosyo-kültürel bağlamına da katkıda bulunur (Gül vd., 2024).

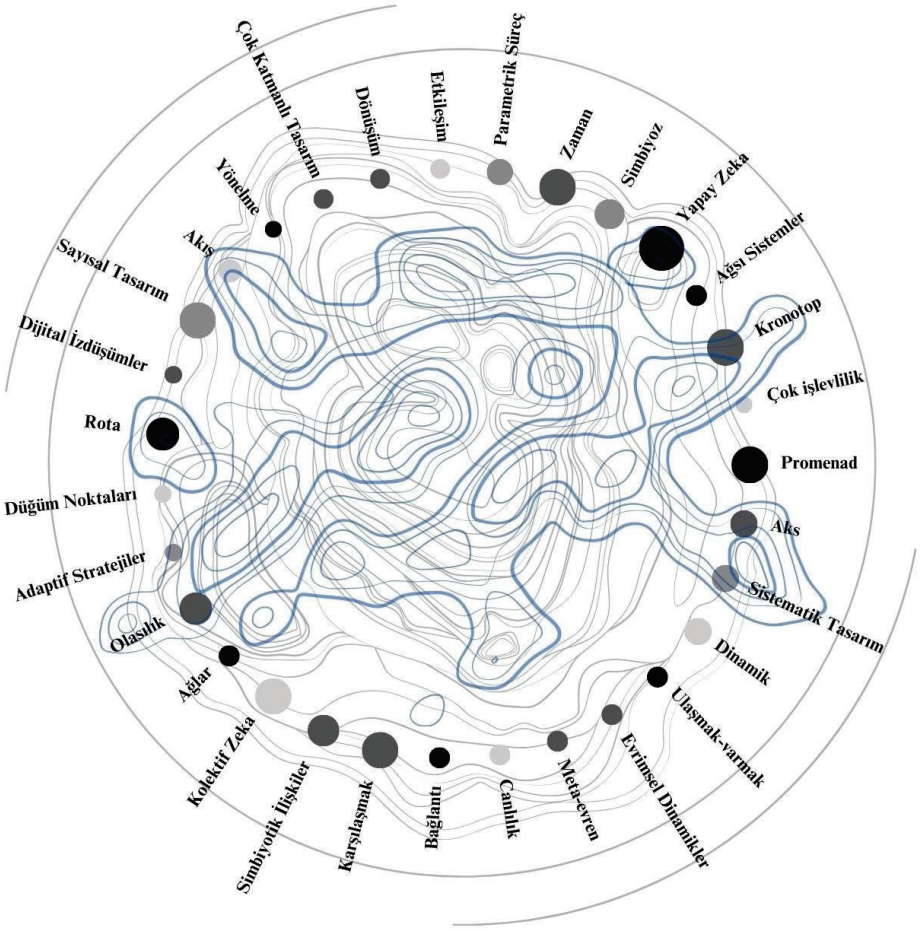
Mimari tasarımda, tüm görsel materyaller, kendileri birer dil olmanın yanı sıra, dilsel içeriği genişleten araçlar olarak düşünülebilir. Bu nedenle, stüdyo ortamının her türlü görsel ve metinsel materyalle beslenmesi gerekir. İmge üretimi yoluyla mimari tasarım eğitimine dair yeni bir anlayış kazanmak, en başından itibaren yabancıyla bir yüzleşme olarak anlamayı gerektirir. YZ, tekrarlanan tasarım önerileri sunarak tasarımcının yeni ilişkiler kurmasına, bunları anlamasına ve böylece tasarım problemiyle ilgili keşifler yapmasına ortam sağlar. Bu tür birikmiş keşifler, tasarımı bilgilendiren, yönlendiren ve hatta teşvik eden tasarım çıktılarıdır (Schön ve Wiggins, 1992). Keşiflere veya kişisel dünyalara ulaşmak için, farklı ilgi alanlarını birleştirebilen ve formüle edilmiş nedenlerden ortak anlamların üretilmesini teşvik eden imge üretiminin yapısı önem kazanacaktır. Aslında bu, diyalog için üretken bir temel oluşturur.

Araştırmanın hipotezleri şunlardır:

YZ, imge üretim aracı olarak kullanılabilir mi?
ÜYZ'yı tasarım konseptini oluşturmak için bir iletişim aracı olarak nasıl kullanabiliriz?
ÜYZ ile oluşturulan anlatılar neye hizmet eder?
Tasarım sürecinde ÜYZ ile ikinci bir zihin olarak nasıl diyalog kurulabilir?
ÜYZ nasıl yaratıcı hale gelir?
Kronotoplar oluşacak mekânsal imgelerin atmosferini nasıl tarif eder? Bu tarifler ÜYZ'yi daha iyi kontrol etmenin ve tasarım konseptini oluşturmanın bir yolu olabilir mi?

2. Yöntem

Tasarım eğitimi üzerine dijital dünyayı göz önünde bulundurarak bir metodoloji önermek için, tasarımın bilişsel temel yapılarını kronotoplar olarak, yani Bakhtin'in toplumsal diyaloglar üzerine yaptığı geniş felsefi çalışmada tanımladığı sosyo-zamansal, sosyo-fiziksel yapılar olarak tanımlamamız gerekir. Muntanola'ya (2022) göre kronotop yaratıcı tasarım kurgusunun yeni mekân stratejisidir. Bakhtin'in ifade ettiği gibi yol, çeşitli karşılaşmaların yaşanabildiği bir uzamdır ve çeşitli sınıflardan insanların karşılaşmasına aracılık eder (**Şekil 1**). Yolu bir yerden bir yere ulaştıran yüzey, rota, dolaşım elemanı olarak tanımlayabiliriz. Yol kimi zaman asıl mekânlara ulaştıran dolaşım elemanıdır, kimi zaman kendisi mekâna dönüşür. Yoldaki eyleme göre zaman akış halindedir. Yürüme eylemi esnasında, yoldaki deneyime göre zaman yavaşlar veya hızlanır. Karşılaşmalarda ise zaman anlık bir değer kazanır. O an çoğalır ve zihnimizin farklı kıvrımlarına tekrar tekrar hatırlanmak üzere işlenir.

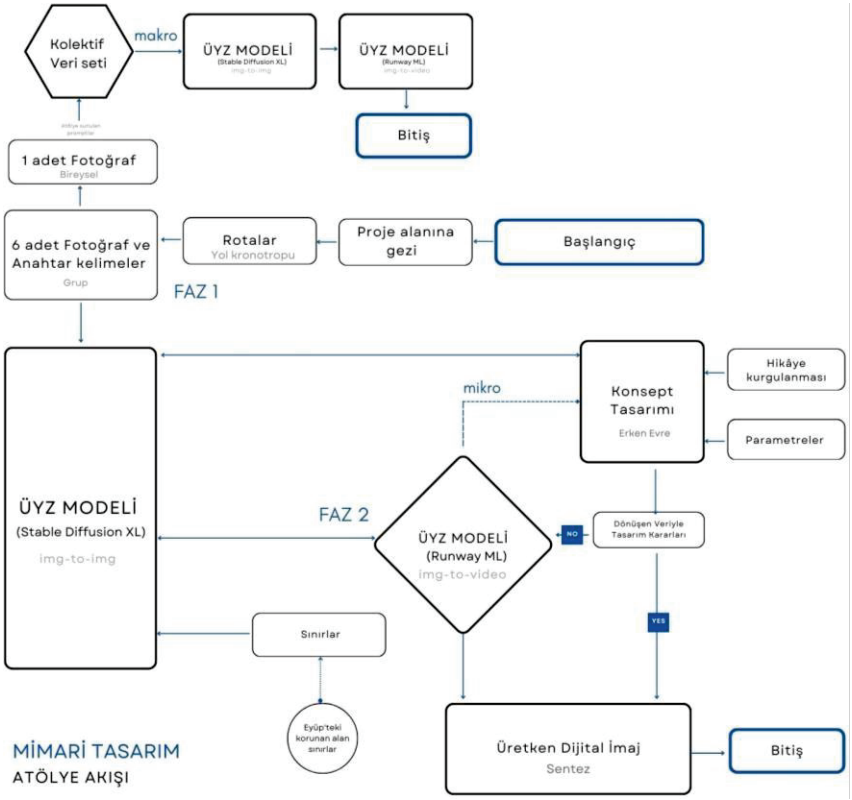


Şekil 1: Mimari bir gösterge olarak yol (Yazarlar, 2025).

Schumacher'e (2016: 112) göre, ilişkilerin tam olarak karakterize edilmesi, bir araya gelen çeşitli kodların düzenlenişine bağlıdır. Bu kodların düzenlenişinde, seçimlerle oluşan stratejilerle karşılaşılır. Bu stratejiler modellerin oluşumuna yön verirler. Modeller test edilen bileşenler (komponentler) ve mekanizmalardan (jeneratörler) oluşur (Arıdağ, 2018). Stüdyo süreçlerinde, yol kronotopu ve YZ teknolojilerinin entegrasyonu, öğrencilerin mimari tasarım konseptlerini geliştirmelerini ve erken tasarım aşamalarında yaratıcı görsel imgeler üretmelerini teşvik edebilir (Ozorhon & Sarman, 2023). Bu kapsamda, ÜYZ'ye 6 adet fotoğraf ve komut istemine anahtar kelimeler girilmiştir. YZ, tasarım süreçlerine yönelik düşünsel bir zemin oluşturmak amacıyla, "resimden-görüntüye" (img-to-img) ve "görüntüden-videoya" (img-to-video) tekniklerini kullanarak imajlar üretilmiştir. İlgili süreç, Şekil 2'de şematik olarak gösterilmiştir (**Şekil 2**). Bu doğrultuda, makine öğrenimine dayalı YZ araçları olan Stable Diffusion ve Runway ML kullanılmıştır. Ayrıca, atölyeye özgü bir ÜYZ modeli geliştirmesi amacıyla, toplu olarak oluşturulan bir veri kümesi modele entegre edilmiştir. ÜYZ modelinin eğitimi, öğrenciler tarafından sağlanan fotoğraflar ve belirlenen anahtar kelimeler komut istemleri kullanılarak, atölyenin kendi çıktısını üretilebilmesine olanak sağlamıştır. Bu bağlamda, YZ ile eğitilen veri seti, tasarım sürecinde referanslar üreten ve gelişen bir iletişim ağı içinde kolektif bir düşünsel yapı oluşturan dinamik bir sistem olarak, duyarlı ve özgün bir zekâ olarak kabul edilebilir (Yorulmaz ve Arıdağ, 2024).

Bu çerçevede, Saldana Ochoa ve Huang (2022), ÜYZ'yi, kavramsal tasarım süreçlerinde aktif bir ajan olarak tanımlayarak tasarımcının düşünsel sınırlarını aşmasını ve özgün çözümler üretmesini mümkün kılan metodolojik bir yaklaşım ortaya koymaktadır. Bu yaklaşım, ÜYZ'nin tasarım sürecindeki rolünü, pasif bir yardımcı olmaktan çıkarıp; anlaşılması güç kavramları görünür kılan, tasarımcının algısal derinliğini ve kavramsal soyutlama potansiyelini artıran sistematik bir donanım seti olarak yeniden tanımlamakta; tasarımcı ise bu süreçte hem imgelerin hem de metinlerin ifade gücünü eşzamanlı olarak kullanarak kavramsal ilişkilerin somutlaştırıldığı ve yeniden yapılandırıldığı entegre bir yöntem izlemektedir (Saldana Ochoa & Huang, 2022). Benzer biçimde, Cheung ve Dall'Asta (2024), insan-bilgisayar etkileşimi (HCI) perspektifinden, mimari tasarımda ÜYZ'nin pedagojik değerine dikkat çekerek, öğrencilerin düşünme biçimlerini daha eleştirel, çoklu perspektifli ve katılımcı hale getirdiğini savunur. Öte yandan, Komatina, Miletić ve

Mosurović Ružičić (2024) ise, ÜYZ'nin mimarlık eğitimine entegrasyonunun yalnızca yaratıcı süreçleri değil, aynı zamanda sürdürülebilir tasarım pratiklerini destekleyen çevresel farkındalıkları da geliştirdiğini belirtmektedir. Onlara göre, veri odaklı karar destek sistemleriyle birlikte ÜYZ, gelecekteki tasarımcıların sürdürülebilirlik ilkelerini içselleştirmelerini kolaylaştırarak, daha sorumlu ve ileri görüşlü bir tasarım kültürünün inşasına katkı sağlar.



Şekil 2: Atölye yöntemi (Yazarlar, 2025).

3. Bulgular

Mimari tasarım süreçleri, YZ ve hayal gücüyle oluşturulan meta-evrenler aracılığıyla sistematik bir araştırma alanı sunar ve Schumacher'in metodolojisiyle organizasyon (mekânbilim), eklemleme (fenomenoloji), anlam (semiyoloji) ve etkileşim tasarım (dramaturji) bileşenlerini bir araya getirir (Schumacher, 2022):

- Mekanbilim: karmaşık yapılandırmalar sunan organizasyon
- Fenomenoloji: algısal işlenebilirlik sunan eklemleme
- Semiyoloji: bilgi zenginliği sunan anlamlandırma
- Dramaturji: iletişim zenginliği sunan etkileşim

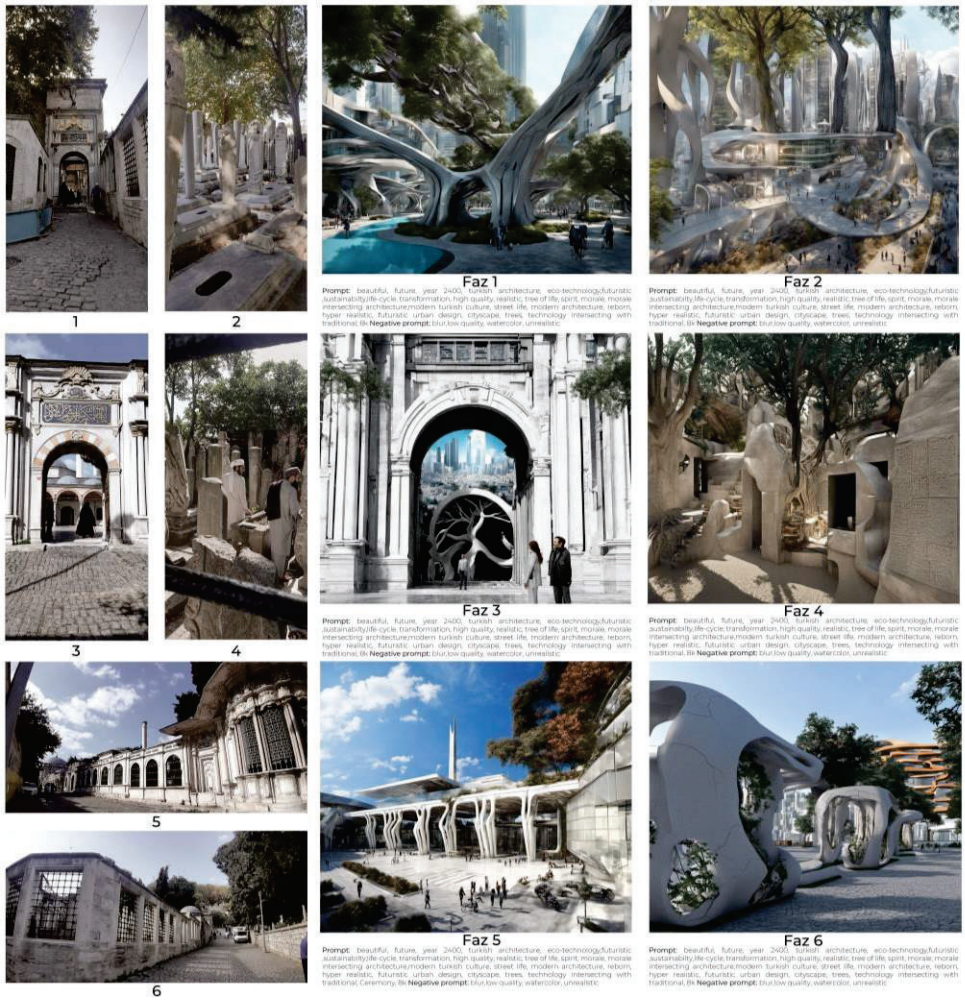
Schumacher'in mimari tasarım için yaratma stratejisi, YZ'yı kontrol etmenin ve mekân atmosferini geliştirmenin bir yoluna işaret ediyor olabilir. ÜYZ, mekân etkileşimlerini sürekli olarak izler ve tasarımcının ihtiyaçlarına anında yanıt verir (Leach, 2022). YZ ile görselleştirilen kronotop kurgusu ve atmosferi kelimeden imgeye ve imgeden imgeye giden bir anlatı olarak kronotopların içreğini oluşturabilir. Mekân oluşumu ve kronotop kurguları arasında yeni yaratıcı ve daha hassas olasılıklar bulunabilir. Bakhtin'e göre, "zamanı mekânda somutlaştırma" işlevine sahip kronotop, yalnızca zaman ve mekânın bir arada var olması değil, aynı zamanda sahip oldukları duygusal değerdir. Zaman ve mekânı birlikte ele aldığımızda, bu iki kavramın ortak bir duyguya sahip olması kronotop tanımını uyumlu hale getirir (Bakhtin, 2010). Temsil ötesi kuramı "duygu ve sevgiye" önem verir (Thrift, 2007). Beden ve duygu üzerine yapılan çalışmalarda beden, duygunun oluştuğu aşkın bir varlık olarak kabul edilirken, maddi unsurlar ve duygu üzerine yapılan çalışmalarda birey ve çevre birbirini üreten olgular olarak ele alınır. Temsil ötesi kuramı, mekânı bir boşluk yerine performatif anların toplamının sürekli oluşumundaki canlılık olarak görür. Bu performatif deneyim anları, bireyin günlük rutini, bilişsel geçmişi, ruh hali, pratik becerileri ve dürtüleri gibi bileşenler tarafından şekillendirilir (Prince, 2018). Kronotoplar, geleneksel temsil yöntemleriyle açıklanamayan uygulamalar için yeni referans çerçeveleri oluşturan temsil ötesi araçlar

olarak kullanılabilir. Bakhtin, kronotopun bu işlevini vurgular. Gerçek dünyanın sanal zaman uzantıları temsilin kaynağını oluşturur. Kurgusal dünyanın yansıması olan zaman ve uzantı temsilleri kronotoplarla ortaya çıkar. Temsilin kaynağı olan sanal dünya ile kurguda temsil edilen dünya arasında bir sınır çizgisi vardır. Ancak bu sınır çizgisi, canlı organizmalar ve etraflarındaki çevre gibi sürekli etkileşim yaratan bir ilişkidir (Bakhtin, 2010). İmge ile yaşam arasındaki bu ilişki, belirli bir yaratıcı zaman uzantısıdır. Zaman ve mekân ayrılmaz bir bütünlüktür. Mekânın tanımlanmasına yönelik her girişim, zamanı anlama çabasıdır. YZ araçlarını kullanan tasarımcı, ilişkileri ne kadar iyi tanımlarsa, o kadar iyi imgeler üretebilir. ÜYZ, tasarımcıyla kurduğu sinerjik eş-aktörlük ilişkisi, stüdyo süreçlerinde kesintisiz geri bildirim mekanizmaları ve yaratıcı öneri dizgeleri aracılığıyla yalnızca bireysel yaratıcılığı pekiştirmekle kalmaz; aynı zamanda eleştirel düşünce becerilerinin derinleşmesini ve kolektif düşünsel üretim pratiklerinin daha rafine, çok boyutlu kavramsal oluşlara dönüştüren dinamik bir düşünsel ortam inşa eder.

2023, 2024 ve 2025 yıllarında yapılan Mimari Tasarım 7 stüdyoları kapsamında düzenlenen “MEKANIN YAPAY KATMANLARI VE ROTALAR” ve “YOL KRONOTOPU VE KENT” adlı 2 günlük atölye çalışmalarının içerikleri şu şekildedir (**Şekil 3, 4**):

- Öğrencilerle proje alanına (Eyüp) gezi.
- 2-3 kişilik gruplar oluşturarak “Rotalar/ Kronotop” üzerine düşünme.
- Belirledikleri rotalara bağlı olarak Eyüp'teki verilen yerlere göre çevrede fotoğraf çekme.
- Bu fotoğraflardan 6 tanesini, belirledikleri rota içerikleriyle ilişkili olacak şekilde seçme.
- İçeriklerine göre rotayı tanımlayan anahtar sözcükleri bulma ve buna göre bir hikâye yazma.
- Rota hikâyelerini destekleyen yeni görseller üretme.

Schumacher’in mimari tasarım için yaratma stratejisi, YZ’yı kontrol etmenin ve mekân atmosferini geliştirmenin bir yoluna işaret ediyor olabilir.



Şekil 3: ÜYZ modelliyle üretilen dijital imgeler, Zehra Pınar Gür, Merve Sever, Samet Okyay, Nursema Yılmaz, Esra Can

Şekil 4: ÜYZ modelliyle üretilen dijital imgeler, Elif Gizem Alkaya, Bahanur Özen, Beyza Açıkgöz, Feride Ahsen Arslan

4. Sonuçlar

Zaman, çeşitli sınıflandırmalarla birçok kategoride tanımlanabilir. Kronotoplar zamanı somutlaştırarak görünür kılar ve temsil ederek aktarılabilir bilgilere dönüştürür. Buna bağlı olarak YZ için yol kronotopunu tarif edecek metnin yazımı (prompt) önemlidir. Metin yazımında yolu betimleyecek kelime ve cümlelerin yolun duygusunu verecek şekilde fenomenolojik olarak seçilmesi kendine özgü yolu oluşturmak ve ileride tasarlanacak mekân konsepti için önemlidir. Kronotoptaki nitelikleri kategorize ederek fenomenolojik bir yaklaşım geliştirmek YZ'nin daha nitelikli önermeler yapabilmesine olanak sağlayabilir. ÜYZ'nin yer aldığı tasarım süreçlerinin kontrol edilebilirliği, öğrencilerin yarattığı mekânsal imgelerin atmosferini tanımlayarak daha verimli hale gelebilir. Öğrenciler, farklı ve özgün imgelerle karşılaştıkça, bu imgelerle daha güçlü bir bağ kurarak tasarımlarını geliştirir. Bu, tasarımcıların hem görsel hem de metinsel materyalleri etkin bir şekilde birleştirerek zengin, çok katmanlı anlatılar üretmelerine olanak tanır. Sonuç olarak, ÜYZ'nin tasarım sürecinde nasıl daha yaratıcı hale getirilebileceği hem teknik beceri hem de bilişsel iş birliğini gerektiren bir süreç olarak karşımıza çıkar. 2025 Bahar döneminde yapılan son atölye çalışmasında fenomenolojik, analitik ve matematiksel ilişkilere dikkat edilerek öneriler geliştirilmesi hedeflenmiştir. Aşağıdaki seçilen grup (Sesim Haypatya Akarsu, Sümeyye Sena Zorlu) buna örnek oluşturmaktadır (**Şekil 5**).

Şekil 5: ÜYZ modelliyle üretilen dijital imgeler, Sesim Haypatya Akarsu, Sümeyye Sena Zorlu

Konsept: Kentsel Yarıklar

Parent tarafından ortaya atılan oblik işlev teorisine göre kent planlaması, geleneksel iki boyutlu kartezyen düzenlemeler yerine, kentsel mekânın kesit analizleri üzerinden yeniden ele alınmasını gerektirmektedir. Eğik Düzlem İşlev Teorisi, kent dokusunun durağan geometrilerden bağımsız olarak, akışların dinamiğini yansıtan topo-morfolojik bir düzende şekillenmesini savunmaktadır. Geleneksel dikey ve yatay kent modellerinin yetersizliği, kent yaşamında sınırlandırıcı mikro gettoların oluşmasına neden olmakta ve bireylerin mekânla kurduğu ilişkileri kısıtlamaktadır. Bu noktada Eğik Düzlem İşlev Teorisi, yığınlaşma, biçimlenme, boşluk, eğim ve iç içe geçme gibi kavramları merkeze alarak, kesit bazlı bir mekânsal organizasyonun gerekliliğini vurgulamaktadır. Bu fikirlerden ve sorunlardan yola çıkılarak, mekânsal organizasyonu sağlamak ve mevcutta var olan yatay-düşey kentsel sınırlar arasındaki geçiş formasyonunu oluşturabilmek adına “Kentsel Yarıklar” olarak nitelendirdiğimiz; kent dokusundaki fiziksel, mekânsal, algısal ve işlevsel

kesintiler ya da süreklilikler aracılığıyla yeni geçişler, bağlantılar ve kullanım senaryoları oluşturan bir kentsel arayüzdür. Bu yarıklar, yaya ve taşıt akışının kesintisiz ilerlediği sürekli geçitlerden, farklı yönlere ve kotlara evrilen kesintili bağlantılara, kentsel yoğunluğu dengeleyen boşluk alanlarına ve topografyanın hareketliliği yönlendirdiği mekânlara kadar geniş bir yelpazede şekillenebilir. Aynı zamanda, görsel açıklıklar, ışık ve gölge dinamikleri gibi algısal unsurlar aracılığıyla kullanıcı deneyimini yönlendirirken, zaman ve programatik farklılıklar sayesinde aynı mekânın değişken işlevler üstlenmesini mümkün kılar. Kentsel yarıkları genel ve kısa bir tabirle nitelendirmek gerekirse; mevcut kent dokusunu dönüştüren, akışı organize eden ve kentsel yaşamın çok katmanlı yapısını destekleyen dinamik arayüzler olarak kent içindeki mekânsal sürekliliği ve çeşitliliği artırır. Bu bağlamda incelenmesi önerilen, "Kentsel Yarık (Incision Urbaine)" kavramı, birkaç farklı yarık tipolojisi kavramları altında ele alınmıştır. Bunlar:

Yarık tipolojileri

1. Mekânsal ve fiziksel yarıklar

1.1 Sürekli yarık

Mevcut kent dokusundaki yaya yolların araç yolları ve fiziksel, mekânsal engeller olmaksızın kesintiye uğramadan devam ettiği geçişlerdir. Dinamik yaya akışı hakimdir.

1.2 Kesintili Süreklilik Yarıkları

Yaya veya taşıt yollarının belirli noktalarda kesilip yeniden bağlandığı, farklı kotlar, yönler veya hızlar ile akışın farklı yönlere evrildiği alanlardır. (Örneğin, pasajlar, ara sokaklar, tüneller)

Bu yarıklar, mevcut dokuyu bozmadan yeni bir katman ekleyerek ya da mekânsal bir süreklilik içinde farklı bir akış düzeni oluşturarak kente entegre edilebilir.

1.3 Boşluk Yarıkları

Mevcut kent dokusunda yoğunluğu dengelemek için oluşturulan negatif mekânlardır. (Örneğin, avlular, meydanlar, yeşil koridorlar)

1.4 Topografik yarıklar

Kentsel topografyanın doğal eğimlerinden veya yapay kot farklarından yararlanarak yeni hareket alanları yaratmak (Örneğin, teraslar, amfi alanlar, alt geçitler).

2. Algısal Yarıklar

2.1 Görsel Yarıklar

Kentsel mekânın farklı noktalarda açılarak kullanıcıları belirli yönlere yönlendirmesi. Örneğin, aniden açılan geniş bir meydan ya da dar bir sokaktan geniş bir alana geçiş.

2.2 Işık ve Gölge Yarıkları

Mevcutta olan yapıların gabari seviyeleri, cephe sınırları ve yoğunluklarının güneş ışınlarıyla oluşturduğu değişken zaman mekân algısının akışları sezgisel olarak yönlendirdiği yarıklardır.

3. İşlevsel Yarıklar

3.1 Zaman Yarıkları

Aynı mekânın farklı saatlerde farklı işlevlere büründüğü yarıklardır. (Örneğin, gündüz otopark olarak kullanılan bir alanın akşam pazaryerine dönüşmesi).

3.2 Programatik Yarıklar

Kentsel dokunun belirli bölgelerinde alternatif kullanımlar ekleyerek yoğunluk dengesini sağlandığı yarıklardır.

Üretken yapay zekâ (ÜYZ) yöntemlerinin hızlı evrimi, mimari tasarım pratiği ile akademik araştırmalar arasında giderek daha fazla kesişim yaratarak, araştırmacıların bu teknolojileri tasarıma nasıl adapte edebilecekleri üzerine odaklanmasını tetiklemektedir (Dai vd., 2023). Tasarımcı, öğrenci, mimar ne yaptığını anlamak için bu revizyonu bir tasarım, çizim, şehir veya bina boyunca dışsallaştırması gerektiğinde, aslında bir kronotop yaratmaktadır. Dijitalin tasarım sürecindeki aktif varlığı, mimari temsil yöntemlerini ve temsil alanlarını yorumlanabilir ve daha dinamik bir platforma dönüştürür. Tasarım süreci artık çok sayıda bilgiyi kodlama, yönetme, geri bildirimle yeniden yapılandırma yeteneğine sahip ve etkileşimlidir. YZ, tasarımcıyla etkileşimli bir süreç içinde yer alarak, tasarım fikirlerini sürekli olarak geliştirip, farklı bakış açıları sunarak yaratıcı süreci besler. Tasarımcının bilgiyi kontrol etme ve manipüle etme yeteneğiyle, tasarım sürecini sayısal ve fenomenolojik olarak algılamak daha bütünsel bir bakış açısı ve daha hassas bir yaklaşım sağlar (**Şekil 6**).

Şekil 6: Kolektif veri seti ile eğitilmiş ÜYZ stüdyo çıktıları

KAYNAKLAR

Agkathidis, A., Song, Y., & Ioanna, S. (2024). Aı-assisted design: Utilising artificial intelligence as a generative form-finding tool in architectural design studio teaching. In*: eCAADe 2024: Data-Driven Intelligence*, 2024-9-11 - 2024-9-13, Nicosia

Arıdağ, L. & Uraz, T. (2006). Tasarım diyalogunda imgeler ve sözcükler. *İTÜ Dergisi/a, Mimarlık, Planlama, Tasarım, 5*(1), 57–68.

Arıdağ, (2018). Mimari tasarımda rasyonalitenin yeniden temellendirilmesi: Polyfold 3.0. *TMD Uluslararası Hakemli Tasarım ve Mimarlık Dergisi, 15,* Sonbahar-Kış, https://10.17365/TMD.2018.3.1.

Bakhtin, M.M. (2010). *The dialogic imagination: Four essays*. University of Texas Press.

Cheung, L. H., & Dall'Asta, J. C. (2024). Human-computer Interaction (HCI): Approach to artificial ıntelligence in education on (AIEd) in architectural design. *Eídos, 17*(23), 109-131.

Dai, S., Li, Y., Grace, K., & Globa, A. (2023). Towards human-AI collaborative architectural concept design via semantic AI. *In International Conference on Computer-Aided Architectural Design Futures* (pp. 68-82). Springer Nature Switzerland.

Gül, L. F., Delikanlı, B., Üneşi, O., & Gül, E. Ö. (2024). Yapay zekâ, yaratıcılığı destekleyen bir takım arkadaşı olabilir mi? Mimari tasarım stüdyosu deneyiminden öğrendiklerimiz. *XVIII. Mimarlıkta Sayısal Tasarım Ulusal Sempozyumu* (pp. 679-695). Balıkesir.

Komatina, D., Miletić, M., & Mosurović Ružičić, M. (2024). Embracing artificial ıntelligence (AI) in architectural education: A step towards sustainable practice?. *Buildings, 14*(8).

Leach, N. (2022). *Architecture in the age of artificial ıntelligence: An introduction to aı for architects*. Bloomsbury Publishing.

Muntanola, J., (2022). Artificial intelligence and architectural design: An introduction, some theoretical considerations in order to start a dialogy between the three branches of the Langer's Tree. *Arquitectonics: Mind, Land & Society, 33,* 121–143.

Ozorhon, G., & Sarman, G. (2023). The architectural design studio: A case in the intersection of the conventional and the new. *Journal of Design Studio, 5*(2), 295–312. https://doi.org/10.46474/jds.1394851.

Prince, S. (2018). Dwelling and tourism: Embracing the non-represen¬tational in the tourist landscape. *Land¬scape Research, 44*(6), 731-742.

Saldana Ochoa, K., & Huang, L. (2022). AI as active agent for creative exploration in design pedagogy: An AI design methodology for conceptual design in an educational context. *In Proceedings of the Design Communication Association (DCA) International Conference, Forgetting / Remembering,* Alabama, USA, 5-8 October.

Schön, D. & Wiggens, G. (1992). Kinds of seeing and their functions in designing, *Design Studies, 13,* 135-156.

Schumacher, P. (2016). Advancing social functionality via agent based parametric semiology. In P. Schumacher (Ed.), *Parametricism 2.0* (pp. 108–113). Architectural Design (AD).

Schumacher, P. (2022). The metaverse as opportunity for architecture and society: Design drivers, core competencies, *Architectural Intelligence, 1*(1), 11.

Thrift, N. (2007). *Non-representa¬tional theory: Space, politics, affect.* New York: Routledge.

Yorulmaz, G.B., & Arıdağ, L. (2024). Human-machine collaboration: Re-coding space with artificial ıntelligence and agent-based modeling. *Proceedings of the XXVIII Conference of the Iberoamerican Society of Digital Graphics, Biodigital Intelligent Systems* (pp 2215-2226), Barcelona, Spain, 13-15 November.

MSTAS 2025 MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Tek Katlı Plan Organizasyonlarında Çekişmeli Üretici Ağlar ve Pekiştirmeli Öğrenmenin Entegrasyonu: Kullanıcı Merkezli Ödül Fonksiyonları

Mertcan Güldilek[1]; Mustafa Emre İlal[2]; Berk Ekici[3]
[1,2,3]İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü
[1]mertcanguldilek@iyte.edu.tr; [2]mustafaemreilal@iyte.edu.tr; [3]berkekici@iyte.edu.tr

Özet

*Bu çalışma, tek katlı konut planlarının üretiminde yapay zekâ temelli iki güçlü yaklaşım olan **Çekişmeli Üretici Ağlar (GANs- ÇÜA)** ve **Pekiştirmeli Öğrenme (RL-PÖ)** yöntemlerinin entegrasyonunu ele alarak, kullanıcı merkezli ödül fonksiyonlarıyla desteklenen yeni bir tasarım paradigması önermektedir. Geleneksel mimari plan üretimi genellikle uzman bilgisine dayalı manuel süreçlerle gerçekleştirilmekteyken, son yıllarda gelişen yapay zekâ algoritmaları bu süreci otomatikleştirmede önemli bir potansiyel sunmaktadır. Ancak birçok veri odaklı model, tasarımın öznel ve kullanıcı temelli boyutlarını göz ardı etmektedir. Bu çalışmanın temel amacı, kullanıcıların mekânsal tercihlerini sistemin merkezine alan bir model geliştirmek ve bu tercihleri yönlendirebilecek şekilde kütüphaneleştirilmiş ödül fonksiyonları tanımlamaktır. Araştırmada ilk olarak, HouseGAN++ mimarisi kullanılarak, geniş bir mimari veri seti (RPLAN) ile eğitilmiş bir ÇÜA modeli geliştirilmiştir. Bu model, rastgele vektörlerden gerçekçi, mekânsal tutarlılığı yüksek bina planları üretebilme yeteneğine sahiptir. İkinci aşamada, PPO (Yakınsal Politika Optimizasyonu) algoritması ile çalışan bir PÖ ortamı tanımlanmıştır. Bu ortamda, ÇÜA çıktıları; toplam alan uyumu, mekânsal yakınlık, şekil düzenliliği, koridor oranı, mekan çakışması, boş alan kullanımı ve giriş bağlantısı gibi kullanıcı tanımlı ödül fonksiyonları aracılığıyla değerlendirilmiş ve optimize edilmiştir. Tanımlanan ödül fonksiyonları, modüler ve özelleştirilebilir bir yapıda bir kütüphane hâline getirilmiş, her bir fonksiyon kullanıcı önceliklerine göre ağırlıklandırılabilir biçimde yapılandırılmıştır. Bu esneklik, hem bireysel kullanıcıların hem de farklı senaryoların gereksinimlerine uygun plan üretimini mümkün kılmaktadır. Bulgular, sadece GAN tabanlı üretimlerin mekânsal doğruluk ve kullanıcı deneyimi açısından yetersiz kaldığını, ancak PPO destekli üretimlerin bu eksiklikleri gidererek daha fonksiyonel, daha kompakt ve kullanıcı ihtiyaçlarına uygun tasarımlar sunduğunu ortaya koymuştur. Bu çalışma, ÇÜA ve PÖ'nün entegrasyonu yoluyla sadece görsel değil; aynı zamanda fonksiyonel olarak da geçerli planlar üretilebileceğini kanıtlamaktadır. Önerilen sistem, gerçek zamanlı kullanıcı müdahalesine açık bir yapıya evrilebilecek potansiyele sahip olup, gelecekte çok katlı yapılar, farklı tipolojiler ve karma kullanım senaryolarına da uygulanabilir hale getirilebilir. Aynı zamanda kullanıcıdan gelen geri bildirimlerin dinamik biçimde modele entegre edilebilmesi için adaptif ödül sistemlerinin geliştirilmesi önerilmektedir. Bu yönüyle çalışma, kullanıcı deneyimini merkeze alan, yapay zekâ destekli mimari tasarım süreçleri için güçlü ve esnek bir altyapı sunmaktadır.*

Anahtar Kelimeler: *Çekişmeli Üretici Ağlar, Takviyeli Öğrenme, Ödül Fonksiyonları, İnsan-Makine Etkileşimi, Derin Öğrenme.*

2025 MSTAS MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Integrating Generative Adversarial Networks and Reinforcement Learning in Single-Level Plan Organizations: User-Centered Reward Functions

Mertcan Güldilek[1]; Mustafa Emre İlal[2]; Berk Ekici[3]
[1,2,3]Izmir Institute of Technology
[1]mertcanguldilek@iyte.edu.tr; [2]mustafaemreilal@iyte.edu.tr; [3]berkekici@iyte.edu.tr

Abstract

This study proposes a novel design paradigm that integrates two powerful AI-based approaches—Generative Adversarial Networks (GANs) and Reinforcement Learning (RL)—for the generation of single-story residential floor plans. The framework is driven by user-centered reward functions, offering a new perspective on automated architectural design. While traditional architectural planning largely relies on expert-driven, manual processes, recent advancements in artificial intelligence offer promising opportunities for automation. However, many data-driven models fall short in capturing the subjective and user-specific aspects of design. The primary aim of this study is to develop a model that places users' spatial preferences at the core of the generative process and to define a modular library of reward functions capable of guiding these preferences. The research first employs the HouseGAN++ architecture, trained on a large-scale architectural dataset (RPLAN), to develop a GAN model capable of generating realistic and spatially coherent building layouts from random latent vectors. In the second phase, a reinforcement learning environment based on the Proximal Policy Optimization (PPO) algorithm is introduced. In this environment, the outputs of the GAN are evaluated and optimized using a set of user-defined reward functions, including total area alignment, spatial proximity, shape regularity, corridor ratio, room overlap, void space utilization, and entry connectivity. The reward functions are structured as a modular and customizable library, allowing each function to be weighted according to specific user priorities. This flexibility enables the generation of floor plans that can cater to individual preferences as well as diverse design scenarios. Findings reveal that GAN-only models fall short in terms of spatial accuracy and user-centric performance, whereas PPO-augmented models successfully overcome these limitations, producing more functional, compact, and user-aligned layouts. For instance, accessibility is enhanced via the connectivity reward, unused spaces are minimized through void space penalties, and functional adjacencies are promoted by spatial proximity metrics. The integration of GANs and RL in this framework demonstrates the capability to generate not only visually plausible but also functionally valid architectural layouts. The proposed system holds the potential to evolve into a real-time, user-interactive platform, and is extendable to multi-story buildings, varied typologies, and mixed-use scenarios. Additionally, the development of adaptive reward systems that can dynamically incorporate user feedback is suggested for future work. Overall, this study presents a robust and flexible infrastructure for AI-assisted architectural design processes centered around user experience.

Keywords: *Generative Adversarial Networks, Reinforcement Learning, Reward Functions, Human-Machine Interaction, Deep Learning.*

1. Giriş

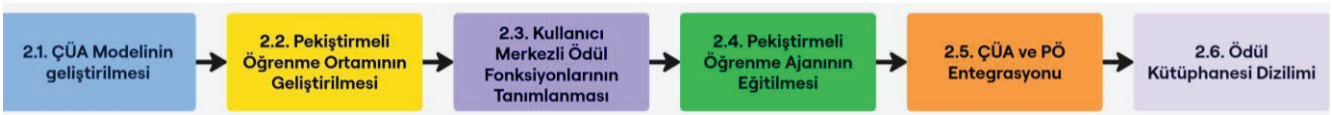
Son yıllarda oluşan yapay zekâ (YZ/AI) ve derin öğrenme (DÖ/DL) alanındaki gelişmeler, mimari tasarım gibi yaratıcı alanlarda yeni yöntem ve uygulamaların geliştirilmesini sağlamıştır (Weber vd., 2022). Bu kapsamda, Çekişmeli Üretici Ağlar (ÇÜA/GANs) ve Pekiştirmeli Öğrenme (PÖ/RL), karmaşık problemlerin çözümünde sıklıkla kullanılan iki güçlü yöntem olarak dikkat çekmektedir (Baduge vd., 2022). ÇÜA, özellikle veri üretiminde büyük bir başarı sağlayarak gerçekçi ve yaratıcı çıktılar sunabilmesiyle öne çıkmıştır. İki sinir ağı (üretici ve ayırt edici) arasındaki rekabetçi yapıya dayanan ÇÜA (Goodfellow vd., 2014), görüntü sentezi (Yang vd., 2023), metin üretimi (Rosa & Papa, 2021) ve sanal ortam oluşturma gibi alanlarda yaygın olarak uygulanmaktadır. PÖ ise, bir etmenin ortamıyla etkileşim kurarak uzun vadeli ödülleri en üst düzeye çıkaracak şekilde öğrenmesini sağlayan deneyime dayalı bir yöntemdir (Sutton & Barto, t.y.). PÖ, robotik, oyunlar ve otonom sistemler gibi uygulamalardaki yüksek öğrenim performansıyla öne çıkmaktadır. Her iki YZ yönteminin ayrı ayrı sağladığı avantajlara göre, YZ algoritmalarının birleşimi, daha etkili ve kullanıcı merkezli sistemlerin geliştirilmesine olanak tanıyabileceği düşünülebilir (Franceschelli & Musolesi, 2024). ÇÜA ve PÖ'nün bütünleşik kullanımı hakkında literatürde çalışmalar bulunsa da mimari plan organizasyonunda ele alan çalışmaların sınırlı olduğu gözlemlenmektedir.

ÇÜA ve PÖ'nün entegrasyonu, yapay zekâ destekli tasarım süreçlerinde yenilikçi bir paradigma sunma potansiyeline sahiptir (Abbasian vd., 2023). ÇÜA'nın güçlü veri üretim yetenekleri ile PÖ'nün dinamik karar verme süreçlerini bir araya getirmek, yalnızca statik veri odaklı bir yaklaşımdan ziyade kullanıcı taleplerine duyarlı, esnek ve özelleştirilebilir tasarım süreçlerini mümkün kılmaktadır(Franceschelli & Musolesi, 2024). Bu bağlamda, ÇÜA ve PÖ'nün birleşimi, mimari tasarım alanında daha önce karşılaşılan sorunların üstesinden gelmek için umut verici bir çözüm sunmaktadır. Ancak, bu entegrasyonu mimari bağlamda ele alan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Mimari tasarımda ÇÜA ve PÖ'nün bir arada kullanılması fikri, yaratıcı tasarımlar üretirken kullanıcı ihtiyaçlarını ön planda tutmayı ve bu süreçleri daha optimize hale getirmeyi mümkün kılmaktadır (Rahbar vd., 2022). Literatürde, ÇÜA genellikle mimari plan üretimi veya benzeri alanlarda veri üretimi için kullanılırken, PÖ daha çok etkileşimli karar alma süreçlerinde yer almıştır. Örneğin, ÇÜA kullanılarak mekansal düzenlemelerin otomatikleştirildiği bazı çalışmalar mevcuttur; ancak bu yaklaşımlar çoğunlukla kullanıcı merkezli bir değerlendirme mekanizmasına dayanmamaktadır (Zhang vd., 2024) . Benzer şekilde, PÖ uygulamaları, mekânsal kararların optimize edilmesi gibi alanlarda başarılı sonuçlar sunmuş olsa da genellikle kullanıcı odaklı geri bildirimlere dayalı olarak tasarlanmış değildir (Hong vd., 2022). ÇÜA ve PÖ'nün birleştirilmesi, kullanıcı ihtiyaçlarına duyarlı bir tasarım çerçevesi sunarak literatürdeki bu boşluğu doldurma potansiyeli taşımaktadır.

Bu çalışma, Çekişmeli Üretici Ağlar (ÇÜA) ve Pekiştirmeli Öğrenme'nin (PÖ) mimari tasarım süreçlerinde entegrasyonunu ele almakta ve bu birleşimi kullanıcı merkezli bir yaklaşımla uygulamayı hedeflemektedir. Özellikle tek katlı plan organizasyonlarında, kullanıcı tercihlerini yönlendirecek ödül fonksiyonlarının tanımlanarak modüler bir kütüphane hâline getirilmesi amaçlanmıştır. ÇÜA'nın gerçekçi mekânsal plan üretim yetenekleri, PÖ'nün dinamik öğrenme ve karar verme mekanizmalarıyla birleştirilerek sadece görsel açıdan tatmin edici değil, aynı zamanda kullanıcı ihtiyaçlarına duyarlı ve özelleştirilebilir planlar oluşturulmuştur (Abbasian vd., 2023). Çalışmanın temel katkısı, kullanıcı odaklı ödül fonksiyonlarının geliştirilmesi ve sistematik bir şekilde kütüphaneleştirilmesidir. Bu fonksiyonlar, geometrik yapı, mekânsal ilişkiler, enerji verimliliği ve estetik gibi kriterlere dayanarak plan üretimini optimize etmektedir. Literatürde ÇÜA ve PÖ'nün birleşimini ele alan az sayıda çalışma mevcuttur ve çoğu kullanıcı ihtiyaçlarını yeterince dikkate almamaktadır. Bu çalışma ise, kullanıcıların mekan boyutu, odalar arası mesafe ya da toplam alan gibi tercihlerine göre sistemin çıktılar üretmesini sağlayarak kullanıcı beklentilerini doğrudan sürece entegre etmeyi hedeflemektedir. Sonuç olarak, çalışma yalnızca teknik bir yenilik sunmakla kalmayıp, mimari tasarımda kullanıcı deneyimini artıran dinamik ve esnek bir yaklaşımı desteklemektedir. Böylece ÇÜA ve PÖ'nün bütünleşik kullanımına dair literatürdeki boşluğu doldurmakta ve bu entegrasyonun sağladığı potansiyel katkıları ortaya koymaktadır.

2. Model Kurgusu ve Entegrasyonu

Model kurgusu ve entegrasyonu aşamaları **Şekil 1**'de verilmiştir.



Şekil 1: Model kurgusu ve Entegrasyonu akış şeması

2.1. ÇÜA Modelinin geliştirilmesi

Bu çalışmanın başlangıç noktasında, HouseGAN++ (Nauata vd., 2021) temelli bir ÇÜA modeli geliştirilmiştir. ÇÜA, bina planlarının üretimi için yüksek kaliteli ve gerçekçi mekansal düzenlemeler yapma kapasitesine sahiptir. Model, rastgele girdileri bina planlarına dönüştürmek üzere eğitilmiştir. Eğitim sürecinde geniş bir mimari plan veri seti olan RPLAN (Wu vd., 2019) kullanılarak üretici ve ayırt edici ağların eş zamanlı optimizasyonu sağlanmıştır. Eğitim sırasında, ÇÜA'nın mekansal düzenlerin geometrik tutarlılığı ve çeşitliliği açısından performansı izlenmiş ve test aşamasında modelin çıktı kalitesi değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, modelin PÖ ortamında kullanılmak üzere yeterli esnekliğe ve doğruluğa sahip olduğunu göstermiştir.

2.2. Pekiştirmeli Öğrenme Ortamının Geliştirilmesi

PÖ'nün sisteminde iki temel bileşen yer alır: etmen (agent) ve ortam (environment). Etmen, ortamla etkileşime geçen bir sinir ağıdır ve ortamın kuralları doğrultusunda deneyim kazanarak öğrenir. Ortam ise, bu öğrenme süreci için gerekli kurallar, ödüller ve geri bildirim mekanizmalarını içerir. ÇÜA modeli tanımlandıktan sonra, bina planlarını kullanıcı merkezli kriterlere göre değerlendirmek amacıyla bir PÖ ortamı oluşturulmuştur. Ortamın eylem alanı, ÇÜA'nın sürekli uzayında tanımlanmış ve etmenin bu uzayda hareket ederek planları yönlendirmesi sağlanmıştır. Durum alanı (state), etmenin mevcut planı gözlemleyip karar almasına olanak tanırken, adım fonksiyonu her hareket sonrası ÇÜA'nın yeni bir plan üretmesini ve bunun kullanıcı tanımlı ödül fonksiyonlarıyla değerlendirilmesini sağlamıştır. Ortam, belirli bir ödül düzeyine ulaşıldığında eğitimi durduracak şekilde tasarlanmış; ayrıca, her eğitim döngüsünde rastgele bir başlangıç vektörü ve mimari parametrelerle yeniden başlatılarak üretimde çeşitlilik sağlanmıştır.

2.3. Kullanıcı Merkezli Ödül Fonksiyonlarının Tanımlanması

Kullanıcı merkezli ödül fonksiyonları, bina planlarının kullanıcı tercihleri doğrultusunda optimize edilmesi için tanımlanmıştır. Bu fonksiyonlar, *alan uyumu*, *mekansal yakınlık*, *şekil faktörleri*, *koridor cezası*, *mekan örtüşmesi*, *bağlantı* ve *boş alan kullanımı* kriterlerine dayalı olarak tanımlanmıştır:

- Alan uyumu, planın toplam alanının hedef alana olan yakınlığına göre bir ödül hesaplamaktadır.
- Mekansal yakınlık, belirli odalar arasında kullanıcı tarafından belirlenen mekansal ilişkilerin sağlanması durumunda ödüllendirmeyi içermektedir.
- Şekil faktörleri, odaların kareye yakın geometriye sahip olması ve kompakt düzenlemeler içermesi gibi kriterleri ödüllendirirken, aşırı uzun ya da düzensiz şekilleri cezalandırmaktadır.
- Koridor cezası, toplam koridor alanını minimize etmeye yönelik negatif bir ödül mekanizmasıdır.
- Mekan örtüşmesi, üst üste binen odalar için bir ceza mekanizması sunarken, bağlantı ödülü, giriş odasının diğer odalarla bağlantılı olmasını teşvik etmektedir.
- Boş alan kullanımı, kullanılmayan alanların oranını minimize etmeye yönelik negatif ödüller içermektedir.

2.4. Pekiştirmeli Öğrenme Etmeninin Eğitilmesi

PÖ etmeninin eğitimi, Yakınsal Politika Optimizasyonu (YPO/PPO) algoritmasıyla gerçekleştirilmiştir. YPO, etmen politikasının daha kararlı ve verimli bir şekilde optimize edilmesini sağlamak için kullanılmıştır (Schulman vd., 2017). Etmen, her tekrarda bir eylem seçmiş ve ÇÜA'nın yeni bir bina planı üretmesini sağlamıştır. Üretilen plan, ortamdan gelen ödüller doğrultusunda değerlendirilmiş ve etmen, ödül fonksiyonlarına uygun planlar üretmek için politikasını güncellemiştir. Politika güncellemesi sürecinde etmen, ödülleri optimize etmek için iteratif bir şekilde politikasını iyileştirmiştir. YPO algoritması, öğrenme oranı (learning rate), kırpma aralığı (clipping range) ve hedeften sapma (target deviation) gibi parametreler ile optimize edilmiştir. Bu süreç, etmeni kullanıcı odaklı ödül fonksiyonlarına uygun şekilde daha karmaşık planlar üretmeye yönlendirmiştir.

2.5. ÇÜA ve PÖ Entegrasyonu

ÇÜA modeli PÖ ortamına entegre edilmiştir. Bu entegrasyon, ÇÜA'nın yaratıcı veri üretme kapasitesini PÖ'nün dinamik öğrenme ve optimizasyon yetenekleriyle birleştirmiştir. PÖ etmeni, ÇÜA'nın ürettiği bina planlarını ödül fonksiyonları doğrultusunda değerlendirmiş ve geri bildirim sağlayarak ÇÜA'nın çıktılarının kullanıcı gereksinimlerine daha uygun hale gelmesini sağlamıştır. Bu süreç, ÇÜA ve PÖ'nün birlikte çalışarak mimari tasarım süreçlerinin iyileştirilmesini mümkün kılmıştır.

2.6. Ödül Kütüphanesi Dizilimi

Bu çalışmanın temel yeniliklerinden biri, kullanıcı merkezli ödül fonksiyonlarının modüler bir kütüphane şeklinde düzenlenmesidir. Her ödül fonksiyonu bağımsız bir modül olarak tanımlanmış ve kullanıcı ihtiyaçlarına göre özelleştirilebilir bir yapı sunulmuştur (Bahrehmand vd., 2017). Kütüphane, ödül fonksiyonlarının kullanıcı önceliklerine göre ağırlıklandırılmasına olanak tanır; örneğin bir kullanıcı alan uyumuna, bir diğeri mekansal yakınlığa öncelik verebilir. Bu esnek yapı, farklı senaryolara uygun plan üretimini mümkün kılmakta; ayrıca, yeni ödül fonksiyonlarının eklenmesini ve mevcutların kullanıcı geri bildirimine göre güncellenmesini desteklemektedir.

2.6.1. Alan Uyumu

Pekiştirmeli öğrenme tabanlı bina planı üretiminde, toplam alanın hedeflenen alanla uyumluluğu önemli bir optimizasyon kriteridir. Üretilen bina planlarının toplam alanı ($\mathbf{A_{plan}}$), kullanıcı tarafından belirlenen hedef alan ($\mathbf{A_{hedef}}$) ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda ödül fonksiyonu Denklem (1) de tanımlanmıştır.

$$R_{alan} = -\frac{|A_{plan} - A_{hedef}|}{A_{hedef}} \times \alpha_{alan} \quad (1)$$

Burada, $\mathbf{|A_{plan} - A_{hedef}|}$ ifadesi, mevcut plan ile hedef alan arasındaki sapmayı temsil etmekte, $\mathbf{A_{hedef}}$'e bölünerek bu sapma normalize edilmektedir. Bu sayede farklı büyüklükteki projeler arasında karşılaştırılabilir bir ölçek sağlanmaktadır. Negatif işaret kullanımı, sapmanın büyümesi durumunda ödül değerinin azalmasını sağlamaktadır. $\boldsymbol{\alpha_{alan}}$ katsayısı ise, alan uyumu ödülünün toplam ödül fonksiyonu üzerindeki ağırlığını belirlemektedir. Bu yaklaşımın temel amacı, etmenin üretmiş olduğu planların, tasarım hedeflerine daha uygun ölçekte olmasını teşvik etmektir. Gerçek dünyada, belirlenen alan limitlerinin aşılması hem ekonomik hem de fonksiyonel açıdan olumsuzluk yaratacağından, bu ödül fonksiyonu tasarım sürecinde kritik bir rol oynamaktadır.

2.6.2. Mekansal Yakınlık

Mekansal organizasyon, mimari tasarımın en temel unsurlarından biridir. Özellikle bazı fonksiyonel alanlar arasında (örneğin yatak odası ve banyo gibi) fiziksel yakınlık sağlanması kullanıcı deneyimi açısından büyük önem taşır. Bu bağlamda, tanımlanan mekansal yakınlık ödül fonksiyonu, önceden belirlenmiş ideal komşuluk ilişkilerine ($\mathbf{A_{istenen}}$) dayalı olarak planları değerlendirmektedir. İki oda maskesi ($\mathbf{M_i}$ ve $\mathbf{M_j}$) arasındaki komşuluk ilişkisi Denklem (2) de tanımlanmıştır:

$$Komşu(M_i, M_j) = \begin{cases} 1, & eğer\ M_i ve\ M_j\ bitişikse \\ -1, & değilse \end{cases} \quad (2)$$

Buna bağlı olarak, toplam mekansal yakınlık ödülü ise Denklem (3) ile tanımlanmıştır:

$$R_{komşuluk} = \frac{1}{|M|} \sum_{(i,j) \in A_{istenen}} Komşu(M_i, M_j) \times \alpha_{komşuluk} \quad (3)$$

Burada, $\mathbf{|M|}$ toplam oda sayısını, $\boldsymbol{\alpha_{komşuluk}}$ ise bu ödülün katsayısını ifade etmektedir.
Bu yöntem ile, etmenin oda yerleşimlerini yalnızca rastgele değil, mekansal ilişkilere duyarlı şekilde öğrenmesi hedeflenmektedir. Böylece üretilen planlarda işlevsel bütünlük sağlanması amaçlanmaktadır.

2.6.3. Şekil Faktörleri

Oda şekillerinin düzenliliği, hem estetik hem de kullanım verimliliği açısından bina planı kalitesini doğrudan etkilemektedir. Bu bağlamda, odaların geometrik özellikleri iki temel ölçüt üzerinden değerlendirilmiştir: oran (aspect ratio) ve kompaktlık (compactness). Bir odanın oranı, genişliğinin yüksekliğine oranı olarak tanımlanır:

$$Oran = \frac{Genişlik}{Yükseklik} \quad (4)$$

İdeal oran değeri 1.0 olup, bu değer kareye yakın odaların tercih edildiğini gösterir. Kompaktlık ise bir şeklin çevresine göre ne kadar düzgün olduğunu ifade eder ve şu formülle hesaplanır:

$$Kompaktlık = \frac{4\pi\ x\ Alan}{(Çevre)^2} \quad (5)$$

Bu iki ölçüte dayalı olarak oluşturulan şekil ödülü:

$$R_{şekil} = \sum_i(-|Oran_i| \; x \; \alpha_{oran}) + ((Kompaktlık_i < \theta_{kompaktlık}) \; x \; \beta_{kompaktlık}) \quad (6)$$

şeklinde tanımlanmıştır. Burada, $\theta_{kompaktlık}$ belirli bir kompaktlık eşik değerini (bu çalışmada 0.5 değeri kullanılmıştır) temsil etmekte olup, eşiğin altındaki odalar için ek ceza puanı uygulanmaktadır. Bu sayede, etmenin sadece odaların alanını optimize etmesi değil, aynı zamanda işlevsel ve estetik açıdan kabul edilebilir şekiller üretmesi sağlanmaktadır. Böylelikle kullanıcı deneyimini olumsuz etkileyebilecek uzun ve dar odaların üretimi minimize edilmektedir.

2.6.4. Koridor Cezası

Bina planlarında koridorlar, kullanıcıya doğrudan bir yaşam fonksiyonu sunmayan, geçiş odaklı alanlardır. Bu sebeple, koridor alanlarının minimize edilmesi, yaşam alanlarının efektif kullanımı açısından önemlidir. Koridor alanı üzerinden verilen ceza fonksiyonu şu şekilde formüle edilmiştir:

$$R_{koridor} = -\frac{A_{Koridor}}{A_{plan}} \times \alpha_{koridor} \quad (7)$$

Bu formülde, $A_{koridor}$ toplam koridor alanını, A_{plan} ise tüm plan alanını temsil etmektedir. Normalize edilen koridor oranı, negatif bir çarpan ile ödül fonksiyonuna dahil edilerek, koridor alanlarının azaltılması teşvik edilmektedir. $\alpha_{koridor}$ katsayısı ise, bu cezanın toplam öğrenme sürecine etkisini belirler. Bu ödül fonksiyonunun amacı, etmenin oda yerleşimlerini mümkün olduğunca kompakt ve verimli şekilde organize etmesini sağlamaktır. Böylece gerçek dünyadaki kullanıcı ihtiyaçları doğrultusunda, daha yaşanabilir ve işlevsel mekan tasarımları elde edilebilmektedir.

2.6.5. Mekan Örtüşmesi

Bina planı üretiminde odaların birbirinin üzerine çakışmaması, tasarımın geçerliliği ve kullanım kolaylığı açısından kritik öneme sahiptir. Gerçek bir mimari projede farklı odaların alanlarının üst üste binmesi, yapısal problemler ve kullanım zorlukları yaratır. Bu nedenle, üretilen planlardaki mekân örtüşmeleri cezalandırılarak, etmen bu tür hatalı üretimlerden kaçınmaya teşvik edilmiştir. Mekan örtüşmesi için tanımlanan ceza fonksiyonu şu şekildedir:

$$R_{Çakışma} = -\frac{A_{çakışma}}{A_{toplam_maske}} \times \alpha_{çakışma} \quad (8)$$

Burada, $A_{çakışma}$, birden fazla odanın aynı piksel alanı içinde üst üste gelmesi sonucu oluşan toplam çakışma alanını, A_{toplam_maske} ise tüm planın toplam alanını ifade etmektedir. Normalize edilerek hesaplanan bu oran, negatif bir katsayı ($\alpha_{çakışma}$) ile çarpılarak ceza puanı üretir. Bu fonksiyon sayesinde, üretilen planlarda odaların birbirinden ayrışması sağlanmakta ve fiziksel olarak tutarlı mekânsal düzenlemelerin oluşması teşvik edilmektedir. Böylece yapısal geçerliliği ve kullanıcı deneyimi açısından uygun planlar elde edilmektedir.

2.6.6. Bağlantı Ödülü

Bir bina planında giriş alanının diğer tüm odalara doğrudan veya dolaylı bir şekilde bağlı olması, hem güvenlik hem de erişilebilirlik açısından son derece önemlidir. Özellikle acil durum senaryolarında (yangın, tahliye gibi) tüm mekanlara girişten erişim sağlanabilir olması zorunludur. Bu çalışmada, giriş odasının diğer tüm odalarla bağlantısını kontrol eden bir bağlantı ödülü tanımlanmıştır. Bağlantı durumu aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$Bağlantı = \begin{cases} 1, & eğer\ giriş\ tüm\ odalara\ bağlıysa \\ -1, & değilse \end{cases} \quad (9)$$

Bağlantı ödülü ise:

$$R_{bağlantı} = Bağlantı \; \times \alpha_{bağlantı} \quad (10)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Burada $\alpha_{bağlantı}$, bağlantının toplam ödül üzerindeki ağırlığını belirleyen katsayıdır. Bu yöntemle etmen, mekansal olarak kopuk ve erişilemez odalar üretmekten kaçınarak, her odanın fonksiyonel bir bütünlük içinde yer aldığı planlar geliştirmeye teşvik edilmiştir. Bu mekanizma özellikle kullanıcı güvenliği ve tasarım fonksiyonelliği açısından önemlidir.

2.6.7. Boş Alan Kullanımı

Bina planlarının iç mekan kullanımında etkinlik sağlamak amacıyla, kullanılmayan boş alanların oranı minimize edilmeye çalışılmıştır. Boş alanlar, hem ekonomik verimliliği düşürmekte hem de mekansal organizasyonu

zayıflatmaktadır. Bu bağlamda, plan içerisindeki kullanılmayan boş alan miktarı baz alınarak bir ceza fonksiyonu oluşturulmuştur:

$$R_{boş_alan} = -\frac{A_{boş_alan}}{A_{toplam_maske}} \times \alpha_{boş_alan} \quad (11)$$

Burada, $\mathbf{A_{boş_alan}}$ kullanılmayan (yani hiçbir oda maskesi tarafından kaplanmamış) alanı, $\mathbf{A_{toplam_maske}}$ ise toplam plan alanını temsil etmektedir. Normalize edilmiş bu oran, negatif bir katsayı ile çarpılarak boş alanı minimize edecek şekilde etmeni yönlendirmektedir. Bu yaklaşım sayesinde, üretilen planlarda mevcut alanlar maksimum verimlilikle kullanılarak hem estetik hem de fonksiyonel olarak güçlü tasarımlar elde edilmiştir. Aynı zamanda, enerji verimliliği ve inşaat maliyetleri açısından da olumlu etkiler sağlanması hedeflenmiştir.

2.6.8. Toplam Ödül Fonksiyonunun Yapılandırılması

Tüm tanımlanan bağımsız ödül ve ceza fonksiyonlarının bir araya getirilerek tek bir toplam ödül fonksiyonu oluşturulması, pekiştirmeli öğrenme sürecinin nihai yönlendiricisi olmuştur. Bu birleşik ödül fonksiyonu, her alt kriterin kullanıcı tarafından belirlenebilecek ağırlık katsayıları ile çarpılması esasına dayanmaktadır:

$$R_{toplam} = \sum_{k=1}^{N} \lambda_k R_k \quad (12)$$

Burada, $\mathbf{R_k}$ her bir ödül fonksiyonunu, $\boldsymbol{\lambda}_k$ ise o fonksiyonun toplam ödül içindeki ağırlığını temsil etmektedir. **N** toplam ödül fonksiyonu sayısını ifade eder. Bu yapı, kullanıcının farklı tasarım önceliklerine göre ağırlıkları ayarlamasına ve elde edilecek bina planlarının belirli bir kullanım senaryosuna veya kullanıcı profiline uygun şekilde optimize edilmesine olanak tanımaktadır. Aynı zamanda yeni kriterlerin sisteme entegre edilmesini kolaylaştırarak sistemin modülerliğini ve genişletilebilirliğini de sağlamaktadır.

3. Bulgular

3.1. Ödül Fonksiyonlarının Etkileri

Bu bölümde, tanımlanan her bir ödül fonksiyonunun bina planı üretimi üzerindeki etkisi görsel örnekler eşliğinde sunulmaktadır. Her bir alt bölüm, spesifik bir ödül fonksiyonunun aktivasyonu sonrası üretilen planlardaki değişimi ve gelişimi ortaya koymaktadır. Her bir üretim sadece tek bir girdiden üretilmiş olup bu girdideki değişimler gözlenmiştir. Bu sayede YPO'nun ÇÜA üzerinde oluşturduğu etki daha rahat gözlenmiştir.

3.1.1. Alan Uyumu

Şekil 2'de sadece Alan Uyumu ödülü aktifken üretilen plan örnekleri gösterilmiştir. Görüldüğü üzere, planların toplam alanı, hedeflenen alan değerine yakınsamakta ve alan sapması minimize edilmektedir. Bu durum, alanın verimli kullanımı açısından bir gelişme sağlamıştır. Mekanların boyutları kareleştirilmiş veya dikdörtgen hale getirilmiştir.

Şekil 2: Alan Uyumu ödülü ile üretilen bina planı örneği

3.1.2. Mekansal Yakınlık

Şekil 3'te, mekansal yakınlık ödülünün aktif olduğu üretimler yer almaktadır. Özellikle yatak odası ve banyo gibi fonksiyonel açıdan birbiriyle ilişkili odaların mekansal yakınlıklarının optimize edildiği gözlemlenmektedir. Bu, kullanıcı deneyimi açısından önemli bir tasarım gelişimidir. Normalde girdide mavi alan (balkon) planın sağ-alt tarafında bulunmaktadır. Sol-alt bölüme almak için ödül fonskiyonu özelleştirilmiş olup bu sayede balkon sol tarafa alınmıştır.

Şekil 3: Mekansal Yakınlık ödülü ile optimize edilmiş plan örneği

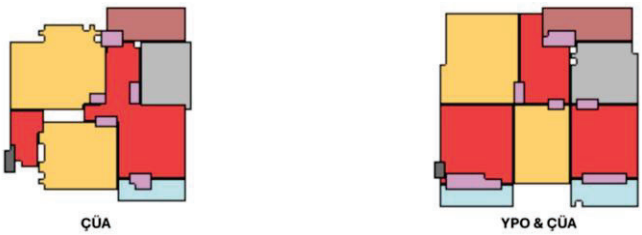
3.1.3. Şekil Faktörleri

Şekil 4, Şekil Faktörleri ödülü aktifken üretilen planları göstermektedir. Oda geometrilerinin daha kompakt ve kareye yakın formda olduğu, düzensiz ve uzun odaların minimize edildiği dikkat çekmektedir. Böylece hem estetik hem de fonksiyonellik açısından olumlu bir gelişme sağlanmıştır. Oturma odası (kırmızı) olan alan bölünmüş ve düzensiz bir şekle sahipken düzenlenmiştir. Ayrıca geri kalan mekanların ebatları da kareleştirilerek daha net bir plan elde edilmeye çalışılmıştır.

Şekil 4: Şekil Faktörleri ödülü ile şekil düzenlemesi sağlanmış planlar

3.1.4. Koridor Cezası

Şekil 5, Koridor Cezası aktifken üretilen planları göstermektedir. Koridor alanlarının belirgin şekilde azaldığı ve odadan odaya geçişlerinin daha kompakt şekilde organize edildiği görülmektedir. Bu durum hem alan verimliliğini hem de mekan kullanımını optimize etmeyi amaçlamaktadır. Mekanlar, birbirine kapılarla bağlanmıştır ve mekan bölünmesi koridor alanını minimize ederek yapılmıştır.



Şekil 5: Koridor alanı azaltılmış bina planı örneği

3.1.5. Mekan Örtüşmesi

Mekân örtüşmesi cezası aktif edildiğinde, odalar arasındaki çakışmaların belirgin şekilde azaldığı görülmüştür. **Şekil 6**'da yalnızca bu cezanın uygulandığı bir örnek plana yer verilmiştir. Ödül fonksiyonu devre dışı olduğunda, odaların sınırları üst üste gelmiş ve fiziksel olarak uygulanamaz planlar oluşmuştur. Ceza etkinleştirildiğinde ise, odalar net biçimde ayrışmış ve çakışmalar büyük ölçüde ortadan kalkmıştır. Bu durum, özellikle küçük yüzölçümlü planlarda daha düzenli alan kullanımı sağlayarak, yapısal tutarlılık ve fonksiyonellik açısından önemli iyileşmeler sunmuştur. Bulgular, mekânsal ayrışmanın kullanıcı deneyimi üzerindeki önemini açıkça ortaya koymaktadır.

Şekil 6: Mekan Örtüşmesi cezası sonrası çakışması olmadan plan üretimi

3.1.6. Bağlantı Ödülü

Bağlantı ödül fonksiyonunun uygulanmasıyla, girişten tüm odalara erişim sağlanan planlar elde edilmiştir. **Şekil 7**'de bu ödül aktifken üretilen örnek plana yer verilmiştir. Ödül uygulanmadan önce, erişilemeyen veya izole odalar sıkça görülmüş; bu da fonksiyonellik ve güvenlik açısından önemli eksiklikler doğurmuştur. Ödülün devreye alınmasıyla birlikte mekânsal bütünlük sağlanmış, tüm odalar girişe doğrudan ya da dolaylı biçimde bağlanmıştır. Bu gelişme hem kullanıcı dolaşımını kolaylaştırmakta hem de acil durum senaryolarında güvenliği artırmaktadır. Bulgular, bağlantı kriterinin tasarım kalitesi ve kullanıcı deneyimi açısından kritik bir rol oynadığını göstermektedir.

Şekil 7: Bağlantı Ödülü uygulanarak tüm odalara erişim sağlanan plan örneği

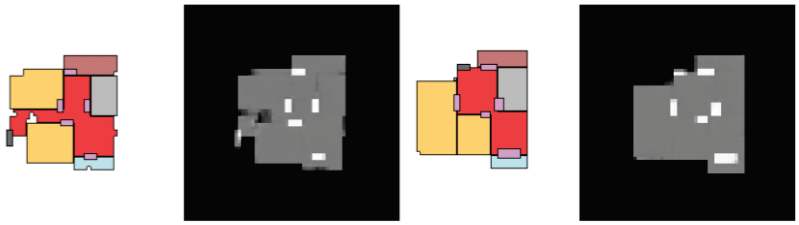
3.2. Toplam Ödül Fonksiyonuyla Üretilen Planlar

Tüm ödül fonksiyonlarının aynı anda aktif olduğu durumda üretilen planlar, **Şekil 8**'de sunulmuştur. Bu planlar hem hedef alan uyumu, hem işlevsel komşuluk, hem de estetik açıdan optimum bir denge sağlamaktadır. Etmenin, çoklu ödül kriterlerine uyum sağlayarak dengeli ve yüksek kaliteli çıktılar üretebildiği gözlemlenmiştir.

Şekil 8: Toplam ödül dikkate alınarak üretilen plan örneği kıyaslaması

3.3. YPO & ÇÜA Modeli ile Eğitim Sonrası Elde Edilen Gelişmeler

Bu çalışmada ÇÜA tabanlı üretimler ile YPO destekli ÇÜA üretimleri karşılaştırılmıştır. Üretilen planlarda düzensizlik, alan sapmaları, işlevsel kopukluklar ve mekansal geçişlerde düzensizlikler gözlemlenmiştir. Oda şekilleri düzensiz ve koridor alanı kullanımında verimsizlikler mevcuttur **(Şekil 9-Sol)**. YPO destekli eğitim sonrası, planlar daha düzenli, alan kullanımı daha verimli, odalar arasındaki geçişler daha optimize ve genel tasarım kalitesi daha yüksek olarak ortaya çıkmıştır. Bu sonuçlar, pekiştirmeli öğrenme destekli optimizasyon sürecinin ÇÜA tabanlı üretimlerin kalitesini anlamlı derecede artırabildiğini göstermektedir **(Şekil 9-Sağ)**.



Şekil 9: Üretilen Plan Örnekleri (Sol-sadece ÇÜA, Sağ- YPO ve ÇÜA)

4. Sonuçlar

Bu çalışma, tek katlı bina plan organizasyonlarında ÇÜA ve PÖ yöntemlerinin entegrasyonu yoluyla kullanıcı merkezli tasarım süreçlerinin geliştirilmesini amaçlamaktadır. Elde edilen sonuçlar, önerilen yaklaşımın hem üretim kalitesi hem de kullanıcı odaklılık açısından önemli avantajlar sunduğunu göstermektedir. Yalnızca ÇÜA ile üretilen planlarda; alan sapmaları, işlevsel kopukluklar, mekan çakışmaları ve aşırı koridor kullanımı gibi ciddi eksiklikler gözlemlenmiştir. Bu da veri temelli modellerin tek başına, kullanıcı odaklı tasarımda yetersiz kaldığını ortaya koymuştur. PÖ'nün entegrasyonu sayesinde, kullanıcı tanımlı ödül fonksiyonları doğrultusunda etmen yönlendirilmiş ve çıktılar önemli ölçüde iyileştirilmiştir. Alan uyumu ödülü, planların hedef alana yakınsamasını sağlamış; mekansal yakınlık ödülü ile

işlevsel odalar bir araya getirilmiş; şekil faktörleri sayesinde ise daha kompakt ve estetik formlar elde edilmiştir. Ayrıca koridor cezası ve boş alan ödülü ile verimsiz alanlar azaltılarak, aktif kullanım oranı artırılmıştır. Mekan örtüşmesi cezası fiziksel geçerliliği artırırken, bağlantı ödülü tüm mekanlara erişimi garanti altına almıştır. Bu kriterlerin birlikte değerlendirilmesiyle hem fonksiyonel hem güvenli planlar üretilmiştir. ÇÜA ile yalnızca GAN tabanlı üretimler ve PPO destekli üretimler karşılaştırıldığında; YPO & ÇÜA entegrasyonunun daha kompakt, erişilebilir ve kullanıcı hedeflerine uygun çıktılar sunduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, literatürde sınırlı sayıda bulunan ÇÜA-PÖ entegrasyon çalışmalarını desteklemekte ve özellikle kullanıcı merkezli tasarım hedeflerine ulaşmada bu iki yöntemin birlikte yüksek potansiyel taşıdığını göstermektedir. Gelecekte, daha büyük veri setleri ve farklı yapı tipolojileri üzerinde çalışmalar yapılması önerilmektedir. Ayrıca, kullanıcı geri bildirimlerine dayalı adaptif ödül sistemleri geliştirildiğinde, yöntemin gerçek dünya uygulamaları için daha güçlü hale geleceği öngörülmektedir. Bu çalışma, yapay zekâ tabanlı tasarımda yalnızca veri üretiminin değil, etkileşim ve öğrenmenin de merkezî rol oynayabileceğini ortaya koymaktadır.

KAYNAKLAR

Abbasian, M., Rajabzadeh, T., Moradipari, A., Aqajari, S. A. H., Lu, H., & Rahmani, A. (2023). *Controlling the Latent Space of GANs through Reinforcement Learning: A Case Study on Task-based Image-to-Image Translation* (No. arXiv:2307.13978). arXiv. http://arxiv.org/abs/2307.13978

Baduge, S. K., Thilakarathna, S., Perera, J. S., Arashpour, M., Sharafi, P., Teodosio, B., Shringi, A., & Mendis, P. (2022). Artificial intelligence and smart vision for building and construction 4.0: Machine and deep learning methods and applications. *Automation in Construction*, *141*, 104440. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104440

Bahrehmand, A., Batard, T., Marques, R., Evans, A., & Blat, J. (2017). Optimizing layout using spatial quality metrics and user preferences. *Graphical Models*, *93*, 25-38. https://doi.org/10.1016/j.gmod.2017.08.003

Franceschelli, G., & Musolesi, M. (2024a). Reinforcement Learning for Generative AI: State of the Art, Opportunities and Open Research Challenges. *Journal of Artificial Intelligence Research*, *79*, 417-446. https://doi.org/10.1613/jair.1.15278

Goodfellow, I. J., Pouget-Abadie, J., Mirza, M., Xu, B., Warde-Farley, D., Ozair, S., Courville, A., & Bengio, Y. (2014). *Generative Adversarial Networks* (No. arXiv:1406.2661). arXiv. http://arxiv.org/abs/1406.2661

Hong, W., Zhu, M., Liu, M., Zhang, W., Zhou, M., Yu, Y., & Sun, P. (2022). *Generative Adversarial Exploration for Reinforcement Learning* (No. arXiv:2201.11685). arXiv. http://arxiv.org/abs/2201.11685

Nauata, N., Hosseini, S., Chang, K.-H., Chu, H., Cheng, C.-Y., & Furukawa, Y. (2021). House-GAN++: Generative Adversarial Layout Refinement Network towards Intelligent Computational Agent for Professional Architects. *2021 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 13627-13636. https://doi.org/10.1109/CVPR46437.2021.01342

Rahbar, M., Mahdavinejad, M., Markazi, A. H. D., & Bemanian, M. (2022). Architectural layout design through deep learning and agent-based modeling: A hybrid approach. *Journal of Building Engineering*, *47*, 103822. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103822

Rosa, G. H. de, & Papa, J. P. (2021). A survey on text generation using generative adversarial networks. *Pattern Recognition*, *119*, 108098. https://doi.org/10.1016/j.patcog.2021.108098

Schulman, J., Wolski, F., Dhariwal, P., Radford, A., & Klimov, O. (2017). *Proximal Policy Optimization Algorithms* (No. arXiv:1707.06347). arXiv. http://arxiv.org/abs/1707.06347

Sutton, R. S., & Barto, A. G. (t.y.). *Reinforcement Learning: An Introduction*.

Weber, R. E., Mueller, C., & Reinhart, C. (2022). Automated floorplan generation in architectural design: A review of methods and applications. *Automation in Construction*, *140*, 104385. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104385

Wu, W., Fu, X.-M., Tang, R., Wang, Y., Qi, Y.-H., & Liu, L. (2019). Data-driven interior plan generation for residential buildings. *ACM Transactions on Graphics*, *38*(6), 1-12. https://doi.org/10.1145/3355089.3356556

Yang, T., Ren, P., Xie, X., & Zhang, L. (2023). *Pixel-Aware Stable Diffusion for Realistic Image Super-resolution and Personalized Stylization* (No. arXiv:2308.14469). arXiv. http://arxiv.org/abs/2308.14469

Zhang, Z., Guo, Z., Zheng, H., Li, Z., & Yuan, P. F. (2024). Automated architectural spatial composition via multi-agent deep reinforcement learning for building renovation. *Automation in Construction*, *167*, 105702. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105702

İç Mimari Görüntülerle Yapay Zekâ Modeli Eğitimi: Bir Veri Seti Hazırlama Strateji Önerisi

Yaren Cengiz[1]; Orkan Zeynel Güzelci[2];Derya Güleç Özer[3]; Koray Kıdış[4]
[1,2,3]İstanbul Teknik Üniversitesi; [4]Yeşim Kozanlı Mimarlık
[1]cengizy23@itu.edu.tr; [2]guzelci@itu.edu.tr; [3]dgulec@itu.edu.tr; [4]koray@yesimkozanli.com

Özet

Son yıllarda, diğer alanlarda olduğu gibi mimarlık ve iç mimarlık disiplinlerinde de yapay zeka (YZ) teknolojilerinin kullanımı giderek artmakta ve tasarım süreçlerini dönüştürme potansiyeli taşımaktadır. Özellikle metinden-görüntü üretimi (text-to-image) yapan yapay zeka modelleri, belirli bir tasarım dili ya da stile sahip ofisler için hazırlanan özelleştirilmiş veri setleri ile birlikte eğitildiğinde, ilgili ofisin tasarım diline yakınsayan görüntü (render) üretebilme potansiyeli taşımaktadır. Ancak bu modellerin eğitim süreçleri çoğu zaman kullanıcılar tarafından doğrudan gözlemlenememekte ve şeffaflıktan uzak, kapalı sistemler içerisinde yürütülmektedir. Bu durum, sürecin işleyişine dair ayrıntılı bir metodolojik çerçevenin eksikliğini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, iç mimarlık gibi üç boyutlu görsel üretiminin yoğun olduğu bir alanda, yapay zeka için veri hazırlama stratejilerinin ayrıntılı biçimde ele alınması, literatürdeki önemli bir boşluğu işaret etmektedir. Yapay zeka modelinin nasıl eğitildiği, eğitimin aşamalarının neler olduğu, hangi tür verilerin ne şekilde hazırlanması gerektiği ve çıktıların niteliğini etkileyen unsurların neler olduğu gibi temel sorular bu çalışmanın motivasyonunu oluşturmaktadır. Bu çalışma, Yeşim Kozanlı Mimarlık (YKA) ofisinin tasarım stilini yansıtan üç boyutlu görüntülerle eğitilecek bir yapay zeka modelinin geliştirilme ve test süreçlerini sunmaktadır. Bu kapsamda, tasarımı YKA ofisine ait dokuz adet otel projesinden seçilen görüntüler kullanılmış ve bu görüntüleri betimleyen açıklayıcı metinler oluşturularak bir veri seti oluşturulmuştur. Çalışmada hem veri seti hazırlama süreci hem de modelin eğitim aşamaları ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen ilk bulgular, otomatik etiketleme yöntemlerinin uzmanlar tarafından hazırlanan açıklayıcı metinlere (caption) kıyasla oldukça yetersiz kaldığını; eğitim aşamasında karşılaşılan dil kullanım hatalarının model çıktıları üzerinde doğrudan etkili olduğunu; ayrıca üç boyutlu olmayan yazı ve benzeri grafik temsillerin modelin öğrenme sürecini olumsuz yönde etkilediğini göstermiştir. Bununla birlikte, görsel çeşitliliğin ve içerik zenginliğinin model performansı üzerindeki belirleyici rolü olduğu ortaya konmuştur. Bu bağlamda, çalışmanın temel amacı, iç mimarlık alanında faaliyet gösteren YKA ofisinin tasarım stiline yakınsayarak metinden-görüntü üretimi yapabilen bir yapay zekâ modelini eğitmek ve bu eğitim için gerekli olan görüntüleri betimleyen açıklayıcı metinlerin nasıl oluşturulması gerektiğine dair bir strateji geliştirmektir.

Anahtar Kelimeler: *Yapay Zekâ, İç Mimarlık, Metinden-Görüntüye Üretim, Veri Seti Hazırlama, Tasarım Stili.*

Training AI Models with Interior Design Renders: A Strategy Proposal for Dataset Preparation

Yaren Cengiz[1]; Orkan Zeynel Güzelci[2];Derya Güleç Özer[3]; Koray Kıdış[4]
[1,2,3]Istanbul Technical University; [4]Yeşim Kozanlı Architecture
[1]cengizy23@itu.edu.tr; [2]guzelci@itu.edu.tr; [3]dgulec@itu.edu.tr; [4]koray@yesimkozanli.com

Abstract

In recent years, as in many other fields, the use of artificial intelligence (AI) technologies in the disciplines of architecture and interior design has been steadily increasing, carrying the potential to transform design processes. Particularly, text-to-image AI models, when trained with customized datasets prepared for offices with a specific design language or style, have the potential to generate images (renders) that converge with the design identity of those offices. However, the training processes of these models are often not directly observable by users and are conducted within opaque, closed systems lacking transparency. This situation reveals a significant gap in the presence of a detailed methodological framework regarding how these processes function. In this context, it becomes crucial to examine data preparation strategies for AI in detail, especially in a field like interior design where three-dimensional visual production is prominent. Fundamental questions such as how the AI model is trained, what the stages of training entail, how various types of data should be prepared, and which factors influence the quality of outputs form the core motivation of this study. This research presents the development and testing processes of an AI model trained with three-dimensional images reflecting the design style of the Yeşim Kozanlı Architecture (YKA) office. In this scope, images selected from nine hotel projects designed by the YKA office were used, and descriptive captions were created for these visuals to compile a dataset. Both the dataset preparation process and the training stages of the model are evaluated in detail. Initial findings reveal that automatic captioning methods fall significantly short compared to expert-written descriptive texts; linguistic errors encountered during training phases have a direct impact on the model's outputs; and non-three-dimensional elements such as text and other graphic representations negatively affect the model's learning process. Furthermore, it was demonstrated that visual diversity and content richness play a decisive role in model performance. Accordingly, the primary aim of this study is to train a text-to-image AI model that can approximate the design style of the YKA office, which operates in the field of interior design, and to develop a strategy for how to create the descriptive captions necessary for this training.

Keywords: *Artificial İntelligence, İnterior Design, Text-To-İmage Generation, Dataset Preparation, Design Style.*

1.Giriş

Son yıllarda mimarlık ve iç mimarlık gibi tasarım disiplinlerinde yapay zekâ kullanımı giderek artmaktadır. Bu çalışmalar, yapay zekâ modellerinin özelleştirilmiş veri setleriyle eğitildiğinde daha başarılı sonuçlar üretebildiğini vurgulamaktadır (Gan vd., 2023; Lee vd., 2024). Yapılan literatür taraması, bu çalışmanın kapsamı da göz önünde bulundurularak: (i) metinden-görüntü üreten yapay zekâ araçları ve bu araçların mimarlık ve iç mimarlık disiplinlerinde kullanımı ve (ii) yapay zekâ modeli eğitiminin teknik boyutları üzerine yapılan çalışmalardan oluşmaktadır.

Metinden görüntü üreten yapay zekâ araçlarının mimarlık ya da iç mimarlık disiplinlerinde kullanımı konusunda yapılan araştırmalar; mimari tasarımda yapay zekâ ile eskiz oluşturulması (Avcı & Kavut, 2024), yapay zekâ ile teknik çizim ve eskizden görüntü oluşturulması (Akçay Kavakoğlu vd., 2022; Karadağ, 2023); yapay zekâyı bir sunum ve temsil aracı olarak kullanma (Yıldırım vd., 2021; Tong vd., 2023) ve yapay zekâ ile metinden iç mimari görüntüler (Lee vd., 2024) ve çeşitli yapay zekâ tabanlı görüntü oluşturma modellerinin iç mimarlık alanında kullanılması (Ayaz, 2024) gibi konulara odaklanmaktadır.

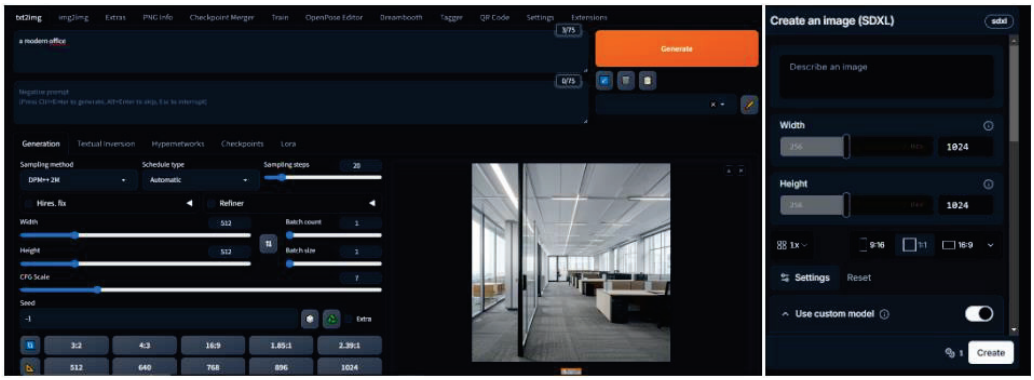
Yapay zekâ eğitimi ve eğitim veri seti hazırlama araştırmaları ise var olan görüntüler için açıklayıcı metin yazma yaklaşımları (Lee vd., 2024) ve özelleştirilmiş veri setleri ile yapay zekâ tabanlı difüzyon modellerinin eğitimi (Chen vd., 2023; Gan vd., 2023, Chen vd.,2024) gibi konularda çeşitlilik göstermektedir. Belirlenen bu iki konuda yapılan akademik çalışmaların yapay zekânın gelişme hızına paralel olarak son yıllarda ivmelenerek arttığı gözlemlenmiştir.

Yapay zekâ modellerinin eğitim sürecinin kapalı kutu benzeri bir süreçle, kullanıcılar tarafından doğrudan müdahale edilemeyen ve gözlemlenemeyen şekilde gerçekleşmesi, bu sürecin nasıl işlediğine ve hangi parametrelerin model eğitimine ne düzeyde etki ettiği konusunda kapsamlı bir araştırmanın gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, çalışmanın temel amacı, iç mimarlık alanında faaliyet gösteren Yeşim Kozanlı Mimarlık (YKA) ofisinin tasarım stiline yakınsayarak metinden-görüntü (text-to-image) üretimi yapabilen bir yapay zekâ modelini eğitmek ve bu eğitim için gerekli olan görüntüleri betimleyen açıklayıcı metinlerin (caption) nasıl oluşturulması gerektiğine dair bir strateji geliştirmektir.

2. Yöntem

Metin-görüntü oluşturan difüzyon modelleri, yapay zekâ tekniklerini kullanarak bir istem (prompt) metnini girdi olarak almakta ve bu isteme karşılık gelecek biçimde görüntüler oluşturmaktadır. Bu bağlamda, MidJourney, Dall-E ve Stable Diffusion yaygın olarak kullanılan metinden-görüntü oluşturan üretken yapay zekâ araçları olarak öne çıkmaktadır.

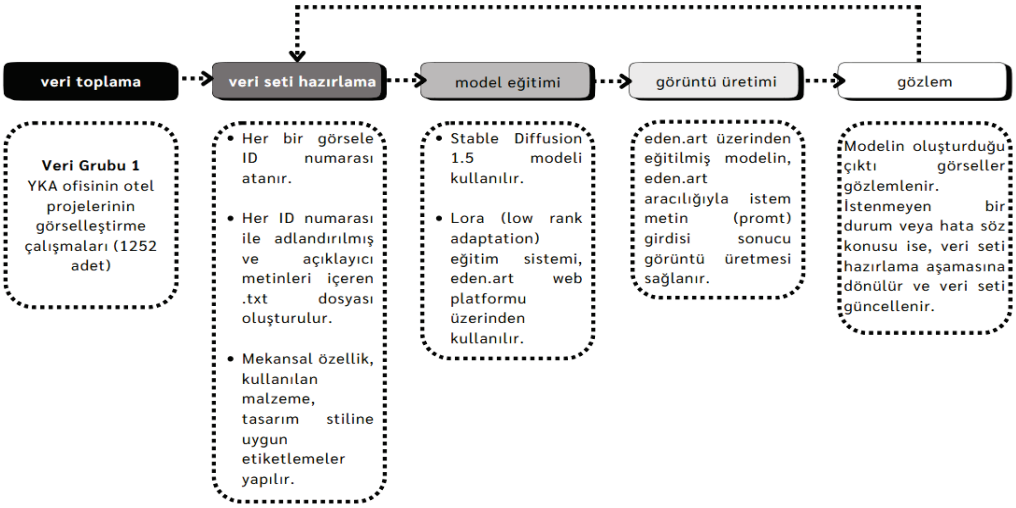
Bu araçlardan, Stable Diffusion 1.5 sürümü, açık kaynaklı olup ücretsiz kullanım imkânı sağlamaktadır. Stable Diffusion 1.5 ayrıca özelleştirilmiş (customized) veri setlerinin de üretim aşamasında kaynak olarak kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Kullanıcılar, Stable Diffusion 1.5'i Windows tabanlı bilgisayarların Terminal penceresinden Automatic 1111 arayüzünü kullanarak (**Şekil 1 - Sol**) (AUTOMATIC1111, n.d.) veya eden.art (**Şekil 1 - Sağ**) (Eden.art, n.d.), civit.ai (The home of open-source Generative AI. Civitai, n.d.) gibi web tabanlı platformlar üzerinden bulutta çalıştırarak kullanabilmektedir.



Şekil 1. Sol: Automatic 1111 arayüzü (AUTOMATIC1111, n.d.) ; Sağ: eden.art arayüzü (Eden.art, n.d.)

3.Uygulama

Stable Diffusion 1.5'in temel modeli özelleştirilmiş veri setleriyle tekrar eğitildiğinde, belirli bir tasarım stilini temel alan ve ilgili stile yakınsayan sonuçlar üretebilmektedir (Lee vd., 2024). Çalışma kapsamında, bu tür bir amaçla yapay zekâ modelini geliştirirken sırasıyla uygulanan veri toplama, veri seti hazırlama, model eğitimi, eğitilen model ile görüntü üretimi ve model çıktılarının gözlemlenmesi aşamalarına yer verilecektir (**Şekil 2**). Bu bölümde, tüm süreç anlatıldıktan sonra sürecin genelinde dikkat edilmesi gereken önemli noktalar "Bulgular ve Sonuçlar" bölümünde detaylandırılacaktır.



Şekil 2. Yapay zekâ modelinin geliştirilme aşamaları

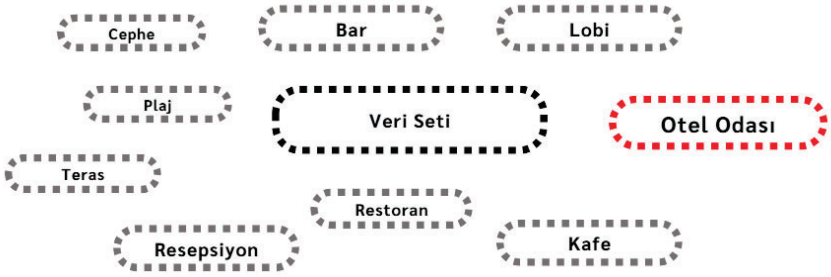
3.1. Veri Toplama

Bir çok alanda olduğu gibi, iç mimarlık alanında da web üzerinden yüksek kaliteli ve açık kaynaklı veri setlerine ulaşmak kolay değildir. Bu durumda, iç mimarlık ofisleriyle iş birliği yaparak veri seti elde edilmesi alternatif bir stratejidir. Toplanan verilerle modelin etkili bir şekilde eğitilebilmesi için veri miktarının yeterli olması (Gan vd., 2023) ve veri setinin kendi içinde çeşitliliğe sahip olması (Lee vd., 2024) gerekmektedir. Bu çalışmada, yapay zekâ modelinin YKA ofisinin stili doğrultusunda eğitilebilmesi ve görüntü üretimi yapabilmesi için, ofisin kendi bünyesinde hazırladığı 9 adet otel projesine ait 1252 adet 3 boyutlu görüntü (render) elde edilmiştir.

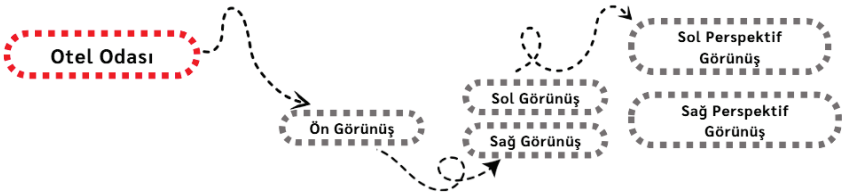
3.2. Veri Seti Hazırlama

Yapay zekâyı modelinin eğitimi için öncelikle görüntülere veri bölme ve görüntülere ait açıklayıcı metin oluşturma işlemleri uygulanmıştır. Veri bölme işleminde, modelin performansının değerlendirilebilir olması için toplanan veri test kümelerine ayrılmıştır. Bu çalışmada, YKA ofisinin 9 adet otel projesi için ürettiği görüntüler, önce mahallerine daha sonra da görünüş/bakış açılarına göre bölünmüştür (**Şekil 3**, **Şekil 4**).

Açıklayıcı metinler oluşturma aşamasında ise eğitim için kullanılacak görüntüler ve görüntüleri açıklayan metinler aynı isme sahip olacak şekilde sırasıyla 1.png ve 1.txt benzeri şekilde adlandırılarak bir kaynak klasöre toplanmıştır. İç mimari görüntüler için açıklayıcı metinler yazılırken; mobilyaların detayları, renkler, malzemeler, dokular, aydınlatma, kompozisyon ve diğer tasarım öğeleri mümkün olduğunca detaylandırılmıştır. Açıklayıcı metin yazımında, iç mimari bilginin yanı sıra Lee vd. (2024) tarafından da belirtildiği gibi yapay zekâ modelinin anlayabileceği dilde (İngilizce) kurallı ifadeler kullanılmıştır.



Şekil 3. Veri setinin mahallere göre bölünmesi

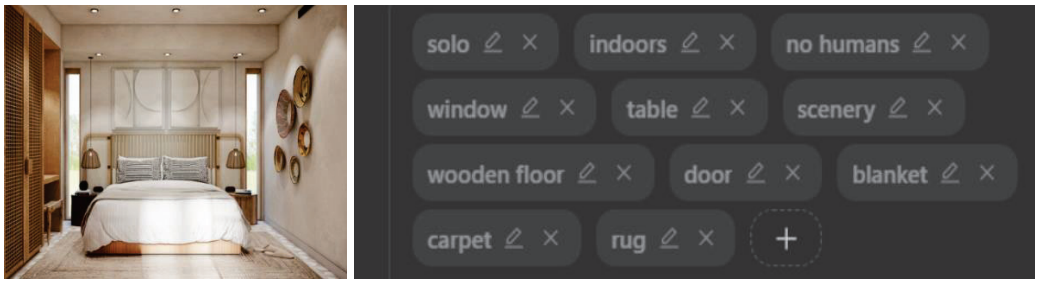


Şekil 4. Veri setinin görünüş/bakış açılarına göre bölünmesi

3.3. Model Eğitimi ve Görüntü Üretimi

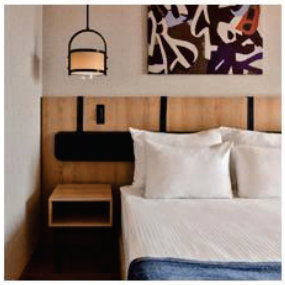
Hazırlanan veri setleri ile eden.art (Eden.art, n.d.) platformu üzerinden yedi farklı model eğitim deneyi gerçekleştirilmiştir. Bu modellerden, beş tanesi sadece belli açılardan alınmış görüntülerle eğitilirken, bir tanesi farklı açılardan alınmış karma görüntülerle eğitilmiş ve bir diğeri ise görüntülerin açıklayıcı metinleri *wd-v1-4-vit-tagger-v2* otomatik etiketleme aracı ile üretilerek eğitilmiştir. (SMILINGWOLF/WD-V1-4-vit-tagger-v2 · hugging face. SmilingWolf/wd-v1-4-vit-tagger-v2 · Hugging Face, n.d.) Sonrasında, her bir model verilen istemler ile test edilmiş ve model çıktıları olan görüntüler yazarlar tarafından yorumlanmıştır. Örneğin, bakış açılarının talep edilenden farklı olması, iç mekan elemanlarının yer ve biçimlerinin hatalı olması ve malzeme uyuşmazlıkları olması gibi durumlardan dolayı çıktılar tatmin edici bulunmadığında veri seti hazırlama, eğitim ve üretim aşamaları tekrar edilmiştir.

Deney 1'de, YKA ofisine ait bir görüntülerin açıklama metninin yapay zekâ tarafından oluşturulması beklenmiştir. Deney 1 sonucunda, yapay zekânın görüntüler için açıklama metni oluşturmada yetersiz olduğu, açıklamaların detaysız olduğu ve iç mimari ögelerin niteliklerine dair bilgi içermediği görülmüştür. Bu nedenle, veri seti hazırlarken açıklamaların iç mimarlık alanında uzman kişiler tarafından yazılması yaklaşımı benimsenmiştir (**Şekil 5**).



Şekil 5: Sol: YKA ofisine ait bir görüntü (YKA Arşivi); Sağ: YKA ofisine ait görüntü için wd-v1-4-vit-tagger-v2 tarafından oluşturulan açıklama metni (SMILINGWOLF/WD-V1-4-vit-tagger-v2 · hugging face. SmilingWolf/wd-v1-4-vit-tagger-v2 · Hugging Face, n.d.)

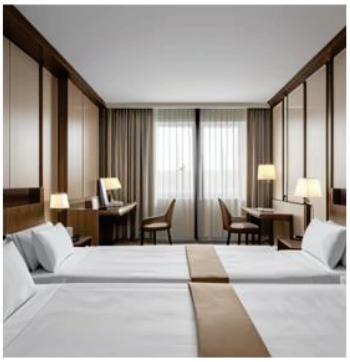
Deney 2'de YKA ofisine ait görüntülerin açıklama metinleri yazarlar tarafından elle (manuel) oluşturulmuştur. Deney 2 veri setinde 13 görüntü ve 13 açıklama metni bulunmaktadır (**Şekil 6**). Deney 2 kapsamında eğitilen modele verilen istem ile bir görüntü üretildiğinde, çift kişilik yatağı açıklamak için kullanılan 'double bed' ifadesinin hataya yol açtığı gözlemlenmiştir (**Şekil 7**). Deney 2 sonrasında, görüntü açıklama metinleri hazırlarken ve eğitilen modele görüntü üretmesi için istem verilirken kelime seçimlerinin çok önemli anlaşılmıştır. Bu nedenle, veri setindeki açıklama metinlerinde ve istemlerde bulunan 'double bed' ifadesi 'a double sized bed' olarak değiştirilmiştir.



Açıklayıcı metin:
A modern and minimalist bedroom with **double bed** in the center. The bed has a wooden headboard with a black headboard and white linens. There are two white pillows on the bed and a blue blanket on top. On the left side of the bed, there is a small wooden nightstand with a lamp hanging above it. The wall behind the bed is painted in a light beige color and has a large abstract painting hanging on it.

Şekil 6: Deney 2'nin veri setinde bulunan YKA ofisine ait bir görüntü (YKA Arşivi)

İstem metin:
hotel room, **double bed** in the center, light colors, light wood furniture.



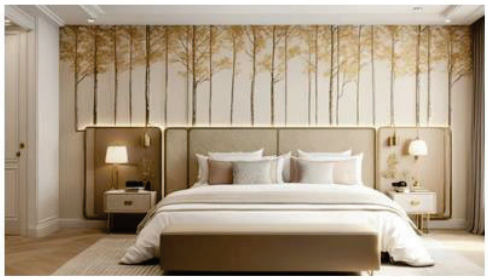
Şekil 7: Deney 2 kapsamında eğitilen yapay zekâ modeli ile üretilen bir görüntü

Deney 3'te veri setindeki ön görünüş niteliğine sahip 14 görüntü ve bu görüntüleri açıklayan 14 metin dosyasıyla eğitim yapılmıştır (**Şekil 8**). Deney 3 kapsamında eğitilen modele verilen istem ile üretilen görüntüler incelendiğinde istemlerde sayı belirtilmediği durumlarda abajur sayısının gereğinden fazla ve mobilya detaylarının hatalı (komodin ayaklarının eksik / hatalı) olduğu görülmüştür (**Şekil 9**). Aynı model ile farklı istem girdisiyle görüntü üretimi yapıldığında ise olumsuz bir bulguya rastlanmamıştır (**Şekil 10**). Deney 3'te, görüntülerde ortaya çıkan hataların eğitim veri setinden veya istemlerden kaynaklandığına dair bir ayrım yapılabilmesi amacıyla çoklu görüntü üretimleri gerçekleştirilmiştir.

Açıklayıcı metin:
front view of mediterranean designed hotel room, double sized bed on the pine wood platform, rattan oval bedhead, three blue and sea themed drawings on the wall above bedhead, light greige fabric wallcovering on the half of the wall that behind the bedhead, two wood frame on the wall, light grey fabric sofa on the pine wood platform, blue and grey patterned pillows on the sofa and bed, foldable oval wood coffee table in front of the sofa, light brown wallpaper on the wall, black side door on the right, pendant rattan ventilator lamp above the sofa

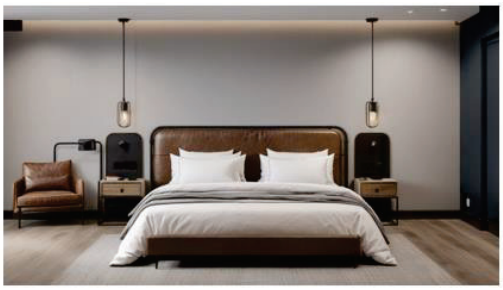
Şekil 8: Deney 3'ün veri setinde bulunan YKA ofisine ait bir görüntü (YKA Arşivi)

İstem metin:
front view of elegant hotel room, double sized bed, tree patterned wallcoverings on the wall behind the bedhead, two nightstands, gold metal detailed table lights on the nightstands, light beige color painted walls, light wooden herringbone floors.



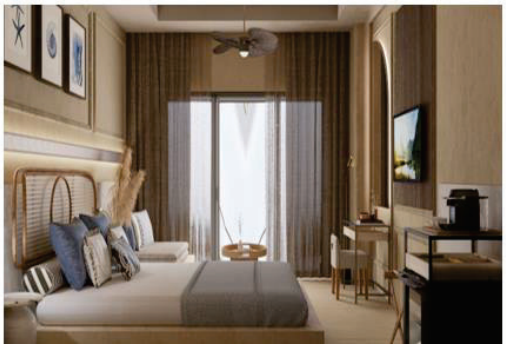
Şekil 9: Deney 3 kapsamında eğitilen yapay zekâ modeli ile üretilen bir görüntü

İstem metin:
front view of industrial hotel room, double sized bed, two nightstands, camel leather covered bedhead, black metal detailed tablelight on the nightstand, light grey color painted walls, walnut wood floors



Şekil 10: Deney 3 kapsamında eğitilen yapay zekâ modeli ile üretilen bir görüntü

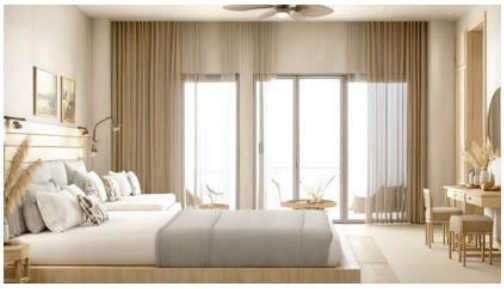
Deney 4'te veri setindeki sol görünüş niteliğindeki 4 görüntü ve onları açıklayan metin dosyalarıyla eğitim yapılmıştır (**Şekil 11**). Deney 4 kapsamında eğitilen modele verilen istem ile üretilen görüntü incelendiğinde; eğitim veri seti içeriğinin artırılması gerektiği ve görüntünün, eğitim verisinde kullanılan görüntülere çok benzediği (overfitting) sonucuna ulaşılmıştır (**Şekil 12**).



Açıklayıcı metin:
left view of mediterranean designed hotel room, double sized bed on the pine wood platform, rattan oval bedhead, three blue and sea themed drawings on the wall above bedhead, black metal detailed minibar under the coffee machine, light wooden dressing table with black metal details, houndstooth fabric chair, tv hanging across the bed, light greige fabric wallcovering on walls, light grey fabric sofa on the pine wood platform, blue and grey patterned pillows on the sofa and bed, foldable oval wood coffee table in front of the sofa, pendant rattan ventilator lamp above the sofa, light wooden texture tiles on the floor, sunlight coming from the window.

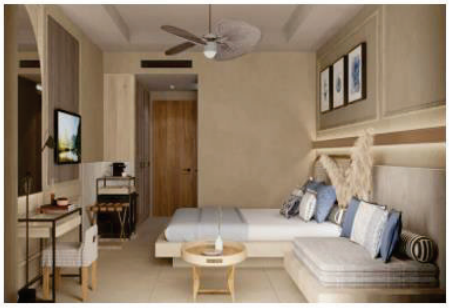
Şekil 11: Deney 4'ün veri setinde bulunan YKA ofisine ait bir görüntü (YKA Arşivi)

İstem metin:
left perspective view of mediterranean hotel room, double sized bed, rattan oval bedhead, white sheets and pillows, natural elements, wardrobe with rattan doors, grey sofa, sunlight coming from the outside



Şekil 12: Deney 4 kapsamında eğitilen yapay zekâ modeli ile üretilen bir görüntü

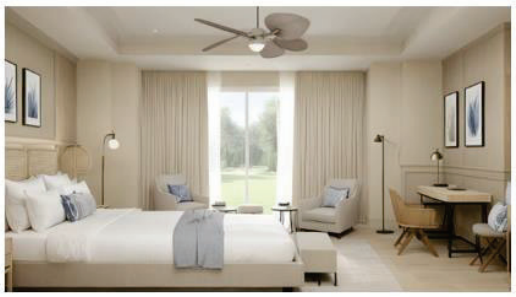
Deney 5'te veri setindeki sağ görünüş niteliğine sahip 5 görüntü ve onları açıklayan metin dosyalarıyla eğitim yapılmıştır (**Şekil 13**). Deney 5 kapsamında eğitilen modele verilen istem ile üretilen görüntü incelendiğinde; eğitim veri seti içeriğinin artırılması gerektiği ve görüntünün, eğitim verisinde kullanılan görüntülere çok benzediği, modelin görüntü üretimlerinde sağ ve sol kavramlarını karıştırdığı sonucuna ulaşılmıştır (**Şekil 14**).



Açıklayıcı metin:
left view of art nouveau designed hotel room, one double sized bed, rattan oval bedhead, grey concrete separator wall behind the bedhead, blue light grey patterned pillows on the bed, rattan ventilator light above the bed, two grey platform night table, one rattan and glass detailed pendant light above the night stand, grey concrete textured wallpaper on the wall, carved wood frames on the walls, bird and tree textured wallpaper on the corner of the wall, tv hanging on the wooden stand in front of the bed, grey linen fabric covered sofa, foldable round shape light wooden coffee table in front of the sofa, oak wood herringbone pattern floor, black framed windows across the bed.

Şekil 13: Deney 5'in veri setinde bulunan YKA ofisine ait bir görüntü (YKA Arşivi)

İstem metin:
right perspective view of mediterranean hotel room, double sized bed, light beige fabric covered bedhead, white sheets and pillows, natural elements, wardrobe with rattan doors, grey sofa, decorative plates on the wall, light wooden floors, sunlight coming from the outside



Şekil 14: Deney 5 kapsamında eğitilen yapay zekâ modeli ile üretilen bir görüntü

Deney 6'da veri setindeki sol-perspektif niteliğine sahip üç görüntü ve onları açıklayan metin dosyalarıyla eğitim yapılmıştır (**Şekil 15**). Deney 6 kapsamında eğitilen modele verilen istem ile üretilen görüntü incelendiğinde; eğitim veri seti içeriğinin artırılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Görüntünün, eğitim verisinde kullanılan görüntülere çok benzediği ve modelin sağ ve solu karıştırdığı görülmüştür. Öte yandan, eğitim veri setinde yer alan görüntülerin grafiksel anlatım ve yazı içermemesi gerektiği sonucuna varılmıştır (**Şekil 16**).

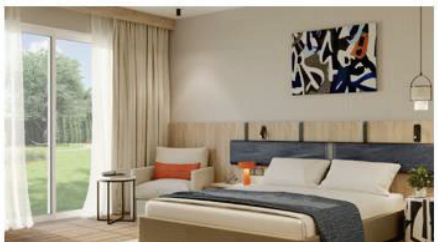
Açıklayıcı metin:
left-perspective view of mediterranean designed hotel room, natural elements, double sized bed, wooden fluted beadhead, two white abstract paintings above the beadhead, tree trunk nightstand next to the bed, wooden striped ceiling, black spot lights on the ceiling, light concrete texture painted walls, jutte carpet under the bed, geometric textured tiles coverings on the floor, sitting area with white cushion in front of the window, modern table lamp next to sitting area, beige curtain on the window.

Şekil 15: Deney 6'nın veri setinde bulunan YKA ofisine ait bir görüntü (YKA Arşivi)

İstem metin:
left-perspective view of industrial designed hotel room, double sized bed, two nightstands, camel leather covered bedhead, black metal detailed tablelight on the nightstand, light grey color painted walls, walnut wood floors.

Şekil 16: Deney 6 kapsamında eğitilen yapay zekâ modeli ile üretilen bir görüntü

Deney 7'de veri setindeki sağ-perspektif niteliğine sahip 3 görüntü ve onları açıklayan metin dosyalarıyla eğitim yapılmıştır (**Şekil 17**). Deney 7 kapsamında eğitilen modele verilen istem ile üretilen görüntü incelendiğinde; eğitim veri seti içeriğinin artırılması gerektiği ve görüntünün, eğitim verisinde kullanılan görüntülere çok benzediği, ayrıca modelin sağ ve sol kavramını karıştırdığı sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, istemde belirtilen döşeme türünün (balıksırtı) üretilen görüntülerde yer almadığı görülmüştür (**Şekil 18**).



Açıklayıcı metin:
right-perspective view of modern hotel room, double sized bed, dark grey leather cushion detailed bedhead, light wooden platform under the bed, white fabric and brass metal detailed pendant light above the right night stand, walnut wood floor, one abstract painting above the bedhead, white cozy armchair and orange pillow on the armchair, white round shape coffee table in front of the armchair, garden view on the window, sunlight coming from the outside.

Şekil 17: Deney 7'nin veri setinde bulunan YKA ofisine ait bir görüntü (YKA Arşivi)

İstem metin:
right-perspective view of modern hotel room, double sized bed, light grey linen covered bedhead, light wooden platform under the bed, grey sofa, oak herringbone wooden floors

Şekil 18: Deney 7 kapsamında eğitilen yapay zekâ modeli ile üretilen bir görüntü

Deney 8'de veri setindeki otel odalarına ait, yatağı içeren tüm görüntüler (sağ, sol, ön, sağ-perspektif ve sol-perspektif görünüşler) ve onları açıklayan metin dosyalarıyla eğitim yapılmıştır. Deney 8'de eğitim toplamda 56 veri (28 görüntü, 28 metin) ile gerçekleştirilmiştir. Deney 8 kapsamında eğitilen modele verilen istemler ile üretilen görüntülerin istenilen açıda oluşturulmadığı, tavan aydınlatmasının yerinin (gardırop kapağının hemen önünde) yanlış olduğu (**Şekil 19**), mobilyaların (gardırop kapaklarının) istenen malzemede olmadığı ve aydınlatmalarda (spot) hatalar olduğu görülmüştür (**Şekil 20**).

İstem metin:
right-perspective view of mediterranean hotel room, double sized bed, rattan oval bedhead, white sheets and pillows, natural elements, wardrobe with rattan doors, grey sofa, sunlight coming from the outside.

Şekil 19: Deney 8 kapsamında eğitilen yapay zekâ modeli ile üretilen bir görüntü

İstem metin:
right-perspective view of mediterranean hotel room, double sized bed, rattan oval bedhead, white sheets and pillows, natural elements, wardrobe with rattan doors, grey sofa, sunlight coming from the outside.

Şekil 20: Deney 8 kapsamında eğitilen yapay zekâ modeli ile üretilen bir görüntü

4. Sonuçlar

Çalışmada deneyimlenen süreç ve çıktılar üzerinden elde edilen bulgular şu şekilde özetlenebilir:

- Otomatik etiketleme yöntemiyle elde edilen açıklayıcı metinlerin iç mimarlık konusunda uzmanlığı bulunan kişiler tarafından hazırlanan metinlere oranla eksik ve detaysız olduğu görülmüştür.
- İngilizce ifade ve dil bilgisi hatalarından dolayı görüntü üretimlerinin yanlış yönlendiği görülmüştür.
- İstem yazarken iç mimari eleman sayılarının tam belirtilmediği durumlarda kontrolsüz eleman ekleme riski olduğu görülmüştür.
- Yapay zekâ modeli eğitimi ve test aşamasında aşırı öğrenme olmaması için gerekli iç mekân görüntüsü ve açıklama metni sayısına dair öngörüler oluşmuştur.
- Eğitim veri seti içerisinde iç mimari öğe olmayan 2 boyutlu yazıların (poster, yazı, logo vb.) yapay zekâ model tarafından öğrenilemediği görülmüştür.
- Eğitim veri setinde tüm detayları görünmeyen iç mimari öğelerin test aşamasında da eksik üretildiği görülmüştür.

Model eğitimi için görüntü seçimi ve açıklayıcı metin yazımı konusunda yukarıda listelenen bulgular, çalışmanın ileriki aşamalarında kurgulanacak yeni deneylerle geliştirilecek ve alanda yapılacak sonraki çalışmalar için strateji oluşturma amacıyla sistematik bir şekilde detaylandırılacaktır.

Çalışmanın sonraki aşamalarında, eğitilen modellerle üretilen görüntülerin başarısının Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) yöntemiyle değerlendirilmesi hedeflenmektedir. Bu değerlendirme kapsamında, uzmanlardan oluşan bir grubun, bir görüntünün başarılı olarak nitelendirilebilmesi için gerekli kriterleri ve bu kriterlerin önem yüzdelerini belirlemesi sağlanacak; ardından, üretilen görüntülerin Saaty ölçeğine göre puanlanması istenecektir. Bu yöntem aracılığıyla, üretilen görüntülerin başarı düzeylerinin sayısal olarak ölçülmesi amaçlanmaktadır.

Teşekkür
Bu çalışma "Otel İç Mekan Tasarımlarında Yapay Zekâ ile Stil Öğrenimi ve Uygulaması" isimli İstanbul Teknik Üniversitesi Döner Sermaye AR-GE Projesi kapsamında ve İTÜ BAP FHD-2024-46544 kodlu proje tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

Akçay Kavakoğlu, A., Almaç, B., Eser, B., & Alaçam, S. (2022). AI driven creativity in early design education – A pedagogical approach in the age of Industry 5.0. In *Proceedings of the 40th International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe (eCAADe) - Vol. 1* (pp. 133–142). https://papers.cumincad.org/data/works/att/ecaade2022_270.pdf

Avcı, E., & Kavut, İ. E. (2024). Mimari tasarımda eskiz aşamasının yapay zekâ ile oluşturulması. *Journal of Interior Design and Academy*, *4*(1), 43–61. https://doi.org/10.53463/inda.20240258

Ayaz, O. (2024). *Yapay zeka destekli MidJourney görüntü oluşturma modelinin iç mimari tasarım sürecinde değerlendirilmesi üzerine bir bakış* (Master's thesis, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).

Chen, J., Shao, Z., & Hu, B. (2023). Generating interior design from text: A new diffusion model-based method for efficient creative design. *Buildings*, *13*(7), 1861. https://doi.org/10.3390/buildings13071861

Chen, J., Shao, Z., Zheng, X., Zhang, K., & Yin, J. (2024). Integrating aesthetics and efficiency: AI-driven diffusion models for visually pleasing interior design generation. *Scientific Reports*, *14*, 3496. https://doi.org/10.1038/s41598-024-53318-3

Gan, R., Wu, X., Lu, J., Tian, Y., Zhang, D., Wu, Z., Sun, R., Liu, C., Zhang, J., Zhang, P., & Song, Y. (2023). iDesigner: A high-resolution and complex-prompt following text-to-image diffusion model for interior design. *arXiv*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2312.04326

Karadağ, İ. (2023). Transforming sketches into realistic images: Leveraging machine learning and image processing for enhanced architectural visualization. *Sakarya University Journal of Science*, *27*(6), 1209–1216. https://doi.org/10.16984/saufenbilder.1319166

Lee, J. K., Jeong, H., Kim, Y., & Cha, S. H. (2024). Creating spatial visualizations using fine-tuned interior design style models informed by user preferences. *Advanced Engineering Informatics*, *62*, 102686. https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102686

Tong, H., Türel, A., Şenkal, H., Yagci Ergun, S. F., Güzelci, O. Z., & Alaçam, S. (2023). Can AI function as a new mode of sketching: A teaching experiment with freshman. *International Journal of Emerging Technologies in Learning (iJET)*, *18*(18), 234–248. https://doi.org/10.3991/ijet.v18i18.42603

Url-1: AUTOMATIC1111. (n.d.). *AUTOMATIC1111/stable-diffusion-webui: Stable diffusion web UI*. GitHub. https://github.com/AUTOMATIC1111/stable-diffusion-webui

Url-2: *Eden.art*. Eden. (n.d.). https://app.eden.art/

Url-3: *The home of open-source Generative AI*. Civitai. (n.d.). https://civitai.com/

Url-4: *SMILINGWOLF/WD-V1-4-vit-tagger-v2 · hugging face*. SmilingWolf/wd-v1-4-vit-tagger-v2 · Hugging Face. (n.d.). https://huggingface.co/SmilingWolf/wd-v1-4-vit-tagger-v2

Yıldırım, B., & Demirarslan, S. (2021). Yapay zekâ destekli iç mimari tasarım ve sunum araçlarında bulut tabanlı bir yazılım: Coohom örnek olay incelemesi. *The Journal of Social Sciences*, *54*, 589–610. https://doi.org/10.29228/SOBIDER.52577

MSTAS 2025 MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

"DeepSmart Corpus" Re-evaluating Dexterity with Machine Learning and Digital Craftsmanship from Data of Architectural Pavilions

Ayça Ayaz Erdağ[1]; Arzu Gönenç Sorguç[2]
[1,2]Middle East Technical University
[1]aycayaz@gmail.com; [2]arzug@metu.edu.tr

Abstract

Digital technologies have transformed the role of architects and compelled them to redefine their roles within technology-driven processes. Advanced computational tools have gradually evolved the role of architects from traditional designers to digital craftsmen. This shift is achieved by the integration of advanced technologies, including generative and parametric algorithms, complex geometries, and robotic fabrication into architectural design and production, promising unprecedented precision and efficiency with entirely new creative opportunities. Alongside these digital tools, and with the permeation of machine learning, these tools are expanded to include automatic optimization of solutions, predictions based on results, and automation of complex workflows. Through the "DeepSmart Corpus Research," develops a comprehensive Pavilion Dataset that uses 158 pavilions with 32 distinct features recognized as laboratories of architectural experimentation. With 5,056 units of qualitative, quantitative, and contextual data analyzed, the research constructs a design ontology that interrogates the interplay between traditional and digital craftsmanship. The findings emphasize how machine learning's precision and computational capabilities enhance, rather than replace, the improvisational, intuitive, and materially sensitive qualities inherent in manual craftsmanship. These were interpreted both semantically and syntactically by the architect and the machine learning, highlighting differences or intersections evolving synergy between machine and craftsmanship in architecture. Ultimately, this research aims to reposition architecture as a human endeavor, augmented by artificial intelligence and digital tools, but with manual dexterity based on the physical and tactile. This study not only reveals the practical implications of integrating artificial intelligence into design processes but also offers a philosophical and epistemological reflection on the changing nature of authorship, agency, and creativity in architecture. By positioning the pavilion as an experimental typology, the research enables a high-resolution examination of how emerging technologies shape both form-making and material engagement. The DeepSmart Corpus functions as both a knowledge base and a generative platform, allowing architects and researchers to discover latent patterns, anomalies, and correlations within design data. In doing so, it provides a valuable contribution to the future of architectural education, where digital literacy, data fluency, and material intelligence must coexist. The implications extend beyond pavilion design, offering scalable methodologies that can inform broader architectural practices through machine learning-enhanced creativity.

Keywords: *Digital Craftsmanship, Artificial Intelligence in Architecture, Computational Design, Architectural Pavilion Data.*

2025 MSTAS MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

"DeepSmart Corpus": Mimari Pavyon Verilerinden Yola Çıkarak Makine Öğrenimi ve Dijital Zanaatkârlık ile El Becerisinin Yeniden Değerlendirilmesi

Ayça Ayaz Erdağ [1]; Arzu Gönenç Sorguç [2]
[1,2]Ortadoğu Teknik Üniversitesi
[1]aycayaz@gmail.com; [2]arzug@metu.edu.tr

Özet

Dijital teknolojiler, mimarların rollerini köklü biçimde dönüştürmüş ve onları teknoloji odaklı süreçler içerisinde rollerini yeniden tanımlamaya zorlamıştır. Gelişmiş hesaplamalı araçlar, zamanla mimarların geleneksel tasarımcı rollerinden dijital zanaatkârlara dönüşmesini sağlamıştır. Bu dönüşüm, üretken ve parametrik algoritmalar, karmaşık geometriler ve robotik üretim gibi ileri teknolojilerin mimari tasarım ve üretim süreçlerine entegre edilmesiyle gerçekleşmiş; eşi benzeri görülmemiş bir hassasiyet, verimlilik ve yepyeni yaratıcı fırsatlar vaat etmiştir. Bu dijital araçlara ek olarak, makine öğrenmesinin yaygınlaşmasıyla birlikte çözümlerin otomatik optimize edilmesi, sonuçlara dayalı öngörüler yapılması ve karmaşık iş akışlarının otomasyonu da mümkün hale gelmiştir. "DeepSmart Corpus Araştırması" kapsamında, mimari deneyin laboratuvarları olarak tanımlanan 158 pavyonu içeren ve 32 farklı özelliğe sahip kapsamlı bir Pavyon Veri Seti geliştirilmiştir. 5.056 birimlik nitel, nicel ve bağlamsal verinin analiz edilmesiyle, geleneksel ve dijital zanaatkârlık arasındaki etkileşimi sorgulayan bir tasarım ontolojisi inşa edilmiştir. Bulgular, makine öğrenmesinin sağladığı hassasiyet ve hesaplama yetilerinin, el işçiliğine özgü doğaçlama, sezgisel ve malzeme duyarlı nitelikleri yok etmek yerine onları geliştirdiğini ortaya koymaktadır. Bu veriler hem mimar hem de makine öğrenmesi algoritmaları tarafından semantik (anlamsal) ve sentaktik (yapısal) düzeyde yorumlanarak, zanaatkârlık ile makine arasındaki farklılıkları, kesişimleri ve evrilen iş birliğini gözler önüne sermektedir. Sonuç olarak bu araştırma, mimarlığı fiziksel ve dokunsal temelli el becerileriyle desteklenmiş, yapay zekâ ve dijital araçlarla zenginleştirilmiş insani bir faaliyet olarak yeniden konumlandırmayı amaçlamaktadır. Bu çalışma yalnızca yapay zekânın tasarım süreçlerine entegrasyonunun pratik etkilerini ortaya koymakla kalmayıp, aynı zamanda mimarlıkta değişen yazarlık, özne ve yaratıcılık kavramları üzerine felsefi ve epistemolojik bir yansıma da sunmaktadır. Pavyonu deneysel bir tipoloji olarak konumlandırarak, yeni teknolojilerin biçim üretimi ve malzeme ile etkileşimi nasıl şekillendirdiğine dair yüksek çözünürlüklü bir inceleme imkânı sağlamaktadır. DeepSmart Corpus, bir bilgi tabanı ve üretken bir platform işlevi görerek, mimarların ve araştırmacıların tasarım verileri içinde gizli kalmış örüntüleri, anomalileri ve korelasyonları keşfetmelerine olanak tanır. Böylece, dijital okuryazarlık, veri yetkinliği ve malzeme zekâsının bir arada var olması gereken mimarlık eğitiminin geleceğine önemli bir katkı sağlar. Bu etkiler yalnızca pavyon tasarımıyla sınırlı kalmayıp, makine öğrenmesi destekli yaratıcılıkla daha geniş mimari uygulamaları da besleyebilecek ölçeklenebilir yöntemler sunar.

Anahtar Kelimeler: *Dijital Zanaatkarlık, Mimarlıkta Yapay Zekâ, Hesaplamalı Tasarım, Mimarlık Pavyonu Verileri.*

1. Introduction

The advent of digital technologies has brought about a radical shift in the architectural profession. No longer confined to traditional drafting tables or static design workflows, contemporary architects operate within complex digital environments where computation, data, and automation play a central role. This paradigm shift has fundamentally redefined architectural authorship, representation, and construction, resulting in the emergence of what has been termed the "digital craftsman" a hybrid figure that combines computational proficiency with material sensibility (Burry, 2011; Gramazio & Kohler, 2008).

Within this context, machine learning (ML) has recently emerged as a transformative force. Unlike earlier computational tools focused primarily on parametric control or geometry generation, ML introduces a new layer of intelligence: the ability to learn from data, predict outcomes, and optimize decisions (Jiang & Zheng, 2022; Li et al., 2024). It promises to not only assist the architect in complex design processes but also to challenge the long-held dichotomy between human intuition and machine logic. This development raises profound questions about the role of manual dexterity, a quality historically central to architectural making (Pye, 1968).

The DeepSmart Corpus Research Project is situated at the intersection of digital craftsmanship and machine intelligence. It aims to re-evaluate the value of dexterity in architecture through a comprehensive analysis of 158 pavilion projects. These pavilions, chosen for their experimental character and variety in design approaches, serve as a microcosm of the broader architectural landscape. With over 5,000 units of data encompassing geometric, material, procedural, and contextual attributes, the research develops a design ontology that explores how machine learning can complement rather than replace the tacit, embodied knowledge embedded in manual craftsmanship (Oxman, 2017).

By examining how Machine Learning can augment rather than automate creativity, this study proposes a future where architects are not displaced by artificial intelligence but are instead empowered through it. Here, the architect becomes a mediator between digital systems and tactile making, orchestrating a new form of hybrid intelligence that is as much about code as it is about craft.

In the following sections, this paper will first trace the historical evolution of craftsmanship in architecture before addressing how digital tools have redefined this tradition. It will then present the theoretical and methodological framework of the DeepSmart Corpus Project, followed by an in-depth discussion of its findings. The conclusion reflects on the ethical, aesthetic, and epistemological implications of repositioning the architect as an augmented craftsman in the age of artificial intelligence.

1.1. Historical Digital Turn in Architectural Practice

The digital turn in architectural practice marks a transformative era in how buildings are conceived, represented, and constructed. Starting in the late 20th century, digital tools began to infiltrate architectural workflows, initially as representational aids (e.g., CAD software) and later as generative and performative agents that could simulate, optimize, and fabricate. This shift reintroduced a form of authorship where the design process is co-shaped by algorithms and code (Terzidis, 2006).

One of the earliest signals of this change was the emergence of parametric design, popularized by tools like Generative Components and Grasshopper. Parametricism allowed architects to manipulate form through parameters and relationships rather than fixed geometries. The process introduced a logic of variation and customization, enabling designers to create complex, non-standard geometries with mathematical precision (Schumacher, 2009).

Simultaneously, digital fabrication techniques such as CNC milling, 3D printing, and robotic assembly began bridging the gap between design and making. Architects were no longer distant from material realization; they were again involved in the act of making but this time through machines. This development was seen by some as a re-materialization of architecture (Picon, 2010), where the digital and the physical became increasingly intertwined.

However, this newfound control came with new challenges. As Kolarevic (2005) emphasized, the shift from digital design to digital fabrication demanded a rethinking of construction logic and a reintegration of knowledge systems

that were historically separated. The architect now had to engage with issues of tooling, material behavior, and fabrication constraints an echo of the master builder of the pre-modern era but armed with algorithms instead of chisels.

Digital tools also changed how design intelligence was conceptualized. No longer centered solely in the mind of the architect, design decisions could now be delegated to systems that evolve, learn, and iterate. This shift laid the groundwork for the integration of machine learning, as design processes became datasets, and architecture became computable (Oxman, 2017).

This trajectory has significant implications for craftsmanship. While early critics feared the loss of the human touch, others argued that digital tools could enhance traditional practices by reintroducing precision, improvisation, and material exploration within a computational framework (Burry, 2011). In this sense, digital craftsmanship does not oppose tradition it extends it through new modes of expression and agency.

1.2. Defining Digital Craftsmanship

Digital craftsmanship is reshaping what it means to make architecture today. It's not just about using digital tools or machines it's about developing a new kind of sensitivity, where the hand, the material, and the algorithm work together in an ongoing conversation. Instead of drawing a strict line between handmade and machine-made, digital craftsmanship sees them on a spectrum. The essence of craft intention, care, and deep knowledge can be expressed just as well through code as through a chisel. This idea echoes what Pye (1968) described decades ago: that craftsmanship is about the maker's relationship with the material, guided by responsiveness and adaptability. As Burry (2011) puts it, today's designers are part of "scripting cultures," where programming becomes an active collaborator in the creative process. Digital tools, in this light, aren't valued simply because they prevent mistakes, they're powerful because they support play, discovery, and improvisation. This is the modern version of the "workmanship of risk," played out through parametric design and algorithmic exploration (Burry, 2011).

As tools like simulation software, machine learning, and generative design become more common, they're changing not just how we design, but how we understand making itself. These technologies give architects access to new levels of complexity and performance, letting them work with data in ways that weren't possible before. At the same time, digital craftsmanship is breaking down the old divide between designing and building. With robotic fabrication and custom scripts, architects are back in touch with the act of making only now, they're shaping forms through code. This re-connection mirrors the old role of the master builder, but in a digitally augmented way (Gramazio & Kohler, 2008). In the DeepSmart Corpus Research, this blended approach creates a meaningful bridge between the intuitive skills of the hand and the logic of machines. The pavilion, in this context, becomes more than a temporary structure it becomes a kind of laboratory, where craft and computation come together to test new forms of creativity, rooted in both technology and touch.

1.3. Machine Learning in the Design Process

Machine learning (ML) represents a transformative shift in architectural design processes, going well beyond traditional computational tools. Unlike rule-based systems that require explicit programming, ML algorithms learn from data patterns, making them ideal for tasks like prediction, classification, clustering, and generative design (Li et al., 2024). This data-driven approach opens up new possibilities for responsiveness and adaptability in both design and fabrication stages. ML's strength lies in its capacity to handle high-dimensional, multi-variable datasets and uncover subtle, often unexpected correlations. For instance, supervised learning can predict the structural performance of a pavilion based on geometry and materials, while unsupervised techniques can reveal latent patterns across typologies and fabrication strategies (Wang et al., 2023). Optimization also benefits from ML: algorithms can learn user preferences or constraints, enhancing traditional evolutionary methods and enabling faster convergence on viable solutions thereby freeing up space for human judgment and creativity (Gero, 2014).

More recently, architects and researchers have been exploring generative models like Variational Autoencoders (VAEs) and Generative Adversarial Networks (GANs), which allow machines to propose novel formal solutions based on learned features (Jiang & Zheng, 2022). These models support an open-ended, dialogic engagement between human and machine, where output is suggestive rather than prescriptive. Additionally, Natural Language Processing (NLP) tools such as Large Language Models (LLMs) are being combined with Building Information Modeling (BIM) systems

to enable more intuitive interaction with complex datasets (Jang & Lee, 2023). Within the DeepSmart Corpus Research, ML is positioned not as a black-box solution but as a semi-autonomous collaborator. By interpreting pavilion data semantically and syntactically, ML helps identify spatial, material, and procedural tendencies highlighting not only patterns but also design anomalies that reflect individual expression. Ultimately, this phase of research demonstrates that ML can augment rather than replace human dexterity by engaging with the design process as a materially grounded, context-sensitive, and continuously evolving practice.

2. DeepSmart Corpus Research: A Data-Driven Exploration

The DeepSmart Corpus is a comprehensive, data-driven research framework developed to investigate the evolving interplay between digital craftsmanship, manual dexterity, and machine learning within architectural design. At its foundation lies an architectural knowledge system composed of empirical data extracted from 158 pavilion case studies constructed between 2000 and 2024. These pavilions, ranging from experimental academic prototypes to high-profile commissions like the Serpentine Pavilion series and World Expo pavilions, serve as fertile testbeds for technological, material, and formal innovation. The aim of this corpus is to reframe architectural experimentation as a structured dataset, systematizing it into 5,056 entries across 32 categories, such as geometry, materials, construction logic, digital tooling, and contextual information. These entries provide a dual-purpose foundation: enabling qualitative interpretation through design theory and discourse and supporting quantitative analysis via machine learning applications.

As seen in **Figure 1**, the data reveals that amorphous forms are the most frequently used typology. It emphasizes that the construction of complex amorphous structures is made possible through the utilization of advanced digital tools, facilitated by a symbiotic relationship between architects and computational technologies. This comprehensive dataset will provide valuable insights into how architects integrate machine learning-enabled and computational tools with traditional craft techniques in their design, featuring the architect as a counterpart to the medieval master builder in the digital age. According to Steenson, data is the new oil, and, within the DeepSmart Corpus Research framework, it will become a key resource in reshaping the role of architecture, architectural design, and manufacturing processes.

Figure 1: Overall Shape Chart of the Pavilions (created by the author, 2024)

As seen in **Table 1**, the form and tool matrix offers an analytical overview of how geometric forms and fabrication tools have evolved in pavilion architecture between 2000 and 2024. It reveals a strong correlation between advanced digital techniques like parametric modeling, robotic fabrication, and CNC milling and the emergence of complex geometries such as freeform surfaces and adaptive structures. In contrast, traditional handcrafting methods remain more closely tied to rectilinear and modular forms, illustrating a balance between digital precision and artisanal craft. This mapping highlights how emerging technologies, including AI-driven design and augmented reality, are reshaping the experimental possibilities of architectural production.

Table 1: Form and tool matrix of pavilions (2000-2024), developed by the author.

	Amorphous	Arched	Conic	Cuboid	Cylinder	Dynamic	Ellipsoid	Hemispehere	Hexagonal prism	Pyramid	Ring	Shell	Sphere	Spiral	Spiral Torus	Star	Torus	Triangular prism	Tubular	Vault
Augmented Reality	o																			
Fabric Tape												o								
Air Drying		o																		
CNC-knitted flexible formwork																	o			
Knitted textile Formwork												o								
FiDU Technology		o																		
Hot Wire		o																		
Cable-Driven Parallel				o																
CNC Roling												o								
Water Jet Cutting									o											
3D Printing	oo			o															o	
Robotic Arm	oo	ooooo			oo		o	oooo		o		o			o		o			oo
Hand Crafted	oo	oooo	oo																	
CNC Miling	oo	o		o											o					
Pneumatic	o												oo							
Nonbuilt	o						o													
Conventional	ooooooooo ooooooooo ooooooooo	ooooooo ooooooo	oo	ooooooo ooooooo ooooooo ooo	ooooooo ooo	oooo	oo	ooooo	o		o	oooo	ooooo	o	ooo	oo	ooo	ooooo			oooo

Meanwhile, World Expo Pavilions occupy a unique space between cultural representation and technological exhibition. These structures frequently aim to communicate national identity or futuristic vision through architecture, blending cutting-edge materials, kinetic systems, and interactive technologies. The DeepSmart Corpus reveals that Expo pavilions often integrate machine learning and data-driven design techniques post-2015, particularly in optimizing environmental performance or enhancing visitor interaction.

By analyzing these clusters collectively and individually, the DeepSmart Corpus not only identifies design trends across two decades of pavilion production but also showcases how digital craftsmanship evolves in different institutional, cultural, and material contexts. Through this typological comparison, the research underscores the value of pavilions as both experimental platforms and critical contributors to the discourse on architecture's digital transformation.

3.1. Serpentine Pavilions

The Serpentine Pavilion commission, held annually in London since 2000, represents one of the most visible platforms for experimental architecture. Its unique format inviting globally renowned architects to create temporary, full-scale structures produced a wide spectrum of formal, material, and conceptual approaches.

Analysis of 24 Serpentine pavilions within the DeepSmart Corpus reveals that this typology favors formal novelty and symbolic expression. A majority of these projects exhibit amorphous or curvilinear forms, enabled by advanced digital modeling and fabrication tools. Architects such as Toyo Ito (2002), Frank Gehry (2008), and Bjarke Ingels (2016) leveraged parametric geometries and complex surface articulation to generate spatial drama and sensory engagement.

The data indicates a high correlation between the use of Rhinoceros/Grasshopper and the emergence of non-standard forms, especially post-2005. Additionally, robotic and CNC fabrication methods begin to dominate after 2010, allowing precise realization of complex components (Gramazio & Kohler, 2008). Material strategies tend to favor lightweight assemblies (e.g., timber grids, tensile membranes, and polycarbonate skins), reflecting the temporary and experimental ethos of the series.

Semantic analysis of curator statements and project texts reveals recurring themes of interaction, perception, and temporality. These align with a broader cultural narrative where the pavilion serves not just as shelter, but as spatial interface a prototype of architectural possibility rather than a resolved product.

3.2. Research Pavilions

The second cluster includes academic or institutional research pavilions developed as part of experimental design studios, digital fabrication labs, or interdisciplinary collaborations. Examples include the ICD/ITKE Research Pavilions (University of Stuttgart), ETH Zurich's robotic timber shells, and various outputs from MIT, AA DRL, and CITA.

These pavilions are defined less by aesthetic intention and more by construction logic and computational rigor. In contrast to the Serpentine Series, research pavilions often adopt modular or biomimetic geometries derived from algorithmic simulations. Within the DeepSmart Corpus, 41 such pavilions were analyzed, showing a strong tendency toward bottom-up material systems and form-finding methodologies.

Notably, this category exhibits the most intensive use of robotic fabrication, particularly multi-axis robotic arms used for filament winding, fiber placement, and non-linear assembly (Menges & Reichert, 2012). The integration of performance simulation structural, thermal, or acoustic is also more frequent here, often used to drive geometric variation or inform material distribution. Machine learning is increasingly employed in this context for design optimization, predictive modeling, and adaptive control systems. For example, clustering algorithms have been used to reduce redundancy in joint typologies, while reinforcement learning helps refine toolpaths in robotic assembly. These applications extend the role of the architect from form-maker to system-designer, mediating between machine precision and material behavior.

3.3. World Expo Pavilions

World Expositions have long served as national showcases for technological progress and cultural identity, and their pavilions reflect this dual agenda. Within the DeepSmart Corpus, 38 World Expo pavilions from 2000 to 2020 were analyzed, spanning expositions in Hanover, Shanghai, Milan, and Dubai.

Compared to the other categories, Expo pavilions display a hybrid character situated between the spectacle of the Serpentine and the experimental logic of research prototypes. Formally, they tend to emphasize monumental gestures and narrative content. Examples include the UK Pavilion at Expo 2010 (Thomas Heatherwick), which used thousands of fiber-optic rods to create a data-driven surface responsive to light and movement.

In terms of tools and materials, Expo pavilions often deploy high-performance composites, interactive skins, and kinetic systems. These choices reflect not only technological ambition but also representational concerns how architecture signifies national innovation or ecological commitment. The DeepSmart dataset shows a growing presence of AI-related design processes in Expo pavilions post-2015, particularly in simulations of crowd behavior, environmental optimization, and façade responsiveness.

Importantly, the design of these pavilions is often informed by multidisciplinary teams including engineers, data scientists, artists, and branding experts. This collaborative ecosystem exemplifies the architect's evolving role as orchestrator of complex technological narratives.

4. Machine Learning in Dexterity

The notion of dexterity in architecture has traditionally referred to the embodied intelligence of the hand the ability to engage directly with materials, adapt intuitively to changing conditions, and embed knowledge into form through tactile making. In this context, craftsmanship has always implied more than technical skill; it represents a deep, situated understanding of material behavior and spatial thinking. With the integration of machine learning (ML) into architectural workflows, however, a new model of dexterity is emerging one that is distributed, augmented, and partially algorithmic. Rather than replacing human input, ML extends and transforms it, introducing new modes of responsiveness, feedback, and collaboration.

Within the framework of the DeepSmart Corpus, ML-augmented dexterity refers to a cooperative design condition in which the architect and algorithm share decision-making authority. The architect contributes intuition, cultural context, and material sensitivity, while the ML model offers optimization, pattern recognition, and predictive capacity. This synergy enables new levels of precision and efficiency. For example, in projects characterized by complex geometries, ML can identify optimal form configurations by drawing from previously analyzed pavilion data. Instead of trial-and-error, architects become curators of machine-suggested options, evaluating them through their own experiential judgment (Oxman, 2017). In DeepSmart experiments, trained neural networks predicted material-fabrication pairings and flagged inconsistencies in novel configurations, creating an "intelligent feedback" loop that parallels the responsiveness of hands-on craftsmanship (Li et al., 2024).

Machine learning also plays a growing role in robotic fabrication, where algorithms assist in real-time calibration of robotic arms, reacting to toolpath errors or material tolerances as they occur (Menges & Reichert, 2012). This produces a new form of craftsmanship one enacted through code but grounded in tactile precision. Importantly, this augmentation does not suggest a loss of human agency. Instead, it redefines what it means to design: shaping datasets, choosing appropriate models, and interpreting algorithmic output are now integral parts of architectural dexterity. ML transforms craftsmanship from a purely manual act into an epistemological model an expanded intelligence that merges embodied skill, computational fluency, and ethical responsibility. This shift holds profound implications for architectural education, authorship, and practice in the age of AI.

5. The Architects as Mediator

In the rapidly evolving landscape of architecture, the infusion of artificial intelligence, robotics, and data science is fundamentally transforming not just how buildings are designed and constructed, but also how architects understand and perform their roles. This integration demands a shift in mindset: the architect can no longer be seen solely as a form-giver or as someone who coordinates the activities of various stakeholders. Instead, the architect increasingly

occupies the position of a mediator a thoughtful negotiator navigating the complex intersections between human values and technological capabilities (Gero, 2014).

This expanded role situates the architect at the center of a dialogue between material and machine, where decisions are no longer based solely on intuition or aesthetic judgment but are informed by data-driven analysis, algorithmic suggestions, and predictive modeling. As tools such as machine learning and parametric design take on more generative and evaluative functions, architects must engage not only with the visual and tactile dimensions of design, but also with systems thinking, code logic, and the ethical implications of automation (Burry, 2011).

The contemporary architect must therefore adopt a hybrid identity simultaneously creative, technical, ethical, and collaborative. They must be fluent in both the language of digital systems and the embodied knowledge of making. This means developing interdisciplinary competencies that span architecture, computer science, material engineering, and environmental psychology, among others. In this expanded capacity, the architect becomes a translator bridging the gap between user needs and technological possibilities, between cultural narratives and computational logic.

Moreover, the rise of intelligent design systems introduces new responsibilities. Architects must now assess and curate the decisions made by machines, ensuring that these outputs align with broader social, ecological, and cultural goals. The challenge lies in preserving architectural authorship and criticality in an age when machines can suggest, simulate, and even select outcomes. This requires a clear understanding of where and how human agency must intervene.
Ultimately, this evolving role does not diminish the value of the architect it amplifies it. By embracing their position as mediators, architects can lead the development of design practices that are both technologically advanced and deeply human-centered. They can ensure that architecture remains a field grounded in ethics, material intelligence, and spatial imagination, even as it moves deeper into the realm of data and automation.

6. Discussion

The findings from the DeepSmart Corpus and its integration with machine learning tools invite a broad rethinking of architectural authorship, design agency, and material intelligence in the context of digital craftsmanship. One of its most important contributions is the reframing of craftsmanship not as an obsolete manual tradition, but as an evolving intelligence distributed across human and machine actors. By constructing a dataset of pavilion case studies and analyzing them through semantic and syntactic models, the research reveals how architectural knowledge can be encoded, learned, and reinterpreted computationally without eliminating the cultural and improvisational dimensions of making. The findings demonstrate that digital craftsmanship is not about abandoning tradition but augmenting it extending the intuition, skill, and adaptability of the human hand into algorithmic environments. Throughout the study, the architectural pavilion emerges not simply as a typology, but as an epistemic object a vehicle for generating knowledge about space, material, form, and process. By examining pavilions across different institutional, cultural, and technological contexts, the DeepSmart Corpus constructs a comparative framework that explains how digital tools reshape the craft of building.

The implications of this study are twofold. First, it validates the use of pavilion data as a meaningful input for ML systems that seek to learn architectural patterns. Second, it repositions the pavilion not just as a representational artifact, but as an operative mechanism for forward-looking design research. The research emphasizes the importance of fostering synergy not substitution between humans and machines in architectural practice. While ML is shown to enhance dexterity by providing predictive support, surfacing patterns, and enabling novel generative processes, it is ultimately the architect's judgment, cultural fluency, and material awareness that determine the true value of computational outputs. The DeepSmart framework, therefore, operates as a collaborative model supporting and expanding architectural thinking rather than automating it. Despite its contributions, the research acknowledges limitations, including dataset biases favoring well-documented or globally visible pavilions, and the partial subjectivity in interpreting semantic content even with computational support. Moreover, the complexity of ML modeling necessitates interdisciplinary fluency, a demand that holds implications for architectural education and practice. Ultimately, the study calls for an emergent design ontology that integrates tacit knowledge, digital intelligence, and computational tools into a coherent and adaptive practice. The DeepSmart Corpus is a step in that direction showing how design knowledge can be structured and mobilized while preserving the cultural essence of craftsmanship. As we

move forward, maintaining a human-centered approach working with, not against, machine learning will be vital in ensuring architecture remains a profoundly human endeavor.

7. Conclusion

The DeepSmart Corpus and its integration with machine learning offer a compelling framework for re-evaluating architectural craftsmanship in the digital era. Rather than replacing manual dexterity, this research demonstrates that machine intelligence can enhance it expanding the designer's cognitive, material, and computational capacities. Through a nuanced and collaborative relationship between humans and machines, the study challenges conventional narratives around automation and architectural labor. Pavilions owing to their experimental nature, flexibility, and freedom from commercial constraints have served as ideal sites for this investigation. The analysis of 158 pavilions over 24 years illustrates how digital tools, robotic fabrication, and machine learning increasingly intersect with tactile making and material intelligence. From the Serpentine's expressive geometries to the precision-driven logics of research pavilions and the symbolic complexity of World Expo structures, the DeepSmart Corpus maps diverse modes through which digital craftsmanship manifests.

At the core of this study lies a redefinition of architectural authorship one that is distributed, responsive, and grounded in ethics. By treating data as a creative medium and ML models as design collaborators, the research encourages architects to reclaim agency in a technologically complex environment. This demands a shift in mindset: from control to curation, from execution to orchestration. The study also emphasizes the need for a revised architectural pedagogy preparing future professionals to navigate both material practices and computational systems, grounded in spatial intelligence, cultural awareness, and ethical reflection. Looking ahead, the DeepSmart Corpus provides a strong foundation for expanded research enabling the inclusion of broader geographies, typologies, and collaborative models. It also proposes an adaptable approach for integrating AI into design in a transparent and human-centered way. Ultimately, architecture in the age of artificial intelligence is not about abandoning the hand it is about extending its reach. The architect becomes a digital craftsman by embedding care, culture, and creativity into every algorithmic decision and every physical intervention.

References

Burry, M. (2011). *Scripting cultures: Architectural design and programming*. John Wiley & Sons.

Gero, J. S. (Ed.). (2014). *Design computing and cognition '14*. Springer.

Gramazio, F., & Kohler, M. (2008). *Digital materiality in architecture*. Lars Müller Publishers.

Jang, S., & Lee, G. (2023). Interactive design by integrating a large pre-trained language model and building information modeling. *arXiv*. https://arxiv.org/abs/2306.14165

Jiang, T., & Zheng, S. (2022). Design synthesis using deep generative models: A survey of methods and applications. *Automation in Construction, 138*, 104230. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104230

Kolarevic, B. (2005). *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*. Taylor & Francis.

Li, C., Zhang, T., Du, X., Zhang, Y., & Xie, H. (2024). Generative AI for architectural design: A literature review. *arXiv*. https://arxiv.org/abs/2404.01335

Menges, A., & Reichert, S. (2012). Material computation: Higher integration in morphogenetic design. *Architectural Design, 82*(2), 14–21.

Oxman, R. (2017). Thinking difference: Theories and models of parametric design thinking. *Design Studies, 52*, 4–39. https://doi.org/10.1016/j.destud.2017.06.001

Picon, A. (2010). *Digital culture in architecture: An introduction for the design professions*. Birkhäuser.

Pye, D. (1968). *The nature and art of workmanship*. Cambridge University Press.

Schumacher, P. (2009). Parametricism: A new global style for architecture and urban design. *Architectural Design, 79*(4), 14–23.

Terzidis, K. (2006). *Algorithmic architecture*. Architectural Press.

Wang, A., Dong, J., Lee, L.-H., Shen, J., & Hui, P. (2023). Towards AI-architecture liberty: A comprehensive survey on designing and collaborating virtual architecture by deep learning in the metaverse. *arXiv*. https://arxiv.org/abs/2305.00510

2025 MSTAS

OTURUM 8

SANAL/ARTIRILMIŞ/KARMA GERÇEKLİK I

2025 MSTAS MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Kültürel Mirasın Dijital Geleceği: Artırılmış Gerçeklik Kesişiminde Araştırma Eğilimlerinin Haritalanması

Beryar Zübeyde Balaban[1]; Leman Figen Gül[2]
[1,2]İstanbul Teknik Üniversitesi
[1]balaban22@itu.edu.tr; [2]fgul@itu.edu.tr

Özet

Bu çalışma, Artırılmış Gerçeklik (AR) teknolojisinin kültürel miras alanındaki kullanımını bibliyometrik analiz yöntemiyle ele almaktadır. Literatürdeki klasik bibliyometrik çalışmalarının büyük bir çoğunluğu yalnızca sayısal verilere odaklanırken, bu araştırma kelime tabanlı veri analizi yöntemini merkeze alarak literatürdeki eğilimleri, araştırma boşluklarını ve gelecekteki potansiyel alanları tespit etmeyi amaçlamaktadır. AR'nin kültürel miras çalışmalarında neden tercih edildiği ve hangi yöntemler ile kullanıldığına dair kapsamlı bir değerlendirme sunan araştırma, kelime tabanlı analiz yoluyla bu alandaki temaları ve anahtar kavramları görselleştirerek yorumlamaktadır. Araştırma süreci; veri toplama, işleme, görselleştirme ve analiz aşamalarından oluşmaktadır. Bu süreç, araştırmacılara mevcut bilgilerin daha derinlemesine anlaşılmasını sağlayan önemli bir araç sunmaktadır. Bütün bu aşamalar, bibliometrik analizlerin kapsamlı bir şekilde yapılmasına olanak tanımaktadır. Çalışmada, ilk olarak kelime tabanlı bibliyometrik analiz kullanılarak etkileşime olanak veren Sanal Gerçeklik (VR), Artırılmış Gerçeklik (AR) ve Karma Gerçeklik (XR) gibi mekânsal teknolojilerin kapsadığı geniş bir alanı haritalandırarak bu çalışmalar deşifre edilmiştir. Bu analiz, aynı zamanda bu teknolojilerin kültürel mirasın farklı yönlerine nasıl entegre olabileceğini ve etkilerinin nasıl farklı disiplinler arasında yayıldığını da ortaya koymaktadır. Analizler, teknolojilerin farklı disiplinlerdeki etkilerini ve bu etkileşimlerin kültürel mirasa olan katkılarını ortaya koymaktadır. Araştırmada VOSviewer ve Bibliometrix yazılımları kullanılarak Scopus ve Web of Science veri tabanlarından elde edilen veriler analiz edilmiştir. Bu analizler sonucunda, literatürdeki mevcut araştırma boşlukları ve gelecekteki gelişim potansiyelleri tespit edilmekte ve alanda daha az çalışılan konular vurgulanmaktadır. Çalışma, ayrıca bu alanın hızla değişen doğasına paralel olarak, teknolojilerin gelecekteki gelişimine dair öngörülerde bulunmakta ve bu bağlamda yeni araştırma yolları önermektedir. AR'nin kültürel miras alanındaki uygulamalarına ilişkin eğilimler, disiplinler arası yaklaşımlar ve alandaki boşluklar ortaya konulmuştur. Çalışma ayrıca, bu teknolojilerin kültürel mirasın korunması, tanıtılması ve erişilebilirliğinin artırılması açısından sunduğu imkânları incelemekte ve AR'nin kültürel miras bağlamında nasıl konumlandığını detaylandırarak, bu alandaki potansiyel fırsatlar ışığında gelecekteki araştırmalara katkı sağlamayı hedeflemektedir.

Anahtar Kelimeler: *Artırılmış Gerçeklik, Bibliyometrik Analiz, Kültürel Miras.*

2025 MSTAS MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

The Digital Future of Cultural Heritage: Mapping Research Trends at the Intersection of Augmented Reality

Beryar Zübeyde Balaban[1]; Leman Figen Gül[2]
[1,2]Istanbul Technical University
[1]balaban22@itu.edu.tr; [2]fgul@itu.edu.tr

Abstract

This study explores the use of augmented reality (AR) technology in the cultural heritage field through bibliometric analysis. While the majority of classical bibliometric studies in the literature focus only on numerical data, this research aims to identify trends in the literature, research gaps and potential future areas by focusing on the word-based data analysis method. The research provides a comprehensive assessment of why AR is favoured in heritage studies and the methods by which it is used, visualising and interpreting themes and key concepts in the field through word-based analysis. The research process consists of stages of data collection, processing, visualisation and analysis. This process provides researchers with an essential tool for gaining a deeper understanding of existing knowledge. All these stages allow bibliometric analyses to be carried out in a comprehensive manner. In the study, word-based bibliometric analysis was first used to decipher these studies by mapping a wide area covered by spatial technologies such as Virtual Reality (VR), Augmented Reality (AR) and Mixed Reality (XR) that allow interaction. This analysis also reveals how these technologies can be integrated into various aspects of cultural heritage and how their impacts are distributed across different disciplines. The analyses highlight the effects of these technologies in diverse fields and their contributions to cultural heritage. Data obtained from Scopus and Web of Science databases were analysed using VOSviewer and Bibliometrix software. As a result of these analyses, existing research gaps in the literature and future development potential are identified and less studied areas in the field are highlighted. The study also provides insights into the future development of these technologies, in parallel with the rapidly changing nature of this field, and proposes new avenues for research in this context. Trends in the application of AR to cultural heritage, interdisciplinary approaches and gaps in the field are identified. The study also examines the opportunities these technologies offer for the preservation, promotion, and accessibility of cultural heritage and aims to contribute to future research by detailing how AR is positioned in the context of cultural heritage, in light of the potential opportunities in this field.

Keywords: *Augmented Reality, Bibliometric Analysis, Cultural Heritage.*

1. Giriş

Kültürel Miras (KM), toplumların geçmişten günümüze kadar taşıdığı maddi ve manevi değerleri içerir ve tüm insanlığın ortak kimliğini oluşturur. Somut ve somut olmayan unsurları içeren bu mirasın korunması ve gelecek nesillere aktarılması bu kimliğin sürdürülebilirliği açısından büyük önem taşır (UNESCO World Heritage Centre, 2023). Bu araştırmanın amacı, artırılmış gerçeklik (augmented reality, AR), sanal gerçeklik (virtual reality, VR) ve genişletilmiş gerçeklik (extended reality, XR) gibi mekansal teknolojilerin kapsamındaki konuların, kültürel miras alanındaki uygulamalarına doğru odaklanmış bir bibliometrik analiz yapmaktır. Bu bağlamda, çalışmanın temel araştırma sorusu kültürel miras alanında AR'nin gelişiminin nasıl bir yol izlediği ve nasıl bir gelişim süreci gösterdiğidir. Çalışma, alandaki eğilimleri ve yaygın olarak kullanılan terimleri analiz ederek, gelişen söylemin haritasını çıkarmayı ve AR ile kültürel miras çalışmalarındaki yönelimleri, eksiklikleri ve potansiyel başlıkları kelime odaklı bir tarama ile keşfetmeyi amaçlamaktadır. Son yıllarda, kültürel miras varlıkları, mirasın korunması ve tanıtılması, bu varlıklarla etkileşimin artırılmasını sağlayabilen dijital teknolojilerin gelişmesiyle, geniş çapta araştırma konusu olmuştur. Özellikle AR teknolojisinin kültürel mirasın daha geniş kitlelere sunulması, topluluk belleğinin güçlendirilmesi ve kimlik oluşumuna katkı sağlama gibi önemli roller üstlendiği görülmektedir. Kültürel miras kaynaklarını anlamaya (Mason ve Vavoula, 2021; Portalés vd. 2018), korumaya (Beck, 2013) ve onlarla etkileşime olanak veren (Cucchiara ve Del Bimbo, 2014) araştırmalar, kültürel mirasın kimlik ve toplumun hafızasını oluşturmadaki artan rolü ile giderek yaygınlaşmaktadır. Çalışma ilk olarak mekânsal teknolojiler arasından öne çıkan yönelimi belirlemeyi ve ardından özellikle AR ve kültürel miras alanında derinlemesine bir analiz yaparak çalışılan temalara dair önemli öngörüler elde etmeyi hedeflemektedir. Bibliyometrik analiz, kelime odaklı eğilimlerin görselleştirilmesine (Van Nunen vd., 2018), sayısallaştırılmasına, araştırma boşluklarının belirlenmesine ve bu dinamik alanın gelecekteki potansiyellerinin ortaya konulmasına olanak tanımaktadır (Alsharif vd., 2020).

2. Yöntem

Bu çalışma, öncelikle VR, AR ve XR gibi mekansal teknolojilerin odakta olduğu çalışmaları bir araya getirerek bu çalışmalar arasından ön plana çıkan kavramları belirlemektedir. Sonraki aşamada öne çıkan iki kavram olan 'AR' ile 'kültürel miras'ın kesişim alanını incelemek için daha kapsamlı bir bibliyometrik analiz yapılmıştır. Bu süreçte VOSviewer ve Bibliometrix yazılımları kullanılarak alandaki eğilimler, eksiklikler ve potansiyeller belirlenmektedir. Süreç veri toplama, toplanan verilerin işlenmesi, görselleştirme ve analiz gibi birkaç temel aşamadan oluşmaktadır.

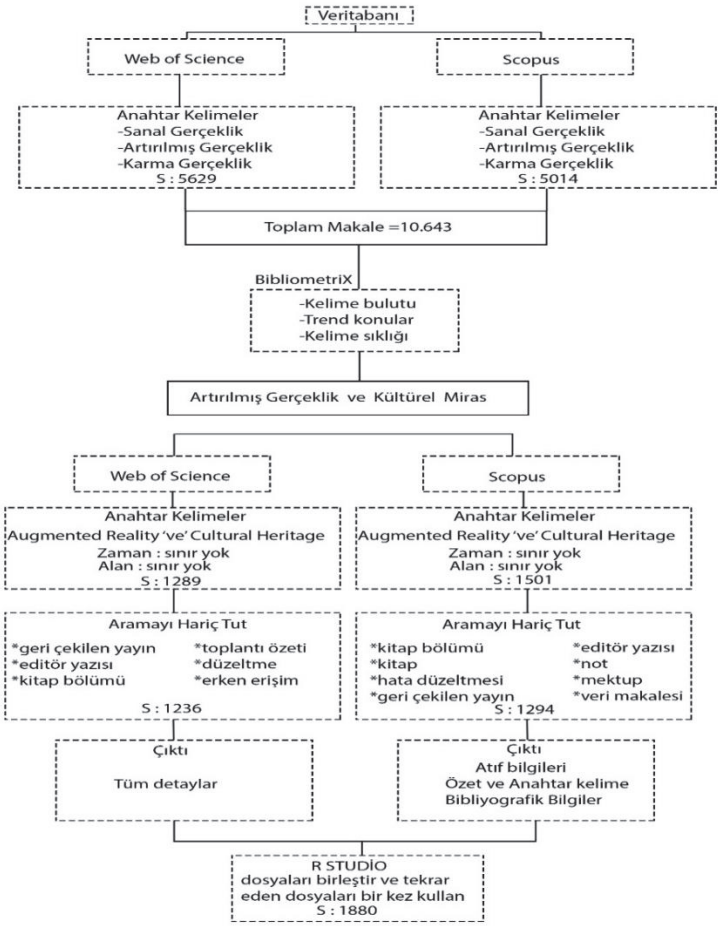
2.1.Veri Toplama

İlk aşamada, akademik araştırmalarda en sık kullanılan iki veri tabanı olan 'Scopus' ve 'Web of Science' veri tabanında herhangi bir tarih ve makale türü kısıtlaması yapılmadan 'VR' , 'AR' ve 'XR' anahtar kelimeleri kullanılarak bir tarama yapılmıştır. Scopus veri tabanında 5014 ve Web of Science veri tabanında 5629 olmak üzere toplamda 10.643 makale listelenmiştir. Bu makaleler yaygın eğilimi belirlemek üzere Bibliometrix programına yüklenmiş, kelime bulutu ve yaygın konular olarak AR, VR ve kültürel miras konularının öne çıktığı tespit edilmiştir **(Şekil 1)**.

Şekil 1: Kelime bulutu

İlk taramada elde edilen verilerden çıkan sonuçlar (Aliprantis, 2019' da önerildiği gibi) 2. taramanın giriş verilerine dönüşerek, 'AR' ve 'Kültürel Miras' gibi belirli anahtar kelimeler kullanılmıştır. İki anahtar kelime, ortak çalışma kümesi elde etmek amacıyla 'AND' bağlacı ile bağlanarak taranmıştır. Başlangıçta toplam 2790 çalışma ve ardından araştırma

alanının dışında kalan bağlam dışı çalışmalar çıkarılarak makale sayısı 2530 makaleye düşürülmüştür. Analizlerin sağlıklı yapılabilmesi amacıyla her iki veri tabanında ortak olarak bulunan makalelerin sadece bir kez kümeye eklenmesi için veri analiz programı olan R Studio kullanılmıştır. R Studio programına yazılan kod sayesinde tekrar eden tüm makaleler sadece bir kez genel toplama dâhil edilerek 1880 makalelik bir veri kümesi elde edilmiştir **(Şekil 2)**.



Şekil 2: Veri toplama iş akışı

2.2.Veri İşleme

Makale künyeleri, bilimsel çalışmalarda kaynakların yönetimini ve düzenlenmesini sağlayan bir referans biçimi olan BibTeX formatında toplanmıştır. Ortak veri tabanı kümesini işlemek için R Studio aracılığıyla xlxs formatına dönüştürülen makaleler, daha ileri işleme için VOSviewer ve Bibliometrix yazılımlarına aktarılmıştır. VOSviewer ortak yazarlar, atıf ilişkileri ve anahtar kelime eş zamanlılığı gibi bibliyometrik ağların görselleştirilmesinde kullanılmıştır. Bibliometrix programı yayın eğilimleri, atıf analizi ve alandaki öncü yazarlar ile kurumların belirlenmesi gibi (Kalinda, 2022) bibliyometrik verilerin sayısal analizini gerçekleştirmek amacıyla kullanılmıştır. Anahtar kelimeler, tematik kümeler halinde sınıflandırılarak yoğun araştırma yapılan alanlar ve literatürdeki olası boşluklar tespit edilmiştir.

2.3.Veri Analizi ve Görselleştirme

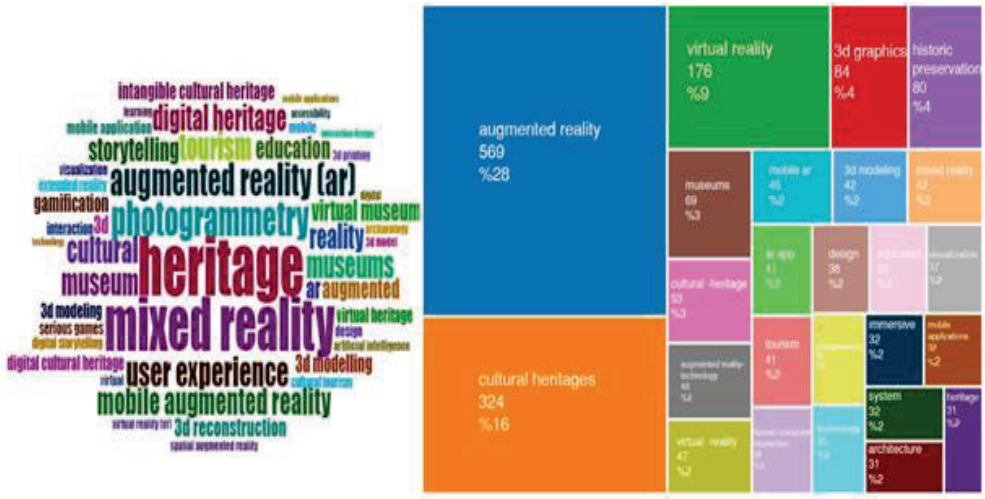
Kelime odaklı yaklaşım genel temaları vurgulama özelliğinin yanında, ilgili disiplinin temel yapısı hakkında ayrıntılı bilgiler sunan temalar arası ilişkileri de tespit etmektedir (Karaçor, 2023). Bu analiz, AR'nin kültürel miras alanındaki mobil uygulamalardan kültürel eserlerin restorasyonu için tasarlanmış sistemlere kadar çeşitli uygulamalarını vurgularken bulguların gelecekteki araştırma eğilimleri üzerindeki etkilerini, alandaki sınırlı çalışmaları ve popüler çalışma alanlarını değerlendirmektedir (Münster vd., 2021). Wang ve Chen'e göre (2014) VOSviewer ve Bibliometrix tarafından oluşturulan haritalar, diğer araçların net bir şekilde sunamadığı bir kavrayış sunmakta ve özelleşmiş

alanlarda çalışmak isteyen araştırmacılar için verileri daha erişilebilir hale getirmektedir. Veri görselleştirme süreci, bibliyometrik ağların haritalanması ve analizi için VOSviewer ve Bibliometrix R paketi gibi etkili araçların entegre edilmesiyle desteklenmiştir.

3.Bulgular

AR'nin kültürel miras ile ilişkilenerek üretildiği çalışmalar; beş başlık altında incelenmiştir. Başlıklar **Anahtar Kelime Yoğunluğu ve Tematik Odaklar, Kelime İlişki Ağları ve Kavramsal Bağlantılar**, **Yıllara Göre Araştırma Eğilimleri ve Atıf Analizi, Tematik ve Kavramsal Haritaların İncelenmesi, Araştırma Boşlukları ve Gelecek Potansiyelleri** şeklinde sıralanabilir.

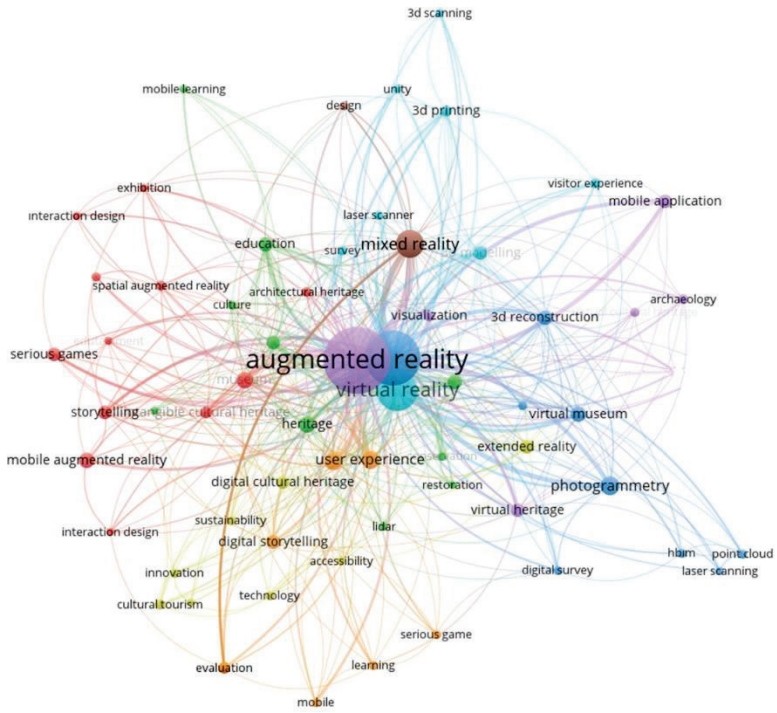
Anahtar Kelime Yoğunluğu ve Tematik Odaklar: 'VR', '3D computer graphics' (3B grafikler; Li vd., 2010) ve 'historic preservation' (tarihi koruma; Comes vd., 2014) gibi terimlerin öne çıkması **(Şekil 3)**, dijital araçların kültürel mirasın korunması ve erişilebilirlik konularının sıklıkla çalışıldığı gösterirken kullanıcı deneyimi ve eğitim-turizm gibi konuların daha az ele alındığı göze çarpmaktadır. AR, %28 oranla en sık tekrar eden anahtar kelime olarak öne çıkmaktadır. Fakat, 'user experience' ve 'mobile AR' gibi kullanıcı odaklı alt kavramların sık kullanılanlar listesinde daha az sıklıkta bulunması, AR'nin kültürel mirası geniş kitlelere ulaştırmadaki potansiyelinin henüz yeterince etkin şekilde kullanılmadığını düşündürmektedir. AR uygulamaları, teknolojileri ve mobil uygulamalar gibi kavramlar dijital araçların kültürel miras projelerinde hızla yaygınlaştığını ve kullanıcı merkezli çalışmaların gelecekte daha fazla önem kazanacağına işaret etmektedir. Ancak, özellikle sosyokültürel ve tarihsel anlatı perspektifleri (örneğin 'storytelling', 'intangible cultural heritage', 'historical narrative') ile ilgili kavramların diğer teknik kavramlara kıyasla görselde daha az vurgulanması, dijital içeriklerin hikâyesel derinliğini geliştirme alanında bir eksikliğe işaret etmektedir. Bu durum, araştırmalarda teknolojinin etkin bir biçimde kullanımı noktasında hassas davranılırken tarihsel anlatının derinliğinin sağlanması noktasında bir yaklaşım eksikliğine dikkat çekmektedir.



Şekil 3: Kelime bulutu ve oranları

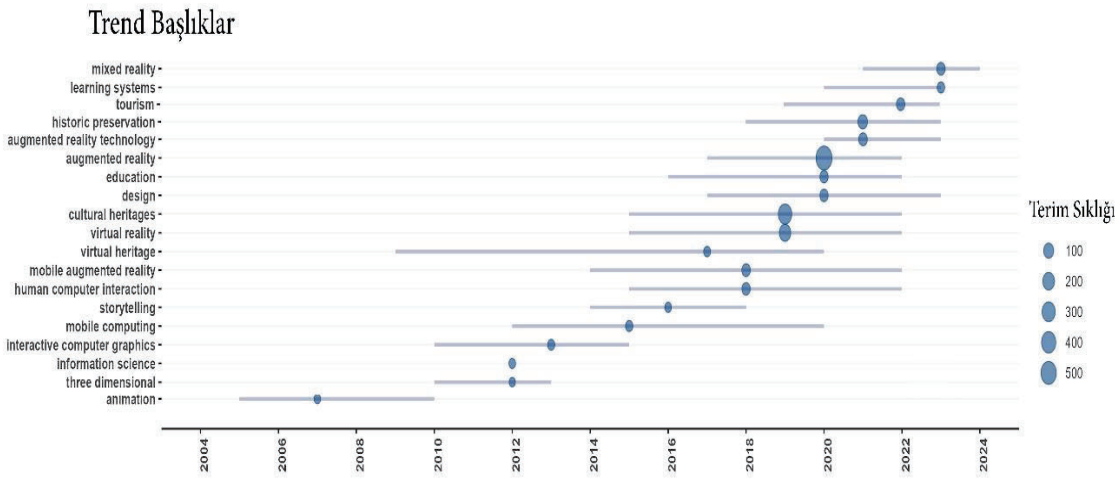
Kelime İlişki Ağları ve Kavramsal Bağlantılar: 'AR', 'VR', 'KM', 'digital cultural heritage' (Pedersen vd., 2017; Amato vd., 2017), '3D reconstruction' (Bevilacqua vd., 2019; Gherardini vd., 2018) ve XR gibi kavramlar kültürel mirasın dijital ortamlara aktarılmasında aktif teknolojiler olarak öne çıkmaktadır **(Şekil 4)**. Özellikle fotogrametri ve 3B tarama gibi teknikler, kültürel miras alanında fiziksel yapıların dijital ortama aktarılması sürecinde önemli bir yer tutmaktadır. Bu kümenin birleşim noktalarının oldukça yakın olması bu kavramların birbirleriyle yüksek oranda ilişkili olduğunu ve bu alanların literatürde genellikle birlikte çalışıldığını göstermektedir. 'Ontology', 'serious games' (Anderson vd., 2010; Mortara vd., 2014), 'mobile', 'evaluation' ve 'sustainable development' gibi temalar yüksek gelişim yoğunluğuna sahip olmasına rağmen merkezi konumdan uzak bir alanda yer almaktadır. Bu durum, bu kavramların ilişkilendiği alanların görece daha sınırlı olduğunu ve merkezde bulunan araştırma konularından nispeten bağımsız olarak üretildiğini göstermektedir. Özellikle genç nesillerin kültürel mirasa erişimini teşvik etme potansiyeline sahip olan bu bilgi sistemleri alanındaki araştırmalar, AR uygulamalarının pratik bir çerçeveye oturtulması açısından kritik öneme sahiptir. Analizde yer alan 'mobile augmented reality', 'storytelling' (Liestøl, 2019; Machidon vd., 2018), 'engagement' ve 'user experience' (Vainstein vd., 2016; Střelák vd., 2016; Han vd., 2018) gibi kavramların, daha geride durmasına rağmen ilişki kurma bakımından yüksek potansiyele sahip olduğu görülmektedir. Bu kavramlar, AR uygulamalarının kültürel

mirasta kullanıcı etkileşimini artırma ve deneyimleri daha ilgi çekici ve güçlü hale getirme işlevini yansıtmaktadır. 'Video mapping', 'archaeology' ve 'digital storytelling' gibi temalar düşük merkeziyet ve yoğunluk derecelerine sahiptir. Özellikle dijital hikâye anlatımı ve arkeoloji konuları, kültürel miras alanında ilginç olmakla birlikte, görece olarak az araştırılmış alanlardır ve bu konuların gelecekte daha fazla gelişme potansiyeli bulunmaktadır.



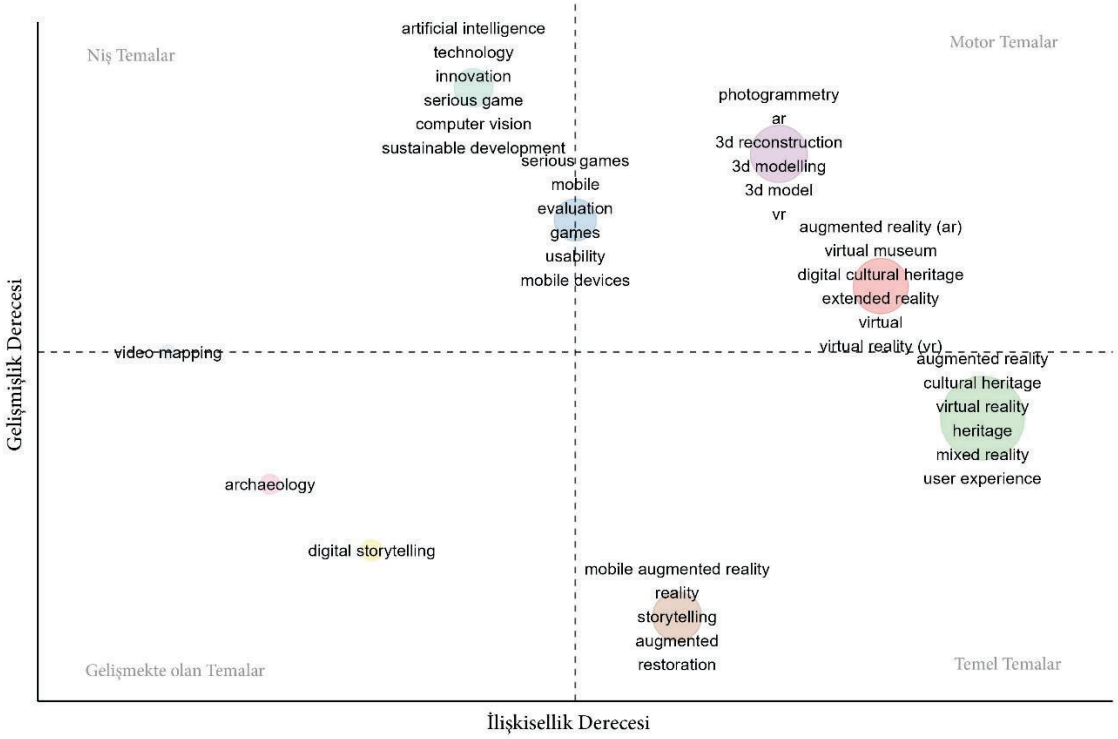
Şekil 4: Kelime ilişki ağları

Yıllara Göre Araştırma Eğilimleri ve Atıf Analizi: Yıllık Bilimsel Üretim verisi ile 2000'li yılların başında sınırlı olan makale sayısının 2015 ve sonrası dönemde ivmelenerek arttığını, özellikle 2020 civarında zirveye çıktığını söylemek mümkündür **(Şekil 5)**. Bu eğilim, alanın bilimsel topluluk nezdinde önem kazandığını ve araştırma potansiyelinin keşfedildiğini göstermektedir. Özellikle 2020 yılındaki artış, pandemi sürecinde dijital ve uzaktan erişim çözümlerine olan ilginin arttığını göstermektedir. Bazı yıllarda yapılan çalışmaların öncü nitelikte kabul edilerek alana geniş bir etki sağladığı ve literatüre önemli katkılar sunduğu söylenebilir**.** Metinlerin tamamı analiz edilerek oluşturulan görseldeki trend konu başlıkları AR, KM, tasarım, eğitim ve sanallaştırma gibi terimlerin sıklıkla kullanıldığını ve araştırmaların bu ana başlıklar etrafında yoğunlaştığını ortaya koymaktadır. Bu da, inovasyon potansiyeline işaret ederek AR uygulamalarının kültürel mirasın korunması, erişilebilirliği ve eğitim gibi alanlarda stratejik bir önem taşıdığını ve disiplinler arası bir ilerleme kaydedildiğini göstermektedir.



Şekil 5: Trend başlık sıklığı

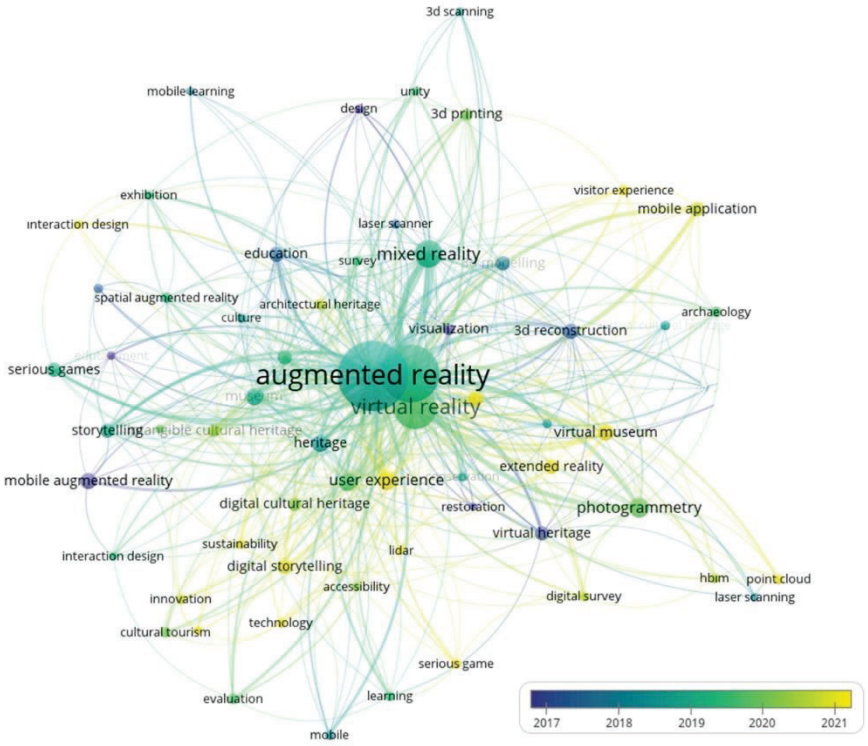
Tematik Haritaların İncelenmesi: Tematik haritanın yatay ekseni (İlişkisellik Derecesi), bir temanın diğer temalarl ne kadar bağlantılı olduğunu göstermektedir (Wilczewski ve Alon, 2023). Sağa doğru gittikçe temanın ne kadar merkezî olduğu, yani çalışmalar içerisinde ne derece sık kullanıldığı ve diğer temalarla yoğun ilişkiler kurduğu anlaşılmaktadır. Sola doğru gittikçe temanın ne kadar bağımsız veya diğer temalarla daha az ilişkilendirilmiş bir konumda bulunduğu sonucuna varılmaktadır. Dikey eksen (Gelişmişlik Derecesi) ise temanın kendi içinde ne kadar yoğun geliştiğini ve alan içerisinde ne kadar olgunlaştığını ifade etmektedir **(Şekil 6)**. Tematik harita, kavramların gelişmişlik (yoğunluk) ve ilişkisellik (merkezilik) derecelerine göre dört grupta sınıflandırıldığı bir analiz yöntemine dayanmaktadır (Bretas ve Alon, 2021). Motor Temalar hem merkezi hem de yoğun olarak gelişmiş temaları içermektedir. Buradaki kavramlar alanda en güçlü ve en sık çalışılan konuları temsil etmektedir. Örneğin: 'AR,' 'KM', 'virtual museum' gibi kavramlar burada yer almaktadır ve bu temalar alanın temel itici güçleri olarak öne çıkmaktadır. Niş temalar yüksek gelişmişliğe sahip ancak merkezî olmayan konuları temsil etmektedir. Bu kavramlar çoğunlukla, uzmanlaşmış araştırma alanlarıdır. 'AI', 'serious game' , 'computer vision' gibi kavramların yer aldığı bu bölüm özelleşmiş çalışmalar ile derinleşmiş ancak genel eğilimlerden uzak kavramları barındırmaktadır. Temel temalar merkezi olan ancak gelişim düzeyi diğer temalara göre düşük olan konuları göstermektedir. Bunlar, alanda sıkça ele alınan ve temel olmakla beraber yeterince derinleştirilmeyen konulardır. 'Mobile augmented reality', 'storytelling' ve 'augmented restoration' gibi kavramlar sıkça ele alınmakla birlikte, özellikle sonuçların değerlendirilmesi ve test edilmesi aşamalarında yeterince derinleştirilmemiş konular olarak karşımıza çıkmaktadır**.** Gelişmekte olan temalar, yeni ortaya çıkan konuları veya zamanla önemini yitiren araştırma alanlarını temsil etmektedir. Örneğin, 'archaeology' ve 'digital storytelling' gibi konular bu kapsamda değerlendirilebilir.



Şekil 6: Tematik harita

Araştırma Boşlukları ve Gelecek Potansiyelleri: AR ve kültürel miras temaları dışındaki konularda dikkat çeken eğilim ve araştırma boşluklarının yıllara göre yoğunlaşması renk kodları ile ifade edilmiştir **(Şekil 7)**. Özellikle 2017 yılı ve sonrası dönemde sanal müzeler (Li, Yu ve Liang, 2021; Bachiller vd., 2023), mobil uygulamalar (Yi ve Chen, 2024), tasarım (Man ve Gao, 2023) ve eğitim gibi konuların popülaritesinin arttığı gözlemlenmektedir. Kelime ilişki ağında dijital hikâye anlatımı, ziyaretçi deneyimi ve sürdürülebilirlik gibi kavramlar öne çıkmaktadır. Bu analiz dijital araçların yalnızca mirasın korunması değil aynı zamanda eğitim, turizm ve kullanıcı deneyimi gibi alanlarda da önemli bir katkı sunduğunu ve bunun disiplinler arası araştırmalar için potansiyel oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Diyagramda, AR ve KM ana temalarının çevresinde sanal müzeler, dijital hikâye anlatımı, ziyaretçi deneyimi (Rodriguez-Garcia ve Alaguero, 2023) ve sürdürülebilirlik (Vlizos vd., 2024) gibi kavramlar görünürlük açısından öne çıkmakla birlikte, bu

kavramların diğer temalarla kurduğu bağlantı sayısının görece sınırlı olması, bu alanlarda derinleştirici ve disiplinler arası çalışmalara duyulan ihtiyacı ortaya koymaktadır.



Şekil 7: Yıllara göre kelime ağı ilişkisi

4.Sonuçlar

Sunulan tarama, AR teknolojisinin kültürel miras alanındaki uygulamalara giderek daha fazla entegre olduğunu ve bu alandaki çalışmaların kapsamının genişleyeceğini göstermektedir. Bununla birlikte, bazı temalar şimdiye kadar literatürde baskın olsa da, farklı ve ilişkili perspektiflerden ele alınması gerekmektedir. Bu çalışmada, kültürel miras araştırmalarında AR uygulamalarının tarihsel gelişimi ve bibliyometrik eğilimleri tartışılmış; AR ile kültürel mirasın disiplinler arası entegrasyonuna duyulan ihtiyaç gibi kritik boşluklara dikkat çekilmiştir. Ayrıca, nispeten daha az incelenmiş olan sürdürülebilirlik ve toplum temelli etkileşim temaları, literatürde belirlenen temalara ek anlam kazandırmaktadır. Çalışma, AR teknolojilerinin tarihsel anlatıları yeniden inşa etme ve toplumsal hafızayı güçlendirme potansiyelini incelemekte ve literatürdeki eğilimlerden yola çıkarak, bu tür uygulamaların yalnızca teknoloji odaklı değil, aynı zamanda kullanıcı merkezli ve bağlama duyarlı yaklaşımlarla geliştirildiği yönündeki yaklaşımları grafikler ile desteklemektedir. Buna ek olarak, sürdürülebilirlik ve toplumsal hafızanın güçlendirilmesi konusundaki potansiyellerin alanla uyumlu hâle getirilmesi, kültürel mirasın yalnızca dijital ortama aktarılmasına değil aynı zamanda gelecek nesillere aktarılmasını da katkı sağlayacaktır. Bu tür bir entegrasyonun vaka çalışmalarıyla desteklenmesi, alanın sahip olduğu anlatıları merkeze alarak bir üretim zemini oluşturacak ve AR uygulamalarının toplum üzerindeki etkisinin anlaşılmasına katkı sunacaktır. Bu bağlamda, çalışma kapsamında elde edilen bulgular kültürel miras ve AR kesişiminde öne çıkan temaların hangi alanlarda yoğunlaştığını ve hangi konuların görece daha az ele alındığını ortaya koymaktadır. Kültürel mirasın toplumsal hafızayı güçlendirme potansiyeli göz önünde bulundurularak, çalışmaların bu alanda yoğunlaştırılması toplum katılımını teşvik etme açısından kritik bir öneme sahiptir. Diğer yandan son yıllarda birçok farklı alanda kullanılmaya başlanan yapay zekânın geri planda kalması dikkat çekmektedir. Bu teknolojiyle ilgili doğrudan bir veri analizi yapılmamakla birlikte, AR ve kültürel miras kesişimindeki araştırma eğilimlerinin, teknolojik çeşitlenmeye açık bir yapıda olduğu gözlemlenmektedir. Aynı zamanda özellikle ziyaretçi deneyimi ve sürdürülebilirlik gibi konuların kültürel miras alanında teknolojinin etkilerini ölçen kullanıcı odaklı çalışmalara ihtiyaç duyduğu görülmektedir. Bu bağlamda vaka çalışmalarının devamında AR uygulamalarının kullanıcı deneyimi üzerindeki etkilerini ölçen araştırmaların sayısı ve içeriğinin iyileştirilmesi çalışmaların etkilerini ölçme noktasında kritik öneme sahiptir. Dijital hikâye anlatımına odaklanan çalışmalar kültürel mirasın bağlamına uygun bir biçimde üretilmesi ve deneyimlenmesine katkı sunması yönünden desteklenmesi gereken bir alan olarak ön plana çıkmaktadır. Sonuç olarak

AR ve kültürel miras ortak kullanımında, disiplinler arası çalışmalar arttıkça, bu alanın katlanarak geniş bir akademik yelpazeye dönüştüğü söylenebilir.

KAYNAKLAR

Aliprantis, J., & Caridakis, G. (2019). A survey of augmented reality applications in cultural heritage. International Journal of Computational Methods in Heritage Science (IJCMHS), 3(2), 118-147.

Alsharif, A. H., Salleh, N. O. R. Z. M. D., & Baharun, R. O. H. A. I. Z. A. T. (2020). Bibliometric analysis. Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 98(15), 2948-2962.

Amato, F., Moscato, V., Picariello, A., Colace, F., Santo, M. D., Schreiber, F. A., & Tanca, L. (2017). Big data meets digital cultural heritage: Design and implementation of scrabs, a smart context-aware browsing assistant for cultural environments. *Journal on Computing and Cultural Heritage (JOCCH)*, *10*(1), 1-23.

Anderson, E. F., McLoughlin, L., Liarokapis, F., Peters, C., Petridis, P., & De Freitas, S. (2010). Developing serious games for cultural heritage: a state-of-the-art review. *Virtual reality*, *14*, 255-275.

Bachiller, C., Monzo, J. M., & Rey, B. (2023). Augmented and virtual reality to enhance the didactical experience of technological heritage museums. *Applied Sciences, 13*(6), 3539

Beck, L. S. (2013). Digital documentation in the conservation of cultural heritage: Finding the practical in best practice. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *40*, 85-90.

Bevilacqua, M. G., Caroti, G., Piemonte, A., & Ulivieri, D. (2019). Reconstruction of lost architectural volumes by integration of photogrammetry from archive imagery with 3D models of the status quo. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *42*, 119-125.

Bretas, V. P., & Alon, I. (2021). Franchising research on emerging markets: Bibliometric and content analyses. *Journal of Business Research*, *133*, 51-65.

Comes, R., Buna, Z., & Badiu, I. (2014). Creation and preservation of digital cultural heritage. *Journal of Ancient History and Archaeology, 1*(2).

Cucchiara, R., & Del Bimbo, A. (2014). Visions for augmented cultural heritage experience. *IEEE MultiMedia*, *21*(1), 74-82.

Gherardini, F., Santachiara, M., & Leali, F. (2018, June). 3D virtual reconstruction and augmented reality visualization of damaged stone sculptures. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 364, p. 012018). IOP Publishing.

Han, D. I., tom Dieck, M. C., & Jung, T. (2018). User experience model for augmented reality applications in urban heritage tourism. *Journal of Heritage Tourism*, *13*(1), 46-61.

Kalinda, D. (2022). Tangible cultural analytics: how tangible augmented reality can enhance cultural heritage research. [Thesis, Toronto Metropolitan University]. https://doi.org/10.32920/ryerson.14647101

Karaçor, E. K., & Ögçe, H. (2023). Evaluating the Publicness Dimension of Public Space with Bibliometric Analysis. *Future Cities and Environment*, *9*(1).

Li, R., Luo, T., & Zha, H. (2010). 3D digitization and its applications in cultural heritage. In *Digital Heritage: Third International Conference, EuroMed 2010, Lemessos, Cyprus, November 8-13, 2010. Proceedings 3* (pp. 381-388). Springer Berlin Heidelberg.

Li, Y., Yu, L., & Liang, H. N. (2021, October). CubeMuseum: An augmented reality prototype of embodied virtual museum. In 2021 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct) (pp. 13-17). IEEE.

Liestøl, G. (2019). Augmented reality storytelling: Narrative design and reconstruction of a historical event *in situ*. *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, *13*(12), 196–209. https://doi.org/10.3991/ijim.v13i12.11560

Machidon, O. M., Duguleana, M., & Carrozzino, M. (2018). Virtual humans in cultural heritage ICT applications: A review. *Journal of Cultural Heritage*, *33*, 249-260.

Man, S., & Gao, Z. (2023). (Retracted) Digital immersive interactive experience design of museum cultural heritage based on virtual reality technology. *Journal of Electronic Imaging*, *32*(1), 011208-011208.

Mason, M., & Vavoula, G. (2021). Digital cultural heritage design practice: a conceptual framework. *The Design Journal*, *24*(3), 405-424.

Mortara, M., Catalano, C. E., Bellotti, F., Fiucci, G., Houry-Panchetti, M., & Petridis, P. (2014). Learning cultural heritage by serious games. *Journal of Cultural Heritage*, *15*(3), 318-325.

Münster, S., Utescher, R., & Ulutas Aydogan, S. (2021). Digital topics on cultural heritage investigated: how can data-driven and data-guided methods support to identify current topics and trends in digital heritage?. *Built Heritage*, *5*(1), 25.

Pedersen, I., Gale, N., Mirza-Babaei, P., & Reid, S. (2017). More than meets the eye: The benefits of augmented reality and holographic displays for digital cultural heritage. *Journal on Computing and Cultural Heritage (JOCCH), 10*(2), 1-15.

Portalés, C., Rodrigues, J. M., Rodrigues Gonçalves, A., Alba, E., & Sebastián, J. (2018). Digital cultural heritage. *Multimodal Technologies and Interaction*, *2*(3), 58.

Rodriguez-Garcia, B., & Alaguero, M. (2023, September). Immersive virtual reality in cultural heritage dissemination: a comprehensive application for Novice Users. In *International Conference on Extended Reality* (pp. 287-301). Cham: Springer Nature Switzerland.

Střelák, D., Škola, F., & Liarokapis, F. (2016, June). Examining user experiences in a mobile augmented reality tourist guide. In *Proceedings of the 9th ACM international conference on pervasive technologies related to assistive environments* (pp. 1-8).

UNESCO World Heritage Centre. (2023). *The World Heritage List.* UNESCO. Retrieved March 24, 2025, from https://whc.unesco.org/en/list

Vainstein, N., Kuflik, T., & Lanir, J. (2016, March). Towards using mobile, head-worn displays in cultural heritage: user requirements and a research agenda. In *Proceedings of the 21st international conference on intelligent user interfaces* (pp. 327-331).

Van Nunen, K., Li, J., Reniers, G., & Ponnet, K. (2018). Bibliometric analysis of safety culture research. *Safety science*, *108*, 248-258.

Vlizos, S., Kotsopoulos, K., & Christodoulou, D. (2024). Enhancing Cultural Sustainability: Making Rescue Excavations Accessible through Educational Applications and Virtual Reality. *Sustainability*, *16*(4), 1439.

Wang, C. H., & Chen, S. C. (2014). Bibliometric and social network analysis for data mining: The intellectual structure of tourism destination literature. *Journal of testing and evaluation*, *42*(1), 229-241.

Wilczewski, M., & Alon, I. (2023). Language and communication in international students' adaptation: a bibliometric and content analysis review. *Higher Education*, *85*(6), 1235-1256.

Yi, K., & Chen, Y. (2024, June). Research on AR Cultural Heritage Museum Application Design Driven by User Demands. In *International Conference on Human-Computer Interaction* (pp. 119-134). Cham: Springer Nature Switzerland.

2025 MSTAS MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Spatial and Temporal Organization of Biometric Feedback for Architectural Research

Kutay Guler
Kansas State University
guler@ksu.edu

Abstract

Architectural experience is inherently multisensory, involving not only the five classical senses but also proprioception, vestibular inputs, and temporal perception. However, architectural theory has long been dominated by ocularcentrism. While concepts of embodied perception have enriched discourse, they often rely on subjective interpretations that lack empirical rigor. Scientific investigations into architectural atmosphere remain underdeveloped, typically relying on qualitative methodologies susceptible to bias. Neuroarchitecture, an emergent interdisciplinary field bridging architecture, neuroscience, and psychology, offers promising pathways to address these limitations. Despite longstanding availability, neuroscientific tools, such as eye tracking and biosensors, have only recently become accessible due to advances in cost-effective hardware and software. Yet, applications in architectural contexts remain limited, particularly those integrating biometric and virtual reality (VR) methodologies.

This study proposes a novel neuroarchitectural methodology to synchronize multi-channel biometric data, ...including eye tracking (saccade and fixation), heart rate, pupil dilation, galvanic skin response, and skin temperature, spatially and temporally synchronized within a virtual reality environment. The approach enables spatial-temporal alignment of physiological responses with gaze behavior in three-dimensional space. An experimental demonstration involving 80 participants exposed to four variations of a photorealistic virtual atrium (biophilic, material, color, and control conditions) illustrates the framework's utility. Following a stress-induction protocol, participants engaged with the virtual environments while biometric data were recorded.

The method offers significant potential for advancing evidence-based design in architecture by enabling precise mapping of perceptual and emotional responses to spatial features. Furthermore, the large volume of structured, high-resolution data produced by this method offers significant potential for advanced statistical analysis, machine learning applications, and cross-disciplinary use in product design, gaming, and virtual cinematic experiences.

Keywords: *Biometric Data Analysis, Neuroarchitecture, Spatial Perception.*

2025 MSTAS MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Biyometrik Geri Bildirimin Mekânsal ve Zamansal Organizasyonu

Kutay Guler
Kansas State University
guler@ksu.edu

Özet

Mimari deneyim, yalnızca beş klasik duyu ile sınırlı kalmayıp, aynı zamanda propriosepsiyon, vestibüler girdiler ve zamansal algı gibi bileşenleri de içeren doğası gereği çok duyulu bir süreçtir. Ancak mimarlık kuramı uzun süredir görme merkezli bir bakış açısı tarafından şekillendirilmiştir. Bedensel algı kavramı söylemi çoğunlukla öznel yorumlara dayanmaktadır ve deneysel kesinlikten yoksundur. Mimari atmosferin bilimsel incelenmesi görece geri planda kalmış, genellikle bilişsel ve kültürel önyargılara açık nitel yöntemlere dayandırılmıştır. Mimarlık, sinirbilim ve psikolojiyi bir araya getiren yükselen disiplinlerarası bir alan olan nöromimarlık, bu sınırlamaların aşılmasında umut verici yeni yollar sunmaktadır. Göz izleme ve biyosensörler gibi nörobilimsel araçlar uzun süredir mevcut olmasına rağmen, yalnızca son dönemde düşük maliyetli donanım ve yazılım teknolojilerindeki gelişmeler sayesinde daha erişilebilir hale gelmiştir. Buna rağmen, biyometrik veriler ile sanal gerçeklik (VR) teknolojilerini birleştiren mimari uygulamalar hâlâ sınırlıdır.

Bu çalışma, çok kanallı biyometrik verileri senkronize eden özgün bir nöromimarlık metodolojisi önermektedir. Bu veriler; göz izleme (sakkad ve fiksasyon), kalp atış hızı, gözbebeği genişlemesi, galvanik deri tepkisi ve cilt sıcaklığı gibi göstergeleri içermekte, sanal gerçeklik ortamında mekânsal ve zamansal olarak senkronize edilmektedir. Bu yaklaşım, fizyolojik tepkilerin üç boyutlu uzamda bakış davranışıyla eşzamanlı analizini mümkün kılmaktadır. Yöntemin geçerliliği, 80 katılımcının dört farklı fotogerçekçi sanal atriyum senaryosuna (biyofilik, malzeme, renk ve kontrol) maruz bırakıldığı deneysel bir uygulama ile gösterilmiştir. Stres indüksiyon protokolünün ardından katılımcılar bu sanal ortamlarla etkileşime geçmiş ve biyometrik veriler gerçek zamanlı olarak kaydedilmiştir.

Bu yöntem, mimari tasarımın kanıta dayalı bir temelde geliştirilmesi açısından, algısal ve duygusal tepkilerin mekânsal özelliklerle hassas şekilde eşleştirilmesini sağlaması bakımından büyük potansiyele sahiptir. Ayrıca, bu yöntemle elde edilen yüksek çözünürlüklü, yapılandırılmış büyük veri setleri; ileri düzey istatistiksel analizler, makine öğrenmesi uygulamaları ve ürün tasarımı, oyun geliştirme ve sinematik sanal deneyim gibi disiplinler arası alanlarda geniş kullanım potansiyeli sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Biyometrik Veri Analizi, Mekân Algısı, Nöromimarlık.*

1. Understanding Embodied Perception and Atmosphere

The complexity of architectural experience extends far beyond the visual domain, despite the historical and contemporary dominance of ocular-centric perspectives. Juhani Pallasmaa, in his seminal work "The Eyes of the Skin" (1996), critiques the increasing reliance on images in defining architecture, arguing that this trend reduces the depth of spatial experience. This concern is even more relevant today, as architectural perception is often mediated through digital screens, small and large, further detaching the built environment from direct sensory engagement. Italo Calvino's (1988) expression, "We live in an unending rainfall of images," from Six Memos for the Next Millennium, resonates deeply in this AI-driven era, where visual representations increasingly shape spatial understanding. However, architecture is not solely a visual phenomenon; it is a multi-sensory experience that engages not only the five Aristotelian senses but also proprioception, the vestibular system, and even temporal perception. While vision remains a dominant sense in architectural discourse, it is merely one component of a broader, interconnected sensory tapestry.

Architectural space is multi-dimensional; it is not a static entity but one that unfolds over time. Much like music, it reveals itself through movement as individuals navigate, approach, and inhabit it. This process engages the entire body, contributing to an embodied perception of space. And the idea of embodied perception highlights the deep connection between the mind, body, and environment, emphasizing that perception is not just a passive process in the brain but an active and dynamic interaction that involves the entire body. It is through this dynamic interaction that architecture transcends mere form and becomes an atmospheric, immersive experience.

The study of architectural experience has predominantly been approached from a philosophical perspective, with limited engagement in scientific inquiry. While the phenomenological concept of embodied perception has provided valuable insights, the discourse has often relied on subjective interpretations, occasionally leading to contradictions or overextensions in an effort to fit specific examples. Rooted in mid-20th-century phenomenology (Bachelard, 2014; Merleau-Ponty et al., 2013), embodied perception has shaped the design philosophies of influential architects such as Peter Zumthor and Steven Holl. However, much of the existing research is informed by qualitative methods, including observational studies, post-occupancy evaluations, and self-reported assessments—approaches that are inherently prone to bias (Eberhard, 2009). This subjectivity has limited the development of an objective, evidence-based understanding of how architectural space influences human perception and emotion.

Despite early calls for a more scientific approach—such as Walter Gropius's advocacy for integrating optical research and Gestalt psychology into architectural design in the 1920s—empirical methodologies have remained largely underutilized. Only in recent years has technological advancement provided new opportunities to bridge this gap. The emergence of user-friendly biometric data collection tools has begun to facilitate a more rigorous, quantitative analysis of architecture's emotional and cognitive impact (Kim and Kim, 2022; Mahamadu et al., 2021). These developments signal a crucial shift toward a more interdisciplinary understanding of architectural experience, one that integrates both philosophical and scientific perspectives to create a more comprehensive framework for studying embodied perception.

2. Neuroarchitecture and Biometric Data

Neuroarchitecture is an interdisciplinary field that integrates principles from neuroscience, psychology, and architecture to explore how the perception of and interaction with the built environment influence human behavior, cognition, and emotional well-being (Higuera-Trujillo et al., 2021; Wang et al., 2022). Even though neuroscientific methodologies have been available for many decades, their cost and the expertise required have acted as barriers to widespread adoption, and only recently, with the emergence of affordable hardware and software solutions, have these methodologies become more accessible (iMotions, 2021; Nukala & Halal, 2010; Paek et al., 2020). The application of neuroscientific methodologies in architecture is still nascent, with very few examples and a lack of an established foundation or framework (Arbib, 2021; Dance, 2017; Higuera-Trujillo et al., 2021). Typically, neuroarchitecture is defined or supported to a large degree by neuroscience studies that often do not directly relate to architecture (Arbib, 2015).

There are two significant issues tied to the practice of neuroarchitecture. The first issue concerns the recording and evaluation of architectural experience. Architectural experience is complex, multidimensional, and multilayered—as

well as embodied, in the sense that as the observer moves through space, it is experienced with the entire body and all senses, including a kinesthetic component (Pektas, 2021). A large portion of research attempts to explain architectural experience based on observations, post-occupancy evaluations, and self-reported assessments of spatial features and dynamics, methods known to introduce subjective bias (Eberhard, 2009; Schwarz & Strack, 1999). Even in architectural practice, the impact of the built environment on user perception, cognition, and emotion has often been interpreted through the architect's own experiences and intuitions (Bower et al., 2019; Eberhard, 2009), with widely known examples including Zumthor's Atmospheres (2006) and Steven Holl's Parallax (2000). The promise of neuroarchitecture lies in its potential to offer methods and tools that enable the objective recording and interpretation of physiological and neurological responses (Nold, 2009; De Paiva, 2018; Winkielman et al., 2001), thereby facilitating a higher degree of empirical rigor (Kim and Kim, 2022).

At the core of neuroarchitecture is biometric feedback, which can be defined as the real-time monitoring of bodily signals to assess how individuals autonomously respond to external conditions or cognitive demands (Mandryk & Nacke, 2016). Biometric data has significant potential to address the first issue outlined above. Bodily responses or signals such as heart rate, electrodermal activity, and skin temperature reflect sympathetic nervous system activity, which is typically involuntary and beyond the user's conscious control (Persiani et al., 2021). Unlike methods such as surveys or interviews, these responses are immediate and objective, thereby enabling the development of a more robust, evidence-based foundation for design (Kim and Kim, 2022). In addition, the variety of biometric feedback is rich, and the granularity of the data can be quite fine, yielding an immense volume of information that can be temporally correlated (Navarro et al., 2021). However, it should be noted that biometric data may pose limitations, as the underlying emotional response may be difficult to pinpoint with certainty. Therefore, cross-validation with subjective measures such as surveys and interviews is recommended to support more nuanced conclusions (Kim and Kim, 2022).

The second issue, conveying the complexity of architectural experience, poses a significant limitation. This pertains to ecological validity, which refers to the degree of correspondence between experimental conditions and real-world contexts, including perceptual cues (Gibson, 2014; Schmuckler, 2001). While some of the more prominent neuroarchitecture studies (Djebbara et al., 2019; Fich et al., 2014; Naghibi Rad et al., 2019; Shemesh et al., 2021; Vartanian et al., 2013) have demonstrated rigorous experimental control, they often suffer from limited ecological validity (Wang et al., 2022). In many cases, the richness of architectural experience is reduced to the viewing of two-dimensional images, which represents a substantial limitation. This issue persists even in highly influential studies such as Ulrich (1991). In such contexts, the absence of stereopsis, parallax effects, and vestibular feedback substantially hinders the sense of presence and immersion (Guler, 2022).

To address these challenges, VR technology enables experiences that are more ecologically valid, simulating real-life spatial interactions or site-based experiences more accurately (Parsons, 2015), while preserving the advantages of laboratory-based control (Gorini et al., 2010; Higuera-Trujillo et al., 2021; Vince, 2011). In this context, visual realism plays a critical role in establishing the ecological validity of VR environments (Huang & Klippel, 2020). That said, the limitations of VR must also be acknowledged. VR remains a simulation, an approximation of reality, and although behavioral responses to simulated environments can closely resemble those in the real world, validation in physical settings may still be necessary (Higuera-Trujillo et al., 2017; 2021). Moreover, VR experiences are known to induce cybersickness, headaches, and fatigue (Keshavarz, 2018; Thach et al., 2020; Weech et al., 2019).

3. Eye Tracking and Its Relevance

Eye tracking is a sophisticated methodological tool that captures and quantifies ocular behavior to infer patterns of user attention, engagement, and perceptual processing (Duchowski, 2017; Higuera-Trujillo et al., 2021; Holmqvist et al, 2011; Shi et al., 2020). By monitoring the movement patterns and physiological responses of the eyes, insight can be gained pertaining to where, how long, and in what sequence visual attention is directed. Eye tracking has been a focus of interest, especially for reading research since late 19th century, with some early examples featuring lenses mechanically connected to a kymograph, a type of two-dimensional plotter, dating back to the beginnings of 20th century (Cognolato et al., 2018; Eggert, 2007). Today's state-of-the-art eye-tracking systems employ embedded infrared cameras to record eye behavior, broken down into a range of parameters including pupil size, pupil position, gaze direction, saccadic movement, dilation, and blinking behavior, often in real time and with high precision, with

relatively minimal cost and expertise barriers (Holmqvist et al, 2011; Lu & Pesarakli, 2022; Shadiev & Li, 2023). These metrics provide a rich dataset for interpreting user interactions with visual stimuli.

Extensive research has demonstrated the utility of eye tracking across multiple domains, particularly in the investigation of visual perception, cognitive processing, attentional allocation, and emotional responses (Berto et al., 2008; Guo et al., 2019; Monty & Senders, 2017). Its ability to unobtrusively reveal both conscious and unconscious visual behaviors makes it a valuable asset in psychological, neurological, as well as architectural research. There are several architectural studies noted to have applied eye tracking, in various forms either physical or simulated (Higuera-Trujillo et al., 2021; Kim and Kim, 2022; Lu and Pesarakli, 2022), though the number is severely limited.

Eye tracking data, specifically gaze behavior data, can be organized around two important metrics, fixation and saccades, and these two metrics are at the core of the majority of eye-tracking studies. In eye-tracking research, a fixation refers to a brief period during which the eyes remain relatively still and focused on a particular point, typically lasting between 100 and 200 milliseconds and confined within a spatial dispersion of approximately two degrees of visual angle (Jacob & Karn, 2003; Rayner, 1978). Rather than occurring arbitrarily, fixations are directed toward elements of a visual scene that are perceptually salient or semantically significant, reflecting the viewer's selective attention to critical regions of the visual field (Dupont et al., 2016; García et al., 2006). This metric is foundational in eye-tracking analyses, including those concerned with user interaction in architectural spaces, where understanding gaze behavior can yield insights into spatial perception and environmental cognition (Holmqvist et al., 2011). Fixation duration is often examined in relation to a predefined Area of Interest (AOI) or Object of Interest (OOI), which denotes either a visually prominent zone or a conceptually meaningful entity within the stimulus. Prolonged fixations within these areas are generally interpreted as indicators of heightened attentional engagement (Soler-Dominquez et al., 2017; Leder et al., 2016) or increased cognitive processing demands (Holmqvist et al., 2011).

Saccades constitute a fundamental metric in eye-tracking studies and refer to the rapid, ballistic movements of the eyes that occur between successive fixations (Lai et al., 2013). Unlike smooth pursuit movements, which are characterized by slow, continuous tracking of a moving target under intentional attentional focus, saccades are quick shifts that enable the visual system to redirect gaze toward new stimuli. Saccades are not merely mechanical transitions but can serve as indicators of underlying cognitive and emotional states. For instance, variations in saccade duration have been associated with shifts in attentional load (Wang et al., 2020), while increased velocity may reflect heightened arousal or perceived risk, and slower saccades have been linked to fatigue or cognitive depletion (Sharma et al., 2016; Zagermann et al., 2016). Additionally, frequent or persistent saccadic activity, particularly when not followed by meaningful fixations, may suggest uncertainty or confusion, signaling ongoing visual search behavior without clear resolution (Soler-Dominguez et al., 2017).

It should be noted that pupil dilation, blinking patterns, and even vengeance can be utilized as data to support findings in addition to gaze behavior (Eckstein et al., 2017), though the number of existing studies and reliability of the methodology are limited.

Even though an important source of data and insight, eye-tracking has two important limitations. Similar to other types of biometric data, while eye-tracking is a practical and reliable method for gathering objective data on users' gaze behaviors, depending on the context, the same gaze behavior can be interpreted in different ways (Lu & Pesarakli, 2022). For example, prolonged gaze may indicate interest (high arousal, positive valence) or confusion (high arousal, negative valence), depending on context—aligning with Russell's (1980) circumplex model of affect, which maps emotions across arousal and valence dimensions. Therefore, biometric data needs to be complemented with additional sources, such as follow-up questionnaires or interviews, to gain insight into the specific brain activities of the user, particularly in relation to attention, cognition, and emotion (Elsadek et al., 2017; Tuszyńska-Bogucka et al., 2020). The second limitation is that eye-tracking typically requires careful and time-consuming calibration processes, especially for users who are elderly or have undergone ocular procedures (Lu & Pesarakli, 2022). This might cause user disengagement, or in the case of VR, the introduction of cybersickness. However, this calibration is essential to prevent inaccuracies between captured and actual gaze points (Shi et al., 2020).

4. The Proposed System

As previously explored, neuroarchitecture research faces two important barriers: one being the collection and analysis of objective and robust quantitative data, and the second being a satisfactory level of ecological validity. In this research, a methodology for spatially and temporally organizing multi-channel biometric data in relation to gaze behavior is presented. To address these two problems, the proposed methodology employs VR technology to create an immersive architectural experience that aligns with a user's real-life experience of architectural space, while also enabling the collection of biometric data, specifically gaze data, in a 3D space. The goal is to understand gaze behavior within a 3D context that reflects real-world architectural experience, providing innovative means to address research questions more accurately (Clay et al., 2019; Winklbauer, 2022), with potentially higher levels of engagement (Shi et al., 2020). As previously mentioned, the number of studies that employ VR and eye-tracking is very limited, and in these studies, a three-dimensional distribution of gaze data is rarely utilized.

The collection of gaze data in 3D space is challenging. A significant downside of commonly utilized eye-tracking methods is their focus on collecting, organizing, visualizing, and analyzing data on a two-dimensional plane. However, when the experience of the three-dimensional world is considered, the number of possibilities regarding what the observer might be looking at, from where, at what angle, through what, and in what order, considerably complicate the situation. To enable the collection of gaze data in 3D space, bespoke software was developed in Unreal Engine (Patent pending #63/518,198).

In essence, the software enables tracing a ray from each of the user's eyes to the virtual environment being observed in VR. The incidences of this ray on virtual surfaces and elements are recorded with a timestamp. The environment is organized into three-dimensional data blocks, with eye-tracking as well as other biometric data linked to each block via a timestamp. This enables rapid association, comparison, visualization, and interpretation of the data, for example, through robust three-dimensional heatmaps.

5. The Experiment and Findings

To demonstrate the proposed methodology and to evaluate its potential and limitations, an experiment was devised. Grounded in well-established literature on the psychological impact of biophilic design, the experiment involved a comparative assessment of individuals experiencing an architectural space incorporating various biophilic design interventions.

Biophilia can be defined as the inherent affinity between humans and nature, rooted in evolutionary exposure (Iltis, 1973; Kellert & Wilson, 1995). This stems from the hypothesis that the human brain evolved in a biocentric world, where diverse natural landscapes and species signaled a greater likelihood of food, safety, and security—conditions essential to human survival. Strong empirical evidence indicates that exposure to natural environments fosters emotional restoration, with reductions in tension, anxiety, anger, fatigue, and confusion, and overall improvements in mood (Kalantari et al., 2022; Kim and Kim, 2022; Yao et al., 2021; Yin et al., 2020; Zare et al., 2021). Moreover, there is a strong theoretical foundation and a well-established body of literature supporting the role of biophilic environments in attention restoration (Kaplan, 1995), stress reduction (Ulrich et al., 1991), place attachment (Cole et al., 2021), and prospect-refuge dynamics (Appleton, 1984). It is no coincidence that prominent rating systems and building standards—such as LEED, WELL, and the Living Building Challenge—acknowledge and emphasize the positive impact of biophilic elements within the built environment. Even though research on biophilic design is robust, studies exploring its physiological impacts in interior environments remain limited (Yin et al., 2020). This gap becomes even more pronounced when considering the severe lack of research integrating eye-tracking technology, a shortcoming that this study aims to address.

In alignment with this objective, a photorealistic virtual model of an office building atrium was developed as the experimental environment (**Figure 1**). The atrium spans 200 m² with a 10-meter ceiling height, featuring an entrance on the south side and a front desk on the north. Users could observe two available circulation paths flanking the front desk, as well as a mezzanine level. Additionally, an exterior urban street scene was visible through the entrance. Aside from the baseline condition (BSL), participants' biometric responses were recorded across three additional spatial variations: biophilic (BPH), green color (GRC), and natural material (MAT) interventions (**Figure 1**).

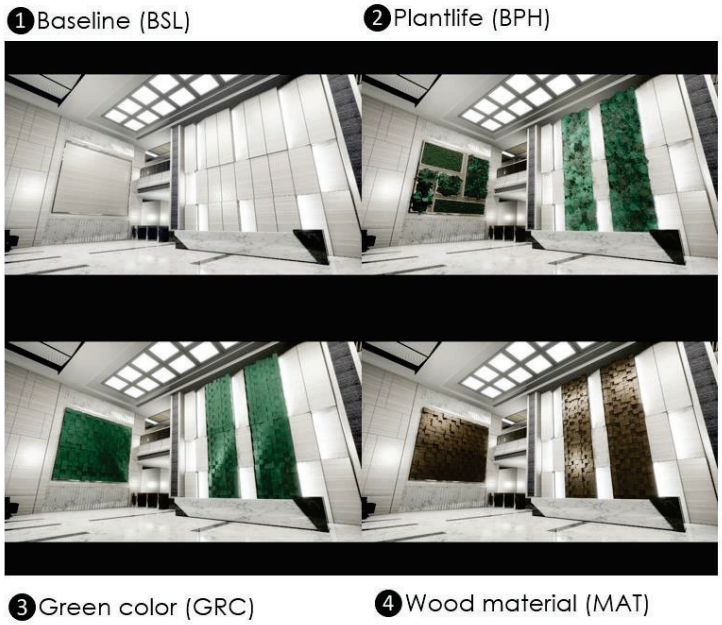


Figure 1: The four spatial interventions

Convenience sampling was employed to create a pool of Interior Architecture, Industrial Design, Architecture, and Landscape Architecture students (n = 80, with 20 participants assigned to each condition), due to their intrinsic interest in spatial characteristics. While the participants experienced the experimental space, their gaze data were collected, and to complement this, their heart rate (HR), galvanic skin response (GSR), and skin temperature (ST) were also recorded. HTC Vive Pro Eye and ProComp Infinity systems were used for data collection. Participants were free to walk and look around within a 5 meter × 3 meter area (**Figure 2**).

Figure 2: A participant with the VR headset and biometric sensors attached

As previously discussed, biometric data can be difficult to interpret with precision. To address this, a questionnaire featuring semantic differential index was utilized to support the eye-tracking data (Kim and Kim, 2022; Lu and Pesarakli, 2022; Tuszyńska-Bogucka et al., 2020). After the VR experience, participants completed the short questionnaire. Each session lasted approximately 10 minutes. After sensors were attached and the VR headset was worn, participants followed the sequence below:

- (0:00) Participant viewed a dark screen with the text “Relax…” for 3 minutes.
- (3:00) Participant was asked to prepare for mental math questions.
- (3:10 to 4:00) Participant was asked 4 mental math questions.
- (4:00 to 10:00) Participant experienced one of the four environments for 6 minutes.
- At the conclusion of the session, participants completed a brief questionnaire.

Mental math tasks are widely used in research as a reliable stress inducer (Sloan et al., 1991; Yoon et al., 2009). The intent here was to elevate participants' stress levels after a brief relaxation phase, enabling assessment of how effectively each intervention facilitated stress reduction.

Physiological data were recorded at 2048 samples per second and averaged into 30-second segments for comparability. Data were normalized (range: 0.0 to 1.0) to ensure consistency, and erroneous entries were removed (marked as NaN—Not a Number), without affecting the analysis. Python and its associated libraries were used for data cleaning, organization, and analysis.

Total gaze duration was translated into a 3D heat map (**Figure 3**), with bright red indicating longer gaze durations. After data organization and visualization, the distribution of gaze data was produced (**Figure 3**). The large volume of data collected during the experiment enabled a comprehensive evaluation of the proposed methodology. This methodology yielded several critical insights.

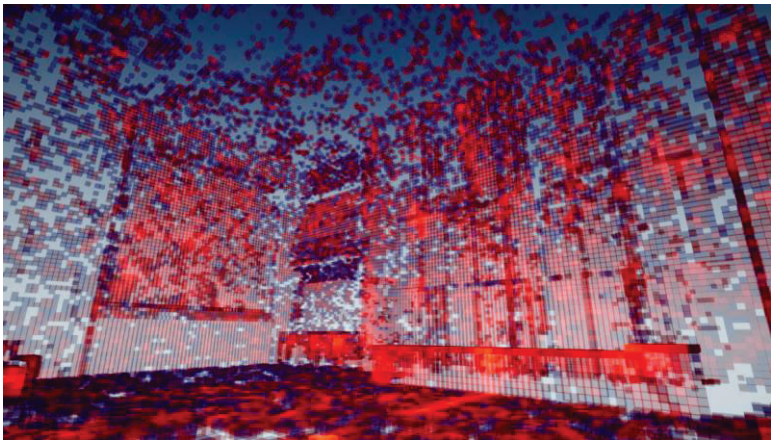


Figure 3: 3D heat map depicting composite gaze fixation time

Fixation time and saccade time (time spent during each state) indicated that in all states participants' stress levels decreased over time (**Figures 4 and 5**). However, according to the data, there was no significant difference between any of the spatial interventions or the baseline condition.

As seen in **Figure 6**, galvanic skin response over time shows that green color intervention and plantlife intervention lead to lowered levels of stress, especially after the 8 minutes' mark. This aligns with the previously discussed hypothesis that biophilic interventions facilitate stress reduction.

Accordingly, when the survey responses of the participants were examined, pertaining to overall pleasantness of the experience, calmness of the participants, and sense of control in accordance with the circumplex model of affect (Russell, 1980), biophilic and color intervention environments were found to be more pleasant by the participants (**Table 1**). Participants expressed less control in the baseline environment and material intervention.

Table 1: Participant post-experiment survey responses

	Baseline	Biophilic	Color	Material
Pleasantness	4.35	4.9	5	4.6
Calmness	4	4.55	4.7	4.6
Control	3.65	4.15	4.4	3.75

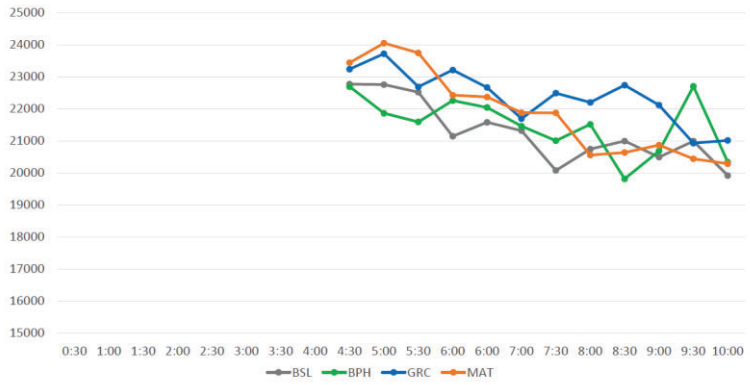


Figure 4: Aggregate saccade time distributed over time

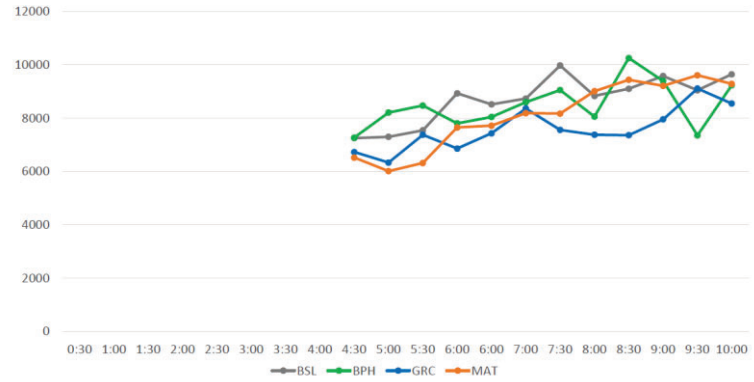


Figure 5: Aggregate fixation time distributed over time

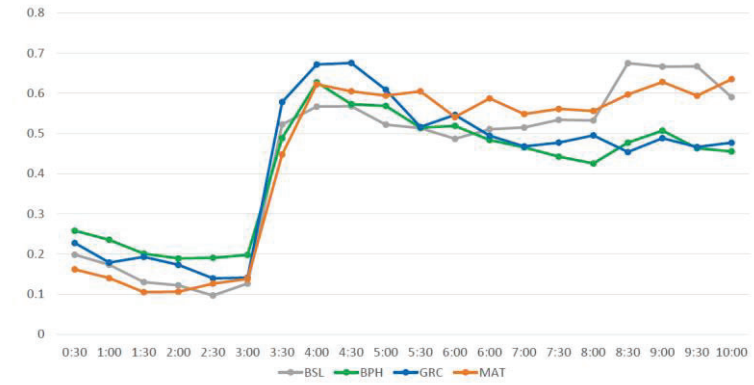


Figure 6: Aggregate galvanic skin response (GSR) distributed over time

However, it was important to see if the participant was exposed to the areas of interest where the design variations were implemented. As seen in **Figure 7**, it was found that the participants gazed upon the areas of interest roughly equally in all three interventions with no statistically significant difference. This indicated that the stress reduction effects were not biased by gaze exposure to spatial interventions.

As demonstrated by both biometric data and subjective responses, the proposed methodology enabled the discovery that significant stress reduction can be achieved through plant-life or green color interventions. Importantly, it also confirmed that these outcomes were not confounded by unequal gaze exposure or by specific design elements drawing more visual attention.

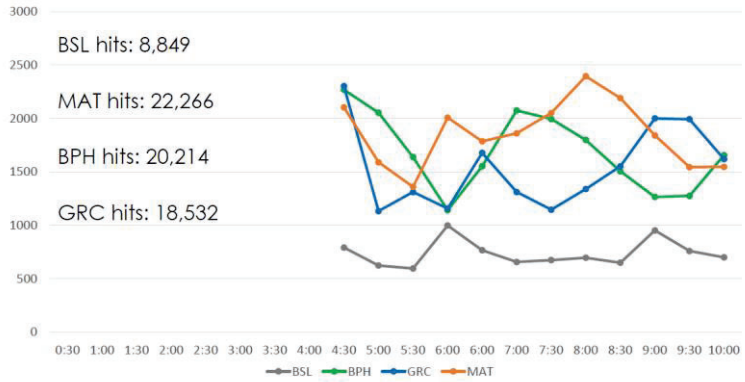


Figure 7: Aggregated gaze time on the area of interest

6. Conclusions

Given the complexity of architectural space perception, the ability to accurately associate biometric data with any point in three-dimensional space and time is immensely valuable and could potentially define a pivotal shift in neuroarchitecture research. By allowing for the mapping of biometric data from multiple sources throughout a three-dimensional space (**Figure 8**), the proposed methodology and associated software technology enable the following potential uses:

- Providing a flexible framework for the in-depth study of design at multiple scales (e.g., urban exteriors, interiors, furniture, automotive, packaging, etc.), for collecting vast amounts of quantitative data, and for statistical analysis and model fitting.
- Disparate sets of biometric data from multiple sources (such as gaze duration from a headset, galvanic skin response from a biofeedback monitor, etc.) can be associated, aligned, offset, and cross-analyzed.
- Three-dimensional and dynamic visualization capabilities create opportunities for rapid informal/descriptive analysis and more engaging design team, consultant, or client meetings.
- The original data is not truncated; all nuances, including users' precise locations at specific times and their corresponding gaze directions, are recorded and retained.

It should also be noted that both VR and biometric monitoring technologies are rapidly improving. VR headsets are becoming slimmer and lighter, and biometric monitors are increasingly embedded in smartwatches—indicating that the presented methodology will only become more relevant.

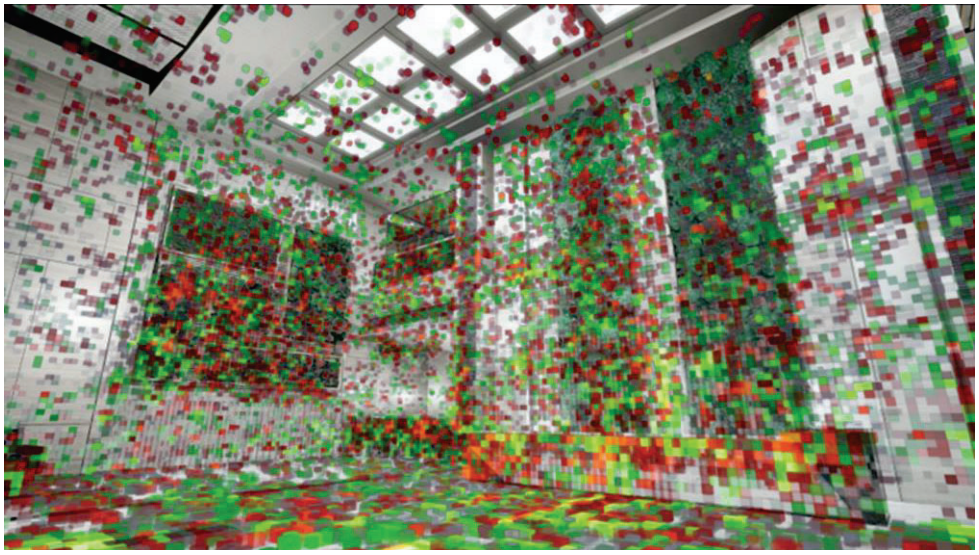


Figure 8: Sample composite galvanic skin response data

REFERENCES

Appleton, J. (1984). Prospects and refuges re-visited. *Landscape Journal, 3*(2), 91-103.

Arbib, M. A. (2015). Toward a neuroscience of the design process. In S. Robinson & J. Pallasmaa (Eds.), *Mind in architecture* (pp. 75–98). MIT Press.

Arbib, M. A. (2021). *When brains meet buildings*. Oxford University Press.

Bachelard, G. (2014). *The poetics of space* (M. Jolas, Trans.). Penguin Books. (Original work published 1958)

Bardeen, J. R., & Daniel, T. A. (2017). An eye-tracking examination of emotion regulation, attentional bias, and pupillary response to threat stimuli. *Cognitive Therapy and Research, 41*, 853–866. https://doi.org/10.1007/s10608-017-9860-y

Berto, R., Massaccesi, S., & Pasini, M. (2008). Do eye movements measured across high and low fascination photographs differ? Addressing Kaplan's fascination hypothesis. *Journal of Environmental Psychology, 28*(2), 185–191. https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2007.11.004

Bower, I., Tucker, R., & Enticott, P. G. (2019). Impact of built environment design on emotion measured via neurophysiological correlates and subjective indicators: A systematic review. *Journal of Environmental Psychology, 66*, 101344. https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2019.101344

Calvino, I. (1988). *Six memos for the next millennium* (P. Creagh, Trans.). Harvard University Press. (Original work published 1985)

Clay, V., König, P., & Koenig, S. (2019). Eye tracking in virtual reality. *Journal of Eye Movement Research, 12*(1), 10. https://doi.org/10.16910/jemr.12.1.3

Cognolato, M., Atzori, M., & Müller, H. (2018). Head-mounted eye gaze tracking devices: An overview of modern devices and recent advances. *Journal of Rehabilitation and Assistive Technologies Engineering, 5*, 2055668318773991. https://doi.org/10.1177/2055668318773991

Cole, L. B., Coleman, S., & Scannell, L. (2021). Place attachment in green buildings: Making the connections. *Journal of Environmental Psychology, 74*, 101558. https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2021.101558

Dance, A. (2017). The brain within buildings. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 114*(5), 785–787. https://doi.org/10.1073/pnas.1620658114

De Paiva, A. (2018). Neuroscience for architecture: How building design can influence behaviors and performance. *Journal of Civil Engineering and Architecture, 12*(2), 132–138. https://doi.org/ 10.17265/1934-7359/2018.02.007

Djebbara, Z., Fich, L. B., Petrini, L., & Gramann, K. (2019). Sensorimotor brain dynamics reflect architectural affordances. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 116*(29), 14769–14778. https://doi.org/10.1073/pnas.1900648116

Duchowski, A. T. (2017). *Eye tracking methodology: Theory and practice* (2nd ed.). Springer.

Dupont, L., Ooms, K., Antrop, M., & Van Eetvelde, V. (2016). Comparing saliency maps and eye-tracking focus maps: The potential use in visual impact assessment based on landscape photographs. *Landscape and Urban Planning, 148*, 17–26. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.12.007

Eberhard, J. P. (2009). *Brain landscape: The coexistence of neuroscience and architecture*. Oxford University Press.

Eckstein, M. K., Guerra-Carrillo, B., Singley, A. T. M., & Bunge, S. A. (2017). Beyond eye gaze: What else can eyetracking reveal about cognition and cognitive development?. Developmental cognitive neuroscience, 25, 69-91.

Eggert, T. (2007). Eye movement recordings: Methods. *Developments in Ophthalmology, 40*, 15–34. https://doi.org/10.1159/000100346

Elsadek, M., Sun, M., & Fujii, E. (2017). Psycho-physiological responses to plant variegation as measured through eye movement, self-reported emotion and cerebral activity. *Indoor and Built Environment, 26*(6), 758–770. https://doi.org/10.1177/1420326X1663871

Fich, L. B., Jönsson, P., Kirkegaard, P. H., Wallergård, M., Garde, A. H., & Hansen, Å. (2014). Can architectural design alter the physiological reaction to psychosocial stress? A virtual TSST experiment. *Physiology & Behavior, 135*, 91–97. https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2014.05.034

García, L., Hernández, J., & Ayuga, F. (2006). Analysis of the materials and exterior texture of agro-industrial buildings: A photo-analytical approach to landscape integration. *Landscape and Urban Planning, 74*(2), 110–124. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2004.10.007

Gibson, J. J. (2014). *The ecological approach to visual perception: Classic edition*. Psychology Press.

Gorini, A., Pallavicini, F., Algeri, D., Repetto, C., Gaggioli, A., & Riva, G. (2010). Virtual reality in the treatment of generalized anxiety disorders. *Annual Review of Cybertherapy and Telemedicine, 154*, 39–43. https://doi.org/10.3233/978-1-60750-561-7-39

Guler, K. (2022). Sensing the atmospheric space through a virtual lens: Scrutinizing opportunities and limitations. In B. Condia & E. Canepa (Eds.), *Generators of architectural atmosphere* (pp. 57–94). New Prairie Press.

Guo, J. J., Zhou, R., Zhao, L. M., & Lu, B. L. (2019, July). Multimodal emotion recognition from eye image, eye movement and EEG using deep neural networks. In *2019 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)* (pp. 3071–3074). IEEE. https://doi.org/10.1109/EMBC.2019.8856563

Higuera-Trujillo, J. L., Maldonado, J. L. T., & Millán, C. L. (2017). Psychological and physiological human responses to simulated and real environments: A comparison between photographs, 360 panoramas, and virtual reality. *Applied Ergonomics, 65*, 398–409. https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.05.006

Higuera-Trujillo, J. L., Llinares, C., & Macagno, E. (2021). The cognitive–emotional design and study of architectural space: A scoping review of neuroarchitecture and its precursor approaches. *Sensors, 21*(6), 2193. https://doi.org/10.3390/s21062193

Holl, S. (2000). *Parallax*. Princeton Architectural Press.

Holmqvist, K., Nyström, M., Andersson, R., Dewhurst, R., Jarodzka, H., & Van de Weijer, J. (2011). *Eye tracking: A comprehensive guide to methods and measures*. Oxford University Press.

Huang, J., & Klippel, A. (2020, November). The effects of visual realism on spatial memory and exploration patterns in virtual reality. In *Proceedings of the 26th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology* (pp. 1–11). Association for Computing Machinery. https://doi.org/10.1145/3385956.3418945

Iltis, H. H. (1973). Down the technological fix. *Landscape Architecture, 63*(4), 361–363.

iMotions. (2021). *What are emotions, and how do we measure them – iMotions webinar* [Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=-mx3O_JBuwk

Jacob, R. J. K., & Karn, K. S. (2003). Eye tracking in human-computer interaction and usability research: Ready to deliver the promises. In J. Hyönä, R. Radach, & H. Deubel (Eds.), *The mind's eye: Cognitive and applied aspects of eye movement research* (pp. 573–605). North-Holland. https://doi.org/10.1016/B978-044451020-4/50031-1

Kalantari, S., Xu, T. B., Mostafavi, A., Lee, A., Barankevich, R., Boot, W. R., & Czaja, S. J. (2022). Using a nature-based virtual reality environment for improving mood states and cognitive engagement in older adults: A mixed-method feasibility study. *Innovation in Aging, 6*(3), igac015. https://doi.org/10.1093/geroni/igac015

Kaplan, S. (1995). The restorative benefits of nature: Toward an integrative framework. *Journal of Environmental Psychology, 15*(3), 169–182. https://doi.org/10.1016/0272-4944(95)90001-2

Kellert, S. R., & Wilson, E. O. (Eds.). (1995). *The biophilia hypothesis*. Island Press.

Keshavarz, B., Ramkhalawansingh, R., Haycock, B., Shahab, S., & Campos, J. L. (2018). Comparing simulator sickness in younger and older adults during simulated driving under different multisensory conditions. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 54*, 47–62. https://doi.org/10.1016/j.trf.2018.01.007

Kim, J., & Kim, N. (2022). Quantifying emotions in architectural environments using biometrics. *Applied Sciences, 12*(19), 9998. https://doi.org/10.3390/app12199998

Lai, M. L., Tsai, M. J., Yang, F. Y., Hsu, C. Y., Liu, T. C., Lee, S. W. Y., ... & Tsai, C. C. (2013). A review of using eye-tracking technology in exploring learning from 2000 to 2012. *Educational research review*, *10*, 90-115. https://doi.org/10.1016/j.edurev.2013.10.001

Lu, Z., & Pesarakli, H. (2023). Seeing is believing: Using eye-tracking devices in environmental research. *HERD: Health Environments Research & Design Journal, 16*(1), 15–52. https://doi.org/10.1177/19375867221130806

Leder, H., Mitrovic, A., & Goller, J. (2016). How beauty determines gaze! Facial attractiveness and gaze duration in images of real-world scenes. *i-Perception, 7*(4), 2041669516664355. https://doi.org/10.1177/2041669516664355

Mahamadu, A. M., Prabhakaran, A., Clark, K., Dziekonski, K., Okeke, U., Zhang, W., Matthews, P. & Aigbavboa, C. O. (2021). The application of eye-tracking technology in architecture, engineering, and construction industry: A systematic review. In *Industry 4.0 applications for full lifecycle integration of buildings* (pp. 56–76). Springer.

Mandryk, R. L., & Nacke, L. E. (2016). Biometrics in gaming and entertainment technologies. In S. Mitra & M. Gofman (Eds.), *Biometrics in a data driven world* (pp. 191–224). CRC Press.

Merleau-Ponty, M., Landes, D., Carman, T., & Lefort, C. (2013). *Phenomenology of perception* (D. A. Landes, Trans.). Routledge. (Original work published 1945)

Monty, R. A., & Senders, J. W. (2017). *Eye movements and psychological processes*. Routledge. (Original work published 1976)

Naghibi Rad, P., Shahroudi, A. A., Shabani, H., Ajami, S., & Lashgari, R. (2019). Encoding pleasant and unpleasant expression of the architectural window shapes: An ERP study. *Frontiers in Behavioral Neuroscience, 13*, 186. https://doi.org/10.3389/fnbeh.2019.00186

Navarro, D., Sundstedt, V., & Garro, V. (2021). Biofeedback methods in entertainment video games: A review of physiological interaction techniques. *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction, 5*(CHI PLAY), 1–32. https://doi.org/10.1145/3474695

Nold, C. (Ed.). (2009). *Emotional cartography: Technologies of the self*. https://www.emotionalcartography.net/

Nukala, V. N., & Halal, W. E. (2010). Emerging neurotechnologies: Trends, relevance and prospects. *Synesis: A Journal of Science, Technology, Ethics & Policy, 1*(1), T4–T12.

Paek, A. Y., Brantley, J. A., Evans, B. J., & Contreras-Vidal, J. L. (2020). Concerns in the blurred divisions between medical and consumer neurotechnology. *IEEE Systems Journal, 15*(2), 3069–3080. https://doi.org/10.1109/jsyst.2020.3032609

Pallasmaa, J. (2024). *The eyes of the skin: Architecture and the senses* (3rd ed.). John Wiley & Sons.

Partala, T., Jokiniemi, M., & Surakka, V. (2000, November). Pupillary responses to emotionally provocative stimuli. In *Proceedings of the 2000 Symposium on Eye Tracking Research & Applications* (pp. 123–129). Association for Computing Machinery. https://doi.org/10.1145/355017.355042

Parsons, T. D. (2015). Virtual reality for enhanced ecological validity and experimental control in the clinical, affective and social neurosciences. *Frontiers in Human Neuroscience, 9*, 660. https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00660

Pektas, Ş. T. (2021). A scientometric analysis and review of spatial cognition studies within the framework of neuroscience and architecture. *Architectural Science Review, 64*(1), 1–9. https://doi.org/10.1080/00038628.2021.1910480

Persiani, S. G., Kobas, B., Koth, S. C., & Auer, T. (2021). Biometric data as real-time measure of physiological reactions to environmental stimuli in the built environment. *Energies, 14*(1), 232. https://doi.org/10.3390/en14010232

Rayner, K. (1978). Eye movements in reading and information processing. *Psychological Bulletin, 85*(3), 618–660. https://doi.org/10.1037/0033-2909.85.3.618

Russell, J. A. (1980). A circumplex model of affect. *Journal of Personality and Social Psychology, 39*(6), 1161–1178. https://doi.org/10.1037/h0077714

Schmuckler, M. A. (2001). What is ecological validity? A dimensional analysis. *Infancy, 2*(4), 419–436. https://doi.org/10.1207/S15327078IN0204_02

Schwarz, N., & Strack, F. (1999). Reports of subjective well-being: Judgmental processes and their methodological implications. In D. Kahneman, E. Diener, & N. Schwarz (Eds.), *Well-being: The foundations of hedonic psychology* (pp. 61–84). Russell Sage Foundation.

Shadiev, R., & Li, D. (2023). A review study on eye-tracking technology usage in immersive virtual reality learning environments. *Computers & Education, 196*, 104681. https://doi.org/10.1016/j.compedu.2022.104681

Sharma, C., Bhavsar, P., Srinivasan, B., & Srinivasan, R. (2016). Eye gaze movement studies of control room operators: A novel approach to improve process safety. *Computers & Chemical Engineering, 85*, 43–57. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2015.09.012

Shemesh, A., Leisman, G., Bar, M., & Grobman, Y. J. (2021). A neurocognitive study of the emotional impact of geometrical criteria of architectural space. *Architectural Science Review, 64*(5), 394–407. https://doi.org/10.1080/00038628.2021.1940827

Shi, Y., Du, J., & Ragan, E. (2020). Visual attention and spatial memory in building inspection: Toward a cognition-driven information system. *Advanced Engineering Informatics, 44*, 101061. https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101061

Sloan, R. P., Korten, J. B., & Myers, M. M. (1991). Components of heart rate reactivity during mental arithmetic with and without speaking. *Physiology & Behavior, 50*(5), 1039–1045. https://doi.org/10.1016/0031-9384(91)90434-P

Soler-Dominguez, J. L., Camba, J. D., Contero, M., & Alcañiz, M. (2017). A proposal for the selection of eye-tracking metrics for the implementation of adaptive gameplay in virtual reality-based games. In *Virtual, Augmented and Mixed Reality: VAMR 2017, HCI International 2017 Proceedings, Part I* (pp. 369–380). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-57987-0_30

Thach, K. S., Lederman, R., & Waycott, J. (2020). How older adults respond to the use of Virtual Reality for enrichment: A systematic review. In *Proceedings of the 32nd Australian Conference on Human–Computer Interaction* (pp. 303–313). ACM. https://doi.org/10.1145/3441000.3441003

Tuszyńska-Bogucka, W., Kwiatkowski, B., Chmielewska, M., Dzieńkowski, M., Kocki, W., Pełka, J., ... & Galkowski, D. (2020). The effects of interior design on wellness – Eye tracking analysis in determining emotional experience of architectural space. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine, 27*(1), 113–122. https://doi.org/10.26444/aaem/112372

Ulrich, R. S., Simons, R. F., Losito, B. D., Fiorito, E., Miles, M. A., & Zelson, M. (1991). Stress recovery during exposure to natural and urban environments. *Journal of Environmental Psychology, 11*(3), 201–230. https://doi.org/10.26444/aaem/106233

Vartanian, O., Navarrete, G., Chatterjee, A., Fich, L. B., Leder, H., Modroño, C., Nadal, M., Rostrup, N. & Skov, M. (2013). Impact of contour on aesthetic judgments and approach-avoidance decisions in architecture. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 110*(Suppl. 2), 10446–10453. https://doi.org/10.1073/pnas.1301227110

Vince, J. (2011). *Introduction to virtual reality*. Springer.

Wang, S., Sanches de Oliveira, G., Djebbara, Z., & Gramann, K. (2022). The embodiment of architectural experience: A methodological perspective on neuro-architecture. *Frontiers in Human Neuroscience, 16*, 833528. https://doi.org/10.3389/fnhum.2022.833528

Weech, S., Kenny, S., & Barnett-Cowan, M. (2019). Presence and cybersickness in virtual reality are negatively related: A review. *Frontiers in Psychology, 10*, 158. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.00158

Winkielman, P., Berntson, G. G., & Cacioppo, J. T. (2001). The psychophysiological perspective on the social mind. In A. Tesser & N. Schwarz (Eds.), *Blackwell handbook of social psychology: Intraindividual processes* (pp. 89–108). Blackwell Publishers.

Winklbauer, A. (2022). *Affect in virtual reality games: An eye-tracking study* [Bachelor's thesis, University not specified].

Yao, W., Zhang, X., & Gong, Q. (2021). The effect of exposure to the natural environment on stress reduction: A meta-analysis. *Urban Forestry & Urban Greening, 57*, 126932. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126932

Yin, J., Yuan, J., Arfaei, N., Catalano, P. J., Allen, J. G., & Spengler, J. D. (2020). Effects of biophilic indoor environment on stress and anxiety recovery: A between-subjects experiment in virtual reality. *Environment International, 136*, 105427. https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105427

Yoon, T., Keller, M. L., De-Lap, B. S., Harkins, A., Lepers, R., & Hunter, S. K. (2009). Sex differences in response to cognitive stress during a fatiguing contraction. *Journal of Applied Physiology, 107*(2), 450–459. https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00238.2009

Zagermann, J., Pfeil, U., & Reiterer, H. (2016, October). Measuring cognitive load using eye tracking technology in visual computing. In *Proceedings of the Sixth Workshop on Beyond Time and Errors on Novel Evaluation Methods for Visualization* (pp. 78–85). ACM. https://doi.org/10.1145/2993901.2993908

Zare, G., Faizi, M., Baharvand, M., & Masnavi, M. (2021). A review of biophilic design conception implementation in architecture. *Journal of Design and Built Environment, 21*(3), 16–36. https://doi.org/10.22452/jdbe.vol21no3.2

Zumthor, P. (2006). *Atmospheres: Architectural environments. Surrounding objects*. Birkhäuser.

2025 MSTAS MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Mimari Tasarım Stüdyo Eğitiminde Sanal Gerçeklik Teknolojileri ile Siber-Tektonik Mekân Deneyimi

Büşra Cantürk[1]; Levent Arıdağ[2]
[1,2]Gebze Teknik Üniversitesi
[1]busracanturk@gtu.edu.tr; [2]leventaridag@gtu.edu.tr

Özet

Teknolojinin gelişimi, diğer bilim ve sanatların olanaklarını geliştirdiği gibi mimarlık ortamının da olanaklarını arttırmıştır. Özellikle bilgisayarların gelişimi ile mimarlık ve buna bağlı olarak eğitim ortamı da yeni bir boyut kazanmıştır. Başlarda sayısal ortam sadece araç olarak kullanılmış, ancak sayısal ortama iletişim araçları olarak siber öğelerin eklenmesiyle bu ortam bir deneyim alanı olarak dönüşüme uğramıştır. Deneyim, siber iletişim araçları olan Gerçeklik Teknolojileri (Arttırılmış Gerçeklik, Sanal Gerçeklik, Karma Gerçeklik) ile gerçekleşmekte olup, herkes tarafından üretilmekte, paylaşılmakta ve dönüştürülmektedir. Bilgi üretimi için rasyonel bir araç olan sibernetik bilimi, sadece üretim dilini değiştirmekle kalmayıp, 2. bir zihin olarak veriler arası ilişkileri gösteren bir ortamın oluşmasını da sağlamaktadır. Verilerin etkileşimleri neticesinde ortaya çıkan ilişki yapıları ile deneyimleyen kişi bu siber arayüzde hareket ettikçe, sistem yapısında yer alan diğer bilgi katmanları ile çarpışmakta ve bu çarpışmalar her seferinde yeni deneyimlerin yaşanmasına imkân tanımaktadır. Sistemin bu yapısı ile beden ve/veya bedenlerin hareketlerinin eş zamanlı olarak kodlandığı bir deneyim ve etkileşim arayüzden bahsedilmektedir. Mekânın bu şekilde yeniden kodlanıyor ve deneyim potansiyellerini barındırıyor olması, bu araştırmanın temel başlangıcını oluşturmaktadır.

Çalışma alanı olarak, mimarlık eğitiminde tasarlama pratiği seçilmiştir. Bu bağlamda Gebze Teknik Üniversitesi 2024-25 Güz Dönemi MIM421 mimari tasarım stüdyosu programının erken ve orta tasarım evresi olan ilk 7 haftalık sürecine, bedenin sanal gerçeklik mekânında siber eklentiler ile karşılıklı etkileşime girebilmesine imkân sağlayan gerçeklik teknolojilerinden- sanal gerçeklik (SG) gözlükleri dâhil edilmiştir. Çünkü arttırılmış gerçeklik (AG) teknolojilerinde, siber eklentiler ile fiziksel mekân üst üste çakıştırılmakta böylelikle deneyim kısmi olarak yapılabilmektedir. Karma gerçeklik (KG) teknolojilerinde ise, beden, siber eklentiler ve fiziksel mekân verileri ile etkileşime girebilmektedir. SG arayüzünde ise beden, yaratılan benzetim ortamının içerisine dâhil olarak sarmalanmaktadır. Böylelikle, öğrencinin yarattığı tasarımı, fiziksel mekân olmadan da SG arayüzüne taşıyarak deneyimleyebilmesinin yolu açılmıştır. Bu kapsamda, bu çalışma, SG gözlükleri ile öğrencilerin 'beden-mekân' diyaloğunda projeleri kapsamında kurdukları ilişkileri ele almaktadır. Katılımcı görüşme formları ve ilk elden deneyim ile elde edilen bilgiler, literatür taraması ile ilişkili olarak değerlendirilerek, SG teknolojileriyle mimari tasarım stüdyo eğitimine yeni bir bakış getirilmesi hedeflenmektedir.

Anahtar Kelimeler: *Sanal Gerçeklik Teknolojileri, Mimari Tasarım Stüdyosu, Beden-Mekân Deneyimi, Siber-Tektonik Mekân.*

2025 MSTAS MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Cyber-Tectonic Space Experience with Virtual Reality Technologies in Architectural Design Studio Education

Büşra Cantürk[1]; Levent Arıdağ[2]
[1,2]Gebze Technical University
[1]busracanturk@gtu.edu.tr; [2]leventaridag@gtu.edu.tr

Abstract

The development of technology has increased the possibilities of architecture, just as it has improved the possibilities of the sciences and the arts. Especially with the development of computers, architecture and education have gained a new dimension. The digital environment was used only as a tool, but with the addition of cyber elements as communication tools, it has transformed into an experience interface. The experience is realized with reality technologies (Augmented Reality, Virtual Reality, Extended Reality), which are cyber communication tools. Thus, it becomes a cybertectonic organism that users produce, transform, and share. The science of cybernetics, a rational tool for production models, not only changes the model but also creates an environment that shows relationships as a second mind. As the person who experiences the relations that emerge as a result of the interactions of the data moves in this cyber interface, it collides with other layers of information in the system structure, and these collisions allow new experiences in each time. It also provides a potential reservoir of data for other relationships that can be used at any time. This recording of space and its potential for experience constitutes the beginning of this research.

This research focuses on design practice in architectural education. Specifically, it examines the early and middle design phases (the first 7 weeks) of the MIM421 architectural design studio at Gebze Technical University during the Fall 2024-25 semester. Virtual reality (VR) headsets were incorporated into the studio to enable interactions between the body and cyber elements in virtual spaces. While augmented reality (AR) technology overlays cyber elements onto physical space, allowing for partial experiences, mixed reality (MR) allows the body to interact with cyber elements and physical space data. In contrast, VR immerses the body entirely in a simulated environment. This enables students to experience their designs within the VR interface, even without physical spaces. In this context, this study explores the relationships students establish in their "body-space" dialogue through VR technology within the context of their projects. Data were gathered through participant interviews and firsthand experiences and analyzed about the literature. The study aims to offer a new perspective on architectural design studio education using VR technologies.

Keywords: *Virtual Reality Technologies, Architectural Design Studio, Body-Space Experience, Cyber-Tectonic Space.*

1. Giriş

Teknolojinin hızlı gelişimiyle birlikte, son yıllarda mimarlık eğitiminde kullanılan bilgi iletişim araçlarında önemli dönüşümler yaşanmıştır. Bu dönüşüm, mimarlık stüdyo eğitiminde tasarım süreçlerinin de gözden geçirilmesini gerekli kılmıştır. Bunun temel sebebi, hesaplamalı tasarım araçlarının, insanın sağladığı verileri görsel olarak işleyebilme kapasitesine sahip olmasıdır. İnsan ve makine arasındaki bu bilgi aktarımı, sibernetik teorisi ile açıklanabilir. Bu çalışma kapsamında geri-bildirimle bilgi işleyebilen yazılım ve donanımlar, 'siber-iletişim araçları' olarak ele alınmaktadır. Siber iletişim araçları, genişletilmiş gerçeklik (GG) teknolojilerini içerir ve bu araçlar deneyim alanı oluşturmayı mümkün kılmıştır. Bu deneyim alanında, GG araçları, bedenin bir uzvu gibi davranarak, mekânı sanal ya da fiziksel ortamda 3B olarak keşfetmeye olanak sağlar. Bu bağlamda, beden mekân içinde hareket ettikçe, Tschumi'nin (2001) ifadesiyle mekânın katmanlarıyla çarpışmakta ve bu çarpışmalar mekânda yeni deneyimler sunmaktadır. Artık fiziksel mekândan farklı olarak GG ile mekân, bedenin hareketiyle deneyimlenebilmektedir. Schumacher (2022) bu arayüzü etkileşim yetenekleri ile zenginleştirilmiş meta-veri alanları olanları tanımlamaktadır. Ve yüksek hızlı ağ ve bulut teknolojileriyle birleştiğinde, bu tür sanal alanların duyusal, bilgi paylaşımı ve gerçek zamanlı iletişim için etkileşim platformları olmasını sağlayacağını iletmiştir. Bilinen fizik-mekân deneyimine benzer bir yaklaşım ile mekânın siber-arayüzde de bu şekilde deneyim potansiyelleri barındırıyor olması çalışmanın ana çıkış noktaları arasında yer almaktadır.

Bugünün teknolojisiyle, GG ile deneyim, arttırılmış gerçeklik (AG), sanal gerçeklik (SG) ve karma gerçeklik (KR) araçlarıyla mümkün hâle gelmiştir. AG, fiziksel mekânın üzerine sanal eklentilerin yerleştirilmesiyle bedenin bu sanal öğeleri kısmi olarak deneyimlemesini sağlar. SG, fiziksel mekândan bağımsız bir ortamda, bedeni sanal öğelerle etkileşime sokarak bir arayüz oluşturur. KG ise, sanal gerçeklikte bedeni, sanal eklentiler ve fiziksel mekân verileriyle etkileşime sokar. AG ve KG, bilgisayarda üretilen sanal ortam ile fiziksel ortam verilerini bir arada kullanırken (Testi vd., 2024), SG, tamamen bilgisayarda üretilen bir 'benzetim ortamı' olup, kullanıcılara deneyim senaryoları sunar (Bayraktar, 2007). SG, AG ve KG'den farklı olarak, kullanıcının 3B sanal ortamı, fiziksel mekândan bağımsız olarak deneyimlemesini sağlar. Bu özellik, özellikle mimari tasarım eğitimi için büyük bir avantaj sunar; çünkü öğrencilerin tasarımlarını SG gözlükleriyle stüdyo ortamlarında veya farklı ortamlarda deneyimlemelerini mümkün kılar. Bu nedenle bu araştırma, SG gözlükleri aracılığıyla sanal gerçeklik teknolojilerinin sağladığı olanakları görünür kılmak üzere sınırlandırılmıştır.

Bu alanda yapılmış çalışmalar, SG kullanılarak yüksek lisans öğrencileriyle mekân algısına dair testler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, mekânsal ilişkileri kurmada SG'nin etkili olduğunu ancak çıktıların, eskiz süreçlerine benzer şekilde daha soyut olduğunu göstermiştir. Buna karşılık, bilgisayar ortamında elde edilen sonuçların daha somut olduğu tespit edilmiştir (Yıldan vd., 2019). Diğer bir çalışma ise üniversitelerdeki farklı bölümlerden lisans öğrencileriyle yapılmış ve SG gözlükleriyle deneyimlenen tarihi mekânlara dair kullanıcı görüşleri alınmıştır. Bu görüşlerde, çözünürlük sorunları ve uzun süreli kullanımda baş ağrısı ve mide bulantısı gibi fizyolojik etkiler rapor edilmiştir (Kaleci vd., 2017). Bu çalışmada ise SG teknolojileri, stüdyo sürecinde kullanılan araç ve tekniklere ek olarak bir tasarım geliştirme aracı olarak ele alınmıştır.

1.1. Amaç, Kapsam

Günümüzde mimari tasarım eğitimi, eskiz, maket ve bilgisayar ekranı üzerinden 2B ve 3B sanal ortamlar gibi araçlarla gerçekleştirilmektedir. Öğrenciler, fiziksel mekânları maketler aracılığıyla ölçekli bir şekilde deneyimleyebilirken, sanal ortamlar üzerinden ise bu deneyim ekran ölçeğinde kalmaktadır. Bu iki farklı arayüzün birleşim noktasında ise SG teknolojileri devreye girmektedir. SG hem fiziksel alanın hem de sanal ortamın bilgilerini içinde barındıran hibrit bir deneyim sunmaktadır. SG üzerinde yer alan sensörler sayesinde, kullanıcının bedensel hareketleri anlık olarak arayüze aktarılabilir. Böylece, öğrencilerin fiziksel olarak gerçekleştiremeyecekleri tasarımları, sanal ortamda etkileşimli bir şekilde keşfetmeleri mümkün hale gelmiştir.

Bu araştırma, öğrencilerin SG gözlükleri ile yaptıkları deneyimler hakkındaki görüşlerini toplama amacı taşımakta olup, öğrencilerin kurdukları mekânsal ve çevresel diyalogları ele almaktadır. Bu bağlamda, gelecekte yapılacak araştırmalara bir perspektif sunmayı amaçlamaktadır. Araştırmanın temel sorusu ise, 'mimari tasarım eğitim arayüzünde SG gözlüklerinin kullanımı, ölçek algısı ve mekânsal-çevresel diyalogların kurulmasında öğrenci görüşlerine nasıl yansımıştır?' Verilerin alınabilmesi için, 2024-25 güz döneminde Gebze Teknik Üniversitesi'nde, MIM421 mimari tasarım stüdyosu programına SG gözlükleri dahil edilerek workshop çalışması gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışma ile

öğrencilerin SG arayüzünde gözlem ve hareketleri ile varlık bularak, projeleri ile ilişkili diyaloglar kurmaları beklenmiştir.

2. Sanal Gerçeklik Teknolojileri ve Mimari Tasarım Eğitimi

Gerçek ortam ve sanal ortam arasında bir süreklilik vardır (Milgram vd., 1995). Bu sürekliliğin bir ucunda herhangi bir donanım kullanmadan çıplak gözle algılanabilen gerçek bir ortam bulunurken, diğer ucu ise yalnızca sanal varlıklardan oluşan tamamen bilgisayar üretimi bir ortam vardır. Bu sürekliliğin ara kesitinde ise, SG teknolojileri yer almaktadır. SG dijital ve gerçek olan arasında hibrit bir alan yaratır. Bu ara kesitte, bilgisayarla oluşturulmuş 3B benzetim ortamında, kullanıcı SG gözlükleri ve kumandalar aracılığı ile etkileşime girerek duyusal olarak bu ortamı algılayarak uzanım sağlar. Kullanıcının gezinme davranışını destekleyen ve duyuları aracılığıyla etkileşimde bulunduğundan gerçek zamanlı olarak uyarılmasını sağlar (Guttentag, 2010). SG sadece zihnin bulunduğu mekânı önemsemez, bedenin yaratılan sanal mekânı deneyimlemesine de imkân tanır. Fiziksel gerçekliğe yakın deneyimler yaşayabilmek amacıyla yaratılan 3B SG mekânı, mekânda diğer nesneler ile etkileşimde bulunmaya ve kullanıcılarda ortamda bulunma hissi yaratan sarmal alanlardır. Sanal gerçeklik ortamında duyu organları fiziksel bir gerçekliği algılar gibi hareket etmektedir (Sherman vd. 2009).

SG arayüzünün sağladığı bu imkânlar, mimari tasarım eğitim arayüzünde de öğretme-öğrenme sürecinde yeni yaklaşımların kullanılmasında önemli bir yere sahip olmaya başlamıştır. Mimari tasarım eğitiminde, tasarımlar eskiz, ölçekli maket, 2B çizimler, 3B modeller ile temsil edilmektedir. SG teknolojileriyle artık, projelerin 1:1 ölçekli veya farklı ölçeklerde deneyimlenmesi de mümkün olmaktadır. SG teknolojilerinin gelişimiyle birlikte, öğrenciler tasarladıkları projelerde mekânı deneyimleyebilmektedir. SG teknolojilerini kullanarak tasarım eğitimi alan öğrenciler, aslında öğrendiği ve işleyiş mantığını bildikleri sistemi kullanırlar. SG arayüzü bilgisayarda kullanılan 3B program işleyişi ile benzer olup, aradaki tek fark bedenin ekranın dışında değil içinde olmasıdır (Vargün, 2024).

3. Yöntem

Çalışmada araştırma yöntemi olarak nitel araştırma modellerinden olgubilim, ölçme aracı olarak da uzman görüşü alınan yarı yapılandırılmış görüşme formu kullanılmıştır. Uygulanan görüşme formu ek olarak paylaşılmıştır **(Ek 1)**. Alan çalışması sonrasında, katılımcı tüm öğrencilerden bu formu doldurmaları istenmiştir. Elde edilen veriler, nitel araştırma yöntemlerinden betimsel ve içerik analizle değerlendirilmiştir.

3.1. Çalışma Grubu

Gebze Teknik Üniversitesi'nde Prof. Dr. Levent Arıdağ ve Dr. Derya Çakır Aydın tarafından yürütülmüş olan MIM421 mimari tasarım stüdyo sürecine, SG gözlükleri programın 3. haftasında dâhil edilmiştir. Programın 7. haftasında 4 günlük süren bir workshop çalışması yapılmıştır. Araştırmanın 1. yazarı, deney sürecine gözlemci ve SG gözlük arayüzü yönlendiricisi olarak katılım sağlamıştır. Araştırmanın çalışma grubunu 23 kız, 5 erkek olmak üzere toplam 28 öğrenci oluşturmuştur. Öğrenci yaşları 22-27. Eğitim durumu lisans düzeyi, mimarlık 4. sınıf bahar dönemi öğrencileridir. Seçilme kriteri için, çalışmaya atölyenin tüm öğrencileri ayrım gözetmeksizin dâhil edilmiştir. Mimarlık seviyesindeki tüm öğrenci grupları (1. sınıftan 4. sınıfa kadar) ile çalışma yapılabilir. Bu grubun seçilme nedeni ilgili dönemin danışmanları ile SG gözlüklerinin, ders programına dâhil edilebilir şekilde programlanmış olmasıdır.

3.2. Veri Toplama Araçları

Bu araştırmada veriler, nitel bir yöntemle toplanmıştır. Veri toplama aracı olarak çevrim içi ortamda Google Forms üzerinde geliştirilen ve alan uzmanlarının görüşleri doğrultusunda yapılandırılan 6 maddelik bir yarı yapılandırılmış görüşme formu kullanılmıştır **(Ek 1)**. Form, açık ve kapalı uçlu soruların bir arada bulunduğu karma bir yapıya sahiptir. Bu şekilde soru sormak katılımcıların kapalı uçlu sorulara verdikleri yanıtların sebeplerinin araştırılmasını ve bu yanıtların ötesine geçen yorumlar yapabilmelerine olanak sağlar (Creswell, 2016). Görüşme formu, 3 farklı alan uzmanının görüşlerine sunulmuş, 5 öğrenci ile pilot uygulama yapılmıştır. Yapılan pilot çalışmada, kullanıcılar uzun süreli gözlük kullanımında baş dönmesi geri dönüşünü iletmişlerdir. Bu duruma çözüm olarak, gözlük kullanım süresi bireysel olarak 7-10 dakika arasında tutularak giderilmeye çalışılmıştır. Çalışma 3 adet Oculus Quest II gözlüğü ile yürütülmüştür. Kullanılan SG gözlüğü ile deneyim tam çevreleme olarak sağlanabilmektedir. Cihazın üzerinde bulunan sensörler, kullanıcının kafa, el hareketlerinden aldığı konum bilgilerini eş zamanlı olarak algılayarak gözlük arayüzüne görüntü olarak iletmektedir. SG gözlük arayüzünde, öğrencilerin bilgisayar arayüzünde kullandıkları Sketch up, Rhino, 3dmax yazılımlarıyla veri alışverişine olanak sağlayan Gravity Sketch yazılımı kullanılmıştır.

3.3. Veri Toplama Süreci

Çalışma takvimine göre, dönemin 2 haftasında öğrenciler ile çalışmanın yapılacağı Eyüp Bölgesine alan gezisi düzenlenmiştir. Akabinde, öğrencilerden alana ait 3B modellerin hazırlanması istenmiştir. Programın 3. haftasında, SG gözlük arayüzü ve kullanımına yönelik öğrencilere bilgiler aktarılmıştır. 4., 5., 6. haftalarda, öğrencilerin süreç içerisinde tasarıma yönelik geliştirdikleri 3B modelleri bireysel olarak deneyimlemeleri ve gözlük arayüzünü tanımları sağlanmıştır. 7. haftada workshop çalışması gerçekleştirilmiştir. Workshop, 4 günlük bir süre zarfında gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın 1. gününde, öğrencilerin tasarımlarına yönelik hazırlamış oldukları 3B modeller SG gözlük arayüzüne aktarılmıştır. Bununla birlikte, mekânsal ve çevresel diyalogların kurulması için, öğrencilerle kesit ve silüet ilişkisi (bulunduğu yere uyum), kent katmanları ile ilişkilenme (yeşil alan, tarihi doku vb.), çevresel parametreler (doğal ışık, doluluk-boşluk vb.), topografya (kot farklılıkları, yatay & düşey ilişkiler vb.), diyagramları dönüştürme (sistemi oluşturan bilgi katmanları), hikâye (olay kurgusu), mekân algısı (insan ölçeği, kuş bakışı vb.), mekânsal organizasyon (sirkülasyon elemanları, program ögeleri vb.), çevre ve yüzey artikülasyonu (çevresel ve mekânsal diyaloglar), ölçek koordinasyonu (hacimsel büyüklükler, merdiven, koridor, ıslak hacim vb.) kavramları paylaşılmıştır. Bu kavramlar, ders yürütücüleriyle belirlenmiş olup 'öğrenciler mekânı ve çevreyi hangi unsurlar üzerinden düşünmelidir?' sorusuna dayanarak seçilmiştir. Öğrencilere deneyimlerini paylaşırken, 'hangi verileri toparladıkları' ve bu verilerin 'hangi tasarım kararına dönüştüğü' sorulmuştur. Workshop 'un 2. ve 3. günlerinde, öğrencilerden kurdukları mekânsal ve çevresel diyaloglara göre bilgisayar arayüzünde bireysel olarak 3B modellerini geliştirmeleri beklenmiştir. 4. günde öğrencilerden, geliştirdikleri tasarımlarını SG arayüzünde tekrardan deneyimlemeleri istenmiştir. Workshop sonunda öğrencilerden SG gözlük deneyime istinaden kurdukları diyalogları yarı yapılandırılmış görüşme formu aracılığıyla paylaşmaları istenmiştir.

3.4. Veri Analizi

Verilerin analizinde betimsel ve içerik analizi yöntemlerinden yararlanılmıştır. Araştırmada elde edilen bulgular araştırmacıların dışında mimarlık alanında doktora düzeyinde iki farklı uzmana gösterilerek, uzman görüşleri alınmış ve geçerlik-güvenirlik çalışması yapılmıştır. Miles ve Huberman'ın güvenirlik formülüne göre [Güvenirlik = (Görüş Birliği/ Görüş Birliği + Görüş Ayrılığı] araştırmacılar arasındaki uyum %92 olarak belirlenmiştir. Araştırma sonuçlarının güvenilir kabul edilebilmesi için güvenirlik hesaplarının %70'in üzerinde olması gerekmektedir (Miles, 1994). Güvenirlik hesaplamasında kullanılan bu formül ile elde edilen yüksek uyum oranı, sonuçların güvenilir olduğunu göstermektedir.

4. Bulgular

Araştırma kapsamında ulaşılan 28 öğrencinin görüşlerine dayalı olarak toplam 8 başlıkta toplanabilecek görüş elde edilmiştir. Öğrenciler toplam 125 görüş ifade etmişlerdir. Görüşlerin değerlendirilmesinde her öğrenci bir birey olarak A1, A2, A3, …, A27, A28 olarak numaralandırılmıştır. Öğrenci yanıtlarını içeren bilgiler **Tablo 1**'de verilmiştir.

Tablo 1: Yarı Yapılandırılmış Görüşme Formuna İstinaden Öğrenci Yanıtları (Toplam: 125 görüş)

No	Veri	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14	A15	A16	A17	A18	A19	A20	A21	A22	A23	A24	A25	A26	A27	A28	Yanıtlayan Öğrenci Sayısı
1	**Kesit & Silüet İlişkisi** (bulunduğu yere uyum)	●		●		●	●		●			●	●	●	●		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		21 öğrenci
2	**Kent Katmanları ile İlişkilenme** (yeşil alan, tarihi doku, vb.)	●				●																	●		●			●		5 öğrenci
3	**Çevresel Parametreler** (doğal ışık, doluluk-boşluk, vb.)		●		●	●	●	●	●	●			●		●	●		●	●	●	●		●	●	●	●	●	●	●	21 öğrenci
4	**Topografya** (kot farklılıkları, yatay & düşey ilişkiler, vb.)	●	●	●				●	●		●	●	●			●	●	●	●		●				●		●	●	●	17 öğrenci
5	**Mekan Algısı** (insan ölçeği, kuş bakışı, vb.)		●	●	●	●	●			●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		●		23 öğrenci
6	**Mekansal Organizasyon** (sirkülasyon elemanları, program ögeleri, vb.)									●			●	●			●		●		●				●	●	●	●	●	11 öğrenci
7	**Çevre ve Yüzey Artikülasyonu** (çevresel ve mekansal diyaloglar)		●		●		●			●				●				●	●		●			●	●	●				11 öğrenci
8	**Ölçek Koordinasyonu** (hacimsel büyüklükler, merdiven, koridor, ıslak hacim, vb.)				●	●	●			●	●			●		●	●			●	●		●	●	●	●	●	●		16 öğrenci

Bu çalışmada, öğrencilerin SG gözlükleriyle projelerinde kurdukları ve mekânsal ve çevresel ilişkilerin analizi, içerik analizi yöntemiyle yapılmıştır. Araştırma sürecinde kullanılan kapalı uçlu görüşme formu ile elde edilen 125 görüşten içerik analizi ile toplamda 297 veri yakalanmış, bu veriler gruplandırarak 6 ana başlık ve 19 alt başlık oluşturulmasına olanak tanımıştır. Bu başlıklar, öğrencilerin projelerinde öne çıkan tasarım faktörlerini ve bunların mekânsal ve çevresel algılar üzerindeki etkilerini anlamak için bir temel teşkil etmektedir. Analiz, verilerin sıklık ilişkisi temel alınarak yapılmış olup, her başlık ve alt başlık için sıklık sayıları **Tablo 2**'de gösterilmiştir. Bununla birlikte **Tablo 2**'de her alt başlık için öğrenci diyaloglarından alıntılar paylaşılmıştır. Öğrenci görüşlerine istinaden, tespit edilen ilişkiler;

4.1. Doğal Işık İlişkisi

Doğal ışık, projelerde önemli bir tasarım parametresi olarak öne çıkmaktadır. Bu başlık altında toplamda 55 veri kaydedilmiştir **(Tablo 2)**. Bulgulara göre, öğrenciler projelerinde 'ışık ve mekânsal organizasyon', 'ışık ve malzeme', 'ışık ve yönelim' olmak üzere 3 alt başlıkta içerik bildirmiştir. Bu veriler, ışığın mekân üzerinde nasıl etkili bir biçimde kullanıldığını ve tasarım sürecindeki işlevini açıklamaktadır.

Şekil 1: Işık almayan alanlar için üst örtüde açıklıklar açılması (A11 no'lu öğrenci)

- **Işık ve Mekânsal Organizasyon:** Öğrenciler, SG gözlük deneyimlerinde doğal ışığın mekânsal organizasyon üzerindeki etkisini vurgulamışlardır. Bu bağlamda, 'mekânların ışık alma durumunu', 'gün ışığını iç mekâna yönlendiren açıklıklar ve yüzeyler', 'ışık-gölge etkisi' ve 'mekânsal derinlikler' üzerine gözlemler yaparak, ışık almayan ya da yetersiz ışık alan mekânları tespit etmişlerdir. Örnek olarak, ışık almayan mekânlar için üst örtüde açıklıklar açılması **(Şekil 1)**, alt kottaki mekânlara ışık girmesi için galeri boşlukları oluşturulması gibi çözüm önerileri getirilmiştir.
- **Işık ve Malzeme:** Öğrenciler, doğal ışığı yetersiz alan mekânları belirlemişlerdir. Bu doğrultuda, 'malzeme seçimleri' üzerinden doğal ışığın yönlendirilmesine yönelik önerilerde bulunmuşlardır. Örneğin, cephede yansıtıcı malzemeler kullanılarak ışığın alt kotlardaki mekânlara yönlendirilmesi, üst kabukta veya cephe/avlu çeperlerinde şeffaf malzeme kullanımı önerilmiştir.
- **Işık ve Yönelim:** Öğrenciler, SG deneyimlerinde iç mekânlara doğal ışığın en verimli şekilde girmesi için güneş ışığının geliş yönlerini tespit etmişlerdir. Bu doğrultuda, 'cephe ve yüzey yönelimleri' üzerinden, gün ışığının iç mekâna girmesi için çözüm önerileri geliştirilmiştir.

4.2. Sirkülasyon İlişkisi

Sirkülasyon ilişkisi, projelerde bir diğer önemli tasarım faktörü olmuştur. Bu ana başlık altında toplamda 51 veri kaydedilmiştir **(Tablo 2)**. Bulgulara göre, öğrenciler projelerinde 'sirkülasyon ve akış', 'sirkülasyon ve ergonomi', 'sirkülasyon ve mekânsal organizasyon', 'sirkülasyon ve kentsel organizasyon' olmak üzere 4 alt başlıkta içerik bildirmişlerdir. Bu veriler, sirkülasyonun mekânın işleyişi üzerindeki etkisini ve kullanıcı hareketini nasıl yönlendirdiğini göstermektedir.

- **Sirkülasyon ve Akış:** Öğrenciler, SG deneyimlerinde sirkülasyonda akışı bozan mekânsal düzenleri tespit etmişlerdir. Bu bağlamda, 'sirkülasyon akışı – organizasyonunu' gözlemleyip, sirkülasyon akış sürekliliğinin sağlanmasına yönelik çözüm önerileri geliştirmişlerdir. Örneğin, program ögeleri arasındaki erişim zorluklarını gidermek için yeni aksların eklenmesi, sirkülasyon kopukluklarının bulunduğu alanlarda merdiven, rampa gibi sirkülasyon elemanlarının yerleştirilmesi önerilmiştir.
- **Sirkülasyon ve Kullanıcı Etkileşimi:** Öğrenciler, SG deneyimlerinde sirkülasyon elemanlarının ergonomik açıdan yeterli olup/olmadığını tespit etmişlerdir. Bu bağlamda, 'sirkülasyon elemanları ergonomisi ve erişim' üzerinden beden ölçeğinden hareketle kullanıma yönelik çözüm önerileri geliştirilmiştir. Örneğin, rampa eğimi ergonomik açıdan uygun olmadığı için merdiven yapılması, rampa eğiminin azaltılması önerilmiştir.

- **Sirkülasyon ve Mekânsal Organizasyon:** Öğrenciler, SG deneyimlerinde sirkülasyon elemanlarının mekân organizasyonuna nasıl dahil olduğunu kullanıcı deneyimi üzerinden gözlemlemişlerdir. Bu bağlamda, 'mekânlar arası sirkülasyon mesafeleri', 'mekânlar arası sirkülasyon ilişkileri' ve mekânlara giriş-çıkışlar için 'servis alma ilişkisi' üzerinden aksaklıkları tespit ederek, organizasyonda sirkülasyon akışının sağlanmasına yönelik çözüm önerileri geliştirmişlerdir. Örneğin, iç-dış mekânlar arasında kullanıcı erişimi için sirkülasyon bağlantıları önerilmiştir.
- **Sirkülasyon ve Kentsel Organizasyon:** Öğrenciler, SG deneyimlerinde sirkülasyon ilişkisi üzerinden kente ait verilere nasıl ulaşılacağı ve/veya bu verilere nasıl uyumlanabileceği üzerine gözlemler yapmışlardır. Bu bağlamda, 'ulaşım ve açık alan ilişkilerinin çevresel bağlam ile uyumu', 'mevcut yaya-araç akışı' ve 'kentsel ve kıyısal sirkülasyon ilişkisi' üzerinden kent ile bağlam kurulamayan ilişkileri tespit ederek, sirkülasyon üzerinden çözüm önerileri geliştirmişlerdir.

4.3. Topografya İlişkisi

Topografya ilişkisi, projelerde bir diğer öne çıkan tasarım faktörü olmuştur. Bu ana başlık altında toplamda 24 veri kaydedilmiştir **(Tablo 2)**. Bulgulara göre, öğrenciler projelerinde 'topografya ile uyum', 'topografya ve yerleşim ilişkileri', 'topografya ve mekânsal organizasyon' olmak üzere 3 alt başlıkta içerik bildirmişlerdir.

Şekil 2: Topografyayla sürekli bir görünüm sağlamak için yüzey açıları düzenlenmiş (A8 no'lu öğrenci)

- **Topografya ile Uyum:** Öğrenciler, SG deneyimlerinde topografya verilerine göre tasarımın nasıl entegre edilebileceğini gözlemlemişlerdir. Bu bağlamda, 'topografyaya uyum', 'diyagramatik verilerle topografik kotlar arası uyum', 'eğime bağlı yüzey ilişkileri' üzerinden değerlendirmeler yapılmıştır. Örneğin, topografyayla sürekli bir görünüm sağlamak için yüzey açıları düzenlenmiştir **(Şekil 2)**.
- **Topografya ve Yerleşim İlişkileri:** Öğrenciler, SG deneyimlerinde çevre yapıların yatay-düşey yerleşim ilişkilerini gözlemlemişlerdir. Bu bağlamda, 'kot farklılıkları ve yerleşim ilişkileri', 'kot farklılıkları ve yükselme potansiyelleri' üzerinden topografya yapısına ve çevre yapıların yerleşim ilişkilerine göre uyum sağlamak için çözüm önerileri geliştirmişlerdir.
- **Topografya ve Mekânsal Organizasyon:** Öğrenciler, SG deneyimlerinde topografya kot farklılıklarının mekânsal organizasyonu nasıl etkilediğini gözlemlemişlerdir. Bu bağlamda, 'kot farkı olan alanların mekânsal kullanım potansiyeli' üzerinden bu alanlara mekânsal işlev kazandırmaya yönelik öneri geliştirdikleri gözlemlenmiştir. Örneğin, kot farkı bulunan alanlarda basamaklı peyzaj düzenlemeleri, sirkülasyonun kesintiye uğradığı yerlerde sirkülasyon elemanlarının entegrasyonu önerilmiştir.

4.4. Ölçek İlişkisi

Ölçek ilişkisi, projelerde en çok veri kaydı ile öne çıkan tasarım faktörü olmuştur. Bu ana başlık altında toplamda 66 veri kaydedilmiştir **(Tablo 2)**. Bulgulara göre, öğrenciler projelerinde 'ölçek ve kullanıcı etkileşimi', 'ölçek ve kentsel organizasyon', 'ölçek ve mekânsal organizasyon', 'ölçek ve büyüklükler' olmak üzere 4 alt başlıkta içerik bildirmişlerdir.

Şekil 3: Tasarımdaki yapıların, birbirleri ve çevre yapılarla ilişkili olarak hacimsel boyutlarının ayarlanması (A15 no'lu öğrenci)

- **Ölçek ve Kullanıcı Etkileşimi:** Öğrenciler, SG ile hem beden ölçeği hem de kuş bakışı olarak mekânı ve kenti deneyimlemişlerdir. Beden ölçeği ile mekânsal büyüklükler, kent silüetine uyum gibi konuları, kuş bakışıyla ise yaya ve ulaşım organizasyonu, yeşil alan oranı-sürekliliği, önemli kent noktaları ile bağlantı ilişkilerini gözlemlemişlerdir.
- **Ölçek ve Kentsel Organizasyon:** Öğrenciler, SG deneyimlerinde kentsel bağlamda ölçek ile tasarımları arasındaki ilişkiyi gözlemlemişlerdir. Bu bağlamda, 'hacimsel büyüklükler', 'yeşil alan oranı – organizasyonu' üzerinden çevre yapılarla ölçek uyumunun sağlanması ve kent ihtiyaçlarına göre yeşil alan önerileri geliştirdikleri gözlemlenmiştir. Örneğin, tasarımdaki yapıların, birbirleri ve çevre yapılarla ilişkili olarak hacimsel boyutlarının ayarlanması **(Şekil 3)** ve yeşil alan oranının yetersizliği göz önünde bulundurularak yeşil alanın arttırılması önerilmiştir.
- **Ölçek ve Mekânsal Organizasyon:** Öğrenciler, SG deneyimlerinde program ögeleri ile ilişkili olarak mekânsal büyüklüklerin yeterliliğini sorgulamış ve birbirleri arasındaki ilişkileri gözlemlemişlerdir. Bu bağlamda, 'mekânsal hiyerarşi', 'mekânsal büyüklükler – program ögelerinin yerleşim ilişkileri' üzerinden erişim ve fonksiyonellik ihtiyaçlarına göre düzenlemeler yapılmıştır.
- **Ölçek ve Büyüklükler:** Öğrenciler, SG deneyimlerinde kente ve mekâna ait büyüklükleri kullanıcı deneyimi üzerinden gözlemlemişlerdir. Bu bağlamda, 'iç mekân yükseklikleri', 'yüzey artikülasyonları – yükseklikler', 'mekânsal öge büyüklükleri', mekânsal açıklıkların büyüklükleri üzerinden kullanıcı ergonomisine göre düzenlemeler yapılmıştır. Örneğin, kullanıcıda basıklık hissi yaratan üst örtü yüzey artikülasyonlarının yüksekliklerinin düzenlenmesi, sirkülasyon genişliklerinin kullanıcı ergonomisine uygun düzenlenmesi önerilmiştir.

4.5. Mekânsal İlişki

Mekânsal ilişki, projelerde bir diğer öne çıkan tasarım faktörü olmuştur. Bu ana başlık altında toplamda 59 veri kaydedilmiştir **(Tablo 2)**. Bulgulara göre, öğrenciler projelerinde 'mekân ve kullanıcı etkileşimi', 'mekân ve işlev' olmak üzere 2 alt başlıkta içerik bildirmişlerdir.

Şekil 4: Eğrisel yüzeylerin işlevlendirilmesi ve mekânların kullanım potansiyelleri (A7 no'lu öğrenci)

- **Mekân ve Kullanıcı Etkileşimi:** Öğrenciler, SG deneyimlerinde mekânı kullanıcı deneyimi üzerinden gözlemlemişlerdir. Bu bağlamda, 'mekânsal ergonomi', 'program ögeleri – açık alan kullanım ilişkileri', 'izleyici-izlenen ilişkisi' üzerinden hem ergonomi hem de mekân-kullanıcı etkileşimini sağlamak amacıyla düzenlemeler yapılmıştır. Örneğin, galeri boşlukları açılarak izleyici-izlenen ilişkisi kurgulanmış, iç-dış mekânlar arası kullanıcı etkileşimi için teraslar eklenmiş ve manzara yönelimi sağlanmıştır.
- **Mekân ve İşlev:** Öğrenciler, SG deneyimlerinde mekânların kullanım durumlarını gözlemlemişlerdir. Bu bağlamda, 'taşıyıcı sistem yerleşimi', 'mekânların kullanım potansiyelleri', 'atıl alanların işlevlendirilmesi', 'eğrisel yüzeylerin işlevlendirilmesi' üzerinden mekânların fonksiyonel olarak kullanılabilir hale getirilmesi için düzenlemeler yapılmıştır. Örneğin, taşıyıcı elemanların işlevi dışında yüzeylerine cam malzeme eklenerek iç mekâna doğal ışık alımı, eğrisel yüzeylerin işlevsel olarak alana amfi ve peyzaj olarak dahil edilmesi **(Şekil 4)** önerilmiştir.

4.6. Kentsel İlişki

Kent ilişkileri, projelerde bir diğer öne çıkan tasarım faktörü olmuştur. Bu ana başlık altında toplamda 42 veri kaydedilmiştir **(Tablo 2)**. Bulgulara göre, öğrenciler projelerinde 'kent ve silüet ilişkisi', 'kent ve süreklilik', 'kent ve yönelim' olmak üzere 3 alt başlıkta içerik bildirmişlerdir.

Şekil 5: Kullanıcı etkileşimi kurulamayan cadde tarafına etkileşimin yoğun olduğu program ögelerinin yerleşimi (A1 no'lu öğrenci)

- **Kent ve Silüet İlişkisi:** Öğrenciler, SG deneyimlerinde silüet ilişkisi üzerinden kent ile ilişki kurmuşlardır. Bu bağlamda, 'çevre yapılar ile yükseklik uyumu – kent silüetine uyum', 'farklı perspektifler – kent ile ilişkilenme', 'cephe düzenlemesi' üzerinden kent silüetini bozmamak ve kente uyum sağlayacak şekilde düzenlemeler yapılmıştır. Örneğin, kentte keskin hatlar oluşturan yüzeylerde katlama mantığı ile eğimli yüzeyler önerilmiştir.
- **Kent ve Yönelim:** Öğrenciler, SG deneyimlerinde mekânsal yönelimler üzerinden kentle olan ilişkilerini keşfetmişlerdir. Bu bağlamda, 'manzara yönelimi' üzerinden yapının deniz ve yeşil alanlara yönelimleri üzerine değerlendirmeler yapılmıştır. Örneğin, farklı perspektiflerden kent ile yapının manzara kesişimleri gözlemlenmiştir.
- **Kent ve Süreklilik:** Öğrenciler, SG deneyimlerinde, kent ile olan bağlantıyı sürdürmek üzerine düşünmüşlerdir. Bu bağlamda, 'yeşil alan sürekliliği', 'önemli kent noktaları ile ilişki', 'doluluk-boşluk ilişkisi' üzerinden kent ile akışın kesildiği durumları tespit etmişlerdir. Örneğin, projedeki açık etkinlik alanı ile kent içinde yer alan etkinlik alanı arasında sirkülasyon bağlantısı kurulması, kullanıcı etkileşimi kurulamayan cadde tarafına etkileşimin yoğun olduğu program ögelerinin yerleştirilmesi ve sirkülasyon verilmesi **(Şekil 5)** önerilmiştir.

Tablo 2: Yarı Yapılandırılmış Görüşme Formu – Öğrenci Mekânı Ne Üzerinden Düşünüyor?

Deneyim	Deneyim Alt Başlıkları	Öğrenci Diyalogları
Doğal Işık İlişkisi (Sıklık: 55)	Işık ve Mekânsal Organizasyon	''… açık ritüel alanlarının üzerinde açtığımız boşluk ise burayı meydanlaştırarak peyzajla iç içe bir alana hizmet etmiş oldu.'' (A18)
	Işık ve Malzeme	''…cephede yansıtıcı yapı elemanları (titanyum metal kaplama cephe) tasarlanarak doğal ışığın içeri yönlendirilmesi gerektiği kararı alınmıştır.'' (A8)
	Işık ve Yönelim	''Yapıda oluşacak yüzeylerin şeffaflık potansiyeli, mekân doğal aydınlatmayı en verimli şekilde hangi yüzeylerden kullanabilir?'' (A10)
Sirkülasyon İlişkisi (Sıklık: 51)	Sirkülasyon ve Akış	''…dış mekânda sirkülasyonun koptuğu erişimin sağlanamadığı mekanlara, çözüm olarak düşey sirkülasyon elemanlarından rampalar tasarlanması gerektiği kararı alındı.'' (A14)
	Sirkülasyon ve Kullanıcı Etkileşimi	''Rampalar arası akış, kütlelerimizdeki akışlar, çıkılabilir ya da çıkılamayan yüzeyler yeniden değerlendirildi. Eğitim merkezindeki serginin üst kısmında bulunan iki kabuk parçasının bir kısmının terasa dönüşebileceği gözlemlendi.'' (A2)
	Sirkülasyon ve Mekânsal Organizasyon	''…dış mekanla sirkülasyonun koptuğu erişimin sağlanamadığı mekanlara, çözüm olarak düşey sirkülasyon elemanlarından rampalar tasarlanması gerektiği kararı alındı.'' (A14)
	Sirkülasyon ve Kentsel Organizasyon	''Denize bakan amfide tramvay ulaşımı problemi nasıl çözülebilir? …amfinin zemin kotundan 2 metre daha aşağıda olmasına ve bir köprü yaratılarak tramvayın oradan geçmesine karar verildi.'' (A5)

Tablo 2: Yarı Yapılandırılmış Görüşme Formu – Öğrenci Mekânı Ne Üzerinden Düşünüyor? (Devamı)

Topografya İlişkisi (Sıklık: 24)	Topografya ile Uyum	‘‘…Diyagramlarımızdan gelen yükseklikler doğal eğim ve topografyayla uyuşmuyor yüksek kalıyordu, manuel ama kodu bozmayan oynamalarla çevresiyle daha uyumlu bir hale getirildi.’’ (A21)
	Topografya ve Yerleşim İlişkileri	‘‘Arazide yer alan 2 metrelik kot farkını, ön kütlenin zemin kat yüksekliğini 5,30 metre, arkasındaki üç kütlenin zemin katını 4,30 metre yaparak kot farkını kütle içinde çözmüş oldum.’’ (A20)
	Topografya ve Mekânsal Organizasyon	‘‘…belirli alanlar arasındaki kot farklılıklarının sirkülasyonu olumsuz etkilediğini fark ettim. Bu farklılıkları çözmek için rampa ve merdiven tasarımları ekledim.’’ (A17)
Deneyim	Deneyim Alt Başlıkları	Öğrenci Diyalogları
Ölçek İlişkisi (Sıklık: 66)	Ölçek ve Kullanıcı Etkileşimi	‘‘Yapıların insan gözünden görülmesi, insan ölçeğine göre yüksekliklerin ayarlanmasında özellikle derin alanların belirlenmesinde gözlük deneyimi çok yardımcı oldu.’’ (A4)
	Ölçek ve Kentsel Organizasyon	‘‘Model çevresinde VR gözlük ile dolaşırken özellikle, yapıların birbiriyle ve çevreyle olan ilişkisi göz önünde bulundurulduğunda, belirli kütlelerin boyutlarında ve oranlarında düzenlemeler yapılması gerektiği görüldü.’’ (A26)
	Ölçek ve Mekânsal Organizasyon	‘‘…öncesinde yeterli büyüklükte mi diye sorguladığımız mekanlar (çocuk oyun alanı, çok amaçlı salon) olduğundan gözlükle yaptığımız deneyimden yeterli olduğu geri dönüşünü almış olduk.’’ (A18)
	Ölçek ve Büyüklükler	‘‘…çatı seviyesindeki yüzey artikülasyonlarının kullanıcıda basıklık hissi yarattığı gözlemlendi. Sorunu çözmek için çatı yüksekliği artırılarak daha ferah bir mekân algısı sağlandı.’ (A7)
Mekânsal İlişki (Sıklık: 59)	Mekân ve Kullanıcı Etkileşimi	‘‘…açık teras alanları ekledim ve bu terasları doğal manzaraya yönlendirdim. Böylece, kullanıcıların dış mekanla daha sık temas kurmasını hedefledim.’’ (A15)
	Mekân ve İşlev	‘‘…Farklı mevsim ve gün ışığı koşullarında mekanların kullanım potansiyelleri nasıl değişir?’’ (A7)
Kentsel İlişki (Sıklık: 42)	Kent ve Silüet İlişkisi	‘‘…kesitlerdeki yüksekliklerin dış silüetle uyumunu inceledim. Bu gözlemler sonucunda, yüksekliklerin bulunduğu çevreye daha uygun hale gelmesi için kesit kararlarımı yeniden düzenledim. Örneğin, bazı iç mekân yüksekliklerini arttırarak dış mekandaki genel uyumu güçlendirdim.’’ (A6)
	Kent ve Yönelim	‘‘Yapının farklı açılardan görünüşlerini, çevreye nasıl entegre olduğunu ve manzaraları nasıl kesip böldüğünü gerçek zamanlı olarak gözlemledim.’’ (A23)
	Kent ve Süreklilik	‘‘…kuş bakışı ile stadyumdan gelen bağlantının açık etkinlik alanına bağlanamadığı için stadyum bağlantısı kütüphane yanından değil serginin üst kotundan olacak şekilde yeri değiştirilmesine karar verildi.’’ (A14)

5. Sonuçlar

Mimari tasarım stüdyosuna SG teknolojilerinin dahil edilmesiyle, yaratılan sanal bir mekânın artık beden tarafından deneyimlenmesi mümkün hale gelmiştir. Tasarlama sürecinde öğrenci, kendi beden hareketleri ile mekânın içerisinde varlık bulabilmekte ve mekân-çevre ile kurduğu diyaloglarda tasarım problemlerine yanıt arayabilmektedir. Hareketin eş zamanlı aktarıldığı SG arayüzünde beden, yaratılan benzetim ortamın içerisinde hem gözlemleyerek hem de onu dönüştürerek yaşama imkânı bulmaktadır. SG arayüzü, sanal mekân olan bilgisayar arayüzü ile fiziksel ortam arasında hibrit bir alan oluşturmuştur. Bu hibrit alanda beden hem sanal ortamın bilgisini kullanabilmekte hem de bu ortamı yaşayarak dönüştürebilmektedir. Bu arayüzde fiziksel ortam, esneklik kavramı kazanarak dönüşüme açık olmuştur. Sanal arayüzde, bir ekran arkasından değil sarmal bir şekilde bedeni içerisine dâhil ederek, bedenin kendi hareketleri ile duyumsayarak kodlamasına imkân sağlamıştır. Benzer şekilde, George ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada, SG

ortamında yürütülen stüdyolarda öğrencilerin daha esnek tasarımlar geliştirdikleri ve farklı düşünme yöntemleri geliştirdikleri gözlemlenmiştir (George vd., 2017).

Araştırma kapsamında, 2024-25 güz döneminde Gebze Teknik Üniversitesi 4. Sınıf MIM421 öğrencileri ile yapılan çalışmada, SG arayüzünde öğrencinin mekân ve çevre ile kurduğu diyaloglar ele alınmıştır. Sanal gerçeklik sayesinde kullanıcılar, tasarımı SG ortamında deneyimleyerek, daha iyi bir fikir edinmekte ve tasarıma yönelik geri bildirimlerde bulunabilmektedir (Öksel, n.d.). Tasarım problemi çözümünde, belirli bir noktaya yoğunlaşmayı hedeflerken, öğrencinin mekâna ve çevreye ait verileri daha bütünsel bir ilişkide ele aldığı görülmüştür. Öğrencilerden alınan geri dönüşlere bakıldığında; mekân ve çevrenin farklı ölçeklerden deneyimlenmesi ile öğrencide gerçek dünyaya ilişkin ölçek algısı oluşarak, hacimsel büyüklüklerin 1:1 beden ölçeğinde değerlendirildiği, mekâna ilişkin dar-geniş, yüksek-alçak, büyük-küçük gibi yorumların yapıldığı görülmüştür. Topografyanın yapısı üzerinden, kot ilişkileri kurularak çevresel ve mekânsal akışların (promenad, araç, yeşil alan vb.) kurulması sağlanmıştır. Benzer şekilde, Chang (2017), sanal gerçeklik ortamında bilgisayar destekli tasarım ortamına göre boyut, derinlik ve mimari alan ölçeğinin daha iyi anlaşıldığını belirtmektedir. Ayrıca, SG ortamında topolojik ilişkileri algılamanın daha kolay olduğunu ifade etmiştir. Angulo (2015) ise, SG'nin mekânları algılamak için alternatif bir yol sağladığını ve gerçekleştirilen deneylerden sonra öğrencilerin, SG kullanılması durumunda mekânların topolojik ilişkilerini geleneksel tasarım ortamına göre daha iyi algıladıklarını belirtmiştir. Çevresel parametrelerin farkındalığı ile mekân içerisinde doğal ışığın alımı, vista noktalarının algılanması ile kesit-silüet ilişkilerinin kurulduğu gözlemlenmiştir. Tarihi yapıların alandaki varlığı hissedilerek mekânsal-çevresel doluluk boşlukların kurgulanması ve tarihi yapı silüetinin korunmasına yönelik hacimsel büyüklükler değerlendirilmiştir. Tasarımın bulunduğu alandaki ihtiyaç gereksinimlerine göre, doluluk-boşluk ilişkilerinin düşünülerek, duraklama noktaları, yeşil alan vb. gibi kurguların yapılabildiği gözlemlenmiştir. Mekânsal deneyim ile, mekân içi sirkülasyon elemanlarının sürekliliğinin sağlanması, taşıyıcı sistem yerleşimine yönelik organizasyonlar yapılmıştır. Bununla birlikte, tasarım sürecinde öğrencilerin, SG gözlüklerini kendi kullandıkları diğer araçlar (eskiz, maket, 2B & 3B bilgisayar yazılımları) ile geri bildirim ilişkisinde kullanabildikleri gözlemlenmiştir.

Mimari tasarım stüdyo pratiğine SG gözlüklerinin dâhil edilmesi ile öğrencilerin yaparak öğrenme edimine ek olarak deneyimleyerek de öğrendiği bir sürece geçilmiştir. Böylelikle, öğrenci kendi hareketleri ile yarattığı tasarımın içerisinde varlığını duyumsayarak sezgileriyle var olabilmektedir. Yaparak ve kodlayarak öğrenmek, artık deneyimleyerek öğrenmek olarak yeni bir dinamik kazandığından söz edilebilir. Benzer şekilde, Pandey vd. (2015), sanal gerçeklik ortamının eğitimde bir araç olarak kullanılmasının öğrencilerin mekânı algılama yeteneklerini geliştireceğini ve buna bağlı olarak öğrenme motivasyonlarının ve yaratıcılıklarının artacağını ifade etmişlerdir. Bununla birlikte ileriki çalışmalara bir perspektif oluşturması açısından, öğrencilere SG gözlüklerinin tasarım sürecine hangi şekillerde dâhil edilmesinin daha etkili olacağı sorulmuştur. Öğrencilerden alınan geri dönüşlere istinaden 'tasarım sürecinde bireylerin serbest kullanımını destekleyecek şekilde SG laboratuvarların kurulması', 'sanal gerçeklik, arttırılmış gerçeklik ve karma gerçeklik teknolojilerinin birlikte kullanılabileceği simülasyon laboratuvarlarının kurulması' ve 'yurtdışı ve/veya yurtiçi eğitim kurumları ile iş birlikli tasarım atölyelerinin organize edilmesi' gibi geri dönüşler alınmıştır.

Teşekkür
Bu bildiri, birinci yazar tarafından ikinci yazarın danışmanlığında devam etmekte olan doktora tezinden geliştirilmiştir. Tez, aynı zamanda Gebze Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinatörlüğü tarafından "2023-A-102-07" proje kodu ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

Angulo, A., & de Velasco, G. V. (2013). Immersive simulation of architectural spatial experiences. *Blucher Design Proceedings*, *1*(7), 495-499.

Angulo, A. (2015). Rediscovering Virtual Reality in the Education of Architectural Design: The immersive simulation of spatial experiences. *Ambiances. Environnement sensible, architecture et espace urbain*, (1).

Bayraktar, E., & Kaleli, F. (2007). Sanal gerceklik ve uygulama alanlari. *Akademik Bilişim*, *1*(6).

Chang, J. Z. (2017). *Designing in virtual reality: tools with the human field of vision* [Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology].

Creswell, J. W., & Poth, C. N. (2016). *Qualitative inquiry and research design: Choosing among five approaches*. Sage publications.

George, B. H., Sleipness, O. R., & Quebbeman, A. (2017). Using virtual reality as a design input: Impacts on collaboration in a

university design studio setting. *Journal of Digital Landscape Architecture*, *2*, 252-259.
Guttentag, D. A. (2010). Virtual reality: Applications and implications for tourism. *Tourism Management, 31*(5), 638.
Kaleci, D., Tepe, T., & Tüzün, H. (2017). Üç boyutlu sanal gerçeklik ortamlarindaki deneyimlere ilişkin kullanici görüşleri. *Türkiye Sosyal Araştırmalar Dergisi*, *21*(3), 669-689.
Miles, M. B. (1994). Qualitative data analysis: An expanded sourcebook. *Thousand Oaks*.
Milgram, P., Takemura, H., Utsumi, A., & Kishino, F. (1995, December). Augmented reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum. In *Telemanipulator and telepresence technologies* (Vol. 2351, pp. 282-292). Spie.
Öksel, İ. N. (n.d.). *Mimarlıkta Sanal gerçeklik*. Arch Network. Retrieved May 12, 2023, from https://archnetworktr.com/mimarlikta-sanal-gerceklik/
Pandey, M., Luthra, V., Yammiyavar, P. G., & Anita, P. Y. (2015). Role of immersive virtual reality in fostering creativity among architecture students. In A. Chakrabarti, T. Taura & Y. Nagai (Eds.), *The Third International Conference on Design Creativity (3rd ICDC),* Bangalore, India.
Schumacher, P. (2022). The metaverse as opportunity for architecture and society: design drivers, core competencies. *Architectural Intelligence*, *1*(1), 11.
Sherman, W. R., & Will, J. D. (2009). *Developing virtual reality applications: foundations of effective design*. Morgan Kaufmann.
Testi, C., Nagy, D. Z., Dow, J. E., & Bannova, O. (2024). Use Virtual Reality as a Tool for Evaluating a Lunar Habitat. In *AIAA AVIATION FORUM AND ASCEND 2024* (p. 4842).
Tschumi, B. (2001). *Event-Cities 2* (1st ed.). MIT Press.
Vargün, Ö. (2024). Sanal Gerçeklikte Tasarım Deneyimine İlişkin Öğrenci Görüşleri. *Yedi*, (Sanatta Dijitalizm [Özel Sayı]), 1-16.
Yıldan, İ., Çağdaş, G., & Tong, H. (2019). Sarmal Sanal Gerçeklik Ortamının Topolojik İlişkilerin Algısına Etkisi. In *13. Mimarlıkta Sayısal Tasarım Ulusal Sempozyumu: Kesişmeler-Örtüşmeler*, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, 169-184.

EK 1: Yarı Yapılandırılmış Görüşme Formu

1. **Adınız / Soyadınız:** .....
2. **Cinsiyet:** .....
3. **Doğum Yılı:** .....
4. **Bu çalışma öncesinde sanal gerçeklik gözlük deneyiminiz oldu mu?**

☐ Evet
☐ Hayır
☐ Kısmen

5. **Sanal gerçeklik gözlükleri ile yaşadığınız deneyim, projenizde ne tür ilişkileri kurabilmenize fayda sağladı? Deneyimleriniz ile paylaşabilir misiniz? Birden çok seçeneği işaretleyebilirsiniz.**

☐ Kesit & Silüet İlişkisi (bulunduğu yere uyum) .....
☐ Kent Katmanları ile İlişkilenme (yeşil alan, tarihi doku vb.) .....
☐ Çevresel Parametreler (doğal ışık, doluluk-boşluk vb.) .....
☐ Topografya (kot farklılıkları, yatay & düşey ilişkiler vb.) .....
☐ Mekân Algısı (insan ölçeği, kuş bakışı) .....
☐ Mekânsal Organizasyon (sirkülasyon elemanları, program öğeleri vb.) .....
☐ Çevre ve Yüzey Artikülasyonu (çevresel ve mekânsal diyaloglar) .....
☐ Ölçek Koordinasyonu (hacimsel büyüklükler, merdiven, koridor, ıslak hacim vb.) .....

6. **Sanal gerçeklik gözlüklerinin, tasarım sürecine hangi şekillerde dahil edilmesinin daha etkili olacağını düşünüyorsunuz? Birden çok seçeneği işaretleyebilirsiniz.**

☐ Tasarım sürecinde bireylerin serbest kullanımını destekleyecek şekilde SG laboratuvarların kurulması
☐ Ekip çalışmalarında ekip üyeleriyle birlikte iş birlikli gözlük deneyimlerinin gerçekleştirilmesi
☐ Danışman kritiklerinin gözlük üzerinden alınması
☐ Yurtdışı ve/veya yurtiçi eğitim kurumları ile iş birlikli tasarım atölyelerinin organize edilmesi
☐ Sanal gerçeklik, arttırılmış gerçeklik ve karma gerçeklik teknolojilerinin birlikte kullanılabileceği simülasyon laboratuvarlarının kurulması

2025 MSTAS

OTURUM 9

YAPAY ZEKA VE MİMARLIK II

MSTAS 2025 MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Mimari Tasarım Sürecinde Örnek Proje İnceleme İçin Özelleştirilmiş Arama Motoru Tasarımı

Betül Uçkan[1]; Gülen Çağdaş[2]; Gülce Kırdar[3]
[1]İstanbul Medipol Üniversitesi ve İstanbul Teknik Üniversitesi; [2] İstanbul Teknik Üniversitesi; [3]Yeditepe Üniversitesi;
[1]betul.uckan@medipol.edu.tr; [2]glcagdas@gmail.com; [3]gulce.kirdar@yeditepe.edu.tr

Özet

Mimari tasarımda örnek proje analizi, mevcut projelerden öğrenerek tasarım bilgisinin geliştirilmesi için oldukça önemli bir aşamadır. Ancak günümüzde sıklıkla başvurulan dijital mimarlık platformları, kullanıcıların belirli kriterlere göre proje araması yapmalarını ve araştırdıkları projeyle örtüşen benzer örneklere ulaşmalarını yeterince destekleyememektedir. Bu platformların, kullanıcıların spesifik arama kriterlerine uygun içeriklere hızlı ve doğru şekilde erişimini sağlayamaması sorunu göz önünde bulundurularak, çalışma kapsamında kullanıcı ihtiyaçlarına göre özelleştirilmiş bir arama motoru tasarımı ele alınmaktadır. Bu arama motorunun, projeleri belirli parametrelere göre filtreleme ve ilişkili örnekler listeleme yeteneğine sahip olması hedeflenmektedir. Bu bağlamda, projeler arasındaki örtük ilişkileri açığa çıkarabilmek amacıyla veri madenciliği yaklaşımı benimsenmiş ve hızlı, ölçeklenebilir ve anlaşılır sonuçlar sağlayan K-ortalamalar (K-Means) kümeleme algoritması kullanılmıştır.

Çalışma üç temel aşamadan oluşmaktadır: Veri Toplama ve Organizasyonu (I) aşamasında, analiz edilecek mimari projelere ait bilgilerin sistematik biçimde toplanması ve depolanması yer almaktadır. Verilerin saklanacağı bir veri tabanı MySQL kullanılarak oluşturulmuştur. Proje bilgileri, çevrimiçi mimarlık platformlarından Python programlama dili aracılığıyla geliştirilen veri kazıma teknikleriyle otomatik olarak çekilmiş, bazı eksik ya da analiz için uygun olmayan veriler manuel girişle tamamlanmıştır. Toplanan veriler, mimar, fonksiyon, lokasyon, topoğrafya özellikleri, parsel tipi, yapı tipi, kullanılan malzeme gibi çeşitli özellikleri listeleyen 14 temel öznitelik altında yapılandırılmıştır. Veri Analizi (II) aşamasında, toplanan verilerin işlenerek projeler arasındaki örüntülerin ve örtük ilişkilerin ortaya konması amaçlanmıştır. Bu kapsamda, veri madenciliği yöntemlerinden biri olan kümeleme analizi uygulanmıştır. Verilerin analiz edilebilmesi için sayısallaştırma, normalizasyon gibi ön işlemler gerçekleştirilmiş; ardından K-ortalamalar algoritmasıyla projeler belirli kümelere ayrılmıştır. Elde edilen çok boyutlu veriler, boyut indirgeme ile iki boyuta düşürülmüş ve sonuçlar dağılım grafiği üzerinden görselleştirilmiştir. Arama Motoru ve Kullanıcı Arayüzü Geliştirilmesi (III) aşamasında, analiz edilen verilerin kullanıcıya anlamlı ve etkileşimli bir şekilde sunulabilmesi için bir arama motoru ve kullanıcı arayüzü geliştirilmiştir. Bu süreçte uygulama geliştirme ve görsel prototipleme yöntemleri kullanılmıştır. Python ve Flask ile geliştirilen arama motoru, kullanıcı sorgularını analiz sonuçlarıyla eşleştirerek ilişkili projeleri listeleyebilmektedir. Arayüz tasarımı ise Figma aracılığıyla görselleştirilmiş, filtreleme seçenekleri ve yapay zekâ destekli chatbot gibi ileri seviye modüllere temel oluşturacak biçimde yapılandırılmıştır.

Mevcut dijital mimarlık platformlarının yetersiz kaldığı alanlara çözüm sunan bu sistem, projeler arasında niteliksel ilişkiler kurarak kullanıcıya daha anlamlı ve yönlendirici sonuçlar sunabilmektedir. Eğitim ve profesyonel tasarım ortamlarında kullanılabilecek kişiselleştirilmiş bir araştırma aracının ilk prototipini oluşturmaktadır. Tasarım karar süreçlerine katkı sağlayacak biçimde geliştirilmeye açık olan bu sistem; veri havuzunun genişletilmesi, görsel analizlerin entegrasyonu, otomatik bilgi çekme ve doğal dil işleme gibi yapay zekâ teknikleriyle desteklenerek, mimarlık disiplininde dijital bilgi erişimine yönelik yeni bir paradigma önermektedir. Bu bağlamda, yalnızca proje araması yapan bir araç değil; aynı zamanda tasarım sürecini yönlendiren akıllı bir karar destek sistemi olarak evrimleşme potansiyeline sahiptir.

Anahtar Kelimeler: *Mimari Proje Analizi, Örnek Proje İnceleme, Özelleştirilmiş Arama Motoru, Veri Madenciliği.*

2025 MSTAS MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Designing a Customized Search Engine for Precedent Analysis in the Architectural Design Process

Betül Uçkan[1]; Gülen Çağdaş[2]; Gülce Kırdar[3]
[1]İstanbul Medipol Üniversitesi & İstanbul Teknik Üniversitesi; [2] İstanbul Teknik Üniversitesi; [3] Yeditepe Üniversitesi;
[1]betul.uckan@medipol.edu.tr; [2]glcagdas@gmail.com; [3]gulce.kirdar@yeditepe.edu.tr

Abstract

The analysis of precedent projects in architectural design constitutes a critical phase for developing design knowledge through learning from existing examples. However, widely used digital architecture platforms today often fail to adequately support users in searching for projects based on specific criteria and accessing similar examples aligned with their research focus. Considering the limitations of these platforms in providing users with fast and accurate access to content matching their specific search criteria, this study addresses the design of a customized search engine tailored to user needs. The proposed search engine aims to enable filtering projects based on specific parameters and listing related examples. In this context, a data mining approach was adopted to uncover latent relationships between projects, employing the K-Means clustering algorithm, which offers rapid, scalable, and interpretable results.

The study is structured around three main phases: In the Data Collection and Organization (I) phase, information on architectural projects to be analysed was systematically collected and stored. A MySQL database was created to store the data. Project information was automatically retrieved from online architecture platforms using web scraping techniques developed in Python, and missing or unsuitable data for analysis was manually completed. The collected data was structured under 14 key attributes, including architect, function, location, topographical features, parcel type, building type, materials used, etc.. In the Data Analysis (II) phase, the aim was to process the collected data to reveal patterns and latent relationships between projects. Clustering analysis, a method of data mining, was applied for this purpose. Pre-processing techniques such as digitization and normalization were carried out to prepare the data for analysis. Subsequently, projects were clustered using the K-Means algorithm. The resulting high-dimensional data was reduced to two dimensions through dimensionality reduction and visualized via a scatter plot. In the Search Engine and User Interface Development (III) phase, a search engine and user interface were developed to present the analysed data to users in a meaningful and interactive manner. Application development and visual prototyping methods were employed in this process. The search engine, developed using Python and Flask, matches user queries with analysis results and lists related projects accordingly. The user interface was visualized using Figma and structured to form the basis for advanced modules such as filtering options and an AI-supported chatbot.

This system offers a solution to the limitations of current digital architecture platforms by establishing qualitative connections between projects and providing users with more meaningful and guided search results. It represents the first prototype of a personalized research tool that can be used in both educational and professional design environments. Although still in its prototypical phase, the system is open to further development through the expansion of the dataset, integration of visual analysis tools, automated data retrieval, and the use of artificial intelligence techniques such as natural language processing. In this regard, it has the potential to evolve not only as a project search tool but also as an intelligent decision support system capable of guiding the architectural design process.

Keywords: *Architectural Precedent Analysis, Project Case Studies, Customized Search Engine, Data Mining.*

Giriş

Mimari tasarım süreci, yaratıcı fikirlerin geliştirilmesini ve bilgiye dayalı kararların alınmasını gerektiren çok aşamalı bir süreçtir. Bu sürecin önemli aşamalarından biri olan örnek proje incelemesi (*precedent analysis, case studies*), tasarım bilgisinin pekişmesi, fikrin gelişmesi ve zenginleşmesi için önemli bir role sahiptir. Mevcut projeleri inceleyip onlardan öğrenerek ilerleme hali Unwin'in (2014) evrimci gelişimin, geçmişin ne olduğunu anlamaya bağlı olduğunu dile getirdiği söylemi üzerinden daha iyi okunabilir (Schwartz, 2015). Bu aşama, mimarlık eğitiminde de yaygın bir şekilde kullanılmaktadır ve öğrencilerin aktif ve analitik keşif sürecini teşvik etmesi nedeniyle önemli bir yere sahiptir (Balmer & Swisher, 2013). Öğrenciler, örnek projeler aracılığıyla; kendi projeleri için ilham edinebilir, tasarım stratejilerini anlama yetilerini geliştirebilir ve tasarım teorisinin pratikteki karşılıklarını daha iyi analiz edebilir (Schwartz, 2015).

Örnek proje inceleme sırasında, araştırılan konu için verimli projelerin seçimi ve doğru kriterlerle değerlendirilmesi gibi konular ardında birtakım karar problemleri barındırmaktadır. Özellikle çevrimiçi kaynak kullanımında, internette artan veri miktarından ötürü istenilen bilgiye doğrudan erişimin zorlaştığı görülmektedir (Pretschner & Gauch, 1999; Choudhary vd., 2019). Örnek inceleme aşamasında proje tasarımı sürecini destekleyecek nitelikli örneklere doğrudan erişimin de zorlaştığı söylenebilir. Günümüzde yaygın kullanılan mimarlık platformları (Archdaily; Dezeen; Architizer; Arkitera, t.y.) projeleri listeleme ve ilişkili örnekleri sunma konusunda yetersiz kalmaktadır. Kullanıcılar, belirli bir kriterle araştırma yaparken filtreleme eksiklikleri ve projeler arasında örtük ilişkilerin eksik olması gibi sorunlarla karşılaşmaktadır.

Bu çalışma, söz konusu soruna odaklanarak, mimari projeleri daha etkili bir şekilde analiz etmeyi sağlayan, filtreleme ve karar destek mekanizmalarına sahip bir arama motoru tasarımını hedeflemektedir. Sisteme, bir karar destek mekanizması olarak *veri madenciliği* ve *K-ortalamalar (K-Means)* kümeleme algoritması entegre edilmiştir. Bu sistemin amacı, proje araştırma aşamasında kullanıcıların kendi konularıyla ilgili daha nitelikli sonuçlara doğrudan erişebilmelerini sağlayacak; tasarım süreçlerini destekleyen ve analiz sürecini hızlandıran pratik bir araç sunmaktır.

Çalışma genel başlıklarda aşağıdaki kurguyla ilerlemektedir: Giriş (I) bölümünde, çalışmanın konusuna, arka planına, motivasyonuna ve hedeflerine dair genel bilgiler yer almaktadır. Literatür Araştırması ve Metodoloji (II) bölümünde arama motoru üzerine yürütülen araştırmalarda kullanılan yöntemlere ve veri madenciliğine dair genel bilgi verilmektedir. Yöntem (III) bölümünde veri madenciliği ve arama motoru tasarımı için kullanılan yöntemlere ve uygulama adımlarına dair bilgiler yer almaktadır. Sonuç ve Tartışmalar (IV) bölümünde, çalışmada elde edilen verilere dair genel bilgiler, çalışmanın potansiyeline ve gelecek çalışmalara dair fikirler sunulmaktadır.

1. Literatür Araştırması ve Metodoloji

2000'li yıllardan itibaren 'arama motoru *(search engine)*' tasarımı üzerine yapılan araştırmaların hızla artmakta olduğu görülmektedir (Scopus, 2024). Büyük veri *(big data)* çağında, veri hacmi ve çeşitliliği hızla artmış, bu da kullanıcıların ihtiyaç duydukları bilgilere erişimini daha karmaşık hale getirmiştir (Mayer-Schönberger & Cukier, 2013; Naimi & Westreich, 2014). Bu nedenle, arama motorlarının daha verimli ve etkili hale getirilmesi, bilgi erişimini kolaylaştırmak için kritik öneme sahiptir.

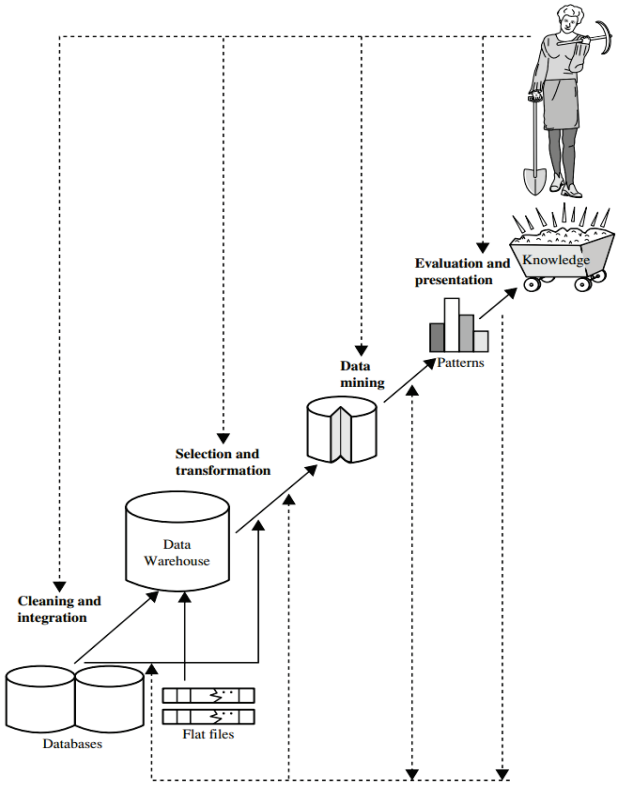
Bir arama motoru, kullanıcı sorgularını veri havuzundaki bilgilerle eşleştirip listelemek amacıyla *anahtar kelime sorgulama (keyword-based querying), desen eşleştirme (pattern matching), semantik arama (semantic search)* gibi çeşitli algoritmalar kullanır (Baeza-Yates & Ribeiro-Neto, 1999; Tran-Thien, 2022; Mudgil vd., 2023; Ignite-AI Blog, 2023). Veri tabanı ile sorgu kelimeleri arasında çok boyutlu ilişkiler kurabilmek için, veriden bilgi keşfini mümkün kılan yöntemler devreye girmektedir. Bu yöntemler, mevcut veriden anlamlı bilgi çıkarılmasını ve arama sonuçlarının bu bilgiyi yansıtacak şekilde listelenmesini sağlayan belirli karar destek mekanizmalarını içerir. Veriden bilgi keşfi süreci, Ackoff'un (1989) tanımladığı *DIKW Piramidi (Data-Information-Knowledge-Wisdom)* ile daha iyi anlaşılabilir. Bu piramitte, işlenmemiş ham verinin *(data)* organize edilerek enformasyona *(information),* enformasyonun yorumlanarak bilgiye *(knowledge)* ve son olarak bilginin doğru kararlar almayı mümkün kılan bilgelik *(wisdom)* düzeyine ulaşması süreçleri açıklanmaktadır (Ackoff, 1989; Rowley, 2007).

Arama motoru tasarımında bu keşif süreci için *veri madenciliği (data mining), makine öğrenmesi (machine learning), kümeleme algoritmaları (clustering algorithms), derin öğrenme (deep learning), sinir ağları (neural networks), yapay zekâ (artificial intelligence) ve doğal dil işleme (natural language processing)* gibi çeşitli yöntemler kullanıldığı

görülmektedir (Li vd., 2002; Chen vd., 2003; Schenker vd., 2005; Ma vd., 2007; Beneventano & Bergamaschi, 2014; Agarwal vd., 2017; Soliman, 2018; Olson, 2022; Mehdi, 2023; Mudgil vd., 2023; Rovatsos & Filgueira, 2023; Stokel-Walker, 2023). Bu çalışmada, literatürde yaygın olarak kullanılıyor olması ve örtük bilgiyi keşfetmeye olanak sağlaması nedeniyle, *veri madenciliği (data mining, knowledge discovery from data)* yöntemi seçilmiştir.

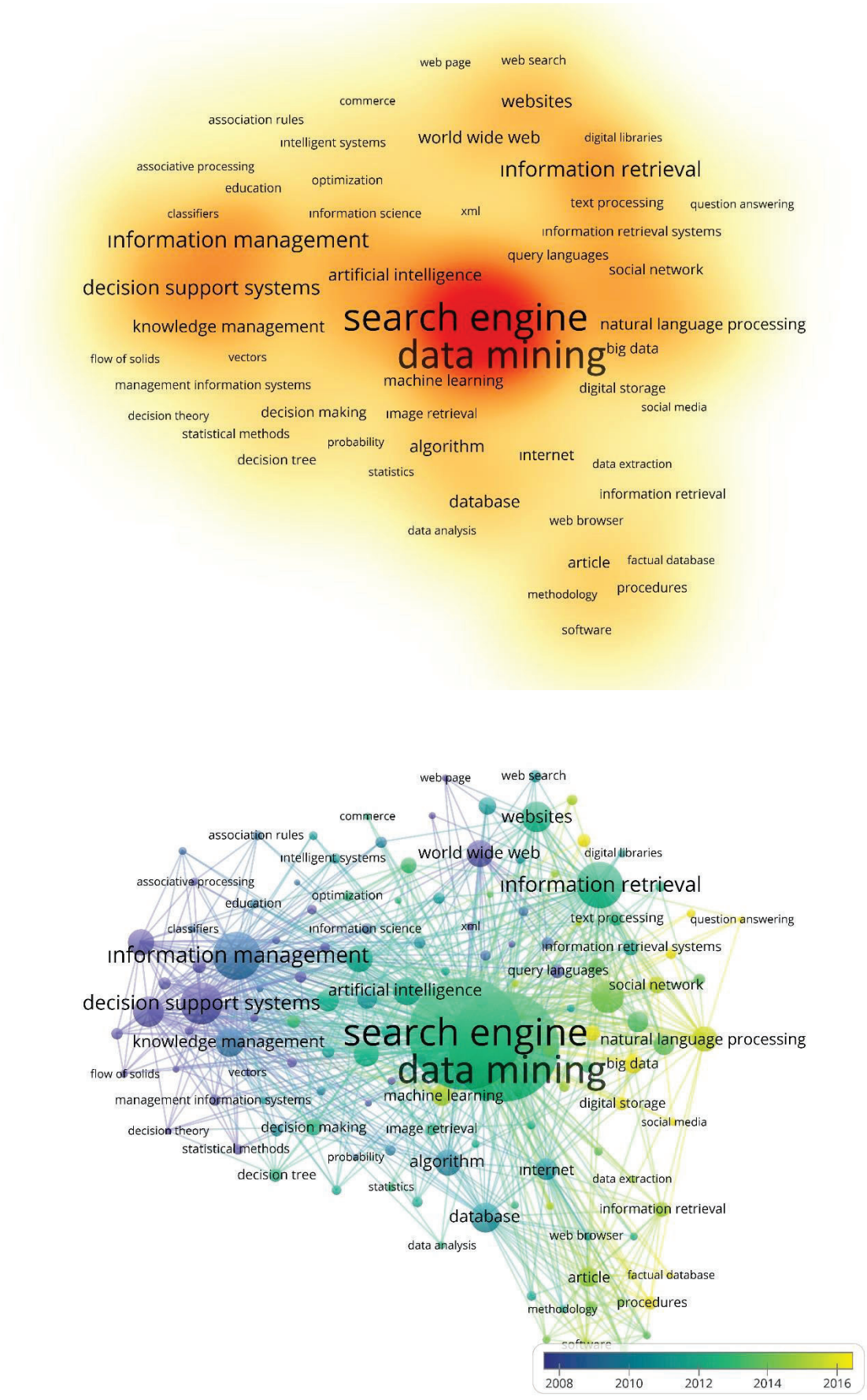
Veri madenciliği, 1960'lardan beri büyük veri kümelerinden anlamlı bilgileri ve desenleri keşfetmek için kullanılan bir yöntemdir (Fayyad vd., 1996; Han vd., 2012). Veri tabanlarında, veri merkezlerinde veya diğer veri depolarında bulunan geniş hacimli verilerden yararlı bilgi çıkarımı için kullanılmaktadır. Keşif süreci Şekil 1'de görülmektedir (Han vd., 2012):

a. Veri temizleme (*data cleaning*): Tutarsız verileri kaldırmak için mevcut verilerin temizlenmesi,
b. Veri entegrasyonu (*data integration*): Çoklu veri kaynaklarının birleştirilmesi,
c. Veri seçimi (*data selection*): Analiz için ilgili verilerin alınması,
d. Veri dönüşümü (*data transformation*): Verilerin özet veya birleştirme işlemleri gerçekleştirilerek madenciliğe uygun biçime dönüştürülmesi,
e. Veri madenciliği (*data mining*): Veri örüntülerinin çıkarıldığı esas süreçler,
f. Desen değerlendirmesi (*pattern evaluation*): İlginç örüntülerin tanımlanması,
g. Bilgi sunumu (*knowledge presentation*): Çıkarılan bilginin kullanıcılara sunulması için görselleştirmesi ve bilginin temsili.



Şekil 1: Veri madenciliği ile bilginin keşif aşamaları (Han vd., 2012).

Arama motoru tasarımında veri madenciliği kullanılması üzerine yürütülen çalışmaları analiz etmek amacıyla Scopus (2024) veri tabanından bir veri seti hazırlanmış ve *VOSviewer* ile *bibliyometrik ağ* analizine tabi tutulmuştur (Van Eck & Waltman, 2017; 2024). Kullanılan anahtar kelimelerin yoğunluklarını ve yıllara göre dağılımlarını gösteren analizler **Şekil 2**'de yer almaktadır. Bu analiz sonucunda, 2000'li yılların başından beri *veri madenciliği* yönteminin aktif olarak kullanılmakta olduğu, zamanla *makine öğrenme, yapay zekâ, doğal dil işleme* sistemlerine dayalı yöntemlerin de araştırmalara dahil edildiği görülmektedir.



Şekil 2: Literatürdeki çalışmaların bibliyometrik ağ analizi
Yoğunluk (üstte) ve yıllara göre değişim (altta) (Van Eck ve Waltman, 2017; 2024).

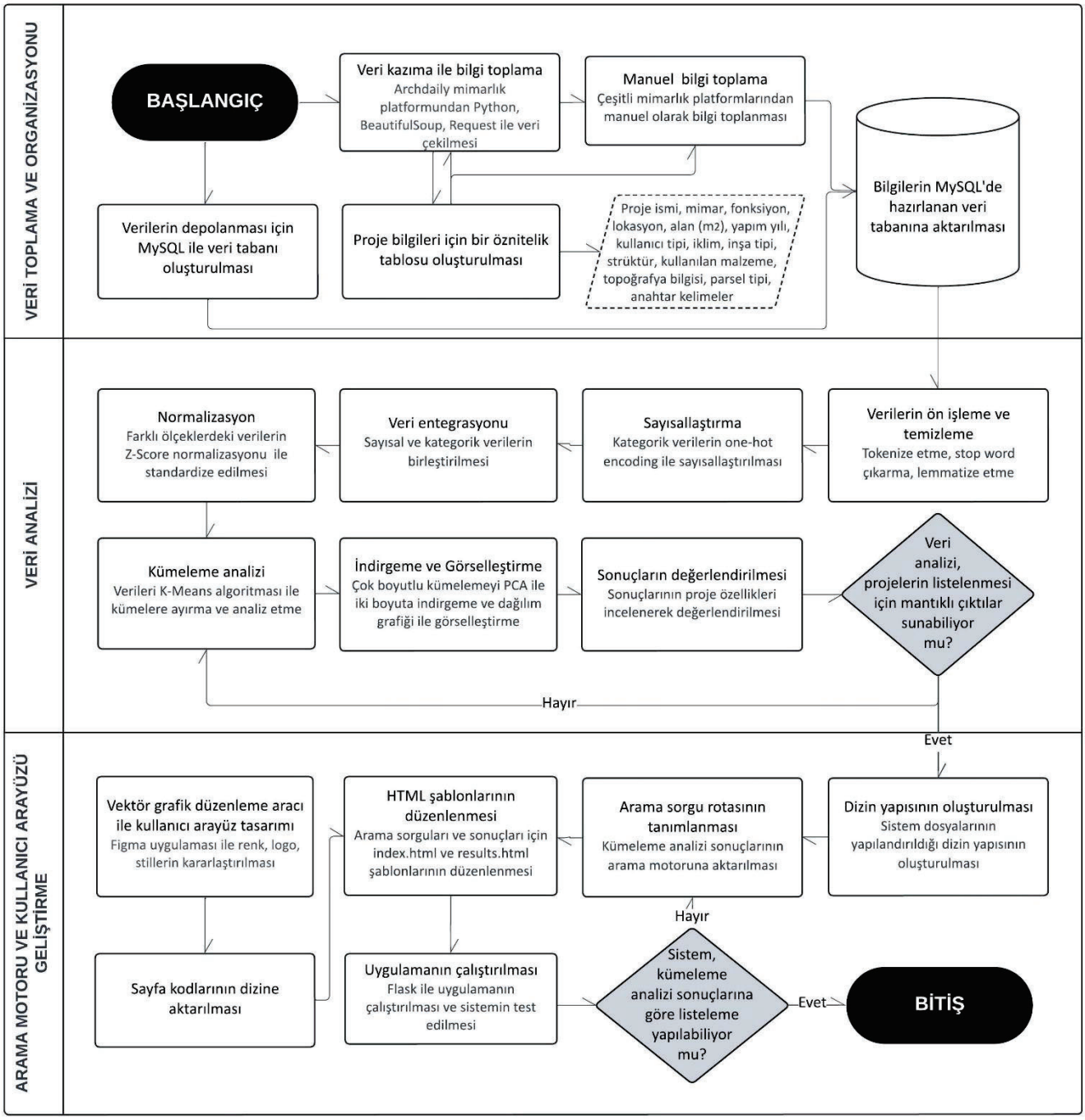
2. Yöntem

Temelde süreç, 'verilerin toplama ve organizasyonu', 'veri analizi', ve 'arama motoru ve kullanıcı arayüzü geliştirilmesi' şeklinde tarif edilebilir. Çalışmanın aşamaları aşağıdaki gibidir ve **Şekil 3**'te yer alan iş akış diyagramında gösterilmektedir:

I- **Veri toplama ve organizasyonu:** Verileri depolamak için bir veri tabanı oluşturulması ve analiz etmek üzere ilgili kaynaklardan proje verileri toplanması gerekmektedir. İlgili bilgilerin çekilmesi için *veri kazıma (web scraping)* ve *manuel bilgi toplama* yöntemleri kullanılmıştır.

II- **Veri analizi:** Bilginin keşfi ve verileri işleyerek anlamlı desenler ortaya çıkarmak için toplanılan verilerin analiz edilmesi gerekmektedir. Veri analizi için *veri madenciliği-kümeleme analizi* kullanılmıştır.

III- **Arama motoru ve kullanıcı arayüzü geliştirilmesi:** Veri tabanında arama-sorgu yapabilmek için arama motoru ve kullanıcı arayüzü geliştirilmesi gerekmektedir. *Uygulama geliştirme (application development)* ve *görsel prototipleme (visual prototyping)* yöntemleri kullanılmıştır.



Şekil 3: Çalışmanın iş akış diyagramı.

2.1. Veri Toplama ve Organizasyonu

İlk aşamada, mimarlık projeleriyle ilgili verilerin depolanabilmesi ve ilgili analiz işlemlerin yapılabilmesi için bir veri tabanı oluşturulması gerekmektedir. Bu işlem için *MySQL* yönetim sistemi kullanılmıştır (Oracle Corporation, 2023). Ardından, bu veri tabanında depolamak ve analiz işlemi gerçekleştirmek üzere ilgili kaynaklardan bilgi toplama aşaması başlatılmıştır. *Veri kazıma (web scraping)* ve *manuel bilgi toplama* yöntemleri kullanılmıştır.

Proje bilgilerini toplamak üzere Archdaily (t.y.) çevrimiçi mimarlık platformu kullanılmış ve son yıllara ait 30 kütüphane projesi seçilmiştir. Projelere ilişkin hangi bilgilerin toplanacağının belirlenmesi ve veri organizasyonu sağlanabilmesi için bir öznitelik tablosu oluşturulmuştur. Tablodaki başlıklar 'proje ismi', 'mimar', 'fonksiyon', 'lokasyon', 'alan (m^2)', 'yapım yılı', 'kullanıcı tipi', 'iklim', 'inşa tipi', 'strüktür', 'kullanılan malzeme', 'topoğrafya bilgisi', 'parsel tipi' ve 'anahtar kelimeler' şeklindedir **(Tablo 1).**

Tablo 1: Proje bilgilerini toplamak için belirlenen 14 öznitelik.

Başlık	Mimar	Fonksiyon	Lokasyon	Kullanıcı tipi	İklim	Alan (m^2)
Yıl	İnşa tipi	Strüktür	Kullanılan malzeme	Topoğrafya bilgisi	Parsel tipi	Anahtar kelimeler

Veri kazıma işlemi, Python'da (2024) *BeautifulSoup4, Pandas, Request, Mysql.connector, SQLAlchemy* kütüphaneleri kullanılarak yürütülmüştür (Beautiful Soup, 2023; Pandas, 2023; Request, 2023; Oracle Corporation, 2024; SQLAlchemy, 2024). Aşağıdaki adımlarla tarif edilebilir:

a. Veri kazıma işlemi yapılacak URL'ler bir liste içinde tanımlanmıştır.
b. Belirtilen URL'lerden 'başlık', 'mimar', 'fonksiyon' ve 'konum' bilgileri çekilmiş ve bir listeye eklenmiştir.
c. Elde edilen veriler bir veri çerçevesine *(dataframe)* dönüştürülmüştür.
d. Veri çerçevesinin, MySQL'de oluşturulan veri tabanına aktarılması sağlanmıştır.

Kaynak sayfanın HTML adresinin daha kapsamlı bilgiler için *veri kazıma* işlemine uygun olmaması ve bazı bilgilerin de ancak çıkarım ve yorumlama ile edinilebiliyor olması nedeniyle bilgilerin bir kısmı tabloya manuel olarak eklenmiştir. Böylece 30 projenin bilgilerini, toplam 14 farklı öznitelik üzerinde toplayan bir veri havuzu üretilmiştir **(Tablo 2)**.

Tablo 2: Tabloya eklenen bilgiler.

User	Climate	Area	Year	Construction	Structure	Material	Topogra	Parcel	Keywords
Children and ...	Humid subtr...	610	2021	Renovation	Masonary	Bricks; Wood	Flatten	Seperated	Gender-inclusive design; Colorful interior; Old a...
University co...	Continental	3200	2023	New Const...	Steel	White plaster; Wood...	Flatten	Seperated	Urban park; Skylight; Open and green areas; In...
Community	Continental	2000	2021	Adaptive R...	Steel	Concrete; Iron	Flatten	Seperated	Dystopia effect; Adaptive reuse; Colored lightin...
University co...	Humid subtr...	18...	2023	New Const...	Reinforced C...	Concrete; Glass	Flatten	Seperated	Nine towers; Concrete effect; Campus life
Community	Humid subtr...	14...	2023	New Const...	Reinforced C...	Glass; Stone; Concrete	Sloped	Seperated	Historical context; Genius loci; Water courtyard...
Community	Continental	6000	2022	New Const...	Reinforced ...	Bricks; Wood; Concrete	Flatten	Seperated	Spiritual presence; Religious-like atmosphere; S...
University co...	Mediterranean	8185	2020	New Const...	Steel	White panels	Sloped	Seperated	Excavated rock; Historical context; Mixing natur...
Community	Tropical mon...	770	2023	Renovation	Steel	Concrete; Gray panels	Flatten	Attached	Panoramic views; Free plan; Circular shaped; C...
Children	Oceanic	2227	2023	New Const...	Timber frame	Wood; Stone; Metal	Flatten	Seperated	Open and green area; Walkable roof; Green ro...
Community	Temperate ...	250	2021	New Const...	Steel	Wood; Precast concr...	Flatten	Attached	Connection with heritage building; Green areas
Community	Mediterranean	2858	2023	New Const...	Steel	Light-colored concret...	Flatten	Seperated	Central garden; Green area; White and black in...
Community	Humid subtr...	2387	2023	Renovation	Reinforced C...	Red paint; Red tile	Sloped	Attached	Reuse; Old and new combination; Sustainability...
University co...	Temperate c...	40...	2023	New Const...	Steel	Glass; Aliminium panl...	Flatten	Seperated	Panoramic view; Local climate characteristics; Fr...
Private	Humid conti...	190	2022	New Const...	Timber frame	Wood; Tile	Flatten	Seperated	Sustainability; Vernacular traditions; Old and ne...
Farmers	Humid subtr...	113	2022	New Const...	Steel	Concrete; Wood	Sloped	Seperated	Earten finish; Walkable roof; Green roof; Dome;...
Community	Subtropical	1322	2023	Renovation	Reinforced C...	Wood; White plaster	Flatten	Seperated	Renovation; Modular bookshelves
Community	Humid subtr...	1017	2023	Renovation	Reinforced C...	Concrete; Bricks	Flatten	Seperated	Organic design; Green texture; Inclusive desing...
Community	Mediterranean	1065	2023	Renovatio...	Reinforced C...	White plaster; Tile	Flatten	Attached	Old and new combination; Wwhite exterior
Community	Mediterranean	650	2020	New Const...	Reinforced C...	Concrete; Wood	Sloped	Seperated	Landscaped roof; Green roof; Walkable roof; N...
Community	Humid subtr...	11...	2023	Renovation	Reinforced C...	Perforated Aluminiu...	Flatten	Seperated	Cultural landmark; Renovation; Semi-open publi...
Children	Continental	3089	2023	Renovation	Reinforced C...	Polycarbonate panel...	Flatten	Seperated	Renovation; Colored spaces; White interior; Sk...
School comm...	Humid subtr...	99...	2021	New Const...	Steel	Wooden; White pan...	Flatten	Seperated	Wooden steps; Campus life
Community	Continental	772	2023	New Const...	Reinforced C...	Glass; Black panels	Sloped	Seperated	Zero Carbon; Atrium; Black interior; Solar and w...
Community	Humid subtr...	756	2023	New Const...	Reinforced C...	Wood; Glass	Flatten	Seperated	Column free space; Panaromic view; Nature; Gr...
Community	Continental	316	2021	New Const...	Reinforced C...	Wood; Concrete; Glass	Flatten	Seperated	Flower field; Village; Angular exterior; Intercon...
Community	Humid subtr...	100	2023	New Const...	Reinforced C...	Brick	Flatten	Seperated	Spiral shell shaped; Vernacular material; Digital i...
University co...	Temperate ...	90...	2022	Renovation	Reinforced C...	Concrete; Wood	Flatten	Seperated	Brutalist; Renovation

2.2. Veri Analizi

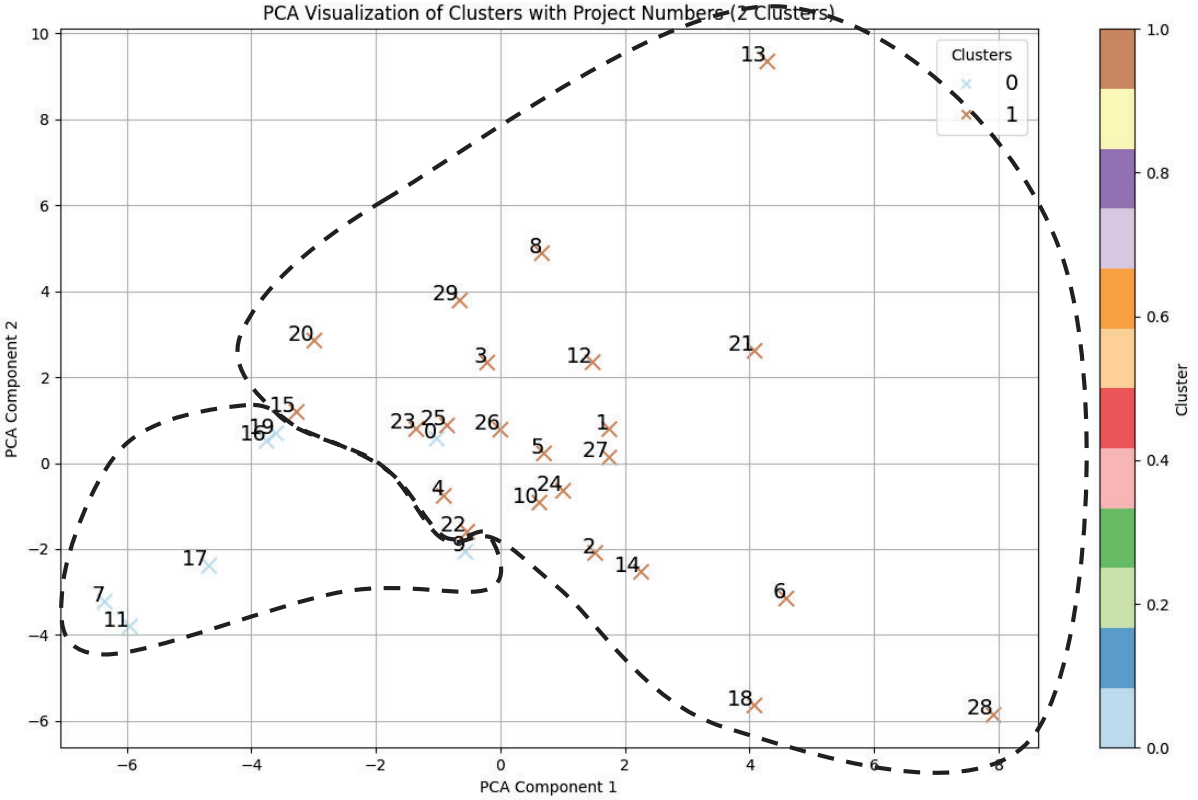
Çalışmada veri analizi için *veri madenciliği* yöntemlerinden, mevcut verileri anlamaya ve tanımlamaya olanak sağlayan *kümeleme analizi* yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, benzer niteliklere sahip verilerin aynı kümeye, farklı niteliklere sahip verilerin farklı kümelere yerleştirilmesi ile verilerin ayrıştırılmasını sağlamaktadır (Han vd., 2012; Çalışır Adem, 2020). Kullanım kolaylığı, çıktıların anlaşılabilirliği ve az sayıda veri ile de anlamlı çıktılar elde edebilmesi nedeniyle, bir *kümeleme analiz* yöntemi olan *K-ortalamalar (K-Means)* algoritması tercih edilmiştir. *K-ortalamalar* algoritması, veri noktalarını k adet küme *(cluster)* halinde gruplamak için kullanılmaktadır ve veriler arasındaki uzaklık ölçüsüne bağlı olarak çalışmaktadır (Jin & Han, 2011). Çalışma prensibi, rasgele olarak k küme merkezi seçimi, her bir verinin en yakın küme merkezine atanması, her bir kümenin yeni ortalamasının hesaplanması ve küme merkezleri sabit kalana kadar bu işlemin tekrarlanması şeklinde tarif edilebilir (Han vd., 2012).

Veri analiz süreci, Python'da (2024) *NLTK (2009)*, *Pandas (*2023*), Matplotlib (*2024*), NumPy (*2024*), Scikit-learn (*2024*), SQLAlchemy (2024)* kütüphaneleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Süreç, *veri ön işleme ve temizleme*, *sayısallaştırma*, veri entegrasyonu, *normalizasyon*, *kümeleme analizi*, *veri indirgeme ve görselleştirme* aşamalarından oluşmaktadır (Jolliffe, 2002; Geron vd., 2011; Han vd., 2012; Visually Explained, 2021):

a. **Ön işleme ve temizleme:** Veri setindeki eksik verilerin sonuçları yanıltmaması için tespit edilip temizlenmesi ve analiz sürecine hazırlık amacıyla verilerin *ön işleme (preprocessing)* tabi tutulması gerekmektedir. Çalışmada ön işleme sürecinde *kelime birimlerine ayırma (tokenize), gereksiz kelimelerin çıkarılması (stop word removal)* ve *köküne indirgeme (lemmatize)* işlemleri kullanılmıştır.
b. **Sayısallaştırma:** Veri seti hem sayısal (1,2,3..) hem de kategorik (abc, kelime, ..) veriler içermektedir; sayısal veriler genellikle doğrudan analiz edilebilirken, kategorik verilerin analiz edilebilmesi için sayısallaştırılması gerekmektedir (Geron vd., 2011). Çalışmada *tek sıcak kodlama (one hot encoding)* yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem ile her kategorik değer ikili *(binary)* sütunlara çevrilmiş ve orijinal veride o değerin bulunup bulunmadığını belirten 1 veya 0 değerine dönüştürülmüştür.
c. **Veri entegrasyonu:** Sayısallaştırma işlemi sonrası, her iki tür verinin birleştirilmesi gerekmektedir (Geron vd., 2011). Bu birleştirme, tüm veri setinin tek bir matriste toplanmasını mümkün kılmaktadır. Kullanıma doğrudan hazır olan 'alan' ve 'yıl' gibi sayısal veriler ile sayısallaştırma işlemi gerçekleştirilen verilerin birleştirilmesi sağlanmıştır.
d. **Normalizasyon (standartlaştırma):** Veri türlerinin çok farklı aralıklarda olması durumunda, kümelerin bozulmaya başladığı görülmektedir. Bu nedenle farklı ölçeklerdeki verilerin aynı ölçeğe indirgenmesi -normalleştirilmesi- gerekmektedir (Han vd., 2012). Çalışmada bu işlem için, *Z-skoru normalizasyonu (Z-score normalization)* kullanılmıştır. Bu yöntem, verilerin ortalamasını 0, standart sapmasını ise 1 olacak şekilde ölçeklendirmektedir.
e. **Kümeleme analizi:** Çalışmada kümeleme analiz modeli olarak *K-ortalamalar (K-Means)* algoritması kullanılmıştır. *K-ortalamalar* ile veriler belirlenen küme sayısına bölünerek analiz edilmiş ve her bir küme, bir numara ile etiketlenerek tarif edilmiştir. Projede farklı küme sayıları üzerinden (n=2,3,4,5) denemeler yürütülmüş, fakat daha anlamlı sonuçlar üretmesi nedeniyle n=2 olacak şekilde işlem sürdürülmüştür.
f. **Veri indirgeme ve görselleştirme:** Çok boyutlu olarak üretilen kümeleme işleminin anlaşılabilir olması, karmaşıklığının azaltılması ve önemli bilgilerin korunarak daha az boyutta ifade edilebilmesi için veri indirgeme işlemi yapılması gerekmektedir (Jolliffe, 2002; Visually Explained, 2021). Bu işlem için, *temel bileşen analizi* (PCA – *Principal Component Analysis*) yöntemi kullanılmıştır. Verideki en büyük varyansa sahip yönler bulunup bu yönlere göre verinin yeniden projelendirilmesi sağlanmıştır. Bu işlem sonrasında, kümelerin ve veri noktalarının dağılımı bir *dağılım grafiği (scatter plot)* üzerinde görselleştirilmiştir.

Tüm bu adımlar sonrasında bir matris üzerine yerleşen veriler **Şekil 4**'te gösterilmiştir. Grafikte, belirli projelerin birbirlerine daha yakın ya da daha uzak konumlanarak kümelenme sınırları oluşturduğu görülmektedir. Bu aşamada, kümeleme sonuçlarının yorumlanması; kümelerin konumları, birbirlerine olan yakınlıkları ve hangi verinin hangi kümede yer aldığı gibi bilgilerin tartışılması gerekmektedir. Kümeler arası mesafelerin analizi ile; projelerin benzerlikleri ve farklılıkları, belirli bir kümede yer alan projelerin incelenmesiyle de projeler arasındaki örtük ilişkiler okunabilir. Dağılım grafiğinde yer alan kümeleme sonuçları, veri havuzunda yer alan diğer bilgilerle birlikte incelendiğinde, bazı özniteliklerin daha etkili olduğu görülmektedir. Örneğin, 0 numaralı kümedeki projeler incelendiğinde; *'inşa tipi'* özniteliğinde genellikle renovasyon projelerinin yaygın olduğu, *'topoğrafya'* bakımından yaygınlıkla düz arazilerde

konumlandığı ve *'strüktür tipi'* olarak çoğunlukla betonarme yapıların seçildiği gözlemlenmiştir. *'Anahtar kelimeler'* özniteliğinde ise eski ve yeni öğelerin kombinasyonu olan projelerin öne çıktığı anlaşılmaktadır.



Şekil 4: Kümeleme sonuçlarının görselleştirmesi

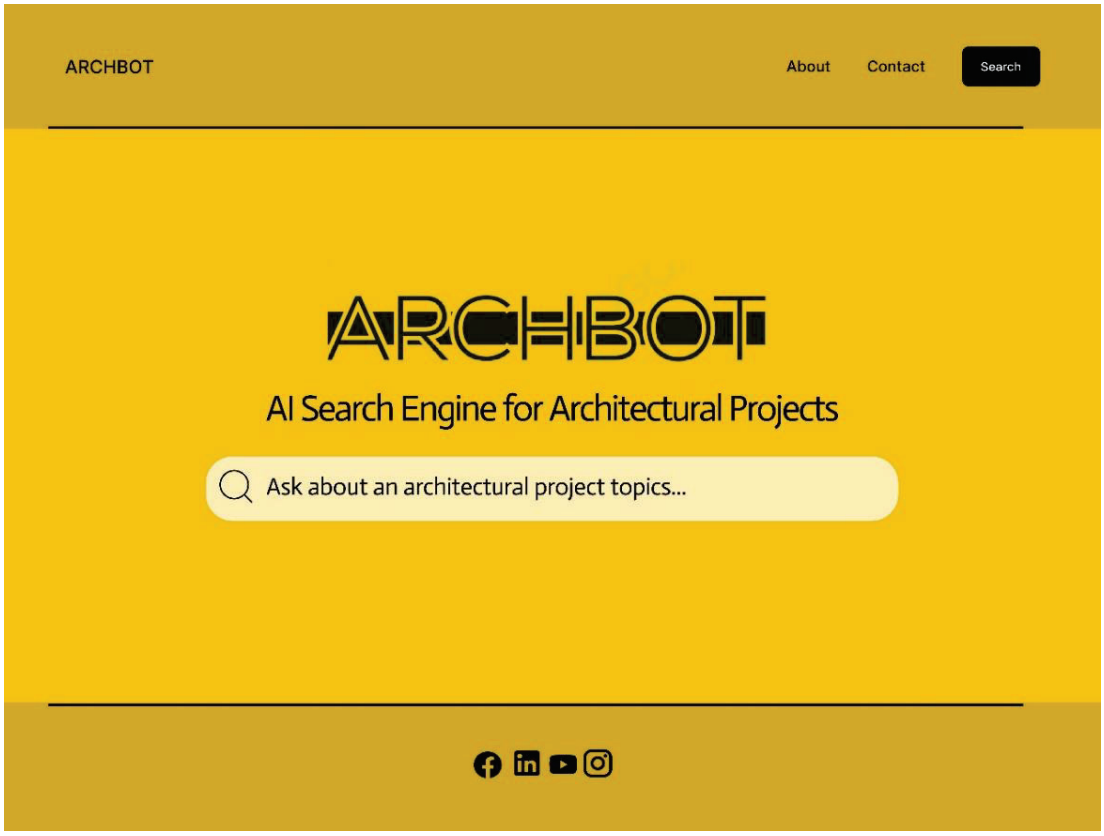
2.3. Arama Motoru ve Kullanıcı Arayüzü Geliştirilmesi

Bu aşamada, analiz edilen verilerin bir arama motoruna entegre edilerek, kullanıcıya etkileşimli bir arayüz aracılığıyla sunulması hedeflenmiştir.

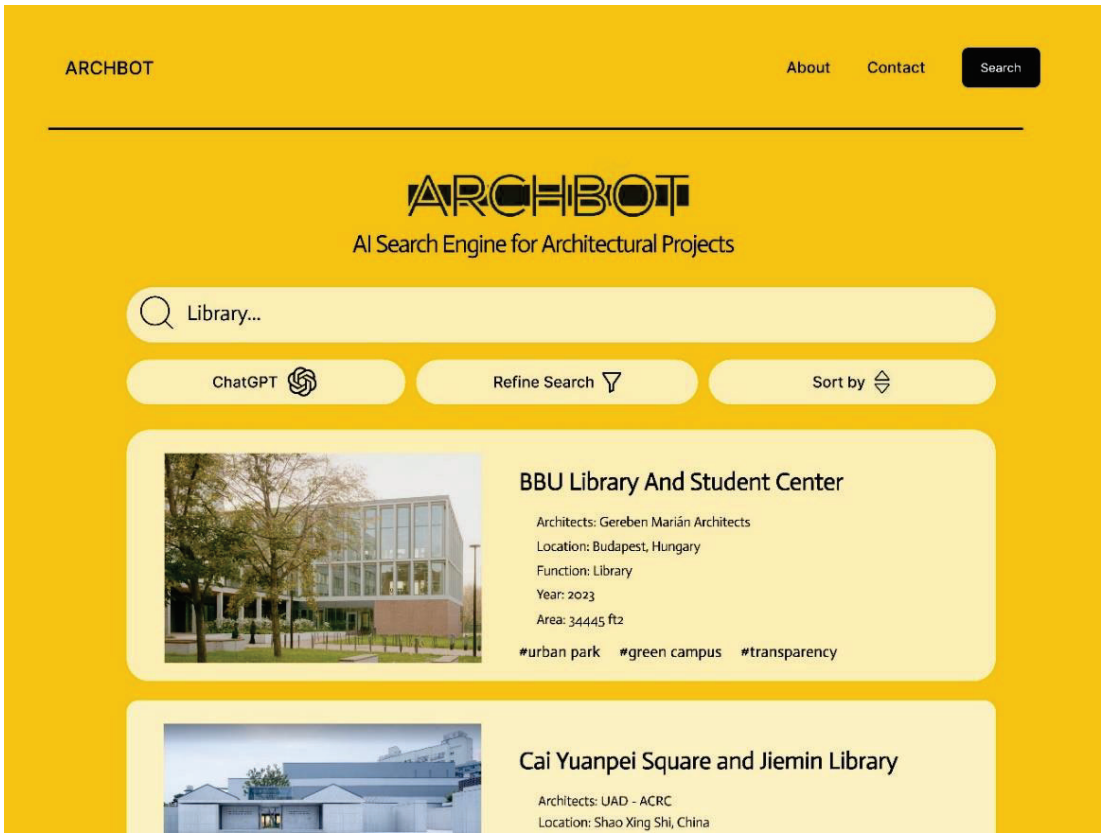
Arama motorunun geliştirilmesi sürecinde, Python *Flask* (2024) kütüphanesi kullanılarak geliştirilen bir web uygulaması aracılığıyla, kullanıcı sorgularının veri madenciliği sonuçlarıyla eşleştirilmesi sağlanmıştır. Uygulamanın geliştirilme süreci, sistem dosyalarının yapılandırıldığı dizin yapısının oluşturulması, HTML şablonlarının düzenlenmesi, analiz aşamasında elde edilen kümeleme verilerinin kullanılmasıyla arama fonksiyonlarının programlanması ve sistemin test edilmesini içermektedir. Geliştirilen arama motoru, kullanıcıların gerçekleştirdiği sorgulara yanıt olarak, sonuçları kümeleme analizine göre sıralayabilmektedir. Böylece kullanıcıların araştırdıkları projelerle ilişkili diğer projelere, veri keşfi sürecinde elde edilen örtük bilgi aracılığıyla ulaşmaları mümkün hale gelmektedir.

Kullanıcı arayüzü tasarımı ise, *görsel prototipleme (visual prototyping)* ve *kullanıcı deneyimi tasarımı (user experience design)* yöntemleri doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Arayüz yapısını tanımlamak ve kullanıcı deneyimini görselleştirmek amacıyla *Figma* (2024) vektörel grafik tasarımı ve prototipleme aracı kullanılmıştır. Kullanıcının proje araması yapabildiği ve sonuçları kümelenmiş biçimde görüntüleyebildiği bir sistem önerilmiştir **(Şekil 5, 6)**. Arayüz tasarımı, ileride entegre edilmesi planlanan filtreleme mekanizmaları ve gelişmiş etkileşim modülleri için altyapı niteliği taşımaktadır. Örneğin, sistemin gelecekte gelişimi için yapay zeka destekli, konuşma tabanlı bir *chatbot* modülünün de entegre edilebileceği planlanmaktadır. Ayrıca, projelerin listelenmesi için analiz aşamasında kullanılan 14 farklı özniteliğe referans veren kapsamlı filtreleme seçeneklerinin eklenebileceği görülmektedir **(Şekil 7, 8)**.

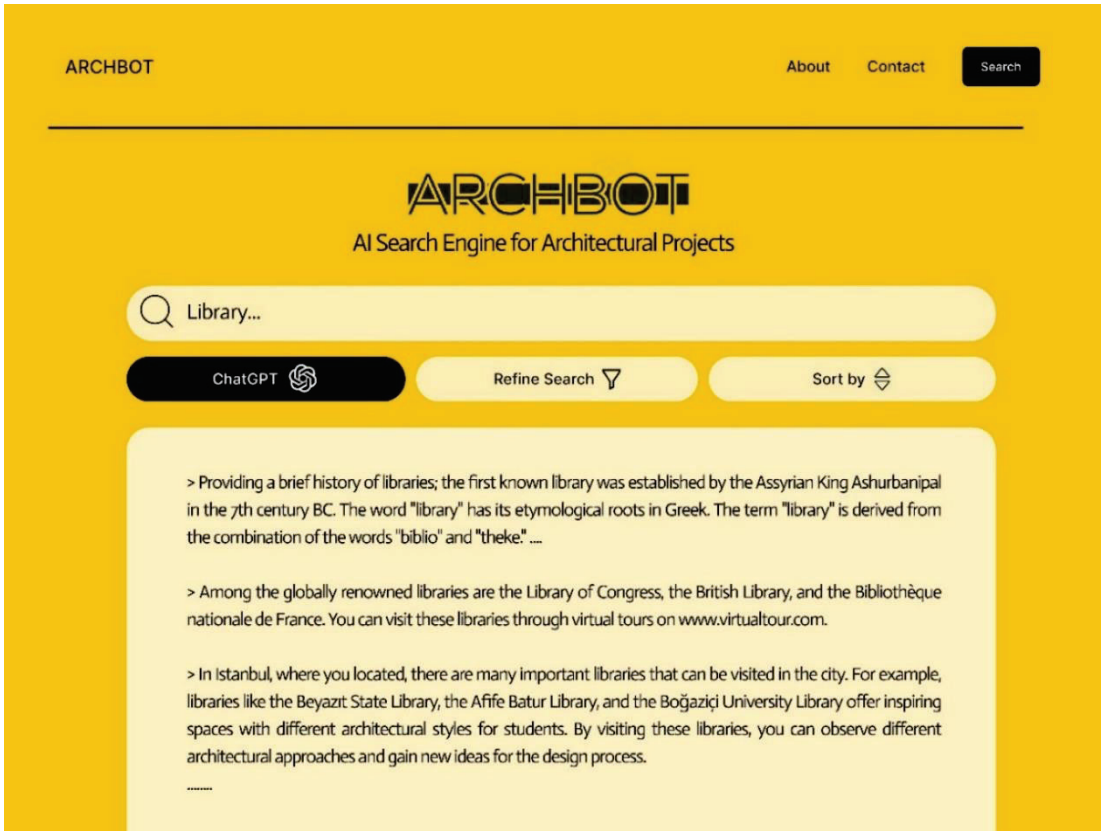
Bu aşama, sistemin genel yapısını ve kullanıcıyla etkileşim biçimini kavramsal düzeyde ortaya koyan, işlevsel olmayan bir taslak çalışma niteliğindedir. *Figma* ile geliştirilen prototip, sistemin işlevsel altyapısıyla henüz entegre edilmemiştir.



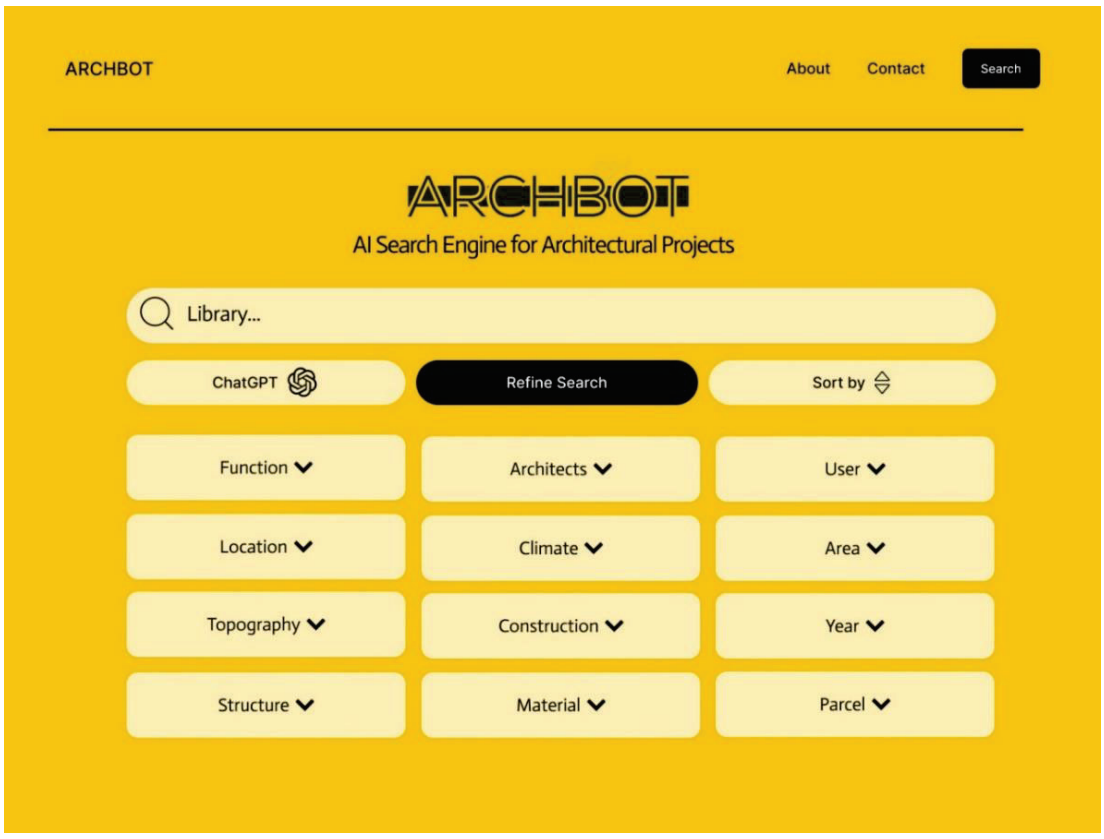
Şekil 5: Arama sayfası için hazırlanan arayüz.



Şekil 6: Sonuç listeleme için hazırlanan arayüz.



Şekil 7: Yapay zekâ destekli *chatbot* eklentisi.



Şekil 8: Arama sonuçlarını iyileştirmek için filtreleme seçenekleri.

3. Sonuçlar

Çalışma kapsamında geliştirilen arama motoru, veri tabanında yer alan mimari projeler arasındaki ilişkileri kullanarak daha verimli bir araştırma sunmayı hedeflemektedir. Geliştirilen sistem, mimarlık öğrencileri ve profesyonelleri için değerli bir araç olma potansiyeline sahiptir. Ancak; veri tabanının ölçeğinin sınırlı tutulması, veri kazıma sürecinde otomasyonun tam olarak sağlanmaması, manuel bilgi girişi yapılması, arayüz tasarım aşamasında yalnızca prototip düzeyinde kalınmış olması, işlevsel bir kullanıcı test sürecinin henüz gerçekleştirilmemesi, ve kod yazma ve arayüz geliştirme sürecindeki zorluklar gibi çeşitli kısıtlardan söz konusudur. Belirtilen sınırlılıklara yanıt vermek ve sistemin geliştirilmesi amacıyla gelecekteki çalışmalarda aşağıdaki konular ele alınabilir:

Veri havuzunun genişletilmesi, daha kapsamlı bir arama süreci için önemlidir. Veri kazıma sonrası manuel ekleme yapmak yerine otomatik bilgi çeken yöntemler kullanmak veri havuzunun güncelliğini koruması ve genişletilmesi için faydalı olabilir. Yeni bir veri tabanı oluşturmak yerine mevcut veri tabanlarından biri ile iletişime geçilebilir ve bu sistemin bir modülü, bir arayüzü olacak şekilde çalışma geliştirilebilir. Ayrıca mevcut verilerin birbirine dönüşebilirliğini sağlamak da veri toplama sürecini hızlandırabilir. Örneğin, 'lokasyon' bilgisinin coğrafi koordinatlar (enlem ve boylam) biçiminde sisteme girilmesi durumunda; bu koordinatlar üzerinden otomatik olarak 'iklim tipi', 'arazinin eğim durumu' ve 'parselin yerleşim içindeki konumu' gibi mekânsal veriler sistem tarafından türetilebilir. Proje görselleri, teknik çizimler gibi görsel verilerin eklenmesiyle, projeler arasındaki benzerliklerin yalnızca metinsel değil, görsel olarak da analiz edilmesi sağlanabilir.

Arayüz geliştirme aşamasında, proje incelemeyi kolaylaştırmak amacıyla içeriksel zenginliği artıracak belirli güncellemeler yapılması sistemin daha etkili kullanılması için faydalı olabilir. Örneğin her projenin ihtiyaç programının ve fonksiyon diyagramının tanımlı olması projelerin anlaşılabilirliğini artırabilir. Bunun için plan şeması üzerinden otomatik olarak basitleştirilmiş fonksiyon diyagramı üretebilen ve mekân dizilimlerini *(space syntax)* gösterebilen bir algoritma geliştirilebilir. Böylece hem kümeleme analizi aşamasında mekan dizimi bilgileri sürece dahil edilebilir, hem de projelerin kullanıcılar tarafından analiz edilme süreci hızlanabilir.

Çalışmada bilginin keşfi için kullanılan *veri madenciliği* yöntemine ek olarak, *yapay zekâ* ve *makine öğrenmesi* tekniklerinin entegrasyonu ile arama sonuçlarının doğruluğu ve ilgi düzeyi önemli ölçüde artırılabilir. Bu teknikler, kullanıcı sorgularının daha iyi anlaşılmasını ve daha alakalı sonuçların sunulmasını sağlayarak, arama motorunun performansını ve kullanıcı memnuniyetini artırabilir. Örneğin, *doğal dil işleme (NLP)* teknikleri ile kullanıcıların içerik arama eğilimleri ve bu aramaların gerçekleştiği anlamsal bağlam daha iyi analiz edilebilir. Bu sayede, semantik arama yetenekleri geliştirilebilir. Ayrıca, *makine öğrenmesi algoritmaları* sayesinde kullanıcıların arama geçmişine ve tercihine dayanarak kişiselleştirilmiş öneriler sunabilir. Böylece, arama motoru, kullanıcıların ihtiyaçlarına daha iyi yanıt verebilir ve mimarlık projeleri arasında daha anlamlı bağlantılar kurulmasına yardımcı olabilir.

Sistemin gelişimi sürecinde; veri mahremiyeti ve etik ilkelere uygun veri yönetimi sağlanması, algoritmik tarafsızlık ilkelerinin korunması ve öneri sisteminin açıklanabilirliğinin güçlendirilmesi gibi güncel tartışmaların göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Özellikle kişiselleştirilmiş öneri sunan sistemlerde kullanıcı verilerinin güvenliği ve sonuçların şeffaf şekilde açıklanması, sistemin güvenilirliği ve kullanıcı memnuniyeti için önemlidir.

Sonuç olarak, bu çalışma, mimari tasarım süreçlerinde ve mimarlık eğitiminde erken aşamada fikir toplama sürecine katkı sunabilecek dijital bir araç önererek, mimarlık disiplininde veri odaklı ve kullanıcı merkezli araştırma süreçlerine yeni bir yaklaşım getirmeyi hedeflemektedir. Geliştirilen sistem, mevcut mimarlık platformlarına kıyasla, odaklı araştırmaların yapılabilmesi, araştırma sürecinin daha etkin yönetilebilmesi ve projeler arasındaki örtük ilişkilerin keşfedilerek yeni potansiyellerin açığa çıkarılması gibi alanlarda önemli avantajlar sunmaktadır. Böylece, mimarlıkta proje araştırma pratiklerini daha sistematik, erişilebilir ve etik ilkelere duyarlı hale getirme potansiyeline sahiptir.

Teşekkür

Çalışma, İstanbul Teknik Üniversitesi, Mimari Tasarımda Bilişim Doktora programında, Prof. Dr. Gülen Çağdaş ve Dr. Gülce Kırdar tarafından yürütülen MBL 602 kodlu ‘Karar Destek Sistemleri’ dersi kapsamında 2023-24 Bahar döneminde hazırlanmıştır. Python kodlarının hazırlanmasında OpenAI (2024) ChatGPT-4o modelinden destek alınmıştır.

KAYNAKLAR

Ackoff, R. L. (1989). From data to wisdom. *Journal of Applied Systems Analysis,* 16(1), 3-9.

Agarwal, G., Desai, H., Mane, A., & Mishra, S. (2017). Search Engine and Portal for B.E. Projects. *International Journal of Computer Applications,* 165, 11-14. https://doi.org/10.5120/IJCA2017913180

Archdaily. (t.y.). https://www.archdaily.com

Architizer. (t.y.). https://architizer.com

Arkitera. (t.y.). https://www.arkitera.com

Baeza-Yates, R., & Ribeiro-Neto, B. (1999). *Modern information retrieval*. ACM Press.

Balmer, J. & Swisher, M. T. (2013). *Diagramming the Big Idea: Methods for Architectural Composition.* Routledge.

Beautiful Soup. (2023). *BeautifulSoup* (Version 4.12) [Yazılım]. https://www.crummy.com/software/BeautifulSoup

Beneventano, D., & Bergamaschi, S. (2014). Provenance-Aware Semantic Search Engines Based On Data Integration Systems. *Int. J. Organ. Collect. Intell.,* 4, 1-30. https://doi.org/10.4018/ijoci.2014040101

Chen, Y., Hung, M., & Yang, D. (2003). Using Data Mining to Construct an Intelligent Web Search System. *Int. J. Comput. Process. Orient. Lang., 16*, 143-170. https://doi.org/10.1142/S0219427903000875

Choudhary, J., Tomar, D.S. & Singh, D.P. (2019). An Efficient Hybrid User Profile Based Web Search Personalization Through Semantic Crawler. *Natl. Acad. Sci. Lett. 42*, 105–108. https://doi.org/10.1007/s40009-018-0686-2

Çalışır Adem, P. (2020). Geleneksel kent dokusunda çevresel verilerin sayısal araçlarla yorumu ve hesaplamalı bir tasarım modeli. [Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi].

Dezeen. (t.y.). https://www.dezeen.com

Fayyad, U., Piatesky-Shapiro, G., & Smyth, P. (1996). Knowledge discovery and data mining: Towards a unifying network. *Proceedings in Advances in Knowledge Discovery and Data Mining*, 82–88.

Figma. (2024). *Figma* (Version 2024) [Yazılım]. https://www.figma.com

Flask. (2024). *Flask* (Version 3.0) [Yazılım]. https://flask.palletsprojects.com

Geron, A. (2019). *Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow: Concepts, Tools, and Techniques to Build Intelligent Systems.* O'Reilly Media.

Han, J., Kamber, M., & J., P. (2012). *Data mining: Concepts and techniques* (3rd edition). Morgan Kaufmann.

Ignite-AI Blog (2023) The Evolution of Search: How AI is Transforming Search Engines. *Ignite-AI Tranformative Intelligence.* https://www.ignite-ai.com/post/the-evolution-of-search-how-ai-is-transforming-search-engines

Jin, X., Han, J. (2011). K-Means clustering. In: Sammut, C., Webb, G.I. (Eds.) *Encyclopedia of machine learning*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-0-387-30164-8_425

Jolliffe, I. T. (2002). Principal Component Analysis. *Springer Series in Statistics*. Springer-Verlag.

Li, Y., Chen, X., & Yang, B. (2002). Research on Web mining-based intelligent search engine. *Proceedings of International Conference on Machine Learning and Cybernetics, 1*, 386-390 vol.1. https://doi.org/10.1109/ICMLC.2002.1176780.

Ma, Z., Pant, G., & Sheng, O. (2007). Interest-based personalized search. *ACM Trans. Inf. Syst.,* 25, 5. https://doi.org/10.1145/1198296.1198301.

Matplotlib. (2024). *Matplotlib* (Version 3.8) [Yazılım]. https://matplotlib.org

Mayer-Schönberger, V., & Cukier, K. (2013). *Big data: A revolution that will transform how we live, work, and think.* Houghton Mifflin Harcourt.

Mehdi, Y. (2023). Reinventing search with a new AI-powered Microsoft Bing and Edge, your copilot for the web. Official *Microsoft Blog*. https://blogs.microsoft.com/blog/2023/02/07/reinventing-search-with-a-new-ai-powered-microsoft-bing-and-edge-your-copilot-for-the-web

Mudgil, P., Gupta, P., Mathur, I., Joshi, N. (2023). Comparative Analysis on Ontology-Based Contextual Senses Approaches for Search Engine. In Kaiser, M.S., Xie, J., Rathore, V.S. (eds) *Information and Communication Technology for Competitive Strategies (ICTCS 2021).* Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-19-0098-3_29

Oracle Corporation. (2023). MySQL (8.0) [Yazılım]. MySQL. https://www.mysql.com

Oracle Corporation. (2024). *MySQL Connector/Python* (Version 8.0) [Yazılım]. https://dev.mysql.com/doc/connector-python/en

Naimi, A.I., Westreich, D. J. (2014). Big data: A revolution that will transform how we live, work, and think. *American Journal of Epidemiology, vol. 179*, 9. pp. 1143–1144. https://doi.org/10.1093/aje/kwu085

NLTK. (2009). *NLTK: Natural Language Toolkit* (Version 3.6) [Yazılım]. https://www.nltk.org

NumPy. (2024). *NumPy* (Version 1.26) [Yazılım]. https://numpy.org

Olson, E. (2022). Introducing Consensus. *Consensus Blog Page.* https://consensus.app/home/blog/introducing-consensus

OpenAI. (2024). *ChatGPT* (Version GPT-4o) [Large language model]. https://openai.com/chatgpt

Pandas. (2023). *Pandas* (Version 2.0) [Yazılım]. https://pandas.pydata.org

Pretschner, A., Gauch, S. (1999). Ontology based personalized search. *Proceedings of the International Conference on Tools with Artificial Intelligence*, pp. 391-398.

Python. (2024). *Python (Version 3.12)* [Yazılım]. https://www.python.org

Requests. (2023). *Requests* (Version 2.31) [Yazılım]. https://docs.python-requests.org

Rovatsos, M., & Filgueira, R. (2023). Building Lightweight Semantic Search Engines. *2023 IEEE 19th International Conference on e-Science (e-Science),* 1-10. https://doi.org/10.1109/e-Science58273.2023.10254874

Rowley, J. (2007). The wisdom hierarchy: representations of the DIKW hierarchy. *Journal of Information Science*, 33(2), 163-180.

Schenker, A., Last, M., & Kandel, A. (2005). Design and implementation of a web mining system for organizing search engine results. *International Journal of Intelligent Systems,* 20. https://doi.org/10.1002/int.20086

Schwartz, C. (2015). Investigating the tectonic: Grounding theory in the study of precedents. *The International Journal of Architectonic, Spatial, and Environmental Design, 10*(1), 1-12. https://doi.org/10.18848/2325-1662/CGP/v10i01/38401

Scikit-learn. (2024). *Scikit-learn* (Version 1.4) [Yazılım]. https://scikit-learn.org

Scopus. (2024). 'Search engine' için arama sonuçları. https://www.scopus.com

Soliman, M., Salama, A., Galster, M., Zimmermann, O., & Riebisch, M. (2018). Improving the Search for Architecture Knowledge in Online Developer Communities. *2018 IEEE International Conference on Software Architecture (ICSA),* 186-18609. https://doi.org/10.1109/ICSA.2018.00028

SQLAlchemy. (2024). *SQLAlchemy* (Version 2.0) [Yazılım]. https://www.sqlalchemy.org

Stokel-Walker, C. (2023). AI chatbots are coming to search engines — can you trust the results? *Nature*. https://www.nature.com/articles/d41586-023-00423-4

Tran-Thien, V. (2022). Semantic Search: An Overlooked NLP Superpower. Dataiku Product. https://blog.dataiku.com/semantic-search-an-overlooked-nlp-superpower?ref=dylancastillo.co

Unwin, S. (2014). *Analysing Architecture*. Routledge.

Van Eck, N. J., & Waltman, L. (2017). VOSviewer Manual. https://www.vosviewer.com/documentation/Manual_VOSviewer_1.6.6.pdf

Van Eck, N. J., & Waltman, L. (2024). *VOSviewer* (Version 1.6.20) [Yazılım]. Centre for Science and Technology Studies, Leiden University. https://www.vosviewer.com

Visually Explained. (2021) Principal Component Analysis (PCA). *Youtube* [Video]. https://www.youtube.com/watch?v=FD4DeN81ODY&t=149s

MSTAS 2025 MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Digital Model Visualization in the AI Era: From Sketch to Scenario to Scene

Habibe Şenkal[1]; Hakan Tong[2]
[1,2] Istanbul Technical University
[1]senkal21@itu.edu.tr; [2]htong@itu.edu.tr

Abstract

Visualization is the process of visually representing abstract or concrete data, ideas, or designs through a range of techniques, from hand-drawn sketches to digital models. Among these techniques, three-dimensional (3D) modeling and rendering are widely used to produce photorealistic images, relying on lighting, material definitions, and physical simulations. However, recent advancements in artificial intelligence (AI), particularly the emergence of text-to-image and image-to-image generation tools, have triggered a paradigm shift in visualization workflows. These new tools are gaining increasing attention due to their ability to generate visual content based on natural language prompts or reference images, expanding the possibilities of creative visual expression. In this context, the study investigates the integration of AI-driven visualization into design workflows and examines its potential to transform traditional rendering techniques. The aim is to assess AI's role not merely as an automated rendering alternative, but as an interpretive and interactive tool within the design process. The research is structured in three main phases. In the first phase, traditional hand-drawn sketches were enriched using text-to-image AI tools, forming the initial visual framework of the scene. In the second phase, these early concepts were transferred into a three-dimensional (3D) model using Autodesk 3ds Max. To maintain neutrality during the subsequent AI driven process, the model was created without material or lighting definitions. In the third phase, screenshots of the 3D model—captured from specific camera angles—were provided to four different AI-based visualization tools (Leonardo.Ai, Krea.ai, Adobe Firefly, and DreamStudio Beta), which generated alternative visual outputs based on descriptive prompts. The resulting images were evaluated based on three main criteria: (a) visual consistency, (b) level of detail and composition, and (c) lighting and atmospheric effects. The findings indicate that while AI tools enable flexible and rapid visual production, the outcomes vary significantly depending on model characteristics and prompt parameters. Consequently, the study concludes that although AI tools are not yet capable of fully replacing traditional rendering engines, they provide a fast and productive visualization process guided by textual descriptions, and can be considered as potential interactive partners in the creative design workflow.

Keywords: *Artificial Intelligence (AI), Text-To-İmage Transformation, Visualization, 3D Modeling.*

2025 MSTAS MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Yapay Zeka Çağında Dijital Model Görselleştirmesi: Eskizden Senaryoya, Senaryodan Sahneye

Habibe Şenkal[1]; Hakan Tong[2]
[1,2]İstanbul Teknik Üniversitesi
[1]senkal21@itu.edu.tr; [2]htong@itu.edu.tr

Özet

Görselleştirme, soyut ya da somut veri, fikir ve tasarımların, eskiz çizimlerinden dijital modellere uzanan çeşitli tekniklerle görsel olarak temsil edilmesi sürecidir. Bu tekniklerden biri olan üç boyutlu (3B) modelleme ve işleme (rendering), fotogerçekçi görüntüler üretmek amacıyla aydınlatmaya, malzeme tanımlarına ve fiziksel simülasyonlara dayalı olarak yaygın biçimde kullanılmaktadır. Ancak, son yıllarda yapay zeka (YZ) alanındaki gelişmeler, özellikle metinden görüntüye ve görüntüden görüntüye üretim araçlarının ortaya çıkması, görselleştirme pratiklerinde bir paradigma değişimine yol açmıştır. Bu yeni araçlar, kullanıcıların doğal dil komutları veya referans görselleri aracılığıyla görsel içerik üretmesine olanak tanıması bakımından ilgi çekici bulunmakta ve potansiyelleri araştırılmaktadır. Bu bağlamda çalışma, YZ destekli görselleştirmenin tasarım süreçlerine entegrasyonunu araştırmakta ve geleneksel işleme tekniklerini dönüştürme potansiyelini incelemektedir. Çalışmanın amacı, yapay zekayı yalnızca alternatif bir otomatik işleme aracı olarak değil, aynı zamanda yorumlayıcı ve etkileşimli bir araç olarak rolünü değerlendirmektir. Araştırma üç ana aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, geleneksel eskiz teknikleri ile YZ üretimleri bir araya getirilerek fikir geliştirme süreci yürütülmektedir. Metinden-görüntüye YZ araçlarıyla zenginleştirilen eskizler, sahnenin senaryosu, yapısı, atmosferi ve tasarım öğelerine dair bir görsel çerçeve oluşturur. İkinci aşamada, bu fikirler Autodesk 3ds Max yazılımı kullanılarak 3B bir ortama aktarılır. Model, YZ üretim sürecinin önyargısız ve yönlendirmesiz olması için malzeme ve aydınlatma tanımları yapılmadan oluşturulmuştur. Üçüncü aşamada ise, belirli bir kamera açısıyla modelin bir ekran görüntüsü alınarak dört farklı YZ tabanlı görselleştirme aracına (Leonardo.Ai, Krea.ai, Adobe Firefly ve DreamStudio beta) girdi olarak sunulmuştur. Bu araçlar, verilen açıklayıcı metinlere (istemlere, promptlara) dayanarak alternatif görsel çıktılar üretmiştir. Elde edilen sonuçlar üç ana ölçüte göre değerlendirilmiştir: (a) görsel tutarlılık, (b) ayrıntı seviyesi ve kompozisyon, (c) ışık ve atmosfer etkileri. Bulgular, YZ araçlarının esnek ve hızlı görsel üretime olanak tanıdığını, ancak üretimlerin model özelliklerine ve parametre ayarlamalarına bağlı olarak değiştiğini ortaya koymaktadır. Sonuçlar, YZ araçlarının henüz geleneksel görselleştirme motorlarının yerini tam olarak almaya hazır olmadığını, ancak metinsel açıklamalarla hızlı ve üretken bir görselleştirme süreci sunduğunu ve etkileşimli bir tasarım partneri olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: *Yapay Zeka (YZ), Metinden-Görüntüye Dönüştürme, Görselleştirme, 3B Modelleme.*

1. Introduction

Visualization is the process of creating a visual representation of abstract or concrete data, ideas, or designs. Throughout history, this process has evolved through different techniques: architectural drawings in antiquity, perspective techniques in the Renaissance, and computer-aided modeling methods in the 20th century. Today, visualization plays a crucial role across multiple disciplines, including architecture, industrial design, the film industry, digital arts, and game development. In particular, three-dimensional (3D) modeling and rendering engines are widely used to create photorealistic scenes, relying on lighting, material definitions, and physical simulations to generate realistic visual outputs (Pharr et al., 2023). However, recent advancements in artificial intelligence (AI) technologies have introduced a transformative shift in visualization workflows. Text-to-image AI tools allow users to define visual content through textual descriptions (prompts) rather than manually adjusting 3D parameters (Elgammal et al., 2017; McCormack et al., 2019; Ramesh et al., 2022). Unlike traditional rendering workflows, which emphasize physical accuracy, AI-driven visualizations prioritize semantic meaning and stylistic coherence, introducing a new paradigm in the visualization domain (Thies et al., 2019; X. Chen et al., 2021). In parallel, image-to-image AI tools, which are now integrated into many text-to-image tools, allow users to input one or more reference images along with a textual prompt to generate new visuals. These tools reinterpret the original image by applying different styles, compositions, or visual characteristics, guided by the prompt.

This study investigates the integration of AI-driven visualization into design workflows and examines its potential to transform traditional rendering techniques. The aim is to assess AI's role not merely as an automated rendering alternative, but as an interpretive and interactive tool within the design process. In this context, the study is structured in three phase (**Figure 1**): (i) concept development through traditional sketching and AI-generated images, (ii) three-dimensional modeling and scene development in 3ds Max environment without material or lighting definitions, and (iii) AI-driven visualization of the generated primitive 3D scene using four different tools (Leonardo.Ai, Krea.ai, Adobe Firefly and DreamStudio beta). The study evaluates AI-generated outputs based on criteria such as (a) visual consistency, (b) level of detail and composition, and (c) lighting and atmospheric effects.

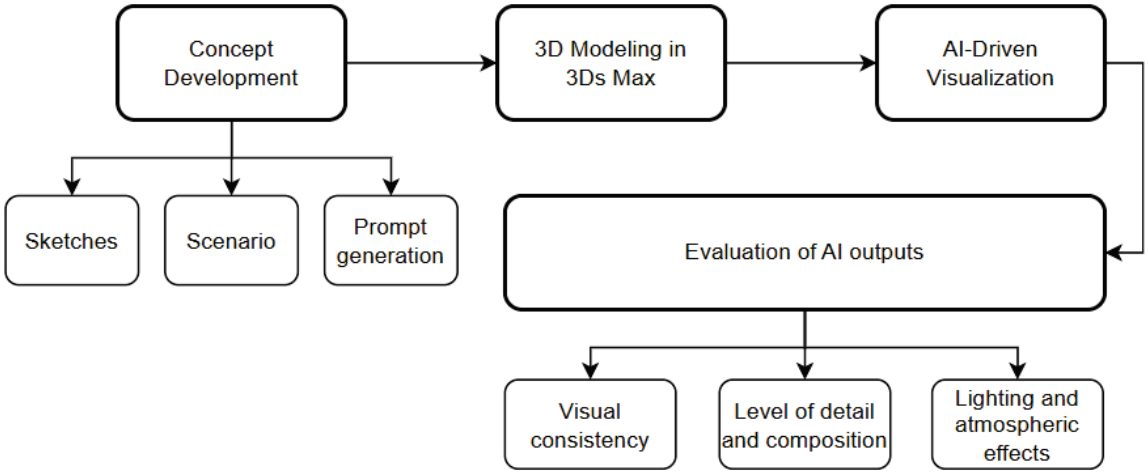


Figure 1: Workflow of the study (by Authors)

2. Related Works

The evolution of visualization techniques has been closely linked to advancements in computational tools and methodologies. Traditional rendering engines—based on physical simulations such as ray tracing and global illumination—enable photorealistic outcomes but require precise manual control and technical expertise in managing parameters like lighting, materials, and camera settings (Çelik, 2014; Samanta, 2022; Pharr et al., 2023). On the other hand, AI-driven approaches such as text-to-image and image-to-image tools introduce a prompt-based workflow that simplifies visual generation and expands iterative possibilities (Ramesh et al., 2022). For example, the visual and aesthetic impact of a scene in different color palettes and material types can be quickly interpreted with text-based input, making the design process more flexible. Additionally, these tools rely on vast datasets and deep learning models to interpret user inputs and generate images based on statistical patterns rather than physical simulations (Elgammal et al., 2017).

Despite the advantages offered by visualization flexibility, it also raises new challenges and questions. For example, biases in the training data of AI models can affect the aesthetic and technical accuracy of the generated images (McCormack et al., 2019). Some models tend to perform poorly when prompted in less common or non-English languages (Sukkar et al., 2024). Additionally, there is a tendency to favor certain design styles or frequently depicted iconic structures (F. Chen et al., 2024; Gür et al., 2024; Sukkar et al., 2024). Although these biases might initially appear limiting, they may also offer creative potential such as facilitating the reproduction of specific design languages or generating stylistic variations rooted in personal design preferences (Lee et al., 2024). Moreover, the consistency and controllability of AI-generated visuals may be lower compared to traditional rendering engines. These issues have sparked debates about whether AI should be seen as a "complementary" tool or an "alternative" in the design process. While Hertzmann (2018) suggests that AI should be considered a complementary tool rather than a replacement for traditional rendering engines, some studies argue that AI-driven tools might standardize creative outputs, potentially limiting diversity in design (Shams et al., 2023).

Building on these discussions, recent studies have begun exploring the pedagogical and conceptual potential of integrating AI-generated visuals into architectural design. Tong et al. (2023a; 2023b) conducted a design studio experiment with first-year students, where AI-generated images created via Midjourney were combined with orthographic drawings to enhance spatial imagination and representation. A similar study by Yaşar et al. (2025) examined the role of prompt literacy and AI-tool selection in shaping visual output in design education, offering insights into the interpretive and stylistic impact of generative tools. These educational experiments highlight the capacity of AI not only to automate visual production but also to serve as a creative and complementary partner in iterative design processes. Furthermore, Hatıpoğlu and Çavuş (2024) discuss the role of AI in artistic production, arguing that its hallucinatory generative capacity—often perceived as a limitation—may in fact offer creative advantages and hold the potential to introduce a new aesthetic dimension.

Unlike previous research that focuses solely on early-stage design exploration, this study investigates a hybrid workflow in which AI is utilized not only for concept generation but also for visualizing 3D models. Rather than limiting its role to the initial ideation, AI is tested as a visualization tool in later stages of scene development.

3. Methodology

The initial phases of the study—specifically concept development and preliminary modeling—were carried out as part of the Computer Aided Architectural Design course offered at Istanbul Technical University in the 2024–2025 fall semester. This course, which has been offered since 2004 and updated regularly to reflect technological advancements, incorporated AI-driven visualization for the first time during this term. Based on this context, this study employs an experimental methodology to explore the role of AI in visualization workflows and to compare the performance of AI-driven visualization tools. The methodology consists of four main phases: (a) concept development, (b) 3D modeling, (c) AI-driven visualization process, and (d) evaluation of outputs.

3.1. Concept Development

The first phase of the study involves an iterative idea development process that integrates both traditional and AI-generated visuals. The study begins with hand-drawn sketches that outline the fundamental composition and spatial arrangement of the envisioned scene. These sketches serve as the primary medium for ideation, capturing initial thoughts on scenario of the scene to be visualized, structure, atmosphere, and key design elements.

The initial conceptual ideas, particularly the scenario, are utilized as inputs for text-to-image and image-to-image AI tools. Descriptive textual prompts, crafted to align with the envisioned scene, guide the AI in generating enriched variations of the original sketches. The goal of this step is not to replace the designer's vision but to explore alternative visual possibilities that may enrich the concept development process. In other words, artificial intelligence does not replace the designer and interfere with the designer's creative side, original perspective and aesthetic preferences, but rather helps discover and develop different aspects of the concept by adhering to this vision.

Scenario

The scenario used to guide the conceptual visualization is as follows:

Humanity, in response to Earth's dwindling resources, embarked on a quest to find habitable alternative settlements, leading them to investigate the mythical "Twin Reality Island." The island is described as a floating structure in space with two contrasting layers. The upper layer is chaotic, filled with disordered structures, metallic towers, and constant storms, while the lower layer offers tranquility with lush forests, blue lakes, and bioluminescent plants.

The spacecraft Aequilibrium, symbolizing balance, descends onto this island after navigating through unknown regions. However, instead of landing on the tranquil lower layer, the spacecraft mistakenly descends onto the chaotic upper layer. The island's artificial intelligence maintains the balance between the two layers. However, the arrival of the Aequilibrium disrupts this balance, causing chaos to intensify in the upper layer and the lower layer to wither. The Aequilibrium now faces the challenge of restoring balance before the island collapses entirely.

From scenario to prompt

In text-to-image generation, prompts serve as the primary mechanism for directing the AI interpretation of a scene. To systematically evaluate prompt effectiveness, this study employed two distinct prompt formulations, prompt 1 containing 99 words of basic keywords and prompt 2 containing 168 words of detailed keywords. Accordingly, the following descriptive prompts were used to generate the conceptual visuals:

Prompt 1: *From inside a futuristic spacecraft, a stark contrast between the peaceful interior and chaotic exterior is visible. Through a large window, jagged metallic structures and spherical objects litter the terrain, while ominous UFOs hover in the sky. The distant mountains rise beneath a crimson sky, filled with swirling black clouds and blue lightning flashes. Inside, the spacecraft's metallic walls are softened by herbaceous plants, patches of grass, and water gently seeping from the floor cracks, illuminated by soft natural light and the ethereal glow of a nebula outside. Keywords: science fiction scene, simple geometric shapes, cinematic effect, 4K rendering.*

Prompt 2: *A landscape viewed from inside a futuristic spacecraft. Contrast between interior and exterior worlds. Looking out through a large observation window, a catastrophic landscape unfolds: jagged metallic structures pierce the ground, spherical futuristic objects are scattered across the terrain, and unidentified flying objects (UFOs) hover ominously in the sky. Towering mountains rise in the distance under a deep crimson sky filled with swirling black clouds illuminated by flashes of vivid blue lightning. In contrast, the interior of the spacecraft offers a tranquil, nature-infused atmosphere. Herbaceous plants grow along the metallic walls, small patches of grass emerge near cracks in the floor where water gently seeps through, and a soft natural light merges with the surreal glow of a nebula visible outside. The result is a peaceful, otherworldly environment that coexists within the mechanical shell of the ship. Outside: catastrophic landscape, metallic structures, spherical futuristic shapes, flying objects (UFOs), crimson sky, blue lightning. Inside: serene natural environment, herbaceous plants, metallic interior, water seeping from floor cracks, soft serene lighting.*

3.2. 3D Modeling

In the second phase, conceptual ideas are translated into a three-dimensional environment using 3ds Max, a 3D modeling, visualization, and animation software developed by Autodesk. The composition includes the spacecraft, a cracked floor in the spacecraft, towering mountains in the outside, flying objects, scattered metallic structures, and spherical futuristic objects (**Figure 2**). This phase allows for deeper exploration of the scene's composition, helping to define visual hierarchy, perspective, and balance.

The scene's view from the specified camera perspective is presented in **Figure 3**. This image was used as a reference image in AI productions. To maintain consistency in AI processing, the model is intentionally kept free of material definitions and lighting configurations. This decision aim to ensure that the AI-driven visualization phase is not affected by predefined rendering parameters, allowing AI tools to paint the model according to prompts.

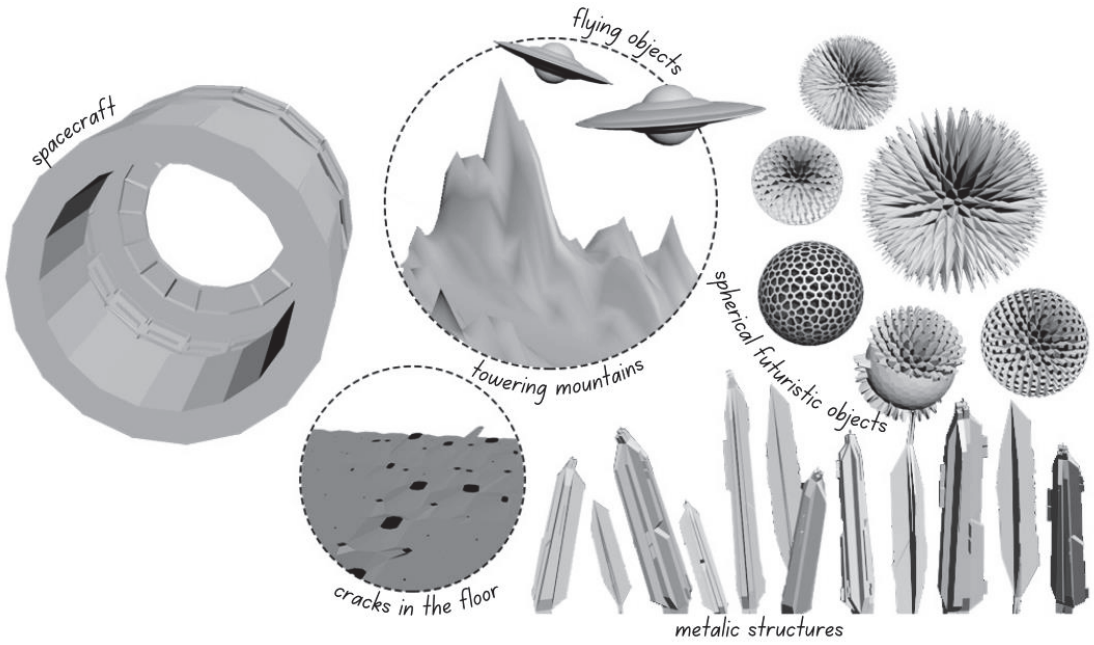


Figure 2: Assets of the scene modelled in 3ds Max (by Authors).

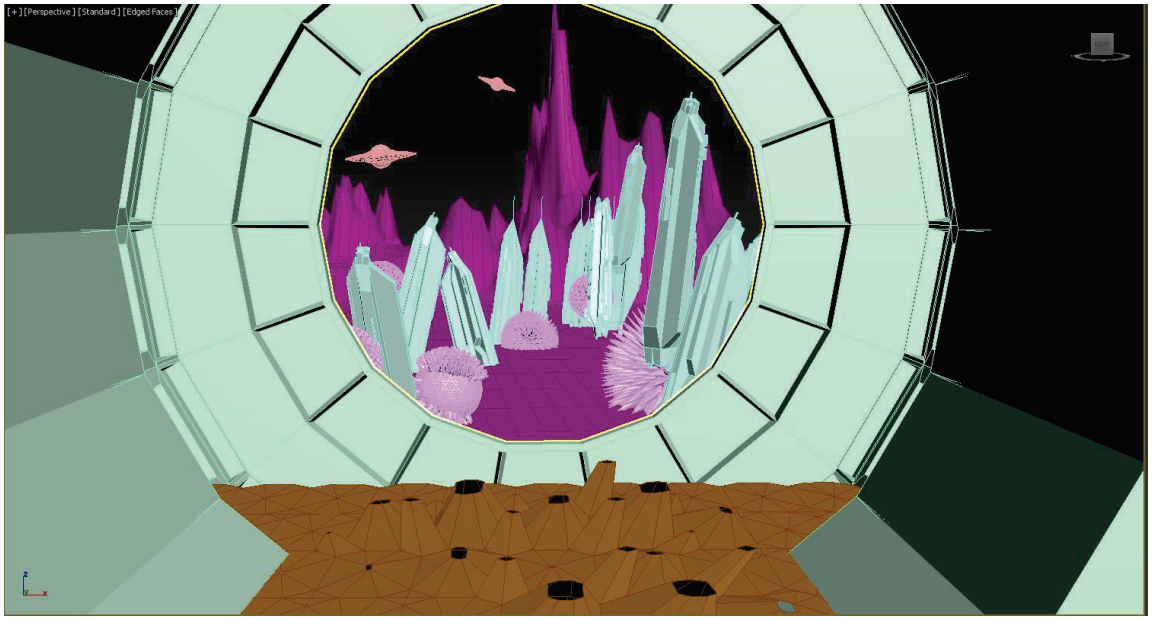


Figure 3: The view of the scene from the specified camera perspective(by Authors).

3.3. AI-driven Visualization

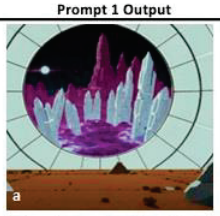
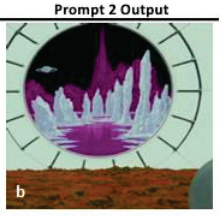
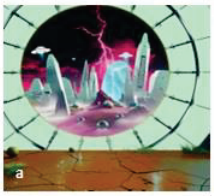
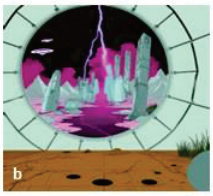
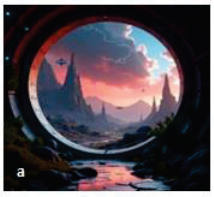
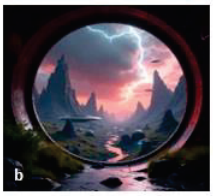
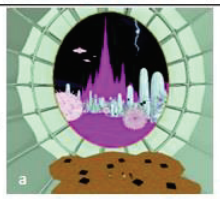
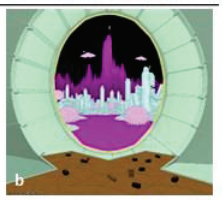
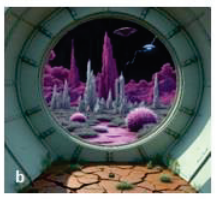
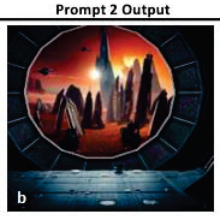
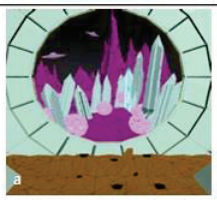
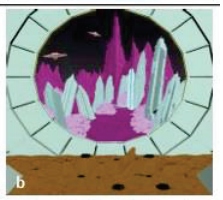
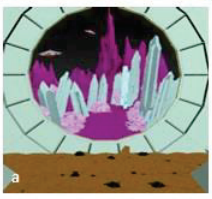
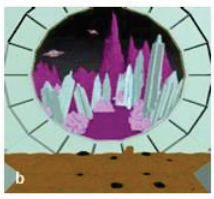
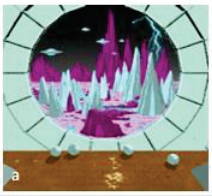
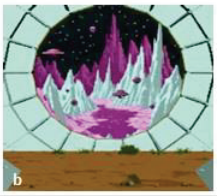
The final phase involves creating alternative visual representations of the 3D model using four different text-to-image AI tools that allow for reference image input, meaning image-to-image generation. Leonardo AI stands out with a broad range of generative capabilities, offering 13 different models and preset alternatives (Leonardo AI, 2024). Krea AI provides six model options and allows users to adjust the degree of adherence to a reference image (Krea AI, 2024). The beta version of DreamStudio beta (2022) supports similar parameters and includes three model choices, while Adobe Firefly (2023) offers two models along with advanced editing controls.

For each AI tool, a two step generation process was conducted using the reference image presented in **Figure 3**, initially with Prompt 1, followed by Prompt 2. In Leonardo AI, three models were utilized for the generations, whereas in the other tools, a single model was used with three different levels (low, medium, and high) precision of conformity to the reference image. During each generation phase, the AI tools produced four images, from which one was selected by the authors for evaluation.

4. Results

The visual outputs generated based on different prompts, models, and precision settings are compiled and presented in **Table 1** for reference as a dataset for subsequent evaluation.

Table 1: AI-generated visual outputs based on reference image and prompt variations (by Authors)

AI Tool	Model	Prompt 1 Output	Prompt 2 Output
Leonardo.Ai	Leonardo Kino XL (L1)		
	Leonardo Phoenix1.0 (L2)		
	FluxDev (L3)		
krea.ai	Flux geometry precision (%100) (K1)		
	Flux geometry precision (%85) (K2)		
	Flux geometry precision (%65) (K3)		
Adobe Firefly	Firefly image 3 geometry precision (%100) (A1)		
	Firefly image 3 geometry precision (%50) (A2)		
	Firefly image 3 geometry precision (%0) (A3)		
DreamStudio	Stable Image Ultra geometry precision (%85) (D1)		
	Stable Image Ultra geometry precision (%65) (D2)		
	Stable Image Ultra geometry precision (%40) (D3)		

5. Evaluation

The visual outputs generated by the AI tools were evaluated based on three main criteria:

- Visual Consistency (E1), examines how consistently each output image preserves the narrative and structural integrity of the reference image.
- Level of Detail and Composition (E2), evaluates the degree to which both the reference elements and the prompt-defined components are accurately represented.
- Lighting and Atmospheric Effects (E3), focuses on how effectively lighting, shadow, and environmental conditions described in the prompts are applied within the scene.

The outputs generated with Leonardo AI's Kino XL (L1) and Phoenix 1.0 (L2) models demonstrated comparable levels of visual consistency and detail relative to the reference image. However, the L2 outputs made more effective use of the atmospheric and lighting elements specified in the prompt (such as blue lightning, black clouds, a crimson sky,

cracked ground, water, grass, and herbaceous plants). In the case of the FluxDev (L3) model, a higher degree of AI-driven creativity was observed. Instead of merely "painting over" the reference image, the model reinterpreted the scene in accordance with the given prompts, producing a distinct visual composition.

Within the Krea.ai, a single model (Flux) was used, but the degree of adherence to the reference image was tested by adjusting the "precision" parameter. Similar to the Leonardo AI outputs, the results (K1a-b, K2a-b, K3a-b) indicate that as adherence to the reference image increases, richness of detail, depth of composition, and atmospheric effects tend to decrease. Similarly, both Adobe Firefly and DreamStudio Beta include a "precision" parameter. However, variations in this parameter did not result in substantial differences across the three evaluation criteria (visual consistency, level of detail, and atmospheric effects). Nonetheless, DreamStudio outputs were generally found to be more visually consistent with the reference image.

Furthermore, outputs produced using similar models across different platforms (such as L3 and K3) as well as outputs generated with varying prompt lengths and complexity exhibited substantial visual similarities. These findings suggest that both model similarity and limited prompt diversification can lead to consistent outcomes across different AI visualization tools. Therefore, in the evaluation of the outputs, the results were compared without separating them based on prompt variations, and the evaluations are presented in **Table 2**. The evaluation scores decrease progressively from dark to light colors, with dark colors receiving the highest scores and light colors the lowest.

Table 2: Comparative evaluation of AI-Driven visual outputs according to evaluation criteria (dark colors: highest scores; light colors: lowest scores). (by Authors).

Outputs	E1	E2	E3
L1			
L2			
L3			
K1			
K2			
K3			
A1			
A2			
A3			
D1			
D2			
D3			

6. Conclusion

This study investigates the potential of artificial intelligence as a next-generation visualization tool that can serve as an alternative to traditional rendering processes in 3D modeling workflows. Within this scope, it conducts a comparative analysis of how different AI tools generate visual outputs when provided with the same reference image and descriptive prompt.

The results show that AI tools consider both the reference image and the prompt, but the weight they assign to each can greatly affect the final output. When the AI closely follows the reference image, the details, atmosphere, and composition described in the prompt often appear less clearly or are missing. In other words, as adherence to the reference increases, the tool tends to limit its creativity and overlook prompt-based elements. On the other hand, in cases where the AI generates more freely, elements from the prompt are more visible, but some key parts of the reference image are lost or their impact on the composition is reduced. This suggests that AI tools struggle to stay strongly aligned with both the reference and the prompt at the same time. Changes made to the prompt—such as adding more descriptive words—had little impact on the outputs. This may be due to the similarity between the two prompts.

These results suggest that while AI tools are not yet ready to fully replace traditional rendering engines, but they are well-suited as supportive instruments for generating creative diversity, accelerating narrative visualizations, and exploring alternative visual languages throughout the design proces.

REFERENCES

Adobe Firefly, (2023). https://firefly.adobe.com/

Chen, F., Mai, M., Huang, X., & Li, Y. (2024). Enhancing the Sustainability of AI Technology in Architectural Design: Improving the Matching Accuracy of Chinese-Style Buildings. *Sustainability, 16*(19), 8414.

Chen, X., Cohen-Or, D., Chen, B., & Mitra, N. J. (2021). Towards a neural graphics pipeline for controllable image generation. In Computer Graphics Forum (Vol. 40, No. 2, pp. 127-140).

Çelik, E. (2014). *3ds max 2014 ile görselleştirme.* Değişim Yayınları.

DreamStudio beta, (2022). https://beta.dreamstudio.ai/generate

Elgammal, A., Liu, B., Elhoseiny, M. & Mazzone, M. (2017). Can: Creative adversarial networks, generating "art" by learning about styles and deviating from style norms. arXiv 2017, arXiv:1706.07068

Gür, M., Çorakbaş, F. K., Atar, İ. S., Çelik, M. G., Maşat, İ., & Şahin, C. (2024). Communicating AI for Architectural and Interior Design: Reinterpreting Traditional Iznik Tile Compositions through AI Software for Contemporary Spaces. *Buildings, 14*(9), 2916.

Hatıpoğlu, S. C. & Çavuş, E. (2024). Estetikte Yeni Katmanlar: Yapay Zeka ve Atmosfer Tartışmalarına Giriş [New Layers in New Aesthetics: An Introduction to Artificial Intelligence and Atmosphere Discussions]. *Mimarlıkta Sayısal Tasarım XVIII. Ulusal Sempozyumu (MSTAS)*, Balıkesir University, Balıkesir, Türkiye, 01-02 July 2024.

Hertzmann, A. (2018). Can computers create art?. In *Arts* (Vol. 7, No. 2, p. 18). MDPI.

Krea AI (2024). https://www.krea.ai

Lee, J. K., Yoo, Y., & Cha, S. H. (2024). Generative early architectural visualizations: incorporating architect's style-trained models. *Journal of Computational Design and Engineering, 11*(5), 40-59.

Leonardo AI, (2024). https://leonardo.ai

McCormack, J., Gifford, T., & Hutchings, P. (2019). Autonomy, authenticity, authorship and intention in computer generated art. In *International conference on computational intelligence in music, sound, art and design* (part of EvoStar) (pp. 35-50). Cham: Springer International Publishing.

Pharr, M., Jakob, W., & Humphreys, G. (2023). *Physically based rendering: From theory to implementation*. MIT Press.

Ramesh, A., Dhariwal, P., Nichol, A., Chu, C., & Chen, M. (2022). Hierarchical text-conditional image generation with clip latents. arXiv preprint arXiv:2204.06125, 1(2), 3.

Samanta, D. (Ed.). (2022). *3D modeling using autodesk 3ds max with rendering view*. IGI Global.

Shams, R. A., Zowghi, D., & Bano, M. (2023). AI and the quest for diversity and inclusion: a systematic literature review. *AI and Ethics*, *5*, 1-28.

Sukkar, A. W., Fareed, M. W., Yahia, M. W., Abdalla, S. B., Ibrahim, I., & Senjab, K. A. K. (2024). Analytical evaluation of Midjourney architectural virtual lab: Defining major current limits in AI-generated representations of Islamic architectural heritage. *Buildings, 14*(3), 786.

Thies, J., Zollhöfer, M., & Nießner, M. (2019). Deferred neural rendering: Image synthesis using neural textures. *Acm Transactions on Graphics (TOG), 38*(4), 1-12.

Tong, H., Türel, A., Şenkal, H., Ergün, F. Y., Güzelci, O. Z., & Alaçam, S. (2023a). Can AI Function as a New Mode of Sketching: A Teaching Experiment with Freshman. *International Journal of Emerging Technologies in Learning, 18*(18). DOI:10.3991/ijet.v18i18.42603

Tong, H., Ülken, G., Türel, A., Şenkal, H., Ergün, F. Y., Güzelci, O. Z., & Alaçam, S. (2023b). An Attempt To İntegrate AI-Based Techniques İnto First Year Design Representation Course. *Cumulus Antwerp International Conference 2023: Connectivity and Creativity in times of Conflict*.

Yaşar, İ., Arslan Selçuk, S. , & Alaçam, S. (2025). Use of Artificial Intelligence and Prompt Literacy in Architectural Education. *New Design Ideas, 9*(1).

MSTAS 2025 MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Mimarlıkta Maket ve Üretken Yapay Zekânın Kullanımı: Simbiyotik Bir Tasarım Eylemi

Adil Yirmibeş[1]; Barış Mert Karasu[2]
[1,2]Bursa Uludağ Üniversitesi
[1]yirmibesadil@uludag.edu.tr; [2]bmertkarasu@uludag.edu.tr

Özet

Bu çalışma, fiziksel tasarım araçları ile üretken yapay zekâ tabanlı sistemlerin eş zamanlı kullanımıyla şekillenen simbiyotik tasarım yaklaşımını mimari tasarım pratiği içinde deneysel olarak ele almaktadır. Günümüzde dijital araçlar, mimari üretimde hızlı görselleştirme, veri analizi ve alternatif senaryo üretimi gibi imkânlar sunmaktadır. Fiziksel araçlar, özellikle maketler, tasarım sürecine dokunsal geri bildirim, mekânsal sezgi ve bağlamla doğrudan ilişki kurma gibi katkılar sağlamaktadır. Bu iki farklı aracın tasarım sürecinde birlikte ve karşılıklı etkileşim içinde kullanılması, yaratıcı üretim süreçlerinde yeni fırsatlar doğurmaktadır. Çalışma kapsamında maket ve üretken yapay zeka araçlarının simbiyotik ilişkisinin tasarım sürecine etkisi test edilmiştir.

Araştırma kapsamında, Bursa Uludağ Üniversitesi Mimarlık Fakültesinde lisans düzeyinde mimarlık öğrencilerinin katılımıyla gerçekleştirilen bir atölye çalışması yürütülmüştür. Öğrenciler, iki farklı tasarım senaryosu üzerinden fiziksel maket üretmiş ve aynı zamanda üretken yapay zekâ destekli görselleştirme araçlarını kullanarak tasarım fikirlerini interaktif biçimde dönüştürmüştür. Çalışmanın ilk aşamasında öğrencilere ön tanımlı bir bağlam verilmiş ve bu bağlam kısıtı dahilinde tasarım yapmaları beklenmiştir. Atölye çalışmasının İkinci aşamasında ise kendi bağlamlarını oluşturarak daha özgür bir tasarım süreci deneyimlemeleri sağlanmıştır. Tüm süreç boyunca elde edilen görseller, müdahale sayıları, üretim stratejileri ve öğrenci geri bildirimleri sistematik biçimde toplanmış ve analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, fiziksel ve dijital araçların birlikte kullanımının, öğrencilerin tasarım sürecine olan katılımını artırdığını, karar verme becerilerini çeşitlendirdiğini ve ortaya çıkan çıktılarda önemli ölçüde çeşitlilik sağladığını göstermektedir. Bulgular her iki aracın da birbirini tamamlayıcı biçimde çalıştığını ve bu simbiyotik ilişkinin tasarım sürecinde hem sezgisel hem de analitik düşünmeyi teşvik ettiğini göstermektedir. Nicel veriler ise ikinci deney aşamasında müdahale düzeylerinin ve yaratıcı denemelerin daha yoğun olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, bağlamı öğrencinin belirlediği senaryoda daha özgün ve çeşitlendirilmiş tasarımlar üretilmiştir.

Sonuç olarak, fiziksel maketlerle üretken yapay zekânın birlikte ve eş zamanlı kullanıldığı simbiyotik tasarım yaklaşımı, mimarlık eğitiminde yeni araçlar sunmakta ve yaratıcı süreçlerin derinleşmesini desteklemektedir. Bu yaklaşımın gelecekte disiplinler arası tasarım ortamlarında daha fazla uygulanabilirlik kazanacağı öngörülmektedir.

Anahtar Kelimeler: *Simbiyotik Tasarım, Üretken Yapay Zekâ, Mimari Maket.*

2025 MSTAS MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Model-Making and Generative Artificial Intelligence in Architecture: A Symbiotic Design Practice

Adil YİRMİBEŞ [1]; Barış Mert KARASU [2]
[1,2]Bursa Uludağ University
[1]yirmibesadil@uludag.edu.tr; [2]bmertkarasu@uludag.edu.tr

Abstract

This study experimentally addresses the symbiotic design approach shaped by the simultaneous use of physical design tools and generative artificial intelligence-based systems within architectural design practice. Nowadays, digital tools offer opportunities such as rapid visualisation, data analysis and alternative scenario generation in architectural production. Physical tools, especially models, contribute to the design process with contributions such as tactile feedback, spatial intuition and direct engagement with context. The use of these two different tools together and in interaction in the design process creates new opportunities in creative production processes. Within the scope of the study, the effect of the symbiotic relationship between the model and generative artificial intelligence tools on the design process was tested.

Within the scope of the study, a workshop was conducted with the participation of undergraduate architecture students at Bursa Uludağ University Faculty of Architecture. The students produced physical models based on two different design scenarios and at the same time transformed their design ideas interactively using generative artificial intelligence supported visualisation tools. In the first phase of the workshop, students were given a predefined context and were expected to design within the constraints of this context. In the second phase of the workshop, they were allowed to experience a more independent design process by creating their own contexts. The visuals, number of interventions, production strategies and student feedbacks obtained throughout the whole process were systematically collected and analysed. The findings show that the combined use of physical and digital tools increased students' participation in the design process, diversified their decision-making skills and provided significant diversity in the outputs. The findings show that both tools work in a complementary manner and that this symbiotic relationship encourages both intuitive and analytical thinking in the design process. Quantitative data reveal that the levels of intervention and creative experimentation were more intense in the second experimental phase. In addition, more original and diversified designs were produced in the scenario where the context was determined by the student.

In conclusion, the symbiotic design approach, in which physical models and generative artificial intelligence are used together and simultaneously, offers new tools in architectural education and supports the depth of creative processes. It is predicted that this approach will gain more applicability in interdisciplinary design environments in the future.

Keywords: *Symbiotic Design, Generative Artificial İntelligence, Architectural Modelling.*

1. Giriş

Tasarım, mevcut durumu tercih edilen duruma dönüştürme çabası olarak (Simon, 1996), problem çözme ve optimizasyon süreçleriyle şekillenen bir eylemdir. Schön (1987), bu süreçte tasarımcıyı, gerçekleştirilecek fikirlerin temsilcisi ve belirsizlik, çelişki gibi dinamiklerle mücadele eden bir 'birleştirici' olarak tanımlar. Hanson'ın (2001) vurguladığı gibi, tasarım yalnızca nesneler değil, dünyaya yönelik bir müdahale aracıdır. Lawson'ın (2006) öne sürdüğü taslak öneri, şema tasarımı ve detay tasarımından oluşan üç aşamalı yapı analiz-sentez-değerlendirme-karar döngüsüyle karmaşık kısıtlar altında kararlar üretmeyi gerektirir. Bahsedilen farklı yaklaşımlar, tasarımın karmaşıklığını ve çok boyutlu doğasını ortaya koymaktadır.

Mimari tasarım süreçlerinde Singh ve Gu'nun (2012) belirttiği gibi, biçim gramerleri (SG) ve genetik algoritmalar (GA) gibi üretken tasarım araçları, sayısal yöntemlerin öncüleri olarak kabul edilmektedir. Günümüzde ise bu araçlara, yapay zekâ tabanlı görsel üretim sistemleri eklenmiştir. Derin öğrenme araçları (DL), "Large Language Models" (LLM) ve "Latent Diffusion Model" (LDM) gibi üretken yapay zeka modelleri sayesinde tasarımcılar metin, görsel veya parametrik girdilerle karmaşık mimari çıktılar üretebilmektedir (Çelik, 2023; Li vd., 2024; Alcaide-Marzal & Diego-Mas, 2025). Dijital çağda tasarlama eylemi ise, Oxman'ın (2006) da belirttiği gibi, mimarın makineyle kurduğu simbiyotik ilişkiyle dönüşmüş; algoritmik tasarım, parametrik modelleme ve yapay zekâ gibi araçlar, tasarım sürecindeki yaratıcı ve analitik kapasiteyi genişletmiştir.

Mimarlıkta fiziksel maketler, dijital devrime rağmen hâlâ önemli bir tasarım aracı olarak varlığını sürdürmektedir (Driscoll, 2013). Dokunsal geri bildirimler ve mekânsal algıyı doğrudan deneyimleme olanağı sunmaktadır. Maketler, mekânın algılanması ve tasarım düşüncelerinin somutlaştırılmasında uzun süredir temel araçlardan biri olarak kullanılmıştır. Aynı zamanda mimari temsilin temel taşı ve tasarımcının zihnindeki soyut kavramları üç boyutlu bir diyaloğudur. Çizimler ve maketler, tasarımın yalnızca teknik bir parçası değil, aynı zamanda mimari düşüncenin bir parçasıdır (Evans, 1986). Mimaride maket yapımı tasarımın kendisini keşfetmesini sağlar; mekânın ölçek, oran ve malzeme gibi unsurlarını test etme, hataları erken aşamada görünür kılma ve yaratıcılığı tetikleme işlevi görür (Smith, 2004). Günümüzde maketlerin estetik ve yapısal değerlendirmelerle sınırlı kullanıldığı görülür. Maketlerle tasarım sürecinde kullanıcı ihtiyaçlarıyla bağlam analizi tasarımın ileri aşamalarında göz ardı edilir. Tasarım süreci boyunca maketlerin kullanıcı geri bildirimlerine kapalı olduğu görülmektedir. Bu nedenle tasarımda hibrit araçların kullanımı önemli görülmektedir (Hettithanthri vd., 2023).

Bilgisayar destekli mimari tasarım (CAAD) araçları, fiziksel maketlerin aksine, hız ve kesinlik sunar ancak maketlerin aksine dokunsal deneyimden uzaklaşma riskini taşır (Porter, 2004). Buna karşılık, dijital ve fiziksel tasarım araçlarının bir arada kullanımı, yaratıcı sezgisellik ile algoritmik optimizasyon arasında bir köprü kurmaktadır (Kolarevic, 2003). Üretken yapay zekâ algoritmaları, tasarımcılara parametrik tasarım, veri analizi ve olasılık temelli senaryo üretimi gibi yeni olanaklar sunmaktadır. Yapay zekâ ile mimari tasarımda "hesaplanabilir yaratıcılık" kavramını ve insan-merkezli tasarım süreçlerini zenginleştirmiştir. Günümüzde tasarımda gerçekleşen yapay zeka dönüşümü, maket gibi fiziksel araçları gereksiz kılmak yerine, onları simbiyotik bir tasarım metodolojisinin parçası haline getirmektedir (Oxman, 2006). Bu yaklaşım, geleneksel maket kullanımını yalnızca korumakla kalmaz, onu veriye dayalı bir tasarım dilinin aktif bileşeni haline getirir. Başarır (2022) Mimari eğitimde yapay zekâ entegrasyonunun tasarım süreçlerinin dönüştürdüğünü ve öğrencilerin "akıllı prototipler" geliştirirken fiziksel maketlerle etkileşimli bir öğrenme deneyimi kazandığını ortaya koyar. Bu süreçte, maketler yalnızca statik temsiller değil, yapay zekâ tarafından üretilen verilerle beslenen dinamik ara yüzler haline gelir. Öğrenciler, hibrit stüdyolarda maketleri yapay zekâ algoritmalarıyla birleştirerek, tasarım kararlarını gerçek zamanlı veri analizleriyle desteklemektedir (Başarır, 2022).

Çalışma, mimari tasarım sürecinde oluşturulan fiziksel maketler ile üretken yapay zekâ modellerinin görsel üretim kapasitesini bütünleştiren bir tasarım metodolojisinin etkinliğini araştırmaktadır. Bu amaçla mimari tasarım sürecinde fiziksel maketlerin ve LDM üretken yapay zekâ aracının potansiyeli bir arada kullanılmıştır. Bu kapsamda simbiyotik tasarım yaklaşımı, fiziksel maket ile üretken yapay zekâ tabanlı tasarım araçlarının eşzamanlı ve karşılıklı etkileşim içerisinde bulunmasını ifade etmektedir. Çalışmanın araştırdığı sorular iki ana başlık altındadır. İlk başlık simbiyotik tasarımdır. Fiziksel ve dijital tasarım araçları ile simbiyotik tasarım süreci oluşturulabilir mi? Mimari maket ve üretken yapay zekâ araçları mimari tasarım sürecinde birbirlerini besleyen araçlar olabilir mi? Bu birliktelikle üretilen tasarımlarda hangi araç daha etkin rol oynar? İkinci başlık ise simbiyotik tasarım sürecinin mimari bağlama göre nasıl

etkilendiğini araştırmaktadır. Tasarlanacak mimari ögenin bağlamı üretken yapay zekâ araçları ile tanımlanabilir mi? Mimari bağlam ve tasarımı kısıtlayıcı ögelerin simbiyotik tasarım sürecine etkisi nedir? Araştırma kapsamında yapılan atölye çalışmasında simbiyotik tasarım süreci katılımcılar tarafından deneyimlenmiştir. Atölye sürecinde katılımcıların deneyimleri kayıt altına alınmıştır. Atölye sonrasındaysa simbiyotik tasarım yönteminin değerlendirilmesine yönelik bir anket uygulanmıştır. Çalışmada geleneksel ve dijital araçların entegrasyonu hedeflenmiştir. Bu birlikteliğin yaratıcı süreçlere ve tasarım kararlarına olan etkisi katılımcılardan elde edilen verilerle ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları fiziksel ve dijital araçlarla simbiyotik tasarımın mümkün olduğunu ve bu birlikteliğin pozitif etkilerini ortaya koymuştur.

2. Metodoloji

Çalışmada, mimari tasarım sürecinde üretken yapay zekânın hızlı görselleştirme potansiyelini araştırmak için deneysel bir yöntem benimsenmiştir. Literatürde, özellikle LDM tabanlı modellerin mimari tasarım alternatiflerinin oluşturulmasında (Çelik, 2023) ve konsept aşamasında hızlı iterasyon sağlamada (Li vd., 2024) etkili olduğu vurgulanmaktadır. Bu amaçla, maket ve Stable Diffusion XL (SDXL) Turbo (Sauer vd., 2024) gibi gerçek zamanlı üretim yapan üretken yapay zekâ modelinin entegre edildiği bir deney düzeneği geliştirilmiştir.

Simbiyotik Tasarım Pratiği atölyesinde kullanılan deney düzeneği fiziksel ortamda üretilen maketlerin dijital ortamda eş zamanlı görselleştirmesini sağlayacak biçimde kurgulanmıştır. Deney ortamı, bir kamera aracılığıyla fiziksel maketlerin görüntülerini kaydeder. Bu görüntüler 'ComfyUI' (Comfyanonymous, 2024) arayüzü üzerinden dijital ortama aktarılır. SDXL Turbo tarafından sağlanan düşük gecikmeli görsel sentezleme yeteneği sayesinde (Sauer vd., 2024), kullanıcı girdilerine anlık yanıt veren sentetik görüntüler üretilmektedir. Düzenek yardımıyla bütün tasarım süreci, alternatifleri üretilen tasarımlar ve tasarım girdileri kayıt altına alınabilmektedir.

Bursa Uludağ Üniversitesi Mimarlık Fakültesi bünyesinde "Simbiyotik Tasarım Pratiği: Mimari Maket ve Üretken Yapay Zekanın Entegrasyonu" başlıklı bir atölye çalışması gerçekleştirilmiştir. Katılımcılara üretken yapay zekâ araçları yardımıyla tasarım pratikleri üzerine bir bilgi paylaşımı yapılarak atölye çalışmasına başlanmıştır. Katılımcı öğrenciler, toplamda altı ekip oluşturarak atölye çalışmasına dahil olmuşlardır. Çalışmada ekipler tarafından fiziksel maketler oluşturularak, oluşturan maketlerden çalışma kapsamında kullanılan yapay zekâ aracı yardımıyla mimari görseller üretilmiştir. Çalışmanın ilk deneyinde, ekiplerden önceden belirlenmiş bir bağlamda tasarımlar geliştirmeleri istenmiştir. İkinci deneyde ise, ekiplerin kendi bağlamlarını yaratarak daha serbest bir tasarım anlayışıyla sonuç görselleri elde etmeleri sağlanmıştır. Çalışma kapsamında kurgulanan deney düzeneği ve atölye süreçleri aşağıda açıklanmıştır.

2.1. Mimari Maket ve Üretken Yapay Zekâ Deney Ortamı

Farklı tasarım araçlarının simbiyotik ilişkisinin tasarım sürecine ve ürüne katkısını ölçmek amacıyla fiziksel ve dijital ortamı bir araya getiren deney düzeneği hazırlanmıştır. Üretken yapay zekâ modelinin etkilenmemesi için bütün ekiplerin görsel girdileri ortaklaştırılmıştır. Fiziksel ortam 50x70cm boyutlarında siyah renkte taban düzlemi ve arka plan düzleminden oluşmaktadır. Taban Düzleminden 10cm uzaklıkta ve 5cm yükseklikte 960x720 piksel boyutlarında çekim yapan bir kamera yerleştirilmiştir. Kamera doğrudan dijital ortama görüntü aktaracak biçimde bir bilgisayara bağlanmıştır. Dijital ortamda üretken yapay zekâ kullanımına olanak tanıyan ve bir geliştirici arayüzü olan Comfyui kullanılmıştır (Comfyanonymous, 2024).

Dijital olarak kullanılan deney ortamı atölye amacına uygun biçimde organize edilmiştir. ComfyUI (Comfyanonymous, 2024) arayüzünde simbiyotik tasarım pratiği çalışmasının gerekliliklerini sağlayan bir iş akışı (pipeline) geliştirilmiştir. Üretken yapay zekâ modeline gönderilecek girdiler maket görüntüleri ve istemlerden (prompt) oluşmaktadır. Girdi görüntüsü olan maket düzeneği kamera aracılığıyla fiziksel ortamdan dijital ortama aktarılmıştır. Maketlerde mimari formun az kayıpla işlenmesine olanak tanıyan derinlik haritası çıkarımı yöntemiyle görüntü ön işlemden geçirilmiştir. Derinlik haritasının üretimi için "DephtAnything V2" (Yang vd., 2024) modeli tercih edilmiştir. LDM modelinin koşullandırılması için ControlNet (Zhang vd., 2023) kontrol ağı kullanılmıştır. ControlNet ağında koşullandırma "DepthAnything V2" modeli aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Girdi olarak kullanılacak metinler "Mimari Tasarım İstemi", "Bağlam İstemi" ve "Görsel Kalite İstemi" olarak üç ayrı metin kutusuna yazılmıştır. Metin kutuları yukarıdaki sıra ile birleştirildikten sonra Clip Text Encoder'a (Radford vd., 2021) gönderilmiştir. Tanımı yapılan modellerle fiziksel maket görselinin simbiyotik tasarım pratiği atölyesinde kullanımına ve dijital tasarım çıktıları üretimine uygun hale getirilmiştir.

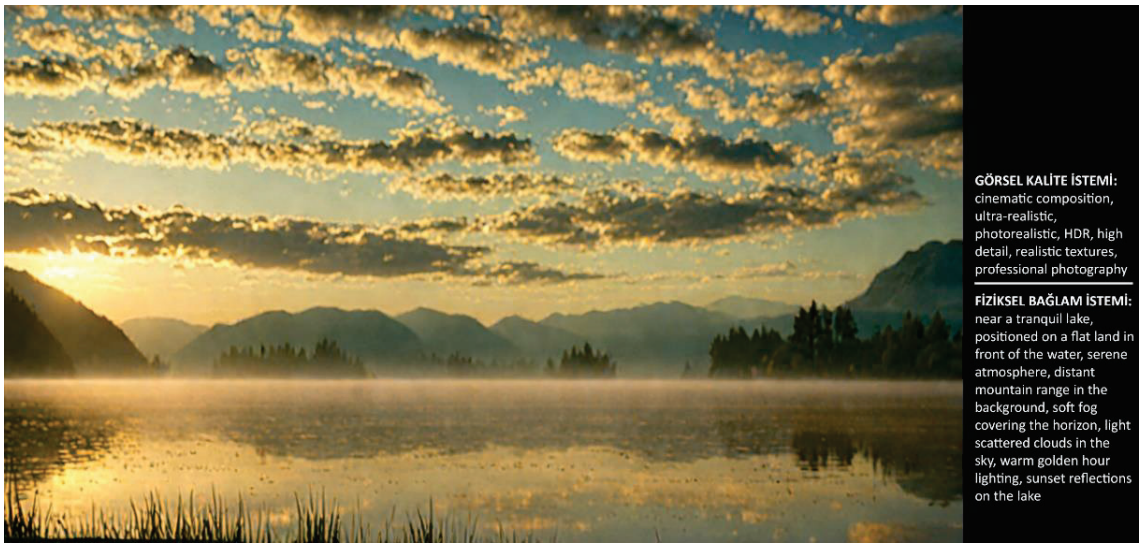
2.2. Simbiyotik Tasarım Pratiği Atölyesi

Atölyeye katılan öğrenciler Bursa Uludağ Üniversitesi'nde 1 ile 4. sınıfların her birinden gönüllülük esasıyla belirlenmiştir. Maket yapma ve istem yazma pratiklerinin eş zamanlı olarak ilerleyebilmesi gerekmektedir. Bu nedenle katılımcılardan en az 2 kişi maket pratiği ve en az 2 kişi istemleri yazmak üzere görevli olacak biçimde minimum 4 kişilik ekiplerin oluşturulması, her ekipte 1, 2, 3 ve 4. Sınıf öğrencilerinin dengeli bir biçimde dağılması istenmiştir. Belirlenen kriterlere göre atölyeye katılan 26 öğrenci 6 ekip oluşturmuştur. Katılımcıların ekiplere ve sınıflara göre dağılımı **Tablo 1**'de görülmektedir. Oluşturulan ekiplere tasarım araçları tanıtılmış ve atölye süresince istenenler anlatılmıştır. Bilgilendirme yapıldıktan sonra ekiplerin toplanıp görev dağılımını yapmaları ve tasarım stratejilerini belirlemeleri için süre verilmiştir.

Tablo 1: Katılımcı Sayıları, Ekiplere Dağılımı

EKİP/SINIF	Ekip-1	Ekip-2	Ekip-3	Ekip-4	Ekip-5	Ekip-6	Toplam
1.Sınıf	0	1	1	1	1	0	4
2.Sınıf	1	1	1	1	1	2	7
3.Sınıf	2	1	1	2	0	1	7
4.Sınıf	1	1	1	1	3	1	8
Toplam	4	4	4	5	5	4	26

Çalışmanın deney-1 aşamasında öğrencilere atölye yürütücüleri tarafından belirlenen bağlam istemleri verilerek hafta sonu evi tasarlanması istenmiştir. Ekiplerin tasarım yapmaları beklenilen bağlamın görseli ve bu görseli elde etmek için kullanılan istemler **Şekil 1**'de görülmektedir. Mimari tasarım istemleri ise ekipler tarafından tasarım süresince belirlenmiştir. Atölye kapsamında gerçekleştirilen deney-1'de öğrencilerin önceden tanımlanmış problemlere yaklaşımları test edilmiştir. Öğrenci ekiplerinden deney sürecine başlamadan önce ön hazırlık yapmaları mimari tasarım kararlarını oluşturmaları beklenmiştir. Her ekip ön hazırlık sonucu mimari tasarım için başlangıç istemleri ve başlangıç maketlerini üretmiştir. Ekipler belirlenen sıra ile 10 dakikalık simbiyotik tasarım pratiğini deneyimlemiştir. Çalışmada maket, maketten oluşturulan derinlik haritası, derinlik haritası ve istemlerin bir araya gelmesiyle üretilen tasarım görseli tüm ekipler tarafından süreç boyunca interaktif biçimde ilerletilmiştir. Ekiplerden birinin süreç içerisinde oluşturduğu anlık ürünün örneği **Şekil 2**'de gösterilmiştir. Tasarım süreçleri tamamlandıktan sonra ekiplere ürettikleri girdi ve çıktı verileri gönderilmiştir. Ekipler maket ve istemlere tasarımlarını güncellemek ve değiştirmek amacıyla yaptıkları müdahale sayılarını, aynı zamanda ürettikleri nihai tasarım ürününü belirlemiş ve raporlamıştır. Raporlamalar sonucu deney-1 sonlandırılmıştır.



Şekil 1: Deney-1 bağlam görseli, bağlam ve görsel kalite istemleri

Şekil 2: Ekip 2 tarafından deney-1'de oluşturulan maket (sol üst), anlık oluşturulan derinlik haritası (sol alt) ve elde edilen anlık tasarım çıktısı (sağ)

Çalışmanın deney-2 aşamasında deney-1'den farklı olarak öğrenci ekiplerinin tasarım yapacakları bağlamın tanımlanması amacıyla bağlam istemlerini de kendileri oluşturmaları beklenmiştir. Ekiplerin oluşturdukları bağlam istemleri deney-2 başlamadan önce hazırlanan düzenekte test edilmiştir. Bağlam istemleri sırasıyla **Tablo 2**'de görülmektedir. Ekiplerin oluşturduğu bağlam istemleri ve kalite istemiyle üretilen sentetik bağlam görselleri **Şekil 3**'te görülmektedir. Sentetik bağlam istemleri doğrultusunda deney-2'de öğrencilerin kendi belirledikleri bağlam ve tasarım problemine yaklaşımları gözlemlenmiştir. Ekiplere ön hazırlık için süre tanınmış, deney-1'de olduğu gibi başlangıç maketi ve istemlerini hazırlamaları beklenmiştir. Ekipler deney-2'de de sırayla 10'ar dakikalık simbiyotik tasarım pratiğini deneyimlemiştir. Deney-2, deney-1'de olduğu gibi maket ve istemlere uyguladıkları müdahalelerin tespit edilmesi, simbiyotik tasarım sürecinde ürettikleri mimari ürünler arasından nihai tasarımlarının belirlenmesi ve raporların oluşturulması ile son bulmuştur.

Tablo 2: Atölyenin 2. Aşamasında Ekiplerin Oluşturdukları Bağlam İstemleri

Ekip-1	*"Here is a tower with zombies. There is a circular moat with lava around the tower. The weather is gloomy and dead trees surround the building. The white on the ground is meteors"*
Ekip-2	*"A surreal and cinematic lunar landscape under a starry night sky. The scene is set on the Moon's surface, with powdery gray dust, scattered rocks, and craters. The background features deep space filled with distant stars, galaxies, and a glowing cosmic horizon. The environment is quiet, vast, and isolated, evoking a science fiction atmosphere. The lighting is low and otherworldly, casting long shadows over the terrain. A futuristic human presence is implied through architectural intervention. Concept art, ultra high resolution, dramatic lighting"*
Ekip-3	*"perched in isolation above a fog-filled mountain valley. Gentle curves, thick volumes, and smooth material transitions inspired by foam model studies. The building's form evokes weightlessness and flow, with parts appearing to hover or cantilever subtly into the void. Minimalist materials — white plaster, pale concrete, satin-finished steel, and soft glass — interact delicately with golden, low-angle sunlight. Fog wraps around cliffs below, drifting like a slow tide. The mood is quiet, surreal, and suspended in time — no people, just wind, stone, light, and the poetic stillness of a structure floating between sky and earth"*
Ekip-4	*"Shenzhen Bay Park, calm reflective water surface, modern skyline with high-rise glass skyscrapers, spring season, clear blue sky, sunlight directly overhead, architectural focus, intricate facade details, urban-natural harmony, water reflections, clean lines, contemporary design, bright daylight, warm tones, tranquil atmosphere, SDXL Turbo style"*
Ekip-5	*"serene, underwater landscape with crystal-clear waters surrounding a small island, partially submerged. The ocean floor is smooth and sandy, with no aquatic plants or seaweed. Sunlight filters down from above, casting soft light patterns on the sandy seabed. The water is calm, with minimal disturbance, and marine life is sparse, adding to the tranquil atmosphere. The scene is pristine, creating a sense of peaceful isolation and natural beauty"*
Ekip-6	*"Ancient Babylonian Hanging Gardens, a terraced paradise rising from the desert, lush vines cascading down massive brick walls, blue-glazed irrigation channels weaving between structures. Floating cuneiform tablets emit a soft glow around a futuristic architectural model, their ancient symbols merging with the design. Golden sunlight filters through palm fronds, casting dynamic shadows across the ziggurat-inspired platforms. The scene blends antiquity with holographic technology - neon-blue water flows through stone aqueducts while AI-generated Babylonian patterns materialize on surfaces. Hyper-detailed, photorealistic 8K, cinematic lighting with volumetric sun rays, intricate textures of weathered brick and glazed ceramics"*

Şekil 3: Atölyenin 2. aşamasında ekiplerin oluşturdukları sentetik bağlamlar.

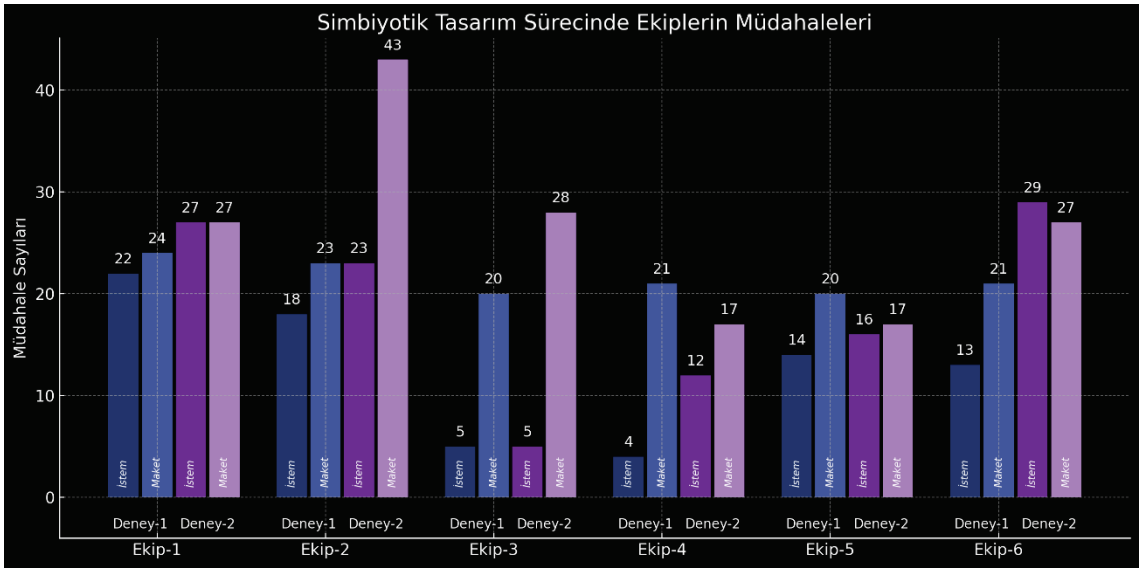
Deneyler tamamlandıktan sonra, Simbiyotik Tasarım Pratiği atölyesinin değerlendirme sorularından oluşan anket öğrencilerle paylaşılmıştır. Anketi katılımcı olan 26 öğrenci tamamlamıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

Simbiyotik Tasarım Pratiği atölyesinde ekiplerin tasarlama eylemleri takip edilmiştir. Ekiplerin tasarım sürecinde kullandıkları basamak sayıları, tasarlama amacıyla izledikleri yollar, tasarımın gelişim aşamaları, tasarım sürecinde maketlere uyguladıkları müdahaleler, üretken yapay zekaya gönderdikleri istem sayıları ve istem cümleleri kayıt altına alınmıştır. Deney-1 ve Deney-2 sonunda öğrencilerin simbiyotik tasarım pratiğini geliştirirken on dakikalık süreçlerde maketlerine ve istemlerine yaptıkları müdahaleler tespit edilmiştir (**Tablo 3**), (**Şekil 4**). Deney-1 süresince katılımcı ekiplerin oluşturdukları tasarım görsellerinden deneyin başlangıç aşaması, bitiş aşaması ve ekiplerin seçtikleri tasarım ürünleri **Şekil-5** ve **Şekil-6**'da görülmektedir. Deney-2 sürecinde ekiplerin oluşturdukları tasarımlar arasından seçtikleri **Şekil 7**'de görülmektedir. Öğrenciler tarafından deneyimlenen atölye süreci anket soruları ile test edilmiştir.

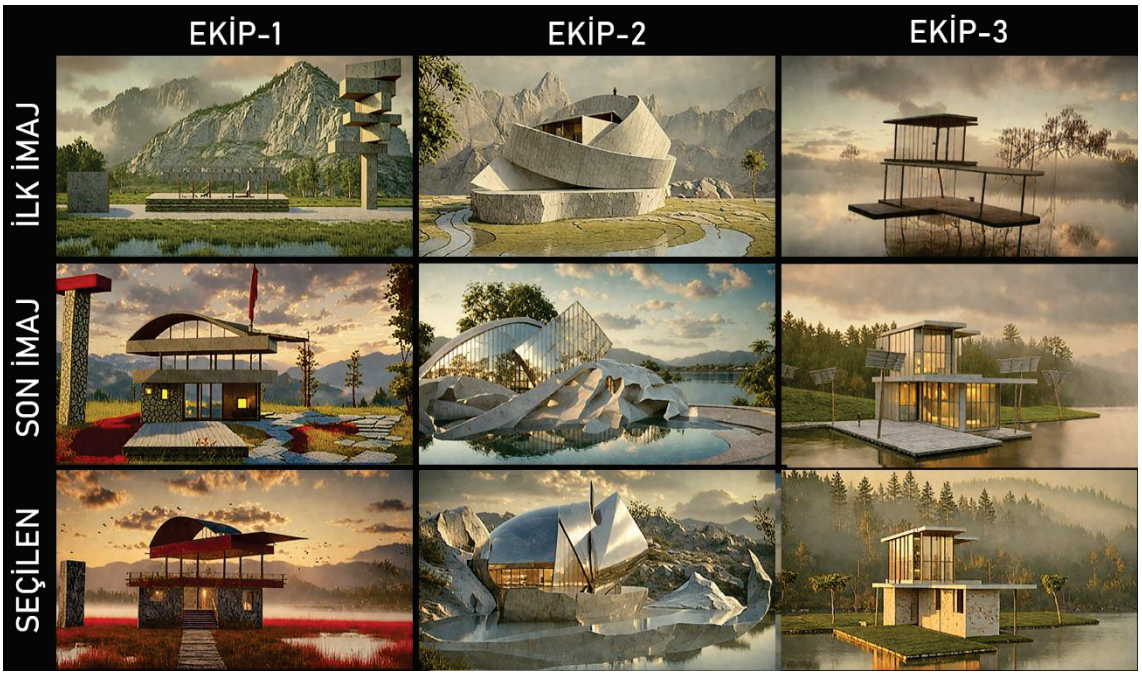
Tablo 3: Simbiyotik Tasarım Pratiği sürecinde ekiplerin maket ve istemlere yaptıkları müdahaleler

Simbiyotik Tasarım	Ekip-1	Ekip-2	Ekip-3	Ekip-4	Ekip-5	Ekip-6	**Toplam**
Deney-1	46	41	25	25	34	34	**205**
Deney-2	54	66	33	29	33	56	**271**
Toplam	100	107	58	54	67	90	**476**



Şekil 4: Simbiyotik Tasarım Pratiği atölyesinde ekiplerin maket ve istemlere müdahaleleri.

Grafikler ve deney çıktıları incelendiğinde simbiyotik tasarım yöntemi uygulanırken toplam müdahale sayısının 476 olduğu tespit edilmiştir. Bu müdahalelerin %39,5 mimari tasarım istemleri %60,50'si maket müdahaleleridir. Deney-1'de toplam müdahale sayısı 205 olarak hesaplanmıştır. Müdahalelerin %37,07'si istem, %62,93'ü maket müdahalesidir. Deney-1'de istemlere en çok %28,95 ile ekip-1 en az %5,26 ile ekip-4 müdahale etmiştir. Deney-1'de maket müdahalesinde oranlar %15,50 ile %18,60 arası değişmektedir. Deney-2'de toplam 271 müdahale bulunmaktadır. %41,33'ü istem, %58,67'si maket müdahalesi olarak gözlemlenmiştir. Çalışmanın deney-1 aşamasında katılımcılara verilen bağlam istemleri ile atölye yürütücüleri tasarım alanını kısıtlamıştır. Deney-2 aşamasında bu kısıt ortadan kaldırılarak tasarım süreci ekip ölçeğinde özelleştirilebilir duruma getirilmiş ve tasarım süreci özgürleştirilmiştir. Deney-2'de istem müdahalelerinde en az %4,46 ile ekip-3 en fazla %25,89 ile ekip-6'dır. Deney-2'de makete yapılan müdahalelerde en az %10,69 ile ekip-4 ile ekip-5 en fazla ise %27,04 ile ekip-2'dir. Ayrıca, maket ve istemlere müdahalelerde deney-1 ile deney-2 arasında nicel farklılıklar bulunmuştur. Deney-2'de toplam müdahale sayısının %32,2, maket müdahalesinin %23,26 ve istem müdahalesinin de %47,37 arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 5: Simbiyotik Tasarım Pratiği deney-1, ekip-1, ekip-2 ve ekip-3'ün ürettiği ve seçtiği tasarım ürünleri

Şekil 6: Simbiyotik Tasarım Pratiği deney-1, ekip-4, ekip-5 ve ekip-6'nın ürettiği ve seçtiği tasarım ürünleri

Atölye süreci sonunda, öğrencilere 5'li Likert ölçeğinde hazırlanmış anket soruları ve bir adet iki seçenekli soru yöneltilmiştir. Anket soruları ile simbiyotik tasarım pratiği atölyesinde kullanılan yöntemlerin etkinliği araştırılmıştır. Ayrıca deney-1 yer alan önceden tanımlanmış bağlam istemlerinin deney-2 aşamasında ortadan kaldırılmasının tasarlama sürecine etkisi test edilmiştir. Yöneltilen sorular ve ortalama sonuçlar **Tablo 4**'te yer almaktadır. S1, S2 ve S5 tasarımla kullanılan maket ve istemlerin etkinliğini, S3, S4 ve **Tablo 5**'te gösterilen iki seçenkli soru ise deney-1 ve deney-2 arasındaki farklılıkların etkisini tespit etmektedir.

Şekil 7: Simbiyotik Tasarım Pratiği deney-2, ekiplerin seçtiği tasarım ürünleri

Tablo 4: Anket soruları ve soruların ortalama değerleri

Likert tipi sorular (soru numarası S ile kısaltılmıştır.)	Ortalama
S1: Mimari tasarım istemleri, tasarımın gelişmesinde etkili oldu.	4,27
S2: Maket yapmak, tasarımın gelişmesinde etkili oldu.	4,62
S3: Bağlam istemlerini (context prompt) oluşturmak daha iyi tasarım yapmama yardımcı oldu.	4,15
S4: İlk deney ve ikinci deney arasında tasarımın geliştirilmesinde fark yoktu.	2,19
S5: Tasarım yaparken istemlere müdahale etmek ve makete müdahale etmek arasında fark yoktu.	2,00

Tablo 5: İki seçenekli anket sorusu ve cevapları

İki seçenekli soru	Deney-1	Deney-2
S6: Hangi aşamada daha etkin tasarım yaptığınızı düşünüyorsunuz?	%69,2 (18)	%30,8 (8)

Simbiyotik tasarım pratiğinde tasarım süreçleri ve anket sorularından elde edilen sayısal veriler değerlendirilmiştir. Maket ve istemlerin bir arada kullanıldığı yaklaşımda ekipler iki yöntemi de etkin biçimde deneyimlemiştir. S1 ve S2'ye verilen cevapların 4 üzerinde olması bu iki aracın birlikte kullanımının süreci pozitif yönde etkilediğini göstermektedir. Bu bulgu simbiyotik tasarım pratiğinde kullanılan yaklaşımların oluşturduğu bütünün, parçaların toplamından fazlası olduğunu kanıtlar niteliktedir. Ayrıca toplam müdahalelerin %60,5'i (288) maket, %39,5'i (188) istem müdahalesinden oluşmaktadır. Bu bulgu, iki aracın birlikte kullanılabilirliğini göstermekte ve maket yapımının istem oluşturmaktan daha etkin olduğuna işaret etmektedir, **Tablo 4**'te gösterilen S1 ve S2 arasında oluşan 0,35'lik fark bulgularla örtüşmektedir. Aynı zamanda S5'ten elde edilen 2,00'lık ortalama değer maket ve istem ile tasarlamak arasında yüksek miktarda fark olduğunu göstermektedir. Çalışma katılan bütün ekipler maketi istemden daha fazla kullanma eğilimi göstermiştir (bkz. **Şekil 4**).

Simbiyotik tasarım pratiğinin bir diğer çıktısı olarak, deney-1 ve deney-2 aşamasın karşılaştırıldığında, deney-2'de toplam müdahale sayısının %32,2 arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca deney-1 ve deney-2 süreçleri arasında farklılıklar olduğu anketteki S4 ile desteklenmektedir. Ancak, S6'dan elde edilen veri deney-1 aşamasında daha etkin tasarım yapıldığı yönündedir. Bu durum deney-2 aşamasında ekiplerin hedefledikleri tasarım çıktısını elde edebilmek için daha fazla müdahalede bulunduklarını işaret etmektedir. Tasarım yaparken kısıtların değişmesinin deneme-yanılma süreci üzerinde doğrudan etkisi bulunmaktadır. Ek olarak, deney-2'de istem müdahalesindeki artışın makete oranla daha fazla olması öğrencilerin üretken yapay zekâ modelleri ile tasarım yapma pratiğinde gelişmeye açık olmalarının bir göstergesidir.

4. Sonuçlar

Tasarım kavramı ve tasarlama eylemi doğası gereği karmaşıktır. Hesaplama güçleri artan donanımlar ile bilgisayar destekli tasarım süreçleri zaman içinde gelişmiş, alternatif tasarım yöntemleri oluşmuştur. Tasarımcılar ise bu alternatifleri deneyimlemektedir. Günümüzde bilgisayar destekli mimari tasarım sürecine ek olarak yapay zekâ destekli üretken modellerin tasarım eylemine katkısı araştırılmaktadır. Karmaşık olan tasarlama eylemi yapay zekâ araçlarıyla yeniden deneyimlenmektedir. Simbiyotik tasarım pratiği atölyesinde üretken yapay zekâ ve fiziksel maketin birlikteliğinin mimari tasarım sürecine etkisi araştırılmıştır. Maket ve istemleri içeren çift yönlü simbiyotik tasarım döngüsü sayesinde tasarım sürecinin hızlanmakta ve tasarım alternatifleri sürece etkin bir biçimde dahil olmaktadır. Tasarımcılar, üretken yapay zekânın sunduğu çok sayıda olası çözüm arasından, istediği etkiye en yakın olan görsel tasarım ürününü seçme imkânı bulmaktadır. Çalışma kapsamında seçilen yöntemlerin birlikte kullanılmasıyla bu üretimlerin etkinliği ve kısıtların sürece etkisi test edilmiştir.

Çalışmada elde edilen bulgular sonucunda fiziksel ve dijital araçların entegrasyonunun yaratıcı süreçleri zenginleştirdiği görülmektedir. Mimari maket üretimi ile yapay zekâ istemlerinin eş zamanlı ve interaktif kullanımını içeren tasarım deneyinde araçların birbirinden beslenerek tasarım pratiğini desteklediği tespit edilmiştir. Bu sonuç tanımlanan deneyde kullanılan araçların simbiyotik bir ilişki içinde olduğunu göstermektedir. Yapay zekâ destekli simbiyotik tasarlama pratiğinde maketlerin sonuç ürüne etkisinin istemlerden daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Geleneksel

tasarlama pratiği içerisinde öğretilen araçlara olan aşinalık bu bulgunun sebebi olarak görülmektedir. Farklı aşamalarda uygulanan kısıtlama değişimi yapılan çalışmada önemli değişimleri tetiklemiştir. İki deney arasındaki fark olan mimari problemlerin ve tasarım bağlamının kişiselleştirilebilir olması simbiyotik tasarım sürecini hızlandırmıştır. Tasarım bağlamının ekiplere bırakılması alternatif arayışını arttırmakla beraber, sonuç ürüne erişimi zorlaştırdığı fark edilmiştir. Bu nedenle katılımcılar tasarım probleminin net olduğu deney-1 aşamasının daha verimli olduğu sonucuna varmıştır. İki aşamada da tanımlanan bağlamdan kopmadan tasarım süreçleri yürütülmüştür. Ekiplerin kısa süre içerisinde kendi bağlamları üretebildiği ve o bağlamda tasarım yapabildikleri görülmüştür. Bu sebeple üretken yapay zekâ modellerinin sentetik veya gerçek bağlamları kolayca simüle edebildiği sonucuna varılmaktadır.

Yapay zekâ destekli görsel üretim ile fiziksel maket oluşturmanın senkronize edilmesi birbirlerini etkileme biçimi göz önüne alındığında tasarım sürecinin simbiyotik bir ilişkiye evrildiğini ortaya koymaktadır. Fiziksel ve dijital farklı araçların entegrasyonunun gelecek çalışmalar için yol gösterici olacağı öngörülmektedir. Bu çalışmada yapılan simbiyotik ilişki ve benzer ilişkilerin deneyimlenmesi özellikle mimarlık eğitimi ve pratiğinde yeni yaklaşımların ortaya çıkmasını sağlayacaktır. Simbiyotik tasarım araçları bağlamında ileride geliştirilecek akıllı etkileşimli geleneksel tasarım sistemleriyle dinamik yapay zekâ modelleri, tasarım alanındaki disiplinler arası iş birliklerini daha da derinleştirecektir.

Teşekkür
Çalışma kapsamında veri üretimine destek sağladıkları için “Simbiyotik Tasarım Pratiği: Mimarlıkta Maket ve Üretken Yapay Zekanın Entegrasyonu” isimli atölyeye katılan Bursa Uludağ Üniversitesi Mimarlık Bölümü öğrencilerine teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Alcaide-Marzal, J., Diego-Mas, J. A. (2025). Computers as co-creative assistants: A comparative study on the use of text-to-image AI models for computer aided conceptual design. *Computers in Industry, 164*(August 2024), 104168. https://doi.org/10.1016/j.compind.2024.104168

Başarır, L. (2022). Modelling AI in Architectural Education. *Gazi University Journal of Science, 35*(4), 1260-1278. https://doi.org/10.35378/gujs.967981

Çelik, T. (2023). Generative design experiments with artificial intelligence: Reinterpretation of shape grammar. *Open House International*. https://doi.org/10.1108/OHI-04-2023-0079

Comfyanonymous. (2024, 5 Şubat). *ComfyUI*. GitHub. Retrieved February 10, 2024, from https://github.com/comfyanonymous/ComfyUI

Driscoll, M. (2013). *Model making for architects*. Crowood.

Evans, R. (1986). *Translations from drawing to building*. MIT Press.

Hanson, J. (2001). Morphology and design. *Architectural Research Quarterly, 5*(1), 41–42.

Hettithanthri, U., Hansen, P., & Munasinghe, H. (2023). Exploring the architectural design process assisted in conventional design studio: A systematic literature review. *International Journal of Technology and Design Education, 33*(5), 1835–1859.

Kolarevic, B. (Ed.). (2003). *Architecture in the digital age: Design and manufacturing* (1st ed.). Taylor & Francis. https://doi.org/10.4324/9780203634561

Lawson, B. (2006). *How designers think: The design process demystified* (4th ed.). Routledge.

Li, C., Zhang, T., Du, X., Zhang, Y., & Xie, H. (2024). Generative AI models for different steps in architectural design: A literature review. *Frontiers of Architectural Research, 14*(3), 759–783. https://doi.org/10.1016/j.foar.2024.10.001

Oxman, R. (2006). Theory and design in the first digital age. *Design Studies, 27*(3), 229–265. https://doi.org/10.1016/j.destud.2005.11.002

Porter, T. (2004). *Archispeak: An illustrated guide to architectural terms* (1st ed.). Routledge. https://doi.org/10.4324/9780203643150

Radford, A., Kim, J. W., Hallacy, C., Ramesh, A., Goh, G., Agarwal, S., Sastry, G., Askell, A., Mishkin, P., Clark, J., Krueger, G., Sutskever, I. (2021, July). Learning transferable visual models from natural language supervision. *Proceedings of the 38th International Conference on Machine Learning (ICML 2021)* (ss. 8748–8763). PMLR.

Sauer, A., Lorenz, D., Blattmann, A., & Rombach, R. (2024, September). Adversarial diffusion distillation. *European Conference on Computer Vision* (pp. 87–103). Springer Nature Switzerland.

Schön, D. A. (1987). *Educating the reflective practitioner: Toward a new design for teaching and learning*. Jossey-Bass.

Simon, H. A. (1996). *The sciences of the artificial* (3rd ed.). MIT Press.

Singh, V., Gu, N. (2012). Towards an integrated generative design framework. *Design studies*, 33(2), 185-207. https://doi.org/10.1016/j.destud.2011.06.001

Smith, A. (2004). *Architectural model as machine* (1st ed.). Routledge. https://doi.org/10.4324/9780080472003

Yang, L., Kang, B., Huang, Z., Zhao, Z., Xu, X., Feng, J., & Zhao, H. (2024). Depth anything v2. *Advances in Neural Information Processing Systems, 37*, 21875–21911.

Zhang, L., Rao, A., & Agrawala, M. (2023). Adding conditional control to text-to-image diffusion models. *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision* (pp. 3836–3847).

2025 MSTAS

OTURUM 10

SANAL/ARTIRILMIŞ/KARMA GERÇEKLİK II

2025 MSTAS MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Sanal Gerçeklik Alanlarında Sesin Görsel Algıya Etkisi

Dila Erdoğdu[1]; Nuray Benli Yıldız[2]; Asena Kumsal Şen Bayram[3]
[1,2]Düzce Üniversitesi; [3]Maltepe Üniversitesi
[1]dila226715@ogr.duzce.edu.tr; [2] nuraybenli@duzce.edu.tr. [2] asenakumsalsenbayram@maltepe.edu.tr

Özet

Mekân, zamanla iç içe geçmiş bir varoluş alanıdır ve bireyin dünyada varlık bulma biçimi ile doğrudan ilişkilidir. Sadece fiziksel bir ortam yaratmaktan çok, insanın varoluşsal deneyimini şekillendiren bir kurgu planlaması olarak mimarlık ise mekânın ontolojik inşasında önemli bir rol oynar. Mekânın nasıl algılandığı ve bu algının nasıl ifade edildiği, mimarlık disiplini için önemli bir araştırma konusudur. Her ne kadar, görsel duyum algısal süreçte birincil öğe olarak düşünülse de birden fazla duyunun ortaklaştığı bir deneyimde bilişsel sonuçlar farklılaşabilir. Bu bağlamda araştırma, ışık ve sesin ortaklaştığı hacimsel niteliklerin optik ve harmonik bir deneyimle kalıcı hafıza izleri oluşturabileceği öngörüsü ile yola çıkmaktadır. Çalışmanın amacı; görsel ve işitsel uyaranların etkileşimini kullanarak, bireylerin mekânsal algı ve bellek etkileşimlerini anlamaya çalışmaktır. Bu amaçla araştırma, literatürdeki mekân tasvirlerine temellenen bir sanal gerçeklik ortamında interaktif bir deneyimin sonuçlarını tartışmaktadır. Tasarlanan sınırlı, duyusal ve hafızaya dayalı üç temel mekân tipine ait varyasyonlar, kullanıcıların görsel ve işitsel uyaranlara verdikleri tepkileri değerlendirmek amacıyla sanal bir deney düzeneğinde test edilmiştir. 3ds Max ve Rhino Grasshopper ortamlarında modellenen ve Unreal Engine 5.3 yazılımı ile geliştirilen 36 farklı oda, biçimsel çeşitlilik, malzeme farklılıkları ve hacimsel değişkenler esas alınarak tasarlanmış; kullanıcıların mekânsal deneyimleri, alfa, beta ve delta frekanslarında üretilen eşzamanlı tonlarla birlikte kurgulanmıştır. Hesaplanan akustik sönümlenme süreleri doğrultusunda ışıkla eşzamanlı olarak kurgulanan seslerin bir ışık kaynağı gibi davrandığı aydınlatma süreleri, mekân algısının çok duyulu olarak tetiklenmesine imkân tanımıştır. Farklı frekanstaki seslerin, biçim, renk ve konum üzerindeki etkilerini araştıran, toplamda farklı deneyim ve eğitim sürelerine sahip 28 mimar ve mimarlık öğrencisi ile yapılan 25 dakikalık deneyimlerin sonuçları, katılımcıların mekânı ne ölçüde algıladıkları, belleklerinde yer eden öğeler ve bunların ses frekansları ile ilişkisi üzerinden değerlendirilmiştir. Deneyim sonrası yapılan anket sonuçları ile elde edilen bulgular, dinamik seslerin karmaşık geometrilerle ilişkili bilişsel süreçleri güçlendirdiğini, yavaş ritimli seslerin ise daha sade hacimlerde duyusal sakinlik ve algısal netlik sağladığını göstermektedir. Böylece ses, mimarlıkta yönlendirici, bilişsel ve duygusal düzeyde bütüncül bir tasarım bileşeni olarak değerlendirilmiştir. Mekânın tekrarlı seslerle birlikte görsel olarak da deneyimlenmesinin kısa süreli görsel-uzaysal çalışma belleğini ve kortikal bağlantıyı artırdığını gösteren bu çalışma, farklı parametrelerle zenginleştirilerek, daha geniş sanal mekânda algı çalışmalarına veri sağlayabilecek niteliktedir.

Anahtar Kelimeler: *Mekânsal Algı, Duyusal Deneyim, İşitsel Ve Görsel Algı, Sanal Gerçeklik (VR), Bellek.*

MSTAS 2025 MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

The Effect of Sound on Visual Perception in Virtual Reality Environments

Dila Erdogdu [1]; Nuray Benli Yildiz [2]; Asena Kumsal Sen Bayram [3]
[1,2]Duzce University; [2]Maltepe University
[1]dila226715@ogr.duzce.edu.tr; [2] nuraybenli@duzce.edu.tr. [2] asenakumsalsenbayram@maltepe.edu.tr

Abstract

The spatial environment is an existential domain intertwined with time and is directly related to how individuals position themselves in the world. Beyond merely constructing physical enclosures, architecture plays a significant role in shaping this existential experience and contributes to the ontological formation of spatial settings. Understanding how the built environment is perceived—and how this perception is expressed—constitutes a critical area of inquiry within architectural discourse. While visual perception is often regarded as the dominant sensory input, cognitive outcomes may vary significantly when multiple senses are engaged simultaneously. In this context, the research is grounded in the hypothesis that volumetric qualities shaped through the integration of light and sound can generate lasting memory traces through a harmonic and optical experience. The aim of the study is to examine the interaction between visual and auditory stimuli and how this interaction affects the perception and memory of architectural environments. To this end, an interactive virtual reality experiment was developed based on spatial typologies drawn from architectural literature. Three primary types—bounded, sensory, and memory-based environments—were designed and expanded through formal and material variations. A total of 36 rooms were modeled in 3ds Max and Rhino Grasshopper and developed in Unreal Engine 5.3. These rooms incorporated formal diversity, material differentiation, and volumetric variation. Participants experienced these environments accompanied by isochronic tones in alpha, beta, and delta frequencies. Acoustic reverberation times were calculated using Sabine's formula, and light durations were synchronized accordingly, allowing the sound to function as a luminous element that enhanced multisensory perception.

The study involved 28 participants—architects and architecture students with varying levels of experience—who engaged in 25-minute sessions. Their responses were evaluated based on how effectively they perceived the spatial environments, the elements retained in memory, and how these related to sound frequency. Results from post-experience questionnaires revealed that dynamic auditory stimuli enhanced cognitive engagement in complex spatial forms, while slower rhythms promoted perceptual clarity and emotional calmness in simpler environments. The findings suggest that sound can function as a guiding, cognitive, and affective design element in architecture. This study, which shows that experiencing the space visually along with repeated sounds increases short-term visual-spatial working memory and cortical connectivity, can provide data for perception studies in wider virtual spaces by enriching them with different parameters.

Keywords: *Spatial Perception, Sensory Experience, Auditory and Visual Perception, Virtual Reality (VR), Memory.*

1. Giriş

Algı, bireyin bulunduğu mekânın sınırları içinde hem fiziksel olarak mevcut olanı hem de düşünsel düzlemde ortaya çıkan kavrayışların deneyimlenmesiyle şekillenen bir olgudur (Morgan, 1993). Bergson (1896) algının bir ayıklayıcı gibi çalıştığını, imgeler bütününden etkisiz imgeleri elediğini öne sürmektedir. Algıyı biçimlendiren şey ortamdaki tetikleyicilerdir. Bu tetikleyiciler deneyimlenen mekânın uzamsal anlamda tanımını da değiştirebilir.

Mekân, zamanla iç içe geçmiş bir varlık alanıdır ve bireyin dünyadaki varoluş biçimiyle doğrudan bağlantılıdır. Mimarlık ise yalnızca fiziksel mekânlar yaratmaktan öte, insanın varoluşsal deneyimini şekillendiren bir tasarım süreci olarak, mekânın ontolojik inşasında belirleyici bir rol oynar (Norberg-Schulz, 1980; Heidegger, 1971). Mekânın algılanışı ve bu algının nasıl ifade edildiği, mimarlık disiplini açısından önemli bir araştırma konusudur. Algısal süreçte görsel duyum öncelikli kabul edilse de birden fazla duyunun etkileşime girdiği deneyimlerde bilişsel sonuçlar değişebilir. Bu çerçevede, araştırma, ışık ve sesin kesiştiği hacimsel özelliklerin, optik ve akustik deneyimler aracılığıyla kalıcı hafıza izleri bırakabileceği varsayımıyla şekillenmektedir. Bu çalışmanın amacı, görsel ve işitsel uyaranların etkileşimini kullanarak bireylerin mekânsal algı ve bellek ilişkilerini anlamaktır.

Son yıllarda işitsel verinin mekânsal algı üzerindeki etkisi, mimarlık ve nörobilim kesişiminde giderek daha fazla önem kazanmaktadır. İşitme duyusunun, mekânın yalnızca görsel değil, aynı zamanda yönelimsellik, hacim ve atmosfer algısı gibi daha derin katmanlarını biçimlendirdiği ortaya konmuştur (Blesser & Salter, 2007; Pallasmaa, 2014). İşitsel algı mekânın hacimsel boyutlarını, derinliğini ve yönelimselliğini kavrama konusunda da kritik bir role sahiptir. Sanal gerçeklik ortamlarında işitsel ögelerin görsel uyaranlarla eşzamanlı kullanımı, kullanıcıların mekânla kurduğu ilişkide bilişsel ve duygusal bağ oluşumunu desteklemektedir (Serafin vd., 2018). Bu bağlamda, çok duyulu tasarım anlayışı, çağdaş mimarlıkta yalnızca fiziksel biçimi değil, deneyimsel yoğunluğu da kapsayan bir mekân tanımı sunmaktadır.

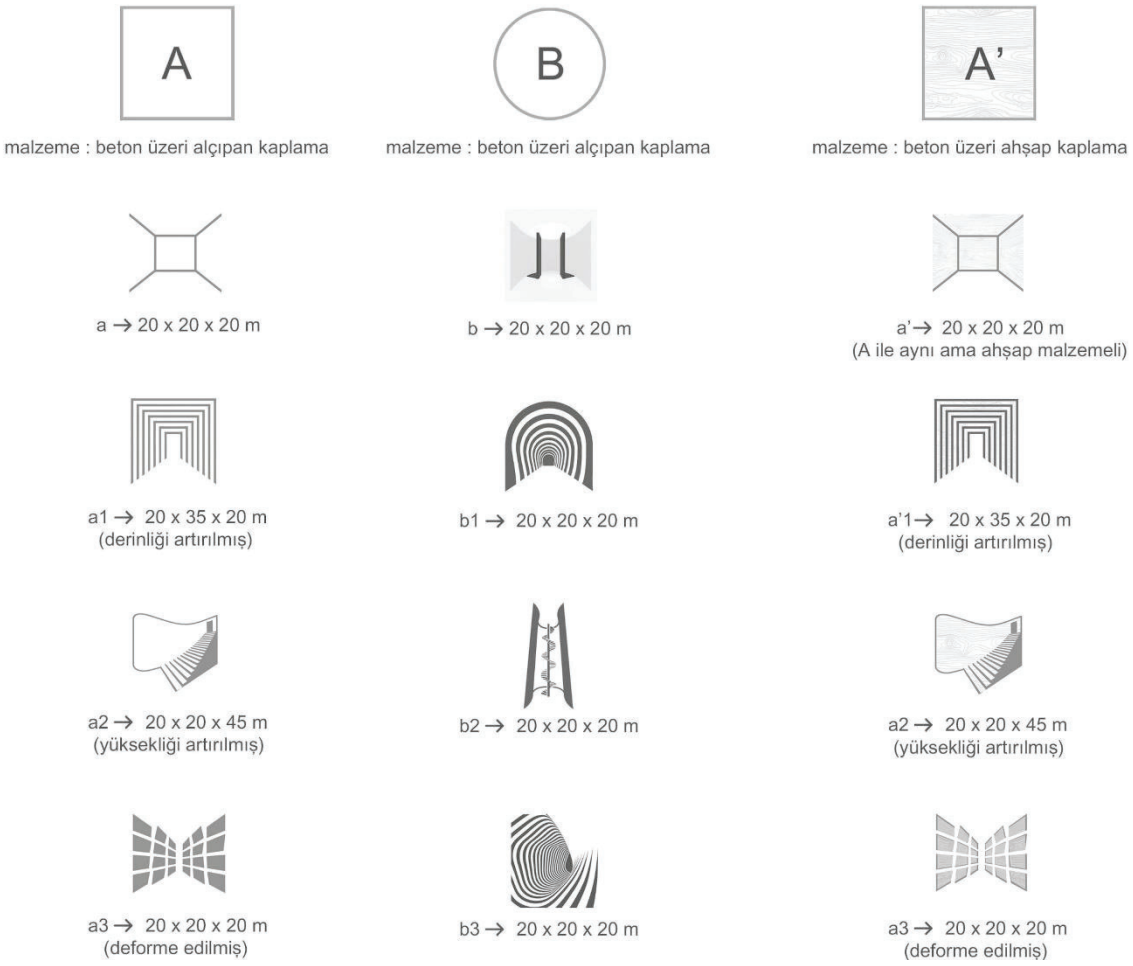
Bu çalışmanın çıkış noktası, sesin mimari deneyimdeki rolünü yalnızca estetik veya teknik değil, aynı zamanda bilişsel bir fenomen olarak ele almaktır. Amaç, farklı frekanstaki seslerin görsel mekânsal bellekle nasıl kesiştiğini anlamak ve bu kesişimin mimarlık disiplini için ne tür tasarım araçlarına dönüştürülebileceğini tartışmaktır.

2. Metodoloji

Mekân Roth (2018)'a göre; (1) duvarlar ve zeminden oluşan sınırlarla kısıtlanmış mekânlar, (2) duyusal-algısal mekânlar, (3) hafıza mekânları ve (4) davranışsal mekânlar olarak dört şekilde tanımlanmaktadır. Bu sebeple çalışmada deneyimin gerçekleştirileceği mekânın sınırlı, davranışsal etkileşime izin veren, hafızada yer eden ve duyular ile şekillenen bir yapıya sahip olması kararı verilmiştir.

Araştırma, nitel bir deneysel modelleme üzerine kuruludur. Deney, Unreal Engine 5.3 ortamında hazırlanan farklı mekânsal karakteristiklere sahip sanal odalarda gerçekleştirilmiştir. Her biri Roth'un (2018) mekân tipolojisine dayanan üç ana oda tipi (sınırlı-duvarsal, duyusal, hafızaya dayalı) tasarlanmış ve bu odalardan her biri üçer varyasyonla çoğaltılmıştır. Toplam 36 sanal mekân, 3ds Max ve Rhino Grasshopper ortamında modellenerek Unreal Engine ortamına aktarılmış, ses akustik parametreleri Sabine Formülü ile hesaplanıp ışıkla senkronize edildikten sonra BluePrint yazılım sistemi kullanılarak karşılıklı etkileşime dayalı interaktif bir sisteme dönüştürülmüştür.

Verilen kararlar doğrultusunda 3 adet ana oda tipi belirlenmiş ve bu oda tiplerinin özellikleri mimari elementlerle birlikte çeşitlendirilmiştir. Ana oda tip sınıflandırması "A odası" ile başlamaktadır. Fiziksel olarak sınırlı ama biçim olarak sade ve rijit olan bu oda tipi Roth'un (1) numaralı tanımı olan "duvarlar ve zeminden oluşan sınırlarla kısıtlanmış mekânlar" tanımına uymaktadır. İkinci ana oda tipi olan "B odası" silindirik yapısıyla klasik mekân tanımının biçimsel olarak dışına çıkan akışkan bir form yakalar ve kullanıcıda duyusal-algısal bir farkındalık yaratır. Bu oda tipi Roth'un (2) numaralı duyusal algısal mekânlar tanımını desteklemektedir. Üçüncü ana oda tipi "A' odası" olarak kurgulanmıştır. Bu oda tipi temel form olarak "A tipi" odaların aynısı olsa da malzeme olarak kullanılan ahşap malzeme algıda farklılık yaratmaktadır. Özellikle ahşap gibi sıcak malzemeler çevresel tetikleyicilerle zihinde sakinlik hissi yaratırken aynı zamanda hafızada olumlu derin izler bırakma potansiyeline sahiptir (Burnard & Kutnar, 2015). Bu yönüyle "A' odaları" Roth'un (3) numaralı tanımına uyarak hafıza mekânlarını oluşturur. Bu üç ana oda tipinden şekillenecek olan alt oda tipleri mekânsal algı ilkeleri incelendiğinde yükseklik, derinlik ve formda biçim bozuklukları olmak üzere çeşitlendirilmiştir. Alt oda tipleri **Şekil 1**'de şematize edilerek gösterilmiştir.



Şekil 1: Sanal mekânlarda mekânsal algı deneyi için modellenmiş oda tipleri

Odalar, 3sMax ve Rhino Grasshopper programlarında üç boyutlu olarak modellendikten sonra Unreal Engine 5.3 programına aktarılmıştır. Deneyin interaktif kısımları Unreal Engine 5.3 programı içinde bulunan BluePrint yazılımı ile oluşturulmuştur. Günümüzde gelişen mimari temsil araçları, söz konusu niteliklere sahip mekânların üretimini ve bu mekânların dinamik deneyimlere dönüştürülmesini sanal gerçeklik (SG) ortamları aracılığıyla mümkün kılmaktadır.

Sanal gerçeklikte mekânsal algı çalışmaları incelendiğinde, araştırmaların yoğunlukla görsel etkileşim ve algı üzerinde durduğu görülmüştür (Loomis & Knapp, 2003; Konrad vd., 2020; Korkut & Surer, 2023) Oysa ki görsel duyum algısal süreçte birincil öğe olarak düşünülse de Malnar ve Vodvarka (2004) mimarlık pratiğinde mekânın algılanması sırasında birden fazla duyunun ortaklaştığı bir duyumsamada bilişsel sonuçların farklılaşabileceğinden bahsetmiştir.

İşitme duyusu bu noktada önem kazanır. Görüş, bir mekânı algılarken odaklandığı nokta üzerinde çeşitli engeller varsa mekânın kısıtlı bir olgu olduğunu düşündürürken işitme duyusu mekânı ses dalgaları ve yansımalara göre şekillendirir (Rasmussen, 1993). Görme biçimsel olarak doğrusaldır ve tek bir odak noktası ile bütünleşir, ardından çeşitlenir. İşitme ise görmeye nazaran çok odaklı bir duyumdur. Dolayısıyla görme tek bir doğrultuda çalışırken işitme küresel bir biçimde faaliyet gösterir. Her iki duyu da birbiri olmadan yetersizdir, bu yüzden bir arada kullanılmaları mekânın algı deneyimini derinleştirir ve pekiştirir (Pallasmaa, 2014).

Görme duyusunun algılama biçimi, öncelikli olarak ışık kaynağından aldığı referansa dayanır ve bu durum, diğer duyular açısından da mekânın algılanabilirliğinde önemli bir rol oynar (Altan, 1983). İşitme duyusunda ise durum farklıdır. Birden fazla sesin olduğu bir ortamda işitsel algının hangi sesi nasıl seçtiğini araştıran Sussman (2017) dikkat öğesinin işitsel algıdaki seçicilikte önemli bir rol oynadığını düşünür. Birden fazla ses kaynağının bulunduğu karmaşık bir işitsel ortamda tüm seslere aynı anda erişilebilir. Dikkat sınırlayıcı bir kaynak olduğundan; dikkate alınmayanları filtrelemek yerine, ses belleğine geçici erişim de sağlar. Beynin algıladığı ve işlediği sesler, zihinsel durumları doğrudan etkileyebilir.

Özellikle ikili vuruşlar (binaural beats) ve eşzamanlı tonlar (isochronic tones) dikkat, hafıza ve zihinsel berraklık üzerinde olumlu etkiler yaratabilecek ses teknolojileridir (Aparecido-Kanzler vd., 2021). Bu yöntemler, beyin dalgalarını belirli frekanslara yönlendirmeyi amaçlayan ses nöromodülasyonu teknikleridir (Gruzelier, 1996). Normal işiten bir bireyin işitsel algı aralığı, yaklaşık olarak 20 Hz ile 20.000 Hz (20 kHz) arasındaki frekans spektrumunu kapsamaktadır. 200-300Hz ve 10kHz aralığındaki sesler insanın en hassas algıladığı ses frekans aralığıdır (Moller & Pedersen, 2004). Günlük konuşma dilinde esas olarak kullanılan bu frekans aralığındaki 200 Hz sesler çoğu müzik aletinin de temel frekanslarını barındırır (Önen, 2017).

Eşzamanlı tonlar (isochronic tones) herhangi bir sesin genliğinin belli bir oranda açılıp kapanmasıyla oluşturulur (Huang & Charyton, 2008). Hızlı yanıp sönen ışıkların beyni nasıl etkileyebildiğine benzer şekilde, ritmik ses darbeleri beyin dalgalarını yönlendirir ve beynin ritmik uyarıcılara senkronize olma eğiliminden yararlanır (Aparecido-Kanzler vd., 2021). Bazı eşzamanlı tonların ses frekanslarının bellek üzerinde güçlendirici etkisinin olduğu ve bilişsel işlevleri geliştirme alanında kullanıldığı çalışmalar mevcuttur. Eşzamanlı tonların (isochronic tones) ses frekansları farklı Hz aralıklarınca incelendiğinde alfa, beta ve delta dalgaları bu dalga modellerine örnek olarak verilebilir. Alfa dalgaları 8-13 Hz aralığındaki frekans kalıplarıdır. Bu dalga modelinin görselleştirme, yaratıcı süreç yönetimleri ve rahatlama üzerinde etkileri olduğu saptanmıştır. Alfa dalgaları hafıza optimizasyonu ve bellek bozukluklarının tedavisi için nörobilişsel bir potansiyele sahiptir (Klimesch, 1999). Beta dalgaları 13-39 Hz aralığında bulunup odaklanma, dikkat ve konsantrasyon ve biliş ile ilişkilidir. Dikkat eksikliği ve hiperaktivite bozukluğunun (DEHB) bazı semptomlarını iyileştirmede etkili olduğu belirlenen bu dalga modeli çevresel ilişki kurmayı da kolaylaştırır. Beauchene ve arkadaşları (2016); deneylerinde uygulanan 15 Hz beta deseninin sağlıklı genç kişilerde kısa süreli görsel-uzaysal çalışma belleğini ve kortikal bağlantıyı artırdığını göstermiştir. Delta dalgaları 0.5-4 Hz aralığındaki frekans modelidir. Bu dalgalar yavaş hali ile uykunun en derin ve bilinçsiz hali ile ilişkilendirilir. Delta modeli kişinin kendi ile daha bağlantılı hissettiği bir zihinsel empati ve mutluluk durumu yaratır. Bu durum sezgileri ve hafızayı geliştirir (Szentirmai vd., 2007). Beyni delta dalga frekansına (0.5-4 Hz) uyumlandırmak amacıyla; 200Hz olarak belirlenen taşıyıcı frekansta ayarlanmış bir sinüs dalgası, saniyede 4 kez açılıp kapatılarak harmonik bir eşzamanlı delta ton oluşturulabilir. Hafıza ve bellek üzerinde yapılan bu araştırmalar doğrultusunda alfa, beta ve delta dalgalarının mekân algısı üzerinde etkili olabileceği saptanmıştır. Bu sebeple araştırmada kullanılmak üzere; 200Hz taşıyıcı ses frekansı üzerinde alfa, beta ve delta eşzamanlı tonlarında (isochronic tones) üç adet melodi üretilmiştir. Bu kapsamda yapılan çalışma oluşturulmuş eşzamanlı ton seslerinin kullanıcıların mekânsal algısını SG ortamlarında nasıl etkilediğini anlamaya odaklanmaktadır.

Araştırma, ışık ve sesin eşzamanlılığı üzerinden kurgulanan mekânsal kompozisyonların, hafızada kalıcılığı destekleyebilecek bir deneyim alanı oluşturabileceği öngörüsünden hareket etmektedir. Bu bağlamda; deneyde kullanılacak ışık süreleri, oluşturulan odaların gerçek hacimleri içerisinde yer alan bir ses kaynağından yayılan tasarlanmış melodi frekansının akustik olarak kaç saniyede sönümleneceği ile doğru orantılı olarak kurgulanmıştır. Odaların gerçek hacminin akustik sönümlenme süresi Sabine Formülü (Sabine Reverberation Time Equation) ile hesaplanabilir (Nowoświat & Olechowska, 2015). Formül şu şekilde hesaplanmaktadır;

$$RT60 = \frac{0.161 \times V}{A} \quad (1)$$

V: Odanın hacmi (m^3)

A: Toplam ses soğurma yüzeyi (sabins)

A = α × S

α: Malzemenin soğurma katsayısı

S: Odanın toplam iç yüzey alanı (m^2)

Deneyde oluşturulmuş olan A odası için örnek hesaplama şu şekildedir;

Oda ölçüleri: 20m × 20m × 20m (küp)

Hacim:
V = 20 × 20 × 20 = 8000 m³

Yüzey Alanı:
S = 6 × (20 × 20) = 2400 m²

Malzeme: Alçıpan (soğurma katsayısı α = 0.06)

Toplam soğurma yüzeyi:
A = 0.06 × 2400 = 144 sabins

RT60:
RT60 = (0.161 × 8000) / 144 = 8.94 saniye

Formül tasarlanan bütün odalar için uygulanmış ve ses yankı sönümlene süreleri bu formül doğrultusunda hesaplanmıştır. Odaların 200Hz taşıyıcı frekans için yankı süreleri aşağıda bulunan **Tablo 1'de** verilmiştir;

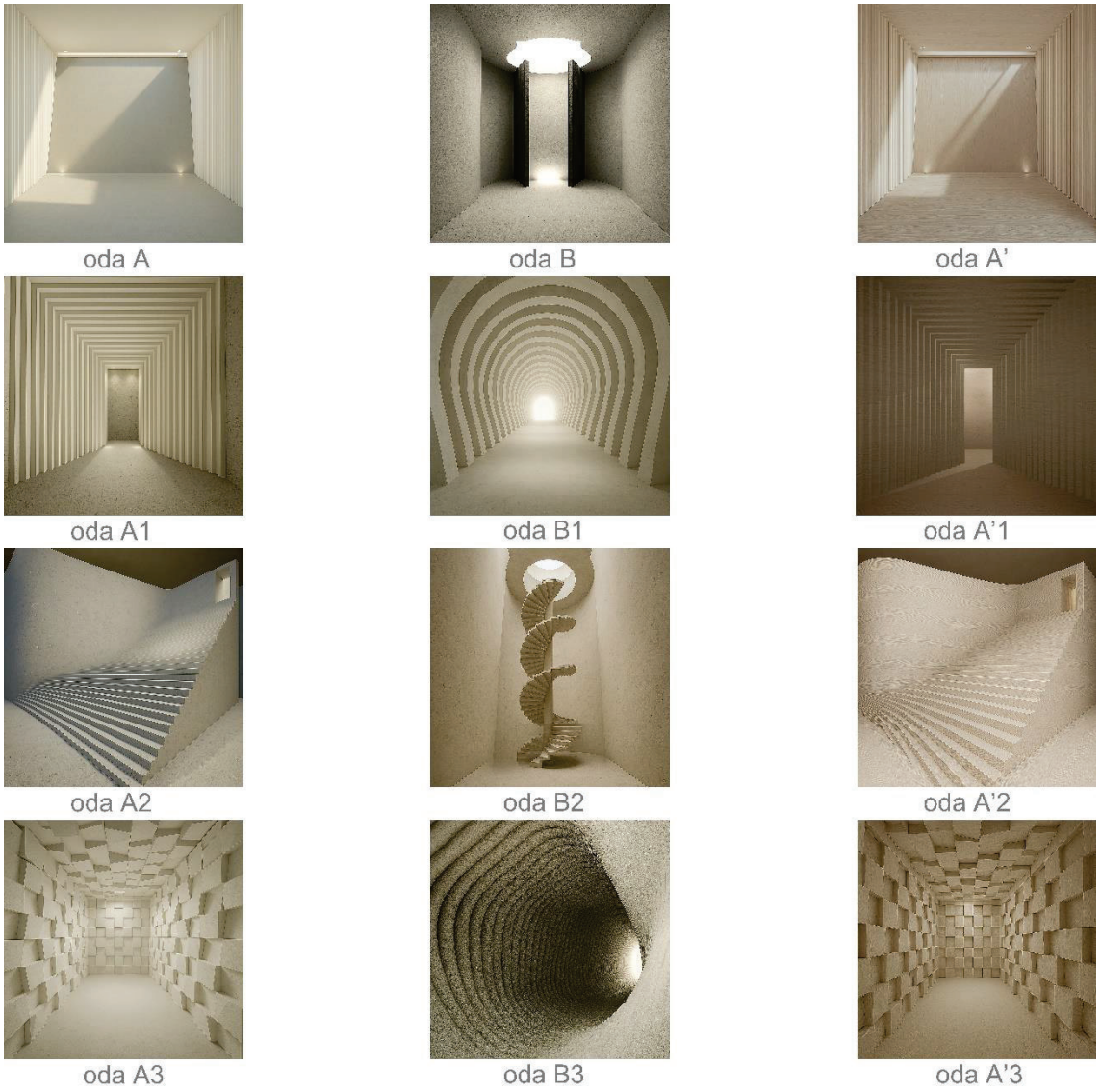
Tablo 1: Odaların Sabine Formülü ile hesaplanmış yankı süreleri

Oda	Şekil	Boyutlar (m)	Kaplama	Yankı Süresi (s)
A	Küp	20×20×20	Alçıpan	8.94
A1	Yüksek Küp	20×35×20	Alçıpan	10.44
A2	Derin Küp	20×20×45	Alçıpan	10.98
A3	Deforme Küp	20×20×20(Deforme)	Alçıpan	10.32
A'	Küp	20×20×20	Ahşap	4.61
A'1	Yüksek Küp	20×35×20	Ahşap	5.38
A'2	Derin Küp	20×20×45	Ahşap	5.66
A'3	Deforme Küp	20×20×20(Deforme)	Ahşap	5.32
B	Silindir	Ø20×20	Alçıpan	8.94
B1	Yüksek Silindir (Yatay)	Ø20×35	Alçıpan	10.44
B2	Derin Silindir (Dikey)	Ø20×45	Alçıpan	10.98
B3	Spiral Silindir	Ø20×45 Spiral	Alçıpan	10.98

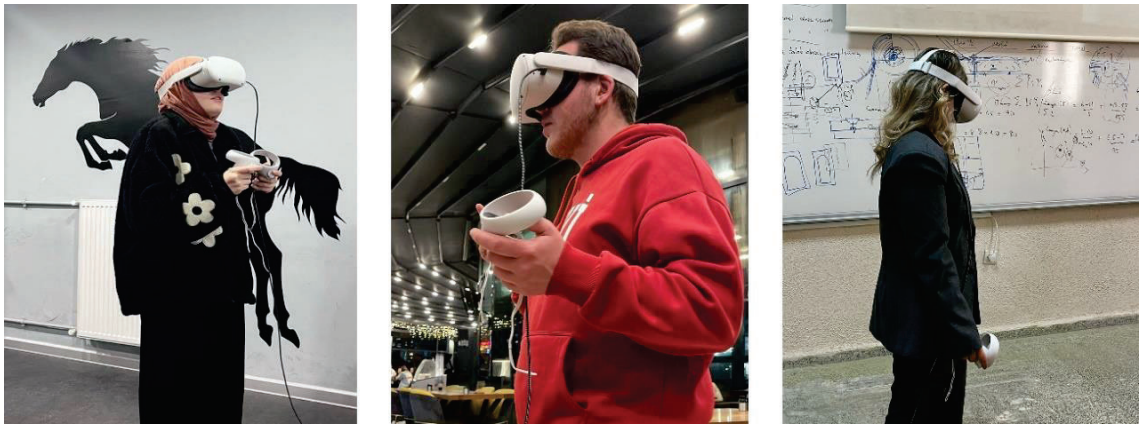
Deneyimciler, deney başlangıcında merkezî bir pozisyonda konumlanmakta ve çevrelerinde konumlanan 36 kapıdan birini seçerek odalara ışınlanmaktadır. Her oda başlangıçta karanlıktır. Kullanıcı, kontrol cihazı ile sesi tetiklediğinde, ortam belirlenen üç sesten biri ile eşzamanlı olarak ses ve ışıkla aydınlatılır. Bu süre boyunca kullanıcı mekânı hem işitsel hem görsel olarak algılar. Süre bitiminde ortam yeniden karanlığa bürünür. Deney kişinin her oda içerisinde 30 saniye kalabileceği şekilde düzenlenmiştir. 30sn boyunca ışık ve ses istenirse tekrar aktive edilebilir. Süre dolduğunda sistem otomatik olarak kişiyi tekrar başlangıç alanına götürecektir. Deney deneyimcinin başka bir kapıyı seçmesi ile devam eder. Tamamlanan her odanın kapısı deneyim sonrası siyaha döner ve tekrar girilemez. Çalışma, katılımcının 36 odalık deneyim sürecini tamamlamasıyla birlikte sona erecek şekilde kurgulanmıştır.

Deneye 28 mimarlık öğrencisi ve mimar katılmıştır. Katılımcıların her biri toplamda 25 dakikalık bir SG deneyimi yaşamış, ardından yapılandırılmış bir anket formu ile değerlendirmeleri kayıt altına alınmıştır. Anket, mekânın

hatırlanabilirliği, odaklanma düzeyi, yönelimsellik, duyusal eşleşme ve sesin etkisi başlıklarında Likert tipi sorulardan ve açık uçlu yorumlardan oluşmaktadır. Deneyde kullanılan oda modelleri **Şekil 2** ve **Şekil 3'**te gösterilmiştir;



Şekil 2: Modellenen oda görselleri



Şekil 3: Sanal gerçeklik (VR) deney oturumlarından fotoğraflar

3. Araştırma ve Bulgular

Elde edilen bulgular, sesin yalnızca işitsel bir uyarıcı olmanın ötesinde, mekânsal algıyı doğrudan etkileyen bir bileşen olduğunu göstermektedir. Katılımcılar, mekânı deneyimlerken ses frekanslarına bağlı olarak farklı görsel ve duyusal çağrışımlara sahip olmuş, bu da işitsel girdilerin mekânsal hafıza üzerindeki etkisini doğrulamıştır. Ayrıca, yüksek frekanslı seslerin bellek izlerinde daha keskin sınırlar ve belirgin geometrik formlar oluşturduğu, düşük frekanslı seslerin ise mekâna daha akışkan ve organik bir karakter kazandırdığı gözlemlenmiştir.

3.1. Sayısal Değerlendirmeler

Katılımcılardan 1 ile 5 arasında puanlamaları istenen değerlendirme soruları, sesin odaklanma ve görsel belleğe etkisi üzerine önemli bulgular sunmuştur.

- Sesin odaklanmaya etkisi, ortalama 3,86 puanla değerlendirilmiş, bu da katılımcıların genel olarak sesin dikkat dağıtmak yerine odaklanmayı kolaylaştırdığını düşündüklerini göstermektedir.

- Sesin görsel bilgilerin hatırlanmasına etkisi ise ortalama 3,64 puanla değerlendirilmiş, bu bulgu sesin görsel belleği destekleyen bir unsur olarak algılandığını ortaya koymaktadır.

3.2. Nitel Gözlemler ve Katılımcı Geri Bildirimleri

Deney sonrasında yöneltilen açık uçlu sorular, sesin algı ve hatırlama üzerindeki etkisini daha derinlemesine anlamaya olanak tanımıştır:

- “Bazı odaları daha net hatırlıyor musunuz?”
- Tüm katılımcılar bu soruya "Evet" yanıtını vermiştir. Bu, bazı mekânsal ögelerin ya da sesle ilişkili deneyimlerin zihinlerde daha belirgin şekilde yer ettiğini göstermektedir.
- “Ses, ortam algınızı değiştirdi mi?”
- Katılımcıların %75’i (21 kişi) bu soruya "Evet" yanıtını vermiştir. Yanıtlarda, sesin mekânın genişliğini ya da darlığını algılamada etkili olduğu, yalnızca işitsel değil aynı zamanda mekânsal bir faktör olarak da işlediği belirtilmiştir.
- “Mekân yapısını sesle daha iyi kavradığınız oldu mu?”
- Katılımcıların yine %82’si, sesin mekân yapısını anlamada yardımcı olduğunu ifade etmiştir. Bu durum, sesin mekânsal çözümlemede aktif bir rehber olarak işlev gördüğüne işaret etmektedir.
- “Hayal etmekte sese kulak verirken mi daha başarılıydınız, sessizlikte mi?”

Bu soruya katılımcıların %79’u (22 kişi), “Sesle birlikte” hayal etmenin daha kolay olduğu cevabını vermiştir. Bu sonuç, sesin zihinsel imgelem ve hayal kurma süreçlerini desteklediğini göstermektedir.

Veri analizine göre, farklı ses türlerinin farklı mekânsal kurgularla olan eşleşmesi katılımcı algısında belirgin biçimde ayrışmaktadır. Titreşimli sesler, mimari olarak karmaşık, hareket içeren veya organik formlu mekânlarda daha belirgin bir zihinsel iz bırakmıştır. Bu ses türü özellikle spiral merdivenli (örneğin, b2 odası) ya da amorf yapılı alanlarda algısal bir gerginlik ve yönelim duygusu yaratmıştır. Katılımcılar bu tarz mekânlarda, sesin ritmik yapısı sayesinde mekânsal çözümlemede daha aktif olduklarını belirtmişlerdir.

Öte yandan, yavaş ya da yumuşak ritimli sesler, daha sade ve açık mekân kurgularında (örneğin camlı ve dış manzaralı a’1 odası) hatırlanabilirliği artırmıştır. Bu tür sesler, genişlik ve sakinlik hissi yaratarak mekânsal bellek üzerinde rahatlatıcı bir etki bırakmıştır. Görsel bilgiyle birlikte sesin eşzamanlı varlığı, hem mekânın daha etkili bir şekilde kurgulanmasını hem de katılımcının duygusal durumunu doğrudan etkilemiştir.

Bu bulgular, sesin yalnızca işitsel bir unsur değil, aynı zamanda mekân algısını şekillendiren güçlü bir bilişsel araç olduğunu göstermektedir. Tasarım sürecinde sesin bilinçli kullanımı hem kullanıcı deneyimini hem de mekânsal hafızayı doğrudan dönüştürebilecek potansiyele sahip olduğu bir kez daha görülmüştür.

3.3. Sesin Mekânsal Belleğe Etkisi: Ses Türleri ile Mekân Kurguları Arasındaki Tematik İlişkiler

Katılımcı yanıtlarının tematik analizi, farklı ses türlerinin zihinsel olarak farklı mekân algılarıyla eşleştiğini ve bu eşleşmelerin mekânsal belleği anlamlı biçimde etkilediğini ortaya koymuştur. İki ana ses kategorisi belirginleşmiştir:

titreşimli/dinamik sesler ve yavaş/yumuşak ritimli sesler. Bu sesler hem algısal düzeyde hem de duygusal geri bildirimlerde belirgin mekânsal karşılıklarla ilişkili bulunmuştur. Titreşimli sesler, spiral merdivenler, amorf planlı odalar veya çok yönlü, karışık mimari yapılar gibi çözülmesi zor mekânlarla ilişkilendirilmiştir (b2, b3 gibi odalar). Katılımcılar bu mekânları dikkat arttıran, keşfetmeye yönelten ve hafızada daha net yer eden deneyimler olarak tanımlamıştır. Bu durum, dinamik seslerin mekân içinde algısal bir gerilim ve merak oluşturarak yön bulma gibi bilişsel fonksiyonları tetiklediğine işaret etmektedir (Blesser & Salter, 2007; Gaver, 1993).

Yavaş ve yumuşak ritimli sesler ise, daha sade, açık ve görsel olarak dış dünyaya bağlı odalarla (a'1 gibi camlı, manzaralı odalar) özdeşleşmiştir. Katılımcılar bu alanları ferah, güvenli ve rahatlatıcı olarak tanımlamış, bu da yumuşak tempolu seslerin mekânsal bellek üzerinde olumlu bir çağrışımsal iz bıraktığını göstermiştir. Tuan'a (1977) göre, deneyimle şekillenen yer kavramı, güvenlik ve aidiyet gibi duygularla inşa edilir; dolayısıyla ses gibi duyusal ögeler, mekânın zihinsel temsiline katkı sağlayarak onu 'yer'e dönüştürebilir. Katılımcıların %82'si, sesi bir rehber olarak kullanarak mekânsal çözümlemede daha başarılı olduğunu belirtmiştir. Bu oran, işitsel girdilerin yalnızca atmosferik değil, aynı zamanda yönlendirici bir etkisinin olduğunu göstermektedir. Yüksek frekanslı beta sesleri, kullanıcıların daha keskin hatlara ve sert dokulara sahip mekânları tanımlamasına yol açarken, delta frekansları daha yumuşak, oval ve açık renkli hacimlerle ilişkilendirilmiştir.
Katılımcıların %79'u, sesli ortamda deneyimledikleri mekânları sessiz ortamlara göre daha net hatırladıklarını ifade etmiştir. Bu durum, sesin kısa süreli görsel-uzaysal belleği tetiklediğini göstermektedir (Beauchene et al., 2016). Özellikle spiral merdivenli odalar gibi kompleks geometrilere sahip hacimlerde, ritmik titreşimli seslerin kullanıcıları yönelime teşvik ettiği gözlenmiştir.

Tematik analiz, ses tiplerinin mekân karakteristikleriyle eşleştiğini ortaya koymuştur:
- Beta sesler (15 Hz): Keskin, rijit, dik açılı formlar, dar hacimler.
- Alfa sesler (10 Hz): Dairesel, akışkan formlar, orta ölçekli hacimler.
- Delta sesler (4 Hz): Açık, amorf ve doğal ışık alan mekânlar.

4. Sonuçlar

Deney, mekânın tekrarlı seslerle birlikte görsel olarak da deneyimlenmesinin kısa süreli görsel-uzaysal çalışma belleğini ve kortikal bağlantıyı güçlendirdiğini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, farklı parametrelerle zenginleştirildiğinde, daha geniş ölçekli sanal mekân algı çalışmalarına veri sağlayabilecek nitelikte olup, mimari tasarım süreçlerinde sesin mekânsal algıya etkisini anlamaya yönelik yeni perspektifler sunmaktadır.

Çalışmanın bulguları, sesin mekânsal algı üzerindeki etkisini yalnızca yön bulma ya da atmosfer oluşturma düzeyinde değil, aynı zamanda bilişsel haritalama ve hafıza oluşumu süreçlerinde de etkili olduğunu göstermektedir. Katılımcıların çoğunluğunun titreşimli sesleri karmaşık mekânsal yapılarda daha net hatırlaması, sesin yapısal karmaşıklıkla uyumlu bir bilişsel tetikleyici olabileceğine işaret etmektedir. Yavaş tempolu seslerin ise görsel olarak açık ve yatıştırıcı alanlarda kullanıldığında mekânsal netliği ve duygusal konforu artırdığı gözlemlenmiştir. Bu durum, mimari tasarımda sesin deneyimi derinleştiren bir tasarım bileşeni olarak kullanılabileceğini ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, ses-mekân ilişkisi sadece işitsel estetik açısından değil, aynı zamanda kullanıcı odaklı, çok duyulu bir mekân tasarım dili geliştirmek için önemli bir araç haline gelmektedir.

Mimarlıkta işitsel deneyim, sadece akustik konfor düzeyinde değil, aynı zamanda mekânsal imgelerin kalıcılığı ve anlam inşası açısından da belirleyici rol oynayabilir. Özellikle VR gibi simülasyon ortamlarında bu potansiyel daha da görünür hale gelmekte; sesler, kullanıcının yön bulma, keşif, dikkat odaklanması gibi bilişsel süreçlerini doğrudan etkileyebilmektedir. Mekânın deneyimsel tasarımı, geleneksel estetik yaklaşımların ötesinde, duyusal modülasyonlara açık hale gelmektedir. Bu çerçevede, sesin bir tasarım parametresi olarak düşünülmesi, özellikle sanal mimarlıkta kullanıcı deneyimini daha bütüncül kılma potansiyeline sahip olduğu görülmüştür.

Pallasmaa'nın (2014) işaret ettiği gibi, görsel egemenliğin ötesine geçen bir duyusal mimarlık, bireyin mekâna fiziksel değil, varoluşsal olarak da yerleşmesini sağlar. Araştırmanın ortaya koyduğu üzere, farklı frekansların bireysel zihinsel durumlar üzerinde yarattığı etkiler, mekân tasarımını yalnızca görsel değil, bilişsel ve duygusal katmanlarla da bütünleştirmektedir.

Sesin mimari deneyimdeki rolünü çok duyulu bir bağlamda ele alan bu çalışmadaki bulgular, alfa dalgalarının odaklanmada önemli bir rol oynadığı, beta dalgalarının dikkati artırıcı, delta dalgalarının ise mekânsal empatiyi güçlendirici etkilerinin bulunduğunu ortaya koymakta ve sanal ortamlarda duyusal bütünlük sağlanması açısından yeni bir paradigma önermektedir. Araştırma sesin mimarlıkta, mimarlık eğitiminde ve sanal ortam tasarımlarında etkin bir tasarım aracı olarak kullanıldığında, kullanıcı deneyimini derinleştirme açısından önemli bir potansiyel sunacağını öngörmekle birlikte gelecekte sanal gerçeklik teknolojileriyle desteklenerek, mekân-ses ilişkisini daha ayrıntılı bir şekilde ele almayı ve mimarlık alanında duyusal algıya dayalı tasarım yaklaşımlarına katkı sağlamayı hedeflemektedir.

KAYNAKLAR

Altan, İ. (1983) *Mimaride Işık-Gölge İlişkilerinin Psikolojik Etkileri Üzerine Bir Araştırma* [Basılmamış Doktora Tezi , Yıldız Teknik Üniversitesi].

Aparecido-Kanzler, S., Cidral-Filho, F. J., ve Prediger, R. D. (2021). Effects of binaural beats and isochronic tones on brain wave modulation: Literature review. *Revista mexicana de neurociencia, 22*(6), 238-247.

Beauchene C, Abaid N, Moran R, Diana RA, Leonessa A. (2016). The effect of binaural beats on visuospatial working memory and cortical connectivity. *PLoS One*, 11:e0166630.

Bedenel, A.-L., Jourdan, L., ve Biernacki, C. (2019). Probability estimation by an adapted genetic algorithm in web insurance. In R. Battiti, M. Brunato, I. Kotsireas, ve P. Pardalos (Eds.), *Lecture notes in computer science: Vol. 11353. Learning and intelligent optimization* (pp. 225–240). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05348-2_21

Bergson, H (1896). *Matière et Mémoire*. Paris: Librairie Felix Alcan.

Blesser, B. ve Salter, L.-R. (2007). *Spaces speak, are you listening? Experiencing aural architecture*. MIT Press.

Burnard, M. D., ve Kutnar, A. (2015). Wood and human stress in the built indoor environment: a review. *Wood science and technology, 49*(5), 969-986.

Gaver, W. W. (1993). *How do we hear in the world? Explorations in ecological acoustics*. Ecological Psychology.

Gruzelier, J. H. (1996) New advances in EEG and cognition. *Int J Psychophysiol 24*:1-5.

Heidegger, M. (1971). *Poetry, Language, Thought* (A. Hofstadter, Trans.). Harper ve Row.

Huang, T.L ve Charyton, C. (2008). A comprehensive review of the psychological effects of brainwave entrainment. *Alternative Therapies in Health Medicine, 14*(5), 38-49.

Klimesch W. (1999). EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: a review and analysis. *Brain Res Rev. 29*, 169-95.

Konrad, R., Angelopoulos, A., ve Wetzstein, G. (2020). Gaze-contingent ocular parallax rendering for virtual reality. *ACM Transactions on Graphics (TOG), 39*(2), 1-12.

Korkut, E. H., & Surer, E. (2023). Visualization in virtual reality: a systematic review. Virtual Reality, 27(2), 1447-1480

Loomis, J. M., ve Knapp, J. M. (2003). Visual perception of egocentric distance in real and virtual environments. In *Virtual and adaptive environments* (pp. 21-46). CRC Press.

Malnar, J. M. ve Vodvarka, F. (2004). *Sensory design*. University of Minnesota Press.

Moller, H., ve Pedersen, C. S. (2004). Hearing at low and infrasonic frequencies. *Noise and health, 6*(23), 37-57.

Morgan,C. T. (1993). *Psikolojiye giriş ders kitabı* (Çev. Arıcı, H. ve diğerleri, 10. Basım). Ankara: Hacettepe Üniversitesi Psikoloji Bölümü Yayınları No:1.

Norberg-Schulz, C. (1980). *Genius Loci: Towards a Phenomenology of Architecture*. Rizzoli.

Nowoświat, A., & Olechowska, M. (2015). Investigation studies on the application of reverberation time. *Archives of acoustics, 41*(1), 15-26.

Önen, U. (2017, October 16). *Frekans aralıkları*. Ufuk Önen. https://www.ufukonen.com/tr/frekans-araliklari.html

Pallasmaa, J. (2014). *Tenin Gözleri* (A. U. Kılıç Çev.). İstanbul: YEM Yayınları.

Roth, L. (2018). *Understanding architecture: Its elements, history, and meaning*. Taylor & Francis.

Serafin, S., Geronazzo, M., Erkut, C., Nilsson, N. C., ve Nordahl, R. (2018). Sonic interactions in virtual reality: State of the art, current challenges, and future directions. *IEEE computer graphics and applications, 38*(2), 31-43.

Rasmussen, S. E. (1993). *Experiencing architecture* [Yaşanan Mimari] (Ö. Erduran), Remzi Kitabevi, İstanbul, 2010.

Sussman E. S. (2017). Auditory Scene Analysis: An Attention Perspective. Journal of speech, language, and hearing research : *JSLHR, 60*(10), 2989–3000. https://doi.org/10.1044/2017_JSLHR-H-17-0041

Szentirmai, E., Yasuda, T., Taishi, P., Wang, M., Churchill, L., Bohnet, S., Magrath, P., Kacsóh, B., Jimenez, L., & Krueger, J. M. (2007). Growth hormone-releasing hormone: cerebral cortical sleep-related EEG actions and expression. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol, 293*(2):R922-30.

Tuan, Y.-F. (1977). *Space and place: The perspective of experience.* University of Minnesota Press.

MSTAS 2025 MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Tarihi Yapıların Analiz Süreçlerine VR Sistemlerinin Entegre Edilmesi: İnayetullah Camii Örneği

Hasan SÖYLEMEZ[1]; Mustafa Haki ERASLAN[2]; Serap SEVGİ[3]; Mesut YILMAZ[4]
[1,2,3]Karabük Üniversitesi
[1]hasansoylemez@karabuk.edu.tr; [2]hakieraslan@karabuk.edu.tr; [3]serapsevgi@karabuk.edu.tr; [4]yilmazmesut10@gmail.com

Özet

Bu çalışma, Çorum ili sınırlarında yer alan ve günümüzde İnayetullah Camii olarak bilinen yapının tarihsel süreç içerisinde geçirdiği mekânsal ve işlevsel değişimleri, dijital belgeleme teknikleri ve sanal gerçeklik (VR) teknolojileri aracılığıyla analiz etmeyi ve deneyimlenebilir hale getirmeyi amaçlamaktadır. Yapıya ilişkin en erken tarihli arşiv kaydı 1926 yılına ait olsa da, mimari izler, malzeme kullanımı ve bölgedeki benzer yapılarla yapılan karşılaştırmalı analizler, yapının 20. yüzyıl başlarında mescit olarak inşa edildiğini, zamanla camiye dönüştürüldüğünü ortaya koymaktadır. Bu dönüşümde minberin ve ahşap minarenin yapıya eklenmesi, işlevsel farklılaşmayı belirleyen temel unsurlar arasında yer almaktadır.

Çalışma kapsamında, yapının tarihsel gelişimi üç ana döneme ayrılarak ele alınmıştır: ilk inşa dönemi (mescit olarak kullanıldığı dönem), onarım sonrası dönem (minber ve minarenin eklendiği, işlevsel olarak camiye dönüştüğü dönem) ve mevcut durum (bugünkü mimari kimliğini kazandığı dönem). Her bir dönem için detaylı restitüsyon projeleri hazırlanmış, bu projeler temel alınarak üç boyutlu dijital modeller oluşturulmuştur. Veri toplama sürecinde arşiv taramaları ve literatür incelemelerine ek olarak, yapının mevcut durumunun yüksek doğrulukla belgelenmesi amacıyla fotogrametrik ölçüm teknikleri ile yersel lazer tarama yöntemleri bir arada kullanılmıştır. Bu hibrit belgeleme yaklaşımı, hem geometrik hem de dokusal özelliklerin hassasiyetle kaydedilmesini mümkün kılmıştır.

Elde edilen veriler sistematik biçimde sınıflandırılarak dijital ortama aktarılmış ve SketchUp yazılımı kullanılarak detaylı 3B modeller üretilmiştir. Bu modellerde yapıların iç mekân unsurları olan minber, mihrap, ahşap tavan detayları gibi ögeler ayrıntılı şekilde modellenmiştir. Üç dönem için ayrı ayrı hazırlanan bu modeller, yapının farklı zamanlardaki fiziksel ve işlevsel durumlarını kullanıcıların görsel ve mekânsal olarak deneyimleyebileceği bir formatta sunmayı amaçlamaktadır.

Dijital modeller, sanal gerçeklik ortamına aktarılmak üzere Unity oyun motoruna entegre edilmiştir. Unity'nin kapsamlı VR geliştirme araçları, görsel programlama destekleri ve Meta Quest Oculus 3 gözlüğü ile olan uyumluluğu sayesinde kullanıcı etkileşimine açık, sürükleyici bir deneyim ortamı oluşturulmuştur. Uygulama içerisinde, kullanıcıların farklı dönemlere ait modellere geçiş yapmalarına olanak sağlayan arayüzler ve kontrol mekanizmaları geliştirilmiştir. Böylece kullanıcılar, caminin üç ayrı tarihsel dönemine ait versiyonları arasında gezinebilmekte, mimari unsurları karşılaştırmalı olarak gözlemleyebilmektedir.

Bu çalışmanın en önemli çıktılarından biri, kültürel miras yapılarının sanal ortamlarda yeniden inşa edilerek deneyimlenebilir hale getirilmesidir. Bu yaklaşım, özellikle mimarlık ve sanat tarihi gibi disiplinlerde eğitim aracı olarak kullanılabileceği gibi, koruma ve restorasyon süreçlerinde karar vericilere önemli bir öngörü ve analiz imkânı sunmaktadır. Ayrıca, yapıların fiziksel erişiminin mümkün olmadığı durumlarda, sanal deneyim yoluyla toplumun geniş kesimlerine kültürel mirasın tanıtılması sağlanabilmektedir.

Sonuç olarak bu çalışma, geleneksel mimari belgeleme yöntemlerinin ötesine geçerek, dijital teknolojilerin kültürel miras alanındaki potansiyelini ortaya koymakta; görselleştirme, belgeleme ve eğitsel amaçlarla kullanılabilecek çok yönlü bir uygulama geliştirmektedir. Yapının tarihsel değişimini mimari ve mekânsal boyutlarıyla sanal ortamda deneyimlenebilir hale getiren bu yöntem, benzer projeler için örnek teşkil edecek nitelikte bütüncül bir metodoloji sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: *VR, Restorasyon, Geleneksel Cami, Dijital Rekonstrüksiyon.*

2025 MSTAS MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Integrating VR Systems into the Analysis Process of Historical Buildings: The Case of Inayetullah Mosque

Res. Ass. Hasan SÖYLEMEZ[1]; Res. Ass. Mustafa Haki ERASLAN[2]; Asst. Prof. Serap SEVGİ[3]; Mesut YILMAZ[4]
[1,2,3]Karabuk University
[1]hasansoylemez@karabuk.edu.tr; [2]hakieraslan@karabuk.edu.tr; [3]serapsevgi@karabuk.edu.tr; [4]yilmazmesut10@gmail.com

Abstract

This study aims to analyze the spatial and functional changes of the building known as Inayetullah Mosque in Çorum province through digital documentation techniques and virtual reality (VR) technologies. While the earliest archival record of the building dates back to 1926, architectural traces, material use, and comparative analysis with similar buildings in the region reveal that the building was constructed as a mosque in the early 20th century and converted into a mosque over time. The integration of the minbar and the wooden minaret stands as a pivotal element in the functional differentiation of the building.

The historical development of the building is divided into three main periods: the initial construction period (when it was used as a mosque), the post-repair period (when the minbar and minaret were added and functionally transformed into a mosque), and the current situation (when it gained its present architectural identity). Detailed restitution projects were prepared for each period, and three-dimensional digital models were created based on these projects. The data collection process involved a multifaceted approach, encompassing archival research and literary reviews, complemented by applying photogrammetric measurement techniques and terrestrial laser scanning methodologies. These methods were employed in conjunction to ensure the capture of precise and comprehensive data, facilitating a detailed documentation of the building's current state. This hybrid documentation approach enabled the precise recording of both geometric and textural features.

The data were systematically classified and digitized, and detailed 3D models using SketchUp software. These models are notable for their intricate depiction of interior elements, including the minbar, mihrab, and wooden ceiling details. These models, prepared separately for three periods, aim to present the physical and functional conditions of the building at different times in a format that users can experience visually and spatially.

The digital models were integrated into the Unity game engine to be transferred to the virtual reality environment. The Unity game engine's comprehensive VR development tools, coupled with its visual programming support and compatibility with Meta Quest Oculus 3 glasses, have been instrumental in creating an immersive experience environment that is open to user interaction. Interfaces and control mechanisms have been developed within the application to allow users to switch between models from different periods. Consequently, users can navigate between mosque models from three distinct historical periods and observe the architectural elements comparatively.

A significant finding of this study is the reconstruction of cultural heritage buildings in virtual environments, thereby making them experiential. This approach can function as an educational instrument, particularly in disciplines such as architecture and art history. Moreover, it offers decision-makers a valuable opportunity to gain insight and conduct analysis on conservation and restoration processes. Furthermore, in cases where physical access to the buildings is not possible, the cultural heritage can be introduced to large segments of the society through virtual experience.

Consequently, this study transcends conventional architectural documentation methods, underscoring the transformative capacity of digital technologies within the domain of cultural heritage. It has yielded a multifaceted application, proficient in visualizing, documenting, and facilitating education, thus paving the way for innovative research in the field. This methodology, which encompasses the historical transformation of the building with its architectural and spatial dimensions, can be experienced in a virtual environment. It offers a holistic methodology that can serve as an example for similar projects.

Keywords: *VR, Restoration, Traditional Mosque, Digital Recontruction.*

1. Giriş

Günümüzde sanal gerçeklik (Virtual Reality, VR) teknolojisi, kültürel mirasın korunması, deneyimlenmesi ve bu mirasa ilişkin bilgi üretiminin yeniden tanımlanması açısından kritik bir rol üstlenmektedir. VR teknolojisi; mimarlık, mühendislik, dijital beşeri bilimler, eğitim ve müzecilik gibi farklı disiplinlerde yalnızca bir temsil aracı değil, aynı zamanda düşünme ve deneyimleme biçimlerini dönüştüren yenilikçi bir platform olarak öne çıkmaktadır. Özellikle kültürel miras bağlamında VR, geçmişin izlerini taşıyan yapıların dijital olarak belgelenmesi, zaman içinde kaybolmuş ya da tahrip olmuş unsurların yeniden kurgulanması ve bu yapıların geniş kitlelerce erişilebilir hâle getirilmesi yönünde önemli fırsatlar sunmaktadır. Sanal ortamlar, kullanıcıların mekânsal bilgiye sezgisel, etkileşimli ve deneyimsel yollarla ulaşmasına olanak tanıyarak geleneksel iki boyutlu temsil yöntemlerinin sınırlarını aşmakta ve mimarlığın zamansal boyutunu da içerecek şekilde yeniden düşünülmesine imkân tanımaktadır (Yıldırım, 2024).

Son yıllarda, kültürel mirasın dijital ortama aktarılması ve sanal deneyimler aracılığıyla sunulmasına yönelik artan sayıda akademik çalışma dikkat çekmektedir. Khorloo vd. (2022), Karakurum Antik Kenti'nin sanal rekonstrüksiyonunu gerçekleştirdikleri çalışmada, VR teknolojisinin tarihî mirasın hem korunması hem de farklı toplumsal kesimlere aktarılması açısından sunduğu potansiyeli ortaya koymuşlardır. Pietroni ve Ferdani (2021), ise, sanal rekonstrüksiyon süreçlerinde kullanılan metodolojik ve görsel temsil tekniklerine yönelik eleştirel bir değerlendirme sunarak, dijital şeffaflık ve temsilin epistemolojik boyutlarını tartışmışlardır. Öte yandan, Rodriguez-Garcia vd. (2024) tarafından gerçekleştirilen sistematik derleme çalışması, sürükleyici VR (iVR) teknolojilerinin kültürel miras rekonstrüksiyonlarındaki kullanım biçimlerini, etkileşim düzeylerini ve teknik standartlarını analiz ederek, bu alanda karşılaşılan metodolojik sorunlara ve çözüm önerilerine dikkat çekmiştir.

Tüm bu çalışmalar, VR'ın kültürel mirasın deneyimlenmesinde kullanıcı merkezli bir yaklaşımı mümkün kıldığını ve tarihî yapıların farklı açılardan analizine olanak tanıdığını göstermektedir. Bununla birlikte, literatür incelendiğinde Osmanlı dönemine ait geleneksel cami yapılarının sanal ortama aktarılması, tarihsel evrimlerinin modellenmesi ve bu modellerin interaktif VR ortamlarında sunulması yönünde görece daha az sayıda çalışma bulunduğu gözlemlenmektedir.

Bu çalışma, Çorum ili Merkez ilçesi Karakeçili Mahallesi'nde yer alan ve İnayetullah Vakfı'na ait olan İnayetullah Camii'ni örnek vaka olarak ele almaktadır. İnayetullah Camii'nin farklı tarihsel evrelerine ilişkin üç boyutlu (3B) modeller oluşturulmuş ve bu modeller VR teknolojisiyle bütünleştirilerek etkileşimli bir dijital platforma aktarılmıştır. Böylece yapı hem mimari hem de tarihsel açıdan çok katmanlı bir biçimde analiz edilebilmekte; kullanıcılar ise caminin değişen mekânsal kurgusunu zamansal bir süreklilik içerisinde deneyimleme olanağı elde etmektedir. Çalışmanın nihai hedefi, dijital miras kavramını teknik bir araçtan öte, katılımcı ve erişilebilir bir anlatı ortamına dönüştürmek; aynı zamanda kültürel mirasın daha geniş kitleler tarafından anlaşılmasına ve değerinin fark edilmesine katkı sunmaktır.

2. 3B Model Oluşturulmasında Yazılımların Rolü

Sanal gerçeklik (Virtual Reality – VR) teknolojisinin kültürel mirasın dijital olarak belgelenmesi, yeniden inşası ve deneyimlenmesine yönelik uygulamaları, üç boyutlu (3B) modellerin oluşturulmasını ve bu modellerin etkileşimli ortamlarla bütünleştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu süreçte kullanılan yazılımlar, görsel gerçeklik düzeyi, kullanıcı etkileşimi, platform uyumluluğu ve erişilebilirlik gibi parametreler doğrultusunda önemli rol oynamaktadır. Unity, Unreal Engine, Enscape ve Twinmotion gibi yazılımlar, kültürel miras alanında yürütülen dijital rekonstrüksiyon çalışmalarında farklı avantaj ve sınırlılıklarla öne çıkmaktadır.

Unity, açık kaynak kodlu yapısı, çok yönlü entegrasyon yetenekleri ve maliyet etkinliği gibi özellikleri sayesinde kültürel miras projelerinde yaygın olarak tercih edilen bir platformdur. Geniş bir model formatı yelpazesini desteklemesi ve ücretsiz lisanslama seçeneği, özellikle akademik projelerde kullanımını artırmaktadır. Ancak, sistemin işlevselliğinin artırılması için C# programlama dili üzerinden özel kodlamaların gerçekleştirilmesi gerekliliği, mimarlık ya da arkeoloji gibi teknik olmayan disiplinlerden gelen araştırmacılar için belirli zorluklar teşkil etmektedir (Al shawabkeh & Arar, 2024). Bununla birlikte, Unity'nin sahip olduğu geniş kullanıcı topluluğu, zengin çevrimiçi kaynakları ve geliştirici desteği, performans optimizasyonu ve teknik sorunların çözümünde önemli katkılar sağlamaktadır. Ciekanowska vd. (2021) tarafından gerçekleştirilen karşılaştırmalı bir çalışmada, Unity'nin sanal müze oluşturma sürecinde Unreal Engine'e kıyasla daha verimli olduğu saptanmıştır.

Unreal Engine, özellikle yüksek düzeyde görselleştirme gerektiren uygulamalarda öne çıkan bir diğer yazılımdır. Gelişmiş dinamik ışıklandırma sistemi, detaylı materyal yönetimi ve gerçek zamanlı render kapasitesi sayesinde kullanıcıya daha etkileyici ve gerçekçi deneyimler sunmaktadır (Rodriguez-Garcia vd., 2024). Kodlama bilgisi gerektirmeksizin görsel programlama yapmayı mümkün kılan Blueprint Visual Scripting özelliği, Unreal Engine'i teknik bilgi düzeyi düşük kullanıcılar için erişilebilir hale getirmektedir. Ayrıca, platformlar arası uyumluluk (PC, mobil, VR gözlükleri vb.) açısından sunduğu geniş seçenekler, bu yazılımın kültürel miras uygulamalarında tercih edilme oranını artırmaktadır (Al shawabkeh ve Arar, 2024). Rodriguez-Garcia vd. (2024), gerçekleştirdikleri sistematik derlemede, Unreal Engine'in özellikle Level of Detail (LoD) ve Level of Scale (LoS) bakımından Unity'ye kıyasla daha üstün sonuçlar verdiğini ortaya koymuşlardır. Nanite teknolojisi sayesinde yüksek poligon sayısına sahip modellerde dahi performans kaybı yaşanmamakta, bu da yazılımın büyük ölçekli ve detaylı tarihi yapılarla çalışma potansiyelini artırmaktadır. Ek olarak, Virtual Scouting ve Multi-User Editing gibi modüller, çoklu kullanıcı ortamlarında iş birliği odaklı geliştirme süreçlerini mümkün kılmaktadır.

Enscape ve Twinmotion, özellikle mimari tasarım ve görselleştirme süreçlerinde kullanılan, hızlı render alma ve kullanıcı dostu arayüz özellikleriyle öne çıkan yazılımlardır. VR destekli işlevler içermekle birlikte, interaktif senaryo üretme ve kullanıcı etkileşimini özelleştirme noktasında Unity ve Unreal Engine kadar güçlü değildirler. Twinmotion, sahne animasyonları ve etkileşimli öğeler ekleme konusunda kolaylık sağlamakta; ancak yapısal olarak daha çok görsel sunumlara odaklanmaktadır (Banfi & Oreni, 2025).

Bu çalışmada, yukarıda belirtilen karşılaştırmalar doğrultusunda Unity yazılımı tercih edilmiştir. Seçim sürecinde yazılımın açık kaynaklı olması, yaygın kullanıcı desteği, dökümantasyon zenginliği ve maliyet etkinliği belirleyici faktörler olmuştur. C# programlama dili gereksinimi sebebiyle süreç içerisinde çeşitli zorluklarla karşılaşılmış olsa da, bu zorlukların üstesinden gelmek adına ChatGPT, Claude gibi yapay zekâ destekli araçlardan yararlanılmıştır. Böylelikle, hem yazılım öğrenme süreci desteklenmiş hem de dijital üretim süreçlerinin yapay zekâ ile entegrasyonu deneyimlenmiştir.

Çalışma kapsamında, İnayetullah Camii'nin farklı tarihsel evrelerini temsil eden üç boyutlu modeller oluşturulmuş ve bu modeller, Unity yazılımı aracılığıyla sanal gerçeklik platformuna entegre edilmiştir. Unity'nin sunduğu esneklik sayesinde kullanıcılar, yapıların dönemsel değişimlerini karşılaştırmalı olarak inceleyebilmekte, mimari detaylara yakın plan erişim sağlayabilmekte ve yapı ile etkileşimli bir deneyim kurabilmektedir. Ayrıca, proje ekibinin Unity platformuna olan aşinalığı, geliştirme sürecinin hızlanmasına ve karşılaşılan teknik sorunların hızlıca çözümlenmesine katkı sunmuştur. Sonuç olarak, interaktif özelliklerin özelleştirilebilirliği ve maliyet etkinliği gibi avantajlar göz önünde bulundurulduğunda, Unity, bu tür kültürel miras projeleri için işlevsel ve uygun bir platform sunmaktadır.

3. Metot

Bu çalışmada, İnayetullah Camii'nin tarihsel süreç içerisinde geçirdiği fiziksel ve işlevsel dönüşümlerin belgelenmesi ve sanal ortamda deneyimlenmesine olanak sağlayacak dijital bir modelleme ve etkileşimli sunum yöntemi benimsenmiştir. Bu yaklaşım üç temel aşamada yürütülmüştür: veri toplama, üç boyutlu modelleme ve sanal gerçeklik uygulamasının geliştirilmesi.

İlk aşamada, yapıya ilişkin tarihsel bilgi ve belgeler toplanmıştır. Bu kapsamda arşiv taramaları gerçekleştirilmiş, alanda yapılan gözlemler ve ölçümler aracılığıyla yapının mevcut durumu detaylı biçimde belgelenmiştir. Elde edilen veriler, yapının tarihsel gelişiminin analizine temel teşkil etmiş ve bu doğrultuda yapının üç farklı dönem altında incelenebileceği sonucuna varılmıştır. Her bir dönem için ayrı ayrı restitüsyon projeleri hazırlanarak, yapının tarihsel sürekliliği mekânsal olarak ortaya konulmuştur.

İkinci aşamada analiz sonucunda belirlenen üç döneme ilişkin restitüsyon verileri temel alınarak, SketchUp yazılımı aracılığıyla yapının üç boyutlu dijital modelleri oluşturulmuştur. Modelleme sürecinde yalnızca yapının dış mimarisi değil, aynı zamanda iç mekân öğeleri (örneğin, mihrap, minber, tavan detayları) de dahil edilerek ayrıntılı bir temsiliyet sağlanmıştır. Bu yaklaşım, kullanıcıların yapıyı her açıdan deneyimleyebileceği yüksek çözünürlüklü ve gerçekçi modellerin geliştirilmesine imkân tanımıştır.

Üçüncü aşamada 3 boyutlu modeller, sanal gerçeklik ortamına aktarılmak üzere Unity oyun motoruna entegre edilmiştir. Uygulamanın Meta Quest Oculus 3 VR gözlüğü ile uyumlu çalışabilmesi amacıyla, Unity içerisinde gerekli sahne yapıları oluşturulmuş ve APK formatında derlemeler gerçekleştirilmiştir. Kullanıcının her üç dönemi ayrı ayrı deneyimleyebilmesi amacıyla modeller arası geçişleri mümkün kılan kullanıcı arayüzleri ve hareket kontrolleri programlanmıştır.

Bu aşamada, kullanıcıların yapının farklı dönemlerine ait temsiller arasında geçiş yapabileceği bir navigasyon sistemi tasarlanmış; yönlendirme, konum değiştirme ve sahne geçişi gibi etkileşimsel fonksiyonlar uygulamaya entegre edilmiştir. Böylelikle, kullanıcılar VR gözlük aracılığıyla yapının geçmişten günümüze uzanan mekânsal dönüşümünü doğrudan deneyimleme fırsatı bulmuştur.

Süreç sonunda geliştirilen VR uygulaması test edilmiş ve yapının farklı dönemlerine dair sanal deneyim başarıyla gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda elde edilen çıktıların, hem koruma amaçlı belgeleme çalışmalarında hem de kültürel mirasın dijital ortamda aktarılmasında kullanılabilirliğine ilişkin değerlendirmeler yapılmıştır. Uygulamanın eğitim, tanıtım ve mimari analiz gibi farklı disiplinlerdeki potansiyel katkıları, proje çıktıları doğrultusunda ortaya konulmuştur.

4. Vaka Çalışması

4.1. İnayetullah Camii

Çorum İli, Merkez İlçesi, Karakeçili Mahallesi, 523 ada 1 parselde yer alan ve Karakeçili ile Kültür sokaklarının kesişim noktasında konumlanan İnayetullah Camii, mülkiyeti İnayetullah Vakfı'na ait bir dini yapıdır. Caminin inşa tarihine ilişkin Osmanlıca bir kitabe mevcut olmamakla birlikte, güney cephesinin güneybatı köşesinde yer alan Türkçe bir kitabede "İnayetullah Camii, Y. Tarihi 1902" ifadesi bulunmaktadır. Buna ek olarak, 1973 yılına ait Çorum İl Yıllığı'nda yapının 1318/1900 yılında halk tarafından inşa ettirildiği belirtilmektedir (Çorum İl Yıllığı, 1973). Caminin mihrap duvarındaki vitraylı pencerede yer alan 1318/1900 tarihi de bu bilgileri doğrular niteliktedir (Dündar, 2004).

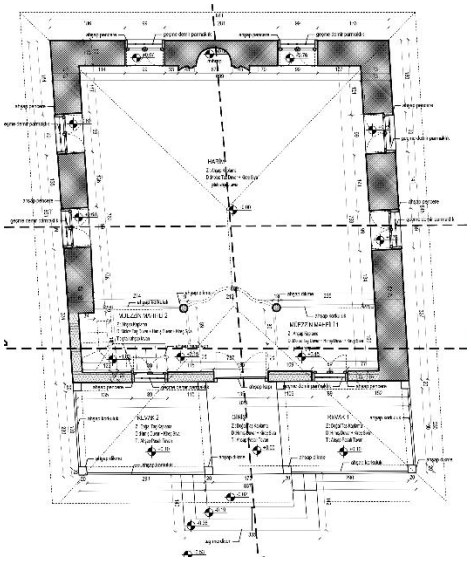
İlk İnşa Dönemi (1900 – 1926 öncesi)

İnayetullah Camii, Çorum İli, Merkez İlçesi, Karakeçili Mahallesi'nde konumlanmaktadır. Yapının günümüze ulaşan kitabesi bulunmamakla birlikte, güneybatı köşesindeki taş levhada "İnayetullah Camii, Y. Tarihi 1902" ibaresi yer almakta, mihrabın üst kısmındaki vitraylı pencerede ise 1318/1900 tarihi görülmektedir. 1973 tarihli Çorum İl Yıllığı da yapının halk tarafından 1900 yılında inşa ettirildiğini belirtmektedir.

Yapıya ilişkin en erken tarihli arşiv kaydı ise 1926 yılına aittir ve Vakıflar Genel Müdürlüğü arşivlerinde yer almaktadır. Her ne kadar daha erken bir belge bulunmasa da, mevcut mimari izler ve karşılaştırmalı analizler doğrultusunda yapının 20. yüzyıl başlarında mescit olarak inşa edildiği anlaşılmaktadır.

Bu dönemde yapı, derinlemesine dikdörtgen planlı, sade, tek katlı bir mescit görünümündedir. Doğu, batı ve kuzey cepheleri kerpiç yığma duvarlarla örülmüştür. İç mekânda özgün mihrap nişi, sağındaki duvar dolabı ve vitraylı pencere bu döneme aittir. Yapının kuzeyindeki mahfil, sınırlı büyüklükte tutulmuştur. Son cemaat yeri ise ahşap sütunlarla taşınan, yarı açık bir mekân olarak düzenlenmiştir.

Minber bu dönemde mevcut değildir. Bu durum, yapının ilk aşamada sadece mescit olarak kullanıldığını göstermektedir. Dolayısıyla bu dönemdeki dini kullanım biçimi, cuma namazı gibi toplu ibadetleri kapsamayacak şekilde, daha çok mahalle ölçekli günlük ibadetlere yöneliktir (**Şekil 1**).



Şekil 1: Birinci dönemde yapının durumu (Çorum İl Yıllığı, 1973)

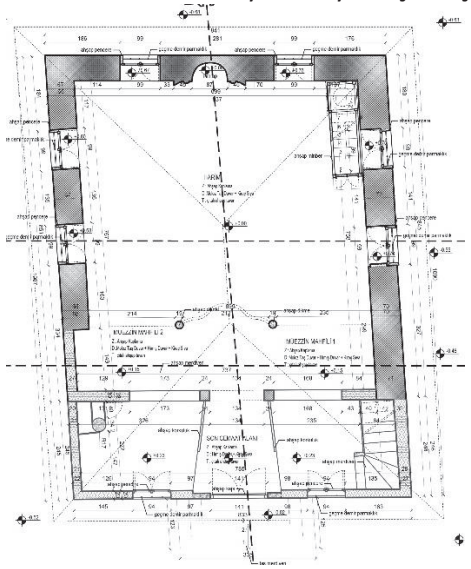
İkinci Dönem: Fonksiyonel Dönüşüm ve Camiye Evrilme (1926 – 1963)

1926 tarihli arşiv kaydının ardından, yapıda işlevsel ve yapısal değişikliklerin başladığı bir dönem gözlenir. Bu değişimlerin en önemlisi, yapının mescit kimliğinden cami kimliğine evrilmesidir. Bu dönüşümdeki en belirleyici unsurun, minberin yapıya eklenmesi olduğu düşünülmektedir. Minberin varlığı, cuma namazı ve hutbe gibi ibadetlerin bu yapıda gerçekleştirilmesine imkân tanımış, böylece yapı resmen bir cami işlevi kazanmıştır.

Minber ile eş zamanlı olarak, ahşap minarenin de bu dönemde eklendiği değerlendirilmektedir. Minarenin çekirdeğini oluşturan ahşap seren, müezzin odasına kadar uzanmakta ve her iki kattan da erişilebilmektedir. Minare, caminin mahalle ölçeğindeki dinsel ve sosyal statüsünü güçlendiren bir unsur olarak dikkat çeker.

Bu dönem aynı zamanda mahfilin kuzey yönünde genişletildiği, bu bölümde ahşap karkas (hımış) sistemin tercih edildiği, aralarının ise kerpiçle doldurulduğu bir müdahale dönemidir. Bu inşa tekniği, duvar kalınlıklarında da fark edilmektedir.

Son cemaat yerinin açık formu zamanla değişmiş, mahfilin genişletilmesi ve yapının kuzey cephesinde kapatmalar yapılmasıyla, özgün cephe karakteri bu dönemde kısmen kaybolmaya başlamıştır (**Şekil 2**).

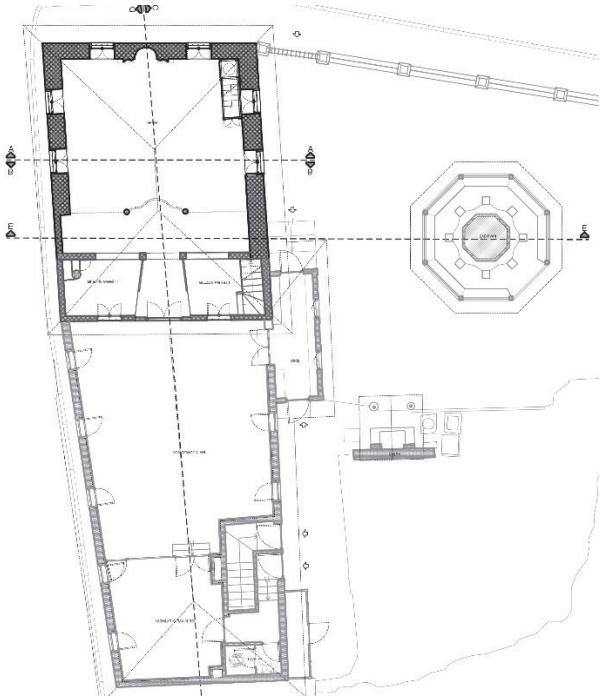


Şekil 2: İkinci dönemde yapının durumu

Üçüncü Dönem: Ekler (1963 – 2003)
Yapının en kapsamlı müdahalelere uğradığı bu dönem, 1963 yılında başlatılan onarımla başlamaktadır. Bu süreçte caminin kuzey cephesine ayakkabılık, batı avlusuna ise şadırvan ve tuvalet eklenmiştir. Bu düzenlemeler, cemaatin artan sosyal ihtiyaçlarına ve temizlik koşullarına yanıt olarak gerçekleştirilmiştir.

En öne çıkan değişiklikler ise 2003 yılı onarımında meydana gelmiştir. Bu onarımla birlikte, kuzey yönünde mevcut cami yapısından bağımsız fakat ona eklemlenmiş büyük bir yapı inşa edilmiştir. Bu yapı, giriş işlevini üstlenmekle kalmamış; aynı zamanda mahfil genişletilerek kadınlar için zemin kat, erkekler için bodrum kat tuvalet olarak işlevselleştirilmiştir. Şadırvan da batı yönüne kaydırılarak yeniden inşa edilmiştir.

Bu ek yapı, özgün yapının cephe düzeniyle oransal uyumsuzluklar taşımakta; özellikle mahfil katındaki yeni pencere açıklıkları ve boyutları, yapının ilk dönemine ait mimari ölçekle uyuşmamaktadır. Böylece cami, özgün mimari karakterinden uzaklaşarak günümüzdeki görünümüne kavuşmuştur (**Şekil 3**).



Şekil 3: Üçüncü dönemde yapının durumu

4.2. Unity Entegrasyonu ve VR Deneyimi

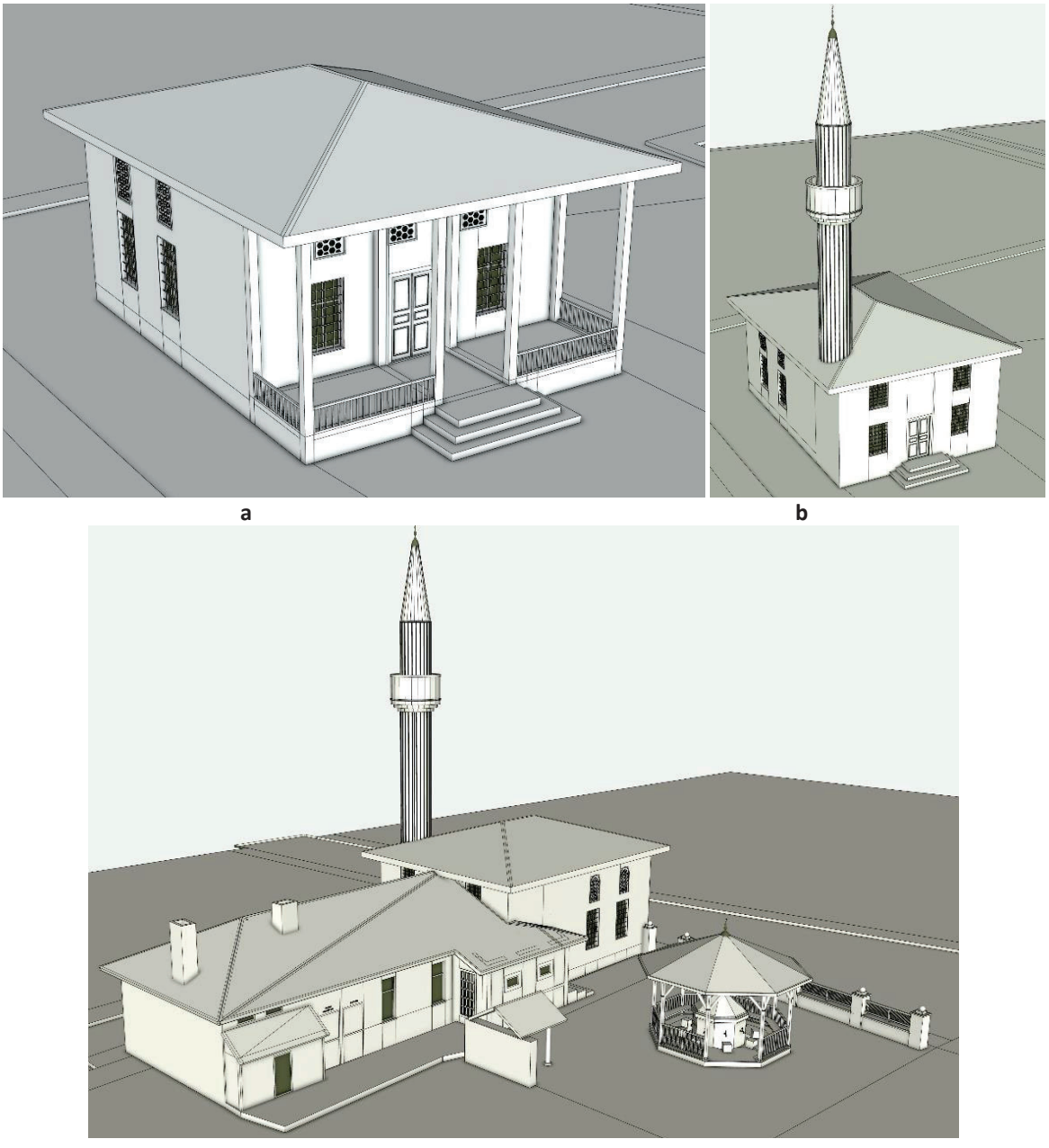
Bu çalışmada, yapının tarihsel gelişiminin sağlıklı bir şekilde izlenebilmesi amacıyla hem arşiv taraması hem de modern dijital dokümantasyon tekniklerinden faydalanılmıştır. Yapıya ilişkin tarihsel veriler, özellikle Vakıflar Genel Müdürlüğü ve diğer resmi kurum arşivlerinden elde edilen belgeler aracılığıyla toplanmıştır. Bu belgeler, yapının fonksiyonel ve mekânsal dönüşüm sürecine dair önemli ipuçları sunmaktadır.

Mevcut durumun yüksek doğrulukla belgelenmesi amacıyla fotogrametri ve yersel lazer tarama (Terrestrial Laser Scanning - TLS) teknikleri birlikte kullanılmıştır. Bu hibrit dokümantasyon yaklaşımı, yapının hem geometrik yapısını hem de yüzey dokularını milimetrik hassasiyetle kayıt altına alma imkânı sunmuştur. Elde edilen veri seti, dijital ortamda sistematik biçimde sınıflandırılarak hem arşivlenmiş hem de üç boyutlu modelleme süreçleri için altlık olarak kullanılmıştır.

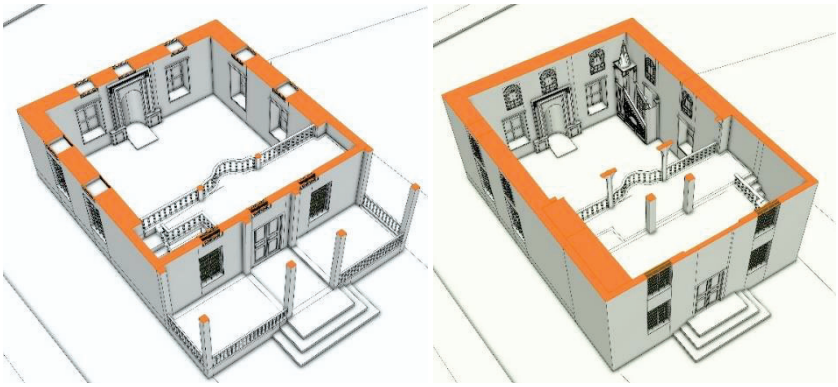
Yapının mimari evrimini daha iyi anlayabilmek ve farklı dönemler arasındaki değişimleri karşılaştırmalı olarak inceleyebilmek adına, SketchUp yazılımı kullanılarak yapının üç farklı döneme ait modelleri oluşturulmuştur. Söz konusu dönemler; yapının ilk inşa edildiği dönem, minber ve minarenin eklendiği ikinci dönem ve 2003 sonrası

müdahalelerin yapıldığı üçüncü dönemi kapsamaktadır. Her bir dönem için hem iç hem de dış mekân modellemeleri gerçekleştirilmiştir.

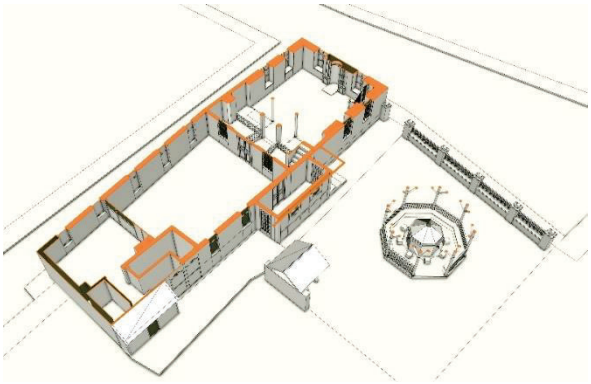
Modelleme sürecinde, yapı içindeki minber, mihrap, tavan kaplamaları ve pencere açıklıkları gibi mimari detayların yüksek çözünürlükte temsil edilebilmesine olanak tanınmıştır (**Şekil 4-5**). Böylece yapının dönemsel mimari dönüşümleri sadece görsel olarak değil, mekânsal deneyim açısından da karşılaştırmalı olarak analiz edilebilmiştir.



Şekil 4: Yapının 3 ayrı dönemine ait modeller (a: 1. Dönem, b: 2. Dönem, c: 3. Dönem)



a b



c

Şekil 5: Yapının 3 ayrı dönemine ait iç mekân modelleri (a: 1. Dönem, b: 2. Dönem, c: 3. Dönem)

Oluşturulan üç boyutlu modeller, kullanıcıların yapının tarihsel gelişimini etkileşimli bir ortamda deneyimleyebilmesi amacıyla Unity oyun motoruna aktarılmıştır. Unity'nin tercih edilmesinin başlıca nedenleri arasında; kapsamlı VR geliştirme araçları sunması, farklı platformlarla geniş uyumluluğa sahip olması ve yaygın kullanıcı topluluğu desteği ile güçlü dökümantasyon altyapısı yer almaktadır. Unity'nin sunduğu görsel programlama arayüzü, teknik programlama bilgisine sahip olmayan kullanıcıların dahi temel düzeyde etkileşimli içerikler geliştirebilmesine olanak tanımaktadır.

Geliştirilen uygulama, Meta Quest Oculus 3 sanal gerçeklik başlığı ile uyumlu olacak şekilde, APK formatında derlenmiş ve sahne içi hareket kontrolleri, kullanıcı navigasyonu gibi özelliklerle desteklenerek kullanıcı deneyimi optimize edilmiştir. Böylelikle kullanıcılar, yapının üç farklı dönemini sanal ortamda gezerek, mekânsal ve tarihsel bağlamı doğrudan deneyimleyebilmektedir (**Şekil 6-7**).

Şekil 6: Modellerin VR ortamına aktarılması

Şekil 7: VR ortamında yapının deneyimlenmesi (a: 1. Dönem, b: 2. Dönem, c: 3. Dönem)

5. Sonuçlar

Bu çalışma, İnayetullah Camii'nin tarihsel gelişimini ve dönüşümünü sanal gerçeklik (VR) teknolojileri ve dijital belgeleme yöntemleri kullanarak derinlemesine incelemeyi amaçlamıştır. Çalışma sürecinde, caminin tarihsel gelişimi üç ana döneme ayrılarak her bir dönemin özgün mimari özellikleri ve mekânsal dönüşümleri 3D modeller aracılığıyla görselleştirilmiştir. Fotogrametrik belgeleme ve yersel lazer tarama tekniklerinin birleşimi, yapının geometrik ve dokusal özelliklerinin yüksek hassasiyetle kaydedilmesini sağlamış, ardından SketchUp yazılımı ile elde edilen modeller Unity oyun motoruna aktarılmıştır. Bu sayede kullanıcılar, İnayetullah Camii'nin farklı dönemlerine ait mimari ve iç mekân detaylarını sanal ortamda deneyimleyebilmiştir.

Çalışmanın önemli çıktılarından biri, kültürel miras yapılarının dijital ortamda yeniden inşa edilerek hem korunmasının sağlanması hem de sanal ortamda deneyimlenebilir hale getirilmesidir. Bu yöntem, özellikle mimarlık, sanat tarihi ve restorasyon gibi disiplinlerde eğitim aracı olarak kullanılabilir. Yapının geçmişine dair bilgiye sahip olmayan kullanıcılar için interaktif bir deneyim sunulmuş, böylece tarihsel mirasa duyulan ilgi artırılmıştır. Ayrıca, yapıların fiziksel olarak erişilemez olduğu durumlarda sanal ortamlar, bu yapıları deneyimlemek için güçlü bir alternatif sunmaktadır.

Çalışmada elde edilen sonuçlar, kültürel mirasın dijital ortamda belgelenmesi ve sanal gerçeklik teknolojileriyle halkla buluşturulmasının önemini bir kez daha ortaya koymuştur. Bu yöntem, kültürel mirasın korunmasında yeni bir boyut açmakta ve gelecekte yapılacak benzer projeler için model teşkil etmektedir.

Öneriler:

Dijital Restorasyon Çalışmalarının Yaygınlaştırılması: İnayetullah Camii örneğinde olduğu gibi, tarihi yapıların dijital ortamda belgelenmesi ve sanal gerçeklik teknolojileriyle sunulması, kültürel mirasın korunmasına önemli katkı

sağlamaktadır. Bu tür çalışmaların yaygınlaştırılması, tarihî yapıların korunması ve gelecek nesillere aktarılması açısından kritik bir adım olacaktır. Benzer projelerin diğer tarihi yapılarda da gerçekleştirilmesi önerilmektedir.

Eğitim ve Araştırma Amaçlı Kullanım: Sanal gerçeklik ve 3D modelleme teknolojileri, mimarlık, restorasyon ve sanat tarihi gibi disiplinlerde eğitim aracı olarak kullanılabilir. Bu tür projeler, öğrencilere ve araştırmacılara tarihi yapıları detaylı bir şekilde inceleme fırsatı sunarak eğitim süreçlerini zenginleştirecektir. Ayrıca, bu teknolojilerin müze ve sergi alanlarında da kullanılmasına yönelik çalışmalar yapılabilir.

Sanal Miras Projeleri: Tarihi yapıların sanal ortamlarda halkın erişimine sunulması, kültürel mirasa olan ilgiyi artıracak ve bu mirasın korunmasına yönelik farkındalığı destekleyecektir. Bu tür sanal deneyimlerin kamuya açık hale getirilmesi, toplumun kültürel mirasa duyduğu saygıyı pekiştirecek ve mirasın korunmasına yönelik sosyal sorumluluk bilincini güçlendirecektir.

Çoklu Dönem ve Bölgelerin İncelenmesi: Çalışmada, yapının üç farklı döneminin dijital ortamda sunulması, yapıların geçirdiği değişimleri gözlemleme imkânı sunmuştur. Benzer projeler, birden fazla tarihi dönemi ve coğrafi bölgeyi kapsayacak şekilde genişletilebilir. Bu tür çalışmalar, yerel mimari çeşitliliği ve kültürel zenginliği daha geniş bir kitleye tanıtma fırsatı verebilir.

Sonuç olarak, bu çalışma İnayetullah Camii gibi kültürel miras yapılarının dijital ortamda belgelenmesinin ve sanal gerçeklik teknolojileriyle halkla buluşturulmasının önemini vurgulamaktadır. Bu tür projeler, sadece kültürel mirası koruma adına değil, aynı zamanda toplumun bilinçlendirilmesi ve eğitilmesi açısından da önemli bir araçtır. Gelecekte, bu çalışmaların daha geniş kapsamlı ve erişilebilir hale getirilmesi, kültürel mirasa duyulan ilgiyi ve saygıyı artıracaktır.

KAYNAKLAR

Al shawabkeh, R., & Arar, M. (2024). Virtual reality as a tool to enhance the efficiency and reliability of the virtual reconstruction process for heritage/archaeological sites: The case of umm Al-Jimal in Jordan. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, *33*, e00325. https://doi.org/10.1016/j.daach.2024.e00325

Banfi, F., & Oreni, D. (2025). Unlocking the interactive potential of digital models with game engines and visual programming for inclusive Vr and web-based museums. *Virtual Archaeology Review*, *16*(32), 44-70. https://doi.org/10.4995/var.2024.22628

Ciekanowska, A., Kiszczak - Gliński, A., & Dziedzic, K. (2021). Comparative analysis of Unity and Unreal Engine efficiency in creating virtual exhibitions of 3D scanned models. *Journal of Computer Sciences Institute*, *20*, 247-253. https://doi.org/10.35784/jcsi.2698

Cumhuriyetin 50. Yılında Çorum (1973). *1973 İl Yıllığı*, Çorum: Türkiye Cumhuriyeti Kültür ve Turizm Bakanlığı

Dündar, A. (2004). *Çorum Cami ve Mescitleri*. Ankara: Motif yayınları.

Khorloo, O., Ulambayar, E., & Altantsetseg, E. (2022). Virtual reconstruction of the ancient city of Karakorum. *Computer Animation and Virtual Worlds*, *33*(3-4). https://doi.org/10.1002/cav.2087

Pietroni, E., & Ferdani, D. (2021). Virtual Restoration and Virtual Reconstruction in Cultural Heritage: Terminology, Methodologies, Visual Representation Techniques and Cognitive Models. *Information*, *12*(4), 167. https://doi.org/10.3390/info12040167

Rodriguez-Garcia, B., Guillen-Sanz, H., Checa, D., & Bustillo, A. (2024). A systematic review of virtual 3D reconstructions of Cultural Heritage in immersive Virtual Reality. *Multimedia Tools and Applications*, *83*(42), 89743-89793. https://doi.org/10.1007/s11042-024-18700-3

Yıldırım, E. (2024). Exploring Architectural Tools for Oculus Quest 2. *Haliç Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, *7*(2), 107-132. https://doi.org/10.46373/hafebid.1542678

2025 MSTAS MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Yapay Zekâ Destekli Karma Gerçeklik Teknolojilerinin İnsan-Bilgisayar Etkileşimi Bağlamında Değerlendirilmesi

Sibel Özden Omuzlu[1]; Ayşegül Akçay Kavakoğlu[2]
[1]Haliç Üniversitesi ve İstanbul Teknik Üniversitesi; [2]İstanbul Teknik Üniversitesi
[1]sibelozdenomuzlu@halic.edu.tr; [2]akcaykavakoglu@itu.edu.tr

Özet

Bu çalışma, karma gerçeklik (KG) teknolojilerinin insan-bilgisayar etkileşimi (İBE) bağlamında sunduğu olanakları, karşılaşılan zorlukları ve gelecekteki potansiyel gelişmeleri incelemeyi amaçlamaktadır. Geleneksel İBE, klavye, fare ve dokunmatik ekran gibi fiziksel arayüzler üzerinden gerçekleşirken, KG tabanlı sistemler kullanıcıların el hareketleri, ses komutları, göz takibi ve hatta beyin-bilgisayar arayüzleriyle doğrudan etkileşim kurmalarını sağlamaktadır. Yapay zekâ (YZ) teknolojilerindeki ilerlemeler, özellikle büyük dil modelleri (LLM) ve doğal dil işleme (NLP) sistemleri ile birleşerek KG tabanlı etkileşimi daha sezgisel, akıllı ve kullanıcı dostu hale getirmektedir. Bu araştırma, sistematik literatür taraması yöntemiyle yürütülmüş olup, 2019-2024 yılları arasında Web of Science ve Scopus veri tabanlarında yayımlanmış çalışmalar incelenmiştir. PRISMA protokolü doğrultusunda yürütülen araştırma sürecinde tanımlama, tarama, uygunluk ve dahil edilme aşamaları uygulanmıştır. Dâhil etme ve dışlama kriterlerine göre seçilen makaleler, nitel analiz yöntemiyle değerlendirilmiştir. KG teknolojileri kullanıcıların çevreyle doğrudan, sezgisel ve bağlamsal olarak zengin etkileşimler kurmasını sağlamaktadır. Eğitimde, karmaşık kavramların deneyimsel öğrenme yoluyla daha iyi anlaşılmasına olanak tanımaktadır. Mimari tasarımda, KG ile gerçek zamanlı mekân deneyimi sağlanarak tasarım kararlarının hızla alınmasına katkı sunulmaktadır. Bununla birlikte, bilişsel yük, göz yorgunluğu ve yüksek donanım maliyetleri gibi zorluklar da dikkat çekmektedir. Literatür taraması sonucunda, KG ve YZ'nin bir arada kullanıldığı etkileşim alanlarında kullanıcı deneyimini zenginleştirici ve daha sezgisel hale getiren potansiyellerinin olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, teknolojinin yaygınlaşmasında karşılaşılan zorluklar, bilişsel yük ve cihaz erişilebilirliği gibi sorunlar da mevcuttur. KG'nin tasarım süreçlerini dönüştürme potansiyeli, kullanıcı performansına etkileri ve bireysel farklılıkları nasıl desteklediğine dair çeşitli bulgulara ulaşılmıştır. YZ destekli KG sistemleri İBE alanında yeni açılımlar sunmakta olup, özellikle eğitim, mimarlık ve tasarım gibi alanlarda kullanıcı deneyimini dönüştürme potansiyeline sahiptir. Bu teknolojilerin daha erişilebilir ve ergonomik hale gelmesi, gelecekteki araştırmalar ve tasarım uygulamaları açısından önem taşımaktadır. Çalışma, YZ ve KG entegrasyonunun kullanıcı merkezli etkileşim tasarımı bağlamında sürdürülebilir gelişimi için öneriler sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Karma Gerçeklik, Yapay Zekâ, İnsan-Bilgisayar Etkileşimi, Etkileşim Tasarımı.*

2025 MSTAS MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Evaluation of AI-Assisted Mixed Reality Technologies in the Context of Human-Computer Interaction

Sibel Özden Omuzlu[1]; Ayşegül Akçay Kavakoğlu[2]
[1]Haliç University & İstanbul Technical University; [2]İstanbul Technical University
[1]sibelozdenomuzlu@halic.edu.tr; [2]akcaykavakoglu@itu.edu.tr

Abstract

This study aims to examine the opportunities, challenges, and future potential developments of mixed reality (MR) technologies in the context of human-computer interaction (HCI). While traditional HCI relies on physical interfaces such as keyboards, mice, and touchscreens, MR-based systems enable users to interact directly through hand gestures, voice commands, eye tracking, and even brain-computer interfaces. Advances in artificial intelligence (AI), particularly large language models (LLMs) and natural language processing (NLP) systems, make MR-based interactions more intuitive, intelligent, and user-friendly. This research was conducted through a systematic literature review of studies published between 2019 and 2024 in the Web of Science and Scopus databases. Following the PRISMA protocol, the process included identification, screening, eligibility, and inclusion stages. Articles selected based on inclusion and exclusion criteria were analyzed using a qualitative method. MR technologies enable users to establish direct, intuitive, and contextually rich interactions with their environment. In education, they facilitate a better understanding of complex concepts through experiential learning. In architectural design, MR contributes to faster design decision-making by providing real-time spatial experiences. However, issues such as cognitive load, eye strain, and high hardware costs are also prominent. The literature review revealed the potential of MR and AI integration to enhance and make user experiences more intuitive in interaction domains. Nevertheless, challenges such as cognitive load and device accessibility hinder the widespread adoption of these technologies. The study identifies various findings regarding the transformative potential of MR in design processes, its impact on user performance, and how it supports individual differences. AI-powered MR systems offer new possibilities in the HCI field, particularly in education, architecture, and design, by transforming user experiences. Making these technologies more accessible and ergonomic is crucial for future research and design practices. This study provides recommendations for the sustainable development of AI and MR integration in the context of user-centered interaction design.

Keywords: *Mixed Reality, Artificial Intelligence, Human-Computer Interaction, Interaction Design.*

1. Giriş

Karma Gerçeklik (KG) ve Yapay Zekâ (YZ), son yıllarda teknolojinin hızlı gelişimiyle birlikte, insan-bilgisayar etkileşimi (İBE) bağlamında yeni olanaklar yaratmaktadır. Geleneksel İBE ara yüzleri genellikle fare, klavye ve dokunmatik ekranlarla sınırlıyken, KG tabanlı sistemler, kullanıcıların doğal etkileşim araçlarıyla (el hareketleri, sesli komutlar, göz takibi gibi) doğrudan iletişim kurmalarını sağlamaktadır. YZ, bu etkileşimleri daha akıllı hale getirirken, kişiselleştirilmiş ve bağlamsal olarak zenginleştirilmiş kullanıcı deneyimleri sunmaktadır. Karma Gerçeklik (KG) (Mixed Reality-MR) teknolojileri, fiziksel ve dijital ortamları birleştirerek kullanıcı deneyimini daha sezgisel ve sürükleyici hale getiren bir alan olarak gün geçtikçe daha fazla ilgi görmektedir. MR teknolojileri, tasarım süreçlerinde iş birliğini artırmak, görselleştirme yeteneklerini geliştirmek ve yaratıcı süreçleri optimize etmek için kullanılmaktadır. YZ destekli KG sistemleri, dinamik ve gerçekçi sanal ortamların oluşturulmasına olanak tanıyarak kullanıcıların tasarım süreçlerindeki verimliliğini artırır (Xu vd., 2024). KG, mimari tasarımda, özellikle eğitim ve görselleştirmede dönüştürücü bir araç olarak giderek daha fazla tanınmaktadır. KG teknolojilerinin bütünleştirilmesiyle, mimari tasarım süreçleri hem öğrenmeyi hem de müşteri katılımını artırarak daha etkileşimli ve sürükleyici hale gelebilir. Milgram ve Kishino (1994), gerçeklik-virtüalite sürekliliği çerçevesinde KG teknolojilerinin kullanıcı etkileşimlerini nasıl dönüştürdüğünü açıklamıştır. KG, hem fiziksel hem de sanal bileşenleri birleştirerek tasarım süreçlerinde daha zengin ve etkileşimli bir deneyim sunar (Milgram & Kishino, 1994). Bu teknoloji, özellikle mimari tasarım süreçlerinde, kullanıcıların mekânsal biçimleri keşfetmelerine ve manipüle etmelerine olanak tanır. Ayrıca, KG gözlüğü olarak kullanılan Microsoft HoloLens duyusal işleme bozukluğu olan bireylerin günlük yaşamlarını kolaylaştırmak için etkileşimli ve gerçek zamanlı çözümler sunar (Brigham, 2017). Bu çalışma, tasarım süreçlerinde mekânsal bilişsel farklılıkları destekleyen araçlar geliştirmenin önemini vurgulamaktadır.

ÜYZ tabanlı dil modelleri (LLM), doğal dil işleme ve insan-bilgisayar etkileşimi alanlarında önemli gelişmeler sağlamıştır. Örneğin, Xu ve diğerleri çalışmalarında, Büyük Dil Modelleri (LLM), ÜYZ ve KG teknolojilerini birleştirerek işbirlikçi tasarım süreçlerini optimize eden AI-MCD çerçevesini önermektedir. Araştırma, metinden 2B/3B görselleştirme ve tasarım önerileri sunarak tasarım sürecinde verimliliği artırırken, insan-makine ve insan-insan etkileşimlerini güçlendirir. Bulgular, KG ortamlarının tasarım prototipleri oluşturma hızını önemli ölçüde artırdığını ve paydaşlar arasındaki iletişimi iyileştirerek yaratıcı süreci desteklediğini göstermektedir. Bu çalışma, KG ortamlarında ÜYZ destekli çözümlerin inovatif ve kapsayıcı bir tasarım yaklaşımı sunduğunu vurgular (Xu vd., 2024). Karma Gerçeklik (MR) teknolojileri, dijital ve fiziksel ortamları birleştirmenin yenilikçi yollarını sunarken İnsan-Bilgisayar Etkileşimi (İBE) alanı ile ilişkisi gelişen YZ ile giderek daha önemli hale gelmektedir. Bu teknolojiler, sürükleyici ve etkileşimli arayüzler sağlayarak kullanıcı deneyimlerini geliştirmektedir. KG teknolojileri, telemedikal ve uzaktan kumanda gibi endüstrilerde gelişmelere yol açmakta, dijital olarak desteklenen simülasyonlar ve yardımcı programlar sunmaktadır (Aiersilan, 2023). Ürün tasarımında, KG prototiplemenin kullanılabilirliği değerlendirilmiş, farklı görev karmaşıklıkları ve bağlamlarda kullanıcı performansını etkilediği gözlemlenmiştir (Wang vd., 2024). Holografik projeksiyonun KG ortamlarına entegrasyonu, sürükleyici deneyimler yaratarak kullanıcı etkileşimini geliştirir. Bu yaklaşım, kullanıcıların başa takılan gözlükler ve holografik projeksiyonlar aracılığıyla 3B verilerle etkileşime girmesine olanak tanıyan iç mekân tasarımı uygulamalarında kullanılmıştır (Fadzli vd., 2024). KG'de bilgi birleştirme arayüzlerinin geliştirilmesi, bilişsel yükü azaltabilir ve görev performansını iyileştirebilir. Özellikle derin birleştirme arayüzlerinin, bilişsel zorluk ve operasyonel verimlilik açısından birleşik arayüzlerden daha iyi performans gösterdiği bulgulanmıştır (Zhu vd., 2023).

KG teknolojileri İnsan-Bilgisayar Etkileşimi alanında önemli ilerlemeler sunarken, sezgisel etkileşim tekniklerine duyulan ihtiyaç ve çok boyutlu arayüzlerle ilişkili potansiyel bilişsel yük gibi zorluklar devam etmektedir. Bu zorlukların ele alınması, KG teknolojilerinin çeşitli alanlarda geliştirilmesi ve entegrasyonu için önemlidir. İBE bağlamında KG, geleneksel arayüzlerden farklı olarak dokunsal, görsel ve sözel girdilere dayanan etkileşim biçimlerini desteklemektedir. Milgram ve Kishino'nun (1994) gerçeklik-virtüalite sürekliliği çerçevesinde tanımladığı KG teknolojileri, YZ ile entegre biçimde kullanıldığında kullanıcıların hem sanal hem de fiziksel bileşenlerle etkileşim kurmasını sağlayarak tasarım ve eğitim alanlarında yeni fırsatlar sunmaktadır. Ancak mevcut literatür genellikle KG'nin teknik boyutlarına odaklanmış olup, insan-bilgisayar etkileşimini ele alan çalışmalar nispeten sınırlıdır. Bu çalışma, KG ve YZ'nin birleşiminin İBE üzerindeki etkilerini, uygulama alanlarını ve karşılaşılan zorlukları analiz etmektedir. Literatürde yapılan sistematik taramalarla, bu teknolojilerin farklı etkileşim araçları ve amaçları bağlamında sunduğu potansiyeller incelenmiştir.

1.1. Çalışmanın Amacı

Sanal gerçeklik (virtual reality-VR) ve artırılmış gerçeklik (augmented reality-AR) teknolojilerini gerçek-sanal uzamı bağlamında kapsayıcı olan karma gerçeklik (KG), insan-bilgisayar etkileşimi (İBE) açısından yapay zekâ teknolojilerinin hızlı gelişimi ile yeni kullanım senaryoları ve araştırma alanları ortaya çıkarmaktadır. Bu çalışma, KG teknolojilerinin İBE bağlamında sunduğu olanakları, karşılaşılan zorlukları ve gelecekteki potansiyel gelişmeleri incelemeyi amaçlamaktadır. Geleneksel İBE, klavye, fare ve dokunmatik ekran gibi fiziksel arayüzler üzerinden gerçekleşirken, KG tabanlı sistemler kullanıcıların el hareketleri, ses komutları, göz takibi ve hatta beyin-bilgisayar arayüzleriyle doğrudan etkileşim kurmalarını sağlamaktadır. Bu etkileşim biçimleri, kullanıcı deneyimini daha sezgisel hale getirirken, aynı zamanda bilişsel yük, öğrenme eğrisi ve ergonomi gibi faktörleri de yeniden değerlendirmeyi gerektirmektedir.

Son yıllarda yapay zekâ (YZ) teknolojilerindeki ilerlemeler, özellikle büyük dil modelleri (LLM) ve YZ destekli etkileşim sistemleri, KG ile birleşerek İBE alanında önemli yenilikler getirmektedir. LLM'ler, doğal dil işleme (NLP) yetenekleri sayesinde kullanıcıların daha akıllı ve bağlamsal olarak zengin etkileşimler kurmasına olanak tanımaktadır. Örneğin, YZ destekli sanal asistanlar, eğitim ve tasarım süreçlerinde KG ortamlarında rehberlik edebilir, kullanıcıya özelleştirilmiş geri bildirim sağlayabilir ve öğrenme süreçlerini kişiselleştirebilir. Aynı zamanda, YZ destekli göz takibi ve hareket analizi gibi sistemler, kullanıcı davranışlarını analiz ederek daha sezgisel ve verimli bir kullanıcı deneyimi sunabilir.

1.2. Çalışmanın Kapsamı ve Yöntemi

Bu çalışmada, KG teknolojilerinin insan-bilgisayar etkileşimi üzerindeki etkileri, kullanıcı deneyimi, etkileşim türleri ve ergonomi bağlamında ele alınmıştır. Literatür taraması ve deneysel araştırmalar ışığında, KG ve YZ tabanlı sistemlerin kullanıcıların çevreyle etkileşimini nasıl dönüştürdüğü, hangi alanlarda verimliliği artırdığı ve beraberinde getirdiği zorluklar tartışılmıştır. Özellikle eğitim, tasarım ve mimari gibi alanlarda kullanıcı deneyimini nasıl etkilediği, hangi etkileşim modellerini desteklediği ve karşılaşılan zorluklar değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında, YZ'nın gelişmesiyle KG teknolojileri İBE konusuna yeni açılımlar sunmakta olup, gelecekte daha sezgisel, akıllı ve kullanıcı dostu etkileşim biçimlerinin geliştirilmesine olanak sağlayacağı düşünülmektedir. Bu çalışmanın, KG'nin İBE bağlamında gelişimine yönelik öneriler sunarak, YZ ve KG entegrasyonunun gelecekteki araştırmalarına altlık oluşturması ve katkı sağlaması beklenmektedir.

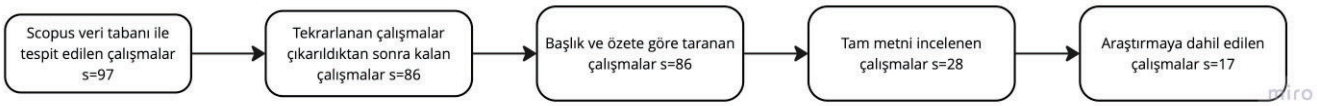
Çalışmada yöntem olarak, 2019-2024 yılları arasında karma gerçeklik (KG) – mixed reality (MR) – ile yapay zekâ (YZ)) – artificial intelligence (AI) –teknolojilerinin insan-bilgisayar etkileşimi (İBE) – human-computer interaction (HCI) – alanındaki kesişimini inceleyen akademik makaleleri derlemek üzere sistematik bir literatür taraması yürütülmüştür. Web of Science ve Scopus veri tabanları kullanılarak, tarama dili olarak İngilizce tercih edilmiş ancak ilgili Türkçe terimler de analiz kapsamında değerlendirilmiştir. Arama stratejisinde, Boolean operatörler yardımıyla konuya ilişkin anahtar kelimeler birleştirilmiştir. "Mixed Reality" OR "Extended Reality" (KG yerine geçebilecek kavramlar) AND "Artificial Intelligence" AND "Human-Computer Interaction" şeklinde bir sorgu kurgulanmıştır. Arama sorgusu, 2019 başından 2024 sonuna kadar yayınlanmış çalışmaları tarayacak şekilde zaman filtresiyle sınırlandırılmıştır. Bu çalışma, Moher vd. (2009) tarafından sistematik derlemelerin belirli bir düzen içinde gerçekleştirilmesi amacıyla geliştirilen PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) Akış Diyagramı temel alınarak yürütülmüştür. Çalışmada, PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) protokolü izlenerek, belirlenen anahtar kelimeler aracılığıyla taranan makalelerden uygun olanlar seçilmiş ve nitel analiz yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Araştırmada, belirlenen dâhil etme ve dışlama kriterleri doğrultusunda çalışmaların kalitesi değerlendirilmiş ve uygun bulunanlar derlemeye dahil edilerek sentezlenmiştir (Karaçam, 2013). PRISMA yönergelerine uygun olarak tanımlama, tarama, uygunluk ve dâhil etme aşamalarında uygulanmıştır.

2. Literatür Araştırması

2.1. 2019-2024 Scopus Tarama Sonuçları

PRISMA Yöntemi Kullanımı ve Sürecinin tanımlama (identification) aşamasında Scopus veri tabanında 2019-2024 yılları arasında aşağıdaki anahtar kelime kombinasyonlarıyla tarama gerçekleştirilmiştir: "Mixed Reality" AND "Artificial Intelligence", "Mixed Reality" AND "Human-Computer Interaction", "Artificial Intelligence" AND "Human-Computer Interaction", "Mixed Reality" AND "Artificial Intelligence" AND "Human-Computer Interaction". Bu aşamada toplam 97 yayın bulunmuştur. Tarama ve Seçim (screening) aşamasında bulunan 97 yayının başlıkları ve özetleri incelenmiştir.

Başlık ve özetlerine göre, çalışma ile doğrudan ilişkili olmayan, çalışma konusuna katkı sağlamayacağı düşünülen 69 yayın dışlanmıştır. Uygunluk (eligibility) değerlendirmesinde kalan 28 yayının tam metinleri ayrıntılı olarak incelenmiştir. İnceleme sonucunda, çalışma kapsamında yeterli bilgi içermeyen, uygulamalı örnek veya disiplinlerarası bağlam sunmayan 9 yayın daha dışlanmıştır. Sonuç olarak, Scopus veri tabanından toplam 17 yayın çalışma için uygun bulunarak dahil edilmiştir (included studies; **Şekil 1**).



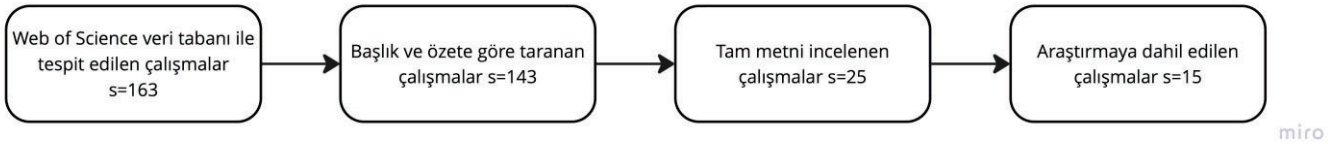
Şekil 1: Scopus veritabanı PRISMA Akış Diyagramı

Bu yayınlar, KG, YZ ve İBE kavramlarının kesişimini ele alan, uygulamalı örneklere sahip ve disiplinler arası etkileşimleri ortaya koyan çalışmalardır (**Tablo 1**).

Çalışmanın, KG, YZ ve İBE kavramlarından en az ikisini net biçimde ele alması, konu odaklı, disiplinler arası veya uygulamalı örneklere yer verilmesi, 2019-2024 yılları arasında yayımlanmış olması, yayının tam metnine erişilebilir olması dahil edilme kriterlerini oluşturur. Dışlanma kriterleri ise çalışmanın araştırmanın ana odak noktasıyla ilgisiz olması, kavramlar arasındaki ilişkiyi yeterince tanımlamaması, tam metnine erişim sağlanamaması, sadece teorik çerçeve sunması ve disiplinlerarası uygulamalara değinmemesi, belirlenen tarihler dışında yayımlanmış olması şeklindedir. Bu süreçte PRISMA yöntemi ile literatür taramasının şeffaflığı ve tekrar edilebilirliği sağlanmış, çalışmaların seçimi bilimsel olarak gerekçelendirilmiştir. Tüm dillerde ve tüm belge türlerinde yapılan taramaya ait bulunan çalışmaların başlıkları, yılları, yazarları, yayınlandıkları kaynaklar, belge türleri ve ilgili kavram kombinasyonu numaraları belirtilmiştir. Tekrar eden çalışmalar çıkarılmıştır.

2.2. 2019-2024 Arası Web of Science Tarama Sonuçları

PRISMA Yöntemi Kullanımı ve Sürecinin tanımlama (identification) aşamasında Web of Science veri tabanında 2019-2024 yılları arasında yapılan taramada şu anahtar kelime kombinasyonları kullanılmıştır: "Mixed Reality" AND "Artificial Intelligence", "Mixed Reality" AND "Human-Computer Interaction", "Artificial Intelligence" AND "Human-Computer Interaction", "Mixed Reality" AND "Artificial Intelligence" AND "Human-Computer Interaction". Bu anahtar kelimelerle yapılan ilk tarama sonucunda toplam 163 yayın tespit edilmiştir. İlk tarama sonucunda elde edilen 163 yayının başlık ve özetleri incelenmiş, konu ile ilgisiz veya kapsam dışı olanlar elenmiştir. Bu aşamada, ilgisiz olduğu belirlenen ve çalışma kapsamında olmayan toplam 130 yayın hariç bırakılmıştır. Tam metnine erişilemeyen ya da içeriği detaylı analiz için yetersiz bulunan 8 yayın daha elenerek değerlendirme dışı bırakılmıştır. Kalan 25 yayın, tam metinleri okunarak değerlendirilmiştir. İnceleme sonucunda, çalışma kapsamında yeterli bilgi içermeyen, uygulamalı örnek veya disiplinlerarası bağlam sunmayan 10 yayın daha dışlanmıştır. Sonuç olarak, Scopus veri tabanından toplam 15 yayın çalışma için uygun bulunarak dahil edilmiştir (included studies) (**Şekil 2**).



Şekil 2: Web of Science veritabanı PRISMA Akış Diyagramı

Bu yayınlar, doğrudan KG, YZ ve İBE arasındaki ilişkiyi ele alan, farklı disiplinlerde uygulamalı veya teorik olarak bu konuların kesişimini net olarak ortaya koyan ve çalışma amacına uygun içerik sunan araştırmalardır. Bu çalışmalar, kavramsal ilişkileri net biçimde tanımladığı ve disiplinler arası yenilikçi uygulamalara vurgu yaptığı için dahil edilmiştir. Dahil etme ve dışlama kriterleri Scopus veritabanındaki araştırmada uygulandığı şekildedir. 2019-2024 yılları arasında Web of Science veri tabanı tarama sonuçları kapsamında dahil edilen yayınlar aşağıdaki tabloda listelenmiştir (**Tablo 2**).

Tablo 1: Scopus Tarama Sonuçları

Yayın Başlığı	Yıl	Yazarlar	Yöntem	Bulgular	Belge Türü
Mixed Reality and Artificial Intelligence: A Holistic Approach to Multimodal Visualization and Extended Interaction in Knee Osteotomy	2023	Andrea Moglia vd.	Durum çalışması-Bu çalışma, diz osteotomisi için yapay zekâ ve karma gerçeklik tabanlı bir sistem geliştirerek uygulamalı sistem geliştirme ve deneysel değerlendirme yöntemlerini kullanmıştır.	KG ve yapay zekâ entegrasyonu, diz osteotomisi planlamasında çok modlu görselleştirme ve genişletilmiş kullanıcı etkileşimi sağlayarak cerrahi süreçlerin doğruluğunu ve etkinliğini artırmıştır.	Makale
Real-time Mixed Reality (MR) and Artificial Intelligence (AI) Object Recognition Integration for Digital Twin in Industry 4.0	2023	Y. M. Tang vd.	Deneysel çalışma- Djital ikiz ortamında nesne tanıma ve etkileşim için KG ve YZ entegrasyonuna dayalı bir sistem geliştirilmiş ve sistem performansı deneysel yöntemle değerlendirilmiştir.	KG ve yapay zekâ entegrasyonu, dijital ikiz ortamında nesne tanıma ve insan-makine etkileşimini gerçek zamanlı hale getirerek depo yönetiminde doğruluğu ve verimliliği artırmıştır.	Makale
Gesture-Based Model of Mixed Reality Human-Computer Interface	2020	Amit Kumar; Archana Mantri	Model geliştirme	Çalışma, karma gerçeklik ortamlarında insan-bilgisayar etkileşimini geliştirmek için jest tabanlı iletişimin etkili bir yaklaşım olduğunu ortaya koyarak kavramsal bir model önermiştir.	Konferans bildirisi
Mixed Reality collaboration environment improves the efficiency of human-centered industrial system: A case study in the mining industry	2023	Shuguang Liu vd.	Vaka çalışması (case study)-Bu çalışma, karma gerçeklik destekli bir iş birliği ortamını geliştirerek madencilik endüstrisinde vaka çalışması ve deneysel değerlendirme yöntemleriyle etkinliğini test etmiştir.	Karma gerçeklik tabanlı iş birliği ortamı, madencilik sektöründe insan merkezli süreçlerde verimliliği artırmış ve kullanıcı deneyimini iyileştirmiştir.	Makale
Research on Information Fusion Interface of Human-Computer Interaction based on Mixed Reality Technology	2023	Yeshan Zhu vd.	Deneysel çalışma (experimental study)-Bu çalışma, karma gerçeklik ortamında insan-bilgisayar etkileşimi için bilgi füzyonuna dayalı arayüzler tasarlamış ve bunları deneysel yöntemle karşılaştırmalı olarak değerlendirmiştir.	Derin füzyon arayüzü, birleşik füzyon arayüzüne kıyasla bilişsel yükü azaltmış, işlem verimliliğini artırmış ve kullanıcılar tarafından daha yüksek düzeyde değerlendirilmiştir.	Konferans bildirisi
Understanding Multi-user, Handheld Mixed Reality for Group-based MR Games	2024	Bautista Isaza, C. A. vd.	Deneysel çalışma-Mobil tabanlı çok kullanıcılı KG etkileşimleri için MOMIS sistemi geliştirerek, grup büyüklüğü ve etkileşim türlerinin kullanıcı deneyimi üzerindeki etkilerinin deneysel kullanıcı çalışmasıyla sistematik olarak analiz edilmesi	Oyuncu takımları büyüklüğünün ve etkileşim türünün, çok kullanıcılı KG deneyimlerinde sosyal varlık, katılım ve bilişsel yük üzerinde anlamlı etkiler yarattığı gösterilmiştir.	Makale
Artificial Intelligence for Human-Computer Interaction: A Modern Approach	2021	Yang Li vd.	Derleme	Modern yapay zekâ teknikleri, klasik İBE problemlerine yeni çözümler sunarak kişiselleştirilmiş tıp, tasarım ve arayüz otomasyonu gibi alanlarda somut faydalar sağlamış ve YZ-İBE entegrasyonunun geniş etki potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymuştur.	Kitap
Human-machine interaction interface design of intelligent equipment based on user experience	2020	C. M. Ma vd.	Durum çalışması (Case study)-İnsan merkezli tasarım teorisi ve kullanıcı deneyimi ilkelerine dayalı olarak, akıllı bir ekipman için insan-makine arayüzü geliştirilmiştir.	Akıllı ekipman arayüz tasarımında cihazın profesyonel gereksinimlerini insan merkezli tasarım prensipleriyle birleştirmenin kullanıcı deneyimini iyileştirdiği sonucuna varılmıştır	Makale

Tablo 1: Scopus Tarama Sonuçları (devamı)

Yayın Başlığı	Yıl	Yazarlar	Yöntem	Bulgular	Belge Türü
A Systematic Review of Human–Computer Interaction and Explainable Artificial Intelligence in Healthcare	2021	Mobeen Nazar vd.	Sistematik derleme	Çalışma, tıbbi uygulamalarda YZ'nin benimsenmesinde kullanılabilirlik, güven ve şeffaflığın kritik olduğunu vurgulamış, derin öğrenme modellerinin açıklanabilirliğini artırmaya yönelik rehber ilkeler ve geliştirme önerileri sunmuştur.	Derleme
LLM enabled generative collaborative design in a mixed reality environment	2024	Shoubo Xu vd.	Vaka çalışması (case study)-Bu çalışma, LLM, GAI ve KG entegrasyonuna dayalı bir iş birliği tasarım çerçevesi geliştirerek, prototip sistemler üzerinden vaka çalışması ve deneysel karşılaştırmalı analiz yürütmüştür.	LLM, GAI ve KG entegrasyonuna dayalı geliştirilen iş birliği çerçevesi, çok paydaşlı tasarım süreçlerinde yaratıcılığı, verimliliği ve kullanıcı etkileşimini geleneksel yöntemlere kıyasla anlamlı şekilde artırmıştır.	Makale
Human-Computer Interaction and Artificial Intelligence: Advancing Care Through Extended Mind Theory	2024	Chris Jacobs vd.	Derleme	Extended Mind bakış açısıyla, yapay zekâ destekli sanal terapistlerin ve KG uygulamalarının klinisyenlerin bilişsel kapasitesini genişleterek ruh sağlığı tedavisi ve tıp eğitiminde daha insan merkezli bakım süreçlerini destekleyebileceği vurgulanmıştır.	Editöryel (Makale)
Frankenstein's Monster in the Metaverse: User Interaction with Customized Virtual Agents	2024	Schmidt S vd	Deneysel çalışma-Bu çalışma, kullanıcıların özelleştirilebilir sanal ajanlarla etkileşim deneyimlerini analiz etmek amacıyla deneysel kullanıcı çalışması yöntemi kullanmıştır.	Özelleştirilebilir sanal ajanlar, kullanıcıların etkileşim deneyimini ve ajana yönelik bağlılık ve özdeşleşme düzeylerini artırmıştır.	Konferans bildirisi
Integrating mixed reality and internet of things as an assistive technology for elderly people living in a smart home	2019	De Belen R.A.J. Vd.	Durum çalışması (Case study)-Yaşlı bireyler için KG ve IoT entegrasyonuna dayalı bir destek sistemi tasarlanmış, Microsoft HoloLens kullanılarak sistem prototipi geliştirilmiş ve uygulama senaryoları üzerinden işlevselliği test edilerek değerlendirilen uygulamalı bir araştırmadır.	Geliştirilen sistem, yaşlı kullanıcıların KG arayüzü üzerinden IoT cihazlarını kolaylıkla yöneterek evlerini daha bağımsız ve güvenli şekilde kontrol etmelerine imkân sağlamıştır.	Konferans bildirisi
GranDIHC-BR 2025-2035 - GC7: Interaction with Emerging Technologies: An Ecosystem Integrating Humans Technologies and Contexts	2024	Zaina L.; Choma J. Vd.	Kavramsal analiz-Bu çalışma, insan, teknoloji ve bağlam etkileşimini merkeze alan gelişen teknolojilerle ilgili kavramsal bir analiz yaparak, geleceğe yönelik araştırma temaları ve stratejik bir araştırma gündemi oluşturmuştur.	Gelişen teknolojiler bağlamında insan-merkezli tasarım, etik sorumluluk ve kapsayıcı inovasyonun, gelecekteki İBE araştırmalarının temel öncelikleri olması gerektiği vurgulanmıştır.	Konferans bildirisi
The Interplay Between Artificial Intelligence and Users' Personalities: A New Scenario for Human-Computer Interaction in Gaming	2020	Caci B.; Dhou K.	Derleme	YZ ile simüle edilen sanal oyuncuların insan benzeri özellikler sergileyerek toplumsal örüntülerin anlaşılmasına katkı sağladığı ve oyunlarda kişilik faktörünün önemli olduğu vurgulanmıştır.	Konferans bildirisi
Spatial Computing: Defining the Vision for the Future	2024	Xu J vd.	Kavramsal analiz-Bu çalışma, Spatial Computing alanında insan-merkezli konulara odaklanarak kavramsal analiz yapmış ve gelecek araştırmalar için stratejik bir araştırma gündemi oluşturmuştur.	Bu çalışma, Spatial Computing alanında insan merkezli konulara odaklanarak kavramsal analiz yapmış ve gelecek araştırmalar için stratejik bir araştırma gündemi oluşturmuştur.	Konferans bildirisi

Tablo 1: Scopus Tarama Sonuçları (devamı)

Yayın Başlığı	Yıl	Yazarlar	Yöntem	Bulgular	Belge Türü
PLEA: The Embodied Virtual Being	2024	Stipancic T. Vd.	Deneysel çalışma-Bu çalışma, sanal ve fiziksel ortamlarda bir sanal varlıkla insan etkileşimini analiz etmek için etnografik iletişim yöntemleri ve kullanıcı merkezli deneysel gözlem tekniklerini kullanmıştır.	Duygusal zekâya sahip sanal varlıklar, insanlarla yüz ifadeleri üzerinden anlamlı ve doğal etkileşimler kurarak yapay zekânın sosyal ortamlardaki rolünü yeniden tanımlama potansiyeli göstermiştir.	Konferans bildirisi

Tablo 2: Web of Science Tarama Sonuçları

Makale Başlığı	Yıl	Yazarlar	Yöntem	Bulgular	Belge Türü
The Combination of Artificial Intelligence and Extended Reality: A Systematic Review	2021	Dirk Reiners, Mohammad R. Davahli vd.	Sistematik Literatür Taraması	AI-XR kombinasyonu; otonom araçlar, robotik, askeri eğitim, tıbbi teşhis ve eğlence gibi alanlarda, yapay zekâyı eğitmek, XR'a zekâ kazandırmak ve XR verilerini yorumlamak amacıyla kullanılmaktadır.	Derleme (Makale)
Consumer engagement via interactive artificial intelligence and mixed reality	2021	Eunyoung Sung, Sujin Bae, Dai-In Danny Han vd.	Alan çalışması (Field study)-Bir eğlence kompleksindeki YZ entegre edilmiş bir KG sergisinde tüketicilerin tepkilerini incelemek	KG ortamında yapay zekâ kalitesinin artması, mekânsal sürükleyiciliği ve kullanıcı keyfini artırarak tüketici etkileşimini, satın alma niyetini ve sosyal paylaşım isteğini güçlendirmiştir.	Makale
AI Adaptivity in a Mixed-Reality System Improves Learning	2024	Nesra Yannier, Scott E. Hudson, Henry Chang ve Kenneth R. Koedinger	Kontrollü deney (Controlled experiment) - Çocuklara deneyleri sırasında anlık kişiselleştirilmiş geri bildirim sunan bir yapay zekâ adaptasyon sistemi kullanarak etkilerini incelemek	Bayesian Knowledge Tracing tabanlı adaptasyon, KG ortamında çocukların bilim öğrenimini artırmış, öğrenme keyfini ise olumsuz etkilememiştir.	Makale
Active Learning is About More Than Hands-On: A Mixed-Reality AI System to Support STEM Education	2020	Nesra Yannier, Scott E. Hudson ve Kenneth R. Koedinger	Randomize kontrollü deney (RCT) - Katılımcılar (çocuklar) rastgele (randomize) bir şekilde farklı aktif öğrenme koşullarına (rehberli pratik, ellerle öğrenme, birleşik yaklaşım) atanmış ve bu koşulların öğrenme üzerindeki etkilerini incelemek	Rehberli keşif ve etkileşimli geri bildirim, yalnızca ellerle öğrenmeye kıyasla bilimsel anlayışta dört, uygulama becerilerinde on kat daha fazla gelişim sağlamıştır.	Makale
Evaluation of User Interaction Technique with Holographic Projection in Extended Reality	2024	F. E. Fadzli, A. W. Ismail, G. E. Su ve S. Sadimon	Tasarım odaklı araştırma (design research) ve Uygulamalı değerlendirme (applied evaluation) - Yeni bir kullanıcı etkileşim tekniği geliştirilmiş ve bu teknik, holografik projeksiyonlu bir XR iç mekân uygulamasında kullanıcı deneyimi üzerinden değerlendirilmiştir	Gerçek zamanlı holografik projeksiyon, XR ortamlarında sezgisel etkileşimi mümkün kılmış ve kullanıcı deneyimini iyileştirme potansiyeli göstermiştir.	Konferans bildirisi
Presence and beyond: Evaluating user experience in AR/MR/VR	2022	R. Skarbez, M. Smith, A. Sadagic ve M. C. Whitton	Derleme	AR/MR/VR sistemlerinin değerlendirilmesinde çoklu yöntemlerin kullanılması ve gerçeklik-sanal süreklilik modellerinin yeni teknolojilere uyarlanması gerekliliği vurgulanmıştır.	Makale

Tablo 2: Web of Science Tarama Sonuçları (devamı)

Makale Başlığı	Yıl	Yazarlar	Yöntem	Bulgular	Belge Türü
Mixed reality prototyping for usability evaluation in product design: a case study of a handheld printer	2024	Y. Wang vd.	Karşılaştırmalı deneysel çalışma (comparative experimental study)- Geleneksel prototipleme ile KG prototiplemenin etkinlikleri karşılaştırılarak, deneysel koşullarda kullanıcı deneyimi veya performans gibi ölçütler değerlendirilmiştir.	Karma prototip, kullanılabilirlik ve işlevselliği gerçekçi biçimde yansıtarak tasarım karşılaştırmaları için uygun bulunmuş, ancak mutlak performans ölçümlerinde sapmalar gözlemlenmiştir.	Makale
Integrating Extended Reality (XR) in Architectural Design Education: A Systematic Review and Case Study at Southeast University (China)	2024	Zhang, Y; Huang, X	Vaka çalışması (Case study)	XR teknolojilerinin mimarlık eğitimine entegrasyonu, tasarım süreçlerini geliştirerek paydaş katılımını artırmış, müfredat yenilikleri ve teknik gelişmelerle öğrencilerin teknoloji odaklı değişime uyumunu desteklemiştir.	Makale
Introduction to this special issue on unifying human–computer interaction and artificial intelligence	2020	M. De Choudhury , M. K. Lee, H. Zhu vd.	Derleme	İnsan merkezli tasarım, kullanıcı katılımı ve disiplinler arası işbirliği yoluyla daha adil ve şeffaf yapay zekâ sistemleri geliştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır.	Editöryal (Makale)
Six Human-Centered Artificial Intelligence Grand Challenges	2023	O. O. Garibay vd.	Uzman görüşüne başvurma- 26 uzmandan oluşan uluslararası bir çalışma grubu, insan merkezli yapay zekâ alanında 6 büyük araştırmayı belirlemek üzere bir konsensus çalışması yapmıştır	Yapay zekânın insan refahını, sorumlu tasarımı, mahremiyeti, insan merkezli ilkeleri, uygun yönetişimi ve bilişsel saygıyı esas alarak daha adil ve sürdürülebilir toplumlar için geliştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır.	Makale
From Explainable to Interactive AI: A Literature Review on Current Trends in Human-AI Interaction	2024	Muhamma d Raees vd.	Derleme -YZ ve İBE literatürünü sistematik olarak inceleyip 'Etkileşimli YZ' kavramına odaklanan bir derleme araştırması yürütülmüştür	Gelecekteki etkileşimli YZ tasarımlarında, kullanıcıların sadece sistemi anlamalarını değil, geliştirme sürecine aktif katılımlarını da sağlayan yetkilendirici yaklaşımlar benimsenmesi gerektiği vurgulanmıştır.	Derleme (Makale)
Hand interaction designs in mixed and augmented reality head mounted display: a scoping review and classification	2023	Nguyen, R; Gouin-Vallerand, C; Amiri, M	Literatür Araştırması-El ile etkileşim teknikleri ve bu etkileşimlerde YZ'nin rolü	İncelenen dönemdeki el etkileşim teknikleri ve gereksinimleri belirlenmiş, bu teknikleri sınıflamak amacıyla Metafor-Davranış taksonomisi geliştirilmiştir.	Makale
Intelligent Virtual Reality and Augmented Reality Technologies: An Overview	2025	Lampropou los, G	Bibliyometrik analiz (bibliometric analysis)	Analiz, AI-XR entegrasyonunun %91'lik yüksek bir büyüme oranıyla eğitimden sağlığa birçok alanda araştırıldığını, mevcut boşluklara rağmen gelecekte güçlü bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymuştur.	Makale
Using Mixed Reality in Intralogistics - Are we ready yet?	2021	Kurschl, W; Pimminger, S; Schönböck, J vd.	Vaka çalışması (Case study)-İki farklı bakım senaryosu için MR prototipleri geliştirilmiş, ardından kullanıcı çalışmaları aracılığıyla bu prototiplerin pratik uygulanabilirliği ve kullanıcı deneyimi sistematik biçimde değerlendirilmiştir.	KG teknolojisi umut verici bulunmuş, ancak kullanıcı geri bildirimleri donanım ergonomisi ve sezgisel etkileşim tasarımı açısından iyileştirme gereksinimine işaret etmiştir.	Makale

Tablo 2: Web of Science Tarama Sonuçları (devamı)

Yayın Başlığı	Yıl	Yazarlar	Yöntem	Bulgular	Belge Türü
Construction and Implementation of Embodied Mixed-Reality Learning Environments	2021	Liu, SG; Ba, L	Tasarım odaklı araştırma (Design-Based Research) – Embodied öğrenme kuramına dayalı olarak karma gerçeklik destekli bir öğrenme ortamı tasarlanmış ve uygulama süreçleri sistematik biçimde modellenmiştir.	Bedensel (embodied) öğrenme yaklaşımıyla tasarlanan karma gerçeklik destekli öğrenme ortamları, beden ve çevre etkileşimini güçlendirerek öğrenme deneyimini zenginleştirmektedir.	Konferans bildirisi

2.3. İnsan-Bilgisayar Etkileşiminde Yer Alan Etkileşim Araçları ve Amaçlarının Sınıflandırılması

Çalışmada, taranan Web of Science ve Scopus veritabanlarındaki araştırmalara dayanarak, insan-bilgisayar etkileşiminde yer alan etkileşim araçları ve bunların çeşitli amaçlara yönelik kullanımına dair bir sınıflandırma yapılmıştır (**Tablo 3**). Bu sınıflama, karma gerçeklik (KG) ve yapay zekâ (YZ) teknolojilerinin insan-bilgisayar etkileşimi bağlamında nasıl kullanıldığını ve etkileşim araçlarının hangi amaca hizmet ettiğini göstermektedir.

Tablo 3: Farklı disiplinlerde İBE bağlamında KG ve YZ kullanımı

Etkileşim Aracı	Amaç	Disiplin/Etki Alanı	Karma Gerçeklik ve Yapay Zekâ Kullanımı
Sesli Komutlar	Eğitim, Tasarım, Sağlık	Eğitim, Mimarlık, Sağlık, Endüstri	Sesli komutlar, kullanıcı etkileşimini artırarak, sesli geri bildirim sağlamak ve tasarımlar üzerinde anında değişiklik yapmaya imkân tanımaktadır. Bu araç, tasarım sürecini daha hızlı ve sezgisel hale getirmek için YZ ile entegre edilmiştir.
El Jestleri	Tasarım, Endüstri	Mimarlık, Endüstri, Eğitim	El jestleri, karma gerçeklik ortamlarında kullanıcıların mekânı şekillendirmesine, tasarımlarını manipüle etmesine olanak tanır. YZ, bu etkileşimleri kişiselleştirerek daha etkili ve özgün bir deneyim sağlar.
Göz Takibi	Eğitim, Sağlık, Tasarım	Eğitim, Tıp, Mimarlık	Göz takibi, kullanıcının tasarımlar üzerinde nereye odaklandığını analiz eder. YZ destekli bu etkileşim, kullanıcının göz hareketlerine tepki verir ve eğitim süreçlerinde etkili geri bildirim sunar.
Dokunmatik Arayüz	Eğitim, Tasarım	Eğitim, Mimarlık, Endüstri	Karma gerçeklikte dokunmatik arayüzler, kullanıcıların sanal dünyadaki öğelere fiziksel etkileşimle dokunmalarını sağlar. Bu araç, YZ ile birleştirildiğinde, etkileşimli geri bildirimler sunarak kullanıcı deneyimini zenginleştirir.
Vücut Hareketleri	Eğitim, Tasarım, Endüstri	Mimarlık, Sağlık, Endüstri	Vücut hareketleri, karma gerçeklik cihazlarıyla kullanıcının tüm vücut hareketlerini algılar. Eğitimde öğrencilerin mekânları deneyimlemelerini sağlar, tasarımda ise dinamik etkileşimler yaratır.

KG teknolojilerinin etkisi, farklı disiplinlerde geniş bir yelpazeye yayılmaktadır. Aşağıdaki tablo, Web of Science ve Scopus veri tabanlarındaki çalışmalar dikkate alındığında, KG teknolojilerinin hangi alanlarda kullanıldığını göstermektedir (**Tablo 4**). Bu etki alanlarının, disiplinlere özgü farklı etkileşim araçlarıyla nasıl ilişkilendirildiği ayrıca belirtilmiştir.

Tablo 4: Farklı disiplinlerde İBE bağlamında örnek uygulamalar

Etki Alanı/Disiplin	Teknoloji Kullanımı	Örnek Uygulamalar
Mimarlık ve Tasarım	Karma gerçeklik, yapay zekâ, el jestleri, göz takibi, sesli komutlar	Tasarım prototipleme, görselleştirme, kullanıcı etkileşimi, hızlandırılmış geri bildirim
Eğitim	Karma gerçeklik, dokunmatik arayüzler, göz takibi, sesli komutlar	Etkileşimli öğrenme ortamları, sanal sınıflar, tasarım uygulamaları ve geri bildirim
Sağlık ve Rehabilitasyon	Karma gerçeklik, vücut hareketleri, sesli komutlar	Cerrahi simülasyonlar, hasta eğitimi, fiziksel rehabilitasyon simülasyonları
Endüstri ve Üretim	Karma gerçeklik, dokunmatik arayüzler, el jestleri, vücut hareketleri	Endüstriyel prototipler, üretim hattı izleme, üretim süreçlerinin sanal simülasyonları

Tablolardaki sınıflandırmaya göre, el hareketleriyle etkileşim (jestler) hemen her alanda yaygın ve doğal bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Eğitim uygulamalarında öğrenciler, örneğin artırılmış gerçeklik destekli fen deneylerinde sanal objeleri elle tutup bırakabilmekte veya hareket ettirebilmektedir. Tasarım ve prototipleme uygulamalarında da HoloLens gibi cihazlar sayesinde kullanıcılar el jestleriyle dijital modelleri ölçeklendirme, döndürme gibi işlemleri yapabilmektedir. Tıbbi uygulamalarda cerrahlar veya tıp öğrencileri, KG ortamında ellerini kullanarak üç boyutlu anatomi modellerini inceleyebilmekte veya görüntü dilimlerini değiştirebilmektedir. Sesli etkileşim ise özellikle ellerin

meşgul olduğu veya dokunmanın mümkün olmadığı durumlarda önemlidir. Örneğin, ameliyat sırasında doktorların steriliteyi bozmayacak şekilde KG arayüzlerini kontrol etmek için sesli komutlar vermesi mümkün olmuş (Dennler vd., 2021), Proximie gibi sistemlerle uzaktaki uzmanlar sözlü yönlendirmelerle canlı KG görüntüleri üzerinde notlar alabilmiştir (Luck vd., 2017).

Eğitimde de büyük dil modellerinin gelişimiyle, KG ortamlarında öğrencilerle etkileşim kuran sesli sanal asistanlar görülmeye başlamıştır (ör. sanal hasta simülasyonlarında öğrenciye konuşarak geri bildirim veren YZ asistanları). Tasarım alanında da konsept olarak tasarımcıların sesli komutlarla model oluşturduğu arayüzler araştırılmaktadır. Göz takibiyle etkileşim, halihazırda KG cihazlarının (ör. HoloLens 2) donanımsal kabiliyetleri arasında yer alsa da literatürde eğitim ve tasarım uygulamalarında yaygın bir kullanımına rastlanmamakla birlikte daha çok araştırma prototiplerinde görülmektedir. Ancak tıbbi alanda, kullanıcının baktığı noktayı takip eden sistemler potansiyel sunmaktadır. Örneğin KG başlıkları, cerrahın bakışına göre ilgili anatomik bilgiyi öne çıkarabilir veya kullanıcı arayüzünde sadece bakılan elementleri etkinleştirerek bilişsel yükü azaltabilir. Nitekim Zhu vd.'nin (2023) çalışmasında daha entegre (dağılmamış) bir arayüzün kullanıcı bilişsel performansını yükselttiği bulgulanmıştır (Zhu vd., 2023). Göz takibinin bu entegrasyonu sağlamada bir araç olacağı düşünülebilir.

Gelecekte eğitim uygulamalarında da öğrencinin dikkat ettiği ögeleri izleyerek adapte olan akıllı KG içerikleri gelişebilir. Dokunmatik etkileşim (ekranlara dokunma veya cihaz üzerindeki tıklamalar) KG bağlamında nispeten daha az tercih edilmektedir. Bunun sebebi, KG'nin fiziksel dünyanın üstüne dijital katmanlar bindirerek eller serbest etkileşimi hedeflemesidir. Eğitimde tablet veya telefon tabanlı artırılmış gerçeklik uygulamalarında dokunmatik arayüz kullanılmaktadır. Ancak gelişmiş KG deneyimleri daha çok el hareketleri ve sesle kontrol edilmektedir. Tasarım ve tıp alanlarında dokunmatik arayüz, genellikle KG öncesi aşamalarda görülür. KG cihazları kullanılırken dokunmadan ziyade doğal arayüzlere geçilir. Özetle, bu sınıflandırma etkileşim yöntemlerinin ön plana çıktığı bağlamları ve uygulamaları göstermektedir. Eğitim uygulamalarında çeşitlilik yüksek olup, dokunmatik ve doğal arayüzler birlikte kullanılmaktadır. Tasarım/mimarlık uygulamalarında doğal ve sezgisel etkileşim (jestler, sesli komutlar) baskındır böylelikle tasarımcı, bilgisayar arayüzünü mümkün olduğunca görünmez kılarak yaratıcı sürece odaklanabilir (Cindioğlu, 2019). Tıbbi uygulamalarda ise eller serbest ve temassız etkileşim büyük önem taşır; bu nedenle el hareketleri ve ses komutları yaygın, dokunma ise yok denecek kadar azdır. Göz ile etkileşim gelecekte önem kazanabilecek bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Özellikle YZ desteği ile kullanıcının dikkatini ve durumunu anlayarak bağlamsal olarak akıllı arayüzler sunma noktasında göz hareketleri ile etkileşim kritik rol oynayabilir.

3. Bulgular

Yukarıdaki çalışmalar karma gerçeklik teknolojilerinin, yapay zekâ ile birleştiğinde İBE alanında yeni etkileşim modelleri ve deneyimler ortaya çıkardığını göstermektedir. Kullanıcı deneyimi, sistemlerin benimsenmesinde kritik bir rol oynamaktadır. KG ortamlarında YZ entegrasyonu, mekânsal sürükleyicilik hissini yükselterek etkileşim, satın alma niyeti ve sosyal paylaşım eğilimini artırmıştır. Prototipleme ve arayüz tasarımı çalışmalarında, insan merkezli tasarım ilkelerinin sistem verimliliğini artırdığı ve bilişsel yükü azalttığı deneysel olarak kanıtlanmıştır. Eğitim, tasarım, sağlık gibi farklı bağlamlarda daha sezgisel, zengin ve akıllı kullanıcı deneyimleri tasarlanmaktadır. Bununla birlikte, cihazların ergonomisi, uygulama maliyetleri, kullanıcıların bilişsel yükü gibi konularda hâlen çözülmesi gereken problemler bulunmaktadır. KG teknolojilerinin YZ'nin gelişimi ile İBE açısından sunduğu başlıca avantajlar şunlardır:

Doğrudan Etkileşim: Geleneksel fare ve klavye gibi arayüzlerin aksine, KG teknolojileri hareket takibi, ses komutları ve el jestleri, LLM ile sohbet sırasında gibi doğrudan etkileşim yöntemleri sunmaktadır.
Deneyimsel Öğrenme: Eğitimde KG, karmaşık kavramları daha iyi anlamak için interaktif ve sürükleyici bir ortam sağlamaktadır. Kıdık ve Asıliskender (2024), KG'nin tasarım eğitimi süreçlerine entegrasyonunun öğrenci katılımını artırdığını göstermektedir.

Mimari Tasarımda Dönüşüm: Kullanıcıların mimari mekânları gerçek zamanlı olarak deneyimlemelerine olanak tanıyarak tasarım süreçlerini hızlandırmaktadır. Phuc ve diğerleri (2024), HoloLens 2 cihazlarının iç mekân haritalama sürecini optimize ederek tasarımcıların daha doğru kararlar almasını sağladığını vurgulamaktadır (Phuc vd., 2024).
Ancak KG'nin uygulanmasıyla ilgili zorluklar da mevcuttur:
Bilişsel Yük: YZ destekli KG ortamları, kullanıcıların algısal ve bilişsel yüklerini artırabilir, bu da uzun vadeli kullanımda zorluklara yol açabilir.

Erişilebilirlik ve Maliyet: KG cihazlarının yaygınlaşmasının önündeki en büyük engellerden biri yüksek maliyet ve teknik altyapı gereksinimleridir.
Kullanıcı Deneyimi ve Ergonomi: KG sistemlerinin ergonomik tasarımı, göz yorgunluğu ve hareket hastalığı gibi problemleri minimize edecek şekilde geliştirilmelidir.

KG teknolojileri YZ'nin gelişmesi ile İBE alanında yenilikler sunmaktadır. Ancak, bu teknolojinin yaygınlaşabilmesi için bir dizi teknik ve ergonomik engelin aşılması gerekmektedir. Çalışmalar, KG'nin bireysel farklılıkları destekleyerek günlük yaşam kalitesini artırma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, KG gözlükleri, holografik projeksiyonlar gibi geliştirilen arayüz teknolojileri, tasarım süreçlerinde daha sezgisel ve erişilebilir çözümler sunmayı amaçlamaktadır. Özellikle YZ destekli KG'nin etkileşimli öğrenme süreçleri, tasarım uygulamaları ve endüstrideki pratik kullanımları ele alınarak bu alanlarda sunulan çözümler ve karşılaşılan zorluklar detaylandırılmıştır.

Karma gerçeklik (KG) ve yapay zekâ (YZ) teknolojilerinin insan-bilgisayar etkileşimine olan etkileri, sadece teknolojik değil aynı zamanda bilişsel, psikolojik ve toplumsal açılardan da önemli sonuçlar doğurmaktadır. Kullanıcıların etkileşim biçimleri giderek daha doğal ve sezgisel hale gelmektedir. Ancak, bu teknolojilerin daha geniş bir kitleye hitap etmesi için ergonomik tasarımların iyileştirilmesi, cihazların daha uygun fiyatlı hale getirilmesi ve erişilebilirlik engellerinin aşılması gerekmektedir. Ayrıca, eğitimde kullanılan YZ destekli KG sistemlerinin öğrenme süreçlerini nasıl dönüştürdüğü ve öğrenciler üzerindeki etkisi üzerine daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir. Bununla birlikte, Web of Science ve Scopus veri tabanlarındaki analiz edilen çalışmalar, KG ve YZ teknolojilerinin disiplinlerarası potansiyelini vurgulamaktadır. Mimarlıkta, bu iki teknolojinin entegrasyonu, daha interaktif tasarım süreçleri sunmakta, kullanıcı geri bildirimlerinin hızlıca toplanmasını sağlamakta ve tasarım sürecini hızlandırmaktadır. Özellikle, sesli komutlar ve el jestleri gibi etkileşim araçları, mimarlık öğrencilerine daha sezgisel bir deneyim sunmaktadır.

4. Sonuçlar

Son yıllarda KG teknolojileri ile YZ'nın kesişim kümesinde yapılan çalışmalar, İBE'nin geleceğine dair önemli ipuçları vermektedir. Literatür taraması bulguları, KG ortamlarının eğitimde öğrenci motivasyonunu ve öğrenme kalitesini artırdığını, tasarım süreçlerinde yaratıcılığı ve verimliliği beslediğini, mimarlık ve mühendislikte gerçek zamanlı geri bildirim sağladığını ortaya koymaktadır. YZ ise bu KG deneyimlerini daha etkileşimli ve uyarlanabilir hale getirmektedir: Örneğin, LLM tabanlı sanal ajanlar kullanıcı ile etkileşim kurarak rehberlik sağlamakta, makine öğrenmesi tabanlı algılama teknikleri kullanıcıların jestlerini, mimiklerini veya dikkatini yorumlayarak sistemi kullanıcı ihtiyaçlarına göre uyarlamaktadır. Bununla birlikte, mevcut çalışmaların da işaret ettiği gibi, teknolojik ve ergonomik zorluklar söz konusudur. KG cihazlarının halen pahalı ve erişiminin kısıtlı olması, kullanıcıların bu deneyimlere erişimini kısıtlamaktadır. Uzun süreli KG kullanımlarında ortaya çıkan baş ağrısı, göz yorgunluğu, bilişsel yük artışı gibi problemler, İBE araştırmacıları tarafından dikkatle ele alınmalıdır.

Gelecekte, YZ desteğiyle daha akıllı arayüzler tasarlanırken bu arayüzlerin kullanıcıya şeffaf ve anlaşılır geri bildirim vermesi, kullanıcının kontrol duygusunu kaybetmemesi için kritik olacaktır. Kullanıcı deneyiminin mekânsal sürükleyicilik, sezgisel etkileşim ve açıklanabilirlik gibi faktörlerle güçlendirilmesi, sistemlerin benimsenmesini ve kullanıcı bağlılığını doğrudan etkilemektedir. Genel olarak, 2019-2024 dönemi literatürü KG ve YZ entegrasyonunun İBE alanında henüz başlangıç aşamalarında olmakla beraber yüksek bir potansiyel taşıdığını göstermektedir. Eğitim teknolojilerinde sürükleyici sanal sınıflar, uzaktan iş birliğinde sanal ofis ve toplantı alanları, endüstride KG destekli bakım ve onarım gibi konular araştırılmaya başlanmıştır. Özellikle sağlık alanında KG'nin cerrahi simülasyon, tıp eğitimi ve hasta rehberliği gibi amaçlarla kullanımı; büyük veri ve YZ ile birleşerek kişiselleştirilmiş tıp eğitimi ve karar desteği sunma fırsatı yaratmaktadır. Günümüzde KG uygulamaları sağlık eğitiminde anatomi öğrenimini interaktif hale getirmiş, cerrahlara ameliyat öncesi pratiği için fırsat sağlamıştır. YZ desteği ise, bu ortamlarda kullanıcının performansını izleyecek ve ihtiyaç duyduğu anda doğru bilgiyi sağlayacak şekilde devreye girebilmektedir. Sonuç olarak, KG ile YZ'nin buluştuğu arakesitte insan merkezli tasarım ilkeleri yeniden tanımlanmaktadır. Hem teknolojik geliştirmeler hem de kullanıcı araştırmaları, daha sezgisel, akıllı ve kullanıcı dostu etkileşim biçimleri ortaya koymaya başlamıştır. Önümüzdeki yıllarda, cihaz boyutlarının küçülmesi, maliyetlerin düşmesi ve YZ'nin açıklanabilirlik/eğitilebilirlik düzeyinin artmasıyla, KG+YZ destekli İBE uygulamalarının eğitimden sağlığa pek çok alanda yaygınlaşacağı öngörülmektedir. Bu çalışma, KG teknolojilerinin YZ alanındaki gelişmeler paralelinde, İBE bağlamında potansiyelini ortaya koyarken, aynı zamanda gelecekteki araştırmalara rehberlik edecek öneriler sunmaktadır. YZ destekli KG'nin daha sezgisel, erişilebilir ve maliyet-etkin hale getirilmesi için tasarım ve yazılım alanında geliştirmelere

ihtiyaç duyulmaktadır. YZ destekli KG teknolojilerinde etik, erişilebilirlik ve insan merkezli tasarım ilkeleri temel belirleyiciler olarak ele alınmalı; araştırmalar, bu bütüncül yaklaşımı merkeze alarak ilerlemelidir. Bu derlemenin ortaya koyduğu çerçeve ile, gelecekteki çalışmalar için araştırmacılara bu alandaki eğilimleri ve boşlukları işaret edeceği ve geleceğin etkileşim tasarımları için yol haritası oluşturmaya yardımcı olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

Aiersilan, A. (2023). Literature Review of Mixed Reality Research. arXiv.Org, abs/2312.02995. https://doi.org/10.48550/arxiv.2312.02995

Bautista Isaza, C. A., Enriquez, D., Moon, H., Jeon, M., & Lee, S. W. (2024). Understanding Multi-user, Handheld Mixed Reality for Group-based MR Games. Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction, 8(CSCW1), 1-28.

Brigham, T. J. (2017). Reality check: basics of augmented, virtual, and mixed reality. *Medical reference services quarterly, 36*(2), 171-178.

Caci, B., & Dhou, K. (2020, July). The interplay between artificial intelligence and users' personalities: a new scenario for human-computer interaction in gaming. In *International Conference on Human-Computer Interaction* (pp. 619-630). Cham: Springer International Publishing.

Choudhury, M. D., Lee, M. K., Zhu, H., & Shamma, D. A. (2020). Introduction to this special issue on unifying human computer interaction and artificial intelligence. *Human–Computer Interaction, 35*(5-6), 355-361. https://doi.org/10.1080/07370024.2020.1744146

Cindioğlu, H. C. (2019). The Influence of emergent mixed-reality technologies on design thinking [Thesis (M.Arch.) -- Graduate School of Natural and Applied Sciences. Architecture.]. Middle East Technical University.

De Belen, R. A. J., Bednarz, T., & Favero, D. D. (2019, November). Integrating mixed reality and internet of things as an assistive technology for elderly people living in a smart home. In *Proceedings of the 17th ACM SIGGRAPH International Conference on Virtual-Reality Continuum and its Applications in Industry* (pp. 1-2).

Dennler, C., Bauer, D. E., Scheibler, A. G., Spirig, J., Götschi, T., Fürnstahl, P., & Farshad, M. (2021). Augmented reality in the operating room: a clinical feasibility study. BMC musculoskeletal disorders, 22(1), 451.

Fadzli, F. E., Ismail, A. W., Eg Su, G., & Sadimon, S. (2023, October). Evaluation of User Interaction Technique with Holographic Projection in Extended Reality. In *International Conference on Trends in Sustainable Computing and Machine Intelligence* (pp. 243-258). Singapore: Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-9436-6_17

Görlich, D., Akincir, T., & Meixner, G. (2022). An overview of user interface and interaction design patterns for VR, AR, and MR applications. Mensch und Computer 2022-Workshopband, 10-18420.

Jacobs, C., Johnson, H., Rennie, T., Lambert, J., & Joiner, R. (2024). Human-Computer Interaction and Artificial Intelligence: *Advancing Care Through Extended Mind Theory. Cureus, 16*(12). https://doi.org/10.7759/cureus.74968

Jiao, H. (2023). Research on Information Fusion Interface of Human-Computer Interaction based on Mixed Reality Technology. 18–27. https://doi.org/10.1109/ichci58871.2023.10277828

Karaçam, Z. (2013). Sistematik derleme metodolojisi: Sistematik derleme hazırlamak için bir rehber. *Dokuz Eylül Üniversitesi Hemşirelik Fakültesi Elektronik Dergisi, 6*(1), 26-33.

Kıdık, A., & Asiliskender, B. (2024). Exploring Mixed Reality in Architectural Design Education: A Systematic Review. DEPARCH Journal of Design Planning and Aesthetics Research, 3(2), 176-188.

Kumar, A., & Mantri, A. (2020, December). Gesture-Based Model of Mixed Reality Human-Computer Interface. In *2020 9th International Conference System Modeling and Advancement in Research Trends* (SMART) (pp. 226-230). IEEE. https://doi.org/10.1109/SMART50582.2020.9337130

Kurschl, W., Pimminger, S., Schönböck, J., Augstein, M., & Altmann, J. (2021). Using mixed reality in intralogistics-are we ready yet?. *Procedia Computer Science*, 180, 132-141.

Lampropoulos, G. (2025). Intelligent Virtual Reality and Augmented Reality Technologies: An Overview. *Future Internet, 17*(2), 58.

Li, Y., & Hilliges, O. (Eds.). (2021). *Artificial intelligence for human computer interaction: a modern approach* (pp. 463-493). Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-82681-9

Liu, S., Xie, J., Wang, X., & Meng, H. (2023). Mixed Reality collaboration environment improves the efficiency of human-centered industrial system: A case study in the mining industry. *Computers & Industrial Engineering, 180*, 109257. https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109257

Luck, J., Hachach-Haram, N., Greenfield, M., Smith, O., Billingsley, M., Heyes, R., ... & Greenfield, M. J. (2017). Augmented reality in undergraduate surgical training: the PROXIMIE Pilot: 0402. International Journal of Surgery, 47, S1.

Ma, C. M., Zhao, D. H., & Xin, H. (2020). Human-machine interaction interface design of intelligent equipment based on user experience. *Computer Integrated Manufacturing Systems, 26*(10), 2650–2660. https://doi.org/10.13196/j.cims.2020.10.005

Milgram, P., & Kishino, F. (1994). A taxonomy of mixed reality visual displays. *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems, 77*(12), 1321-1329.

Moglia, A., Marsilio, L., Rossi, M., Pinelli, M., Lettieri, E., Mainardi, L., Manzotti, A., & Cerveri, P. (2023). Mixed Reality and artificial intelligence: A Holistic approach to multimodal visualization and extended interaction in knee osteotomy. *IEEE Journal of Translational Engineering in Health and Medicine, 12*, 279-290. https://doi.org/10.1109/JTEHM.2023.3335608

Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G., & PRISMA Group. (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. *Annals of internal medicine, 151*(4), 264-269.

Nazar, M., Alam, M. M., Yafi, E., & Su'ud, M. M. (2021). A systematic review of human–computer interaction and explainable artificial intelligence in healthcare with artificial intelligence techniques. *IEEE Access, 9*, 153316-153348. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3127881

Nguyen, R., Gouin-Vallerand, C., & Amiri, M. (2023). Hand interaction designs in mixed and augmented reality head mounted display: a scoping review and classification. *Frontiers in Virtual Reality*, 4, 1171230.

Ozmen Garibay, O., Winslow, B., Andolina, S., Antona, M., Bodenschatz, A., Coursaris, C., Falco, G., Fiore, S. M., Garibay, I., Grieman, K., Havens, J. C., Jirotka, M., Kacorri, H., Karwowski, W., Kider, J. Konstan, J., Koon, S., Lopez-Gonzalez, M., Maifeld-Carucci, I., McGregor, S., Salvendy, G., Shneiderman, B., Stephanidis, C., Strobel, C., Holter, C. T., & Xu, W. (2023). Six human-centered artificial intelligence grand challenges. *International Journal of Human–Computer Interaction, 39*(3), 391-437. https://doi.org/10.1080/10447318.2022.2153320

Phuc, T., D., L., Sanhae, K., Ugli, J. A. F., Mirzaevich, N. O., Hwang, L., Dongsu, Y., & Lee, S. (2024). Optimization of Real-Time Spatial Mapping in Architectural Visualization: A Comparison Among Mixed Reality Devices. https://doi.org/10.20944/preprints202406.1455.v1

Raees, M., Meijerink, I., Lykourentzou, I., Khan, V. J., & Papangelis, K. (2024). From explainable to interactive AI: A literature review on current trends in human-AI interaction. *International Journal of Human-Computer Studies*, 103301. https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2024.103301

Reiners, D., Davahli, M. R., Karwowski, W., & Cruz-Neira, C. (2021). The combination of artificial intelligence and extended reality: A systematic review. *Frontiers in Virtual Reality, 2*, 721933. https://doi.org/10.3389/frvir.2021.721933

Schmidt, S., Köysürenbars, I., & Steinicke, F. (2024). Frankenstein's Monster in the Metaverse: User Interaction With Customized Virtual Agents. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*.

Shuguang, L., & Lin, B. (2021, August). Construction and implementation of embodied mixed-reality learning environments. In 2021 International Conference on Big Data Engineering and Education (BDEE) (pp. 126-131). IEEE.

Skarbez, R., Smith, M., Sadagic, A., & Whitton, M. C. (2022). Presence and beyond: Evaluating user experience in AR/MR/VR. *Frontiers in Virtual Reality*, 3, 983694. https://doi.org/10.3389/frvir.2022.983694

Stipancic, T., Koren, L., Rosenberg, D., Harwood, T., & Benic, J. (2024, June). PLEA: The Embodied Virtual Being. In *International Conference on Human-Computer Interaction* (pp. 266-275). Cham: Springer Nature Switzerland.

Sung, E. C., Bae, S., Han, D. I. D., & Kwon, O. (2021). Consumer engagement via interactive artificial intelligence and mixed reality. *International journal of information management, 60*, 102382. https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2021.102382

Tang, Y. M., Kuo, W. T., & Lee, C. K. M. (2023). Real-time Mixed Reality (MR) and Artificial Intelligence (AI) object recognition integration for digital twin in Industry 4.0. *Internet of Things*, 23, 100753. https://doi.org/10.1016/j.iot.2023.100753

Wang, Y., Tian, Y., Liu, F., Zhou, H., & Zhang, Y. (2024). Mixed reality prototyping for usability evaluation in product design: a case study of a handheld printer. *Virtual Reality, 28*(1), 6. https://doi.org/10.1007/s10055-023-00895-9

Wen, Z., Li, P., Wang, X., Huang, W., Liang, L., Zhou, Y., & Wei, C. (2022). A review of mixed reality-based visual analytics. Journal of Computer-Aided Design and Graphics, 34(06), 821–829.

Xu, J., Papangelis, K., Tigwell, G. W., Lalone, N., Zhou, P., Saker, M., Chamberlain, A., Dunham, J., Luna, S. M., & Schwartz, D. (2024, May). Spatial Computing: Defining the Vision for the Future. In *Extended Abstracts of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 1-4).

Xu, S., Wei, Y., Zheng, P., Zhang, J., & Yu, C. (2024). LLM enabled generative collaborative design in a mixed reality environment. *Journal of Manufacturing Systems, 74*, 703-715. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2024.04.030

Yannier, N., Hudson, S. E., & Koedinger, K. R. (2020). Active learning is about more than hands-on: A mixed-reality AI system to support STEM education. *International Journal of Artificial Intelligence in Education, 30*, 74-96. https://doi.org/10.1007/s40593-020-00194-3

Yannier, N., Hudson, S. E., Chang, H., & Koedinger, K. R. (2024). AI adaptivity in a mixed-reality system improves learning. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 1-18. https://doi.org/10.1007/s40593-023-00388-5

Zaina, L., Prates, R. O., Delabrida Silva, S. E., Choma, J., Valentim, N. M. C., Frigo, L. B., & Bicho, A. D. L. (2024, October). GranDIHC-BR 2025-2035-GC7: Interaction with Emerging Technologies: An Ecosystem Integrating Humans Technologies and Contexts. In *Proceedings of the XXIII Brazilian Symposium on Human Factors in Computing Systems* (pp. 1-21).

Zhang, Y., & Huang, X. (2024). Integrating Extended Reality (XR) in Architectural Design Education: A Systematic Review and Case Study at Southeast University (China). Buildings, 14(12), 3954. https://doi.org/10.3390/buildings14123954

Zhu, Y., Wang, W., & Jiao, H. (2023, August). Research on Information Fusion Interface of Human-Computer Interaction based on Mixed Reality Technology. In *2023 4th International Conference on Intelligent Computing and Human-Computer Interaction (ICHCI)* (pp. 18-27). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICHCI58871.2023.10277828

2025 MSTAS

OTURUM II

MEVZUATA UYUM VE DENETİM

MSTAS 2025 MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Mimari Tasarımda Koruma Amaçlı İmar Planları Hükümlerine Uygunluğun Dijital Modellerle Denetlenebilirliği

Kadir Emre Bakır[1]; Sevim Ateş Can[2]; İbrahim Bakır[3]
[1]Antalya Bilim Üniversitesi & Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi; [2]Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi;
[3]Akdeniz Üniversitesi
[1]kadir.bakir@antalya.edu.tr; [2]sevimates@mehmetakif.edu.tr; [3]ibakir@akdeniz.edu.tr

Özet

Mimari tasarım sürecinde koruma amaçlı imar planı hükümlerine uyumun sağlanması hem kısıtlayıcı hem de belirleyici bir etkendir. Dolayısıyla tasarımın erken aşamalarından itibaren koruma amaçlı imar planı uygulama hükümlerine uygunluğun kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu süreç, elle yapılan kontrollere dayanmakta, zaman ve çaba istemektedir. Hata riskini arttıran bu tarz kontrol yöntemleri yerine dijital modellerin denetlenmesi, kontrol sürecini daha verimli hale getirebilecek ve hata payını azaltabilecektir. Kontrol sürecinin otomatik hale getirilmesi için yönetmeliklere uygunluk kontrol (ACCC- Automated Code Compliance Check) yazılım araçları geliştirilmiştir. Bu araçlar çoğunlukla IFC modellerinin kısıtlara uygunluğunun kontrol edilmesine dayanmaktadır. Ülkemizde IFC modellerinin kontrollerine dayalı, Planlı Alanlar İmar Yönetmeliği için geliştirilmiş web tabanlı araç ile Plansız Alanlar İmar Yönetmeliği'nin hükümlerine uyumun denetlenebileceği bir model önerisi bulunmaktadır. Ancak dijital modellerin orijinal dosya formatından IFC modellerine çevrilmesi, kurallara uyumlu olmayan model elemanlarının tespiti veya modelde değişiklik yapılması gerektiğinde tasarımcıları modelleme aracına geri dönmeye zorlamaktadır. Bu gerekli değişiklikler, modelleme aracıyla kontrol aracının bağlantısız olması nedeniyle doğrudan yapılamamaktadır.

Literatürde Revit eklentilerinin kullanımları; duvarların yangın dayanımının kontrolü, kapıların erişim şartlarını sağlayıp sağlamadığının test edilmesi ve enerji etkin tasarım koşullarının yerine getirilip getirilmediğinin denetlenmesi olarak örneklenmektedir. Çalışma, Revit platformunda oluşturulan dijital modellerin koruma amaçlı imar planları hükümlerine uygunluğunun geliştirilen Revit eklentisiyle kontrolünü ele almaktadır. Revit eklentisi C# programlama dilinde Revit API kullanılarak Visual Studio ortamında oluşturulmuştur. Mimari modellerin geometrik olan ve geometrik olmayan verilerinin koruma amaçlı imar planı uygulama hükümlerinin yeni yapıya dair maddelerine uygunluğu denetlenmektedir. Plan hükümlerinin karmaşıklığı ve belirsizliği bu hükümlerin makine diline çevrilmesi sürecinde problemlere neden olmaktadır. Kesinlik içermeyen ve ihtimale dayalı hükümler çalışma kapsamı dışında tutulurken dijital model elemanlarının hesaplanabilir ve kıyaslanabilir özelliklerine odaklanan hükümler çalışmada değerlendirmeye alınmıştır. Geliştirilen Revit eklentisi Elmalı (Antalya) Koruma Amaçlı İmar Planı Uygulama Hükümleri'nin yeni yapılaşmaya ilişkin hükümler başlığında yer alan maddeleri üzerinde test edilmiştir. Test sonuçları, geliştirilen Revit eklentisinin kısıtlara uygunluk sürecini iyileştirdiğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: *Koruma Amaçlı İmar Planı Uygulama Hükümleri, Revit API, C# Programlama Dili.*

Auditability of Digital Models for Compliance with Conservation Plan Implementation Provisions in Architectural Design

Kadir Emre Bakır [1]; Sevim Ateş Can[2]; İbrahim Bakır[3]
[1]Antalya Bilim University, Burdur Mehmet Akif Ersoy University; [2]Burdur Mehmet Akif Ersoy University; [3]Akdeniz University
[1]kadir.bakir@antalya.edu.tr; [2]sevimates@mehmetakif.edu.tr; [3]ibakir@akdeniz.edu.tr

Abstract

Ensuring compliance with the provisions of the relevant conservation-oriented plan is both restrictive and a decisive factor in the architectural design process. Therefore, it is essential to check compliance with the implementation provisions of the conservation plan from the early stages of the design process. This process is carried out manually and requires a considerable amount of time and effort. Instead of such methods that increase the risk of errors, auditing digital models may streamline the process and reduce the margin of error. To automate control processes, different automated code compliance software tools were developed. These software tools are mostly based on checking conformance of IFC models with restrictions. In Turkey, there are automated code compliance checking tools based on IFC models such as a web-based code compliance checking tool for Planned Areas Zoning Regulations and the proposed model control approach for Unplanned Areas Zoning Regulation. However, the conversion of the digital model from the native file format of modelling tools to IFC models compels designers to go back to the modelling tools when alterations are needed, or non-conforming model elements are detected. These necessary alterations cannot be made directly due to the disconnection between the modelling tools and the automated code compliance checking tools. An embedded code compliance checking tool for Autodesk Revit is proposed to solve this problem.

In the literature, the Revit Add-Ins have been used for checking the compliance of fire walls with specific conditions, verifying whether doors conform to accessibility rules, and evaluating energy efficient design requirements. The study focuses on the development of a Revit Add-In to check whether the digital models created in the Revit platform comply with the provisions of the conservation plans. The Revit Add-In was developed using the Revit API and C# in Visual Studio. The geometrical and non-geometrical data of elements in architectural models are audited within the scope of the articles on "new buildings" in the implementation provisions of conservation-oriented plans. The complexity and ambiguity of these articles cause problems when converting them into machine-readable formats. Whereas the provisions that imply probability and uncertainty are excluded, the provisions that focus on calculable and comparable features of digital model elements are evaluated. The developed Revit Add-In has been tested for the provisions on new buildings in the conservation-oriented plan implementation in Elmalı (Antalya). The test results show that the developed Revit Add-In improves the code compliance checking process.

Keywords: *Implementation Provisions of Conservation-Oriented Plan, Revit API, C# Programming Language.*

1. Giriş

Koruma kavramı Keleş (1980) tarafından; kentlerin belirli bölgelerinde yer alan, tarihsel bağlamı ve mimari değeri yüksek yapıtların, anıtların ve doğal güzelliklerin kentin günümüz sakinlerince gelecek kuşaklar için güvence altına alınması olarak tanımlamaktadır. Benzer şekilde Hasol (2002) da koruma kavramını; tarih ya da sanat değeri taşıyan yapıların, doğal değerlerin, kent parçalarının yaşamlarına devam edebilmesi için onarım ve bakımları için gerekli önlemlerin alınması olarak ifade etmektedir. Bu anlamlarının arka planında, toplumun yaşadığı yapılı çevre ile bağ kurabilmesi, geçmişin anlaşılması, ortak değerlerin üretilmesi hatta başkalarınca ortaya konmuş eserlere saygının uygarlığın bir gereği olduğu belirtilmektedir (Tapan, 2014).

İmar planı, kent halkının sağlığının korunması; toplumsal, ekonomik, sosyal gereksinimlerinin karşılanması amacıyla kentsel işlevleri ve toprak kullanımını gösteren hukuki belge olarak tanımlanmaktadır (Keleş, 1980). Ülkemizde 1973 yılında çıkarılan 1710 sayılı Eski Eser Kanunu ile yapıların tekil olarak korunması yerine sit kavramıyla bölgesel korumanın önü açılmıştır. Koruma amaçlı imar planı kavramı da 1983 yılında ortaya konan 2863 sayılı Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Kanunu'nda yer almıştır. Bu kanuna göre koruma amaçlı imar planı, sit alanları ve bu alanların etkileşim-geçiş sahası dahilinde koruma esaslarını ve kullanma koşulları ile yapılaşma sınırlarını açıklayan plan tutumları, plan notları ve açıklama raporlarını içermektedir (Kültür ve tabiat varlıklarını koruma kanunu, 1983; Madran & Özgönül, 2005).

Mimari tasarım sürecinde kentsel planlama koşulları oldukça belirleyici olmaktadır. Bu koşullar; bina taban alanı, inşaat alanı ile ilgili kısıtlamalar, cephe çizgileri ve yapı alanının sınırlarına dair düzenlemeler, kat sayıları, çatı tipi ve yapım yöntemleriyle ilişkili şartnameler, diğer yapılara ve mülk sınırlarına olan mesafeler, ağaçların korunması vb. olarak örneklenebilmektedir. Tasarım sürecinin henüz başında kentsel planlama koşullarıyla uyumlu bir tasarımın ortaya konması, tasarımın uygulanabilirlik düzeyine önemli katkı sağlamaktadır (Bielefeld & Khouli, 2019). Öyle ki Sırmalı (1975) yasal kısıtların tasarımla ilgili herhangi bir çalışmadan önce araştırılmasının gerekliliğini vurgulamakta ve yapılacak bu ön çalışmayı mimari tasarım sürecinin birinci adımının bir parçası olarak ifade etmektedir. Tarihi çevrede yer alan geleneksel yapıların tamamının incelenmesiyle birlikte alanda yeni yapı tasarımına dair fikirler ortaya konulabilmektedir. Bu fikirler dokuya uyumlu yapıların tasarlanması için koruma amaçlı imar plan hükümlerinde yer alabilmektedir (Madran & Özgönül, 2005).

Farklı alanlara dair koruma amaçlı imar planları hükümleri incelendiğinde; genel hükümler başlığı altında amaç, kapsam, onama gibi başlıklar bulunmaktadır. Yapılaşma koşulları ana başlığı, plan onama sınırları içinde yer alan yapıların niteliklerine göre tescilli yapılar (anıtsal veya sivil), geleneksel yapılar, mevcut yapılar, yeni yapılar olarak ayrılabilmektedir. Bu sınıflama, tarihi değeri bulunan yapılara müdahale, tamirat-tadilat derecelerini belirleyebilmektedir. Alanda yer alan yapılara müdahale sürecinde rölöve, restitüsyon, restorasyon gibi belgeleme çalışmaları ile ilgili yönlendirmeler ve bu süreçte sorumlu kurum ve kuruluşlar da koruma amaçlı imar planı hükümlerinde yer almaktadır. Yapılarla ilgili kısıtlamaların yanında alana dair parsel bazında özel kararlar, ulaşım, altyapı, varsa eğer özel proje alanları, korunacak ağaçlar gibi alt başlıklar da koruma amaçlı imar planları hükümlerinde ele alınabilmektedir (Modül Planlama, 2009; Madran vd., 2010; Yörük, 2021). Mimari tasarım bu hükümler doğrultusunda oluşturulmakta ve geliştirilmektedir.

Mimari tasarım sürecinde oluşturulan dijital modeller, geometrik ve geometrik olmayan veriler içermektedir. Bu modellerde yapı elemanları biçimsel olarak farklı geometrilerle (katı hacimler, yüzeyler, kenarlar, noktalar, düzlemler vb.) temsil edilmektedir. Geometrik olmayan veri ise metin, sayısal değer, doğru ya da yanlış olarak değer alabilen veriler olarak örneklenebilmektedir. Bu iki veri türünün birlikteliği sayesinde bir yapı elemanı, geometrinin yanında maliyet, malzeme, yangın dayanım sınıfı vb. ile de temsil edilmektedir. Yapı elemanlarının geometrik olan verileri genellikle farklı türde çizimlerin üretilmesi için kullanılırken; geometrik olmayan verilerle de liste halinde düzenlenen mahal listeleri, metraj-keşif listeleri oluşturulabilmekte, ısıl performans gibi farklı analizler gerçekleştirilebilmektedir (Lévy, 2011).

1.1. Yasal Kısıtların Dijital Modellerle Denetlenmesi

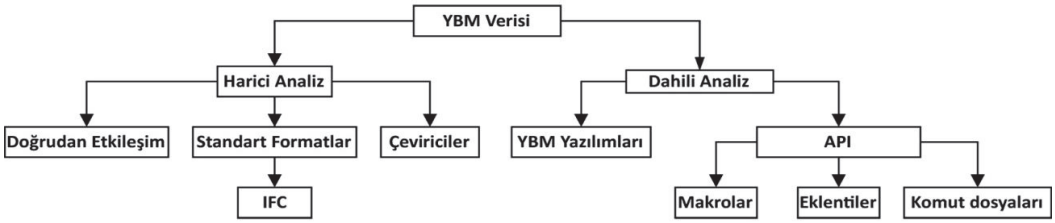
Yapım sektörünü düzenleyen plan hükümleri, yönetmelikler gibi kurallar meslek insanları tarafından meslek insanlarının uygulaması için oluşturulmaktadır. Bu kurallar yazılı metinler, tablolar, formüller şeklinde olabilmektedir. Dijital modellerin kurallara uygunluğunun bilgisayar sistemlerince otomatik olarak değerlendirilmesi amaçlansa da "insan beyninin bilişsel ve analitik yeteneklerinin dijital sistemlerden farklı olması" bu noktada karşılaşılan temel sorunlardan biri olarak ifade edilmektedir. Meslek insanlarınca oluşturulan yönetmeliklerin, yasal kısıtların bilgisayar diline çevrilmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Bu adım kuralların dijital modellerle denetlenmesi için ilk adım olarak görülmektedir. İkinci adım, kuralların denetlenebileceği yapı bilgi modellerinin oluşturulması; üçüncü adım oluşturulan modeller üzerinde denemelerin, testlerin yapılması ve son adım ise denetleme sonucunun raporlanmasıdır (Nawari, 2018). **Şekil 1**'de dijital modellerin kurallara uygunluğunun denetlenme basamakları verilmiştir.

Şekil 1: Dijital modellerin kurallara uygunluğunun denetlenme basamakları (Nawari, 2018)

Denetlenecek kuralların kesin hüküm içermemesi, yoruma açık olabilmesi denetleme sürecinde karşılaşılan diğer bir sorun olarak gösterilmektedir. Sayısal değer içermeyen kuralların denetlenmesinin zorluğu, kurallarda çelişen maddelerin bulunabilmesi gibi hususlar bu sorunun uzantısı olarak ifade edilmektedir. Kuralların çevrimini yapacak olan kişinin, bilgisayar programcısının yorumunun denetleme süreci üzerinde etkisi olacağı yorumu yapılabilmektedir (Luka vd., 2022). Kuralların hangi şartlarda veya hangi bağlamda uygulanacağı, hangi özellikler üzerinde bu kuralların denetleneceği soruları kuralların çevrilmesinde yol gösterici olmaktadır. Örneğin yangın kaçış yolunun tespiti, kuralın hangi bağlamda uygulanacağı sorusunun cevabı olurken bu yolun genişliğinin kontrol edilmesi, kuralda belirlenen asgari şartlara uygun olup olmadığının denetlenmesi de yangın kaçış yolunun özelliğinin sorgulanması şeklinde ele alınabilir. Kuralın yüklem mantığı açısından doğru, yanlış, bilinmeyen olarak sınıflandırılabilmesi gerekmektedir (Eastman vd., 2009).

Kuralların denetlenmesi için dijital modelin doğru bir şekilde yapılandırılmış olması da oldukça önemlidir. Örneğin modelde yer alan merdiven doğrudan merdiven elemanı olarak değil de döşeme elemanları kullanılarak oluşturulmuşsa bu merdivenin rıht yüksekliği, basamak genişliği gibi bazı özelliklerine erişmek mümkün olmayacaktır. Dolayısıyla bu merdiven elemanının kurallara uygunluğu denetlenemeyecektir. Benzer şekilde model elemanlarına eklenen parametrelerin de doğru türde olması ve doğru veriyi içermesi gerekmektedir (Eastman vd., 2009).

Kural tabanlı değerlendirme araçları: tasarım aracına bağlı eklenti (plug-in), bağımsız yazılım ya da web tabanlı uygulamalar olabilmektedir. Eklenti araçlar kurallara uygunluğu gerçek zamanlı kontrol edebilirken diğer araçlar dijital modellerin farklı formatlara çevrilmesini gerektirmektedir. Yapı bilgi modelleri IFC (Industry Foundation Classes) ortak dosya formatına dönüştürülebilmekte, bu dosya türünün içermiş olduğu model elemanlarının kurallara uygun olup olmadığı denetlenebilmektedir. Bu süreç harici araçlarla yapı bilgi modelinin verilerinin işlenmesi olarak ifade edilmektedir. Kural tabanlı değerlendirme araçları eklenti olarak geliştirilecek ise tasarım araçlarına ait uygulama programlama arayüzü (API) kullanımına ihtiyaç duyulmaktadır. Geliştirilen eklentiler tasarım aracına bağlı olarak çalıştığından bu süreç dahili araçlarla model verilerinin analizi grubuna dahil olmaktadır (Ignatova, Zotkin, Zotkina, 2018). **Şekil 2**'de yapı bilgi modelinin içerdiği verilerin dahili ve harici analizler için geliştirilebilecek araçlar gösterilmiştir.



Şekil 2: Yapı bilgi modelinin içerdiği verilerin dahili ve harici analizler için geliştirilebilecek araçlar (Ignatova vd.,2018)

Dijital modellerin kurallara uygunluğunun temeli 1966 yılında S. J. Fenves tarafından atılmıştır. Bu tablolarda "eğer-ise" (if-then) yapısı kullanılarak Amerikan Çelik Konstrüksiyon Enstitüsü Şartnamesi'nin birbiriyle ilişkili karar tabloları

oluşturulmuştur (Fenves S. J. 1966'dan aktaran Aydın, 2022) . 1985 yılında Lopez vd. Fenves'in çalışmalarıyla birlikte Bilgisayar Destekli Tasarım için Standart Arayüzü (Standarts Interface for Computer Aided Design, SICAD); 1987 yılında ise yapı yönetmelikleri için Fenves vd. tarafından Standart, Analiz, Sentez ve İfade (Standarts, Analysis, Synthesis and Expression - SASE) adında biçimsel dil ortaya konmuştur (U.S. Commerce Department National Institute of Standards and Technology, 1985, 1987).

1990'lı yıllarda farklı YBM platformlarından sağlanan model verilerinin IFC ortak dosya formatına çevrilerek model verilerinin kurallara uygunluğunun denetlenmesinin önü açılmıştır. Singapur Ulusal Kalkınma Bakanlığı tarafından ortaya konan İnşaat ve Emlak Ağı (Construction and Real Estate Network, CORENET), kurallara uygunluğun denetlenmesinin de amaçlandığı IFC tabanlı bir veri sistemidir. Bu sistem, geliştirilen Solibri Model Checker yazılımına öncülük etmiştir. Solibri Model Checker yazılımı ön tanımlı kural setleri kullanarak IFC model dosyalarını denetleyebilmektedir. Kullanıcıların da kural oluşturabilmesine izin veren Solibri Model Checker yazılımı Omniclass, Uniclass, Masterformat, Uniformat gibi farklı sınıflandırma sistemlerini desteklemektedir (Sacks vd., 2018). ABD'de Genel Hizmetler İdaresi (General Services Administration, GSA) tarafından adli yapıların tasarımı için oluşturulan kuralların denetlenmesi sürecinde Solibri Model Checker yazılımından faydalanılmıştır (Eastman vd., 2009). Singapur ve ABD haricindeki ülkeler de dijital modellerin kurallara uygunluğunu denetlemek üzere farklı sistemler geliştirmişlerdir. CORENET sistemine benzer şekilde Norveç'te Statsbygg, Avustralya'da DesignCheck, Kanada'da Bina Kabuk Performans Kontrolü (Automated Code Compliance Building Envelope Performance), Portekiz'de LicA sistemi ortaya konmuştur (Ding vd., 2006; Tan vd., 2010; Haraldsen vd., 2004'ten aktaran Aydın, 2022).

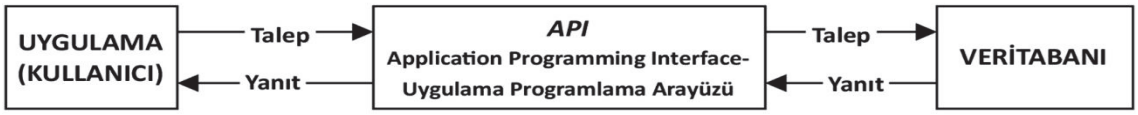
Ülkemizdeki konut projelerinin Planlı Alanlar İmar Yönetmeliği'ne uygunluğunun denetlenmesi için BIMTRAC3 yazılımı ortaya konmuştur. Bu yazılımla YBM modellerinin IFCXML veri standardına dönüştürülmesi ve bu veri standardı üzerinden otomatik yönetmelik kontrolü web tabanlı yapılmakta ve kontrol sonuçları raporlanmaktadır (Aydın, 2022). Plansız Alanlar İmar Yönetmeliği maddelerinin denetlenmesi için Aktaş (2021) tarafından Solibri Model Checker yazılımının ve IFC dosya formatının kullanıldığı öneri geliştirilmiştir. Denetimin sağlanması için kural setleri oluşturulmuştur.

Yapı bilgi modelleme tasarım araçları ile dijital model IFC formatına çevrilebilmekte ve bu IFC modeli kurallara uygunluk için denetlenebilmektedir. Kurallara uygunluğun denetlenmesi sonucunda gerekli koşulları sağlamayan model elemanları üzerinde tasarım değişiklikleri yapılmak istenebilir. Model dosyası IFC dosya formatına aktarılarak denetime tabi tutulduğu için YBM platformuna geri dönüş yapılması gerekmektedir. Denetim raporuna göre tekrar düzenlenmesi gereken elemanlar dijital modelden bulunmalıdır. Değişikliklerin ardından tekrar kontrol yapılmak istenmesi durumunda ise güncel IFC modelinin oluşturulmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yöntemle dijital modelin gerçek zamanlı kontrolü sağlanamamaktadır. Çözüm olarak bu çalışma kapsamında; Autodesk Revit YBM platformu kullanılarak oluşturulan dijital modellerin platform dışına aktarılmadan koruma amaçlı imar planı kısıtlarına uygunluğunun gerçek zamanlı kontrolünün yapılması amaçlanmıştır.

2. Revit API (Application Programming Interface- Uygulama Programlama Arayüzü) ile Revit Eklentisi Geliştirme

Uygulama programlama arayüzü (Application programming interface, API) yazılım uygulamalarının birbirleriyle veri, özellik ve fonksiyon alışverişi için kullandıkları birtakım protokoller ve kurallar olarak tanımlanabilmektedir (Goodwin, 2025). Söz konusu arayüz iki taraf (kullanıcı ve yazılım uygulamaları) arasındaki iletişimi kontrol eder ve tarifler. API kullanımı çerçevesinde kullanıcı, belirlenmiş protokol ve kuralları kullanarak veri sorgulaması yapabilir, eğer kullanıcıya izin verilmişse kullanıcı bu kuralları kullanarak yazılıma yeni bir fonksiyon ekleyebilir. Örneğin, meteoroloji kurumunun yazılım sistemi günlük hava durumu verilerini içermektedir. Kullanıcıların telefonlarında yer alan hava durumu uygulaması, API aracılığıyla sistemden veri çeker ve günlük hava durumu güncellemelerini kullanıcıya gösterilebilir

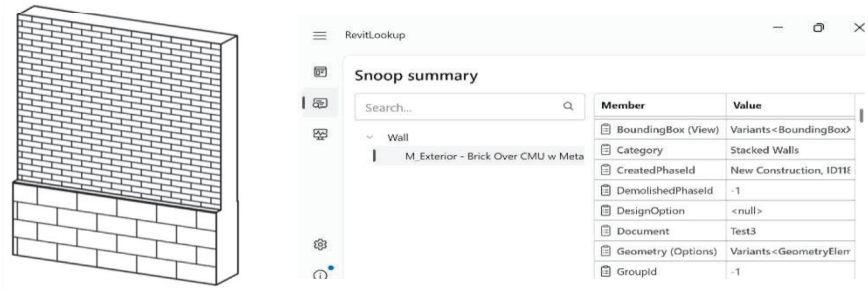
(*What is an API? - application programming interface explained - AWS,* n.d.) . **Şekil 3**'te kullanıcı/uygulama ve yazılım arasında iletişim görevi üstlenen API ve bu iletişim sürecinin akışı verilmiştir.



Şekil 3: Kullanıcı/uygulama ve yazılım arasında iletişim görevi üstlenen API ve bu iletişim sürecinin akışı (Borisova, 2023)

Revit API farklı Visual Basic.NET, C#, C++/CLI gibi programlama dillerini desteklemektedir. Bu programlama dillerinde programcılar Revit için eklentiler geliştirebilmektedir (Autodesk Revit 2024 Help, n.d.a). Revit API kullanımı ile yapılabilecekler; tekrar eden işlemlerin otomatik hale getirilmesi için eklenti veya makro oluşturma, proje tasarım standartlarının hatalar için otomatik kontrolü, analizler için model verilerinin elde edilmesi ve raporlanması, modelde oluşturulacak yeni elemanların parametre verilerinin dışarıdan alınarak otomatik olarak oluşturulması, Revit ile farklı analiz yazılımlarının entegrasyonu, model dokümantasyonunun otomatik oluşturulması olarak ifade edilmektedir (Autodesk Revit 2024 Help, n.d.b).

Autodesk Revit yazılımına ait yazılım geliştirme kiti (Software Development Kit, SDK) Revit API kullanımı için dokümantasyonu içermektedir. Revit SDK bünyesinde yer alan RevitAPI.chm dosyası, Revit API kapsamında yer alan adlarını barındırmaktadır. Revit SDK yerine çevrimiçi Revit API dokümanı da kullanılabilmektedir. Ayrıca Revit yazılımının kurulum dosyasında yer alan RevitAPI.dll ve RevitAPIUI.dll dosyalarının da Microsoft Visual Studio ortamında açılmasıyla da Revit API dokümanlarına erişilebilmektedir (Revit API Docs, n.d.; Revit APIs, n.d.). Bu dokümanlarda farklı alan adları yer almakta, bu alan adları altında farklı metotlar ve özellikler bulunmaktadır. Yazılım geliştirme sürecini kolaylaştırması için Revit Lookup ve Revit Add-In Manager gibi eklentilerden destek alınabilmektedir. Revit Lookup eklentisi Revit ortamında aktif dokümanın ve birçok model elemanının özelliklerini, parametrelerini gösterebilmekte, bu sayede Revit API ile bu model elemanına nasıl erişilebileceği ile ilgili fikir elde edilebilmektedir. Örneğin bir duvar elemanının alan, hacim, ait olduğu kot vb. parametreleri elde edilebilir, bu parametre değerleri farklı analizler için kullanılabilir. Ayrıca duvar elemanını oluşturan nokta, kenar, yüzey ve katı geometriye ulaşılabilir, bu geometrik elemanlarla işlemler yapılabilir (Tammik, n.d.) . **Şekil 4**'te Revit'te yer alan örnek bir duvar elemanı ve bu elemana ait özelliklerin görülebildiği Revit Lookup arayüzü verilmiştir.



Şekil 4: Revit'te yer alan örnek bir duvar elemanı ve bu elemana ait özelliklerin görülebildiği Revit Lookup arayüzü (Tammik, n.d.)

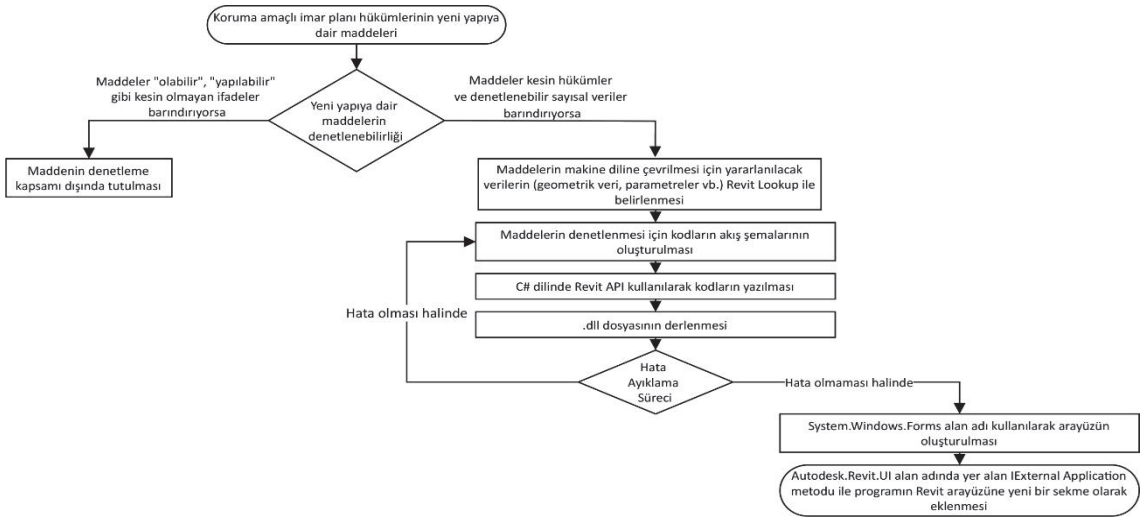
Farklı C# sınıfları halinde oluşturulabilen kodun Revit ortamına aktarılması için.dll (dinamik-link kütüphane dosyası, dynamic-link library) dosyasının derlenmesi gerekmektedir. Ardından, diğer bir eklenti olan Revit Add-In Manager ile bu .dll dosyalarında yer alan dış komutlar (IExternalCommand) Revit ortamında çalıştırılabilmektedir. Bu sayede komutların çalışıp çalışmadığı denenebilir, deneme sürecinde hata oluşması durumunda ise Visual Studio'nun hata ayıklama fonksiyonu kullanılarak çözümler getirilebilir (Chuongmep, n.d.; Pellegrino, vd., 2021). Hataların giderilmesinin ardından System.Windows.Forms alan adı kullanılarak temel arayüz oluşturulabilir. Bu arayüzde bilgilendirme metinleri, açılabilir listeler, butonlar, seçenek butonları gibi elemanlar yer alabilir. Son aşama olarak da testleri tamamlanan komutlar eklenti (IExternalApplication) haline getirilip Revit'in arayüzüne yeni bir sekme olarak eklenebilir (Autodesk Revit 2024 Help, n.d.c; Dotnet-Bot, n.d.).

3. Geliştirilen Revit Eklentisi ile Koruma Amaçlı İmar Planı Hükümlerinin Yeni Yapıya Dair Maddelerinin Denetlenmesi

Koruma amaçlı imar planları hükümlerinin yeni yapıya dair maddelerinin denetlenmesi sürecinde başlangıç olarak hangi maddelerin kesin hüküm taşıdığı ve denetlenebilir olduğu tespiti yapılmıştır. Sayısal hükümler belirten maddeler, kesin ve denetlenebilir oldukları için çalışma kapsamında tutulmuştur. Ancak bazı maddelerde 'olabilir', 'yapılabilir' gibi ifadeler yer almaktadır. Bu ifadeler kesin bir hüküm içermediği, veri karşılaştırmasına uygun olmadığı için çalışma kapsamı dışında tutulmuştur.

Denetlenecek maddelerin seçilmesinin ardından plan hükümlerinin yorumlanması ve makine diline çevrilmesi süreci yürütülmüştür. Bu süreçte temel olarak; hükümlerin hangi model elemanları ile ilişkili olduğu ve bu model elemanlarının hangi verilerinin denetleme için kullanılabileceği ortaya çıkarılmıştır. Model elemanlarının geometrik verilerinin yanında, doğrudan geometriye bağlı parametreler (genişlik, yükseklik vb.) de denetleme sürecinin parçası olarak ele alınmıştır. Veri ve parametrelerin tespitinde Revit Lookup eklentisi kullanılmıştır (Tammik, n.d). Denetleme süreci için kullanılacak veri ve parametrelerin tespitinin ardından C# dilinde yazılacak kodların akış şemaları oluşturulmuştur. Bu akış şemalarına göre kodlar oluşturulmuş ve .dll dosyası derlenmiştir. Kodların işlevlerini yerine getirip getirmediği Revit Add-In Manager aracılığıyla doğrudan Revit arayüzünde kontrol edilmiştir. İşlevlerinde sorun yaşanan komutlar hata ayıklama süreci ile aşama aşama test edilmiş, herhangi bir şekilde çıktı vermeyen veya yanlış çıktı veren kod parçacıkları düzeltilmiş ve tekrar sınanmıştır (Chuongmep, n.d).

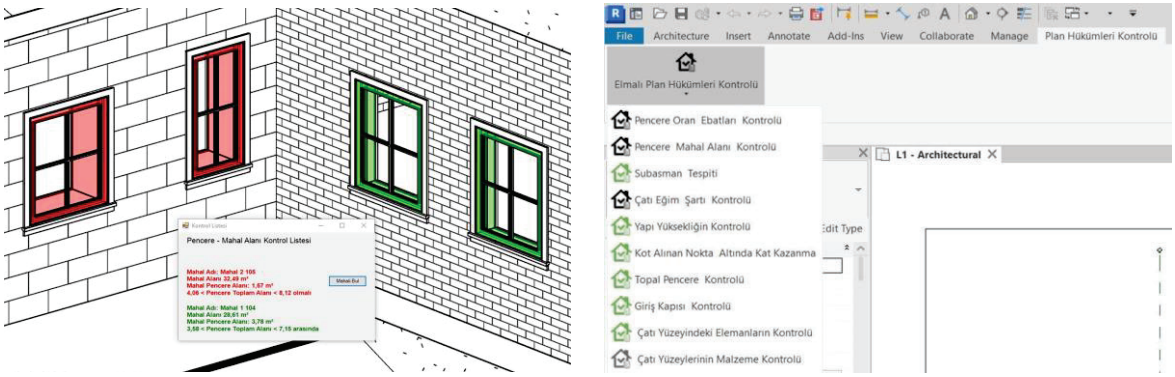
Kodların hata ayıklama sürecinin ardından komutların Revit arayüzünde görüntülenebilmesi için pencereler oluşturulmuştur. System.Windows.Forms alan adı kullanılarak oluşturulan pencerelere bilgi satırları, açılabilir menüler, seçim düğmeleri, metin kutuları eklenerek kullanıcının yönlendirilmesi sağlanmıştır. Bu arayüz, denetlenen koruma amaçlı imar planı hükümlerinde şartları sağlamayan elemanlar için kırmızı yazılarla görüntülenen bilgi satırlarını; ilgili elemanların bulunabilmesi için eleman ID numaralarını, ait olduğu Revit kategori ve aile (family) bilgilerini içermektedir. Ayrıca bu satırların hemen yanlarına konulan butonlar da 3B görünümünden elemanların bulunması, elemana yaklaşılması ve elemanın seçilmesi işlevlerini yerine getirmektedir (Dotnet-Bot, n.d). Revit eklentisinin geliştirilmesi sürecinin ana adımları **Şekil 5**'te verilmiştir.



Şekil 5: Revit eklentisinin geliştirilmesi sürecinin ana adımları

Elmalı (Antalya) Koruma Amaçlı İmar Planı Uygulama Hükümleri'nde yer alan, 2.4.- Yeni Yapılaşmaya İlişkin Hükümler başlığında; mahallerin alanları ile bu mahallerde yer alan pencerelerin alanları oranlarının 1/8 - 1/4 arasında olması gerektiği ifade edilmiştir. Bu maddenin denetlenebilmesi için tüm mahaller ve bu mahallere ait pencereler toplanmış, ilgili parametre değerleri (genişlik, yükseklik, alan vb.) elde edilmiştir. Ardından toplam pencere alanları ait oldukları mahallerin alanlarıyla kıyaslanarak belirlenen sınırlar arasında kalıp kalmadığı tespit edilmiştir. Aynı plan hükümlerinde yer alan, çatı yüzeyinde bacalardan başka çıkan elemanların olamayacağı, güneş kollektörleri gibi elemanların çatıdan bağımsız yükseklik oluşturamayacağı maddesinin denetlenmesi için çatı geometrileri toplanmış ve toplanan çatı

geometrilerini temel alan yardımcı geometriler oluşturulmuştur. Çatı en üst yüzeylerinden belirlenen değerde yüksekliğe sahip yardımcı geometrinin 3B elemanlarla kesişim oranı hesaplanmıştır. Revit kategorisi olarak çatıların farklı kotlarda yer alabileceği düşünüldüğünde hataların en aza indirilebilmesi için kullanıcıdan çatıları seçmesi istenmiştir (Modül Planlama, 2009; OpenAI, 2024). Pencere-mahal alanı kontrolünün ve çatıdan bağımsız yükseklik oluşturan elemanların kontrolünün sağlandığı dış komutlar .addin dosyası ile Revit ortamına Plan Hükümleri Kontrolü adıyla yeni bir sekme olarak eklenmiştir (Pellegrino vd., 2021). Bu sayede komutların doğrudan Revit arayüzünden çalıştırılabilmesi sağlanmıştır. **Şekil 6**'da Elmalı (Antalya) Koruma Amaçlı İmar Planı Uygulama Hükümleri'nde yer alan, 2.4.- Yeni Yapılaşmaya İlişkin Hükümler başlığında; mahallerin alanları ile bu mahallerde yer alan pencerelerin yüzey alanları oranlarının 1/8 ile 1/4 arasında olması şartının denetlenmesi sonucu vurgulanan elemanların sonuç arayüzü ve dış komutlar için oluşturulmuş plan hükümleri kontrolü sekmesi verilmiştir.



Şekil 6: Mahallerin alanları ile bu mahallerde yer alan pencerelerin yüzey alanları oranlarının denetlenmesi (solda) ve dış komutlar için oluşturulmuş plan hükümleri kontrolü sekmesi (sağda)

4. Sonuçlar

Mimari tasarım sürecinde tasarımın yönetmelikler ve kısıtlamalara uyumunun sağlanması, zaman alan ve çoğunlukla elle yapılan kontrollere dayalı bir süreçtir. Bu kontrol sürecinin dijital modellerle otomatik hale getirilebilmesi sayesinde zaman tasarrufu sağlanabileceği; tasarım esnasında ve tasarım sonrasında onay için yapılan kontrollerde hata payının azaltılabileceği öngörülmektedir. YBM platformlarında üretilmiş olan dijital modellerden elde edilen IFC modelleri yönetmeliklere uygunluk için farklı yazılımlarla denetime tabi tutulabilmektedir. Ancak denetim sonrası modellerde değişiklik, güncelleme yapılması gerekliliği modelin oluşturulduğu YBM platformuna geri dönüşü zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle çalışma kapsamında doğrudan modelleme aracı içinde gerçek zamanlı denetimin yapılması; bu denetim sonucunun doğrudan alınması ve şartları sağlamayan elemanların otomatik olarak bulunması yönteminin benimsendiği Revit eklentisi önerilmektedir. Örnek olarak ele alınan Elmalı (Antalya) Koruma Amaçlı İmar Planı Uygulama Hükümleri, 2.4.- Yeni Yapılaşmaya İlişkin Hükümler başlığındaki bazı kısıtların model elemanlarınca sağlanıp sağlanmadığının kontrol edilmesi; kısıtlara uygun olmayan elemanların geliştirilen arayüz ile bulunabilmesine ve düzeltilebilmesine olanak vermiştir. Her ne kadar denetim sürecinin tamamen otomatikleştirilmesi amaçlanmışsa da analiz sürecinde yanlış model elemanlarının seçilmesinin engellenmesi veya görece daha hassas sonuçlar verebilmesi için kullanıcının veri girişine, model elemanı seçimine ihtiyaç duyulmaktadır. Çalışmayla ortaya konan Revit eklentisi, tasarımın başlangıç aşamasından itibaren koruma amaçlı imar plan hükümleriyle uyumlu olmasını sağlayabilmekte, tasarımcıların verimliliklerini arttırarak iş yüklerini azaltabilmektedir.

KAYNAKLAR

Aktaş, M. I. (2021). *Yapı bilgisi modellemesi ile model kontrolü: Plansız alanlar imar yönetmeliği için bir uygulama önerisi [Model Control With Building Information Modeling: Unplanned an Implementation Proposal for Areas Zoning Regulation]* (Publication Number 31185567) [Master's Thesis, Mimar Sinan Fine Arts University (Turkey)]. ProQuest Dissertations & Theses Global. Turkey. https://www.proquest.com/dissertations-theses/yapı-bilgisi-modellemesi-ile-model-kontrolü/docview/2954643198/se-2?accountid=191726 https://hdl.handle.net/20.500.14124/896

Autodesk Revit 2024 Help. (n.d.a). *Getting Started.* Help | Autodesk. Retrieved April 9, 2025 from https://help.autodesk.com/view/RVT/2024/ENU/?guid=Revit_API_Revit_API_Developers_Guide_Introduction_Getting_Started_html

Autodesk Revit 2024 Help. (n.d.b). *What Can You Do with the Revit Platform API?.* Help | Autodesk. Retrieved April 9, 2025 from https://help.autodesk.com/view/RVT/2024/ENU/?guid=Revit_API_Revit_API_Developers_Guide_Introduction_Getting_Started_Welcome_to_the_Revit_Platform_API_What_Can_You_Do_with_the_Revit_Platform_API_html

Autodesk Revit 2024 Help. (n.d.c). *External Application.* Help | Autodesk. Retrieved April 12, 2025 from https://help.autodesk.com/view/RVT/2024/ENU/?guid=Revit_API_Revit_API_Developers_Guide_Introduction_Add_In_Integration_External_Application_html

Aydın, M. (2022). *Türkiye'deki konut projeleri için BIM tabanlı otomatik bina yönetmelik uygunluk kontrol modeli: BIMTRAC3 [A BIM Based Automated Code Compliance Checking Model for Residential Projects in Turkey: BIMTRAC3]* [Dissertation, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü]. Harman. https://research.ebsco.com/linkprocessor/plink?id=3ba79865-04f7-348e-ac59-ec6a99fc0357

Bielefeld, B., & Khouli, S. E. (2019). *Basics design ideas*. Birkhauser.

Borisova, M. (2023, June 28). What is an API and how to integrate it into your product. LinkedIn. https://www.linkedin.com/pulse/what-api-how-integrate-your-product-maria-yudina

Chuongmep. (n.d.). *CHUONGMEP/RevitAddInManager: Revit Addinmanager Update .NET assemblies without restart revit for developer*. GitHub. Retrieved December 31,2024 from https://github.com/chuongmep/RevitAddInManager

Ding, L., Drogemuller, R., Rosenman, M., Marchant, D., Gero, J. (2006). Automating Code Checking for Building Designs: DesignCheck. In K. Brown, K. Hampson, & P. Brandon (Eds.), *Client Driving Construction: Innovative Moving Ideas into Practice*. Cooperative Research Centre for Construction Innovation.

Dotnet-Bot. (n.d.). *System.Windows.Forms namespace*. Microsoft Learn. Retrieved December 31,2024 from https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet/api/system.windows.forms?view=windowsdesktop-9.0

Eastman, C., Lee, J.-m., Jeong, Y.-s., Lee, J.-k. (2009). Automatic rule-based checking of building designs. *Automation in construction*, *18*(8), 1011-1033.

Goodwin, M. (2024, April 9). What is an API (application programming interface)?. *IBM*. Retrieved April 13, 2025 from https://www.ibm.com/think/topics/api

Hasol, D. (2002). *Ansiklopedik mimarlık sözlüğü* [Encyclopedical dictionary of architecture]. Yapı-Endüstri Merkezi.

Ignatova, E., Zotkin, S., Zotkina, I. (2018). The extraction and processing of BIM data. *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering*, *365*(6). https://doi.org/https://doi.org/10.1088/1757-899X/365/6/062033

Keleş, R. (1980). *Kentbilim terimleri sözlüğü* [Glossary of urbanology terms]. Türk Dil Kurumu Yayınları.

Kültür ve tabiat varlıklarını koruma kanunu. (1983). [Law on the conservation of cultural and natural property]. Retrieved 31.03.2025 from https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=2863&MevzuatTur=1&MevzuatTertip=5

Lévy, F. (2011). *BIM in small-scale sustainable design*. John Wiley & Sons.

Luka, J., Leo, M., Ben, D., Nicole, G., Hank, H. M., Daniel, Y. K. (2022). Automated Code Compliance Checking A computational workflow for verifying model, parameter and regulatory compliance. *Co-creating the Future: Inclusion in and through Design*, KU Leuven Technology Campus Ghent, Belgium.

Madran, E., & Özgönül, N. (2005). *Kültürel ve doğal değerlerin korunması* [Preservation of cultural and natural values]. TMMOB Mimarlar Odası Yayınları, Ankara.

Madran, E., Öztürk, A., Öztürk, B., Darıcı, A. L., Güngördü, E., Yağcı, Ö., Çatak, G., Güral, A., Cırık, K., Tan Durmaz, D., Yaşar, N., Oya, A., Nugay, O., Yıldızlı, U., & Yanmış, A. (2010). Antalya ili Muratpaşa ilçesi Haşim İşcan mahallesi kentsel sit alanı ve çevresi 1/1000 ölçekli koruma amaçlı imar planı plan notları [Provisions of the 1/1000 Scale Conservation-Oriented Development Plan for the Urban Site and Its Surroundings in Haşim İşcan Neighbourhood, Muratpaşa District, Antalya Province], Antalya Büyükşehir Belediyesi KUDEB'ten temin edilmiştir.

Modül Planlama (2009). Elmalı (Antalya) Koruma Amaçlı İmar Planı Uygulama Hükümleri [Provisions of the Conservation-Oriented Plan Implementation in Elmalı (Antalya)], Antalya Büyükşehir Belediyesi KUDEB'ten temin edilmiştir.

Nawari, N. O. (2018). *Building information modeling: Automated code checking and compliance processes*. CRC Press.

Pellegrino, E., Bottiglieri, M. A., Crump, G., Pieper, L. C., Touil, D. (2021). Building a Data Bridge between BIM Models and Web-Based Dashboards. In *Managing and Visualizing Your BIM Data: Understand the fundamentals of computer science for data visualization using Autodesk Dynamo, Revit, and Microsoft Power BI*. Packt Publishing Ltd.

Revit API Docs. (n.d.). Retrieved April 9, 2025 from https://www.revitapidocs.com/

Revit APIs. (n.d.). Retrieved April 9, 2025 from https://aps.autodesk.com/developer/overview/revit

Revit 2024 SDK (n.d.). Retrieved April 10, 2025 from https://autodesk-adn-transfer.s3.us-west-2.amazonaws.com/ADN+Extranet/Revit/REVIT_2024_SDK.msi

OpenAI. (2024). *ChatGPT-4o*. https://chatgpt.com/?model=gpt-4o

Sacks, R., Eastman, C., Lee, G., Teicholz, P. (2018). *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, designers, engineers, contractors, and facility managers*. John Wiley & Sons.

Sırmalı, F. (1975). *Adım adım mimarlık* [Architecture step-by-step]. Birsen Kitabevi Yayınları.

Tan, X., Hammad, A., Fazio, P. (2010). Automated Code Compliance Checking for Building Envelope Design. *Journal of Computing in Civil Engineering - J COMPUT CIVIL ENG*, *24*. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3801(2010)24:2(203)

Tammik, J. (n.d). *Revit Lookup*. GitHub. Retrieved December 31,2024 from https://github.com/jeremytammik/RevitLookup

Tapan, M. (2014). *Koruma sorunlarımız: Mimarlık ve kentleşme* [Our preservation issues: Architecture and urbanization]. Cumhuriyet Kitapları.

U.S. Commerce Department National Institute of Standards and Technology, NIST. (1985). Mapping Principles for the Standards Interface for Computer Aided Design https://www.govinfo.gov/app/details/GOVPUB-C13-dbcc99bf2332a11e563536141196ae67

U.S. Commerce Department National Institute of Standards and Technology, NIST. (1987). Introduction to SASE: Standards Analysis, Synthesis, and Expression https://www.govinfo.gov/app/details/GOVPUB-C13-2ee11e8ce4de1e0fb96ae6e2375b7f03

What is an API? - application programming interface explained - AWS. *Amazon Web Services AWS*. (n.d.). Revrieved April 10, 2025 from https://aws.amazon.com/what-is/api/

Yörük, F. (2021). Kaş (Antalya) Kalkan tarihi kent merkezi kentsel sit alanı ve koruma alanı 1/1000 ve 1/500 ölçekli koruma amaçlı imar planı revizyonu plan hükümleri değişikliği [Amendment to the Provisions of the 1/1000 and 1/500 Scale Revised Conservation-Oriented Development Plan for the Urban Site and Conservation Area in Kalkan Historic City Center, Kaş (Antalya)], Antalya Büyükşehir Belediyesi KUDEB'ten temin edilmiştir.

MSTAS 2025 MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Yapı Ruhsat Süreçlerinde TF-IDF ve SVM Yöntemi ile Emsal Alan Tiplerinin Otomatik Sınıflandırılması

Eymen Çağatay Bilge
İstanbul Ticaret Üniversitesi
eymenbilge@gmail.com

Özet

Mimari proje ruhsat süreçleri, mimarlık ofisleri ve belediyeler için önemli bir iş yükü oluşturmaktadır. Bu süreçler, ilgili yönetmelikler ve farklı belediye prosedürleri nedeniyle oldukça karmaşık olup, özellikle emsal alan hesaplamalarında sıklıkla hatalar meydana gelebilmektedir. Emsal alanına dahil edilmesi veya hariç tutulması gereken alanların doğru bir şekilde belirlenmesi hem belediyeler hem de mimarlar için önemli bir zorluk teşkil etmektedir. Aynı alanların farklı mimarlar tarafından farklı terimlerle ifade edilmesi, süreçleri daha da karmaşık hale getirmektedir. Bu ifade farklılıkları dikkate alınarak geliştirilecek bir otomasyon yazılımının, ilgili alanları doğru bir şekilde tanımlayarak sınıflandırması büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, yapı ruhsat süreçlerinde mimari projeler üzerinde bulunan farklı mahallerin emsal alan tiplerinin otomatik olarak sınıflandırılmasına yönelik bir yöntem geliştirilmiştir. İlk aşamada, Planlı Alanlar İmar Yönetmeliği referans alınarak farklı mahallere ait emsal alan tipi parametreleri belirlenmiş ve 850 örnekten oluşan bir veri seti oluşturulmuştur. Bu veri seti, mimari terminolojide sıkça rastlanan kısaltmalar, yazım hataları gibi farklılıkları içerecek şekilde kasıtlı olarak değiştirilmiş ve zenginleştirilmiştir. Eğitim aşamasında, %80-20 oranında eğitim-test ayrımı yapılmış ve üç farklı özellik çıkarımı (TF-IDF, TF-IDF + SVD, Fasttext) ve üç farklı makine öğrenmesi yöntemi (SVM, Lojistik Regresyon ve Rastgele Orman) değerlendirilmiştir. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda, TF-IDF ve ve SVM algoritmalarının en iyi performansı sergilediği belirlenmiş ve çapraz doğrulama sonucunda modelin test verileri üzerinde %95 doğruluk oranına ulaştığı gözlemlenmiştir. Elde edilen performans metrikleri, modelin farklı yazım ve kısaltmalara karşı dirençli olduğunu ve sınıflandırma hatalarına yol açan belirsizlikleri etkin bir şekilde yönetebildiğini ortaya koymaktadır. Geliştirilen model, BIM ortamında Revit 2025 yazılımına bir eklenti olarak entegre edilmiştir. Entegrasyon sonrasında, model örnek bir mimari proje üzerinde test edilmiş ve ilgili alanların belirlenerek uygun kategorilere otomatik olarak atanabildiği görülmüştür. Bu araştırma, yapı ruhsat süreçlerinde dijitalleşme ve otomasyonun yaygınlaştırılmasına katkıda bulunarak, süreçlerin daha verimli ve hatasız bir şekilde yürütülmesine olanak tanımaktadır. Bu model sayesinde, mimarların tasarım süreçlerine daha fazla odaklanarak daha katma değerli işlere yönelmeleri sağlanabilir. Gelecek çalışmalar, yapı ruhsat süreçlerinin tamamının otomasyonunu sağlayacak kapsamlı sistemlerin geliştirilmesine odaklanabilir.

Anahtar Kelimeler: Yapı ruhsatı, Emsal hesaplama, TF-IDF, SVM, BIM.

2025 MSTAS MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Automatic Classification of Floor Area Types in Building Permit Processes Using TF-IDF and SVM

Eymen Çağatay Bilge
İstanbul Ticaret University
eymenbilge@gmail.com

Abstract

Building permit processes represent a significant workload for architectural offices and municipalities. These processes are highly complex due to relevant regulations and varying municipal procedures, leading to frequent errors, particularly in floor area ratio calculations. The accurate identification of areas to be included or excluded from the total floor area poses a significant challenge for both municipalities and architects. The fact that the same areas are expressed differently by different architects further complicates the processes. Considering these variations, it is crucial for the developed automation software to accurately identify and classify these areas. In this study, a method has been developed for the automatic classification of different space types in architectural projects within building permit processes. In the initial phase, parameters for the floor area types of different spaces were determined based on the Planned Areas Zoning Regulation in Türkiye, and a dataset comprising 850 samples was created. This dataset has been intentionally modified and enriched to include common abbreviations, typos, etc. in architectural terminology. In the training phase, 80-20% training-test separation was made and three different feature extraction (TF-IDF, TF-IDF + SVD, Fasttext) and three different machine learning methods (SVM, Logistic regression, Random Forest) were evaluated. The comparison results indicated that the TF-IDF and SVM algorithms achieved the highest performance, with a cross-validation accuracy of 95% on the test data. The obtained performance metrics demonstrate the model's robustness against heterogeneous text inputs and its effectiveness in managing classification uncertainties. The developed model was integrated as an add-on to Revit 2025 software in BIM environment. After integration, the model was tested on a sample architectural project, and it was found that the relevant areas could be identified with high accuracy and automatically assigned to the appropriate categories. This research contributes to the digitization and automation of building permit processes, enabling more efficient and error-free operations. Through this model, architects can focus more on the design process and engage in more value-added tasks. Future studies may focus on the complete automation of the entire building permit process by developing comprehensive systems.

Keywords: Building permit, FAR calculation, TF-IDF, SVM, BIM.

1. Giriş

Mimari proje ruhsat süreçleri hem mimarlık ofisleri hem de belediyeler açısından önemli bir iş yükü oluşturmaktadır. Her belediye, Planlı Alanlar İmar Yönetmeliği'ni doğrudan uygulayabileceği gibi, bu yönetmeliği temel alarak kendi yönetmeliklerini de geliştirebilmektedir. Mimarlar, mimari ruhsat projelerini hazırlarken ilgili belediyenin talep ettiği formatta çeşitli hesaplamalar ve tablolar oluşturmakta; bu kapsamda emsal hesaplamalarını yapmaktadırlar. Planlı Alanlar İmar Yönetmeliği'nde emsal alanının hesaplanması karmaşık bir yapı sergilemektedir. Örneğin, bazı mahaller tümüyle emsal dışı kabul edilirken, bazı mahaller yalnızca belirli bir oranda (ör. %30) emsal dışı tutulabilmektedir. Buna ek olarak, aynı mahalin farklı mimarlarca farklı adlandırılması standardizasyonu güçleştirmekte ve emsal hesaplamalarında hatalara yol açabilmektedir. Söz konusu mahallerin tür ve isimlerine göre metrekare, bulunduğu yer gibi özel koşullarının değişmesi; bodrum katta veya zemin üstünde bulunması gibi faktörler doğrultusunda da uygulamalar arasında farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Bu durum hem mimarlar hem de belediye personeli açısından takip edilmesi ve öğrenilmesi güç bir süreç oluşturmaktadır. Özellikle meslek hayatının ilk yıllarında, her bir mahalin yönetmelik kapsamındaki durumunun tek tek incelenmesi, mimarlar açısından önemli bir zorluk kaynağı oluşturmaktadır.

Yapay zekâ alanındaki son gelişmeler, mimari proje süreçlerinin verimliliğini artırmaya odaklanan araştırmaların sayısında artışa neden olmuştur. Bu çalışmalar ağırlıklı olarak Yapı Bilgi Modellemesi (Building Information Modeling, BIM) nesne sınıflandırması, Endüstri Temel Sınıfları (Industry Foundation Classes, IFC) bütünlük kontrolü, anlamsal zenginleştirme ve Doğal Dil İşleme (Natural Language Processing, NLP) yöntemlerinin inşaat güvenliği ve mevzuata uygunluk gibi alanlarında kullanımına odaklanmaktadır.

BIM nesne sınıflandırması konusundaki ilk yaklaşımlar, IFC verilerindeki nesne sınıflarını belirlemek ve olası anormallikleri tespit etmek için Destek Vektör Makineleri (Support Vector Machines, SVM) makine öğrenmesi tekniğini kullanmıştır (Koo vd., 2019; Koo & Shin, 2018). Derin öğrenme yöntemlerinin olgunlaşmasıyla birlikte araştırmacılar, BIM elemanlarını daha doğru tanımak ve kategorize etmek üzere iki boyutlu evrişimli sinir ağları (Convolutional Neural Networks, CNN) (Kim vd., 2019) ve çoklu görünüm CNN yaklaşımlarına yönelmiştir (Koo vd., 2021). Söz konusu yöntemler, geometrik derin öğrenme çerçeveleri ve grafik tabanlı modellerle desteklenerek daha da geliştirilmiştir. Örneğin Yu vd. (2021), BIM elemanlarını bir grafik yapısında düğüm olarak ele alarak ilişkisel bilgileri yakalamış ve bu sayede sınıflandırma doğruluğunda belirgin iyileşmeler sağlamıştır. Diğer çalışmalar, verimliliği ve performansı artırmak için sentetik veri kümelerinden (Y. Yu vd., 2022) ve seyrek evrişimsel yöntemlerden (Emunds vd., 2022) yararlanmıştır. Daha yakın dönemli araştırmalar ise nesne sınıflandırması ve IFC bütünlük kontrolünü geliştirmek amacıyla toplu öğrenme tekniklerini (Y. S. Yu vd., 2023) ve geometrik-ilişkisel derin öğrenme yaklaşımlarını (Luo vd., 2023) incelemiştir.

Araştırmacılar, BIM modellerinin anlamsal zenginleştirilmesi yönünde de çalışmalar yapmışlardır. Eksik veya örtük verilerin tamamlanmasına odaklanarak hem tasarım doğrulaması hem de model bütünlüğü açısından önemli faydalar sunan çalışmalar bulunmaktadır. Bloch ve Sacks (2020), eksik bilgileri tanımlamak ve kategorize etmek için yöntemler geliştirerek sonraki otomatik kod kontrolü süreçlerini kolaylaştırmıştır. Bu yaklaşımları takiben Wang vd. (2022, 2024), oda tiplerinin sınıflandırılmasını iyileştirmek ve IFC modellerini ek anlamsal katmanlarla güçlendirmek için grafik sinir ağı tabanlı yöntemler tasarlamıştır. Bu tür yenilikler, yalnızca tasarım doğrulamasına katkıda bulunmakla kalmayıp, aynı zamanda daha güçlü bir model birlikte çalışabilirliği de sağlamaktadır.

NLP alanındaki ilerlemeler, otomatik kural kontrolü ve BIM model sorgulamasını da kolaylaştırmaktadır. Song vd. (2020), bina kodlarının otomatik olarak işlenebilmesi için çift yönlü LSTM-CRF modellerini kullanarak yönetmelik metnini makine tarafından okunabilir kurallara dönüştürmüştür. Nabavi vd. (2023) , uzman olmayan kullanıcıların doğal dil kullanarak BIM modelleriyle etkileşime girmesine imkân sağlayan bir NLP tabanlı sorgulama platformu tanıtmıştır.

İnşaat güvenliği verilerinin işlenmesinde yapay zekâ yöntemleri de sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Baker vd. (2020), kaza raporlarından yaralanma öncüllerini çıkarmak üzere hiyerarşik dikkat ağları ile CNN'leri birlikte kullanmıştır. Benzer şekilde Kumi vd. (2024), XGBoost algoritmasıyla insan önyargısını azaltarak inşaat kazalarını doğru biçimde sınıflandırabilen bir NLP modeli geliştirmiştir.

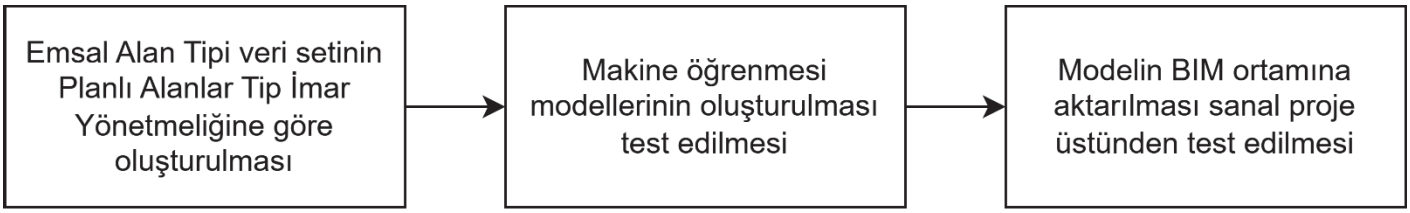
Mevcut çalışmalar incelendiğinde, gelişmiş yapay zekâ yöntemlerinin mimari süreçlere entegrasyonunun BIM nesne sınıflandırması, IFC bütünlük kontrolü ve anlamsal zenginleştirme eksenlerinde yoğunlaştığı görülmektedir. İlk makine öğrenimi tekniklerinden, derin öğrenme ve NLP uygulamalarına kadar uzanan bu yöntemler, manuel iş yükünü azaltma, veri tutarlılığını artırma ve proje çıktılarının kalitesini yükseltme potansiyelini ortaya koymaktadır. Geometrik-ilişkisel verileri işleme kapasitesi ve toplu öğrenme gibi yöntemlerin eklenmesiyle ilerleyen bu çabalar, tasarım ve inşaat süreçlerinde yapay zekâ temelli otomasyonun daha geniş ölçekte benimsenebileceğini göstermektedir.

Ruhsat süreçlerindeki emsal hesaplamaları ve emsal şemalarının hazırlanması da manuel iş yükü gerektiren ve mimarların önemli ölçüde zamanını alan bir konudur. Bu çalışmanın temel motivasyonu, ruhsat süreçlerindeki manuel iş yükünün azaltılarak mimarların katma değerli işlere daha çok vakit ayırmalarını sağlamaktır. Bu bağlamda emsal hesaplamalarına esas oluşturan emsal alan tiplerinin otomatik olarak tanımlanmasının geliştirilmesi hedeflenmiştir. Böylelikle BIM tabanlı ortamlarda, özellikle Revit gibi yazılımlarda üretilen projelerdeki mahal adlarının otomatik okunması ve ilgili parametrelere doğru biçimde atanması hedeflenmektedir.

Bu makalenin devamında, ikinci bölümde araştırmada izlenen yöntem detaylandırılacak, üçüncü bölümde elde edilen bulgular sunulacak, akabinde tartışma ve sonuç bölümleri yer alacaktır.

2. Yöntem

Bu çalışmada araştırma sorusu belirlendikten sonra **Şekil 1**'de gösterilen yöntemler izlenmiştir. İlk aşamada, Planlı Alanlar İmar Yönetmeliği'ne göre veri seti oluşturulmuştur. Daha sonra literatür araştırmasıyla belirlenen, veri setine en uygun makine öğrenme modelleri eğitilmiş ve test edilmiştir. Son aşamada ise seçilen model BIM ortamına aktarılmış ve örnek proje üzerinde test edilmiştir.



Şekil 1: Yöntem

2.1. Veri setinin oluşturulması

Çalışmanın ilk aşamasında, Planlı Alanlar İmar Yönetmeliği'ndeki tanımlar ve seviye bilgileri esas alınarak toplam 850 örnekten oluşan bir veri seti hazırlanmıştır (**Tablo 1**). Yönetmelik incelenerek her bir mahal adı; ilgili emsal alan tipi ve bulunması gereken seviye bilgisiyle eşleştirilmiştir. Yönetmelikte emsal alan tiplerini tarif eden seviyeler bodrum katlar ve zemin üstü katlardır. Ayrıca yönetmelikte, yalnızca zemin katı tarif eden ve taban alanı katsayısını belirleyen tanımlar da yer almaktadır. Ancak, taban alanı katsayısının hesaplanması bu çalışma kapsamı dışında bırakılmıştır. Veri seti yönetmeliğe göre oluşturulduktan sonra, söz konusu mahallerin mimari projelerde farklı şekillerde ifade edilmesi sebebiyle, sık kullanılan kısaltmalar ve farklı yazım biçimleri kasıtlı olarak veri setine dâhil edilmiştir. Bu yaklaşımın amacı, modelin olası yazım hatalarına ve terminolojik çeşitliliğe karşı daha dayanıklı hâle getirilmesidir.

Tablo 1: Veri Seti

Mahal adı	Emsal Alan Tipi	Seviye
AC / DC Güç Dağıtım O	DOĞRUDAN EMSAL DIŞI	BODRUM KAT
AC / DC Güç Dağıtım O	%30 KAPSAMINDA EMSAL DIŞI	ZEMİN ÜSTÜ
AC/DC Güç Dağ. O	DOĞRUDAN EMSAL DIŞI	BODRUM KAT
---	---	---
---	---	---
---	---	---
Yan. Güv. Holü	DOĞRUDAN EMSAL DIŞI	BODRUM KAT
Yan. Güv. Holü	DOĞRUDAN EMSAL DIŞI	ZEMİN ÜSTÜ
Y.G.H	DOĞRUDAN EMSAL DIŞI	BODRUM KAT
Y.G.H	DOĞRUDAN EMSAL DIŞI	ZEMİN ÜSTÜ
Yangın Güvenlik Holü	DOĞRUDAN EMSAL DIŞI	BODRUM KAT
Yangın Güvenlik Holü	DOĞRUDAN EMSAL DIŞI	ZEMİN ÜSTÜ

2.2. Makine öğrenmesi modelinin oluşturulması

Geliştirilen veri setinde "mahal adı" metinsel verilerden oluşurken, "emsal alan tipi" ve "seviye" verileri kategorik yapıdadır. Metin temelli verilerin makine öğrenmesi algoritmalarında kullanılabilmesi için sayısal vektörlere dönüştürülmesi gerekmektedir. Literatürde metin verilerini vektörel forma dönüştürmek için çeşitli yöntemler bulunmaktadır; bunlar arasında kelime torbaları (Bag-of-Words), kelime gömme (Word Embedding), TF-IDF (Term Frequency-Inverse Document Frequency), Word2Vec, FastText (Çelik ve Koç, 2021) ve transformer tabanlı modeller (BERT, GPT vb.) (Acheampong vd., 2021) yaygın olarak tercih edilmektedir. Son yıllarda özellikle transformer temelli modeller (örn. BERT ve GPT varyantları), metinsel ifadelerde bağlam ilişkilerini yakalayabilmeleri sebebiyle gelişmiş performans sunmaktadır . Ancak bu çalışma kapsamında ele alınan veri seti, cümle veya paragraf gibi bağlamsal anlam ilişkileri içermeyen, kısa ve parçalı metinsel ifadelerden oluştuğu için transformer tabanlı kompleks yöntemlerin kullanımı gerekli görülmemiştir. Bu doğrultuda, metin verilerinin daha yalın ancak etkin temsillerini sunabilen TF-IDF ve FastText yöntemleri tercih edilmiştir.

TF-IDF, metinsel ifadelerdeki terimlerin sıklığını ve önemini istatistiksel olarak ağırlıklandırarak sayısal bir temsil oluşturur. FastText yöntemi ise kelimelerin alt karakter dizinlerini (subword embeddings) kullanarak özellikle yazım hataları, kısaltmalar ve benzeri morfolojik varyasyonlara karşı yüksek direnç sağlayan, gömme tabanlı bir vektörleştirme yöntemidir (Kumar & Mehrotra, 2022). Bu yöntemlerin seçilmesi, veri setinde sıkça karşılaşılan terminolojik farklılıklar ve yazım hatalarına karşı dayanıklılığı artırmak amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Modelleme sürecinde ilk aşama olarak metin verilerine ön işleme (preprocessing) yöntemleri uygulanmıştır. Bu kapsamda tüm kayıtlar küçük harfe dönüştürülmüş, noktalama işaretleri kaldırılmış, fazladan boşluklar temizlenmiş ve metin normalleştirilmiştir. Böylece mimari terminolojideki farklı yazım biçimleri ve kısaltmaların tutarlı bir şekilde temsil edilmesi sağlanmıştır. Ayrıca yazım hatalarının olumsuz etkilerini azaltmak amacıyla, sık kullanılan kısaltmalar ve terimler için kural tabanlı eşleştirme yöntemleri uygulanarak metinsel tutarlılık artırılmıştır.

Ön işleme adımlarının tamamlanmasının ardından TF-IDF ve FastText yöntemleri ile elde edilen vektörel temsiller, makine öğrenimi modelleme aşamasında kullanılmıştır. Çalışmada sınıflandırma performanslarının karşılaştırılması amacıyla Destek Vektör Makineleri (Support Vector Machines - SVM), Lojistik Regresyon (Logistic Regression) ve Rastgele Orman (Random Forest) algoritmaları tercih edilmiştir. Destek Vektör Makineleri (SVM), özellikle yüksek boyutlu ve seyrek vektörize edilmiş metin verilerinde başarılı performans sunması sebebiyle metin sınıflandırma görevlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. SVM, sınırlı sayıda örnekten oluşan ve yüksek boyutlu TF-IDF gibi vektör temsilleri ile oluşturulan veri setlerinde yüksek genelleme yeteneği göstermektedir. Ayrıca literatürde yapılan benzer çalışmalarda, kısa metin ve kelime tabanlı sınıflandırma problemlerinde SVM algoritmasının üstün performans sergilediği rapor edilmektedir (Baker vd., 2020).

Lojistik Regresyon, basitliği, hızlı eğitim süresi ve model sonuçlarının yorumlanabilir olması sebebiyle tercih edilmiştir (Kowsari vd., 2019). Ayrıca, metin sınıflandırma problemlerinde, TF-IDF temsili gibi seyrek veri setlerinde genellikle iyi performans gösteren doğrusal bir yöntemdir. Bu algoritma, referans bir baz model olarak performans kıyaslaması

açısından önemli bir temel oluşturmakta ve daha karmaşık yöntemlerle karşılaştırmalı değerlendirme yapmak için kullanılmaktadır. Öte yandan, Rastgele Orman, karar ağaçlarının toplu öğrenme prensibiyle bir araya getirilmesiyle oluşturulan ve veri setindeki karmaşık ve doğrusal olmayan ilişkileri yakalama yeteneği sayesinde tercih edilen bir yöntemdir. Bu algoritma, sınıflandırma performansını artırmak için çok boyutlu ve heterojen yapıya sahip veri setlerinde iyi sonuçlar vermekte ve aşırı öğrenme problemine karşı da dayanıklıdır.

Bu üç yöntemin seçimi hem doğrusal hem de doğrusal olmayan algoritmaların karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesine imkân sağlamış, böylece metinsel veri setinin özelliklerine en uygun yöntemin belirlenmesi mümkün hâle gelmiştir. Ayrıca, bu algoritmaların tümü, benzer metin sınıflandırma problemlerinde literatürde geniş bir şekilde kullanıldığı için, elde edilen sonuçların literatür ile daha kolay karşılaştırılmasına olanak tanımaktadır. Bu yöntemlerin performans karşılaştırması, veri setinin eğitim ve test kümelerine ayrılması ve çapraz doğrulama yöntemleriyle gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, yöntemlerin doğruluk, hassasiyet, duyarlılık ve F1 skoru gibi metriklerle karşılaştırılmasıyla rapor edilmiştir.

2.3. Modelin BIM ortamına aktarılması

Modelin gerçek mimari proje süreçlerinde doğrudan kullanılabilmesi amacıyla, Yapı Bilgi Modellemesi (Building Information Modeling, BIM) platformlarından en yaygın kullanılan yazılımlardan biri olan Autodesk Revit tercih edilmiştir. Eğitim ve test işlemleri sonucunda en yüksek performansı gösteren TF-IDF ve SVM tabanlı makine öğrenmesi modeli, Python programlama dili kullanılarak bir FastAPI web servisi olarak hazırlanmış ve internet protokolü (HTTP) üzerinden erişilebilir hale getirilmiştir. Bu yöntem, modelin farklı BIM platformlarıyla da esnek bir şekilde entegre edilmesine olanak tanımaktadır.

Geliştirilen servis, Revit yazılımına C# dili ile geliştirilen bir eklenti aracılığıyla bağlanmıştır. Revit API (Application Programming Interface) kullanılarak hazırlanan bu eklenti, kullanıcı tarafından oluşturulan veya güncellenen mahal bilgilerinin isim ve seviye bilgilerini otomatik olarak toplayıp Python servisinden sınıflandırma tahminlerini alarak, alan sınırlarını ve alanları oluşturmakta, sonuçları ilgili parametreye atamaktadır. Eklenti çalışma mantığı aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1. Revit ortamında aktif alan planının ilişkili olduğu seviye bilgisi alınır ve bu seviyeye ait olan tüm odalar filtrelenerek toplanır.
2. Bu odaların her biri için, mahal adı ve kot seviyesi bilgisi elde edilir. Kot seviyesi, projenin sıfır kotunun altında kalan alanlar için "BODRUM KAT", üstünde kalanlar için ise "ZEMİN ÜSTÜ" olarak kategorize edilir.
3. Eklenti, her bir oda bilgisini JSON formatına dönüştürerek Python tabanlı FastAPI servisine HTTP POST isteği olarak iletir. Yapılan istek sonucunda Python servisinden emsal alan tipi tahmini alınır.
4. Python servisinden dönen tahmin, "DOĞRUDAN EMSAL DIŞI" veya "%30 KAPSAMINDA EMSAL DIŞI" kategorilerinden birine ait ise işlem devam ettirilir. Diğer durumlarda ilgili oda için alan oluşturma işlemi atlanır.
5. İşlem yapılacak odaların sınır çizgileri Revit API'si kullanılarak alınır ve bu sınırlar doğrultusunda alan sınır çizgileri oluşturulur.
6. Ardından her odanın konum bilgisine göre yeni bir alan (area) objesi Revit ortamında oluşturulur.
7. Oluşturulan alan objesinin "Name" parametresi, odanın adı ile eşleştirilir. Python servisinden alınan tahmin sonucu, "Emsal Alan Tipi" parametresine otomatik olarak atanır.
8. İşlemler tamamlandığında, kullanıcıya kaç adet alanın başarıyla oluşturulduğunu ve kaç işlemde hata yaşandığını içeren bir rapor sunulur.

Bu yaklaşım, modelin sürekli olarak güncellenebilmesi ve değişen mevzuat veya mimari terminolojilere kolay uyum sağlayabilmesi açısından önemlidir. Python servisinin platform bağımsız olması ve Revit eklentisinin yalnızca bu servise bağlanarak çalışması, yöntem güncellemelerinin ve model parametrelerinin BIM yazılımına tekrar müdahale edilmeden hızla devreye alınabilmesini sağlamaktadır.

3. Bulgular

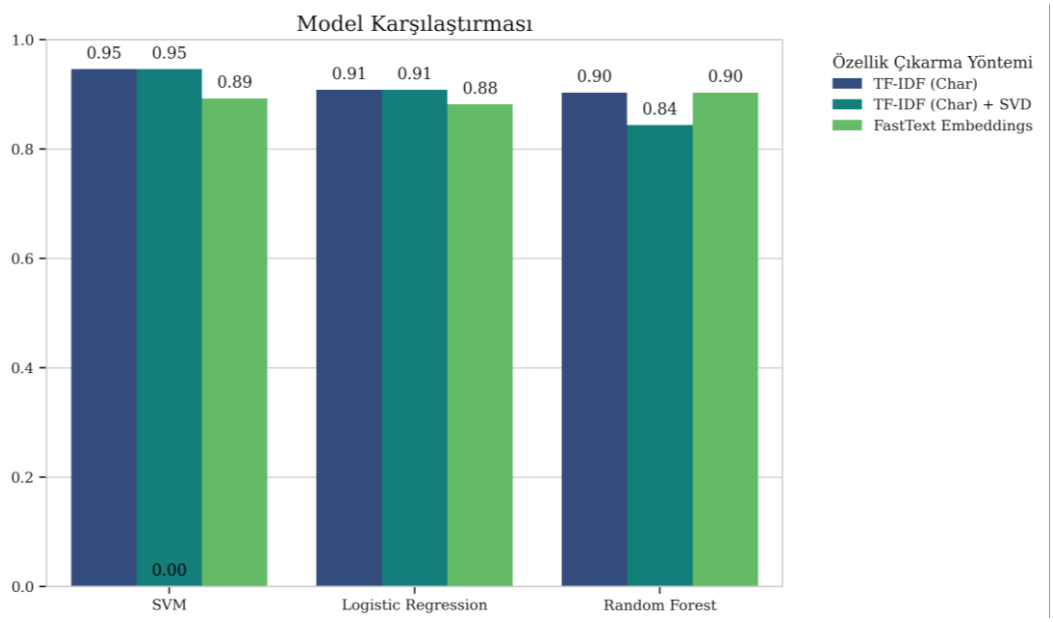
Makine öğrenmesi modeli sonuçları, yapı ruhsat süreçlerinde emsal alan tiplerinin otomatik olarak sınıflandırılmasında makine öğrenmesi modelinin etkinliğini ortaya koymaktadır. Model, mimarların kullandığı farklı terminolojilerden, yazım hatalarından ve kısaltmalardan kaynaklanan tutarsızlıkları başarıyla ele almaktadır. Yapılan analizler sonucunda en yüksek performansı gösteren TF-IDF ve SVM kombinasyonu, %94.62 doğruluk, %93.95 hassasiyet, %95.45 duyarlılık

ve %94.57 F1-skoruna ulaşmıştır (**Tablo 2**). Bu sonuçlar, geliştirilen modelin farklı emsal alan tiplerini yüksek doğrulukla sınıflandırabildiğini ortaya koymaktadır. Öte yandan, TF-IDF özelliklerine Tekil Değer Ayrıştırma (Singular Value Decomposition - SVD) uygulanmasının performansta bir değişikliğe neden olmadığı görülmüştür.

Karşılaştırmalı analizlerde ele alınan diğer algoritmalar olan Lojistik Regresyon ve Rastgele Orman modelleri de başarılı sonuçlar elde etmiş olmakla birlikte, SVM algoritması tüm özellik çıkarım teknikleri arasında istikrarlı şekilde daha yüksek performans göstermiştir. FastText vektörleri, TF-IDF ile karşılaştırılabilir sonuçlar sunsa da TF-IDF tabanlı yöntemler mevcut veri seti için daha uygun bulunmuştur. Bu durum, metinsel verilerin TF-IDF yöntemi ile yeterli düzeyde temsil edildiğini ve özellikle kelime tabanlı kısa ifadelerde gömme yöntemlerinin performans artışı sağlayamadığını göstermektedir.

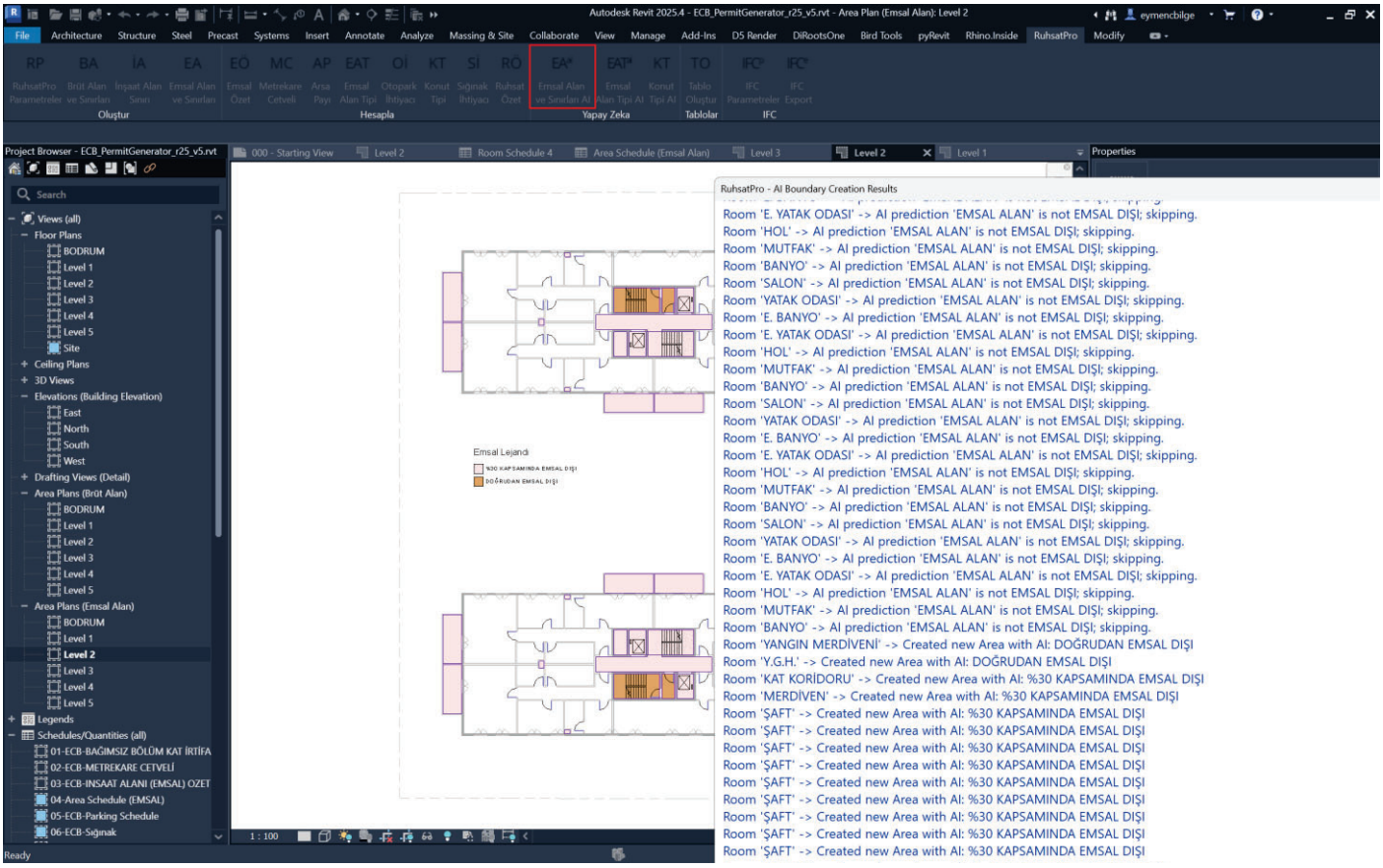
Tablo 2. Model Sonuçları

Model	Özellik Çıkarma Y.	Doğruluk	Hassasiyet	Duyarlılık	F1 Skoru
SVM	TF-IDF (Char)	0.9462	0.9395	0.9545	0.9457
SVM	TF-IDF (Char) + SVD	0.9462	0.9395	0.9545	0.9457
Logistic Regression	TF-IDF (Char)	0.9086	0.9022	0.9076	0.9047
Logistic Regression	TF-IDF (Char) + SVD	0.9086	0.9022	0.9076	0.9047
Random Forest	TF-IDF (Char)	0.9032	0.8958	0.8855	0.8897
Random Forest	FastText Embeddings	0.9032	0.9213	0.8864	0.8983
SVM	FastText Embeddings	0.8925	0.8845	0.8972	0.8897
Logistic Regression	FastText Embeddings	0.8817	0.8772	0.8779	0.8775
Random Forest	TF-IDF (Char) + SVD	0.8441	0.8684	0.8288	0.8423



Şekil 2. Model Karşılaştırması

Modelin uygulamadaki performansını değerlendirmek amacıyla, geliştirilen C# tabanlı eklenti Revit 2025 yazılımına entegre edilerek sanal bir mimari proje üzerinde test edilmiştir. Örnek proje kapsamında, iki bloktan oluşan, dört normal kat ve bir bodrum katı içeren varsayımsal bir yapı tasarlanmıştır. Toplam 410 farklı mahal tanımı içeren projede, gerçek proje koşullarını yansıtmak amacıyla çeşitli kısaltmalar, yazım hataları ve terminolojik varyasyonlar kasıtlı olarak oluşturularak modele sunulmuştur. Yapılan sınıflandırma sonucunda, model tarafından 126 mahal "%30 kapsamında emsal dışı", 66 mahal ise "doğrudan emsal dışı" olarak doğru şekilde belirlenmiştir (**Şekil 3**). Bu mahaller için alan sınırları otomatik olarak oluşturularak ilgili alan atamaları başarılı biçimde tamamlanmıştır. Geriye kalan mahaller ise emsal alana dâhil olduğundan dolayı herhangi bir alan sınırı ve ataması işlemi yapılmamıştır. Sanal proje üzerinde gerçekleştirilen bu testler, geliştirilen modelin gerçek mimari proje süreçlerinde kullanım potansiyelinin yüksek olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 3: Revit Eklentisi model test sonucu

4. Tartışma

Bu çalışmada yapı ruhsat süreçlerinde sıklıkla karşılaşılan farklı terminoloji kullanımı, yazım hataları ve standart olmayan kısaltmalardan kaynaklanan mahal adlandırma sorunlarının, emsal alan tipleri bağlamında otomatik sınıflandırılması hedeflenmiştir. Elde edilen sonuçlar, TF-IDF ve SVM yöntemlerinin bir arada kullanımının en yüksek performansı gösterdiğini ortaya koymaktadır. Çalışmanın temel amacı olarak belirlenen "farklı terminolojilere ve yazım biçimlerine karşı dirençli bir model geliştirilmesi" hedefi doğrultusunda, SVM algoritmasının tatmin edici bir performans sunduğu gözlemlenmiştir.

Mevcut literatür incelendiğinde SVM'nin BIM tabanlı sınıflandırma ve veri zenginleştirme uygulamalarında sıklıkla kullanıldığı görülmektedir (Kim vd., 2019; Koo vd., 2019; Koo ve Shin, 2018). Bununla birlikte, son dönemde derin sinir ağları ve grafik tabanlı yaklaşımlar (Koo vd., 2021; Luo vd., 2023; Y. Yu vd., 2021) giderek daha fazla benimsenmekte ve daha yenilikçi yöntemler olarak öne çıkmaktadır. Bu araştırmada ise SVM'nin tercih edilmesinin temel nedeni, kullanılan veri setinin hacminin ve metinsel ifadelerin kısalığının daha karmaşık modellere gerek bırakmamasıdır. Ayrıca SVM'nin özellikle küçük ve seyrek veri kümelerinde etkin sonuç vermesi, bu çalışmanın yöntem seçimini destekleyen önemli bir gerekçedir. Modelin, mimari projelerde karşılaşılan yazım hataları ve kısaltma biçimlerine karşı yüksek direnç göstermesi de bu tercih kararının geçerliliğini doğrulamaktadır.

Çalışma aynı zamanda yapı ruhsat süreçlerinin dijitalleşmesine ve otomasyonuna yönelik önemli bir örnek teşkil etmektedir. Geliştirilen modelin, Revit 2025 yazılımına doğrudan bir eklenti olarak dâhil edilmesi, mimarlara gerçek zamanlı olarak kullanılabilecek pratik bir çözüm sağlamaktadır. Bu sayede mimarların ruhsat süreçlerindeki manuel kontrol iş yükünün azaltılması ve tasarım süreçlerine daha fazla zaman ayırabilmeleri mümkün olmaktadır. Ayrıca makine öğrenmesi modelinin Python FastAPI servisi olarak Revit ortamına entegre edilmesi, modelin kolayca güncellenebilmesini mümkün kılmakta, böylece Revit eklentisinde herhangi bir değişiklik yapmaya gerek kalmadan modelin performansının zamanla geliştirilmesine olanak sağlamaktadır.

Araştırmanın önemli sınırlılıklarından biri kullanılan veri setinin sınırlı büyüklüğüdür (n=850). Gerçek proje ortamlarında daha geniş ve karmaşık terminolojik çeşitlilik söz konusu olduğundan, gelecekteki çalışmalarda veri setinin daha fazla örnek ile genişletilmesi ve farklı belediye uygulamalarının dâhil edilmesi, modelin genellenebilirliği açısından kritik

önem taşımaktadır. Bir diğer sınırlılık ise, model performansının varsayımsal bir proje üzerinden değerlendirilmiş olmasıdır. Modelin gerçek performansının daha nesnel ve güvenilir biçimde ortaya konulabilmesi için gerçek bir mimari proje üzerinde, öncelikle klasik yöntemlerle hazırlanan emsal şemaları ile daha sonra bu modelin sonuçlarının karşılaştırılması önerilmektedir. Zira mevcut çalışmada hem makine öğrenmesi modelinin hem de test amaçlı varsayımsal projenin aynı araştırmacı tarafından hazırlanması, modele yönelik istemsiz bir ön yargı oluşturabilir.

Son olarak, çalışmada ruhsat süreçlerinin yalnızca "emsal alan tipleri" parametresine odaklanılmıştır. Örneğin, taban alanı katsayısı gibi emsal hesaplarında önemli bir parametre çalışma kapsamı dışında tutulmuştur. İlerleyen çalışmalarda bu parametrenin de sürece dâhil edilmesiyle kapsam genişletilebilir. Ayrıca yapı ruhsat süreçleri, emsal hesaplamalarından farklı olarak, bağımsız bölüm cinsi, konut tipi gibi pek çok ek parametreyi içermektedir. Makine öğrenmesi yöntemleri bu gibi farklı parametreleri de oluşturulacak şekilde genişletilebilir, mimarların ruhsat süreçlerini daha entegre ve verimli şekilde yürütmelerine imkân tanıyabilir. Ayrıca gelecekte yapılacak çalışmaların ruhsat süreçlerinin tamamının otomasyonunu hedeflemesi, yapay zekâ temelli sistemlerin mevzuata uyum, hız ve doğruluk açısından sağlayacağı katkıyı daha kapsamlı biçimde ortaya koyacaktır. Bu bağlamda, derin öğrenme yöntemleri ve grafik tabanlı sinir ağları gibi yenilikçi yaklaşımların da çalışmalara eklenmesi, geliştirilen modellerin performansını ve kullanım alanlarını daha ileri seviyelere taşıyabilecektir.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada, yapı ruhsat süreçlerinde farklı terminoloji, yazım hatası ve kısaltmalar nedeniyle sıklıkla karşılaşılan mahal sınıflandırma problemlerini otomatik olarak çözmeye yönelik bir yöntem geliştirilmiştir. Araştırmanın bulguları, TF-IDF özellik çıkarımı ve SVM algoritmasının bir arada kullanımının emsal alan tipi sınıflandırma problemini çözmede yüksek performans gösterdiğini (%94.62 doğruluk, %93.95 hassasiyet, %95.45 duyarlılık ve %94.57 F1 skoru) ortaya koymuştur. Ayrıca, geliştirilen modelin terminolojik varyasyonlara, kısaltmalara ve metin hatalarına karşı dirençli olduğu da gözlemlenmiştir.

Çalışmanın başlangıcında belirlenen temel hedef, yapı ruhsat süreçlerinde manuel emsal alan tipi hesaplamalarından kaynaklanan zaman kaybını azaltmak ve süreçlerin dijitalleşmesini sağlamaktı. Bu bağlamda, modelin hem çapraz doğrulama testlerinde hem de uygulamalı bir sanal proje üzerinde gerçekleştirilen değerlendirmede başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Sanal proje üzerinde yapılan testlerde, 410 farklı mahal tanımının tamamı doğru olarak sınıflandırılmış ve otomatik olarak alan sınırları oluşturularak ilgili parametre atamaları gerçekleştirilmiştir. Böylece, çalışmanın temel hedeflerine ulaştığı ve pratikte kullanılabilir bir otomasyon çözümü sunduğu söylenebilir.

Elde edilen bulguların mevcut literatürle ilişkisi değerlendirildiğinde, literatürde son zamanlarda daha karmaşık ve büyük hacimli veriler üzerinde derin öğrenme tabanlı yöntemlerin yaygınlaştığı görülmektedir. Ancak bu çalışma, daha küçük ölçekli ve bağlamsal olarak sınırlı metin verileri için, daha yalın ve etkin yöntemlerin (TF-IDF ve SVM) yeterli performansı sağlayabileceğini ortaya koymaktadır. Dolayısıyla çalışma, sınırlı veri setleriyle çalışan benzer problemlerde yalın yöntemlerin tercih edilmesi konusunda literatüre bir katkı sağlamaktadır. Ayrıca geliştirilen modelin, mimarlık pratiğinde doğrudan kullanılabilir bir BIM entegrasyonu örneği sunması, çalışmanın sektördeki pratik katkısını güçlendirmektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma yapı ruhsat süreçlerinde karşılaşılan terminolojik tutarsızlıkların neden olduğu zaman kaybını azaltmak üzere otomatik bir çözüm üretmiş, bu çözümün hem teorik açıdan anlamlı hem de uygulama açısından değerli olduğunu göstermiştir. İlerleyen çalışmalarda, veri setinin büyütülmesi, gerçek projelerle yapılacak karşılaştırmalı testler ve kapsamın genişletilmesi yoluyla, ruhsat süreçlerinin tamamının otomatikleştirilmesi mümkün hâle getirilebilir. Bu doğrultuda özellikle derin öğrenme ve grafik tabanlı yaklaşımlar gibi güncel yöntemlerin sisteme entegrasyonu, gelecekte yapılacak çalışmalar için önemli bir araştırma yönü olacaktır.

6. KAYNAKLAR

Acheampong, F. A., Nunoo-Mensah, H., & Chen, W. (2021). Transformer models for text-based emotion detection: A review of BERT-based approaches. *Artificial Intelligence Review*, *54*(8), 5789-5829. https://doi.org/10.1007/s10462-021-09958-2

Baker, H., Hallowell, M. R., & Tixier, A. J.-P. (2020). Automatically learning construction injury precursors from text. *Automation in Construction*, *118*, 103145. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103145

Bloch, T., & Sacks, R. (2020). Clustering information types for semantic enrichment of building information models to support automated code compliance checking. *Journal of Computing in Civil Engineering*, *34*(6), 4020040. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000922

ÇelİK, Ö., & Koç, B. C. (2021). TF-IDF, Word2vec ve fasttext vektör model yöntemleri ile türkçe haber metinlerinin sınıflandırılması. *Deu Muhendislik Fakultesi Fen Ve Muhendislik*, *23*(67), 121-127. https://doi.org/10.21205/deufmd.2021236710

Emunds, C., Pauen, N., Richter, V., Frisch, J., & Van Treeck, C. (2022). SpaRSE-BIM: Classification of IFC-based geometry via sparse convolutional neural networks. *Advanced Engineering Informatics*, *53*, 101641. https://doi.org/10.1016/j.aei.2022.101641

Kim, J., Song, J., & Lee, J.-K. (2019). Recognizing and Classifying Unknown Object in BIM Using 2D CNN. İçinde J.-H. Lee (Ed.), *Computer-Aided Architectural Design. "Hello, Culture"* (ss. 47-57). https://doi.org/10.1007/978-981-13-8410-3_4

Koo, B., Jung, R., & Yu, Y. (2021). Automatic classification of wall and door BIM element subtypes using 3D geometric deep neural networks. *Advanced Engineering Informatics*, *47*, 101200. https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101200

Koo, B., La, S., Cho, N.-W., & Yu, Y. (2019). Using support vector machines to classify building elements for checking the semantic integrity of building information models. *Automation in Construction*, *98*, 183-194. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.11.015

Koo, B., & Shin, B. (2018). Applying novelty detection to identify model element to IFC class misclassifications on architectural and infrastructure building information models. *Journal of Computational Design and Engineering*, *5*(4), 391-400. https://doi.org/10.1016/j.jcde.2018.03.002

Kowsari, K., Jafari Meimandi, K., Heidarysafa, M., Mendu, S., Barnes, L., & Brown, D. (2019). Text classification algorithms: A survey. *Information*, *10*(4), 150. https://doi.org/10.3390/info10040150

Kumar, N. V. A., & Mehrotra, S. (2022). *A comparative analysis of word embedding techniques and text similarity measures*. *5th International Conference on Contemporary Computing and Informatics (IC3I)*, Uttar Pradesh, India, 2022, pp. 1581-1585, doi: 10.1109/IC3I56241.2022.10072927.

Kumi, L., Jeong, J., & Jeong, J. (2024). Data-driven automatic classification model for construction accident cases using natural language processing with hyperparameter tuning. *Automation in Construction*, *164*, 105458. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105458

Luo, H., Gao, G., Huang, H., Ke, Z., Peng, C., & Gu, M. (2023). A geometric-relational deep learning framework for BIM object classification. Içinde L. Karlinsky, T. Michaeli, & K. Nishino (Ed.), *Computer Vision – ECCV 2022 Workshops*.

Nabavi, A., Ramaji, I., Sadeghi, N., & Anderson, A. (2023). Leveraging Natural Language Processing for Automated Information Inquiry from Building Information Models. *Journal of Information Technology in Construction*, *28*, 266-285. https://doi.org/10.36680/j.itcon.2023.013

Song, J., Lee, J.-K., Choi, J., & Kim, I. (2020). Deep learning-based extraction of predicate-argument structure (PAS) in building design rule sentences☆. *Journal of Computational Design and Engineering*, *7*(5), 563-576. https://doi.org/10.1093/jcde/qwaa046

Wang, Z., Sacks, R., Ouyang, B., Ying, H., & Borrmann, A. (2024). A framework for generic semantic enrichment of BIM models. *Journal of Computing in Civil Engineering*, *38*(1), 4023038. https://doi.org/10.1061/JCCEE5.CPENG-5487

Wang, Z., Sacks, R., & Yeung, T. (2022). Exploring graph neural networks for semantic enrichment: Room type classification. *Automation in Construction*, *134*, 104039. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104039

Yu, Y., Ha, D., Lee, K., Choi, J., & Koo, B. (2022). ArchShapesNet: A novel dataset for benchmarking architectural building information modeling element classification algorithms. *Journal of Computational Design and Engineering*, *9*(4), 1449-1466. https://doi.org/10.1093/jcde/qwac064

Yu, Y., Lee, K., Koo, B., & Lee, K. (2021). Modeling element relations as structured graphs via neural structured learning to improve BIM element classification. *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research 41*(3), 277- 288. https://doi.org/10.12652/ksce.2021.41.3.0277

Yu, Y. S., Kim, S. H., Lee, W. B., & Koo, B. S. (2023). Ensemble-based deep learning approach for performance improvement of BIM element classification. *KSCE Journal of Civil Engineering*, *27*(5), 1898-1915. https://doi.org/10.1007/s12205-023-2331-y

2025 MSTAS MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Uyumluluk Denetimi Otomasyonu için Bina Yangın Yönetmeliğinin Dört Katmanlı Modelleme Yöntemi ile Sayısal Temsili

Tarık Çetin[1]; M. Emre İlal[2]; Sibel Macit İlal[3]
[1,2]İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü; [3]İzmir Demokrasi Üniversitesi
[1]tarikcetin@iyte.edu.tr; [2]emreilal@iyte.edu.tr; [3]sibel.macit@idu.edu.tr

Özet

Yapı yönetmeliklerinin dijitalleştirilmesi ve Otomatik Uyumluluk Denetimi süreçlerine entegre edilebilmesi, yönetmeliklerin yalnızca okunabilir değil, hesaplanabilir bir şekilde temsil edilmesine bağlıdır. Ancak doğal dilde yazılmış, bağlamsal koşullar içeren ve belirsizliklere sahip yapı yönetmelikleri, doğrudan sayısal sistemlerde işlenemez durumdadır. Bu nedenle literatürde çeşitli temsil yöntemleri geliştirilmiştir. Yönetmeliklerin dijital temsili konusunda literatürde önerilen modelleme yöntemleri, teknik olarak güçlü yaklaşımlar sunmakla birlikte, yönetmeliklerin kendine has kavramları, doğasındaki bağlamsallık, çok katmanlılık, istisnalar ve yoruma açık ifadeler gibi yapısal zorlukları her zaman yeterince karşılayamamaktadır. Bu çalışmada RASE yaklaşımına dayanan Dört Katmanlı Temsil Modeli, Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik üzerinde uygulanmıştır. Yönetmelik detaylı olarak analiz edilmiş ve 671 kural cümlesi, 261 açıklama ve 40 uygulanabilirlik koşulu ayrıştırılmıştır. Kural cümleleri hem birbirleri arasındaki ilişkisellik durumuna göre hem de modellenebilirliklerine göre sınıflandırılmıştır.

Kuralların sayısal temsili için yönetmeliğe özgü uzmanlık alan modeli geliştirilmiştir. Bu model, yalnızca kural tanımları için değil, aynı zamanda yapı bilgi modelleri üzerinde gerçekleştirilecek denetimlerde de temel teşkil etmektedir. Ancak bazı kavramların (örneğin kaçış mesafesi, çıkış genişliği, kullanıcı yükü) yapı bilgi modellerinde doğrudan yer almaması, bu değerlerin ön hesaplamalarla elde edilmesini zorunlu kılmaktadır. Ayrıca yönetmelik kurallarının yoğun olarak tablolardan faydalanması ve tablolardaki her bir değerin farklı kural tanımı gerektirmesi, mevcut dört katmanlı temsil modelinin geliştirilmesi gerektiğini ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: *Yapı Yönetmelikleri, Dijital Kural Temsili, Otomatik Uyumluluk Denetimi, Yangın Yönetmeliği.*

2025 MSTAS MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Digital Representation of Fire Safety Code for Automated Compliance Checking Systems Using Four Level Representation

Tarık Çetin[1]; M. Emre İlal[2]; Sibel Macit İlal[3]
[1,2]İzmir Institute of Technology; [3]İzmir Democracy University
[1]tarikcetin@iyte.edu.tr; [2]emreilal@iyte.edu.tr; [3]sibel.macit@idu.edu.tr

Abstract

The digital representation of building codes and their integration into automated compliance checking systems depend on their compatibility. However, building regulations are written in natural languages. They contain many contextual conditions and ambiguities that cannot be directly computed. Methods of representation have been proposed in the literature. Although the proposed modelling methods on digital representation of building codes have tried a variety of approaches, a standard representation still eludes us. In this study, the Turkish Fire Safety Code is analysed for modelling with the Four Layer Representation model. The code was analysed in detail, revealing 671 rule sentences, 261 clarifications, and 40 applicability conditions. The rule sentences are classified both according to structural dependencies and according to their formalizability.
Before modelling the rule sentences, a domain object model specific to the fire safety code was defined. This model serves not only as a basis for rule formalization but also for mapping to building information models. However, the fact that some concepts (e.g. escape distance, output width, user load) are not directly included in building information models necessitates some calculations before rule execution. Also when modelling rules that refer to tables, the Four Level Representation requires modelling of a high number of rules, since each value in a table requires a separate rule to be defined. This study based on the Turkish Fire Safety Code has revealed a need for the existing Four Level Representation model to account for rules that make extensive use of tables.

Keywords: *Building Codes, Digital Rule Representation, Automated Compliance Checking, Fire Safety Code.*

1. Giriş

Yapıların, güvenli, işlevsel ve sürdürülebilir bir şekilde hayata geçirilmesinde yapı yönetmeliklerine uyumluluk kritik bir role sahiptir. Ancak, yönetmeliklerin doğal dilde yazılmış olması, alana özgü kavramlara ve çok değişkenli kurallara sahip olmaları, manuel denetimleri zaman alıcı ve hatalara açık hale getirmektedir. Bu nedenle, otomatik uyumluluk denetimi sistemleri, bu süreçleri hızlandırmak ve doğruluğu artırmak amacıyla önemli bir araştırma alanı olarak ortaya çıkmıştır. Eastman vd.'ne (2009) göre otomatik uyumluluk denetiminin dört temel aşaması bulunmaktadır: (1) Kuralların hesaplanabilir şekilde temsil edilmesi, (2) Denetime uygun bir yapı modelinin hazırlanması, (3) Yapı modelinin temsil edilen kurallar üzerinden kontrol edilmesi ve (4) Sonuçların raporlanması. Bu aşamalardan model hazırlanışı, kontrol mekanizmaları ve raporlama konularında önemli ilerlemeler kaydedilmişken, kuralların hesaplamaya uygun biçimde temsil edilmesi halen kapsamlı ve genel bir çözüm sunulamayan bir alan olarak kalmaktadır (Zhang vd., 2022).

Yönetmeliklerin temsili, yönetmeliklerdeki kuralların bilgisayar programları tarafından hesaplanabilir halde modellenmesini kapsar. Fakat yönetmeliklerin doğal dille yazılmış olması, her yönetmeliğin kapsamına özgü tanımlar içermesi ve karmaşık bir içerik düzenine sahip olması gibi sebeplerden dolayı yönetmeliklerin dijital ortamda temsili zorlayıcıdır. Bu konuda son zamanlarda birçok çalışma olmasına rağmen, kapsamlı bir kural temsili geliştirilememiştir. Son yıllarda, Doğal Dil İşleme (NLP) ve Derin Öğrenme yöntemlerinin gelişimi, uyumluluk denetimi süreçlerinde kural temsili aşamasını önemli ölçüde etkilemiştir. NLP ve Derin Öğrenme tabanlı modeller, kuralların doğru bir şekilde temsil edilmesini sağlama potansiyeline sahiptir (Hettiarachchi vd., 2024; Yin vd., 2023). Ancak, yapı yönetmeliklerinin öznel doğası, bu temsillerin alan uzmanları tarafından doğrulanmasını gerektirmektedir (Fuchs vd., 2024; Nawari ve Alsaffar, 2015) . Bunun yanı sıra, bilgi çıkarımı ölçeklenebilirliğiyle ilgili sorunlar hala çözülememiştir (Fuchs, 2021). Bu durum, yapı yönetmeliklerinin bağlamsal doğası, kamuya açık veri setlerinin eksikliği ve modellerin çoğunlukla nicel veya mekansal gereksinimlere odaklanması gibi nedenlerden dolayı otoriteler tarafından henüz kabul görmemiştir. (Hassan & Le, 2020; Xue ve Zhang, 2020).

Öte yandan semantik tabanlı modeller, yapı yönetmeliklerinin temsili için hala güçlü bir temel sunmaktadır. Bu modeller, kural temsili aşamasında alan uzmanlarının sürece dahil olmasını teşvik ederek şeffaf ve anlaşılır bir yapı sağlar. Bu bağlamda, RASE metodolojisi Nisbet vd. (2008) tarafından önerildiğinden bu yana etkili bir çözüm olarak kabul edilmektedir (Beach vd., 2015; Liu vd., 2024). Macit (2014) tarafından geliştirilen RASE tabanlı Dört Katmanlı Temsil Modeli, metinsel ifadeleri dört seviyeli bir yapıyla hesaplanabilir formata dönüştürmüştür. İzmir Büyükşehir Belediyesi İmar Yönetmeliği'nin dijitalleştirilmesinde başarıyla kullanılan bu model, uyumluluk denetimi süreçlerinde esneklik, şeffaflık ve alan uzmanlarının katılımını sağlamıştır. Ancak, modelin yalnızca imar yönetmeliklerine değil, diğer yönetmeliklere de uygulanabilir olup olmadığının test edilmesi gerekmektedir.

Bu çalışma, Dört Katmanlı Temsil Modeli'nin yangın yönetmeliğine uygulanabilirliğini belirlemeyi amaçlamaktadır. Yangın yönetmeliği de diğer yapı yönetmelikleri gibi doğal dille yazılmış, yoruma açık ve belirsiz ifadeler içermektedir. Bu nedenle, çalışmanın temel sorusu, yangın yönetmeliğinde yer alan kuralların dijital olarak temsil edilip edilemeyeceği ve hangi metodolojik uyarlamaların gerektiğinin belirlenmesidir. Bu bağlamda, çalışma Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmeliğin modellenebilirliğini test etmekte ve yönetmeliğe özgü temel kavramları belirlemeyi, bu kavramların birbiriyle olan ilişkilerini analiz etmeyi, modelin uygulanabilmesi için gereken metodolojik değişiklikleri ortaya koymayı hedeflemektedir.

2. Literatürdeki temsil modelleri

Yapı yönetmeliklerinin dijitalleştirilmesi ve otomatik uyumluluk denetimi süreçlerinde kullanılabilir hale getirilmesi, büyük ölçüde bu yönetmeliklerin nasıl temsil edildiğine bağlıdır. Yönetmeliklerin doğal dilde yazılmış olması, bağlama duyarlılığı, istisnalar içermesi ve zaman zaman performansa dayalı hükümler barındırması, bu belgelerin tek bir modelle kapsayıcı şekilde temsil edilmesini güçleştirmiştir. Bu nedenle literatürde, yönetmeliklerin biçimsel, anlamsal ve bağlamsal düzeylerini ele alan çok sayıda temsil yaklaşımı geliştirilmiştir.

Temsile yönelik ilk sistematik çalışmalar, Fenves (1966) tarafından geliştirilen karar tablolarıyla başlamıştır. Bu tablolar, koşul-eylem ayrımı temelinde yapılandırılmış ve Fenves vd. (1969) tarafından ölçülebilir veri öğelerine dayalı modellerle desteklenmiştir. Bu yaklaşımların doruk noktası olan SASE modeli (Fenves vd., 1987), karar tabloları, bilgi ağları ve atomik veri öğeleri gibi bileşenleri bir araya getirerek dört katmanlı bir yapı önermiştir. Ancak alan nesnesi

temsili eksikliği ve veri öğelerine duyulan yüksek bağımlılık nedeniyle bu yapı, karmaşık ve büyük ölçekli yönetmeliklerde sürdürülebilirliğini kaybetmiştir.

Bu dönemi takip eden kural tabanlı modeller, koşul-eylem (IF–THEN) mantığı ile kuralların doğrudan koşullu cümlelerle ifade edilmesini sağlamıştır (Dym vd., 1988; Rasdorf & Wang, 1988; Rosenman & Gero, 1985). Türkiye bağlamında Balaban vd. (2012), Türk Yangın Yönetmeliği'nin koşul-eylem mantığıyla kodlandığı bir sistem geliştirmiştir. Ancak bu tür sistemler, manuel olarak güncellenmeleri gerektiğinden değişken ve geniş kapsamlı yönetmelikler için genellenebilir değildir. Ayrıca kod ile metin arasında yüksek bağlılık kurması, alan uzmanlarının sistemle etkileşimini sınırlandırmaktadır.

Daha sonra geliştirilen mantık tabanlı modeller, yüklem mantığı (predicate logic) kullanarak kuralların doğruluğunu, çelişkisizliğini ve tamamlayıcılığını formel düzeyde değerlendirmeyi mümkün kılmıştır (Jain vd., 1989; Rasdorf ve Lakmazaheri, 1990). Ancak bu modellerin uygulanabilirliği, yüksek teknik bilgi ve mantıksal modelleme uzmanlığı gerektirmeleri nedeniyle sınırlı kalmıştır. Solihin ve Eastman (2016) tarafından önerilen kavramsal grafikler, bu sorunu aşmak amacıyla geliştirilmiş olsa da, geometrik kuralların temsili gibi alanlarda yeterince güçlü olamamıştır.
Anlamsal (semantik) modelleme yaklaşımları, bu eksiklikleri gidermek amacıyla yönetmelik metinlerinin yapılandırılmış veri formatlarına dönüştürülmesine odaklanmıştır. En yaygın örneği, SMARTcodes projesi kapsamında geliştirilen RASE metodolojisidir (Hjelseth ve Nisbet, 2011; Nisbet vd., 2008). Bu yaklaşımda her kural cümlesi, dört yapısal bileşene (gereksinim, uygulanabilirlik, seçim, istisna) ayrılır ve XML tabanlı veri yapılarıyla sistemlere entegre edilebilir hale gelir. Beach vd. (2015), bu modeli SWRL kuralları ve OWL ontolojileriyle geliştirerek BIM verisi ile kural mantığı arasında anlamsal eşleştirme yapmıştır. Zhang vd. (2018) ve Jiang vd. (2022), bu yapıyı SPARQL tabanlı sorgularla zenginleştirmiş, RDF çizelgeleri üzerinden temsil gerçekleştirmiştir. Ancak bu sistemler hala tablo içeriği, istisnai yapılar ve çok katmanlı koşullar gibi yönetmelik özelliklerini temsil etmekte zorlanmaktadır.

Ontoloji tabanlı modeller, anlamsal temsile dayalı yaklaşımları daha da ileri taşıyarak, kavramları hiyerarşik ve ilişkilendirilebilir ontolojiler olarak yapılandırmayı mümkün kılmıştır. Yurchyshyna vd. (2008) ve Pauwels vd. (2011), OWL, RDF ve SPARQL kullanarak yönetmelik içeriklerini bilgi tabanlarına dönüştürmüş, SPIN ve Jena gibi motorlar aracılığıyla bu içerikler üzerinde çıkarıma dayalı sorgulama yapılmasını sağlamıştır. Bu modeller, bilgi çıkarımı, çelişki kontrolü ve kural zincirleme açısından güçlüdür; ancak geometrik ilişkiler, muğlak tanımlar ve bağlamsal koşulların modellenmesi gibi alanlarda eksiklikler devam etmektedir.

Bu sınırlamalara karşılık geliştirilen hibrit modeller, farklı yaklaşımların güçlü yönlerini birleştirerek nesne tabanlı yapıların mantıksal çıkarım yapılarıyla entegre edilmesini mümkün kılmıştır. Yabuki ve Law (1993) ve Kiliccote ve Garrett (1998) gibi çalışmalarda bu tür çift katmanlı yapılar önerilmiş, ardından Macit (2014) tarafından geliştirilen Dört Katmanlı Temsil Modeli ile hem nesne yönelimli kavramsallaştırma hem de RASE tabanlı anlamsal yapı bütüncül bir sistem içinde birleştirilmiştir.

Daha yakın dönemde, görsel programlama temelli modeller öne çıkmaya başlamıştır. Özellikle Dynamo (Preidel ve Borrmann, 2016) ve Grasshopper (Kim vd., 2019) gibi araçlar, kullanıcıların BIM modelleri üzerinde kural mantığını grafiksel olarak inşa edebilmesini sağlamıştır. Ancak bu modeller, belirli platformlara bağımlı olmaları, mantıksal karmaşıklıkları temsil etme güçlükleri ve genellikle örnek bazlı çözümlere odaklanmaları nedeniyle sınırlı kalmaktadır.
Bunlara paralel olarak, doğal dil işleme (NLP) ve yapay zeka temelli yöntemler, metinlerdeki kuralları otomatik olarak ayrıştırma ve temsil etme alanında umut vadetmektedir. Zhang ve El-Gohary (2016) ve Hettiarachchi vd. (2024) gibi araştırmacılar, yönetmelik metinlerinden otomatik kurallar üretmek üzere sözdizimsel ağaçlar, derin öğrenme modelleri ve görsel gösterimler geliştirmiştir. Ancak bu modeller hala çok cümleli ifadeleri yorumlama, bağlam analizi ve istisnai mantık işleme gibi alanlarda sınırlı kalmakta; detaylı uzman denetimi gerektirmektedir.

Sonuç olarak, literatürdeki tüm bu temsil yaklaşımları, kendi içinde belirli avantajlar sunsa da özellikle tablo referanslı kurallar, bağlama bağlı mantık yapıları ve geometrik/mekansal bileşenlerin entegrasyonu gibi karmaşık yönetmelik yapıları karşısında yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle hem içerik düzeyinde açıklık hem de bina verisiyle bütünlük sunan çok katmanlı ve genişletilebilir modellere ihtiyaç duyulmaktadır.

3. Yöntem

Bu çalışmada, Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmeliğin dijital temsili için Macit (2014) tarafından geliştirilen Dört Katmanlı Temsil modeli benimsenmiştir. Bu model, Nyman ve Fenves (1975) tarafından temellendirilen yapıların, SMARTcodes projesi (Nisbet vd., 2008) kapsamında geliştirilen RASE metodolojisi ile bütünleştirilmesini sağlayan hibrit bir yapı sunmaktadır. Modelin dört katmanı hem yönetmelik kurallarının yapısal çözümlemesine hem de bu kuralların dijital ortamda yürütülmesine olanak tanımaktadır:

1. Tanım Katmanı: Yönetmelikte geçen kavramlar, nesneler ve özellikleri
2. Kural Katmanı: Her bir kural cümlesi
3. Kural Seti Katmanı: Kural cümleleri arası mantıksal ilişkiler (örn. VE, VEYA koşulları)
4. Yönetim Katmanı: Kuralların genel organizasyonu

Bu modelin tercih edilmesinin temel nedenlerinden biri, literatürde yer alan çoğu yaklaşımın ya yalnızca kural mantığına ya da yalnızca veri yapısına (örnek: YBM) odaklanmasıdır. Oysa dört katmanlı temsil modeli, bu iki alanı modüler bir şekilde bir araya getirerek kuralların hem içeriksel hem de bağlamsal olarak modellenmesine olanak tanır. Tanım katmanı, hem kural ifadelerinin dayandığı kavramları (örneğin kapı, kaçış rotası, kullanım alanı gibi) açıkça tanımlar hem de YBM tabanlı bina modellerinde bu kavramlara karşılık gelen veri yapıları ile ilişkilerin tanımlanmasını sağlar. Bu durum kuralların, hem kavramlara dayalı tanımlanmasını, hem de denetlenecek yapı modeliyle ilişkilendirilmesini mümkün kılar.

Ayrıca, dört katmanlı temsil modeli farklı yönetmelik türlerine uyarlanabilir esnekliğe sahiptir. Daha önce İzmir Büyükşehir Belediyesi İmar Yönetmeliği üzerine yürütülen çalışmalarda etkili şekilde uygulanmış olan bu model, çalışma kapsamında yangın güvenliği gibi tablo yoğun, koşullu ve bağlama bağlı kurallar içeren bir yönetmelik için yeniden değerlendirilmiştir.
Çalışma kapsamında yangın yönetmeliği analiz edilerek temsil edilecek kurallar belirlenmiştir. Çalışmada ayrıca yangın yönetmeliğinin sayısal temsili için uzmanlık alanı modeli oluşturulmuştur.

3.1. Yangın yönetmeliğinin analizi

Yapı yönetmelikleri, hükümlerden oluşur ve çoğunlukla yazılı metinlerdir. Hükümler, içerdikleri muğlaklık, cümlelerin birbiri ile olan bağımlılığı ve yazılı metin olmayan görsel içerikleri gibi sebeplerden dolayı birçok karmaşıklık içerir. Bu nedenle, Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmeliğ**i** üzerinde bir analiz gerçekleştirilmiştir. Bu analiz, yönetmeliğin ne kadarının modellenebilir olduğunu belirlemek ve Dört Katmanlı Temsil modeli ile temsil edilmesinde zorluk oluşturan kuralları tespit etmek amacıyla yapılmıştır. Analiz sonrası, yönetmeliğin modellenmesi için gerekli olan uzmanlık alan modeli oluşturulmuştur. Analiz aşaması aşağıdaki adımları kapsamaktadır:

1. Kapsamın belirlenmesi
2. Kural cümlelerinin ayrıştırılması
3. Kural cümlelerinin sınıflandırılması

3.1.1. Kapsamın belirlenmesi

Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik, binalarda yangın güvenliğini sağlarken, yaşamı, mülkiyeti ve çevreyi korumayı amaçlayan kapsamlı bir yasal belgedir. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından yürürlüğe konulan bu yönetmelik, yapıların tasarım, inşa ve işletme aşamalarında uyulması gereken özel önlemleri, kılavuzları ve standartları tanımlar. Yangını önleme, tahliye etkinliği ve hasar azaltma gibi kritik başlıkları ele alarak; yangın risklerini azaltmayı, acil durumlarda güvenli ve etkili tahliyeleri kolaylaştırmayı ve kullanıcılar ile yapılar üzerindeki potansiyel zararları en aza indirmeyi hedefler. Yönetmelik 12 bölümden oluşmaktadır (**Tablo 1**).

Tablo 1. Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik bölümleri

Bölüm No	Bölüm Başlığı	Maddeler
I	*Genel Hükümler, Binaların Kullanım ve Tehlike Sınıfları*	1-19
II	*Binalara İlişkin Genel Yangın Güvenliği Hükümleri*	20-29
III	*Kaçış Yolları, Kaçış Merdivenleri ve Özel Durumlar*	30-52
IV	*Bina Bölümlerine ve Tesislerine İlişkin Düzenlemeler*	53-66
V	*Elektrik Tesisatı ve Sistemleri*	67-84
VI	*Duman Kontrol Sistemleri*	85-89
VII	*Yangın Söndürme Sistemleri*	90-100
VIII	*Tehlikeli Maddelerin Depolanması ve Kullanılması*	101-123
IX	*Yangın Güvenliği Sorumluluğu, Ekipler, Eğitim, Denetim, İşbirliği, Ödenek ve İç Düzenlemeler*	124-137
X	*Mevcut Binalar Hakkında Uygulanacak Hükümler*	138-167
XI	*Tarihi Yapılar*	167/A-C
XII	*Son Hükümler*	168-171

Yangın Yönetmeliği'nde yer alan tüm bölümler incelendiğinde, dijital olarak temsil edilmesi en zorlayıcı maddelerin kaçış ile ilgili hükümler olduğu görülmüştür ve çalışma bu maddelere odaklanmıştır. Zorluklar, söz konusu hükümlerin yönetmeliğin Ekleri arasında yer alan referans tablolarına bağlı olması ve maddelerdeki kıstasların muğlaklıklar içermesinden kaynaklanır.

3.1.2. Kural cümlelerinin ayrıştırılması

Geleneksel uyumluluk denetimi yapı yönetmeliklerinin, kural gerekliliklerini ilgili konu uzmanlarının bilgisine ve deneyimine dayanır. Ancak, yapı yönetmeliklerinin sayısal olarak işlenebilir bir formata dönüştürülebilmesi için, maddelerin cümle bazında çözümlenmesi gerekmektedir. Bu kapsamda, Yangın yönetmeliğinin anlaşılması amacıyla bir analiz gerçekleştirilmiştir. Yapılan analiz sonucunda yönetmelikte üç tür cümle yapısı saptanmıştır: bunlar düzenleyici hükümler, açıklayıcı ve uygulanabilirlik koşulu barındıran ifadelerdir. Bu nedenle, analiz sürecinin ilk adımı olarak yangın yönetmeliğindeki cümlelerin ayrıştırılması yapılmıştır.

Düzenleyici hükümler ya da **kurallar**, yönetmeliklerin uygulanabilirlik açısından kurallarını oluşturur. Bu tür ifadeler, bina tasarımı, inşası veya yaşamına dair zorunluluklar veya kısıtlamalar getirir. Genellikle belirli koşullar altında neyin yapılması ya da yapılmaması gerektiğini tanımlar. Bu tür hükümler, kesin sınırlar tanımlayan "tarifi olan" (prescriptive) ya da bir amaç ya da kıstas belirleyen "performansa dayalı" (performance-based) olabilir. Her iki durumda da düzenleyici hükümler biçimsel temsilde gereksinim (requirement) olarak modellenir ve ilişkili alan kavramlarıyla ilişkilendirilir. Düzenleyici hükümler hesaplanabilir mantığa dönüştürülmesi en kolay olanlardır ve otomatik kural denetim sistemlerinin temelini oluşturur. Düzenleyici hükme örnek olarak, **Madde 34-(3**) verilebilir:

> *"Yangın güvenlik hollerinin taban alanı, 3 m²'den az, 6 m²'den fazla ve kaçış yönündeki boyutu ise 1.8 m'den az olamaz."*

Buna karşılık, **açıklayıcı ifadeler**, düzenleyici hükümlere tanımlayıcı bilgi sağlayan, bağlam sunan ya da açıklık getiren cümlelerdir. Kendi başlarına denetim sağlamasalar de kuralların anlaşılması açısından önemli rol oynarlar. Bu tür ifadeler teknik terimleri tanımlayabilir, istisnaları açıklayabilir ya da genel önerilerde bulunabilir. Aşağıda örnek olarak **Madde 32-(1) yer almaktadır**:

> *"Çıkış genişliği için, çıkış kapıları, kaçış merdivenleri, koridorlar ve diğer kaçış yollarının kapasiteleri 50 cm'lik genişlik birim alınarak hesaplanır. Birim genişlikten geçen kişi sayısı bina kullanım sınıflarına göre Ek-5/B'de gösterilmiştir."*

Tablo 2. 32. Maddenin Ayrıştırılmış hali

Madde Metni	**İfade çeşidi**
Madde 32 – *Çıkış kapasitesi ve kaçış uzaklığı*	
Kullanıcı yükü katsayısı olarak, gerekli kaçış ve panik hesaplarında kullanılmak üzere Ek-5/A'da belirtilen değerler esas alınır.	Açıklayıcı İfade
Çıkış genişliği için, çıkış kapıları, kaçış merdivenleri, koridorlar ve diğer kaçış yollarının kapasiteleri 50 cm'lik genişlik birim alınarak hesaplanır. Birim genişlikten geçen kişi sayısı bina kullanım sınıflarına göre Ek-5/B'de gösterilmiştir.	Açıklayıcı İfade
Kaçış uzaklığı, kullanım sınıfına göre Ek-5/B'de belirtilen değerlerden daha büyük olamaz.	Kural
Kullanılan bir mekan içindeki en uzak noktadan en yakın çıkışa olan uzaklık, Ek-5/B'de belirlenen sınırları aşamaz.	Kural
Odalara, koridorlara ve benzeri alt bölümlere ayrılmış büyük alanlı bir katta, direkt (kuş uçuşu) kaçış uzaklığı Ek-5/B'de izin verilen en çok kaçış uzaklığının 2/3'ünü aşmıyor ise kabul edilir.	Kural
Kaçış uzaklığı ölçülecek en uzak nokta mekan içinde mekanı çevreleyen duvarlardan 40 cm önde alınır.	Açıklayıcı İfade
Yangına en az 60 dakika dayanıklı ve duman geçişi önlenmiş yatay tahliye alanı sağlanan hastane gibi yerlerde kaçış uzaklığı, yatay tahliye alanına götüren koridorun çıkış kapısına kadar olan ölçüdür. Her yatay tahliye alanından en az bir korunumlu kaçış yoluna ulaşılması gerekir.	Kural
Zemin kattaki dükkan ve benzeri yerlerde kişi sayısı 50'nin altında ve kaçış uzaklığı en uzak noktadan dış ortama açılan kapıya olan uzaklık 25 m'den az ise, bina dışına tek çıkış yeterli kabul edilir.	Kural

Son olarak, **uygulanabilirlik koşulları**, belirli bir kuralın hangi bağlamda geçerli olduğunu belirten ifadelerdir. Bu tür cümleler, kuralın ne zaman, nerede ve kim için geçerli olduğunu tanımlar; genellikle bina sınıflandırma sistemlerine, kullanım türlerine, coğrafi bölgelere veya kullanım koşullarına atıfta bulunurlar. Uygulanabilirlik koşulları, bir kuralın hangi senaryolarda geçerli olduğunu tanımlayan ön koşullar gibi çalışır. Aşağıda yer alan **Madde 31-(5),** bu tür bir ifadeye örnektir:

> *"Değişik bölümleri veya katları, değişik tipte kullanımlar için tasarlanan veya içinde aynı zamanda değişik amaçlı kullanımların sürdürüldüğü yapılarda, yapı bütününe veya kat bütününe ilişkin gerekler, en sıkı kaçış gerekleri olan kullanım tipi esas alınarak tespit edilir veya her bir yapı bölümüne ilişkin gerekler ayrı ayrı belirlenir."*

Yapılan ayrıştırma sonucunda, yangın yönetmeliğinin **671 adet kural cümlesi**, **261 adet açıklayıcı ifade** ve **40 adet uygulanabilirlik koşulu** içerdiği tespit edilmiştir. Aşağıda yer alan **Tablo 2**, bu sürece örnek olarak 32. maddenin ayrıştırmasını göstermektedir.

Yönetmelikteki ifadelerinin işlevsel rolünü anlamanın yanı sıra, yapılan analiz maddeler arasındaki ilişkiyi de ortaya koymuştur. Yapı yönetmelikleri nadiren tekil ifadelerden oluşur; aksine, kurallar genellikle birbirine bağlı, karşılıklı bağımlı yapılar oluşturur. Bir kuralın yorumlanması veya uygulanması, çoğu zaman başka bir kuralın varlığına ya da içeriğine bağlıdır. Bu özelliği anlamak ve dijital ortamda temsil edebilmek için, kurallar arası bağımlılık türlerinin sınıflandırılması gereklidir.
İlk ve en basit kategori, **bağımsız** kurallardır. Bu kurallar, tek başlarına anlaşılabilir durumdadır. Tüm gerekli bilgi, tek bir cümle içinde sunulur. Bu yüzden, sayısal olarak işlenebilir mantığa doğrudan dönüştürülmeye en uygun kural tipidir. Örnek olarak aşağıdaki madde verilebilir:

> ***Madde 43-(2)**: "Dairesel merdivenler 9.50 m'den daha yüksek olamaz."*

Buna karşılık, **bağlantılı** kurallar, tam anlamıyla anlaşılabilmek ve uygulanabilmek için dış kaynaklara ya da bağlamsal bilgilere ihtiyaç duyar. Bu kurallar tek başına yeterli değildir; ya tanımlar, ekler, önceki maddeler gibi referanslara dayanırlar ya da başka maddeleri açıklayan veya ayrıntılandıran tamamlayıcı ifadeler içerirler. İki türü vardır. İlk bağlantılı kural türü olan **çapraz referanslı** kurallar, yorumlanabilmeleri için ekler, tablolar veya başka maddelere atıfta bulunur. Örnek olarak Madde 32-(2) verilebilir:

> ***Madde 32-(2)**: "Kaçış uzaklığı, kullanım sınıfına göre Ek-5/B'de belirtilen değerlerden daha büyük olamaz."*

İkinci tür olan **hiyerarşik bağımlı** kurallar, birincil kuralları nitelendirir veya bağlama özgü açıklamalar getirir. Genellikle bir genel kuralın ardından gelen özel durumlar veya alt kurallar şeklinde yapılandırılırlar. Bu yapı insanlar için mantıklı olsa da, özellikle tablo verileri veya kullanım türü gibi koşullarla birleştiğinde dijital temsil açısından önemli bir karmaşıklık yaratabilir. Örnek:

> ***Madde 47-(5)**: "Merdivenden tabii zemin seviyesinde güvenlikli bir alana açılan bütün kaçış yolu kapıları ile bir kattaki kişi sayısının 100'ü geçmesi halinde, kaçış merdiveni, kaçış koridoru ve yangın güvenlik holü kapıları, kaçış yönünde kapı kolu kullanılmadan açılabilecek şekilde düzenlenir."*

Bu tür bağımlılıkların fark edilmesi ve doğru şekilde modellenmesi, kural ayrıştırması, çakışma çözümü ve denetim sırasının belirlenmesi açısından önemlidir.

3.1.3. Kural cümlelerinin sınıflandırılması

Yapı yönetmeliklerinin içerdiği kuralların hepsi kolayca dijitalleştirilebilen kurallar değildir. Modellenebilirlik, bir ifadenin, sayısal sistemler tarafından otomatik olarak kontrol edilebilecek bir yapıya dönüştürülüp dönüştürülemeyeceği tanımlar. Modellenebilirlik yalnızca dilbilgisel netliğe bağlı değildir; aynı zamanda ifadenin ne kadar tam olduğu, başka tablolara veya maddelere bağımlı olup olmadığı ve kullanılan dilin teknik olarak ne kadar net ya da yoruma açık olduğu gibi etmenlere de bağlıdır. Bu özellikler temel alınarak, kurallar üç gruba ayrılabilir:

1. Modellenebilir
2. Yarı-modellenebilir
3. Modellenemez

Modellenebilir Kurallar

Bu tür kurallar, gerekli ise ön hesaplama adımlarının ardından sayısal olarak değerlendirilebilir hale gelir. Yani, çapraz referansların veya hiyerarşik bağımlılıkların çözümlenmesi gibi adımlar tamamlandığında, bu kurallar modellenebilir hale gelir. Örneğin, tabloya veya birden fazla parametreye (örneğin kullanım sınıfı ve kat sayısı) bağlı kurallar bu gruba dahildir, yani bağlam önceden belirlenmişse sayısal olarak işlenebilirler.

> ***Madde 36-(1.a):** "Bir binada veya bina katında, kaçış yolu olarak hizmet veren korunumlu koridorların veya korunumlu hollerin yangına dayanım sürelerinin Ek-3/B ve Ek-3/C'de belirtilen sürelere uygun olması mecburidir."*

Bu tür kuralların modellenebilmesi için, tabloların kural cümleleri ile okunabilmesi gerekmektedir. Gerekli bağlantılar çözümlendiğinde, bu tür kurallar mantıksal ifadeler ya da kısıtlar olarak tanımlanabilir ve bina modeli ile eşlenerek otomatik denetim sürecine entegre edilebilir.

Yarı-modellenebilir Kurallar

Bu kurallar, uzman görüşüne ve bağlamsal yorumlamaya ihtiyaç duyar. Genellikle teknik olarak uygulanabilir olsa da belirsizlikler veya yoruma açık ifadeler içerdiği için net şekilde dijitalleştirilemez. Ancak bir uzman, mesleki bilgisine dayanarak bu kuralları manuel olarak değerlendirebilir.

> ***Madde 48-(3):** "Konut birimlerinden bütün çıkışların, kaçış merdivenlerine veya güvenli bir açık alana doğrudan erişim imkanı sağlayacak şekilde olması gerekir."*

Bu madde eyleme dönük bir niyet taşısa da "doğrudan erişim" gibi ifadeler bağlama ve yoruma bağlıdır. Denetim sürecinde uzmanlar bu kararı deneyimlerine dayanarak verir. Bu tür kurallar, eğer net standartlarla veya açıklayıcı etiketlerle desteklenirse sayısal sistemlere entegre edilebilir; ancak bu tür bir ara yapılandırma olmadan doğrudan modellenemezler.

Modellenemez Kurallar

Bu gruptaki ifadeler genellikle öznel değerlendirme veya kişisel tercihlere dayanır. "Estetik", "uyumlu", "güzel görünümlü" gibi ifadeler teknik ölçütlerle tanımlanamaz ve bu nedenle otomatik denetim sistemleriyle uyumlu

değildir. Yangın yönetmeliği içerisinde bu tür bir kurala rastlanmamıştır. Tablo 3, Açıklanan kavramların yönetmelik maddesinde örnek gösterimini içermektedir.

Tablo 3. Madde-32'nin sınıflandırılması

Madde metini	Kural Tipi	Modellenebilirlik
Çıkış kapasitesi ve kaçış uzaklığı-Madde 32		
Kaçış uzaklığı, kullanım sınıfına göre Ek-5/B'de belirtilen değerlerden daha büyük olamaz.	Çapraz-bağlı	Modellenebilir
Kullanılan bir mekan içindeki en uzak noktadan en yakın çıkışa olan uzaklık, Ek-5/B'de belirlenen sınırları aşamaz.	Çapraz-bağlı	Modellenebilir
Odalara, koridorlara ve benzeri alt bölümlere ayrılmış büyük alanlı bir katta, direkt (kuş uçuşu) kaçış uzaklığı Ek-5/B'de izin verilen en çok kaçış uzaklığının 2/3'ünü aşmıyor ise kabul edilir.	Çapraz-bağlı	Modellenebilir
Her yatay tahliye alanından en az bir korunumlu kaçış yoluna ulaşılması gerekir.	Bağımsız	Modellenebilir
Zemin kattaki dükkan ve benzeri yerlerde kişi sayısı 50'nin altında ve kaçış uzaklığı en uzak noktadan dış ortama açılan kapıya olan uzaklık 25 m'den az ise, bina dışına tek çıkış yeterli kabul edilir.	Üste-bağlı	Modellenebilir

Kural cümlelerinin sınıflandırılması sonucunda, yangın yönetmeliğinde 549 adet bağımsız ve 122 adet bağlantılı kural içerdiği belirlenmiştir. Modellenebilirlik açısından değerlendirildiğinde, 547 kural modellenebilir, 124 kural yarı-modellenebilir olarak sınıflandırılmıştır. Bu çalışmanın kapsamı yalnızca modellenebilir kurallarla sınırlıdır. **Tablo 4**, kural türü ve modellenebilirlik açısından elde edilen sınıflandırma sonuçlarını özetlemektedir.

Tablo 4. Yangın yönetmeliği analizinin bulguları

Kural Tipi	Modellenebilir	Yarı-modellenebilir	Modellenemez
Bağımsız	440 (%66)	109 (%15)	-
Bağlantılı	107 (%16)	15(%2)	-
Toplam	547 (%82)	124 (%17)	-

3.2. Uzmanlık Alan Modeli

Yangın yönetmeliğinin analizinin ve kural ifadelerinin sınıflandırılmasının ardından Dört Katmanlı Temsil modelinin Tanım Katmanı için Uzmanlık Alan Modeli oluşturulma aşaması başlamıştır. Bu aşamada, yönetmelik içinde bahsi geçen kavramlar, nesneler ve özellikleri *uzmanlık alan nesneleri* olarak modellenir. Uzmanlık Alan nesneleri, kurallardan bağımsız şekilde yapılandırılır ve modelleme sürecinde tekrar kullanılabilecek bir kütüphane olarak işlev görür. Bu ayrıştırma sayesinde, kural tanımlarından bağımsız bir alan modeli kurulabilir ve yönetmelikte ileride yapılacak değişikliklerde sistemin tutarlılığı ve sürdürülebilirliği korunur.

Her alan nesnesi, ilgili bir sınıf, özellikler ve gerekiyorsa diğer nesnelerle olan hiyerarşik ilişkileri ile tanımlanır. Bu tanımlar, kapı, duvar, mekan gibi gerçek dünyaya ait bileşenleri, ya da bina türü, kullanım alanı gibi soyut kavramları temsil eder. Uzmanlık Alan modelinin kurallardan bağımsız şekilde oluşturulması, kuralların daha sade yazılmasını sağlar ve oluşturulan modelin Yapı Bilgi Modeli sistemleri ile eşleştirilmesini sağlar. **Tablo 5**, Madde 32 ve 33 ile ilişkili alan nesnelerini göstermektedir. **Şekil 1** ise 32. ve 33. Maddelerin alan nesnelerinin birbiri ile olan ilişkisini göstermektedir.

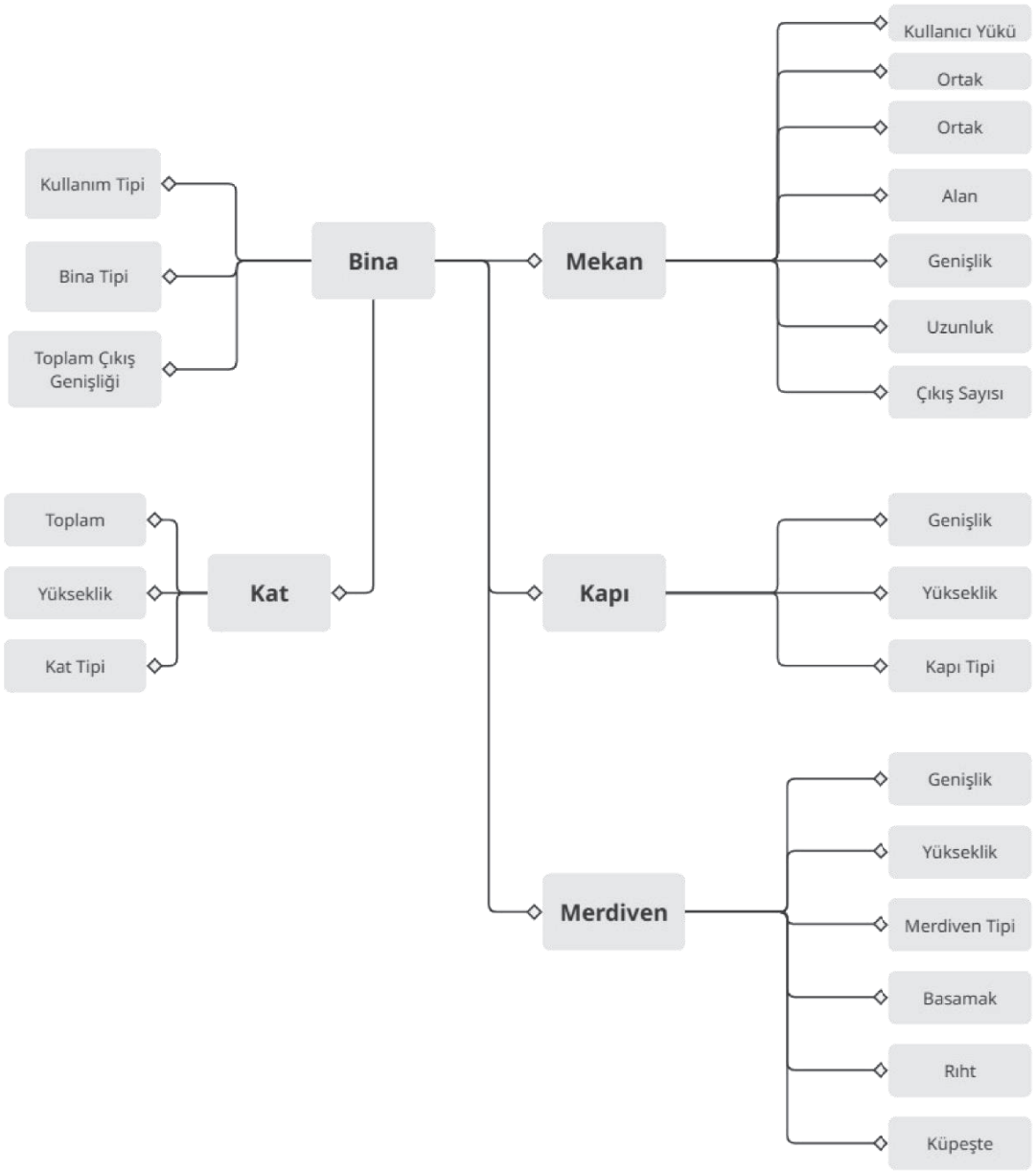
Tablo 5. Madde 32 ve 33 ile ilişkili alan nesneleri

Madde Metni	Alan Nesnesi	Özellik
Çıkış kapasitesi ve kaçış uzaklığı-Madde 32		
3-Kaçış uzaklığı, kullanım sınıfına göre Ek-5/B'de belirtilen değerlerden daha büyük olamaz.	Kaçış Yolu	Uzunluk
4-Kullanılan bir mekan içindeki en uzak noktadan en yakın çıkışa olan uzaklık, Ek-5/B'de belirlenen sınırları aşamaz.	Kaçış Yolu	Uzunluk
5-Odalara, koridorlara ve benzeri alt bölümlere ayrılmış büyük alanlı bir katta, direkt (kuş uçuşu) kaçış uzaklığı Ek-5/B'de izin verilen en çok kaçış uzaklığının 2/3'ünü aşmıyor ise kabul edilir.	Kaçış Yolu	Uzunluk
6-c2-Her yatay tahliye alanından en az bir korunumlu kaçış yoluna ulaşılması gerekir.	Yatay Tahliye Alanı	Kaçış Yoluna Erişim
Zemin kattaki dükkan ve benzeri yerlerde kişi sayısı 50'nin altında ve kaçış uzaklığı en uzak noktadan dış ortama açılan kapıya olan uzaklık 25 m'den az ise, bina dışına tek çıkış yeterli kabul edilir.	Kapı	Çıkış Sayısı
Kaçış yolu sayısı ve genişliği-Madde 33		
1-c1-Toplam çıkış genişliği, 32'nci maddeye göre hesaplanan bir kattaki kullanım alanlarındaki toplam kullanıcı sayısının birim genişlikten geçen kişi sayısına bölümü ile elde edilen değerin 0,5 m ile çarpılması ile bulunan değerden az olamaz.	Kapı	Toplam Çıkış Genişliği
c2-Hiçbir çıkış veya kaçış merdiveni veyahut diğer kaçış yolları, hesaplanan bu değerlerden ve 80 cm'den daha dar genişlikte ve toplam kullanıcı sayısı 50 kişiden fazla olan katlarda bir kaçış yolunun genişliği 100 cm'den az olmayacak şekilde çıkış sayısı bulunur.	Kapı Merdiven Kaçış Yolu	Genişlik
c3-Kaçış yolu, bu özelliği dışında, yapının mekanlarına hizmet veren koridor ve hol olarak kullanılıyor ise, 110 cm'den az genişlikte olamaz.	Kaçış Yolu	Genişlik
2-Yüksek binalarda kaçış yollarının ve merdivenlerin genişliği 120 cm'den az olamaz.	Kaçış Yolu Merdiven	Genişlik
3-Genişliği 200 cm'yi aşan merdivenler, korkuluklar ile 100 cm'den az olmayan ve 160 cm'den fazla olmayan parçalara ayrılır.	Merdiven	Korkuluk Genişliği
Kaçış yolu koridoru yüksekliği 210 cm'den az olamaz.	Kaçış Yolu	Yükseklik
4- İki çıkış gereken mekanlarda, her bir çıkışın toplam kullanıcı yükünün en az yarısını karşılayacak genişlikte olması gerekir.	Mekan	Çıkış Genişliği
5- Tek kanatlı bir çıkış kapısının temiz genişliği 80 cm'den az ve 120 cm'den çok olamaz.	Kapı	Genişlik
6- Bir yapıda veya katlarında bulunan her kullanıcı için, diğer kullanıcıların kullanımında olan odalardan veya mekanlardan geçmek zorunda kalınmaksızın, bir çıkışa veya çıkışlara doğrudan erişim sağlanması gerekir.	Mekan	Kaçış Yoluna Doğrudan Erişim

Yangın Yönetmeliğinde yer alan her kavram, doğrudan bağımsız bir alan nesnesine karşılık gelmemektedir. Bazı kavramlar, belirli özellik değerlerine sahip nesnelerin bir alt kümesini temsil eder. Örneğin, "kapı" ifadesi doğrudan Kapı sınıfına karşılık gelirken, "acil çıkış" ifadesi, yalnızca "çıkışTipi" özelliği belirli bir değere sahip olan kapıları ifade eder. Eğer bu tür alt kümeler için (örneğin "odaÇıkışı", "anaÇıkış" gibi) ayrı sınıflar oluşturulursa, alan modeli gereksiz yere karmaşık hale gelir. Bu sorunu çözmek için, Dört Katmanlı Temsil yaklaşımı içerisinde kavram eşleme tablosu kullanılmaktadır. Bu tabloda, her alt küme için ayrı bir sınıf tanımlamak yerine, kavramlar seçim filtreleri ile ilişkilendirilir. Böylece, kurallar bu alt kavramları kullanarak üst kavramlar üzerinden işlem yapabilir ve her seferinde seçim ölçütlerini yeniden tanımlamaya gerek kalmaz.

Bu yöntem, kural modelinde tutarlılığı artırır ve sistem güncellemelerini kolaylaştırır—çünkü bir kavramın tanımı değiştiğinde, yalnızca eşleme tablosu güncellenir; kuralların tek tek değiştirilmesine gerek kalmaz. Yangın yönetmeliğinin tanımsal, performans tabanlı ve zaman zaman belirsizlik içeren dili dikkate alındığında, bu yaklaşım kuralların daha ölçeklenebilir ve sürdürülebilir bir şekilde modellenmesine olanak tanır. **Tablo 6**, bu kavramsal eşleme yöntemini görsel olarak sunmaktadır.

Uzmanlık Alan Modeli, kuralların modellenebilmesi için gerekli olan tanımları ve tanımlar arası ilişkileri göstermektedir. Yapılan analiz yangın yönetmeliğinin dört katmanlı temsil modeli ile modellenebilirliğini göstermiş ancak yönetmeliğin eklerinde yer alan çok sayıda tabloya referansların bulunduğu ortaya konmuştur. Tablolarda yer alan her hücrenin temsil ettiği olasılık için ayrı bir kural tanımlama gerekliliği ise dört katmanlı temsil modelinin önemli bir kısıtı olarak ortaya çıkmıştır.



Şekil 1. 32. ve 33. Maddelerin Alan Nesne Modeli

Tablo 6. Alan nesnelerinin alt kümelerinin kavram eşlemesi

Kavram	Alan Nesnesi	Özellik	işlem	Değer
odaÇıkışı	Kapı	çıkışTipi	eşittir	odaÇıkışı
acilÇıkış	Kapı	çıkışTipi	eşittir	acilÇıkış
toplamKullanıcıYükü	Mekan	Alan	=	hepsininToplamı
mekanınKullanımYükü	Mekan	ortakOlmayanMekan	eşittir	mekan.alan /bkz.Ek-5/A
tekYönlüEnFazlaUzaklık	kaçışRotasıTipi	çıkışYolu	=	1
çiftYönlüEnFazlaUzaklık	kaçışRotasıTipi	çıkışYolu	=	2
kaçışYolu	Mekan	mekanTipi	eşittir	kaçışYolu
yağmurlamaSistemli	Mekan	yağmurlamaSistemi	boolean	doğru
yağmurlamaSistemsiz	Mekan	yağmurlamaSistemi	boolean	yanlış
kaçışYolunaBitişiklik	Mekan	kaçışYolunaBitişik	boolean	doğru
kuşUçuşuKaçış	Kaçış Yolu	çıkışaDirektGidiş	boolean	Doğru
yüksekBina	Bina	yükseklik	≥	21.50
enAzToplamÇıkışUzunluğu	Bina	toplamGenişlik	eşittir	(mekan.alan/bkz.Ek-5/A)*50
toplamÇıkışGenişliği	Kapı	genişlik	=	hepsininToplamı

4. Sonuçlar

Bu çalışma, Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmeliğin otomatik uyumluluk denetimi açısından dijital olarak temsil edilebilirliğini değerlendirmekte ve Macit (2014) tarafından geliştirilen Dört Katmanlı Temsil modelinin bu bağlamda uygulanabilirliğini test etmektedir. Yönetmelikte yer alan 671 ifade detaylı olarak analiz edilmiş; bu ifadeler içeriklerine (düzenleyici hüküm, açıklayıcı kural, uygulanabilirlik koşulu) ve modellenebilirliklerine göre sınıflandırılmıştır. Elde edilen bulgular, %82 oranında modellenebilir kural bulunduğunu ve bu kuralların sistematik bir modelleme yaklaşımıyla otomatik denetime uygun hale getirilebileceğini göstermektedir.
Bu doğrultuda geliştirilen uzmanlık alan modeli, dört katmanlı temsil modelinin Tanım Katmanını oluşturmuş ve modelin hem kuralları ifade edebilmesi hem de Yapı Bilgi Modelleme sistemleriyle uyumlu çalışabilmesi için kavramsal bir altyapı sunmuştur. Uzmanlık Alan Modeli, yalnızca kural temsiline destek vermekle kalmamakta, aynı zamanda uyumluluk denetimi yapılacak bina modelinde de kuralların referans verdiği tüm kavramların açık ve tutarlı şekilde bulunmasını sağlamaktadır.

Bununla birlikte, Uzmanlık Alan Modeli oluşturulurken çeşitli zorluklarla karşılaşılmıştır. Özellikle yönetmelikte yer alan tabloların çok katmanlı ve bağlama bağlı içerik yapısı, bu verilerin modele doğrudan entegre edilmesini güçleştirmiştir. Aynı kavramın farklı tablolarda farklı özelliklerle tanımlanması, kavram eşleme sürecinde her bir satırın bağımsız nesne gibi ele alınmasını gerektirmiştir. Ayrıca, "kaçış rotası uzunluğu" gibi kavramların Yapı Bilgi Modellerinde doğrudan yer almaması, bu değerlerin uzmanlar tarafından hesaplandığı manuel süreçlere bağımlı kalmasına yol açmaktadır. Bu tür kavramlar için modelde ön hesaplama stratejilerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu noktada, Kural Katmanına geçmeden önce karşılaşılan bu yapısal sorunlar, Dört Katmanlı Temsil modelinin mevcut haliyle yangın yönetmeliğinin tablolara dayalı kural tanımlarını temsil etmekte yetersiz kaldığını ve geliştirilmesinin gerektiğini göstermektedir. Dört Katmanlı Temsil Modelinin "ön-hesaplama" ve "tablo çözümleme" modülleri ile geliştirilmesi faydalı olacaktır. Bu çalışma yangın yönetmeliği gibi karmaşık ve veri yoğun bir yönetmeliğin dijitalleştirilmesinde Dört Katmanlı Temsil modelinin pratik sınırlılıklarını görünür kılarak, modelin gelecekteki sürümleri için genişleme alanlarını tanımlamaktadır.

KAYNAKLAR

Balaban, Ö., Yagmur Kilimci, E., ve Cagdas, G. (2012). Automated Code Compliance Checking Model for Fire Egress Codes. *Proceedings of the 30th eCAADe Conference*, Vol. 2.

Beach, T. H., Rezgui, Y., Li, H., ve Kasim, T. (2015). A rule-based semantic approach for automated regulatory compliance in the construction sector. *Expert Systems with Applications*, *42*(12), 5219–5231.

Dym, C., Henchey, R. P., Delis, E. A., ve Gonick, S. (1988). A Knowledge-Based System for Automated Architectural Code-Checking. *Computer-Aided Design*, *20*(3), 137-145.

Eastman, C., Lee, J., Jeong, Y., ve Lee, J. (2009). Automatic rule-based checking of building designs. *Automation in Construction*, *18*(8), 1011–1033.

Fenves Steven J. (1966). Tabular Decision Logic for Structural Design. *Journal of the Structural Division*, *92*(6), 473–490.

Fenves, Steven, Gaylord, E. ve Goel, S.K. (1969). Decision Table Formulation of The 1969 Aisc Specification. *Civil Engineering Studies* SRS-347.

Fenves, S. J., Wright, R. N., Stahl, F. I., ve Reed, K. A. (1987). *Introduction to SASE :standards analysis, synthesis, and expression*. Technical Report 87-3513, National Bureau of Standards, NBSIR.

Fuchs, Stefan. (2021). Natural Language Processing for Building Code Interpretation: Systematic Literature Review Report. 10.13140/RG.2.2.29107.55845.

Fuchs, S., Witbrock, M., Dimyadi, J., ve Amor, R. (2024). *Using Large Language Models for the Interpretation of Building Regulations*, arXiv:2407.21060 https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.21060

Hassan, F. ul, ve Le, T. (2020). Automated Requirements Identification from Construction Contract Documents Using Natural Language Processing. *Journal of Legal Affairs and Dispute Resolution in Engineering and Construction*, *12*(2).

Hettiarachchi, H., Dridi, A., Gaber, M. M., Parsafard, P., Bocaneala, N., Breitenfelder, K., Jutglar, G. C., Hedblom, M. M., Juganaru-Mathieu, M., Mecharnia, T., Park, S., Tan, H., Tawil, A.-R. H., & Vakaj, E. (2024). CODE-ACCORD: A Corpus of building regulatory data for rule generation towards automatic compliance checking. *Scientific Data*, *12*.

Hjelseth, E., ve Nisbet, N. N. (2011). Capturing normative constraints by use of the semantic mark-up RASE methodology. *Proceedings of CIB W78-W102 Conference* (pp. 1-10).

Jain, D., Law, K. H., ve Krawinkler, H. (1989). On Processing Standards with Predicate Calculus. *Sixth Conference on Computing in Civil Engineering*, Atlanta, Georgia.

Jiang, L., Shi, J., ve Wang, C. (2022). Multi-ontology fusion and rule development to facilitate automated code compliance checking using BIM and rule-based reasoning. *Advanced Engineering Informatics*, *51*.

Kiliccote Han ve Garrett James H. (1998). Standards Modeling Language. *Journal of Computing in Civil Engineering*, *12*(3), 129–135.

Kim, H., Lee, J.-K., Shin, J., ve Choi, J. (2019). Visual language approach to representing KBimCode-based Korea building code sentences for automated rule checking. *Journal of Computational Design and Engineering*, *6*(2), 143–148.

Liu, J., Duan, L., Lin, S., Miao, J., ve Zhao, J. (2024). Semantic Web-Based CRUD Operation and Constraint Validation for IFC-Based Information Management. *Journal of Construction Engineering and Management*, *150*(10).

Macit, Sibel. (2014). *Computer Representation of Building Codes for Automated Compliance Checking*, [Doctoral Dissertation, İzmir Institute of Technology].

Nawari, N. O., ve Alsaffar, A. (2015). Understanding Computable Building Codes. *Civil Engineering and Architecture*, *3*(6), 163–171.

Nisbet, N., Wix, J., ve Conover, D. (2008). The Future of Virtual Construction and Regulation Checking. In *Virtual Futures for Design, Construction ve Procurement* (pp. 241–250).

Nyman, D. J., ve Fenves, S. J. (1975). Organizational Model for Design Specifications. *Journal of the Structural Division*, *101*(4), 697–716.

Pauwels, P., Van Deursen, D., Verstraeten, R., De Roo, J., De Meyer, R., Van de Walle, R., ve Van Campenhout, J. (2011). A semantic rule checking environment for building performance checking. *Automation in Construction*, *20*(5).

Preidel, C., ve Borrmann, A. (2016). Towards code compliance checking on the basis of a visual programming language. *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, *21*(25), 402–421.

Rasdorf, W. J., ve Lakmazaheri, S. (1990). Logic-Based Approach for Modeling Organization of Design Standards. *Journal of Computing in Civil Engineering*, *4*(2), 102–123.

Rasdorf William J. ve Wang TsoJen E. (1988). Generic Design Standards Processing in an Expert System Environment. *Journal of Computing in Civil Engineering*, *2*(1), 68–87.

Rosenman, M. A., ve Gero, J. S. (1985). Design codes as expert systems. *Computer-Aided Design*, *17*(9), 399–409.

Solihin, W., & Eastman, C. (2016). A knowledge representation approach in BIM rule requirement analysis using the conceptual graph. *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, *21*(24), 370–401.

Xue, X., & Zhang, J. (2020). Evaluation of Seven Part-of-Speech Taggers in Tagging Building Codes: Identifying the Best Performing Tagger and Common Sources of Errors. *Construction Research Congress 2020* (pp. 498-507). Reston, VA: American Society of Civil Engineers.

Yabuki, N., & Law, K. H. (1993). An Object-Logic model for the representation and processing of design standards. *Engineering with Computers*, *9*(3), 133–159.

Yin, M., Tang, L., Webster, C., Xu, S., Li, X., & Ying, H. (2023). An ontology-aided, natural language-based approach for multi-constraint BIM model querying. *Journal of Building Engineering*, *76*, 107066.

Yurchyshyna, A., Zarli, A., Zucker, C. F., & Le Thanh, N. (2008). Towards an ontology-based approach for formalizing expert knowledge in the conformity-checking model in construction. In *eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction* (pp. 461-470). CRC Press.

Zhang, C., Beetz, J., & Vries, de. (2018). BimSPARQL: Domain-specific functional SPARQL extensions for querying RDF building data. *Semantic Web*, 1–27.

Zhang Jiansong & El-Gohary Nora M. (2016). Semantic NLP-Based Information Extraction from Construction Regulatory Documents for Automated Compliance Checking. *Journal of Computing in Civil Engineering*, *30*(2), 04015014.

Zhang Zijing, Ma Ling, & Broyd Tim. (2022). Towards fully-automated code compliance checking of building regulations: Challenges for rule interpretation and representation. *Computing in Construction*, *3*.

MSTAS 2025 MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Acil Durum Toplanma Alanlarının Ulaşılabilirliğin Ölçülmesi: İzmir odağında Eğitim ve Sağlık Yapılarının İncelenmesi

Esma Selen Aksoy[1]; Burcu Kısmet Conk[2]; Meryem Birgül Çolakoğlu[3]
[1]Istanbul Technical University; [2]Beykoz University; [3]Istanbul Technical University
[1] aksoye@itu.edu.tr ; [2]burcukismet@beykoz.edu.tr; [3]colakoglumer@itu.edu.tr

Özet

Acil durum toplanma alanları (ADTA), depremler gibi kriz anlarında kent yaşamında bireylerin güvenliği ve refahını sağlama konusunda hayati bir rol oynamaktadır. Bu alanlar özellikle çocuklar, yaşlılar ve hastalar gibi hassas gruplara hizmet veren eğitim ve sağlık yapıları için kritik öneme sahiptir. Deprem riski yüksek bir şehir olan İzmir'de, bu alanların erişilebilirliğinin ve etkinliğinin sağlanması büyük bir öncelik taşımaktadır. Bu çalışma, ileri düzey coğrafi analiz araçları ve kentsel veri analizi tekniklerini kullanarak eğitim ve sağlık yapıları için ADTA'ların erişilebilirliğini ve uygunluğunu değerlendirmeye yönelik sistematik bir çerçeve geliştirilmesini hedeflemektedir. Bu araştırmanın temel amacı, İzmir'deki acil durum toplanma alanları ve acil durum toplanma alanı olarak belirlenebilecek park ve meydanların erişilebilirliğini değerlendirmek ve bu değerlendirmelere yönelik yöntem önermektir. Yakınlık, kapasite, yeterlilik gibi faktörlerin incelenmesiyle mevcut durumun ortaya konması belirlenmesi ve iyileştirmeye yönelik öneriler sunulması hedeflenmektedir. Bu sayede, kentsel altyapılar için daha güvenli ortamlar yaratılarak acil durum hazırlığının artırılmasına katkı sağlanacaktır. Bu çalışma açık kaynaklı gerçek zaman verisine dayalı kentsel bir analizdir. Çalışmada, QGIS, ArcGIS ve Overpass Turbo gibi coğrafi analiz araçları ile OpenStreetMap (OSM) gibi açık kaynaklı kentsel verilerin entegre edildiği karma yöntemler kullanılmıştır. QGIS ve ArcGIS, mekânsal veri analizi ve görselleştirme süreçlerinde kullanılarak erişilebilirlik örüntülerinin ve boşluklarının tespit edilmesini sağlamaktadır. Overpass Turbo, OpenStreetMap verilerinin aktarılması ve sorgulanmasında kullanılmakta; Google Earth ise ek veri noktalarının tanımlanması ve doğrulanması amacıyla tercih edilmektedir. Excel, kesişim verilerinin ve erişilebilirlik ölçütlerinin analiz edilmesi ve görselleştirilmesi için kullanılmaktadır. Araştırmanın bulgularına göre bazı eğitim ve sağlık yapılarının en yakın ADTA'ya önerilen yürüme mesafesinin dışında yer aldığı görülmüş ve bu durumun acil durumlarda risk oluşturduğu belirlenmiştir. Ayrıca, birçok ADTA'nın çevresindeki nüfus yoğunluğunu, özellikle yoğun saatlerde, karşılayabilecek kapasiteden yoksun olduğu saptanmıştır. Yönlendirmelerdeki eksiklikler ve engebeli arazi koşulları gibi faktörler, erişilebilirlikte ek engeller yaratmaktadır. Çalışma, güvenli kentsel çevrelerin geliştirilmesi ve toplulukların kriz anlarındaki dayanıklılığının artırılması için yerel ve merkezi yönetimlere katkı sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Afet ve acil toplanma alanı, erişilebilirlik, veri odaklı tasarım, veri odaklı kentsel analiz.*

2025 MSTAS MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU
28.06.2025 - 02.07.2025

Measuring the Accessibility of Emergency Assembly Areas for Educational and Healthcare Buildings in Izmir

Esma Selen Aksoy [1]; Burcu Kısmet Conk [2]; Meryem Birgül Çolakoğlu [3]
[1]Istanbul Teknik Üniversitesi; [2]Beykoz Üniversitesi; [3]Istanbul Teknik Üniversitesi
[1]aksoye@itu.edu.tr; [2]burcukismet@beykoz.edu.tr; [3]colakoglumer@itu.edu.tr

Abstract

Emergency Assembly Areas (EAAs) play a vital role in ensuring the safety and well-being of individuals during crises such as earthquakes in urban environments. These areas are particularly critical for education and healthcare facilities that serve vulnerable groups, including children, the elderly, and patients. In İzmir, a city with a high risk of earthquakes, ensuring the accessibility and effectiveness of EAAs is a major priority. This study aims to develop a systematic framework for evaluating the accessibility and adequacy of EAAs for educational and healthcare facilities, using advanced geographic analysis tools and urban data analysis techniques. The primary objective of this research is to assess the accessibility of existing EAAs, as well as parks and squares that could function as EAAs, and to propose evaluation methodologies tailored to the context of İzmir. By examining factors such as proximity, capacity, and adequacy, the study seeks to diagnose the current situation and provide recommendations for improvement, thereby contributing to the creation of safer urban environments and enhancing emergency preparedness. The research is based on an urban analysis using real-time open-source data. A hybrid methodology integrating geographic analysis tools such as QGIS, ArcGIS, and Overpass Turbo with open-source urban data from OpenStreetMap (OSM) is employed. QGIS and ArcGIS are utilized for spatial data analysis and visualization to identify accessibility patterns and gaps, while Overpass Turbo is used to extract and query OSM data. Google Earth is applied for identifying and verifying additional data points, and Excel is used for analyzing and visualizing intersection data and accessibility metrics. The findings indicate that some educational and healthcare facilities fall outside the recommended walking distance to the nearest EAA, posing risks in emergency situations. Furthermore, many EAAs are found to lack the capacity to accommodate the surrounding population, particularly during peak hours. Additional barriers to accessibility are created by deficiencies in wayfinding infrastructure and challenging terrain conditions. This study contributes to local and central authorities by providing insights to support the development of safer urban environments and to enhance community resilience during crises.

Keywords: *Emergency Assembly Areas, accessibility, data-driven design, data-driven urban analysis.*

1. Giriş

Acil durum toplanma alanları (ADTA), depremler gibi doğa kaynaklı afet ve her türlü kriz anlarında kent yaşamında bireylerin güvenliği ve refahını sağlama konusunda hayati bir rol oynamaktadır. Özellikle, kriz anlarında kent sakinlerinin güvenliğini sağlamak, geçici barınma ihtiyaçlarını karşılamak ve bilgi akışını sürdürmek için kritik bir role sahiptir. Türkiye Afet Müdahale Planı (TAMP) ve Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) tarafından yapılan tanımlamaya göre, acil durum toplanma alanları; tehlikeden uzak, altyapısı hazır, geçici süreli barınma ve temel yaşam desteğinin sağlanabileceği yerlerdir (AFAD, 2021). AFAD'a göre acil durum toplanma alanları, afet sonrasında geçici barınma ve acil ilkyardım gibi temel yaşamsal fonksiyonların gerçekleşeceği; insanların güvenliğini korumak, tedarik zincirindeki aksamaları önlemek, bilgi akışını sağlamak amacıyla tehlikeden uzak olarak planlanmış toplanma alanlarıdır. Bu alanlar özellikle çocuklar, yaşlılar ve hastalar gibi hassas gruplara hizmet veren, kamuya açık olan eğitim ve sağlık yapıları için kritik öneme sahiptir.

Özellikle İzmir gibi deprem riski yüksek bölgelerde, bu alanların erişilebilirliği, kapasitesi ve doğru planlanması hayati önem taşımaktadır. Türkiye Deprem Tehlike Haritası'na göre İzmir, yüksek sismik risk taşıyan iller arasında yer almakta ve aktif fay hatları üzerinde konumlanmaktadır (Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi, 2018). İzmir'de son yıllarda yaşanan yıkıcı depremler (örneğin 30 Ekim 2020 İzmir-Samos Depremi) sonrası, afet yönetim planlarının merkezinde acil durum toplanma alanlarının bulunması gerektiği bir kez daha netleşmiştir. Deprem riski yüksek bir bölge olan İzmir'de, bu alanların erişilebilirliğinin ve etkinliğinin sağlanması büyük bir öncelik taşımaktadır. Bu çalışmada, özellikle eğitim ve sağlık yapılarının bu alanlara erişiminin sistematik bir şekilde analiz edilmesi ve iyileştirilmesi hedeflenmekte, böylece afet hazırlık kapasitesinin güçlendirilmesine katkı sağlanması amaçlanmaktadır.

Bu çalışma, eğitim ve sağlık yapıları için ADTA'ların erişilebilirliğini ve uygunluğunu değerlendirmeye yönelik sistematik bir çerçeve geliştirilmesini, ileri düzey coğrafi analiz araçları ve kentsel veri analizi teknikleri kullanarak amaçlamaktadır. Bu araştırmanın temel amacı, seçilen ilçelerdeki belirli okul ve hastanelerin İzmir'deki acil durum toplanma alanları ve acil durum toplanma alanı olarak belirlenen alanlara erişilebilirliğini değerlendirmek ve bu değerlendirmelere yönelik standart bir metodoloji önermektir. Yakınlık, kapasite ve arazi koşulları gibi faktörlere göre oluşturulan yürüme suresi odaklı çerçeve ile bu alanlardaki mevcut eksikliklerin belirlenmesi ve iyileştirmeye yönelik hedef odaklı önerilere alt yapı oluşturulması hedeflenmektedir. Bu sayede, kentsel altyapılar için daha güvenli ortamlar yaratılarak acil durum hazırlığının artırılmasına katkı sağlanacaktır.

1.1. Veri Odaklı Tasarım ve Kentsel Analiz

Günümüzün hızla dijitalleşen dünyasında ve Endüstri 4.0 çağında veri, tasarım ve planlama süreçlerinin en kritik bileşenlerinden biri haline gelmiştir. Endüstri 4.0 çağında, veri yalnızca bilgi değil, aynı zamanda karar verme süreçlerinde aktif bir tasarım girdisi olarak kabul edilmektedir (Sawhney vd., 2020; Xu vd., 2018). Veri odaklı tasarım yaklaşımları kent planlama ve afet yönetimi gibi alanlarda yeni olanaklar sunmaktadır. Özellikle gerçek zamanlı veriye dayalı karar alma mekanizmalarının önemi, kentsel ölçekteki karar alma süreçlerinde giderek artmaktadır. Gerçek zamanlı veri analizi, coğrafi bilgi sistemleri (GIS) ve hesaplamalı tasarım (computational design) teknikleri, karmaşık kentsel sistemleri anlamak ve optimize etmek için güçlü araçlar sağlamaktadır (Batty, 2018). Veri odaklı tasarım, mekânsal analizler ve veri modellemesi gibi yöntemlerle, acil durum altyapılarının performansını önceden simüle edebilme ve farklı senaryolar altında riskleri minimize etme imkânı sunmaktadır. Özellikle açık kaynaklı verilerin, GIS ve üretken analiz yöntemleriyle birlikte kullanılması, afet anlarında bireylerin güvenli şekilde toplanabileceği alanların erişilebilirliğini ölçmede etkili olmaktadır (Goodchild & Glennon, 2010).

Son yıllarda afet yönetimi ve acil durum planlaması alanlarında, GIS ve veri analitiği temelli yöntemlerin kullanımı giderek artmaktadır. Özellikle depremler gibi doğa kaynaklı afetler sonrasında, mevcut acil durum toplanma alanlarının erişilebilirliğini ve yeterliliğini analiz etmek için mekânsal veri temelli yaklaşımlar kritik bir rol oynamaktadır. Örneğin, Şahin ve Yılmaz (2019) tarafından yapılan bir çalışmada, deprem sonrası tahliye ve toplanma alanlarının uygunluğu, GIS tabanlı çok kriterli karar verme (MCDM) yöntemleriyle değerlendirilmiş ve kent içi risk bölgeleri ile güvenli alanlar arasındaki erişim süreleri modellenmiştir. Benzer şekilde, Cutter vd. (2013) geliştirdiği "toplumsal hassasiyet indeksi" (SoVI), afet riskine maruz kalan nüfusun mekânsal dağılımını veri odaklı bir yaklaşımla analiz ederek afet öncesi müdahale stratejilerinin belirlenmesine katkı sağlamıştır. Kısmet (2022), etmen tabanlı modelleme ve mekân dizimi yöntemini kullanarak Bağdat Caddesi'nde seçilen bir pilot bölgenin deprem toplanma alanlarına erişilebilirliğini ortaya koymuştur. Çakıcı (2020) da insanları acil durum davranışlarını etmen tabanlı modelleme ile simüle etmiştir. Wang ve

Liu (2020) çalışmalarında gerçek zamanlı sosyal medya verileriyle acil durum toplanma alanlarının etkinliğini analiz etmiş, bu yaklaşımın hızlı karar verme süreçlerinde önemli avantajlar sağladığını göstermiştir. Ayrıca, Aksha vd. (2020) tarafından yapılan bir araştırmada, Nepal'deki kentsel alanlarda açık veri kaynaklarının ve GIS destekli mekânsal modellemenin afet risk yönetiminde kritik bir araç olduğu vurgulanmıştır. Bu tür çalışmalar, gerçek zamanlı veri toplama, analiz ve görselleştirmenin afet dayanıklılığı açısından önemini ortaya koymakta ve acil durum toplanma alanlarının bilimsel temelli planlamasının gerekliliğini desteklemektedir. Bu bağlamda, veri odaklı kentsel analiz ve hesaplamalı tasarım teknikleri, yalnızca mevcut durumu analiz etmekle kalmayıp aynı zamanda geleceğe yönelik dirençli şehir stratejileri geliştirmek için de kritik bir rol oynamaktadır.

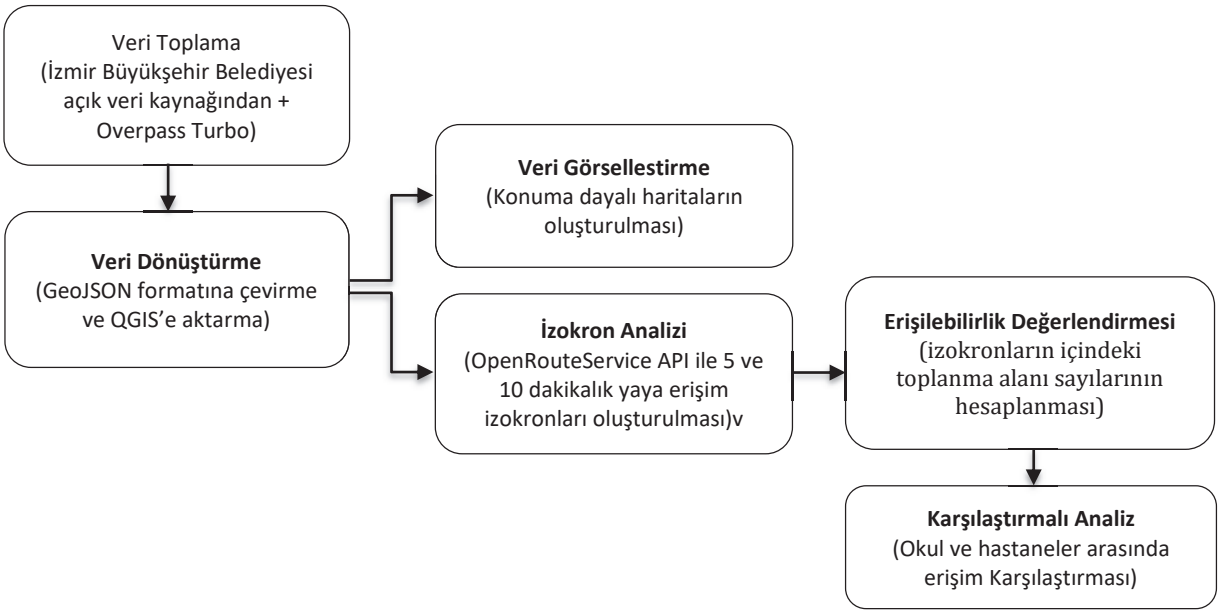
1.2. Çalışmanın Özgün Değeri

Bu çalışma, sayısal tasarım araçları ile afet dayanıklılığına yönelik kentsel karar alma süreçleri arasında simbiyotik bir ilişki kurmayı hedeflemektedir. Coğrafi bilgi sistemleri (QGIS, ArcGIS), açık kaynaklı kentsel veriler (OpenStreetMap) ve parametrik erişim analizleri (izokron haritalama) gibi dijital teknolojiler, yalnızca verileri görselleştirmek amacıyla değil, aynı zamanda planlama kararları yönlendiren aktif bir ortak olarak kullanılmaktadır. Bu şekilde çalışmada, yalnızca mevcut kentsel veri setlerini kullanmakla kalmayıp, sahaya dayalı doğrulama süreçleri ile veri güncelliği ve doğruluğunu artırarak, afet senaryoları için gerçekçi analizler üretmeyi amaçlamaktadır. Çalışmanın sunduğu metodoloji, hesaplamalı tasarım yaklaşımlarının sunduğu GIS ve veri odaklı analiz olanaklarını kullanarak, afet dayanıklılığına yönelik mekânsal karar alma süreçlerini sistematik ve tekrarlanabilir hale getirmektedir. Sayısal tasarım araçları sayesinde, farklı senaryolara göre optimize edilebilen esnek analiz modelleri geliştirilerek, ADTA'nın planlaması ve erişilebilirliğinin irdelenmesi sürecinde geleneksel yöntemlerin ötesine geçilmesi hedeflenmektedir.

Eğitim ve sağlık yapılarının acil durum toplanma alanlarına erişimi, bu dijital araçlarla analiz edilerek mimari mekânların güvenli kent altyapısına katkısı değerlendirilmiştir. Böylece, geleneksel mimari yaklaşımın ötesine geçilerek, teknoloji ile kurulan simbiyotik iş birliği sayesinde afet senaryolarına hazırlıklı, dayanıklı ve kapsayıcı mekânların planlanmasına katkı sağlanmaktadır. Aynı zamanda da çalışma, mekânsal erişim boşluklarının hem görsel hem de sayısal olarak belirlenmesi, geleneksel niteliksel planlama yaklaşımlarına yenilikçi, veri odaklı bir kentsel analiz yöntemini alternatif olarak sunmaktadır. Çalışma mimarlık ve dijital teknolojilerin birlikte çalıştığı, birbirini dönüştürdüğü bir bağlamda ele almakta ve özellikle veri odaklı tasarım yaklaşımlarının kriz yönetimiyle entegre edilmesini sağlamaktadır.

2. Yöntem

Çalışmada, İzmir'in beş ilçesinde acil toplanma alanlarının okul ve hastanelerden yaya erişilebilirliği analiz edilmiştir ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Çalışmanın genel akışı aşağıdaki belirtilmiştir (**Şekil 1**).



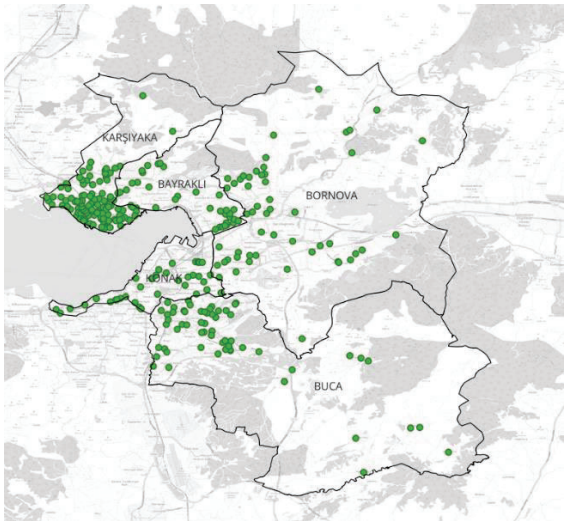
Şekil 1. Akış diyagramı

2.1. Veri Toplama ve Aktarma

İlçe sınırları verisi, toplanma alanları verisi İzmir Büyükşehir Belediyesi açık veri kaynağından alınmıştır. Ancak okul ve hastaneler Overpass Turbo yardımı ile OSM'den çekilmiştir. Overpass Turbo, OpenStreetMap (OSM) altyapısını kullanan bir sorgu aracıdır. OpenStreetMap, dünya çapında kullanıcılar (crowdsourcing) tarafından katkı sağlanan, açık kaynaklı bir harita projesidir. Bu nedenle bilinir ve popüler olan fonksiyonların lokasyon verisi için sıklıkla kullanılmaktadır.

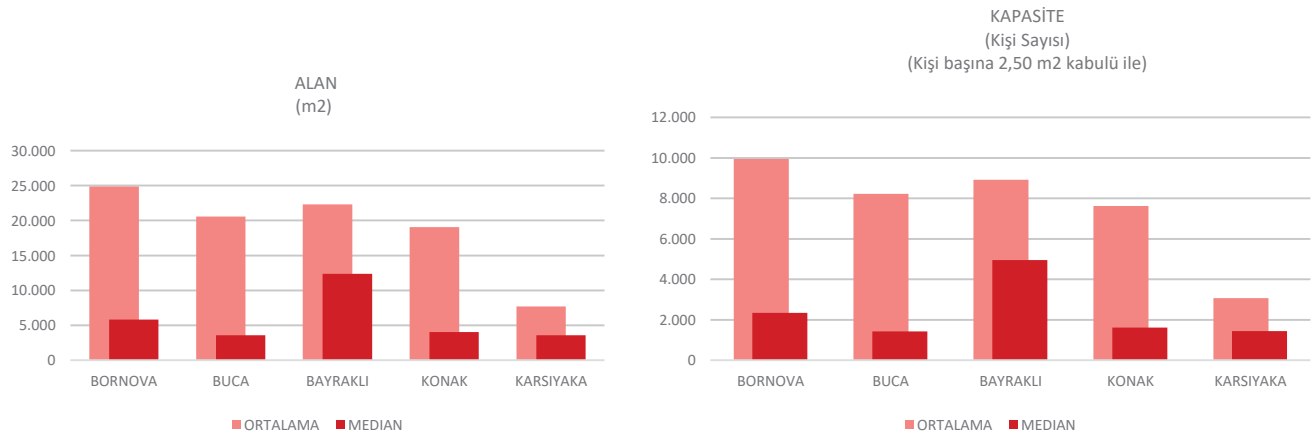
2.2. Veri Dönüşümü ve Görselleştirme

İzmir Belediyesi açık veri platformundan alınan veriler Geojson formatına dönüştürülerek görselleştirilebilir ve analizler için kullanılabilir hale getirilmiştir. Seçilen 5 ilçe, İzmir Belediyesinin 11 merkez ilçesinden en yoğun yerleşim alanlarının ve nüfusun olduğu ilçelerdir. Bu ilçeler Bornova, Buca, Bayraklı, Karşıyaka ve Konak'tır. Bu ilçelerde bulunan toplanma alanları aşağıdaki haritada görselleştirilmiştir (**Şekil 2**).



Şekil 2. İzmir'in 5 ilçesinde bulunan Afet toplanma alanları

Yapılan analiz, İzmir'in beş ilçesindeki Acil Durum Toplanma Alanlarının ortalama büyüklükleri ve kişi kapasiteleri açısından önemli farklılıklar barındırdığını ortaya koymaktadır. Bornova, ortalama 24.884 m² alana ve 9.954 kişilik kapasiteye sahip alanlarıyla, en yüksek ortalamaya sahip ilçelerden biridir. Buca ise 20.568 m² ortalama alan ve 8.227 kişilik kapasite ile Bornova'yı takip etmektedir. Bayraklı'da ortalama alan büyüklüğü 22.311 m², ortalama kişi kapasitesi ise 8.924 olup bu iki ilçeye benzer düzeyde dengeli bir yapı sergilemektedir. Konak'ta ise ortalama alan büyüklüğü 19.046 m², ortalama kapasite ise 7.618 kişidir. Karşıyaka'da da alan başına düşen ortalama büyüklük 7.691 m², ancak ortalama kapasite yalnızca 3.076 kişi olarak hesaplanmıştır (**Şekil 3**).

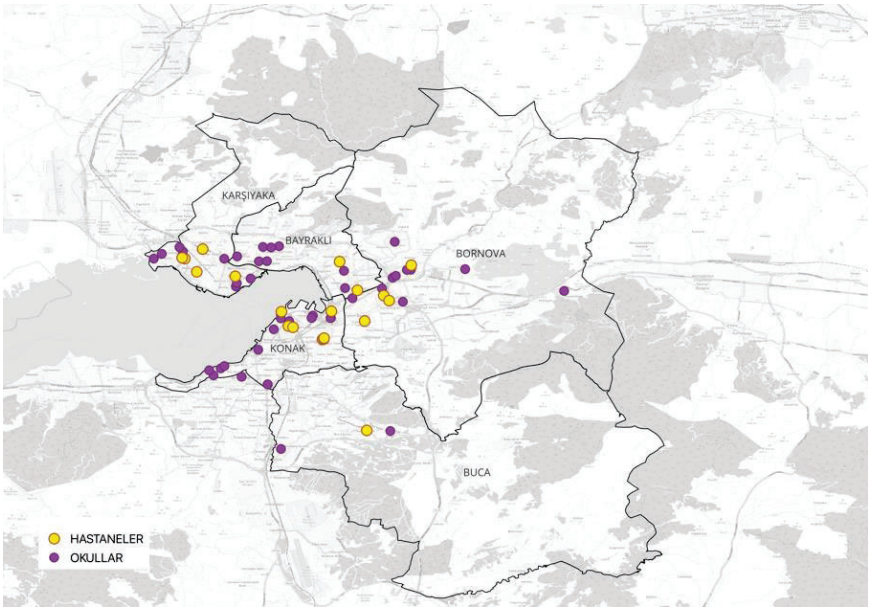


Şekil 3. İzmir'in 5 ilçesinde bulunan Afet toplanma alanları Ortalama alan ve toplam alan karşılaştırması

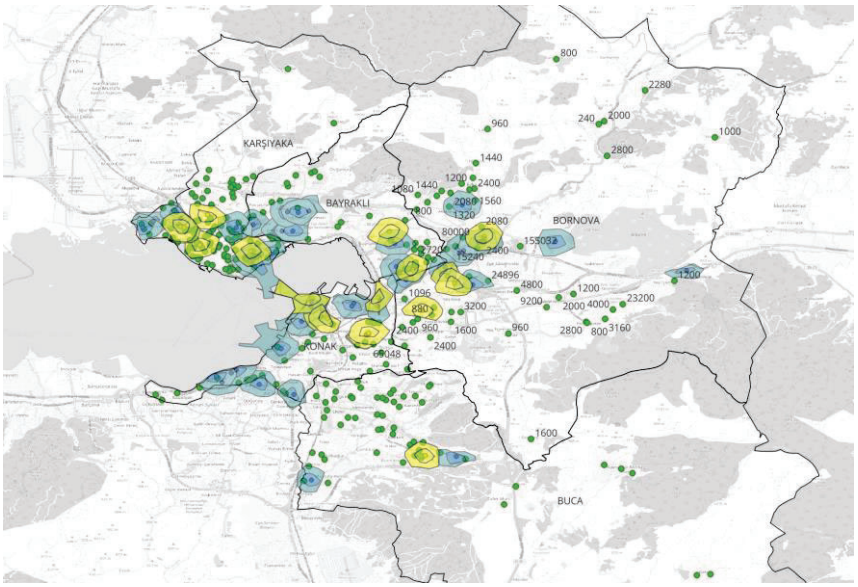
Bu sonuçlar, özellikle Karşıyaka ve Konak ilçelerinde acil durum toplanma alanlarının hem küçük hem de yetersiz olduğunu, afet anlarında bu bölgelerde ciddi erişim ve kapasite problemleri yaşanabileceğini göstermektedir. Buna karşın Bornova ve Buca gibi ilçelerde daha geniş ve fonksiyonel alanların bulunduğu görülmektedir. Bayraklı ise orta ölçekli bir yapı sunmakta ve kentsel planlamada bu tür alanların çeşitlendirilmesine yönelik potansiyel taşımaktadır.

2.3. Yakınlık ve İzokron Analizi

Seçilen 5 ilçe içinde Openstreetmap verilerine göre Overpassturbo ile aktarılan okul ve hastane verileri Qgis programında işlenmişir (**Şekil 4**). Okul ve hastanelerin 5 ve 10 dakikalık mesafelerde erişebildikleri toplanma alanlarını kıyaslamak için izokron haritaları oluşturulmuştur (**Şekil 5**). Bu izokronlar, OpenRouteService API kullanılarak yaya erişimine açık cadde ve sokak ağı üzerinden, her yapının merkez noktasından itibaren 15 dakikalık yürüme mesafesini kapsayacak şekilde oluşturulmuştur; OpenRouteService, açık kaynaklı OpenStreetMap verilerini temel alarak rota planlama, izokron analizleri ve ulaşım ağlarına dayalı erişim hesaplamaları sunan bir coğrafi servis platformudur (Hecht vd., 2019).



Şekil 4. İzmir'in 5 ilçesinden seçilen okul ve hastane yapıları

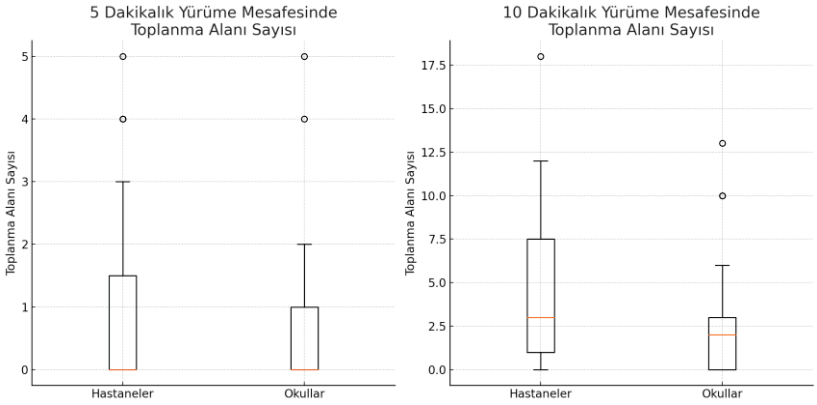


Şekil 5. İzmir'in 5 ilçesinden seçilen okul ve hastane yapılarının 5 ve 10 dakikalık izokron haritası

3. Bulgular

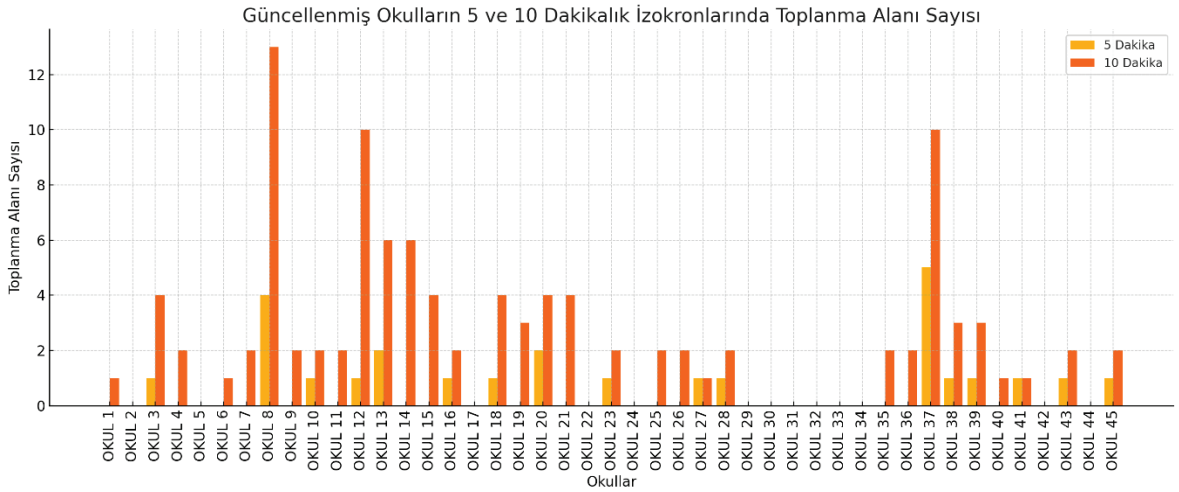
Yapılan çalışma, veri odaklı kentsel planlama yaklaşımlarına yönelik prototip bir model olarak sunulmaktadır. Kent içinde farklı fonksiyonlara sahip yapılar (örneğin okullar ve hastaneler) çevresindeki 5 ve 10 dakikalık yürüme mesafesi içindeki afet toplanma alanlarının sayısı değerlendirilerek, kentsel hizmetlerin erişilebilirliğine dair somut göstergeler üretilmiştir. Bu yaklaşım, toplanma alanlarının konumlanmasında yürünebilirlik süresine dayalı bir kriter sisteminin geliştirilmesine katkı sunmayı amaçlamaktadır.

Bu doğrultuda, seçilen okullar ve hastanelerin 5 ve 10 dakikalık yürüme mesafesi içindeki toplanma alanı sayılarına göre erişilebilirlik düzeyleri karşılaştırılmıştır. Belirlenen 5 merkez ilçedeki Open Street Map verilerine göre seçilen okul sayısının (n=45) hastane sayısından (n=19) fazla olması ve verilerin normal dağılım göstermemesi nedeniyle karşılaştırmalar parametrik olmayan Mann–Whitney U testi ile gerçekleştirilmiştir. Bu test, iki bağımsız grubun meydanları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olup olmadığını ölçmek için uygundur. 5 dakikalık erişim açısından, okulların medyan erişim değeri ile hastanelerinki karşılaştırıldığında istatistiksel olarak anlamlı bir fark tespit edilmemiştir (p = 0.438). Bu sonuç, kısa mesafelerde her iki grup için de erişilebilir toplanma alanı sayılarının benzer düzeyde olduğunu göstermektedir (**Şekil 6**). 10 dakikalık erişim açısından ise, hastanelerin erişim değerleri daha geniş bir dağılım göstermektedir ve bazı hastanelerin çok sayıda toplanma alanına erişebildiği gözlemlenmektedir.

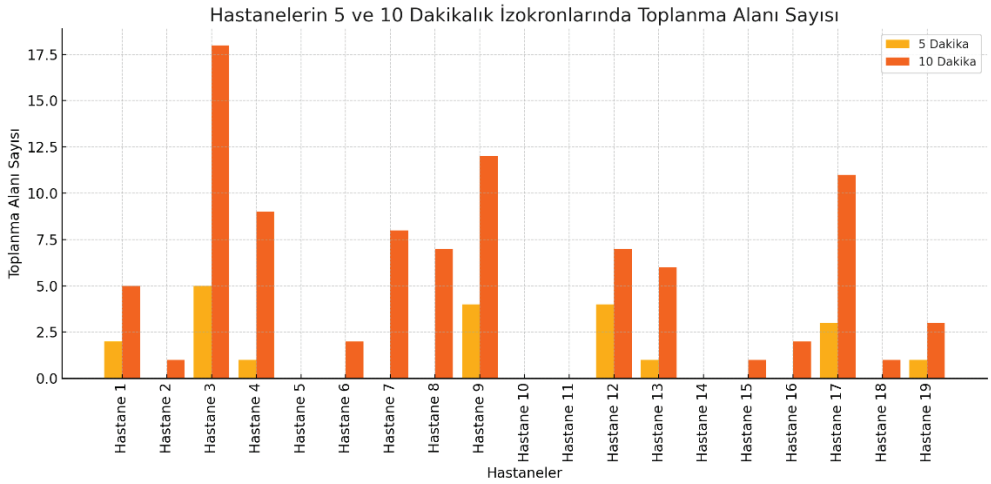


Şekil 6. 5 ve 10 dakikalık erişim açısından, okulların medyan erişim değeri ile hastanelerinki karşılaştırılması

Okul ve hastanelerin 5 ve 10 dakikalık yürüme mesafelerindeki toplanma alanı sayılarının detaylı karşılaştırılması **Şekil 7** ve **8**'de sunulmuştur.



Şekil 7. İzmir'in 5 ilçesindeki okulların 5 ve 10 dakikalık mesafelerindeki toplanma alanı sayısı



Şekil 8. İzmir'in 5 ilçesindeki hastanelerin 5 ve 10 dakikalık mesafelerindeki toplanma alanı sayısı

4. Sonuçlar

Bu çalışma, İzmir kentinde afet anlarında güvenli toplanmayı sağlamak amacıyla belirlenen Acil Durum Toplanma Alanlarının (ADTA) eğitim ve sağlık yapılarıyla olan mekânsal ilişkisini detaylı bir şekilde analiz etmektedir. QGIS, ArcGIS ve Overpass Turbo gibi ileri coğrafi bilgi sistemleri araçları ve OpenStreetMap gibi açık kaynaklı veri platformları kullanılarak geliştirilen yöntem, veri odaklı kentsel planlama anlayışına katkı sunmaktadır. Yapılan analizler, özellikle Karşıyaka ve Konak ilçelerinde toplanma alanlarının büyüklük ve kapasite açısından yetersiz olduğunu; Bornova ve Buca gibi ilçelerde ise daha güvenli ve işlevsel alanların mevcut olduğunu ortaya koymuştur.

İzokron haritalama yöntemiyle gerçekleştirilen erişilebilirlik analizleri, birçok eğitim ve sağlık yapısının önerilen 5 ve 10 dakikalık yürüme mesafesi sınırları içerisinde yeterli ADTA erişimine sahip olmadığını göstermiştir. Ayrıca, yönlendirme eksiklikleri ve engebeli arazi koşulları gibi çevresel faktörlerin erişimi daha da güçleştirdiği belirlenmiştir. Okullar ve hastaneler üzerinden yapılan istatistiksel analizler, özellikle 10 dakikalık yürüme mesafelerinde hastanelerin erişim açısından daha heterojen bir dağılım gösterdiğini ortaya koymuştur.

Bu bulgular, eğitim ve sağlık yapıları gibi hayati kentsel fonksiyonların çevresinde erişim temelli planlamanın önemini vurgulamaktadır. Sayısal analiz araçlarının desteğiyle geliştirilen bu yaklaşım, veri odaklı planlama ve mimari karar verme süreçleri arasında simbiyotik bir bağ kurarak, fiziksel mekânların kriz zamanlarında dayanıklı hale getirilmesi için yürünebilirlik bağlamında zaman odaklı bir çerçeve sunmayı hedeflemektedir.

Aynı zamanda çalışmadaki bulgular, afet hazırlığı bağlamında yalnızca mevcut toplanma alanlarının niceliksel artırımı değil, aynı zamanda erişilebilirlik ve kapasite gibi niteliksel ölçütlerin de dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır. Çalışma, kentsel ölçekte geliştirilecek yeni ADTA planlamalarının veri odaklı, parametrik ve erişilebilirlik temelli kriterlerle desteklenmesi gerektiğini önermektedir. Ayrıca hesaplamalı tasarım yaklaşımlarının sunduğu esneklik sayesinde, farklı senaryolar altında en uygun toplanma stratejilerinin dinamik olarak modellenebileceği gösterilmiştir.

Sonuç olarak, bu araştırma veri tabanlı mekânsal analiz tekniklerinin afet dayanıklılığına yönelik kentsel stratejilerde nasıl etkin bir araç olarak kullanılabileceğini kanıtlamış; yerel yönetimler ve kriz planlamacıları için uygulanabilir bir karar destek modeli sunmuştur. Bu yaklaşım, kentsel sistemlerin dirençliliğini artırmak ve toplulukların afetlere karşı hazırlık seviyesini yükseltmek için önemli bir adım niteliğindedir.

KAYNAKLAR

AFAD. (2021). *Acil Durum Toplanma Alanları Tanımı ve Önemi*. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı.

Aksha, S. K., Juran, L., Resler, L. M., & Zhang, Y. (2020). A spatial framework for assessing community resilience: A case study from Nepal. *International Journal of Disaster Risk Reduction, 50*, 101744. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101744

Batty, M. (2018). *Inventing future cities*. MIT Press.

Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi. (2018). *Türkiye Deprem Tehlike Haritası*. Boğaziçi Üniversitesi, Deprem Araştırma Enstitüsü. https://www.koeri.boun.edu.tr

Çakıcı Alp, N. (2011). *Binalarda kullanıcıların acil durum davranışının ve hareketinin etmen tabanlı bir model ile temsili ve benzetimi*, [Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. İstanbul.

Cutter, S. L., Boruff, B. J., & Shirley, W. L. (2013). Social vulnerability to environmental hazards. *Social Science Quarterly, 84*(2), 242-261. https://doi.org/10.1111/1540-6237.8402002

Goodchild, M. F., & Glennon, J. A. (2010). Crowdsourcing geographic information for disaster response: a research frontier. *International Journal of Digital Earth, 3*(3), 231-241. https://doi.org/10.1080/17538941003759255

Hecht, R., Meinel, G., & Buchroithner, M. (2019). A service-oriented approach to dynamic accessibility analysis using OpenRouteService. *Computers, Environment and Urban Systems, 74*, 155–165. https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2018.12.004

Kısmet, B. (2022). Bağdat Caddesi Özelinde Deprem Toplanma Alanlarının İncelenmesi. *Yapı Dergisi*, *474*. https://yapidergisi.com/bagdat-caddesi-ozelinde-deprem-toplanma-alanlarinin-incelenmesi

Sawhney, A., Riley, M. & Irizarry, J. (2020). *Construction 4.0: An Innovation Platform for the Built Environment*. Routledge. ISBN 9780367027308.

Şahin, S., & Yılmaz, S. (2019). Evaluating Earthquake Assembly Areas via GIS Based Multi-Criteria Decision-Making Techniques: A Case Study from Turkey. *Natural Hazards, 96*(2), 837–860. https://doi.org/10.1007/s11069-018-3565-6

Xu, L. D., Xu, E. L., & Li, L. (2018). Industry 4.0: State of the art and future trends. *International Journal of Production Research, 56*(8), 2941-2962. https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1444806

Wang, Z., & Liu, P. (2020). Real-time analysis of emergency shelter accessibility using crowdsourced data: A case study of Wuhan during COVID-19 lockdown. *International Journal of Disaster Risk Reduction, 51*, 101870. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101870

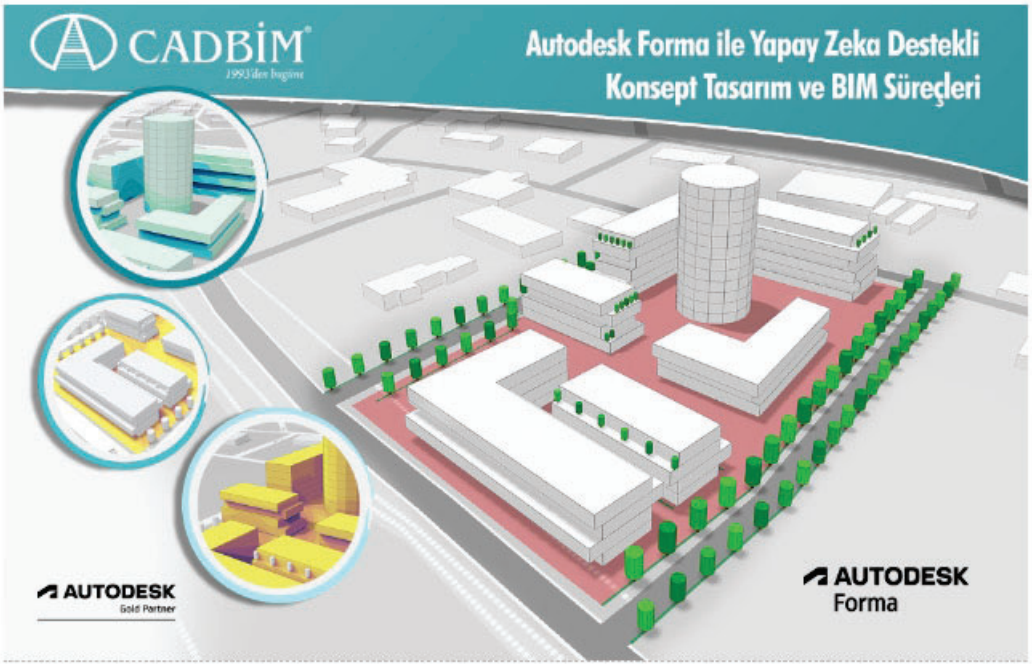
2025 MSTAS

ÇALIŞTAYLAR

MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM
XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU ÇALIŞTAYLARI
28-29 HAZİRAN 2025

Başvuru Formu
mstas2025.antalya.edu.tr/calistaylar/
İletişim Bilgileri
mstas2025@antalya.edu.tr

SİMBİYOZ



A. Autodesk Forma ile Yapay Zeka Destekli Konsept Tasarım ve BIM Süreçleri

Bu çalışmada, Autodesk Forma'nın yapay zeka destekli konsept modelleme, otomasyon ve analiz araçları kullanılarak Antalya Konyaaltı'nda seçilen bir arazide tasarım süreci ele alınacaktır. Katılımcılar, gerçek zamanlı çevresel analizlerle sürdürülebilir tasarım kararları almayı deneyimleyecek, Forma Board üzerinden işbirliği ve veri yönetimini öğrenecektir. Ayrıca, Autodesk Forma'dan Revit'e proje aktarımı uygulamalı olarak gösterilecektir. Çalışmanın amacı, tasarım verimliliğini artırmak, BIM entegrasyonunu sağlamak ve çevresel koşullara uyumlu çözümler geliştirmektir. Beklenen çıktı, katılımcıların yapay zeka destekli araçlarla çevresel analiz ve otomasyonları kullanarak optimize edilmiş konsept projeler oluşturabilmesi ve BIM'e sorunsuz geçiş yapabilmesidir.

B. Çalışma Bilgileri

- **Atölyenin Süresi:**
28 Haziran 2025, 10:00 - 16:00
- **Katılımcılar**
Mimarlık, mühendislik ve tasarım alanlarında çalışan veya eğitim gören herkes katılabilir.
- **Beklenen katılımcı** : 20 / **Maksimum katılımcı :** 30
- **Katılımcılardan beklenen donanım ve ekipmanlar :**
  Güncel bir dizüstü bilgisayar
  Autodesk Forma Erişimi ve Revit yazılımının yüklü olması
  İnternet bağlantısı

ATÖLYE PROGRAMI

Kuramsal Aşama
28.06.2025
10:00-11:00
İçerik: Forma'nın yapay zeka destekli tasarım, analiz ve işbirliği özellikleri anlatılacaktır.

Uygulama Aşaması
28.06.2025
11:00-16:00
İçerik: Forma'da çevresel analiz ve tasarım yapılacaktır.

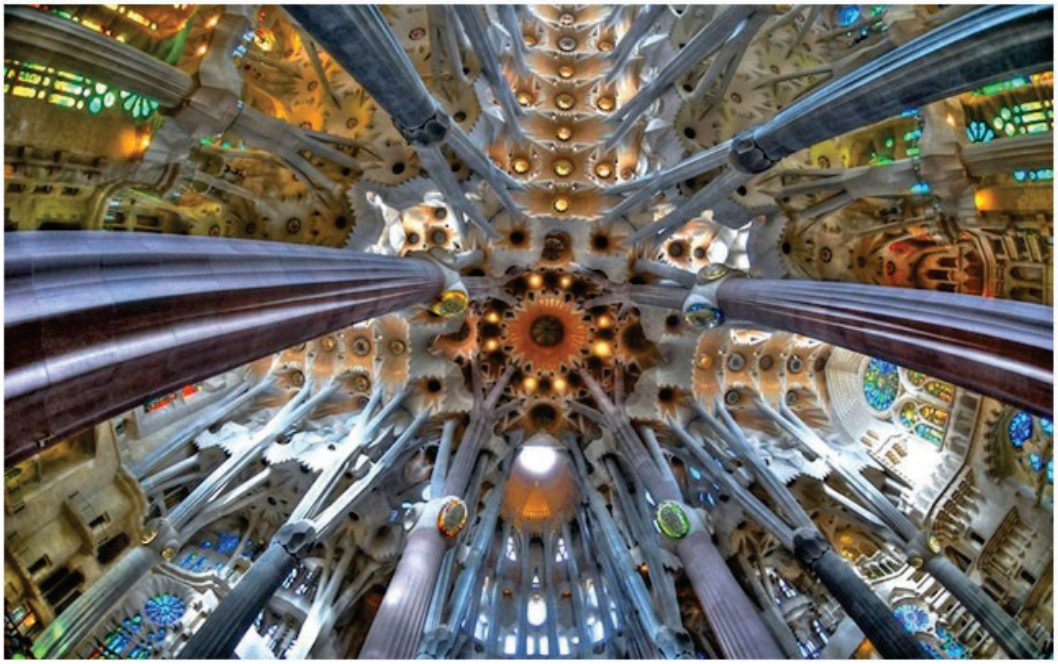
C. Atölye Yürütücüsü

Hilal EKİNCİ / AEC Teknik Destek Uzmanı
CADBİM

MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM
XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU ÇALIŞTAYLARI
28-29 HAZİRAN 2025

Başvuru Formu
mstas2025.antalya.edu.tr/calistaylar/
İletişim Bilgileri
mstas2025@antalya.edu.tr

SİMBİYOZ



A. Sınırları Aşan Algılar (Expand Your Umwelt): Yapay Zekâ ile Yeni Bir Mimarlık Duyusu Yaratmak

AMAÇ: Yapay zekânın yalnızca estetik biçimleri değil, duyusal ve algısal deneyimleri nasıl dönüştürebileceğini keşfetmek; yapay zekâ ile yeni bir mimarlık duyusu ve tasarım dili geliştirmek.

KAPSAM:
- Estetik değerlerin ötesine geçerek, yapay zekânın yaratabileceği yeni duyumsal mimari ortamların araştırılması.
- Algoritmaların insan algısını ve mekân deneyimini nasıl yeniden şekillendirdiğinin keşfi.
- Yapay zekâ ile üretilmiş yapı ve mekânların duygusal, algısal ve deneyimsel etkilerinin incelenmesi.
- Yapay duyarlık kavramının mimarlık felsefesine ve pratiğine entegrasyonu.

B. Çalışma Bilgileri

ÇIKTILAR:
- "Yapay Zekâ ile Duyuların Entegre Edildiği Yeni Bir Mimari Yaklaşım Manifestosu": Yeni bir mimarlık duyusu için kuramsal ve pratik öneriler.
- Yapay zekâ destekli çok-duyulu mekân prototipleri.
- Akademik yayına ve sanatsal sergiye dönüştürülebilecek çalışmalar.
• Yeni bir uluslararası Yapay Zekâ & Mimarlık & Deneyim Ağı (AI & Architecture & Experience Network).

KATILIMCI PROFİLİ:
Mimarlar / • Sinirbilim (Neuroscience) uzmanları / Yapay zekâ uzmanları / Sanatçılar ve enstelasyon tasarımcıları / Ses ve ışık tasarımcıları / Filozoflar / Yeni medya sanatçıları

ATÖLYE PROGRAMI
28.06.2025 / 09:30-13:00

Açılış
Yapay Duyarlık Teorisi ve Estetikte Yapay Zekâ Çağı

Atölye
Yapay zekâ destekli Duyusal Haritalama ve Çoklu-Duyu Mekân Tasarımı

Panel
Yapay Estetik mi? Duyusal Mimari mi?

Demo + VR
"Yapay Duyarlık ile Oluşturulan Yeni Mekân Deneyimi"

Kapanış
"Mimarlıkta AI Duyarlık Manifestosu" taslak çalışması

C. Atölye Yürütücüleri

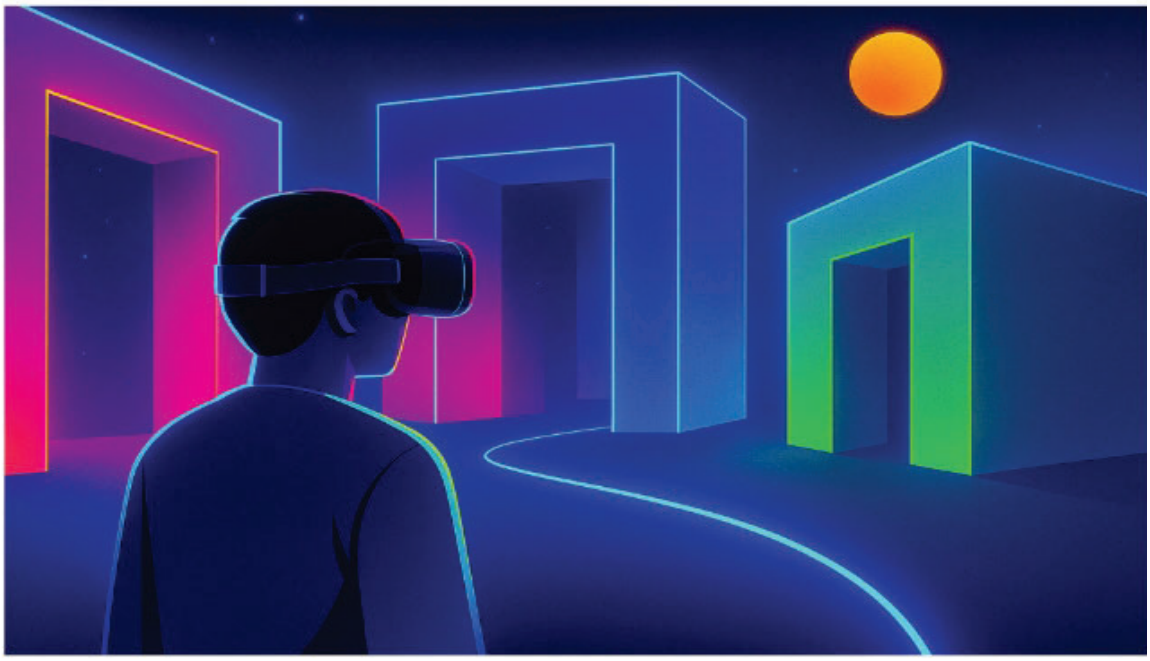
Dr. Ali Cem Başarır
alicembasarir@gmail.com

SİMBİYOZ

MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM
XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU ÇALIŞTAYLARI
28-29 HAZİRAN 2025

Başvuru Formu
mstas2025.antalya.edu.tr/calistaylar/
İletişim Bilgileri
mstas2025@antalya.edu.tr

SİMBİYOZ



VR'da Kısa Bir Yürüyüş: Mekân, Renk ve Ses

Bu atölyede katılımcılar, kendi mimari modellerini Unreal Engine 5 ortamına taşıyarak sanal gerçeklikte kişisel bir mekân deneyimi oluşturacaklardır. Her katılımcıya ayrılan sanal bir parselde, seçilen renkler ve müzikler eşliğinde mekânın atmosferi şekillendirilecek; ışık, ses ve hacim ilişkisi üzerinden mekânın hissi tanımlanmaya çalışılacaktır. Basit bir modelden yola çıkarak bireysel sahneler üreten katılımcılar, atölye sonunda bu sahneleri ortak bir VR haritasında birleştirerek sırasıyla birbirlerinin alanlarını deneyimleyeceklerdir. Atölye, sanal gerçeklik teknolojisini temel düzeyde tanıtarak, mimari tasarımın dijital ve duyusal yönlerini sade ama etkili bir yaklaşımla keşfetmeyi amaçlamaktadır.

Atölye Bilgileri

Atölye süresi: 3.5 saat
Kimler katılabilir: Mimarlık ve tasarım alanlarında okuyan, çalışan ya da bu alanlara ilgi duyan herkes
Katılımcı sayısı: 10 kişi
Gerekli ekipman: Katılımcıların kişisel bilgisayarları ve uygulanacak modelleriyle gelmeleri gerekmektedir. Unreal Engine 5 kurulumu atölyenin parçası değildir, önceden yapılmış olmalıdır. Sanal gerçeklik ekipmanı atölye yürütücüsü tarafından sağlanacaktır.

Not: Modeli olmayan katılımcılara atölyede kullanabilecekleri model sağlanabilir. Bu durumda atölye yürütücüsüyle önceden iletişime geçilmelidir.

ATÖLYE PROGRAMI
Tarih ve Saat
28.06.2025, 14:00-17:30
Kuramsal Aşama
14:00-14:30
Sanal gerçeklikte mimari deneyim nedir
Uygulama Aşaması
14:30-16:00
Model aktarma ve sahne düzenleme
Deneyim Aşaması
16:00-17:30
5'er dakikalık VR deneyimi

Atölye Yürütücüsü

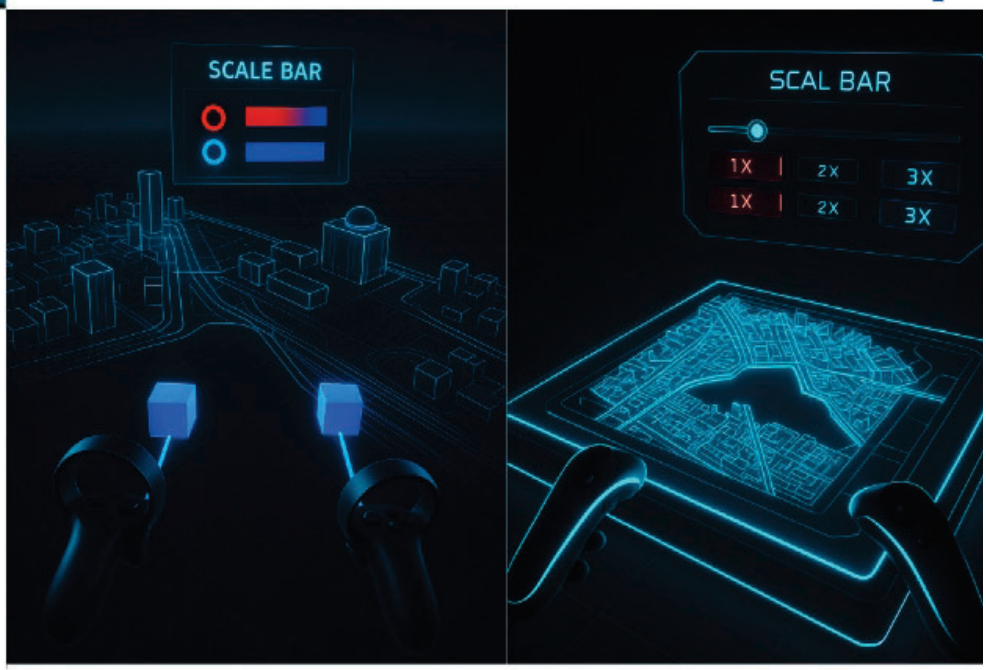
Tolga Özdemir
tolga.ozdemir@antalya.edu.tr

SİMBİYOZ

MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM
XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU ÇALIŞTAYLARI
28-29 HAZİRAN 2025

Başvuru Formu
mstas2025.antalya.edu.tr/calistaylar/
İletişim Bilgileri
mstas2025@antalya.edu.tr

simbiyoz



A. TASARIM-XR: VR ile Kentsel Gelecek

Bu çalıştay, artırılmış gerçeklik (AR) teknolojisini mimarlık ve kentsel tasarım problemleriyle oyunlaştırılmış bir yaklaşımla entegre etmeyi hedeflemektedir. Mimarlık ve kentsel tasarım eğitimi için geliştirilen Unity tabanlı yazılım, katılımcılara modüler mimari sistemler ve etkileşimli VR uygulamaları geliştirme imkânı sur . Oculus Quest platformunda çalışan bu yazılım, kullanıcıların sanal gerçeklik ortamında etkileşimli kentsel tasarım projeleri oluşturmasına olanak tanır. Çalıştay süresince katılımcılar, Unity arayüzüne giriş yapacak temel sahne oluşturmayı, AI destekli C# kod yazmayı, oyun geliştirme prensiplerini ve VR uygulamalarını öğreneceklerdir. Meta SDK'larının entegrasyonu ile statik tasarımları dinamik ve etkileşimli hale getirerek özgün VR deneyimleri tasarlayacaklardır. Oyunlaştırma tekniklerinin tasarıma entegre edilmesiyle grup çalışmaları yaparak VR tabanlı kentsel tasarım çözümleri üretecek ve finalde projelerini sunacaklardır.

B. Çalışma Bilgileri

- Atölye 2 gün sürecek.
- Katılıma açık.
- Beklenen katılımcı sayısı (5)
  Maksimum katılımcı sayısı (20).
- Gereksinimler: Unity (Free License), Rhino (Free Trial) ,Meta XR SDK (Open Source), Visual Studio (Free License) .

ATÖLYE PROGRAMI

Kuramsal Aşama
Tarih ve Saat
29 HAZİRAN / 09:00
Açılış Sunumu.

Uygulama Aşaması
Tarih ve Saat
29 HAZİRAN / 13:00
Çalışmalar İçin Deney.

C. Atölye Yürütücüleri

Yürütücü 1 - Mim. Gays ELUKAB
Yürütücü 2 - Doç. Dr. Serdar AYDIN

SİMBİYOZ

MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM
XIX. ULUSAL SEMPOZYUMU ÇALIŞTAYLARI
28-29 HAZİRAN 2025

Başvuru Formu
mstas2025.antalya.edu.tr/calistaylar/
İletişim Bilgileri
mstas2025@antalya.edu.tr

SİMBİYOZ

Veriden Eskize:
Üretken Yapay Zeka ile Kişiselleştirilmiş Tasarım Deneyimi

Bu çalıştay, (hesaplamalı) tasarım sürecinin sıklıkla ihmal edilen ancak ayrılmaz bir parçası olan eskiz pratiğine, üretken yapay zeka tartışmaları ışığında yaklaşmayı amaçlamaktadır. Lisans seviyesindeki katılımcılar, kendi kişiselleştirilmiş veri setlerini oluşturmayı ve bu veri seti ile temel üretken yapay zeka modellerini eğiterek bunları tasarım süreçlerine etkili biçimde dahil etmeyi öğrenecektir. Böylece eskizin muğlak doğası ile üretken yapay zekanın sürpriz potansiyelinin kesişimde gelişen bir tasarım yönteminin katkılarını deneyimleme ve sorgulama fırsatı bulacaklardır.

Çalışma Bilgileri

Tarih ve Saat: 29.06.2025 | 10.00-16.00
Katılımcı sayısı: En fazla 10 kişi.
Katılımcılardan beklenenler:
Çalıştay, üretken yapay zeka ve eskiz ile ilgilenen tüm lisans öğrencilerine açıktır. Katılımcıların *kişisel bilgisayarları* ve *(varsa) tabletleri* ile gelmeleri beklenmektedir. Gerekli yazılımlar ve belgeler çalıştay yürütücüsü tarafından sağlanacaktır.

Atölye Yürütücüleri

Nur Sipahioğlu
nur.sipahioglu@yasar.edu.tr

ATÖLYE PROGRAMI

Kuramsal Aşama
29.06.2025 10:00-11:00
Giriş ve Tanışma
Üretken Yapay Zeka ile Eskiz ve Tasarım Süreci

Uygulama Aşaması I
29.06.2025 11:00-12:00
Özgün Veri Seti için Eskiz Üretimi

Uygulama Aşaması II
29.06.2025 13:00-16:00
Kişiselleştirilmiş Veri Seti ile Stable Diffusion Eğitimi ve Eskiz Süreci

2025 MSTAS

XIX. MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM ULUSAL SEMPOZYUMU

Bu yılki sempozyumun teması “Simbiyoz” olarak belirlenmiştir. Simbiyoz, farklı varlıkların karşılıklı fayda ve dönüşüm içinde bir arada var olmasını ifade eder; bu bağlamda mimarlık ve teknoloji arasındaki ilişki, birbirini tamamlayan, sınırların belirsizleştiği ve yeni bir ortaklık biçimi yaratan dinamik bir birliktelik-tir.Mimarlık, dijital teknolojilerin hızla artan entegrasyonu ile köklü bir dönüşüm sürecinden geçmektedir. Yapay zekâ, hesaplamalı tasarım, bina bilgi modelleme (BIM) ve karma gerçeklik gibi araçlar, artık günlük mimarlık pratiğinin vazgeçilmez unsurları haline gelmiştir. Bu dönüşüm, mimar ile teknoloji arasında simbiyotik bir ilişki doğurarak, teknolojinin mimarın yaratıcılığını desteklediği ve aynı zamanda yeni çalışma dinamikleri oluşturduğu bir ortam yaratmaktadır. Teknoloji; karmaşık tasarım sorunlarına hızlı çözümler sunma, süreçleri hızlandırma ve disiplinler arası iş birliği imkânı sağlama gibi avantajlar sunmaktadır. Bu bağlamda, mimarların teknolojiyi yalnızca bir araç olarak değil, tasarımı yönlendiren bir ortak olarak görmeleri söz konusudur. MSTAS 2025 sempozyumu, bu karmaşık ilişkiyi farklı boyutlarıyla ele almış; mimar ile dijital teknolojilerin etkileşimini, sunduğu olanakları ve ortaya çıkabilecek zorlukları çeşitli açılardan tartışmaya açmıştır.

ANTALYA BİLİM ÜNİVERSİTESİ DÖŞEMEALTI YERLEŞKESİ
Çıplaklı, Akdeniz Blv. No:290/A, 07190 Döşemealtı/Antalya
https://mstas2025.antalya.edu.tr
www.antalya.edu.tr
ISBN
978-625-94372-3-1