

MSTAS 26

XX. MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM
ULUSAL SEMPOZYUMU

TAM METİN BİLDİRİ KİTABI

“KAPSAM DIŞI”

21-23/06/26
TED ÜNİVERSİTESİ



TED ÜNİVERSİTESİ

TEDU
ARCH

MSTAS 26 "KAPSAM DIŞI"

XX. MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM ULUSAL SEMPOZYUMU

MSTAS 2026

XX. Mimarlıkta Sayısal Tasarım Ulusal Sempozyumu
21-23 Haziran 2026, TED Üniversitesi
"KAPSAM DIŞI"

DÜZENLEYEN

TED Üniversitesi
Mimarlık ve Tasarım Fakültesi
Mimarlık Bölümü

DÜZENLEME KURULU ve EDİTÖRLER

Doç. Dr. Başak Uçar
Dr. Öğr. Üyesi Duygu Tüntaş
Dr. Öğr. Üyesi Gökhan Kınayoğlu
Dr. Öğr. Üyesi Heves Beşeli
Dr. Öğr. Üyesi Onur Yüncü
Öğr. Gör. Dr. Melis Acar
Ar. Gör. Utku Coşkun

DANIŐMA KURULU

Prof. Dr. Arzu Gönenç Sorguç
Prof. Dr. Birgül Çolakoğlu
Prof. Dr. Mine Özkar
Prof. Dr. Salih Ofluoğlu

MİZANPAJ & KAPAK TASARIMI

Ar. Gör. Utku Coşkun

ISBN

978-605-80942-8-4

© TED Üniversitesi

Bu kitabın her hakkı saklıdır ve tüm yayın hakları "TED Üniversitesi Rektörlüğü'ne" aittir. Bu kitabın herhangi bölümü izin alınmaksızın yayınlanamaz, basılamaz, dolaylı dahi olsa kullanılamaz. Kitapta yayınlanan tüm yazı ve görsellerin sorumluluğu yazarlara aittir.

BİLİM KURULU

Prof. Dr. Aliye Senem Deviren
Prof. Dr. Arzu Gönenç Sorguç
Prof. Dr. Aslı Ağırbaş
Doç. Dr. Aslı Çekmiş Kanan
Prof. Dr. Ayşe Zeynep Sözen
Doç. Dr. Ayşegül Akçay Kavakoğlu
Doç. Dr. Başak Uçar
Dr. Benay Gürsoy Toykoç
Dr. Öğr. Üyesi Can Uzun
Dr. Öğr. Üyesi Çağda Özbaki
Prof. Dr. Çetin Tüker
Doç. Dr. Derya Güleç Özer
Dr. Öğr. Üyesi Duygu Tüntaş
Dr. Öğr. Üyesi Elif Belkis Öksüz Uncu
Dr. Elif Ensari
Dr. Öğr. Üyesi Emirhan Coşkun
Dr. Öğr. Üyesi Esra Gürbüz
Doç. Dr. Ethem Gürer
Doç. Dr. Faruk Can Ünal
Doç. Dr. Fulya Akipek
Dr. Öğr. Üyesi Gökhan Kınayoğlu
Prof. Dr. Gülen Çağdaş
Doç. Dr. Güzden Varinlioğlu
Doç. Dr. Hatice Günseli Demirkol
Dr. Öğr. Üyesi Heves Beşeli
Doç. Dr. İlker Erkan
Prof. Dr. İpek Gürsel Dino
Dr. Öğr. Üyesi Kutay Karabağ
Prof. Dr. Leman Figen Gül
Doç. Dr. Mehmet İnceoğlu
Doç. Dr. Mehmet Ali Altın
Doç. Dr. Meltem Aksoy
Prof. Dr. Meryem Birgül Çolakoğlu
Prof. Dr. Mine Özkar
Dr. Müge Kruşa Yemişcioğlu
Prof. Dr. Neşe Çakıcı Alp
Dr. Öğr. Üyesi Onur Yüncü
Doç. Dr. Orkan Zeynel Güzelci
Prof. Dr. Ozan Önder Özener
Dr. Özgün Balaban
Prof. Dr. Özgür Ediz
Dr. Öğr. Üyesi Özlem Atak Doğan
Doç. Dr. Özlem Kandemir
Doç. Dr. Sabri Gökmen
Prof. Dr. Salih Ofluoğlu
Dr. Öğr. Üyesi Selin Oktan
Doç. Dr. Sema Alaçam
Prof. Dr. Semra Arslan Selçuk
Prof. Dr. Serbülent Vural
Doç. Dr. Serkan Palabıyık
Doç. Dr. Sevil Yazıcı
Doç. Dr. Sibel Macit İlal
Prof. Dr. Şebnem Yalınay Çinici
Dr. Öğr. Üyesi Şehnaz Cenani Durmazoğlu
Prof. Dr. Şule Pektaş Taşlı
Doç. Dr. Togan Tong
Prof. Dr. Tuğrul Yazar
Dr. Öğr. Üyesi Yazgı Aksoy
Dr. Öğr. Üyesi Zülal Nurdan Korur

Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi
Middle East Technical University
Özyeğin Üniversitesi
İstanbul Teknik Üniversitesi
İstanbul Medipol Üniversitesi
İstanbul Teknik Üniversitesi
TED Üniversitesi
Pennsylvania State University
İstanbul Teknik Üniversitesi
Altınbaş Üniversitesi
Mimar Sinan Üniversitesi
İstanbul Teknik Üniversitesi
TED Üniversitesi
Kahramanmaraş İstiklal Üniversitesi
NYU Marron Institute
MEF Üniversitesi
Gaziantep Üniversitesi
İstanbul Teknik Üniversitesi
Yeditepe Üniversitesi
İstanbul Bilgi Üniversitesi
TED Üniversitesi
İstanbul Teknik Üniversitesi
University of Liverpool
İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü
TED Üniversitesi
Süleyman Demirel Üniversitesi
Orta Doğu Teknik Üniversitesi
İstanbul Bilgi Üniversitesi
İstanbul Teknik Üniversitesi
Akdeniz Üniversitesi
Eskişehir Teknik Üniversitesi
İstanbul Teknik Üniversitesi
İstanbul Teknik Üniversitesi
İstanbul Teknik Üniversitesi
Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Kocaeli Üniversitesi
TED Üniversitesi
İstanbul Teknik Üniversitesi
İstanbul Teknik Üniversitesi
Eindhoven University of Technology
Bursa Uludağ Üniversitesi
Erciyes Üniversitesi
Eskişehir Teknik Üniversitesi
University of North Carolina
Antalya Bilim Üniversitesi
Karadeniz Teknik Üniversitesi
İstanbul Teknik Üniversitesi
Gazi Üniversitesi
Karadeniz Teknik Üniversitesi
Balıkesir Üniversitesi
İstanbul Teknik Üniversitesi
İzmir Demokrasi Üniversitesi
İstanbul Bilgi Üniversitesi
İstanbul Medipol Üniversitesi
Ostim Teknik Üniversitesi
Yıldız Teknik Üniversitesi
İstanbul Bilgi Üniversitesi
İstanbul Medipol Üniversitesi
İstanbul Medipol Üniversitesi

“KAPSAM DIŞI”

MSTAS 26 "KAPSAM DIŞI"

XX. MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM ULUSAL SEMPOZYUMU

ÖNSÖZ

20.'si düzenlenen Mimarlıkta Sayısal Tasarım Sempozyumu (MSTAS), mimarlık, tasarım ve teknoloji arasındaki ilişkiyi tartışmaya açan; sayısal araçların, yöntemlerin ve düşünme biçimlerinin mimarlık alanındaki dönüşümünü izleyen en önemli buluşmalardan biri olmayı sürdürmektedir. Bugüne kadar gerçekleştirilen sempozyumlar, mimarlık disiplininin değişen sınırlarının, yeni bilgi üretim biçimlerinin ve ortaya çıkan araştırma alanlarının birlikte tartışıldığı, araştırmacılar, eğitimciler ve uygulayıcılar arasında etkileşimi teşvik eden önemli bir paylaşım zemini oluşturmuştur.

XX. MSTAS Mimarlıkta Sayısal Tasarım Sempozyumu, bu birikimden hareketle "Kapsam Dışı" teması etrafında şekillenmiştir. Günümüzde sayısal tasarım, yalnızca belirli araçlar, yazılımlar ya da temsil teknikleri ile tanımlanabilecek bir alan olmanın ötesinde, farklı disiplinler, ölçekler, aktörler ve bilgi biçimleri arasında kurulan ilişkiler aracılığıyla sürekli genişleyen bir araştırma ve üretim alanına dönüşmüştür. Bu dönüşüm, mimarlıkta sayısal tasarımın sınırlarını yeniden düşünmeyi ve yerleşik tanımları sorgulamayı gerekli kılmaktadır. **"Kapsam Dışı"** teması da tam olarak bu genişleme hareketine dikkat çekmektedir. Tema, yalnızca mevcut çerçevelerin dışına çıkan çalışmaları değil, tasarım ve araştırma arasındaki ara alanlarda konumlanan, disiplinler arası ve disiplin ötesi ilişkiler kuran, henüz tam olarak tanımlanmamış ya da kurumsallaşmamış üretim biçimlerini görünür kılmayı amaçlamaktadır. Bu bağlamda kapsam dışı olan, dışarıda bırakılan ya da göz ardı edilen bir alanı değil, aksine yeni karşılaşmaların, yeni yöntemlerin ve yeni bilgi biçimlerinin ortaya çıkabildiği üretken bir genişleme alanını ifade etmektedir.

Bu kitapta yer alan bildiriler, mimarlıkta sayısal tasarımın güncel yönelimlerini farklı ölçeklerde ve bağlamlarda ortaya koymaktadır. Yapay zekâ uygulamalarından hesaplamalı tasarım yöntemlerine, sayısal üretim süreçlerinden kültürel miras çalışmalarına, veri odaklı araştırmalardan yeni temsil ve etkileşim biçimlerine uzanan geniş bir yelpaze, alanın giderek çeşitlenen karakterini gözler önüne sermektedir. Bildiriler, sayısal tasarımın yalnızca teknik bir uzmanlık alanı olarak değil, araştırma yöntemlerini, tasarım süreçlerini, pedagojik yaklaşımları ve mesleki pratikleri dönüştüren geniş bir düşünsel alan olarak ele alınabileceğini göstermektedir.

MSTAS 2026'nın, mimarlıkta sayısal tasarımın değişen sınırlarını birlikte tartışmak, yeni araştırma alanlarını görünür kılmak ve farklı disiplinlerden gelen katılımcılar arasında yeni iş birliklerine zemin hazırlamak açısından önemli bir katkı sunmasını diliyoruz. Sempozyuma çalışmalarıyla katkı sunan tüm yazarlara, değerlendirme süreçlerinde emek veren hakemlere ve Bilim Kurulu üyelerine, davetli konuşmacılarımıza, ayrıca sempozyumun hazırlanması ve yürütülmesinde görev alan Düzenleme Kurulu üyelerine (Başak Uçar, Duygu Tüntaş, Heves Beşeli, Gökhan Konayoğlu, Melis Acar, Onur Yüncü) ve organizasyon ekibine (Belkıs Sena Top, Büşra Karadeniz Akkoç, Çağrı Koçer, Dilşad Nur Altınışik, Hazal Özkan, Selin Kocaman, Sonat Özcivanoğlu, Tolgahan Bardakcı, Ufuk Uğurlar, Utku Coşkuner,) teşekkür ederiz. Bu kitabın gelecekteki araştırmalar, tartışmalar ve yeni üretimler için ilham verici bir kaynak olmasını temenni ederiz.

Doç. Dr. Başak Uçar
MSTAS 2026 Düzenleme Ekibi adına

MSTAS 26 "KAPSAM DIŞI"

XX. MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM ULUSAL SEMPOZYUMU

DAVETLİ KONUŐMACILAR



Co-design through Open Encounters

Carlos Zarco Sanz
OpenACT

Carlos Zarco Sanz is an architect, educator, and co-founder of Openact Architecture, an award-winning interdisciplinary design studio based in Madrid and Istanbul. His work operates across architecture, landscape urbanism, and public space, focusing on adaptable systems, infrastructural landscapes, and ecological transformation. Through Openact, he has received major international distinctions, including the Holcim Awards for Sustainable Construction, the New European Bauhaus Awards, the Turkish National Architecture Award, an Aga Khan Award for Architecture nomination, and the COAM Emerging Architect Award. Alongside practice, he currently teaches and advises research at institutions including Istanbul Technical University, AURA Istanbul, and IE University.

Keynote Lecture organized in collaboration with the Embassy of Spain in Turkey.

MSTAS 26 “KAPSAM DIŞI”

XX. MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM ULUSAL SEMPOZYUMU

DAVETLİ KONUŐMACILAR



LAYERED: The journey from lab to job-site, the story of an entrepreneurial digital fabrication process.

Dr. Selen Ercan Jenny

ETH Zurich & LAYERED

Dr. Selen Ercan Jenny is an architect, researcher, and entrepreneur specializing in digital fabrication and construction robotics. She was a Senior Researcher at ETH Zurich and is currently co-founder of LAYERED, where she develops autonomous surface coating systems using spray-based printing-in-motion powered by machine learning and extended reality. Her work bridges academic research and industry, focusing on mobile robotic fabrication, adaptive material processes, and automation in real-world construction environments. With a background spanning METU in Turkey, TU Delft in the Netherlands, and ETH Zurich, she has led international research initiatives, including at the Singapore-ETH Centre.

MSTAS 26 "KAPSAM DIŞI"

XX. MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM ULUSAL SEMPOZYUMU

DAVETLİ KONUŐMACILAR



The Digital of Craft: The Ecology of Computation

Dr. Hayri Dörtdivanlıoğlu
Dartmouth College

Dr. Hayri Dörtdivanlıoğlu is a Postdoctoral Fellow in the Society of Fellows at Dartmouth College and a TABLINUM Fellow at the Palladio Center in Vicenza. His research sits at the intersection of architectural history and theory, craft studies, and computational design, examining how architecture's disciplinary boundaries have been shaped by the canonical divide between intellectual and manual labor. Weaving serves as the primary epistemological site across his scholarship as a historical practice that exposes the violence of the divide between theory and practice, and as a computational practice that challenges the anthropocentric and technologically determinist assumptions shaping contemporary design discourse. Dörtdivanlıoğlu earned his Ph.D. in Architecture from the Georgia Institute of Technology as a Fulbright Scholar and was awarded the ARCC King Medal for his doctoral research. He holds a B.Arch. and M.Arch. from Middle East Technical University. He has taught at Dartmouth College, the Georgia Institute of Technology, Emory University, and Middle East Technical University.



MSTAS 26 "KAPSAM DIŞI"

XX. MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM ULUSAL SEMPOZYUMU

İÇİNDEKİLER

1. Gün – 21 Haziran 2026

ÇALISTAYLAR

Mimari Tasarımda Yapay Zekâ Ajanlarının Kullanımı: Kendi Ajanınızı Tasarlayın ve Kullanın Kaan Bingöl	1
Dünya Kurma (Worldbuilding) Yoluyla Geleceğin Mekânlarını Tasarlamak Ege Alp Esassolak	2

2. Gün – 22 Haziran 2026

OTURUM 1

Yapay Zekâ ve Gelişmiş Hesaplamalı Sistemler

Oturum Başkanı: Selen Ercan Jenny

FeronAI: CNN Tabanlı Orman Yangını Yayılım Tahmini Berke Can Gülmez	5
İç Mimarlıkta Bireysel Tasarım Stillerinin Derin Öğrenme Modelleri ile Sayısal Analizi Üzerine Bir Araştırma Hülya Gümüş Öksüz, Mehmet Ali Altın	18
Tasarımın Erken Aşamasında Yapay Zekâ Ajanı Destekli Dışmerkezlilik Değerlendirmesi: Karşılaştırmalı Bir Vaka Çalışması Ecem Berna Şahin, Sema Alaçam, Semih Bayer	30
NöroGeneratif Mimarlık: İnsan Verisine Dayalı Mekânsal Üretim için Kavramsal Bir Çerçeve Betül Uçkan, Ayçin Atukeren, Bengü Özmutlu, Aykut Dağ, Tolga Aydoğdu, Umut Pektetik, Ahmet Gün, Ethem Gürer, Tülay Karakaş	42

MSTAS 26 "KAPSAM DIŞI"

XX. MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM ULUSAL SEMPOZYUMU

OTURUM 2	52
BIM, Entegre Tasarım Süreçleri ve Sayısal İş Akışları	
Oturum Başkanı: Zühre Sü Gül	
Integrating BIM and Real-Time Daylight Visualization in Architectural Design: A Method Using Revit and Unreal Engine	53
Ibrahim Juba, Serbülent Vural	
Bina Enerji Performansı Analizinde BEP-TR ve BIM Tabanlı Yaklaşımların Karşılaştırılması	65
Safiye Özlem Çağlar, Salih Ofluoğlu	
Mimaride BIM ve Yapay Zekâ Entegrasyonu ile Otomatik Yönetmelik Kontrolü Üzerine Bibliyometrik Analiz	78
Ceren Akarsu, Nuray Benli Yıldız, Yakup Turan	
Yapı Bilgi Modelinin Varlık Yönetimi Modeline Dönüştürölme Sürecinde Veri İndirgenmesi	88
Emre Akdeniz, Salih Ofluoğlu	
OTURUM 3	106
Sayısal Tasarım Kuramları, Tarihi ve Eleştirel Yaklaşımlar	
Oturum Başkanı: Hayri Dörtdivanlıoğlu	
Synthetic Ontologies: Monadology and Autopoiesis as Frameworks for Bio-Digital Design	107
Melih Kamaoğlu	
Kolektif Bellek Olarak Mimarlık: Nimonik Tuğlalar ile Dağıtık Eyleycilik ve Mekân Hafızası	119
Sinan Ayaz, Sema Alaçam	
Üretken Yapay Zekâ Tasarımda Yaratıcı Özne midir? Araç-Özne Ayrımı için Kavramsal Bir Çerçeve	130
Çetin Tüker	
From Tool Operation to Process-Oriented Design Reasoning: Tracing Student Learning Trajectories in Robotic Fabrication	141
Begüm Hamzaoğlu	

MSTAS 26 "KAPSAM DIŞI"

XX. MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM ULUSAL SEMPOZYUMU

OTURUM 4	152
Yapay Zekâ ve Gelişmiş Hesaplamalı Sistemler	
Oturum Başkanı: Salih Ofloğlu	
From Parametric Design to Digital Fabrication: Optimizing the Barkat CLT Construction System Muhammed Emin Akyürek, Erdem Köymen	153
Mimarlıkta İşbirlikçi Zekâ: Tasarım Eğitiminde Üretken Yapay Zekâ Entegrasyonu için İBE Tabanlı Bir Çerçeve Çisem Nur Demirci, Ecem Fettahoğlu, Selin Oktan, Serbülent Vural	165
Mimari Tasarım Süreçlerinde Üretken Yapay Zekâ Araçlarının Rolü ve İş Akışları Üzerine Bir Analiz Şule Taşlı Pektaş, Ece Genç	177
Kapsam Dışı Pedagojiler: Yapay Zekâ ve Mimarlık Eğitimi Şeyma Karataş, Şölen Köseoğlu	187
OTURUM 5	198
Hesaplamalı ve Üretken Tasarım Yaklaşımları	
Oturum Başkanı: Birgül Çolakoğlu	
Hesaplamalı Materyallikte Haptik Biliş: Rasyonel ve Stokastik Dokuların Nöro-Üretken Tasarım Bağlamında Analizi İlker Erkan, Seda Şimşek	199
Parametrik Tasarım Süreçlerinin Değerlendirilmesine Yönelik Veri Tabanlı Protokol Analizi Yöntemi Kamile Öztürk Kösençiğ, Yağmur Burcu Güneş	212
Konut Birimindeki Koridorların Algısal Bir Değerlendirme Modeli Cansu Taş, Ethem Gürer	222
Co-living (Birlikte Yaşam) Konutlarının Hesaplamalı Okumaları: Uyarlanabilir Konut Dönüşümünde Mekânsal Kararların Değerlendirilmesi Nisa Nur Göksel, Burçin Cem Arabacıoğlu	234

MSTAS 26 "KAPSAM DIŞI"

XX. MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM ULUSAL SEMPOZYUMU

OTURUM 6	246
Sayısal Yöntemler, Görselleştirme ve Kùltürel Miras	
Oturum Başkanı: Seray Türkay Coşkun	
Parametrik Tasarımın Tarihi Evriminin Dört Önemli Yapı Üzerinden Analizi	247
Şule Taşlı Pektaş, Umay Karakaş	
Behind the Museum: Collection Understanding through Data Visualization	259
Derya Gündoğmuş, Dila Kangel, Başak Uçar	
Tracing Chios: A Digital Cartographic Database of Historical Maps	270
Deniz Yeni	
Veri Seti Oluşturma ve Görselleştirme Projesi: "Massive Body Loss"	287
Belkıs Sena Top, Zeynep Kozoğlu	
3. Gün _ 23 Haziran 2026	
OTURUM 7	298
Sayısal Üretim, Fabrikasyon ve Dijital Zanaatkârlık	
Oturum Başkanı: Mine Özkar	
Performatif Tasarım ile Kil-Tabanlı 3B Baskının Bütünleştirilmesine Yönelik Bir Metodoloji: Hesaplamalı Kabuk Tasarımı	299
Çağdaş Elibol, Sevil Yazıcı	
3B Beton Baskı ile Afet Sonrası Barınma: Algoritmik Yerleşim Önerisi	312
Sena Nur İmir, Togan Tong	
Hidrojel Esaslı Biyokompozitlere İlişkin Bir Sayısal Tasarım ve Çevresel Performans Değerlendirme Yaklaşımı	322
Nergiz Han, Sevil Yazıcı	

OTURUM 8	334
Yapay Zekâ ve Mimari Tasarım	
Oturum Başkanı: Duygu Tüntaş	
Halüsinatif Mekânlarda Gerçeklik: Yapay Zekâ ve Otorite Krizi	335
Büşra Pehlivan, Selin Çoban, Selin Oktan, Serbürent Vural	
Yapay Zekâ Tabanlı Metinden 3B Model Üretim Araçlarının Karşılaştırmalı Değerlendirilmesi	346
Önder Aras, Faruk Can Ünal	
Expanding BIM Framework with Transformative Elements and Spatial Affordance	356
Furkan Berke Çilesizoğlu, Togan Tong	
OTURUM 9	368
Sanal, Artırılmış ve Karma Gerçeklik	
Oturum Başkanı: Arzu Gönenç Sorguç	
Fiziksel ve Sanal Gerçeklik Ortamlarında Aydınlatma Koşullarının ve Görsel Konforun Karşılaştırılması: Durum Çalışması	369
Sevim Sevede Güngör, Berk Ekici, Zehra Tuğçe Kazanasmaz	
The Translation of Architectural Terminology to the Definition of Virtual Territory	377
Dilşad Nur Altınışik	
Sanal Gerçeklik Ortamında Etkileşimli Mimari Miras Deneyimi: İstanbul Kara Surları Örneği	385
Elif Erkol, Derya Güleç Özer	
İnteraktif Mekânlar Ve Sosyal Tepkisellik: Sayısal Tasarımın Sosyo-Mekânsal Bir Eşik Olarak Yeniden Kurgusu	394
Ahmet Haktan Canpolat, Yağmur Söker	

OTURUM 10

Akıllı Kentler, Veri-Temelli Kentsel Sistemler ve Dijital İyileştirme

Oturum Başkanı: Başak Uçar

406

Afet Sonrası Mekânsal Engellerin Tahliye Performansı Üzerindeki Etkisi:
Etmen Tabanlı Bir Simülasyon Analizi
Süphan Kaan Çiftci, Mehmet Ali Altın

407

Afet Sonrası Karar Destek Mekanizmalarında Epistemik Geçirimsizlik:
Adıyaman Hasar Tespit Verilerinin Mekânsal Analizi
Başak Ünver, Betül İlayda Ebrinç

419

Katılımcı Kentsel Tasarım Oyunlarından Sayısal Tasarıma Veri Entegrasyonu:
Karşılaştırmalı Bir Analiz
Berkutay Ali Coşkun, Sema Alaçam, Oğuz Orkun Doma

429

Yapay Gece Işıklarının Karşılaştırmalı Analizi:Karanlık Gökyüzü Sertifikalı Alanlar ve Işık
Kirliliği Altındaki Kentsel Ortamlar için Rastgele Orman Regresyonu
Zeynep Çolakoğlu

444

“KAPSAM DIŞI”

Mimari Tasarımda Yapay Zekâ Ajanlarının Kullanımı: Kendi Ajanınızı Tasarlayın ve Kullanın

Kaan Bingöl

Bu atölye, mimarlık, tasarım ve yapılı çevre alanlarında yapay zekâ ajanlarının kullanımını ele alarak katılımcıların kendi üretim süreçlerine uyarlanabilir, bağımsız ve denetlenebilir iş akışları geliştirmelerini amaçlamaktadır. Yapay zekâ ajanları, yalnızca hazır çözümler sunan araçlar olarak değil; bağlamla çalışan, farklı araçlara bağlanabilen ve yeniden kullanılabilir becerilerle yapılandırılabilen sistemler olarak incelenecektir. Katılımcılar, ajan mantığı, bağlam oluşturma, beceri geliştirme, araç entegrasyonu ve MCP aracılığıyla Revit, AutoCAD gibi tasarım ortamlarıyla etkileşim kurma yöntemlerini açık kaynaklı bir çalışma ortamında deneyimleyecektir. Atölye sonunda katılımcılar, yapay zekâ ajanlarının çalışma prensiplerini ve sohbet tabanlı yapay zekâ araçlarından farklarını kavrayacak; mimari tasarım süreçlerinde ajan tabanlı iş akışlarının potansiyelini değerlendirebilecek; belirli bir tasarım görevine yönelik, araç kullanabilen ve özelleştirilebilen bir ajan iş akışı tasarlayıp uygulayabilecektir. Ayrıca, tasarım araçları ve veri kaynaklarıyla entegrasyon senaryolarını analiz ederek açık kaynaklı ve sağlayıcıdan bağımsız yaklaşımların mimarlık pratiğindeki kullanım olanaklarını deneyimleyecektir.

Dünya Kurma (Worldbuilding) Yoluyla Geleceğın Mekânlarını Tasarlamak

Ege Alp Esassolak

Mimarlık pratiğı, fiziksel çevrenin ötesine geçerek sanal dünyalar, artırılmış ve sanal gerçeklik ortamları ile dijital yaşam alanlarını da kapsayan yeni tasarım alanlarına doğru genişlemektedir. Bu dönüşüm, tasarımcıların yalnızca mevcut koşullara yanıt veren değil, aynı zamanda alternatif gelecekleri hayal eden ve sistematik biçimde kurgulayan yaklaşımlar geliştirmesini gerektirmektedir. Bu atölye, dünya kurma (worldbuilding) yöntemini mimari tasarım, kullanıcı deneyimi ve gelecek senaryoları üretimi için yaratıcı bir araç olarak ele almaktadır. Katılımcılar, farklı çevresel, toplumsal ve teknolojik koşullara sahip spekülatif dünyalar tasarlayarak bu dünyaların mekânsal ve yaşamsal sonuçlarını birlikte tartışacaktır. Tasarım süreci boyunca katılımcılar, farklı bakış açılarını deneyimleme, geri bildirim verme ve tasarım kararlarını yeniden değerlendirme fırsatı bulacaktır. Atölye; mimarlık, XR ve spekülatif tasarım kesişiminde, geleceğın fiziksel ve sanal yaşam ortamlarını tasarlarken yaratıcılık, eleştirel düşünme ve kullanıcı odaklı tasarım yaklaşımlarının nasıl bir araya getirilebileceğini araştırmayı amaçlamaktadır.

MSTAS 26 “KAPSAM DIŞI”

XX. MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM ULUSAL SEMPOZYUMU

OTURUM 1

YAPAY ZEKÂ ve GELİŞMİŞ HESAPLAMALI SİSTEMLER

FeronAI: CNN Tabanlı Orman Yangını Yayılım Tahmini

Berke Can Gülmez¹ 

¹Orta Doğu Teknik Üniversitesi

¹berke.gulmez@metu.edu.tr

Özet

Küresel iklim değişikliğinin tetiklediği aşırı sıcaklıklar ve uzun süreli kuraklıklar, orman yangınlarının sıklığını, şiddetini ve yayıldığı coğrafi alanı dramatik bir biçimde artırmaktadır. Günümüzde bu yangınlar, yalnızca doğal ekosistemleri değil, ormanlık alanların kentsel dokuyla kesiştiği Kırsal-Kentsel Arayüz (WUI) bölgelerine sıçrayarak yapıları çevreyi ve insan yerleşimlerini doğrudan tehdit eden makro ölçekli bir mekansal problem haline gelmiştir. Afet anında kentsel dayanıklılığın sağlanması, yangının yalnızca nerede başladığını tespit eden reaktif izleme sistemlerinden ziyade, yangının hangi yerleşim yönüne yayılacağını yüksek doğrulukla öngörebilen proaktif karar destek sistemlerine geçişi zorunlu kılmaktadır. Geleneksel fizik tabanlı simülasyon modelleri, yüksek hesaplama maliyetleri ve operasyonel kısıtlılıkları sebebiyle bu gerçek zamanlı müdahale gereksinimlerini karşılamakta yetersiz kalmaktadır. Bu bağlamdaki kısıtlılıkları aşmak amacıyla geliştirilen bu çalışma, orman yangınlarının mekansal yayılımını uzaktan algılama verileri ve derin öğrenme algoritmalarıyla tahmin eden "FeronAI" adlı çok modlu bir model sunmaktadır. Çalışmada, Akdeniz havzasında yer alan Türkiye, İtalya, İspanya ve Yunanistan'daki 210 büyük ölçekli yangın olayı (yanma alanı 250.000 m²'den fazla) incelenmiştir. Google Earth Engine (GEE) platformu üzerinden elde edilen meteorolojik veriler, bitki örtüsü indeksleri (NDVI) ve geçmiş yangın maskeleri bir araya getirilerek özgün bir veri seti oluşturulmuş; model mimarisi olarak ise ince mekansal detayları korumak adına atlamalı bağlantılara sahip PyTorch tabanlı U-Net yapısı tercih edilmiştir.

Orman yangını uydu verilerinde modelin tahmin yeteneğini kısıtlayan en büyük zorluklardan biri olan "aşırı sınıf dengesizliği" (haritanın %99'unun güvenli, yalnızca %1'inin yangın olması) problemi, bu çalışmada İkili Çapraz Entropi (BCE) ve Dice kaybını birleştiren yenilikçi bir Hibrit Kayıp Fonksiyonu kullanılarak aşılmıştır. Modelin performans analizi sonucunda, FeronAI'nin aktif yangın cephelerini öğrenmede ve arka plandan ayırt etmede başarılı sayılabilecek bir F1-Skoru (~0.52) elde ettiği görülmüştür. Bununla birlikte, tahmin edilen toplam yangın yayılımı ile gerçekte gerçekleşen yayılım alanı arasında $r=0.928$ gibi son derece güçlü bir pozitif korelasyon saptanmıştır. Zincir görselleştirmelerinden elde edilen bulgular, U-Net mimarisinin sadece pikselleri statik olarak ezberlemediğini; rüzgar yönü gibi meteorolojik koşullar ile yangın yayılımı arasındaki nedensel fiziksel ilişkileri başarıyla öğrendiğini kanıtlamaktadır. Sonuç olarak bu araştırma, derin öğrenme yaklaşımlarının orman yangını yayılımını modellemede geleneksel modellere uygulanabilir bir alternatif oluşturduğunu ortaya koymaktadır. FeronAI modeli, yalnızca ekolojik tahribatı tahmin eden bir araç olmanın ötesinde; kentsel tampon bölgelerin lanlanması, tahliye senaryolarının belirlenmesi ve afet dirençli yapıları çevre süreçlerini besleyecek yenilikçi bir karar destek sistemi potansiyeli taşımaktadır.

Anahtar Kelimeler: Orman Yangını Yayılımı, Evrişimli Sinir Ağları (CNN), Kırsal-Kentsel Arayüz (WUI), Çok Modlu Yaklaşım, Çevresel Tasarım Kararları.

FeronAI: CNN-Based Wildfire Spread Prediction

Berke Can Gülmez 

Middle East Technical University
berke.gulmez@metu.edu.tr

Abstract

Extreme temperatures and prolonged droughts, driven by global climate change, are dramatically increasing the frequency, severity, and geographic spread of wildfires. Today, these fires have become a macro-scale spatial problem that threatens not only natural ecosystems but also the built environment and human settlements directly, by spreading to Wildland-Urban Interface (WUI) zones where forested areas intersect with the urban fabric. Ensuring urban resilience during disasters necessitates a transition from reactive monitoring systems that merely detect where a fire started to proactive decision-support systems that accurately predict the direction of fire spread toward settlements. Traditional physics-based simulation models remain inadequate in meeting these real-time intervention requirements due to high computational costs and operational constraints. Developed to overcome the limitations in this context, this study presents a multimodal model named "FeronAI" that predicts the spatial spread of wildfires using remote sensing data and deep learning algorithms. The study examines 210 large-scale wildfire events (with burned areas exceeding 250,000 m²) in Turkey, Italy, Spain, and Greece, all located within the Mediterranean basin. A unique dataset was created by combining meteorological data, vegetation indices (NDVI), and historical fire masks obtained via the Google Earth Engine (GEE) platform; a PyTorch-based U-Net architecture with skip connections was chosen as the model architecture to preserve fine spatial details.

The problem of "extreme class imbalance" (99% of the map being safe, with only 1% being fire)—one of the greatest challenges limiting the predictive capability of models on wildfire satellite data—was overcome in this study by using an innovative Hybrid Loss Function combining Binary Cross-Entropy and Dice loss. The performance analysis of the model revealed that FeronAI achieved an F1-Score (~0.52), which can be considered successful for learning active fire fronts and distinguishing them from the background. Furthermore, a very strong positive correlation ($r=0.928$) was observed between the predicted total fire spread and the actual spread area. Findings from sequence visualizations show that the U-Net architecture does not merely memorize pixels statically but successfully learns causal physical relationships between meteorological conditions, such as wind direction, and fire spread. In conclusion, this research demonstrates that deep learning approaches constitute a viable alternative to traditional models in modeling wildfire spread. Beyond merely predicting ecological destruction, the FeronAI model has the potential to serve as an innovative decision-support system that will inform the planning of urban buffer zones, the development of evacuation scenarios, and the design of disaster-resilient built environments.

Keywords: Wildfire Spread, Convolutional Neural Network (CNN), Wildland-Urban Interface (WUI), Multi-Modal Approach, Environmental Design Decisions.

1. Giriş

Küresel iklim değişikliğinin tetiklediği aşırı sıcaklıklar ve uzun süreli kuraklıklar, orman yangınlarının sıklığını, şiddetini ve yayıldığı coğrafi alanı dramatik bir biçimde artırmaktadır (Andrianarivony & Akhloufi, 2024; Jain et al., 2020). Günümüzde orman yangınları yalnızca doğal ekosistemlerle sınırlı kalmayıp, ormanlık alanların kentsel dokuyla kesiştiği Kırsal-Kentsel Arayüz (Wildland-Urban Interface) bölgelerine sıçrayarak insan yerleşimlerini ve yapıları çevreyi doğrudan tehdit eden makro ölçekli bir mekansal ve mimari problem haline gelmiştir (Kim et al., 2026). Kentsel dayanıklılığın (urban resilience) sağlanması ve can kayıplarının en aza indirilmesi, yangının yalnızca nerede başladığını tespit eden "reaktif" sıcak nokta sistemlerinden ziyade, yangının bir sonraki aşamada hangi yerleşim yönüne yayılacağını yüksek doğrulukla öngörebilen "proaktif" karar destek sistemlerine (DSS) geçişi zorunlu kılmaktadır (Bot & Borges, 2022).

Fiziksel simülasyonların bu operasyonel kısıtlılıklarını aşmak üzere, son yıllarda Makine Öğrenmesi (ML) ve uzaktan algılama verilerini entegre eden Derin Öğrenme (DL) yaklaşımları literatürde güçlü bir alternatif olarak öne çıkmıştır (Huot et al., 2022; Jain et al., 2020). Özellikle Evrişimli Sinir Ağları (CNN), uydu görüntülerindeki (grid tabanlı) mekansal ve zamansal örüntüleri (topografya, meteoroloji, bitki örtüsü) otomatik olarak öğrenerek yangın davranışını fiziksel modellere kıyasla çok daha hızlı ve esnek bir şekilde tahmin edebilmektedir (Ghali & Akhloufi, 2023; Zhou et al., 2025). Buna rağmen, mevcut veri odaklı literatür incelendiğinde iki temel boşluk göze çarpmaktadır: Birincisi, yangın yayılım alanlarının haritanın bütününe oranla çok küçük kalmasından kaynaklanan "aşırı sınıf dengesizliği" (class imbalance) problemi, modellerin tahmin yeteneğini kısıtlamaktadır. İkincisi ise, geliştirilen derin öğrenme algoritmalarının çoğunlukla yalnızca yangın söndürme ve lojistik odaklı kalması; bu modellerin mimarlık ve kentsel planlama disiplinlerine entegre edilerek afet dirençli yapıları çevre tasarımı bir karar destek mekanizması olarak kullanılmamasıdır (Andrianarivony & Akhloufi, 2024).

Bu çalışma, literatürdeki söz konusu boşlukları doldurmak amacıyla FeronAI adlı çok modlu (multi-modal) ve CNN tabanlı özgün bir orman yangını yayılım tahmin modeli sunmaktadır. Bu çalışmayla, orman yangınlarının mekansal yayılımlarının uydu görüntüleri, iklim ve coğrafi verilere dayalı bir derin öğrenme modeli ile tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Günümüzde çok sık orman yangınlarının yaşandığı Akdeniz havzası birincil test alanı olarak seçilmiş; yangın yayılımının fiziksel olarak tutarlı ve öğrenilebilir mekansal-zamansal örüntüler sergileyip sergilemediği araştırılmıştır.

Bu çalışmanın temel amacı; FeronAI modelinin sadece ekolojik bir felaket tahmini aracı olarak değil, aynı zamanda mimari bağlamda kentsel tampon bölgelerin oluşturulması, tahliye ve zonlama senaryolarının belirlenmesi ve kırsal-kentsel arayüzdeki yapısal dayanıklılığın (urban resilience) kurgulanması adına makro ölçekli çevresel tasarım süreçlerini besleyecek yenilikçi bir karar destek sistemi olarak potansiyelini ortaya koymaktır. Çalışmanın ilk bölümünde literatür taraması yapılmış olup diğer bölümlerinde verilerin toplanması, modelin oluşturulması ve modelin performansının yorumlanması bulunmaktadır.

2. Literatür ve Kavramsal Çevre

Küresel iklim değişikliğinin etkileriyle birlikte sıklığı ve şiddeti artan orman yangınları hem doğal ekosistemleri hem de yapıları çevreyi tehdit eden en yıkıcı afetlerin başında gelmektedir (Andrianarivony & Akhloufi, 2024). FeronAI çalışmasının temelini oluşturan bu kavramsal çerçeve; geleneksel yangın davranış modellerinin gelişiminden derin öğrenme mimarilerine, uzaktan algılama

verilerinden kırsal-kentsel arayüz (WUI) yangınlarına ve kentsel dayanıklılık (urban resilience) kavramlarına uzanan çok disiplinli bir literatüre dayanmaktadır.

2.1. Orman Yangını Modelleme ve Tahmininde Geleneksel ve Fiziksel Yaklaşımlar

Tarihsel olarak orman yangını yayılımını modellemek için geliştirilen ilk yaklaşımlar, yanma kimyası ve akışkanlar mekaniğine dayalı fiziksel, matematiksel ve yarı ampirik modellere dayanmaktadır (Zhou et al., 2025). Literatürde en yaygın bilinen geleneksel simülasyon sistemleri arasında Rothermel (1972) tarafından formüle edilen yüzey yangını modeli, FARSITE (Srivastava et al., 2016), FlamMap ve WRF-Fire (Coen et al., 2013) gibi araçlar öne çıkmaktadır (Lattimer et al., 2020; Masrur et al., 2024). Bu fiziksel tabanlı modeller, topografya ve rüzgâr gibi değişkenleri kullanarak yayılım oranlarını hesaplasa da karmaşık rüzgâr-ateş etkileşimlerini simüle etmek için yüksek hesaplama gücüne ve işlem süresine ihtiyaç duyarlar (Lattimer et al., 2020). Ancak kimyasal yanma, akışkanlar mekaniği ve diferansiyel denklemler üzerine kurulu bu geleneksel modeller; hem hesaplama maliyetlerinin çok yüksek olması hem de karmaşık kalibrasyon süreçlerine ihtiyaç duymaları sebebiyle afet anında hızlı ve gerçek zamanlı karar alma gereksinimlerini karşılamakta yetersiz kalmaktadır (Hodges & Lattimer, 2019; Shadrin et al., 2024). Statik varsayımlar üzerine kurulan ve dinamik çevresel koşullara adaptasyonda esnek olmayan bu sistemler, özellikle gerçek zamanlı afet müdahalesi ve hızlı karar alma süreçlerinde kısıtlılıklar yaratmaktadır (Andrianarivony & Akhloufi, 2024; Zhou et al., 2025).

2.2. Yangın Duyarlılık (Susceptibility) Haritalaması ve Makine Öğrenmesi

Geleneksel modellerin kısıtlılıklarını aşmak amacıyla, son yirmi yılda Makine Öğrenmesi (ML) algoritmaları literatürde geniş yer bulmuştur (Jain et al., 2020). Random Forest (RF), Destek Vektör Makineleri (SVM), Lojistik Regresyon (LR), Maksimum Entropi (MaxEnt) ve Yapay Sinir Ağları (ANN) gibi algoritmalar kullanılarak, geçmiş yangın konumları ile meteorolojik, topografik ve bitki örtüsü verileri arasındaki istatistiksel ilişkiler kurulmuş ve yangın duyarlılık (risk) haritaları oluşturulmuştur (Göltas et al., 2024; Iban & Sekertekin, 2022; Kantarcioğlu et al., 2023).

Örneğin, Kantarcioğlu vd. (2023) Türkiye'nin Trakya ve İstanbul bölgeleri için geliştirdikleri YSA (ANN) modelinde %88 genel doğruluk oranına ulaşmış; yollara ve yerleşim alanlarına yakınlık gibi antropojenik faktörlerin yangın ihtimalini artırdığını vurgulamışlardır (Kantarcioğlu et al., 2023). Benzer şekilde, Iban ve Şekertekin (2022) Adana ve Mersin'de gerçekleştirdikleri çalışmada, XGBoost ve Random Forest gibi makine öğrenmesi modellerinin yangın riskini belirlemede yüksek performans (%95.6) gösterdiğini kanıtlamıştır (Iban & Aksu, 2024; Iban & Sekertekin, 2022). Türkiye'de yapılan bir çalışmada ise Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP) ve Evrişimli Sinir Ağları (CNN) karşılaştırılmış, CNN'in çevresel faktörleri haritalandırmada daha isabetli sonuçlar verdiği tespit edilmiştir (Gürsoy et al., 2023). Ancak, standart makine öğrenmesi yaklaşımları ağırlıklı olarak tabular verilere bağımlı oldukları için, yangının gerçek zamanlı uzamsal-zamansal (spatio-temporal) dinamiklerini ve sınır genişlemesini modellemekte yetersiz kalabilmektedir (Andrianarivony & Akhloufi, 2024).

2.3. Uzaktan Algılama ve Derin Öğrenme ile Mekansal Yayılım Tahmini

Makine öğrenmesinden farklı olarak, Derin Öğrenme algoritmaları, özellikle görüntü işleme ve çok modlu (multi-modal) mekansal verilerin analizinde çığır açmıştır. CNN, pikseller arasındaki mekansal bağımlılıkları grid tabanlı bir ilişki olarak algılayabildiği için orman yangını yayılımı tahmininde fiziki modellere karşı en güçlü alternatif haline gelmiştir (Hodges & Lattimer, 2019). Hodges ve Lattimer (2019), FARSITE simülasyonlarıyla eğittikleri bir CNN modelinin (DCIGN), yangın yayılımını fiziksel modellerden çok daha hızlı ve yüksek doğrulukla (F1 skoru 0.82 çıkmıştır) öngörebildiğini göstermiştir.

Uydu teknolojilerinin gelişmesiyle MODIS (MCD14A1) ve VIIRS gibi aktif yangın tespiti sağlayan sensör verileri, derin öğrenme modellerinin en büyük veri kaynağı olmuştur (Huot et al., 2022). "*Next Day Wildfire Spread*" veri setinde; rüzgâr yönü, nem, kuraklık indeksi, topografya ve bir önceki günün yangın maskesi (Previous Fire Mask) değişkenlerini içeren 1 kilometrelik mekansal çözünürlükteki

uydu görüntülerinin bir araya getirilerek, CNN tabanlı tahminler için standart bir altyapı sunulmuştur (Huot et al., 2022; Zhou et al., 2025).

Mekansal ölçeğin sınırlarını genişletmek adına literatürde U-Net, ResNet ve ConvLSTM gibi mimariler giderek daha sık kullanılmaktadır (Zhou et al., 2025). Özellikle atlamalı bağlantılara (skip connections) sahip U-Net mimarisi, farklı ölçeklerdeki çevresel verilerden mekansal özellikleri koruyarak çıkarmada oldukça başarılıdır (Khennou & Akhloufi, 2023). Başka bir çalışmada kullanılan FU-NetCast modeli, Landsat görüntüleri ve topografik/iklimsel veriler ile ertesi günkü yangın çevresini %92.73 doğrulukla tahmin etmeyi başarmıştır (Khennou et al., 2021). CNN mimarisine zaman parametresi eklenerek oluşturulan CNN-BiLSTM ve ConvLSTM modelleri de yangının günbegün davranışını haritalamıştır (Marjani et al., 2024; Masrur et al., 2024).

2.4. Kırsal-Kentsel Arayüz (WUI) Yangınları, Yapılı Çevre ve Kentsel Dayanıklılık (Urban Resilience)

Derin öğrenme tabanlı yayılım modellerinin en kritik uygulama alanı, yapılı çevrenin ormanlık arazilerle iç içe geçtiği Kırsal-Kentsel Arayüz (WUI) bölgelerinin güvenliğinin sağlanmasıdır. Tarihsel orman yangını rejimleri, iklim kriziyle birleştiğinde WUI alanlarındaki konutlar ve kritik altyapı tesisleri için geri döndürülemez riskler taşımaktadır (El Houssami et al., 2016). WUI bölgelerindeki yapısal yangın yayılım yolları genellikle rüzgarla taşınan yanan parçacıklar (firebrands) ve doğrudan radyant ısı transferi üzerinden gerçekleşmekte olup, yerleşim tipolojileri ve vejetasyon planlaması bu riski belirleyen ana etmenlerdir (El Houssami et al., 2016).

Geleneksel planlama paradigmaları afet sonrası reaktif onarıma odaklanırken, modern Kentsel Dayanıklılık konsepti (Urban Resilience); felaketler öncesinde uyum sağlama (adaptation), etkiyi hafifletme (mitigation) ve proaktif karar alma süreçlerini vurgular (Büyüközkan et al., 2022). Kentsel alanların iklim krizine karşı direnç kazanması (urban system adaptation), çevresel tehlike verilerinin kentsel planlama ve mimari tasarım aşamalarına erken entegrasyonu ile mümkündür (Büyüközkan et al., 2022).

İşte bu noktada CNN tabanlı Karar Destek Sistemleri (DSS), makro ölçekli kentsel ve mimari planlama için bir potansiyel sunmaktadır (Bot & Borges, 2022). Açıklanabilir Yapay Zekâ (XAI) yaklaşımları (SHAP ve Grad-CAM ısı haritaları); rüzgâr hızı, yollara yakınlık, eğim gibi çevresel parametrelerin yerleşim bölgelerindeki yangın riskine ne derece katkı sağladığını şeffaf bir şekilde yöneticilere göstererek kentsel zonlama (zoning) ve tampon bölgelerin belirlenmesinde rehberlik etmektedir (İban & Aksu, 2024; Zhou et al., 2025).

Yangının yalnızca nerede başladığını tespit etmek (reaktif) yerine, çok modlu uydu verilerini kullanarak özellikle kırsal kentsel ekoton bölgelerindeki yangınların yapılı çevreye hangi rota üzerinden sızacağını tahmin etmek (proaktif), tahliye senaryolarının düzenlenmesi, hızlı yanıt süresinin getirdiği lojistik avantaj ve dirençli mimari cephe stratejilerinin oluşturulması adına doğrudan bir mekansal giridi sağlar. Bu bağlamda, uydu tabanlı derin öğrenme sistemlerinin mimarlık ve şehir planlama disiplinlerine adaptasyonu, sadece ekolojik zararı önlemekle kalmayıp yeşil yoğunluğunun arttığı kentsel dokunun yapısal direncinin güvence altına alınmasında kritik bir yapı taşı görevi görmektedir.

3. Kapsam ve Yöntem

Çalışma, Akdeniz havzasında meydana gelen büyük ölçekli orman yangınlarının modellenmesini kapsar. Metodoloji; heterojen verilerin toplanması, ön işleme ve derin öğrenme modelinin eğitilmesi aşamalarından oluşmaktadır.

3.1. Veri Seti Oluşturma ve Ön İşleme



Şekil 1: Verisi alınan yangınların haritadaki konumları

Çalışma için Akdeniz havzasından 4 ülke seçilmiş ve Google Earth Engine (GEE) API üzerinden yüksek çözünürlüklü uydu verileri elde edilmiştir. Böylelikle yanma alanı 250.000 m²'den fazla orman yangınları seçilmiş; İspanya'dan 35, İtalya'dan 79, Yunanistan'dan 45 ve Türkiye'den 51 olmak üzere toplamda 210 zincir yangın verisi (4-10 günlük yangınlar, toplamda 633 günün verisi) toplanmıştır (Şekil 1). GEE API üzerinden veri çekimi çok uzun sürdüğünden mevcut zamanda sadece 210 zincir veri ayıklanabilmektedir.

Ham yangın verileri, her pikselin WGS 84 projeksiyonunda bir koordinata karşılık geldiği çok bantlı GeoTIFF dosyaları halinde derlenmiştir. Veri seti; Yangın Sıcaklığı (Kelvin), Yangın Maskesi (0=Güvenli, 1=Yangın), Meteorolojik Veriler (yangın ve hava sıcaklıkları, rüzgar hızı ve yönü) ve Bitki Örtüsü İndeksi (NDVI) olmak üzere 6 kanaldan oluşmaktadır. Girdi kanallarındaki değer aralıklarının farklılığı nedeniyle kanal bazlı normalizasyon uygulanmış; problem, mevcut atmosfer ve yeryüzü durumundan bir sonraki günün yangın maskesini öngören bir gözetimli segmentasyon görevi olarak kurgulanmıştır.

3.2. Model Mimarisi ve Eğitimi

Yangın yayılımının tahmini için PyTorch kütüphanesi kullanılarak evrişimli sinir ağlarına (CNN) dayalı bir tahmin modeli tasarlanmıştır. Model mimarisi olarak, girdi görüntülerinden ince mekansal detayları korumak ve tahmin edilen yangın sınırlarının keskin olmasını sağlamak amacıyla atlama bağlantıları (skip connections) kullanan ve değişkenin ağırlıklarını kendi ayarlayan U-Net yapısı tercih edilmiştir (Tablo 1).

Tablo 1: FeronAI modelinde kullanılan değişkenler ve ağırlıkları

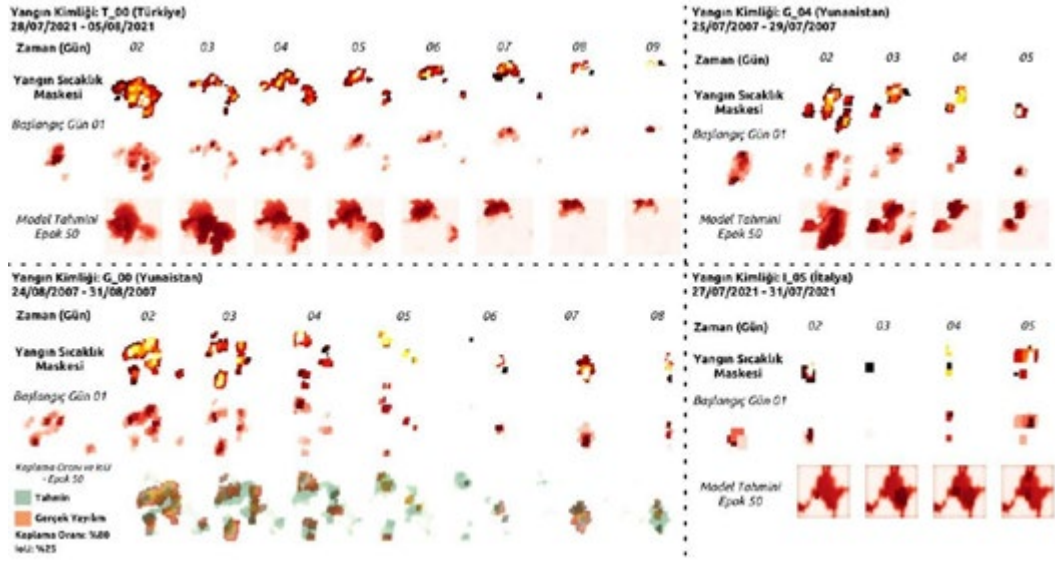
Değişken (Binary)	Kaynak	Ağırlık
<i>Yeşil Alan (Vegetation)</i>	NASA MODIS NVDI/EVI	0.25
<i>Hava Sıcaklığı (Air Temp.)</i>	ECMWF ERA5	0.20
<i>Yangın Sıcaklığı (Fire Temp.)</i>	NASA FIRMS	0.15
<i>Yanan Alan (Fire Mask)</i>	NASA FIRMS	0.12
<i>Rüzgar Yönü</i>	ECMWF ERA5	0.10
<i>Rüzgar Hızı</i>	ECMWF ERA5	0.09
<i>Tarih, Lokasyon ve 2B Topoğrafya</i>	SRTM	0.09

Verilerdeki aşırı sınıf dengesizliğini (haritanın %99'u güvenli, %1'i yangın) çözmek adına, piksel doğruluğu sağlayan İkili Çapraz Entropi (BCE) ile örtüşmeye odaklanan Dice Kaybı birleştirilerek Hibrit Kayıp Fonksiyonu kullanılmıştır. Model, rotasyonel değişmezliği öğrenmesi için veri artırma teknikleri (90, 180 ve 270 derece döndürme ve yatay-dikey çevirme) ile 1680 adet zincir veri oluşturulmuş (toplamda 5064 gün verisi) ve veri seti %80 eğitim, %20 test olarak ikiye ayrılmıştır.

4. Bulgular

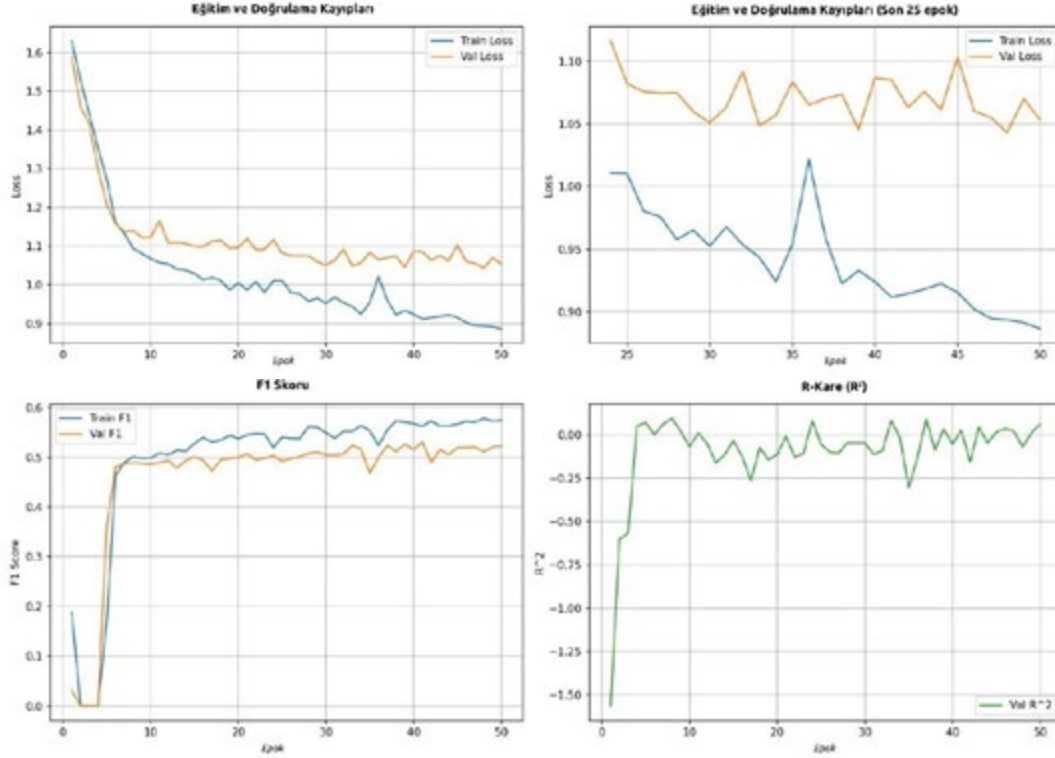
Modelin ürettiği sonuçlar; girdi (ilk yangının başladığı gün ve verileri), gerçek durum (bir sonraki günün uydu maskesi) ve model tahmini (çıktı) ilişkisini gösteren zincir görselleştirmeler ve ısı haritaları aracılığıyla incelenmiştir. Isı haritalarındaki kırmızı alanlar, modelin yangın olma ihtimalini yüksek doğrulukla öngördüğü bölgeleri temsil etmektedir. Ertesi güne geçildiğinde de elindeki ilk gün ve gerçek veriler ertesi günün girdisi olarak kullanılmaktadır (**Şekil 2**).

Şekil 2'de görüldüğü gibi modelin özellikle geniş çaplı ve uzun süreli yangınlarda mekansal yayılımı oldukça başarılı bir şekilde tahmin ettiği görülmüştür (T_00 ve G_00). Ancak, daha az gün süren ve nispeten daha küçük yanan alana sahip yangınlarda modelin tahmin yeteneğinin daha zayıf kaldığı tespit edilmiştir (G_04 ve I_05).



Şekil 2: Modelin 4 farklı orman yangını tahminleri ve kaplama oranı sonuçları

5. Verilerin Değerlendirmesi



Şekil 3: Modelin 50 epok sonundaki eğitim kaybı, doğrulama kaybı, F1 skoru ve doğrulama değerleri

FeronAI'nin nicel performansı için 6 yöntem kullanılmıştır. Grafikler halinde görselleştirilen eğitim dinamikleri, modelin öğrenme davranışı ve istikrarı hakkında kritik bilgiler sağlamaktadır:

- **Hassasiyet (Precision):** Model tarafından pozitif olarak sınıflandırılan (yangın yayılımı olacağı öngörülen) piksellerin ne kadarının gerçekte doğru sınıflandırıldığını ölçer. Yanlış pozitif (FP) tahminleri minimize etmeyi hedefler ve modelin aşırı tahmin (overprediction) eğilimini değerlendirir. Doğru pozitifler (TP) üzerinden hesaplanır.

$$Hassasiyet = \frac{TP}{TP + FP} \quad (1)$$

- **Duyarlılık (Recall):** Gerçekte pozitif olan (yanmış) (TP) piksellerin model tarafından ne oranda doğru tespit edilebildiğini gösterir. Yanlış negatifleri (FN) cezalandırarak, tehlike arz eden alanların gözden kaçırılma oranını kantitatif olarak sunar.

$$Duyarlılık = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2)$$

- **F1-Skoru:** Hassasiyet ve Duyarlılık değerlerinin harmonik ortalamasını ifade eder. Orman yangını yayılımı gibi sınıf dengesizliğinin (class imbalance) yüksek olduğu (yanan piksellerin toplam alana oranının düşük olduğu) veri setlerinde, model başarımını değerlendirmek için kullanılan temel istatistiksel ölçüttür (**Şekil 3**).

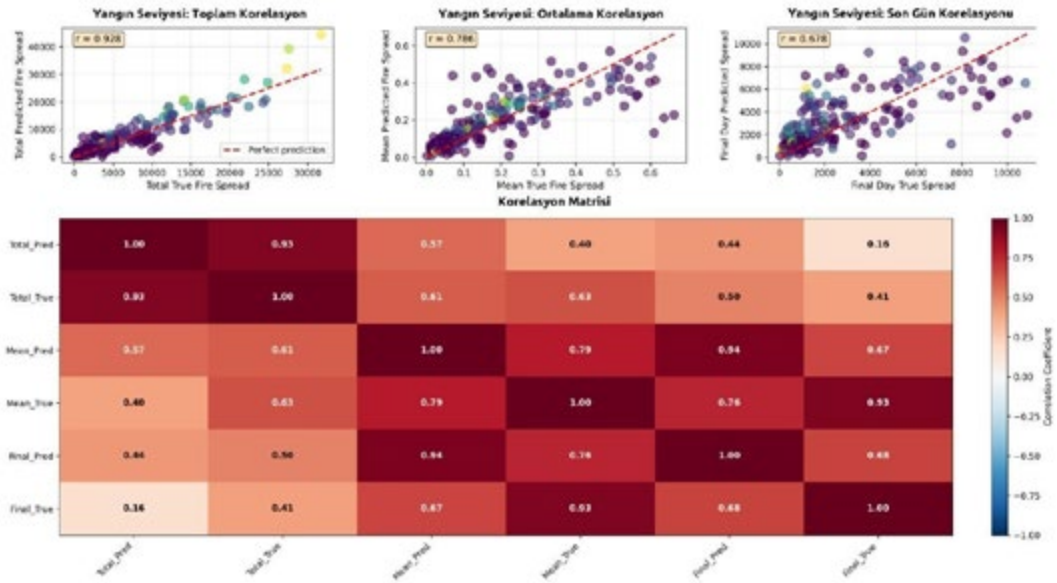
$$F1 = \frac{Hassasiyet * Duyarlılık}{Hassasiyet + Duyarlılık} \quad (3)$$

- **IoU (Kesişim üzeri Birleşim, Intersection over Union):** Tahmin edilen bölge (T) ile gerçek bölge (G) arasındaki mekansal örtüşmeyi değerlendiren temel semantik segmentasyon metriğidir.

İki alanın kesişim kümesinin, birleşim kümesine oranlanmasıyla elde edilir ve modelin konumsal (spatial) doğruluğunu sınar (**Şekil 2**).

$$IoU = \frac{TP}{TP + FP + FN} \quad (4)$$

- **Kaplama Oranı (Coverage):** Model tarafından tahmin edilen mekansal yayılımın (risk poligonunun), gözlemlenen gerçek yangın alanını kapsama düzeyini ifade eder. Tahmin sınırlarının, sahadaki fiziksel tahribat sınırlarını ne ölçüde içine aldığını değerlendiren mekansal bir metriktir (**Şekil 2**).
- **R-Kare (R^2):** Bağımlı değişkenin (yangın yayılım hızı veya etkilenen alan büyüklüğü) varyansının, bağımsız değişkenler (iklimsel ve topoğrafik faktörler) tarafından açıklanma oranını ifade eder. Modelin veriye uyum iyiliğini (goodness-of-fit) gösterir (**Şekil 3**).



Şekil 4: Modelin korelasyon sonuçları ve korelasyon matrisi

5.1. Eğitim ve Doğrulama Kaybı Analizi

Şekil 3'teki kayıp grafikleri (sol üst ve sağ üst) modelin çalışma mantığı ile birkaç kritik noktayı göstermektedir:

- Model, ilk 10 epok içinde keskin bir yakınsama sergilemekte ve eğitim kaybı yaklaşık 1,6'dan 1,1'e önemli ölçüde düşmektedir. Bu, U-Net mimarisinin, kara/su ve bitki örtüsü/yangın gibi veri setinin temel mekansal özelliklerini hızla öğrendiğini göstermektedir.
- 15. epoktan sonra, Doğrulama Kaybı (Turuncu Çizgi) 1,05 ile 1,10 arasında salınım yaparak bir plato evresine girerken, Eğitim Kaybı hafifçe azalmaya devam etmektedir. Eğitim ve Doğrulama performansı arasında küçük bir fark olmasına rağmen, eğriler paralel bir trend izlemektedir. Bu durum, modelin temel mekansal özellikleri hızla öğrendiğini, aşırı öğrenmeden (overfitting) kaçındığını ve görünmeyen verilere karşı güçlü bir genelleme yeteneği sergilediğini ortaya koymaktadır.

5.2. F1-Skoru Değerlendirmesi

Yangın verilerindeki ciddi sınıf dengesizliği göz önüne alındığında (aktif yangın pikselleri görüntünün %1'inden azını oluşturduğundan), **Şekil 3'teki** F1 Skoru (sol alt) başarı için en güvenilir ölçüt olarak hizmet etmektedir:

- Skor, kayıptaki düşüşle eş zamanlı olarak, 5. epok civarında sıfıra yakın bir değerden yaklaşık 0,50'ye yükselmektedir.

- Eğitim F1 (Mavi) ve Doğrulama F1 (Turuncu) çizgileri birbirine hizalanmış ve 0,52 civarında sabittir. Bu hizalama, modelin eğitim verilerini ezberlemediğini, aksine yangın cephelerinin fiziksel özelliklerini gerçekten öğrendiğini doğrular. Bu kadar dengesiz bir segmentasyon görevinde 0,50'den büyük bir F1 puanı, Hassasiyet ve Duyarlılık arasında denge kurarak, tahmin yeteneğinin güçlü bir göstergesi olarak kabul edilebilir.

5.3. R-Kare (R^2) Değerlendirmesi

Doğrulama R^2 grafiği (sağ alt), sıfır civarında yüksek dalgalanma göstermektedir. R^2 , regresyon için standart olsa da, seyrek hedefleri içeren ikili segmentasyon görevleri için burada beklenen bir dalgalanmadır. Dalgalanmalar, farklı örnekler arasındaki ateş boyutlarındaki yüksek varyansı yansıtarak, istatistiksel korelasyon yerine IoU ve F1-Skorunu birincil karar ölçütleri olarak önceliklendirme kararını güçlendirmektedir.

5.4. Korelasyon Matrisi ve Korelasyon Üzerinden Değerlendirme

IoU ve F1-Skor gibi piksel düzeyindeki metrikler segmentasyon doğruluğu hakkında fikir verirken, modelin orman yangını olaylarının genel büyüklüğünü ve zamansal dinamiklerini yakalama yeteneğini değerlendirmek için modelin tahminleri ile gerçek veriler arasında birden fazla boyutta Pearson korelasyon katsayıları (r) hesaplanmıştır. Bu analizin sonuçları **Şekil 4'te** sunulmuştur:

- En önemli bulgu, "Yangın Seviyesi: Toplam Korelasyon" dağılım grafiğinde (sol üst) gözlemlenmektedir. Model, Toplam Tahmin Edilen Yangın Yayılmı ile Toplam Gerçek Yangın Yayılmı arasında $r = 0,928$ gibi son derece güçlü bir pozitif korelasyon göstermektedir. Bu, FeronAI'nin bir felaketin kümülatif ölçeğini tahmin etmede son derece güvenilir olduğunu göstermektedir. Piksel düzeyinde küçük mekansal sapmalar meydana gelse bile, model toplam alan riskini doğru bir şekilde hesaplar; bu da afet yönetiminde kaynak tahsisi ve lojistik planlama için kritik bir parametredir.
- "Yangın Seviyesi: Ortalama Korelasyon" grafiğinde (üst orta), 1. günden 9. güne kadar 0,46 civarında seyrederek nispeten sabit kalmıştır. Bu istikrar, U-Net mimarisinin yalnızca başlangıç durumunu ezberlemek yerine, yayılmanın altında yatan fiziki başarıyla öğrendiğini ve bu sayede uzun süreli yangın olayları sırasında bile tutarlı performans sergileyebildiğini göstermektedir.
- "Yangın Seviyesi: Son Gün Korelasyonu" grafiği (sağ üst), $r = 0,678$ katsayısı vermektedir. Bu, toplam büyüklük korelasyonundan biraz daha düşük olsa da, tahminin en zorlu yönü olan yangının nihai yayılımı için güçlü bir tahmin yeteneğini temsil etmektedir. Bu ölçümde gözlemlenen varyans, yangın davranışının son aşamalarındaki doğasında var olan öngörülemezliği vurgulamaktadır, ancak pozitif doğrusal eğilim modelin sağlamlığını doğrulamaktadır.
- Çapraz korelasyon matrisi (alt), modelin toplam yangın yayılım alanını tahmin etmede (0.93) çok başarılı olduğunu, ancak ortalama (0.79) ve son gün (0.68) tahminlerinde doğruluğun görece düştüğünü göstermektedir. Ayrıca, modelin kendi içindeki ortalama yayılım tahminleri ile son gün yayılım tahminlerinin (0.94) birbiriyle yüksek oranda bağımlı olduğu görülmektedir.

Sonuç olarak, grafiksel kanıtlar Hibrit Kayıp fonksiyonunun modeli yakınsamaya başarıyla yönlendirdiğini doğrulamaktadır. F1 puanının istikrarlılığı, FeronAI'nin doğrulama kümesinde yangın sınırlarını güvenilir bir şekilde ayırabildiğini ve önerilen derin öğrenme metodolojisinin mekansal tahmin için geçerliliğini kanıtlamaktadır.

6. Sonuç

FeronAI modelinden elde edilen bulgular, derin öğrenme yaklaşımlarının çevresel afet yönetimindeki potansiyeline dair önemli veriler sunmaktadır. Eğitim metriklerinde F1-Skorunun 0,52 seviyesinde dengelenmesi, modelin orman yangını veri setlerinde sıkça karşılaşılan "sınıf dengesizliği" problemini ele alma kapasitesini göstermektedir. Bu performans henüz nihai hedef olmasa da, ileriye dönük

optimizasyonlar için güçlü bir altyapı oluşturmaktadır. Veri setindeki piksellerin %99'undan fazlasının "yangın yok" sınıfına ait olduğu göz önüne alındığında, salt doğruluk (accuracy) metrikleri modelin başarısını değerlendirmede yanıltıcı olabilmektedir. Bu bağlamda, elde edilen tutarlı F1-Skoru, modelin tüm haritayı "yangın yok" olarak tahminleme eğilimine girmek yerine, aktif yangın cephelerini arka plandan başarılı bir şekilde ayırt etmeyi öğrendiğini kanıtlamaktadır.

Zincir Görselleştirmelerinden elde edilen kritik bir gözlem, modelin fiziksel dinamikleri yorumlama yeteneğidir. Meteorolojik kanalları ve bitki örtüsü indekslerini termal görüntülerle birlikte dahil ederek, U-Net mimarisi yönsel yayılımı anladığını göstermiştir. Güçlü rüzgar vektörlerine sahip doğrulama örneklerinde, tahmin edilen yangın maskesi rüzgar yönünde uzamış ve gerçek dünya fiziğini taklit etmiştir. Bu, modelin sadece statik şekilleri ezberlemekle kalmayıp, atmosferik koşullar ve yangın yayılımı arasındaki nedensel ilişkiyi öğrendiğini doğrulamaktadır.

Ancak, bazı sınırlamalar gözlemlenmiştir. Uydu görüntülerinin çözünürlüğü (GEE aracılığıyla MODIS/Sentinel/Landsat füzyonundan elde edilmiştir), ilk tutuşma noktalarının tespitini sınırlamaktadır. Model, yerleşik yangın cephelerinde en iyi performansı gösterirken, piksel çözünürlüğünden daha küçük olan "nokta yangınları" ile ilgili sorunlar yaşayabilir. Ayrıca, optik bantlardaki bulut örtüsü zaman zaman gürültüye neden olabilir, ancak termal bantların kullanımı bunu azaltmaya yardımcı olur.

Dahası, 3 günden kısa süren ve daha küçük bir alanı kapsayan yangınlar için tahminler çok tutarlı değildir. Bu nedenle, modelin daha da geliştirilmesi gerekmektedir.

Bu çalışma, derin öğrenme modelleri kullanılarak orman yangınlarının mekansal yayılımının öngörülebileceğini kanıtlamıştır. Bu araştırmanın literatüre ve afet yönetimine en büyük katkısı, sadece yangının nerede olduğunu gösteren "reaktif izlemeden", yangının nereye yayılacağını olasılıksal haritalarla öngören "proaktif tahmine" geçişi sağlamasıdır. Bu sayede karar vericilerin lojistik kaynakları çok daha etkin bir şekilde tahsis etmesi mümkün hale gelmektedir.

FeronAI projesinin gelecek aşamaları için üç temel geliştirme alanı planlanmaktadır:

- Gerçek Zamanlı API Entegrasyonu: Aktif yangınlara erken müdahale edilebilmesi amacıyla eşzamanlı GEE (Google Earth Engine) veri akışının sisteme entegrasyonu hedeflenmektedir. Bu veri sürekliliği, anlık karar destek mekanizmalarının etkinliği açısından kritik bir rol üstlenecektir.
- Üç Boyutlu (3B) Topoğrafya ve Sayısal Yükseklik Modeli (DEM) Entegrasyonu: İki boyutlu (2B) topoğrafik verilerin karmaşık senaryolarda yetersiz kalması nedeniyle, özellikle eğimli arazilerde gözlemlenen hızlı yangın yayılımının (baca etkisi) daha yüksek hassasiyetle modellenmesi öngörülmektedir.
- Kentsel Yangın Dinamiklerine Uyarılma: Model kapsamının kentsel-orman arakesitinden (WUI) şehir merkezlerine doğru genişletilmesi, yapı çevrenin mimari parametrelerinin ve sosyo-mekânsal dinamiklerin analize dahil edilmesini gerektirmektedir. Bu aşamada, binalar arası mesafelerin, sokak genişliklerinin ve kentsel doluluk-boşluk oranlarının (kentsel morfoloji) yangının radyasyon yoluyla atlama potansiyeline olan etkisi modellenmesi planlanmaktadır. Ayrıca, yüksek katlı yapıların oluşturduğu "kentsel kanyon" rüzgar tüneli etkileri ve cephe/çatı kaplama malzemelerinin termal özellikleri (yanıcılık direnci, ısı tutma kapasitesi) gibi yapı fiziği verileri, CNN mimarisinin tahmin katmanlarına mekânsal öznitelikler olarak entegre edilecektir. Bu fiziksel katmanlara ek olarak; bölgesel nüfus yoğunluğu, gün içi bina kullanım tipolojileri ve tahliye ağlarının kapasitesi gibi antropojenik veriler de modele dinamik risk parametreleri olarak beslenecektir. Böylece FeronAI, kırsal alandaki topoğrafik baca etkisinin kentsel dokudaki karmaşık aerodinamik ve mimari karşılığını çözümleyebilen; aynı zamanda can güvenliği ve tahliye önceliklerini merkeze alan bütüncül bir yapıya kavuşacaktır.

Yazar Beyanı

Bu çalışmanın temelleri, ODTÜ Yapı Bilimleri BS723 “Machine Learning Applications in Architecture” dersi kapsamında atılmış olup; yazar, projenin şekillenmesindeki yönlendirici katkılarından dolayı derse teşekkürlerini sunar.

Bu çalışmanın hazırlık sürecinde; metin dilinin iyileştirilmesi, raporun yapılandırılması ve sinir ağı uygulamasına yönelik kod parçacıklarının optimize edilmesi amacıyla üretken yapay zeka araçlarından faydalanılmıştır. Yazar, bu araçların kullanımının ardından elde edilen çıktıları gözden geçirip gerekli düzenlemeleri yapmış olup, bildirinin tüm içeriğine dair nihai sorumluluğu üstlenmektedir.

KAYNAKLAR

- Andrianarivony, H. S., & Akhloufi, M. A. (2024). Machine Learning and Deep Learning for Wildfire Spread Prediction: A Review. In *Fire* (Vol. 7, Number 12). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/fire7120482>
- Bot, K., & Borges, J. G. (2022). A Systematic Review of Applications of Machine Learning Techniques for Wildfire Management Decision Support. In *Inventions* (Vol. 7, Number 1). MDPI. <https://doi.org/10.3390/inventions7010015>
- Büyüközkan, G., Ilıcak, Ö., & Feyzioğlu, O. (2022). A review of urban resilience literature. *Sustainable Cities and Society*, 77. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103579>
- Coen, J. L., Cameron, M., Michalakes, J., Patton, E. G., Riggan, P. J., & Yedinak, K. M. (2013). Wrf-fire: Coupled weather-wildland fire modeling with the weather research and forecasting model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(1), 16–38. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-12-023.1>
- El Houssami, M., Thomas, J. C., Lamorlette, A., Morvan, D., Chaos, M., Hadden, R., & Simeoni, A. (2016). Experimental and numerical studies characterizing the burning dynamics of wildland fuels. *Combustion and Flame*, 168, 113–126. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2016.04.004>
- Ghali, R., & Akhloufi, M. A. (2023). Deep Learning Approaches for Wildland Fires Remote Sensing: Classification, Detection, and Segmentation. In *Remote Sensing* (Vol. 15, Number 7). MDPI. <https://doi.org/10.3390/rs15071821>
- GitHub. (2026). GitHub Copilot [AI coding assistant]. <https://github.com/features/copilot>
- Google. (2026). Gemini [Large language model]. <https://gemini.google.com/>
- Google Earth Engine Data Catalog. (2025). FireCCI51: MODIS Fire_cci Burned Area Pixel Product, Version 5.1 [Data set]. European Space Agency. <https://developers.google.com/earth-engine/datasets/tags/fire>
- Göltas, M., Ayberk, H., & Küçük, O. (2024). Forest fire occurrence modeling in Southwest Turkey using MaxEnt machine learning technique. *IForest - Biogeosciences and Forestry*, 17(1), 10–18. <https://doi.org/10.3832/for4321-016>
- Gürsoy, M. İ., Orhan, O., & Tekin, S. (2023). Creation of wildfire susceptibility maps in the Mediterranean Region (Turkey) using convolutional neural networks and multilayer perceptron techniques. *Forest Ecology and Management*, 538. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121006>
- Hodges, J. L., & Lattimer, B. Y. (2019). Wildland Fire Spread Modeling Using Convolutional Neural Networks. *Fire Technology*, 55(6), 2115–2142. <https://doi.org/10.1007/s10694-019-00846-4>
- Huot, F., Hu, R. L., Goyal, N., Sankar, T., Ihme, M., & Chen, Y. F. (2022). Next Day Wildfire Spread: A Machine Learning Dataset to Predict Wildfire Spreading From Remote-Sensing Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2022.3192974>
- Iban, M. C., & Aksu, O. (2024). SHAP-Driven Explainable Artificial Intelligence Framework for Wildfire Susceptibility Mapping Using MODIS Active Fire Pixels: An In-Depth Interpretation of Contributing Factors in İzmir, Türkiye. *Remote Sensing*, 16(15). <https://doi.org/10.3390/rs16152842>
- Iban, M. C., & Sekertekin, A. (2022). Machine learning based wildfire susceptibility mapping using remotely sensed fire data and GIS: A case study of Adana and Mersin provinces, Turkey. *Ecological Informatics*, 69. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101647>
- Jain, P., Coogan, S. C. P., Subramanian, S. G., Crowley, M., Taylor, S., & Flannigan, M. D. (2020). A review of machine learning applications in wildfire science and management. In *Environmental Reviews* (Vol. 28, Number 4, pp. 478–505). Canadian Science Publishing. <https://doi.org/10.1139/er-2020-0019>
- Kantarcioğlu, O., Kocaman, S., & Schindler, K. (2023). Artificial neural networks for assessing forest fire susceptibility in Türkiye. *Ecological Informatics*, 75. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.102034>

- Khennou, F., & Akhloufi, M. A. (2023). Improving wildland fire spread prediction using deep U-Nets. *Science of Remote Sensing*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.srs.2023.100101>
- Khennou, F., Ghaoui, J., & Akhloufi, M. A. (2021). Forest fire spread prediction using deep learning. In K. Palaniappan, G. Seetharaman, & J. D. Harguess (Eds.), *Geospatial Informatics XI* (p. 16). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2585997>
- Kim, J., Hu, Y., Elhami-Khorasani, N., Sun, K., & Zhou, R. Z. (2026). Assessment of deep learning models integrated with weather and environmental variables for wildfire spread prediction and a case study of the 2023 Maui fires. *Natural Hazards*, 122(1). <https://doi.org/10.1007/s11069-025-07807-x>
- Lattimer, B. Y., Hodges, J. L., & Lattimer, A. M. (2020). Using machine learning in physics-based simulation of fire. *Fire Safety Journal*, 114. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.102991>
- Marjani, M., Mahdianpari, M., & Mohammadimanesh, F. (2024). CNN-BiLSTM: A Novel Deep Learning Model for Near-Real-Time Daily Wildfire Spread Prediction. *Remote Sensing*, 16(8). <https://doi.org/10.3390/rs16081467>
- Masrur, A., Yu, M., & Taylor, A. (2024). Capturing and interpreting wildfire spread dynamics: attention-based spatiotemporal models using ConvLSTM networks. *Ecological Informatics*, 82. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102760>
- NASA. (2025). Fire Information for Resource Management System (FIRMS). Earth Science Data Systems, NASA. <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/>
- Paszke, A., (2019). PyTorch: An Imperative Style, High-Performance Deep Learning Library. In Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS), 32. <https://pytorch.org/>
- Shadrin, D., Illarionova, S., Gubanov, F., Evteeva, K., Mironenko, M., Levchunets, I., Belousov, R., & Burnaev, E. (2024). Wildfire spreading prediction using multimodal data and deep neural network approach. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52821-x>
- Srivastava, T., Artés, T., De Callafon, R. A., & Altintas, I. (2016). Wildfire spread prediction and assimilation for FARSITE using ensemble kalman filtering. *Procedia Computer Science*, 80, 897–908. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.05.328>
- Zhou, Y., Kong, R., Xu, Z., Xu, L., & Cheng, S. (2025). Comparative and Interpretative Analysis of CNN and Transformer Models in Predicting Wildfire Spread Using Remote Sensing Data. *Journal of Geophysical Research: Machine Learning and Computation*, 2(2). <https://doi.org/10.1029/2024JH000409>

İç Mimarlıkta Bireysel Tasarım Stillerinin Derin Öğrenme Modelleri ile Sayısal Analizi Üzerine Bir Araştırma

Hülya Gümüş Öksüz¹ ; Mehmet Ali Altın² 

^{1,2}Eskişehir Teknik Üniversitesi

¹hulya_gumus@ogr.eskisehir.edu.tr; ²maaltin@eskisehir.edu.tr

Özet

İç mimarlıkta stil; iç mimarlar için ilham kaynağı olan, tasarım sürecinde kendi yöntemlerini keşfederek ve diğer tasarımcılardan ayrılarak tasarımcı imzalarını yaratmalarını sağlayan bir olgudur. Stilin özellikle mimarlık alanında manuel yöntemlerle ölçülebilir hale gelişinin ardından yapay zekâ derin öğrenme modelleri ile de bu ölçümler gerçekleştirilebilir hale gelmiştir. Literatür incelendiğinde yapay zekâ ve derin öğrenme ile stil sınıflandırma çalışmalarının farklı disiplinlerde gerçekleştirildiği görülmektedir. Mimarlık alanında ise çoğunlukla dış cephe tasarımlarının sınıflandırılması üzerinedir. İç mimarlık alanında ise tasarım ve mobilya stillerinin sınıflandırılması araştırmaya alınan bir konudur. Ancak iç mimarlık sektöründe tasarım imzasının ne kadar ayırt edici olduğu, hangi stil bileşenlerinden meydana geldiği konusu üzerine henüz tartışma yaratılmamış ve derin öğrenme modelleri ile detaylı olarak sınanmamıştır. Bu araştırmada tasarımcı imzasının ayırt ediciliği ve hangi stillerden oluşabileceği, Türkiye’de faaliyet gösteren iç mimarlık ofislerinin stilleriyle objektif olarak ölçülmüştür. Tasarımcıların bireysel stillerini analize alabilmek için tasarım görsellerinden faydalanılmıştır. Ardından tasarımcıların stilleri, kendi aralarında benzerlikleri ve çalışmada var olan diğer tasarım stilleri bağlamında benzerlikleri açısından sınıflandırılmıştır. Sınıflandırmada tasarımcıların diğer tasarımcılarla ve tasarım stilleriyle hatalı olarak eşleştirilmesi dikkate alınmış ve bu eşleştirmeler benzerlik olarak analize alınmıştır. Derin öğrenme modellerinin kullanıldığı sınıflandırmada, sayısal olarak tasarımcıların tasarım stillerine veya tasarımcılara gösterdiği benzerlik EfficientNet-B1 ve ConvNeXt Tiny modelleriyle ölçülmüş, nihai ve daha başarılı sonuç alabilmek için de Topluluk (ensemble) yöntemiyle stil analiz sonuçları sentezlenmiştir. Topluluk modelinden alınan analiz sonuçlarına göre bazı tasarımcıların yeterince ayırt ediciliği ve tutarlılığı olmasına rağmen tasarım stillerinin bileşenlerine ayrılabilirdiği ve stili bileşenlerine ayrılmasına rağmen kendi içinde tutarlı bir stili olmayan tasarımcıların da olduğu görülmüştür. Ayrıca daha ayırt edici stile sahip bazı tasarımcıların stiline bileşenlerine ayıramayacak kadar model tarafından tanındığı ve kendi içinde oldukça tutarlı olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen bu bulgular, çalışmadaki veri çeşitliliği ve sayısı gibi sınırlılıklara rağmen iç mimarların stillerinin objektif olarak ölçülebildiğini ve bileşenlerine ayrılabilirdiğini göstermiştir. Araştırmanın ileriki aşamalarında tasarımcılarla görüşülerek elde edilen nitel veriler ile sayısal bulgular arasında bağlantı kurulacak ve stillerin bileşenlerine nasıl ayrıldığı tartışılacaktır.

Anahtar Kelimeler: Stil Sınıflandırma, Bireysel Stil, Tasarımcı İmzası, Derin Öğrenme, Stil Analizi, Stil Ölçümü.

A Study on the Quantitative Analysis of Individual Design Styles in Interior Architecture Using Deep Learning Models

Hülya Gümüş Öksüz¹ ; Mehmet Ali Altın² 

^{1,2}Eskişehir Technical University

¹hulya_gumus@ogr.eskisehir.edu.tr; ²maaltin@eskisehir.edu.tr

Abstract

In interior design, style is a phenomenon that inspires interior designers, allowing them to discover their own methods in the design process and create their own signature style, distinguishing themselves from other designers. While style became measurable through manual methods, particularly in architecture, artificial intelligence deep learning models have also made these measurements possible. A review of the literature reveals that AI and deep learning studies on style classification have been conducted in various disciplines. In architecture, the focus is mostly on the classification of exterior designs. In interior design, the classification of design and furniture styles is a research topic. However, the distinctiveness of a design signature in interior design and the stylistic components it comprises have not yet been discussed or thoroughly tested using deep learning models. This research objectively measures the distinctiveness of a designer's signature and the styles it may consist of, using the styles of interior design offices in Turkey. Design visuals were used to analyze the individual styles of the designers. Subsequently, the designers' styles were classified based on their similarities among themselves and their similarities within other design styles present in the study. In the classification, the misclassification of designers with other designers and design styles was taken into account, and these matchings were analyzed as similarities. In the classification using deep learning models, the numerical similarity of designers to design styles or other designers was measured using EfficientNet-B1 and ConvNeXt Tiny models, and the style analysis results were synthesized using the Ensemble method to obtain a more successful final result. Analysis results from the Ensemble model, shows that some designers, despite having sufficient distinctiveness and consistency, could have their design styles decomposed into components, and some designers, even when their style was decomposed into components, did not have a consistent style. In addition, it was observed that some designers with more distinctive styles were recognized by the model to the point that their style could not be broken down into components and was quite consistent within itself. Findings show that, despite the limitations such as the variety and quantity of data in the study, the designer styles can be objectively measured and decomposed into components. In the later stages of the research, a connection will be established between the qualitative data obtained by interviewing designers and the numerical findings, and how styles are broken down into components will be discussed.

Keywords: Style Classification, Individual Style, Designer Signature, Deep Learning, Style Analysis, Style Measurement.

1. Stil ve Derin Öğrenme Modelleri

İç mimarlıkta mekânsal organizasyonun sağlanması aşamasında fonksiyon ve estetik açısından sentezlenmiş bir tasarım süreci gerçekleşmektedir. Bu sürecin estetik kısmında kalan stil, sektörde sıklıkla kullanılan ancak oluşum aşamasında derinlemesine araştırılmayan bir kavram haline gelmiştir. Stil genel itibarıyla, sabit form ve sabit unsurlardan oluşan ayırt edici ve tanınabilir bir yoldur (Gombrich, 2009; Schapiro, 1953). Bireysel stil Wölfflin (2023) tarafından her ressamın kendi kanı ile yaptığı bir çizim olarak görülüp yaradılış farklılığına bağlanmıştır. Ancak Ginzburg (2021), sanatsal algının dış etkenler, estetik, zevk gibi konularla ilgili olduğunu ve doğuştan gelen özelliklerin stili etkilemeyeceğini düşünmektedir.

Farklı disiplinlerce de kullanılan tasarım stilleri, iç mimarlar tarafından tasarımlarda hayat bulmakta ve tasarımcılar için de kendi tasarım dilini bulma konusunda öncü olmaktadır. Bireysel stil çoğunlukla subjektif olarak belirlenen ve gözleme dayalı bir kavram olmuştur. Stilin objektif ölçümüne yönelik ilk araştırmalar mimarlık alanında Chiu-Shui Chan (2000) tarafından gerçekleştirilen çalışmalar olmuştur. İç mimarlıkta ise tasarımcı kimliği konusunda Özçam (2022) öğrencileriyle yaptığı çalışmada mobilya tasarım sürecinde tasarımcı kimliği gelişimini incelemiştir.

Yapay zekâ (AI) teknolojisinin ivmelenerek yükselmesi, tasarım sektöründe de farklı kullanım alanlarıyla yerini bulmuştur. Özellikle stil transferi konusunda yapılan çalışmalar derin öğrenme modellerinin stil sınıflandırmasında kullanılmasına da aracı olmuştur. Derin öğrenme modelleri ile görsel ve stil sınıflandırma konusunda mimarlık alanında yapılan araştırmalar bulunmaktadır. Derin öğrenme modelleri Llamas vd. (2017) tarafından mimari miras öğelerini sınıflandırmak amacıyla kullanılmıştır. Bir diğer mimarlık örneğinde Yönder (2025) Anadolu ve Balkanlar'da bulunan geleneksel Osmanlı evlerinin cephe tasarımlarını baz almış ve derin öğrenme modelleriyle sınıflandırmayı gerçekleştirmiştir.

Bu çalışmaların ortak aracı olan derin öğrenme modelleri, veriye ait karmaşık ve soyut yapıları öğrenme yeteneğine sahip olup görüntü içindeki kenardan nesneye hiyerarşik ve çok katmanlı bir işleme gerçekleştirebilir (Kaya, 2025, s. 3). Derin öğrenme konusu, özellikle görsel tanımda kullanılan CNN (Convolutional Neural Networks- Evrişimli Sinir Ağları) modellerinin 2010'lardan beri gelişmesiyle daha da ilerlemiştir (Liu vd., 2022). Çeşitli görsel sınıflandırmalarında kullanılan öznetelik çıkarıcı (feature extractor) ve sınıflandırıcıdan (classification) oluşan CNN modelleri veriyi kenar, motif ve bunların kombinasyonu da dahil olmak üzere katman katman insan müdahalesi olmaksızın incelemektedir (Kim ve Lee, 2020; LeCun vd., 2015).

Derin öğrenme desteğiyle tasarımcı kimliği konusunu mimarlık alanında Yoshimura vd. (2019) ele almış, dünyaca tanınan 34 "starchitect" tasarım görselleri özellikleri bakımından analize tutularak derin öğrenme modelleri tarafından ayırt edilip edilemediği araştırılmıştır. Araştırma sonuçlarına göre 34 farklı mimarın bireysel doğruluk oranı minimum 32.60 (Koolhaas), maksimum 90.47 (Tschumi) aralığındadır (Yoshimura vd., 2019). Bu çalışmalarla beraber iç mimarlık dahil olmak üzere çeşitli alanları konu alan sınıflandırmalar (classification) gerçekleştirilmiştir. Hu vd. (2017) mobilya stillerini sınıflandırmış, Guo vd. (2024) ise iç mimari stillerin sınıflandırması konusunda çalışmıştır.

Yapılan literatür taraması, araştırmaların mimari öğelerin sınıflandırılması veya tanınan mimarların stillerinin kendi arasında ayrıştırılması üzerine olduğunu göstermektedir. Tasarımcı stillerinin ve tasarım stillerinin bir arada sınıflandırıldığı çalışmalar henüz gerçekleştirilmemiş olup bu araştırma için doldurulacak bir boşluk olarak görülmüştür. Araştırmada tasarımcı görsellerinin derin öğrenme modelleri tarafından hatalı sınıflandırıldığı veya yanlış atfedildiği tasarım stillerinin aslında bu stilleri tanımlamada bir bileşen olarak kullanılması ise bu araştırmanın ayrıştırıcı özelliğidir. Tasarımcı stilleri konusunda henüz iç mimarlık alanında bir sınıflandırma çalışmasının yapılmaması teknolojiden de

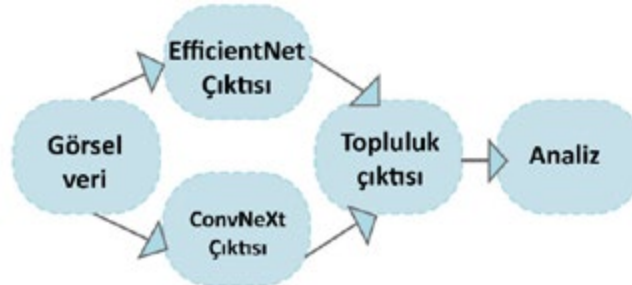
faaydalanarak objektif bir ölçüm yöntemi geliştirilmesinin önünü açmıştır. Stilin ayırt edici ve tanınabilir bir yol olduğu görüşünden yola çıkarak tasarımcı stillerinin analizi gerçekleştirilmiştir. Bu boşlukların doldurulması ile literatüre yeni bir bakış açısı kazandırmak hedeflenmiştir.

2. Amaç ve Kapsam

Çalışmanın amacı, iç mimarlıkta bireysel stil analizi konusunda literatürdeki eksikliği gidererek yeni bir bakış açısı kazandırmaktır. İç mimarlık alanı dahil olmak üzere tasarım disiplinlerinde bireysel stil konusunda literatürdeki eksiklik, araştırmanın stil sınıflandırması üzerinde yoğunlaşmasına sebep olmuştur. Stilin ayırt edici ve tanınabilir bir yol olduğu görüşünden yola çıkarak seçilen tasarımcıların stillerinin derin öğrenme modelleriyle analizi gerçekleştirilmiştir. Araştırma kapsamındaki tasarımcılar Türkiye’de faaliyet gösteren iç mimarlık ofisleridir. Çalışmada stilin analizini gerçekleştirmek ve stili anlayabilmek için bileşenlerine ayırmak amaçlanmıştır. Bir stilin bileşenlerine ayrılması veya ayrılmaması o stil hakkında analiz edilebilecek veriler sunmaktadır. Böylece bireysel stil kavramı ölçülebilir ve yorumlanabilir bir hale gelecektir. Araştırma Türkiye’de iç mimarlık mesleğini yapan iç mimarları ve iç mimari tasarım stillerini kapsamaktadır.

3. Yöntem

Yöntemin ilk aşaması büyük dil modelleriyle analiz aracının yani Python kodlarının oluşturulmasıdır. Tasarımcıların görsellerinin hangi tasarım stillerine ayrıştığı, hangi tasarımcılarla benzeştiği konusu o stili daha iyi kavramayı sağlamaktadır. Bu işlemi objektif ve tekrarlanabilen bir ortamda geliştirebilmek için görsel sınıflandırmada kullanılan derin öğrenme modelleri seçilmiştir. Kullanılan derin öğrenme modelleri CNN tabanlı olup, sonuçların kıyaslanması ve ortaya nihai sonucun çıkarılması aşamasında önemli bir rol oynamaktadır. Görsel verilerle yapılan analizde iki farklı derin öğrenme modeli kullanılmış olup sonuçlar Ensemble (topluluk) yöntemiyle bu iki modelin sayısal değerlerinin ortalamasıyla alınmıştır (**Şekil 1**). Tüm sayısal değerler kuvvet yönelimli ağ grafiği, model başarı karşılaştırması ve karmaşıklık matrisi grafikleriyle görselleştirilmiştir.



Şekil 1: Araştırma yöntemi

3.1. Büyük Dil Modelleri ile Kod Yazım Süreci

Büyük dil modellerinin her geçen gün daha da gelişmesiyle derin öğrenme ve kod yazımı araştırmacılar için daha erişilebilir hale gelmiştir. Analiz aracının oluşturulabilmesi için araştırmacının yönlendirmesiyle Gemini 3 Pro, Claude Sonnet 4.5 ve ChatGPT gibi büyük dil modellerine verilen komutlarla kod yazdırılmış ve Google Colaboratory Pro ortamında Python 3.12 dili ve Nvidia Tesla T4 Gpu donanımı ile çalıştırılmıştır. Kodlarda ConvNeXt-Tiny ve EfficientNet-B1 modelleri kullanılmıştır. Stillerin sınıflandırılmasında kullanılan derin öğrenme modelleri, sınıflandırmayı benzettiği etiket tahmini ve güven skorlarıyla belirtmektedir. Derin öğrenme modelleri analiz sonunda güven skorlarını 0-1 arası değerlerle göstererek stil (sınıf) tahmininde bulunmuştur.

3.2. Verilerin Oluşturulması ve İşlenmesi

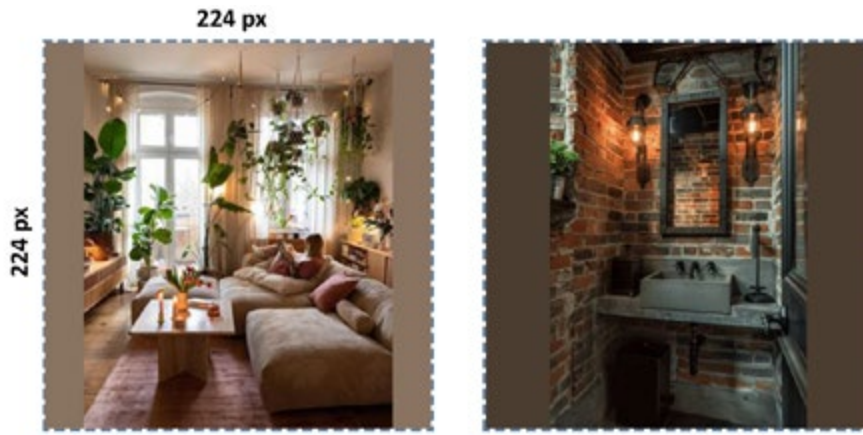
Araştırmada kaggle.com üzerinden (stepanyarullin, t.y.; ZARA2099, t.y.) elde edilen iç mimari tasarım stilleri, stili bileşenlerine ayırma kullanılan verilerdir. Analizde kullanılan diğer görseller ise iç

İç Mimarlıkta Bireysel Tasarım Stillerinin Derin Öğrenme Modelleri ile Sayısal Analizi Üzerine Bir Araştırma | Gümüş Öksüz, Hülya; Altın, Mehmet Ali

mimarların kendi web sitelerinde yayınlanan tasarım görselleridir. Google Drive üzerinde tüm veri setlerine özel klasör oluşturulmuştur. Tasarımcıların adları bilimsel etik sebebiyle ve tasarımcıların talebiyle anonim tutulmuştur.

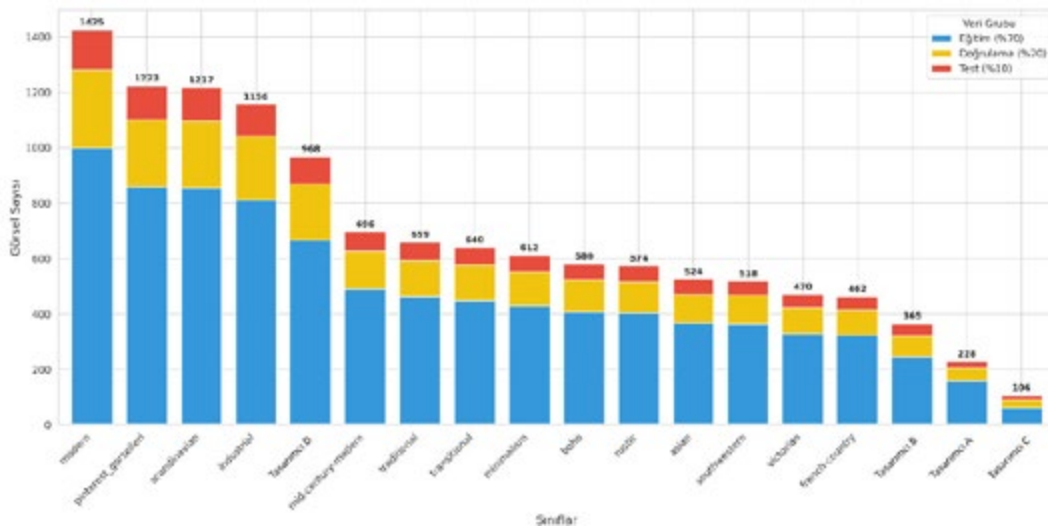
1. Grup: Tasarımcı A, Tasarımcı B, Tasarımcı C, Tasarımcı D olmak üzere Türkiye'nin saygın iç mimarlık ofislerinden oluşmaktadır.
2. Grup: Asian, boho, french country, industrial, mid-century modern, minimalism, modern, rustic, scandinavian, southwestern, traditional, transitional, victorian iç mimari stilleri ve sağlama yapmak için eklenen Pinterest görselleri sınıfından oluşmaktadır.

Pinterest görselleri sınıfı, tasarım stillerinin sayıca ve çeşit olarak yetersiz olma ihtimaline karşın ayrı bir klasör olarak eklenmiştir. İç mimari stillerin isimleri değiştirilmemiş ancak içerikte tekrarlayan öğeler, dış mekân görselleri ve iç mimari olmayan öğeler kaldırılmıştır. Tüm görsel veriler, aynı ölçüye (224x224) ölçeklendirilmiştir. Veri kaybının yaşanmaması için, tasarım görsellerinin boyutları çeşitli olduğundan dolayı görsellerin en- boy oranı bozulmadan 224x224'e küçültülmüş, kalan boşluklara ise görselin ortalama rengi eklenmiştir (**Resim 1**). Bu şekilde tüm görseller aynı boyutta ölçeklendirilmiş ve veri eksikliği ortalama renk dolgusu yöntemiyle tamamlanmıştır.



Resim 1: “Boho” ve “industrial” veri setinden örnek ortalama renk dolgusu uygulaması (ZARA2099, t.y.’tan uyarlanmıştır)

Toplam 12423 adet görselin ilk önce proje bazlı ayrımı gerçekleştirilmiştir. Kalan görseller %70 eğitim, %20 doğrulama, %10 test görseli olmak üzere ayrılmıştır (**Şekil 2**).



Şekil 2: Veri Seti Dağılımı: Tasarımcı ve Stil Sınıfları

Modelin aynı projeye ait farklı verileri ilk olarak eğitim ve ardından test aşamalarında görmesi veri sızmasına neden olmaktadır. Gerçekleştirilen proje bazlı ayırım sayesinde tasarımcıların aynı projeye ait görselleri test ve eğitim için karışık olarak bölünmemiş ve veri sızması ihtimali engellenmiştir. Veri sayısının tasarımcı sınıflarında az olması nedeniyle eğitim görsellerinde veri artırma (data augmentation) işlemleri gerçekleştirilmiştir. Aynı görseller eğitime girmeden önce çevirme, döndürme ve parlaklık ayarlarının değiştirilmesiyle çoğaltılmıştır. Çevirme ayarı eğitim görsellerinde %50 ihtimalle, döndürme ayarı ise $\pm 10^\circ$ aralığında ve görsellerin %40'ında, parlaklık ayarı ise %30 ihtimalle ± 20 oranında uygulanmıştır. Bu işlemler sayesinde görseller yapay olarak çoğaltılmış ve modellerin daha fazla veri öğrenmesi sağlanmıştır.

3.3. Derin Öğrenme Modellerinin Eğitilmesi

Tasarımcılardan elde edilen görsellerin hangi tasarım stillerine ayrıştığı ve hangi tasarımcılarla benzeştiği konusu o stili daha iyi kavramayı sağlamaktadır. Bu işlemi objektif ve tekrarlanabilen bir ortamda geliştirebilmek için görsel sınıflandırmada kullanılan derin öğrenme modelleri seçilmiştir. Kullanılan derin öğrenme modelleri CNN tabanlı olup, sonuçların kıyaslanması ve ortaya nihai sonucun çıkarılması aşamasında önemli bir rol oynamaktadır. Kullanılan modeller Google Colaboratory aracılığıyla çalıştırılmıştır.

Öznitelik çıkarımı ve ince ayar olmak üzere iki aşamadan oluşan transfer öğrenme süreci, her iki model için de ayrı 15+20 devirden oluşmaktadır. Her devirde modellerin öğrenme durumu ve gelişme gösterip göstermediği kontrol edilmiştir. Döngüler esnasında modelin gelişim gösterdiği her aşamada birer checkpoint olarak kaydedilmiştir. Modellerin döngülerden geçerek en verimli olduğu noktada erken durdurma (early stopping) ile kaydedilmiştir. Milyonlarca farklı görsel ile eğitilen ImageNet (Deng vd., 2009) modellerin eğitim sürecinde kullanılarak modellere görme yeteneği kazandırılmış, daha sonra bu modellere tasarım görselleri gösterilmiştir. Tasarımcıların görselleri, eğitim, doğrulama aşamalarından geçirilerek modele öğretilmiş ve test aşamasında model hiç görmediği tasarımcı görselleri ile sınanmıştır. Her iki modelden iki farklı sonuç elde edilmiştir. İki modelin sınıflandırma sonuçları topluluk yöntemi ile sentezlenmiş, basit yumuşak oylama ile aritmetik ortalaması alınmıştır (Zhou, 2012). Sayısal sonuçlar Excel tabloları ve grafiklerle görselleştirilmiştir.

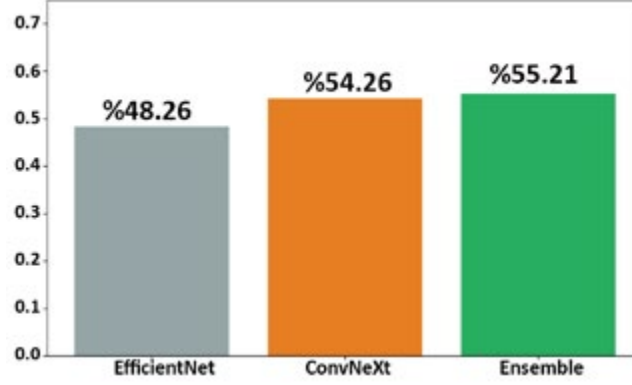
4. Sınırlılıklar

Yoshimura vd. (2019), iç mekânın makine gözüyle algılanmasının mimari formlara göre daha başarılı olduğunu belirtmiştir. Ancak stil analizi, resim analizi gibi konularla karşılaştırıldığında çok daha karmaşık bir yapıya sahiptir. Çünkü görsel stil insan gözü için kolay anlaşılabilir da tanımlanması zordur (Karayev vd., 2014, s. 1). İç mimari görsellerinin daha kompleks yapıda olması bunun etkenlerinden biridir. Model başarısı analizden önce görsellerin arka planından ve gürültüsünden kurtularak artırılabilir, iç mimari görsellerde bu detaylar önemli olduğu için uygulanması daha zordur (Wei vd., 2019, s. 5). Wei vd. (2019) genel görsel analiz yöntemlerinin (kedi, köpek vb. analizi gibi), poz, ölçek ve yön gibi sebepler de dahil olmak üzere ince detaylı görsel sınıflandırmadan daha farklı olacağını, ince detaylı sınıflandırma türünün genel bir büyük başlığın alt sınıflarından sadece biri olduğu için birbirine benzer algılandığını belirtmiştir (s. 2-3). Dolayısıyla daha ince detaya sahip iç mimari stillerin benzerlik analizi, model tarafından algılanması ve ayrıştırılması açısından daha zorlu olacaktır.

5. Tartışma ve Sonuç

Araştırma grafiklerine göre modellerin başarıları karşılaştırılmış, stillerin benzerliği ağ grafikleriyle incelenmiş ve ardından topluluk modeli sonuçlarıyla her bir modelin her tasarımcı tahminleri incelenmiştir. Bu tahmin sonuçlarına göre her bir tasarımcının topluluk modeli tarafından kendi içindeki başarı oranı hesaplanmıştır. Model başarı karşılaştırması grafiğine göre EfficientNet modelinin doğru tahminlerinin tüm tahminlere oranı başarı oranı olup %48,26'dır. ConvNeXt

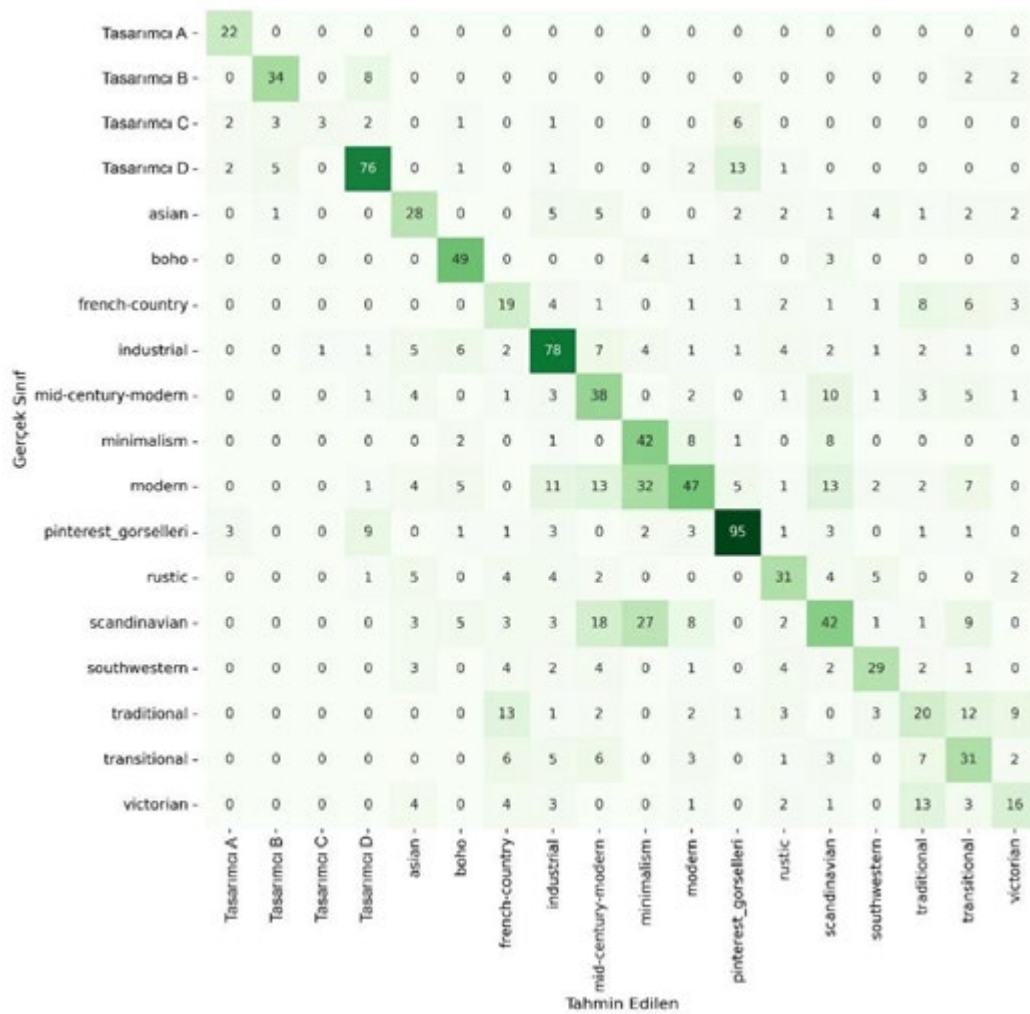
modelinin başarı oranı ise %54,26'dır. Her iki modelin birleşiminden oluşan topluluk modelinin öğrenme başarısı %55,21'dir. Öğrenme başarısı diğer sınıflandırma yöntemlerine kıyasla daha düşüktür. Model başarıları birbirine yakındır, bu sebeple nihai sonucu veren topluluk yönteminde başarı miktarının artışı daha az olmuştur (**Şekil 3**).



Şekil 3: Modellerin Başarı Karşılaştırması

Topluluk yöntemiyle elde edilen tahmin sonuçlarının detayları karmaşıklık matrisinde verilmiştir (**Şekil 4**).

İç Mimarlıkta Bireysel Tasarım Stillerinin Derin Öğrenme Modelleri ile Sayısal Analizi Üzerine Bir Araştırma |
Gümüş Öksüz, Hülya; Altın, Mehmet Ali



Şekil 4: Karmaşıklık matrisi sonuçları

Analiz sonuçlarından elde edilen sayısal veriler, tasarımcıların görsellerini sınıflara atamaktadır. Matriste gerçek sınıfın olduğu satırlarda analize alınan sınıflar, tahmin edilen sütunlarda ise analize alınan sınıfa benzetilen sınıflar yer almaktadır. Her bir gerçek sınıfın kendisiyle aynı ada sahip olan tahmin edilen sınıfla kesiştiği karelerdeki sayılar, doğru bilinen görsel sayısını belirtmektedir. Karmaşıklık matrisinde her 18 sınıfın test edilen görsellerinin model tarafından hangi tasarımcıya veya tasarım stiline benzetildiği, dolayısıyla ne kadar hata yaptığı görülmektedir. Matris sonuçlarına göre;

Tasarımcı A: 22 adet test görselinin tamamı model tarafından doğru bilinmiştir. Hatalı etiketlendirme bulunmamaktadır.

Tasarımcı B: 46 adet test görselinden 34 adeti doğru bilinmiş, kalan görseller Tasarımcı D (8), transitional (2), victorian (2) olarak hatalı etiketlenmiştir.

Tasarımcı C: 18 adet test görselinin 3 adeti doğru bilinmiş, kalan görseller Tasarımcı A (2), Tasarımcı B (3), Tasarımcı D (2), boho (1), industrial (1), Pinterest görselleri (6) olmak üzere hatalı etiketlenmiştir.

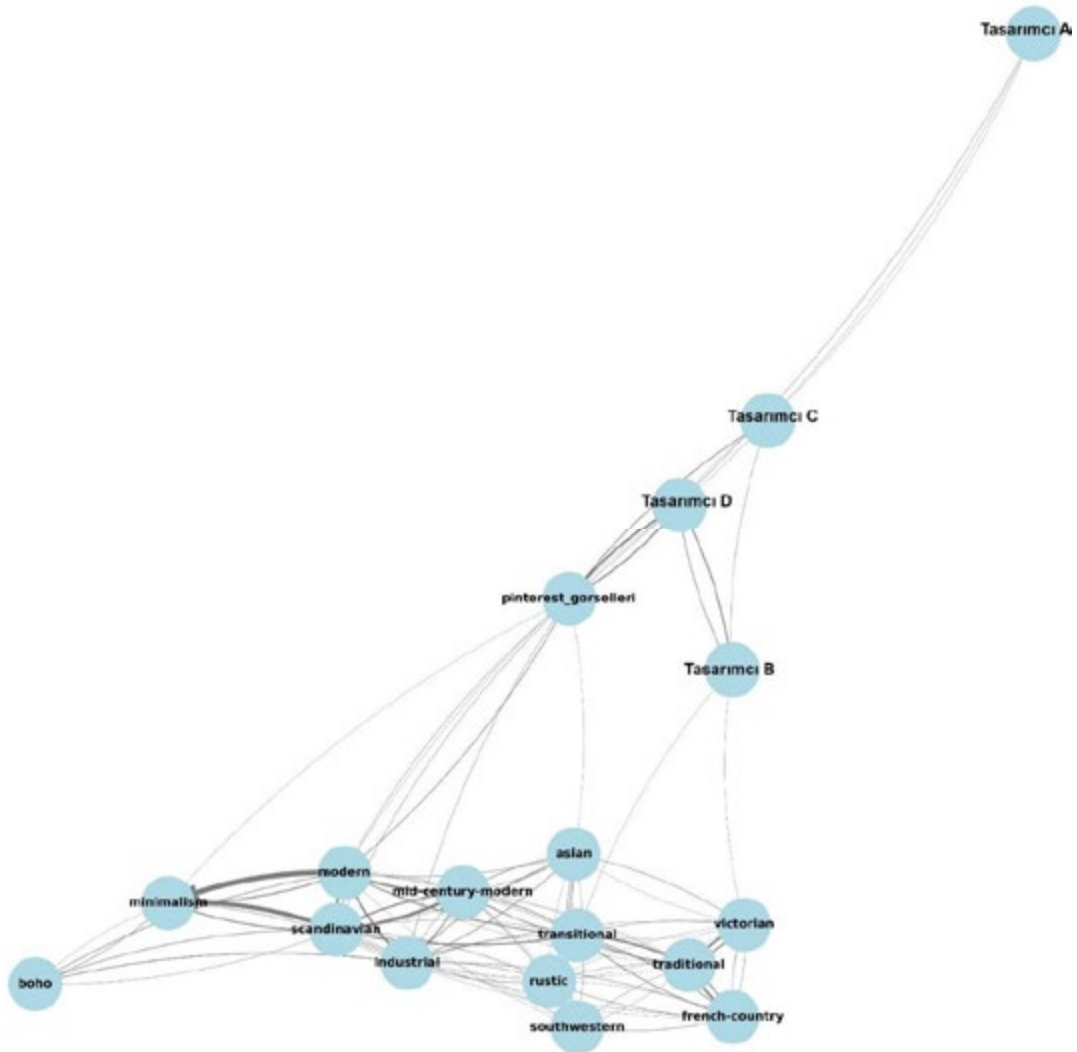
Tasarımcı D: 101 adet test görselinin 76 adeti doğru bilinmiş, kalan görseller Tasarımcı A (2), Tasarımcı B (5), boho (1), industrial (1), modern (2), rustic (1), Pinterest görselleri (13) olmak üzere hatalı etiketlenmiştir.

Bu sonuçlara göre Tasarımcı A'nın doğruluk oranının %100 olması, hatalı etiketlerin bulunmaması ve 22 görselin de ona ait olduğunun model tarafından ayırt edilebildiğini belirtmektedir. En çok tasarım verisine sahip olan Tasarımcı D'nin 101 görselinden 76 tanesi model tarafından doğru tespit edilerek yüksek bir başarı oranı yakalanmıştır. Tasarımcı B için, 46 görselden 34'ü %73,91 oranı ile tanınırılık kazanmış ve model tarafından büyük ölçüde ayırt edilmiştir. Tasarımcılar arasında en düşük sayıda eğitim görseline sahip Tasarımcı C'nin 18 görselinden yalnızca 3 tanesi model tarafından doğru ayırt edilerek en düşük doğruluk oranına sahiptir (**Tablo 1**).

Tablo 1: Analiz Sonuçları

Tasarımcı	Görsel Sayısı	Doğruluk Oranı	Hata Oranı	Benzetilen Tasarımcı	Benzetilen Stil
Tasarımcı A	22	%100	0	Yok	Yok
Tasarımcı B	46	%73,91	%26,09	Tasarımcı D	Transitional Victorian
Tasarımcı C	18	%16,67	%83,33	Tasarımcı B Tasarımcı D Tasarımcı A	Pinterest Boho, Industrial
Tasarımcı D	101	%75,25	%24,75	Tasarımcı B Tasarımcı A	Pinterest, Modern Boho, Rustic

Tasarımcıların birbirine olan benzerliklerinin ve farklılıklarının görsel olarak daha net algılanması açısından topluluk modelinin sonuçlarıyla bir ağ grafiği oluşturulmuştur. Eades (1984) tarafından yaratılan ağ grafikleri, serbest bırakıldığı zaman minimum enerji konumuna ulaşan düğüm ve yaylardan oluşmaktadır. Ardından Fruchterman ve Reingold (1991) tarafından düğümlerin itici güçlerden, komşu düğümlerin ise çekici güçlerden oluştuğu bir sistem olarak geliştirilmiştir. Komşu düğümlerin birbirine yakın olduğu ancak çok yakın olan düğümlerin birbirini ittiği, çok uzak olan düğümlerin ise birbirini çektiği bir sistem oluşturulmuştur (Fruchterman ve Reingold, 1991, s. 1131, Güneş ve Arıkan, 2024, s. 40). Bu çalışmada ise yay kalınlıkları sayısal olarak düğümler arası benzerlik artışını (model hatasını) ifade etmekte ve benzerlik sayısı $n > 1$ olan benzetmeler verilmektedir (**Şekil 5**).



Şekil 5: Stiller Arası Kuvvet Yönelimli Ağ Grafiği

Ağ grafiğine göre, Tasarımcı A çekme kuvvetine rağmen diğer tasarımcılardan ve stillerden çok daha uzakta konumlanmıştır. Tasarımcı A, ağ grafiğine göre diğer tasarımcılardan ve tasarım stillerinden daha çok ayırt edici konumdur. Tasarımcı B, grafiğin merkezinde konumlanarak Tasarımcı C, Tasarımcı D, victorian ve transitional sınıflarıyla benzerlik göstermektedir. Tasarımcı C ise Tasarımcı D, Tasarımcı A ve Tasarımcı B sınıflarıyla benzerlik göstermekte ve grafikte Tasarımcı A ve diğer stiller arasında bağlantı oluşturmaktadır. Tasarımcı D ise en güçlü tasarımcı benzetimini Tasarımcı B ve Pinterest görselleri sınıfı ile gerçekleştirmiş olup komşu düğümlerle de benzeştirilmiştir. Minimalism-modern- scandinavian- mid-century modern stilleri arasındaki yay kalınlıklarına bağlı olarak stiller arasında kümeleşme görülmüştür. Benzer şekilde transitional- victorian- traditional- french country stilleri arasında da yay kalınlıkları daha fazladır. Bohò stili ise tasarım stilleri arasında diğerlerinden daha ayırt edici görünmektedir.

Tasarımcı stilleri, bileşenlerine ayrılma bakımından en başarılı ayrımı Tasarımcı B ve D' de göstermiştir. Tasarımcı B, victorian ve transitional stillerine; Tasarımcı D ise modern, bohò ve rustic stillerine ayrılmıştır. Tasarımcı A, diğer stillerden daha ayırt edicidir, dolayısıyla araştırma stilleri kapsamında bileşenleri bulunmamaktadır. Tasarımcı C ise stil anlayışı sebebiyle model tarafından en düşük doğruluk oranını almıştır. Model tarafından Tasarımcı C bileşenlerine ayrıştırılmış ancak net bir Tasarımcı C stili görülememiştir. Doğruluk oranı görsellerin sayıları ve niteliğinden etkilendiğinden

verilerin artması daha doğru analiz edilmesine imkân tanıyabilir. Verilerin daha az olması ise modelin öğrenme yeteneğini azaltacaktır.

Tasarımcının çok güçlü bir bireysel stilinin var olması durumunda stil bileşenlerine ayrılmasının zorlaştığı, daha zayıf bir stilinin var olması durumunda ise stil bileşenlerine ayrılmasının daha kolaylaştığı gözlemlenmiştir. Tasarımcılar arası benzerlik, tasarımcı veri seti çeşitliliğinin azlığı sebebiyle daha yüksektir. Tasarımcı stillerinin sınıflandırılması, araştırma kapsamında var olan tasarım stilleri ile gerçekleştirilmiştir. Stil sınıflarının sayıca ve çeşit olarak artması görsellerin daha doğru analiz edilmesine imkân tanıyabilir.

İç mimari stiller, benzerlikleri bakımından kendisine en uygun görülen stillerle bağdaştırılabilir ve sınıflandırılabilir hale gelmiştir. Stili bileşenlerine ayırarak objektif bir şekilde ölçmek, bir stilin hangi stillerden meydana gelebileceği, ne kadar ayırt edici olduğu ve diğer stillerden ne kadar ayrıştığı konusuna ışık tutmaktadır. Ayrıca bazı stillerin kendi içinde daha tutarlı olduğu, bazılarının ise hem tutarlı olup hem de eklektik bir yapıya sahip olduğu düşünülmektedir. Bu yöntem, alana özgü, daha çeşitli ve doğru seçilmiş veri setleriyle sektördeki genç tasarımcılar için de bir öz sına yöntem olarak kullanılabilir.

Araştırmanın kilit taşı denebilecek ikinci kısımda tasarımcılarla görüşmeler gerçekleştirilecektir. Bu görüşmeler stilin bileşenlerine ayrılması, ayırt ediciliği ve tutarlılığı konusunda daha aydınlatıcı cevaplar içermesi açısından önem taşımaktadır. Bu sayede tasarımcı beyanları ile model analiz sonuçlarının bir arada değerlendirilmesi ile yöntemin doğrulanabilirliği test edilecektir.

KAYNAKLAR

- Chan, C. S. (2000). Can style be measured? *Design Studies*, 21(3), 277-291.
- Deng, J., Dong, W., Socher, R., Li, L. J., Li, K., & Fei-Fei, L. (2009). ImageNet: A large-scale hierarchical image database. In 2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (pp. 248-255). IEEE.
- Eades, P. (1984). A heuristic for graph drawing. *Congressus Numerantium*, 42(11), 149-160.
- Fruchterman, T. M., & Reingold, E. M. (1991). Graph drawing by force-directed placement. *Software: Practice and Experience*, 21(11), 1129-1164.
- Ginzburg, M. Y. (2021). *Üslup ve çağ: Çağdaş mimarlığın sorunları* (A. Tümertekin & A. Tümertekin, Trans.). Janus Yayıncılık.
- Gombrich, E. H. (2009). Style. In D. Preziosi (Ed.), *The art of art history: A critical anthology* (2nd ed., pp. 129-140). Oxford University Press.
- Guo, L., Zeng, H., Shi, X., Xu, Q., Shi, J., Bai, K., ... & Hang, W. (2024). Semi-Supervised Interior Decoration Style Classification with Contrastive Mutual Learning. *Mathematics*, 12(19), 2980.
- Güneş, Y., & Arıkan, M. (2024). Çevrimiçi Yemek Siparişine İlişkin Paylaşım Yapan Twitter Kullanıcılarının Ağ Yapısının Analizi. *AJIT-e: Academic Journal of Information Technology*, 15(1), 14-48.
- Hu, Z., Wen, Y., Liu, L., Jiang, J., Hong, R., Wang, M., & Yan, S. (2017). Visual classification of furniture styles. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology (TIST)*, 8(5), 1-20.
- Karayev, S., Trentacoste, M., Han, H., Agarwala, A., Darrell, T., Hertzmann, A., & Winnemoeller, H. (2014). Recognizing image style. arXiv. <https://arxiv.org/abs/1311.3715>
- Kaya, Y. (2025). *PyTorch ile Derin Öğrenme: Kavramdan Uygulamaya*. Akademisyen Kitabevi.
- Kim, J., & Lee, J. K. (2020). Stochastic detection of interior design styles using a deep-learning model for reference images. *Applied Sciences*, 10(20), 7299.
- LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *nature*, 521(7553), 436-444.
- Llamas, J., Lerones, P. M., Medina, R., Zalama, E., & Gómez-García-Bermejo, J. (2017). Classification of architectural heritage images using deep learning techniques. *Applied Sciences*, 7(10), 992.
- Liu, Z., Mao, H., Wu, C. Y., Feichtenhofer, C., Darrell, T., & Xie, S. (2022). A convnet for the 2020s. In *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 11976-11986).
- Özçam, I. (2022). Tasarımda kimlik tanımlarını yapma egzersizleri: Temsil sistemlerinin sistematik kullanımı. In H. Kılıçaslan (Ed.), *Mimarlık ve tasarım araştırma ve uygulama* (pp. 1-29). Livre de Lyon.

İç Mimarlıkta Bireysel Tasarım Stillerinin Derin Öğrenme Modelleri ile Sayısal Analizi Üzerine Bir Araştırma |
Gümüş Öksüz, Hülya; Altın, Mehmet Ali

- Schapiro, M. (1953). Style. In A. L. Kroeber (Ed.), *Anthropology today: An encyclopedic inventory* (pp. 287-312). University of Chicago Press.
- stepanyarullin. (n.d.). Interior design styles. Kaggle. Retrieved November 4, 2025, from <https://www.kaggle.com/datasets/stepanyarullin/interior-design-styles/data>
- Wei, X. S., Wu, J., & Cui, Q. (2019). Deep learning for fine-grained image analysis: A survey. arXiv. <https://arxiv.org/abs/1907.03069>
- Wölfflin, H. (2023). *Sanat tarihinin temel kavramları: Yeni zamanların sanatında üslubun gelişmesi sorunu* (A. Cemal, Trans.; 3rd ed.). Hayalperest Yayınevi. (Original work published 1915)
- Yoshimura, Y., Cai, B., Wang, Z., & Ratti, C. (2019, May). Deep learning architect: classification for architectural design through the eye of artificial intelligence. In *International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management* (pp. 249-265). Springer International Publishing.
- Yönder, V. M. (2025). Deep learning-driven visual analysis of tangible architectural heritage data: Classification of Ottoman vernacular houses through facade images [Doctoral dissertation, Izmir Institute of Technology]. YÖKTEZ.
- ZARA2099. (n.d.). Interior design material and style dataset. Kaggle. Retrieved December 1, 2025, from <https://www.kaggle.com/datasets/zara2099/interior-design-material-and-style-dataset/data>
- Zhou, Z. H. (2012). *Ensemble methods: Foundations and algorithms*. CRC Press.

Tasarımın Erken Aşamasında Yapay Zekâ Ajanı Destekli Dışmerkezlik Değerlendirmesi: Karşılaştırmalı Bir Vaka Çalışması

Ecem Berna Şahin¹ ; Sema Alaçam² ; Semih Bayer³ 

^{1,2}İstanbul Teknik Üniversitesi; ³Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi

¹sahine23@itu.edu.tr; ²alacams@itu.edu.tr; ³semihbayer@yyu.edu.tr

Özet

Mimari tasarımın erken aşamalarında belirlenen plan geometrisi, çekirdek konumu ve taşıyıcı eleman dağılımı, kütle merkezi (CM) ile rijitlik merkezi (CR) arasındaki ilişkiyi etkileyerek dışmerkezlik temelli burulma eğiliminin oluşmasında belirleyici olabilmektedir. Bununla birlikte, bu ilişkinin yapısal sonuçları çoğunlukla tasarım kararlarının büyük ölçüde kesinleştiği ileri aşamalarındaki mühendislik analizleri sırasında görünür hâle gelmektedir. Bu araştırma, plan organizasyonuna bağlı dışmerkezlik değerlendirmesini erken tasarım sürecine taşıyan, Bina Bilgi Modellemesi (BIM) tabanlı ve Büyük Dil Modeli (LLM) destekli bir karar destek sistemi önermektedir. Önerilen yaklaşımın özgün katkısı, yönetmelik temelli sayısal kontrolü yapay zekâ yorumlamasından işlevsel olarak ayırması ve uygunluk sınırını aşmayan plan alternatifleri arasındaki yapısal farklılaşmayı dahi tasarımcıya açıklayıcı geri bildirim olarak sunmayı amaçlamasıdır. Böylece yapay zekâ ajanı, sayısal uygunluk kararını üreten bir araç olarak değil, doğrulanabilir hesaplama çıktılarının mimari kararlarla ilişkisini yorumlayan bir katman olarak konumlandırılmaktadır.

Geliştirilen karar destek sistemi, Autodesk Revit 2026 ortamında C# programlama dili ve Revit API kullanılarak geliştirilen bir eklenti aracılığıyla uygulanmıştır. Eklenti, seçilen kat planına ait geometrik ve yapısal verileri doğrudan BIM modelinden almakta; CM ile CR arasındaki farkı x ve y doğrultularında hesaplayarak e_x/L_x ve e_y/L_y oranlarını elde etmekte ve sonuçları Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde (TBDY 2018) tanımlanan $e \leq L/5$ sınırı doğrultusunda kural tabanlı olarak değerlendirmektedir. Hesaplama sonuçları ve uygunluk bilgisi JSON formatında LLM destekli yorumlama katmanına aktarılmakta; Gemini Flash 2.0 modeli, hesaplama müdahale etmeden sonuçları plan geometrisi, çekirdek konumu ve taşıyıcı eleman dağılımı bağlamında yorumlamaktadır.

Sistem, simetrik ve asimetrik plan organizasyonlarına sahip iki örnek üzerinden incelenmiştir. Her iki plan yönetmelik sınırı içinde kalmasına karşın, asimetrik planda özellikle y doğrultusundaki dışmerkezlik oranının belirgin biçimde yükseldiği belirlenmiş; yapay zekâ katmanı bu farklılığı taşıyıcı sistem dağılımının gözden geçirilmesine yönelik tasarım geri bildirimine dönüştürmüştür. Model üzerinde öneriye bağlı otomatik revizyon gerçekleştirilmesi bu araştırmanın kapsamı dışında bırakılmıştır. Bulgular, önerilen yaklaşımın tam yapısal performans doğrulamasının yerine geçmeden, erken mimari kararların olası yapısal etkilerini görünür kılan denetlenebilir ve açıklayıcı bir karar desteği sağlayabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Erken Tasarım Aşaması, Yapay Zeka Ajanları, Büyük Dil Modelleri, Burulma, Dışmerkezlik.

AI Agent-Assisted Eccentricity Assessment in the Early Design Phase: A Comparative Case Study

Ecem Berna Şahin¹ ; Sema Alaçam² ; Semih Bayer³ 

^{1,2}İstanbul Technical University; ³Van Yüzüncü Yıl University

¹sahine23@itu.edu.tr; ²alacams@itu.edu.tr; ³semihbayer@yyu.edu.tr

Abstract

Architectural plan organization is one of the significant design parameters affecting the seismic behavior of buildings, particularly in earthquake-prone regions. Plan geometry, core location, and the distribution of structural elements influence the relationship between the Center of Mass (CM) and the Center of Rigidity (CR), and irregular configurations may increase eccentricity-based torsional tendency. The Turkish Building Earthquake Code (TBDY 2018) defines the eccentricity criterion of $e \leq L/5$ for the evaluation of such plan-related effects. However, although this criterion is directly associated with architectural plan organization, its structural implications generally become visible during engineering analyses at later design stages, when major architectural decisions have largely been finalized. This research proposes a Building Information Modeling (BIM)-based and Large Language Model (LLM)-supported decision support system that integrates eccentricity assessment into the early design process. The original contribution of the proposed approach lies in functionally separating regulation-based numerical control from Artificial Intelligence (AI)-based interpretation and in providing explanatory feedback on structural differences among plan alternatives, even when these alternatives remain within the compliance limit. Accordingly, the AI agent is positioned not as a tool that produces the numerical compliance decision, but as an interpretation layer that relates verifiable computational outputs to architectural design decisions.

The developed decision support system was implemented as a plugin in Autodesk Revit 2026 using the C# programming language and the Revit API. The plugin retrieves geometric and structural data directly from the selected floor plan in the BIM model, calculates the differences between CM and CR in the x and y directions to obtain the e_x/L_x and e_y/L_y ratios, and evaluates these results through a rule-based process according to the limit defined in TBDY 2018. The calculation results and compliance information are transferred in JSON format to the LLM-supported interpretation layer. Without intervening in the numerical calculation, the Gemini Flash 2.0 model interprets the results in relation to plan geometry, core location, and structural element distribution.

The system was examined through two cases representing symmetrical and asymmetrical plan organizations. Although both plans remained within the regulatory limit, the asymmetrical plan exhibited a notably higher eccentricity ratio, particularly in the y direction. The AI layer translated this difference into design feedback suggesting reconsideration of the lateral load-resisting system distribution. Automated revision of the model based on these recommendations was excluded from the scope of this research. The findings indicate that, without replacing full structural performance verification, the proposed approach can provide traceable and explanatory decision support by making the potential structural implications of early architectural decisions visible.

Keywords: Artificial Intelligence Agent, Eccentricity, Torsion, Large Language Models, Early Design Phase.

1. Giriş

Mimari tasarımın erken aşamaları, yapının mekânsal organizasyonunun yanı sıra sonraki yapısal performansını etkileyebilecek temel kararların da biçimlendiği kritik bir süreçtir. Özellikle deprem etkisinin belirleyici olduğu bağlamlarda plan geometrisi, çekirdek konumu ve taşıyıcı elemanların dağılımı, kütle ve rijitlik merkezleri arasındaki ilişkiyi etkileyerek burulma eğiliminin oluşmasına neden olabilmektedir. Düzensiz veya asimetrik plan kurgularında bu ilişki daha kritik hâle gelmekte; buna karşın mimari tasarım kararlarının yapısal etkileri çoğunlukla tasarımın ileri aşamalarında gerçekleştirilen mühendislik analizleri sırasında görünür olmaktadır. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde (TBDY 2018) tanımlanan dışmerkezlik sınırı, plan organizasyonu ile yapısal davranış arasındaki bu ilişkinin değerlendirilmesine yönelik temel ölçütlerden biridir. Ancak söz konusu ölçütün erken tasarım aşamasında mimarın karar verme sürecine doğrudan dâhil edilememesi, daha sonraki aşamalarda tasarım revizyonlarına ve mimarlık ile yapı mühendisliği arasındaki koordinasyon gereksiniminin artmasına yol açabilmektedir.

Yapısal performansa ilişkin bilginin, tasarım sürecinin sonunda doğrulanan bir sonuç olmaktan çıkarılarak tasarım kararlarını yönlendiren bir geri bildirim mekanizmasına dönüştürülmesi, hesaplamalı tasarım araştırmalarının uzun süredir tartıştığı temel sorulardan biriyle ilişkilidir. Bilgisayarın mimari tasarımda yalnızca çizim ve temsil aracı değil, tasarımcıyla etkileşime giren bir karar destek ortamı olarak ele alınması güncel yapay zekâ uygulamalarıyla başlamıştır. Negroponte (1970), mimar ile makine arasındaki ilişkiyi karşılıklı gelişime açık bir ortaklık olarak kavramsallaştırmış; Aoki (1994) ise erken tasarım aşamasındaki eksik ve belirsiz tasarım ifadelerinden hareketle, tasarımcının önceki kararlarındaki ilişkileri kullanarak çıkarım üreten bir CAD modeli önermiştir. Bu tarihsel çerçevede güncel farklılaşma, Büyük Dil Modellerinin (LLM) Bina Bilgi Modelleme (BIM) ortamından elde edilen nicel verileri yorumlayabilen ve tasarımcıya doğal dil aracılığıyla açıklayıcı geri bildirim üretebilen yapay zekâ ajanlarının bir bileşeni olarak kullanılabilesidir.

Bu doğrultuda çalışma, erken tasarım aşamasında plan organizasyonuna bağlı burulma riskinin dışmerkezlik ölçütü üzerinden değerlendirilmesine yönelik BIM tabanlı ve LLM destekli bir karar destek sistemi önermektedir. Autodesk Revit ortamında geliştirilen sistem, Revit API aracılığıyla kat planındaki geometrik ve yapısal verileri elde ederek kütle merkezi (CM) ile rijitlik merkezi (CR) arasındaki ilişkiyi hesaplamakta ve dışmerkezlik değerini TBDY 2018'de tanımlanan sınır doğrultusunda değerlendirmektedir. Sistemde yer alan LLM tabanlı yapay zekâ katmanı ise elde edilen nicel sonuçları plan organizasyonu bağlamında yorumlayarak tasarımcıya yönelik geri bildirimler üretmektedir. Böylece çalışma, genellikle ileri mühendislik analizleri kapsamında ele alınan dışmerkezlik temelli burulma riski değerlendirmesini erken tasarım aşamasına taşıyan bir BIM tabanlı iş akışı sunmakta; kural temelli hesaplama ile LLM tabanlı yorumlamanın birlikte kullanımını simetrik ve asimetrik iki plan örneği üzerinden yürütülen karşılaştırmalı bir vaka çalışması ile incelemektedir. BIM tabanlı uygunluk kontrolü, algoritma destekli BIM süreçleri ve LLM tabanlı yapay zekâ ajanlarına ilişkin literatür izleyen bölümde ayrıntılı olarak ele alınmaktadır.

2. Mimari Tasarımda Hesaplamalı Değerlendirme ve Otomasyon

2.1. BIM Tabanlı Uygunluk Kontrolü

Mimari tasarımın yönetmelik ve performans ölçütleri doğrultusunda sayısal olarak değerlendirilmesi, BIM tabanlı otomasyon araştırmalarının temel konularından biridir. Otomatik Uyumluluk Kontrolü (Automated Compliance Checking, ACC), yönetmelik bilgisinin bilgisayar tarafından işlenebilir kurallara dönüştürülmesi ve bina modelinin bu kurallar üzerinden denetlenmesine dayanmaktadır. Eastman vd. (2009), bu süreci kural yorumlama, bina modelinin hazırlanması, kural yürütme ve sonuçların raporlanması aşamaları üzerinden tanımlamıştır. Yapı elemanlarının geometrik, anlamsal

ve ilişkisel verilerini birlikte barındıran BIM, bu süreçte yalnızca bir temsil ortamı değil, ölçülebilir tasarım özelliklerinin değerlendirilmesini mümkün kılan bir veri altyapısı olarak işlev görmektedir. BIM tabanlı uygunluk kontrolünün erken örnekleri, açık biçimde tanımlanan kuralların model verisi üzerinden sınanmasına odaklanmaktadır. Türkiye bağlamında Balaban vd. (2012), yangın kaçış hükümlerinin BIM ortamında otomatik kontrolünü ele alırken, Yıldırım ve Alaçam (2018) BIM süreçlerinde tekrarlayan modelleme, veri kontrolü ve doğrulama görevlerinin algoritma destekli iş akışlarıyla yeniden düzenlenebileceğini göstermiştir. Daha güncel çalışmalarda ise araştırma odağı, yalnızca tanımlanmış kuralların yürütülmesinden, yönetmelik bilgisinin ve mekânsal ilişkilerin otomatik olarak yorumlanmasına doğru genişlemiştir.

Daha güncel çalışmalarda ise araştırma odağı, yalnızca tanımlanmış kuralların yürütülmesinden, yönetmelik bilgisinin ve mekânsal ilişkilerin otomatik olarak yorumlanmasına doğru genişlemiştir. Wang vd. (2023), yangın yönetmeliklerindeki mekânsal geometrik ilişkileri BIM ve doğal dil işleme yöntemleriyle denetlemiş; Chen vd. (2024), LLM, derin öğrenme ve ontoloji modellerini bütünleştirerek yönetmelik metinlerinin yapılandırılmış kontrol bilgisine dönüştürülmesini amaçlamıştır. Haque ve Kim (2026) ise sağlık yapılarında erişilebilirlik kurallarının değerlendirilmesi için BIM ortamına entegre edilen, LLM destekli kural yorumlama ile otomatik ve kullanıcı girdisine dayalı uygunluk kontrolünü birlikte yürüten bir sistem geliştirmiştir.

Bu gelişim çizgisi, BIM tabanlı kontrolün hesaplama ve yorumlama kapasitesini zenginleştirmekte ve erken tasarım aşamasındaki karar desteği bakımından önemli bir boşluğu da görünür kılmaktadır. Uygunluk kontrolü çoğunlukla bir tasarımın tanımlı sınırları karşılayıp karşılamadığını belirlemeye yönelirken, erken tasarım sürecinde mimarın gereksinimi, plan organizasyonuna ilişkin kararların performans üzerindeki etkisini anlayabilmek ve olası iyileştirme yönlerini değerlendirebilmektir. Dolayısıyla, dışmerkezlik gibi nicel bir yapısal göstergenin model üzerinden hesaplanması kadar, bu sonucun tasarım kararlarıyla ilişkili ve açıklayıcı bir geri bildirimle dönüştürülmesi de önem kazanmaktadır.

2.2. BIM Ortamında LLM Tabanlı Yapay Zeka Ajanları

Doğal dil tabanlı etkileşim olanaklarının gelişmesi, yapay zekâ ajanlarının BIM ortamındaki rolünü model verisine erişimden tasarım değerlendirme ve geri bildirim üretimine doğru genişletmiştir. Fernandes vd. (2024), Revit modelinin metin ve ses komutlarıyla sorgulanmasını ve güncellenmesini sağlayan bir dijital asistan geliştirirken, Guo vd. (2025) kullanıcı sorgularının Revit C# API işlevleriyle eşleştirilmesini çok ajanlı bir yapı üzerinden ele almıştır. Bu çalışmalar, doğal dil arayüzlerinin BIM verisine erişimi kolaylaştırma potansiyelini ortaya koymakla birlikte, tasarım kararlarının performans açısından değerlendirilmesinden çok model etkileşimi ve bilgi erişimine odaklanmaktadır. Tasarım üretimi ve değerlendirme süreçlerine yönelen çalışmalar, ajanların işlevini bilgi erişiminin ötesine taşımaktadır. Jang vd. (2024), doğal dil aracılığıyla üretilen dış duvar detaylarını kullanıcı gereksinimleri ve ısı performans ölçütleri bakımından değerlendirmiş; Du vd. (2026), doğal dil girdilerinden semantik BIM modelleri üreten çok ajanlı bir çerçeveye kural tabanlı kontrol bileşeni ekleyerek yinelemeli iyileştirmeyi mümkün kılmıştır. Tang vd. (2025) ise farklı uzmanlıkları temsil eden ajanların mekânsal, maliyet ve enerji performansı ölçütlerini birlikte değerlendirdiği bir tasarım süreci önermektedir. Bu araştırmalar, yapay zekâ ajanlarının BIM ortamında yalnızca komutları uygulayan araçlar değil, belirli ölçütler doğrultusunda tasarım alternatiflerini geliştiren sistem bileşenleri olarak konumlanmaya başladığını göstermektedir.

Uygunluk kontrolü ve yazılım ortamında görev yürütme üzerine odaklanan araştırmalar ise daha özerk iş akışlarına işaret etmektedir. Ying ve Sacks (2024) ile Iversen ve Huang (2026), yapay zekâ ajanlarının yönetmelik gerekliliklerini yorumlama, ilgili model verisini elde etme, kontrolü yürütme ve sonuçları raporlama kapasitesini incelemiştir. Dong vd. (2025), çoklu ajan yapısı ile Revit ortamında mekânsal sorgulama, eleman oluşturma ve çakışma kontrolü işlemlerini gerçekleştirirken, Deng (2025) BIM yazılımıyla grafik kullanıcı arayüzü üzerinden etkileşim kuran bir ajan yaklaşımı önermiştir.

Bununla birlikte, dışmerkezlilik gibi hassas geometrik ve yapısal parametrelerin hesaplanmasında model verisine API üzerinden doğrudan erişim, arayüz tabanlı eylem üretimine kıyasla daha izlenebilir bir değerlendirme altyapısı sağlamaktadır.

Sayısal analiz sonuçlarının tasarım geri bildirimine dönüştürülmesi bakımından Jadhav ve Barati Farimani'nin (2026) çalışması, bir LLM ajanını sonlu elemanlar analiziyle ilişkilendirerek yapısal alternatiflerin değerlendirilmesi ve performans sonuçlarına bağlı revizyon önerileri üretilmesi açısından önemlidir. Buna karşın, mevcut literatürde mimari plan organizasyonuna bağlı sismik risklerin erken tasarım aşamasında nicel olarak değerlendirilmesi ve bu sonuçların tasarımcıya açıklayıcı geri bildirim olarak sunulması sınırlı kalmaktadır. Bu çalışmada önerilen sistem, TBDY 2018'de tanımlanan dışmerkezlilik sınırını Revit API üzerinden alınan model verileriyle kural tabanlı olarak hesaplamakta; LLM katmanını ise hesaplanan sonuçların plan organizasyonu bağlamında yorumlanması ve erken tasarım kararlarını destekleyen önerilere dönüştürülmesi amacıyla kullanmaktadır.

3. Yöntem

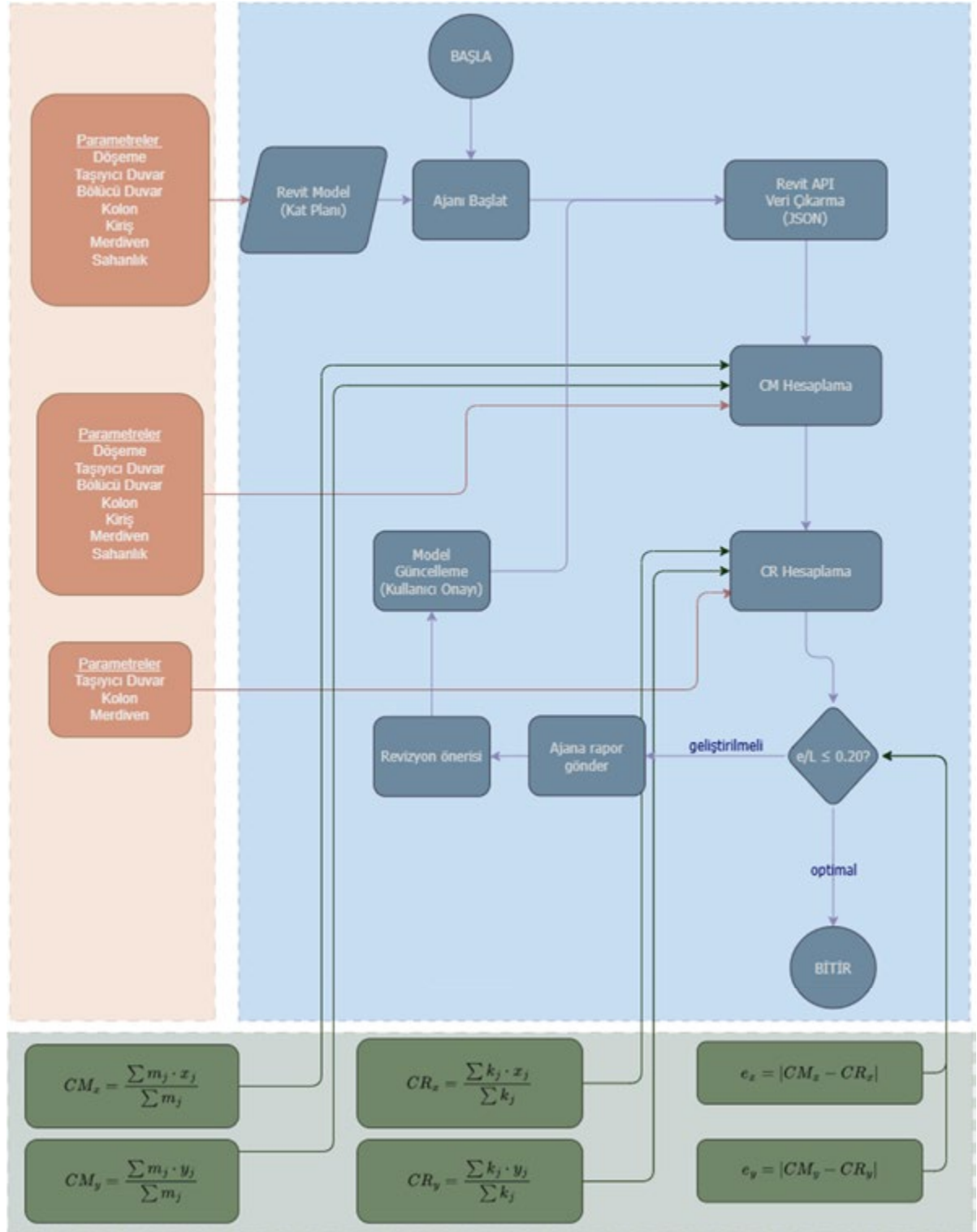
Yöntem, Revit ortamında geliştirilen bir yazılım prototipinin farklı plan organizasyonlarına sahip iki örnek üzerinde sınındığı bir vaka çalışmasına dayanmaktadır. İş akışı; model verisinin elde edilmesi, dışmerkezlilik oranlarının hesaplanması, yönetmelik sınırıyla karşılaştırılması ve sonuçların yapay zekâ katmanı aracılığıyla tasarım geri bildirimine dönüştürülmesi aşamalarından oluşmaktadır. Kapsam, kat planı düzeyindeki dışmerkezlilik değerlendirmesiyle sınırlıdır; çok katlı yapılardaki burulma düzensizliği analizi bu araştırmaya dâhil edilmemiştir.

3.1. Sistem Mimarisi ve İş Akışı

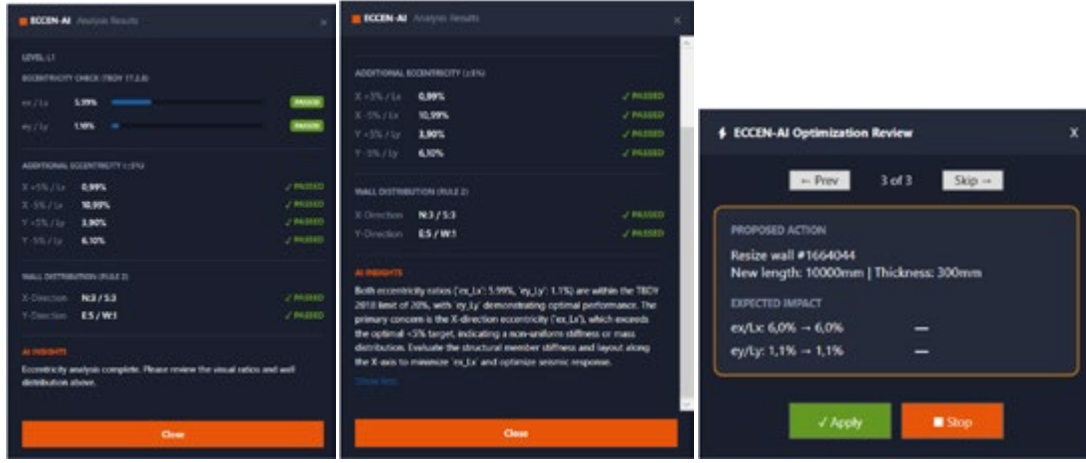
Geliştirilen sistem, Autodesk Revit 2026 ortamına entegre edilmiş, C# programlama dili ve Autodesk Revit API kullanılarak geliştirilmiş özel bir eklentidir. Revit API, BIM model verilerine doğrudan erişim sağlamak amacıyla kullanılmakta; kullanıcı tarafından seçilen kata ait döşeme geometrisi, kolonlar, perde duvarlar ve yapısal çekirdek verileri modelden otomatik olarak elde edilmektedir. Böylece hesaplama süreci, manuel veri aktarımına gerek kalmadan doğrudan sayısal bina modeli üzerinden yürütülmektedir.

Sistem, kural tabanlı hesaplama ile LLM destekli yorumlama katmanlarını ilişkilendiren bir yapay zekâ ajan mimarisi olarak yapılandırılmıştır. Dışmerkezlilik Kontrolü (Eccentricity Check) modülü, modelden elde edilen geometrik ve yapısal veriler üzerinden dışmerkezlilik hesabını ve yönetmelik temelli kontrolü gerçekleştirmekte; hesaplanan oranları ve değerlendirme durumunu görsel bir gösterge aracılığıyla kullanıcıya sunmaktadır. Hesaplanan veriler ve kontrol çıktıları JSON formatına dönüştürülerek Yapay Zekâ Analiz Raporu (AI Analysis Report) modülüne aktarılmakta; bu modülde Gemini Flash 2.0 büyük dil modeli aracılığıyla plan organizasyonuna ilişkin açıklayıcı geri bildirimler üretilmektedir. Otomatik Optimizasyon (Auto Optimize) modülü ise analiz sonuçlarına bağlı önerilerin model üzerinde uygulanmasına yönelik geliştirme aşamasındaki bir bileşendir. Bu modülün otomatik revizyon işlevi karşılaştırmalı değerlendirmeye dâhil edilmemiş olup, önerilerin uygulanması kullanıcı onayına bağlıdır.

Şekil 1, geliştirilen sistemin veri akışını ve değerlendirme sürecini göstermektedir. Seçilen Revit modelinden alınan geometrik ve yapısal veriler hesaplama katmanında işlenmekte, yönetmelik temelli değerlendirme sonrasında elde edilen çıktılar yapay zekâ katmanına aktarılmaktadır. Sistemin Dışmerkezlilik Kontrolü, Yapay Zekâ Analiz Raporu ve Otomatik Optimizasyon modüllerine ait arayüz çıktıları ise **Şekil 2'**de sunulmaktadır.



Şekil 1: AI Ajanın İş Akışı (Yazar tarafından oluşturulmuştur.)
(CM = Kütle Merkezi, CR = Rijitlik Merkezi, e = CM ve CR arasındaki Mesafe, L = Plan Uzunluğu)



(a)

(b)

(c)

Şekil 2: Geliştirilen sistemin temel bileşenleri: (a) Eccentricity Check modülü, (b) AI Analysis Report modülü, (c) Auto Optimization modülü (Yazar tarafından oluşturulmuştur.)

3.2. Dışmerkezlik Hesabı ve Yapay Zekâ Destekli Değerlendirme

Seçilen kat planı için kütle merkezi (CM), kat geometrisi ve kütle dağılımını temsil eden veriler üzerinden; rijitlik merkezi (CR) ise kolon, perde duvar ve yapısal çekirdek gibi yatay yük taşıyıcı elemanların dağılımı üzerinden hesaplanmaktadır. İki merkezin x ve y doğrultularındaki farkları, dışmerkezlik bileşenlerini oluşturmaktadır (1):

$$e_x = |CM_x - CR_x| \quad e_y = |CM_y - CR_y| \quad (1)$$

Dışmerkezlik bileşenleri ilgili doğrultudaki plan boyutlarına oranlanarak e_x/L_x ve e_y/L_y değerleri elde edilmekte ve TBDY 2018’de tanımlanan $e \leq L/5$ sınırı doğrultusunda kural tabanlı olarak değerlendirilmektedir. Yönetmelik uygunluğuna ilişkin sayısal karar hesaplama modülü tarafından üretilmektedir. Bu modülde yönetmelikteki hesaplamalar ve katsayılar baz alınmaktadır. Böylece farklı yapı tipolojileri de eklenti ile değerlendirilebilmektedir. Yapay zekâ katmanı ise hesaplamaya müdahale etmeden CM, CR, dışmerkezlik oranları ve uygunluk bilgisini plan geometrisi, çekirdek konumu ve taşıyıcı eleman dağılımı bağlamında yorumlamakta; tasarımcıya erken aşamadaki plan kararlarını değerlendirmesine yönelik açıklayıcı geri bildirimler sunmaktadır.

3.3. Karşılaştırmalı Değerlendirme Kurgusu

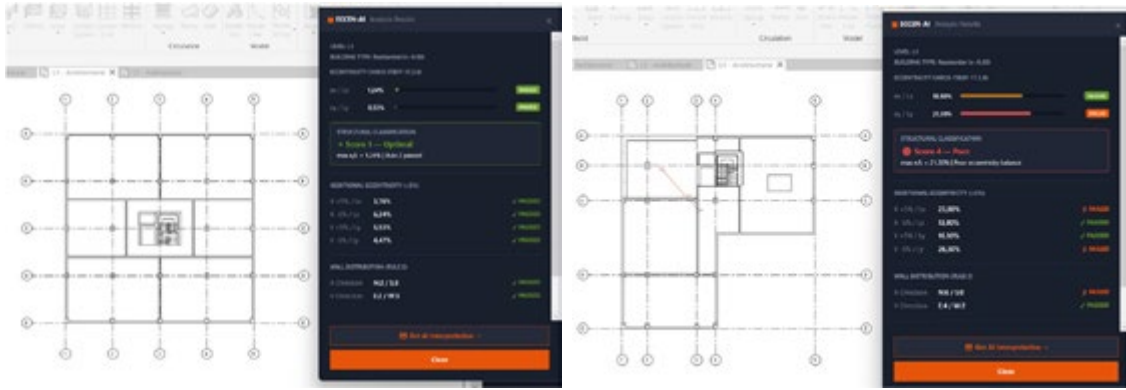
Geliştirilen sistemin farklı plan organizasyonlarına ilişkin çıktı üretme kapasitesi, simetrik ve asimetrik özellikler gösteren iki kat planı üzerinden incelenmiştir. Karşılaştırma değişkenleri; çekirdeğin geometrik merkeze göre konumu, taşıyıcı elemanların plan içindeki dağılımı, plan geometrisinin düzenlilik durumu ile x ve y doğrultularında hesaplanan dışmerkezlik oranları olarak belirlenmiştir. Bu değişkenler, plan organizasyonundaki farklılaşmanın kütle merkezi ile rijitlik merkezi arasındaki ilişkiye nasıl yansıdığını değerlendirmek amacıyla seçilmiştir.

Her iki örnekte, Dışmerkezlik Kontrolü modülü aracılığıyla hesaplanan e_x/L_x ve e_y/L_y oranları yönetmelik sınırı bakımından değerlendirilmiş; ardından Yapay Zekâ Analiz Raporu modülü tarafından üretilen geri bildirimlerin, düşük ve yükselen dışmerkezlik oranlarına sahip plan seçeneklerini nasıl yorumladığı incelenmiştir. Böylece karşılaştırmalı değerlendirme, sistemin yalnızca uygunluk durumunu belirleme işlevini değil, farklı plan organizasyonları için tasarım kararlarını bilgilendirecek

geri bildirim üretme kapasitesini de irdelemektedir. Örnek planlar, hesaplama sonuçları ve yapay zekâ çıktıları izleyen bölümde sunulmaktadır.

4. Karşılaştırmalı Vaka Çalışması

Çalışma kapsamında geliştirilen sistemin farklı plan organizasyonları altında ürettiği değerlendirme çıktılarının incelenmesi amacıyla, iki kat planı üzerinden karşılaştırmalı bir vaka çalışması yürütülmüştür. Örnekler, dışmerkezlik üzerinde etkili olabilecek çekirdek konumu, taşıyıcı eleman dağılımı ve plan geometrisi bakımından farklılaşmaktadır. İlk örnek, çekirdeğin geometrik merkeze yakın konumlandığı ve taşıyıcı elemanların dengeli dağıldığı simetrik bir plan organizasyonunu; ikinci örnek ise çekirdeğin merkezden uzaklaştığı ve taşıyıcı eleman dağılımının düzensizleştiği asimetrik bir plan organizasyonunu temsil etmektedir (**Şekil 3**). Bu bölümde kullanılan plan örnekleri, önceki çalışmada sunulan dışmerkezlik değerlendirme çerçevesiyle ilişkili olmakla birlikte, burada Revit tabanlı hesaplama çıktılarının LLM destekli yorumlama katmanı aracılığıyla tasarım geri bildirimine dönüştürülmesi bakımından yeniden ele alınmaktadır (Şahin vd., 2026).



Şekil 3: Simetrik(a) ve asimetrik (b) plan örneği ve Dışmerkezlik Kontrolü (Eccentricity Check) modülü (Yazar tarafından oluşturulmuştur.)

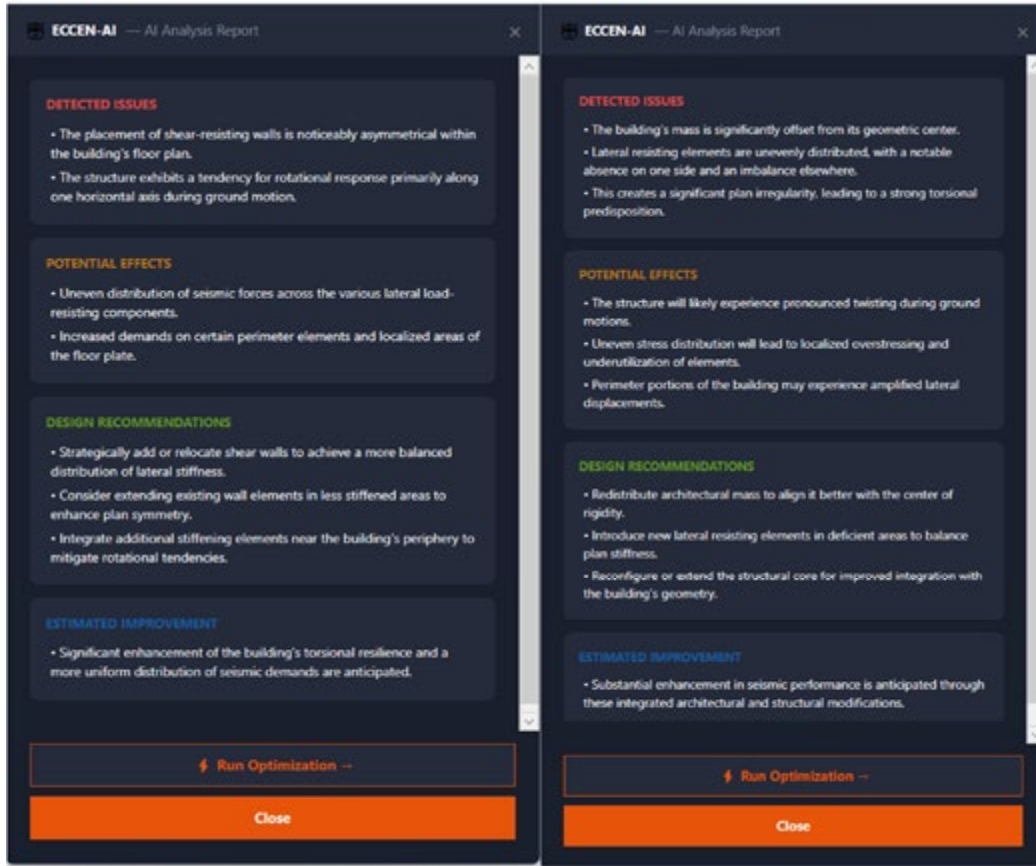
Her iki plan, Revit ortamında geliştirilen eklenti aracılığıyla analiz edilmiştir. Dışmerkezlik Kontrolü (Eccentricity Check) modülü kullanılarak kütle merkezi (CM) ile rijitlik merkezi (CR) arasındaki farklılaşma x ve y doğrultularında hesaplanmıştır; elde edilen e_x/L_x ve e_y/L_y oranları TBDY 2018’de tanımlanan $e \leq L/5$ sınırı doğrultusunda değerlendirilmiştir. Simetrik plan örneğinde $e_x/L_x = \%1,24$ ve $e_y/L_y = \%0,53$ değerleri elde edilirken, asimetrik plan örneğinde bu oranlar sırasıyla $\%18,80$ ve $\%21,30$ olarak hesaplanmıştır. Her iki örnek yönetmelik sınırı içerisinde kalmakla birlikte, asimetrik planda özellikle y doğrultusundaki dışmerkezlik oranının belirgin biçimde yükseldiği görülmektedir. Plan organizasyonlarına ilişkin parametreler ve hesaplama çıktıları **Tablo 1**’de birlikte sunulmaktadır.

Tablo 1: İki farklı planın parametre farklarının değerlendirilmesi

Parametre	Simetrik Plan	Asimetrik Plan
Çekirdek konumu	Merkezi	Merkezden uzak
Taşıyıcı eleman dağılımı	Dengeli	Dengesiz
Plan geometrisi	Düzenli	Düzensiz
e_x/L_x	$\%1,24$	$\%18,80$

e_v/L_v	%0,53	%21,30

Hesaplama çıktıları, Yapay Zekâ Analiz Raporu (AI Analysis Report) modülü aracılığıyla yorumlanmıştır (Şekil 4). Simetrik plan için üretilen rapor, düşük dışmerkezlik oranlarını dengeli kütle ve rijitlik dağılımıyla ilişkilendirmiş ve mevcut organizasyonun korunmasını önermiştir. Asimetrik plan için üretilen rapor ise yönetmelik sınırının sağlanmasına karşı y doğrultusunda yükselen dışmerkezlik oranına dikkat çekerek yatay yük taşıyıcı sistem dağılımının gözden geçirilmesi ve kütle ile rijitlik ilişkisinin daha dengeli hâle getirilmesi yönünde geri bildirim üretmiştir. Böylece vaka çalışması, kural tabanlı hesaplama sonuçlarının LLM destekli yorumlama katmanı aracılığıyla plan organizasyonuna ilişkin açıklayıcı tasarım geri bildirimlerine dönüştürülebildiğini göstermektedir.



(a)

(b)

Şekil 4: Yapay Zekâ Analiz Raporu (AI Analysis Report) modülü çıktıları: (a) simetrik plan örneği değerlendirme, (b) asimetrik plan örneği değerlendirme. (Yazar tarafından oluşturulmuştur.)

5. Bulgular ve Tartışmalar

Karşılaştırmalı vaka çalışması, plan organizasyonundaki farklılaşmanın kütle merkezi (CM) ile rijitlik merkezi (CR) arasındaki ilişkiye yansıdığını göstermektedir. Simetrik örnekte çekirdeğin merkeze yakın konumu ve taşıyıcı elemanların dengeli dağılımı daha düşük dışmerkezlik oranlarıyla ilişkilendirirken, asimetrik örnekte çekirdeğin merkezden uzaklaşması ve taşıyıcı sistem dağılımındaki düzensizlik özellikle y doğrultusundaki dışmerkezlik oranını artırmıştır. Her iki planın da TBDY 2018’de tanımlanan sınır içerisinde kalması, asimetrik organizasyonun yönetmeliğe aykırı olduğunu göstermemektedir. Buna karşılık sonuçlar, yönetmelik sınırı sağlansa dahi plan kararlarının kütle ve

rijitlik dağılımı bakımından karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesinin erken tasarım aşamasında anlamlı bilgi sağlayabileceğine işaret etmektedir.

Geliştirilen sistemin temel katkısı, dışmerkezlik değerlendirmesini yalnızca bir uygunluk kontrolü çıktısı olarak sunmaması, hesaplanan değerleri mimari plan organizasyonu bağlamında yorumlanabilir hâle getirmesidir. BIM tabanlı uygunluk kontrolü literatüründe model verisinin tanımlı kurallar üzerinden denetlenmesi temel bir yaklaşım oluştururken, LLM tabanlı ajanlara ilişkin güncel çalışmalar değerlendirme sonuçlarının doğal dil yoluyla açıklanması ve tasarım süreciyle ilişkilendirilmesi yönünde yeni olanaklar sunmaktadır. Bu çalışmada sayısal uygunluk kararı yapay zekâ tarafından değil, Revit API üzerinden elde edilen verilerle çalışan kural tabanlı hesaplama modülü tarafından üretilmektedir. Yapay zekâ katmanı ise bu doğrulanabilir hesaplama çıktısını çekirdek konumu ve taşıyıcı eleman dağılımı gibi tasarım parametreleriyle ilişkilendirerek geri bildirimle dönüştürmektedir. Bu ayrım, LLM kullanımının hesaplama güvenilirliğini ikame etmeden, sonuçların tasarımcı tarafından yorumlanmasını destekleyen bir katman olarak konumlandırılmasını sağlamaktadır.

Vaka çalışmasının bulguları, sistemin erken tasarım sürecinde alternatif plan organizasyonlarının karşılaştırılması için kullanılabileceğini göstermektedir. Özellikle yönetmelik sınırını aşmayan, ancak dışmerkezlik bakımından birbirinden belirgin biçimde farklılaşan seçeneklerde sistem, tasarımcıyı daha dengeli bir kütle ve rijitlik ilişkisi oluşturabilecek kararlar üzerine düşünmeye yönlendirebilir. Bununla birlikte, yapay zekâ katmanı tarafından üretilen öneriler yapısal performans doğrulaması olarak değerlendirilmemeli; ilerleyen tasarım aşamalarında mühendislik analizleriyle sınanması gereken erken tasarım geri bildirimleri olarak ele alınmalıdır.

Araştırmamızın sınırlılıkları, sistemin mevcut kapsamını da tanımlamaktadır. İnceleme, iki kat planı üzerinden yürütülen plan düzeyindeki dışmerkezlik değerlendirmesiyle sınırlıdır; TBDY 2018’de tanımlanan ötelenme temelli burulma düzensizliği hesabı, çok katlı davranış, malzeme özellikleri ve karma taşıyıcı sistemler değerlendirme kapsamına alınmamıştır. Ayrıca Otomatik Optimizasyon (Auto Optimize) modülü henüz geliştirme aşamasında olduğundan, yapay zekâ tarafından üretilen önerilerin model üzerinde uygulanması ve yeniden hesaplama yoluyla doğrulanması bu çalışmada test edilmemiştir. Bu nedenle bulgular, geliştirilen sistemin erken aşama karar desteği için uygulanabilirliğine ilişkin ön sonuçlar olarak değerlendirilmelidir.

6. Sonuç

Bu araştırma, erken tasarım aşamasında plan organizasyonuna bağlı dışmerkezlik değerlendirmesinin BIM tabanlı bir iş akışı aracılığıyla tasarım sürecine dâhil edilebileceğini ortaya koymaktadır. Autodesk Revit ortamında geliştirilen eklenti, model verisini Revit API üzerinden elde ederek dışmerkezlik oranlarını kural tabanlı biçimde hesaplamakta ve TBDY 2018’de tanımlanan sınır doğrultusunda değerlendirmektedir. LLM destekli yapay zekâ katmanı ise bu hesaplamayı gerçekleştirmek yerine, elde edilen nicel sonuçları plan geometrisi, çekirdek konumu ve taşıyıcı eleman dağılımı bağlamında yorumlayarak tasarımcıya açıklayıcı geri bildirimler sunmaktadır.

Çalışmanın katkısı, yönetmelik temelli dışmerkezlik kontrolünü yalnızca tasarımın ileri aşamalarında gerçekleştirilen bir doğrulama işlemi olarak ele almak yerine, erken tasarım kararlarını bilgilendiren bir değerlendirme sürecine dönüştürme potansiyelini göstermesidir. Karşılaştırmalı vaka çalışması, yönetmelik sınırı içinde kalan farklı plan seçeneklerinin dahi kütle ve rijitlik dağılımı bakımından ayrışabileceğini; bu farklılaşmanın tasarımcıya anlaşılır geri bildirimler olarak aktarılabilmesini göstermiştir. Bu yönüyle önerilen yaklaşım, BIM tabanlı uygunluk kontrolünün denetlenebilir hesaplama kapasitesi ile LLM tabanlı yorumlamanın tasarım desteği potansiyelini bir araya getirmektedir.

Bununla birlikte, geliştirilen prototip mevcut aşamada kat planı düzeyindeki dışmerkezlik değerlendirmesiyle sınırlıdır. Çok katlı yapı davranışı, TBDY 2018 kapsamında ötelenme temelli burulma düzensizliği hesabı, farklı malzeme özellikleri ve karma taşıyıcı sistemler bu çalışmanın kapsamı dışında bırakılmıştır. Ayrıca yapay zekâ tarafından üretilen önerilerin model üzerinde otomatik uygulanmasını amaçlayan Otomatik Optimizasyon (Auto Optimize) modülü henüz geliştirme aşamasındadır. Gelecek çalışmalarda sistemin çok katlı ve farklı taşıyıcı sistemlere uyarlanması, öneri–revizyon–yeniden değerlendirme döngüsünün geliştirilmesi ve profesyonel kullanıcılarla gerçek tasarım senaryoları üzerinden sınanması hedeflenmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bilişim Anabilim Dalı Mimari Tasarımda Bilişim programında yürütülen yüksek lisans tezinin bir parçası olarak hazırlanmıştır.

KAYNAKLAR

- Aoki, Y. (1994). An Association Model For A CAD System, In J.S. Gero & F. Sudweeks (Eds.), *Artificial Intelligence in Design '94*, (pp.219-236). Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-011-0928-4_13
- Balaban, Ö., Yağmur-Kilimci, E. S., & Çağdaş, G. (2012). Automated code compliance checking model for fire egress codes. In H. Achten, J. Pavlíček, J. Hulín, & D. Matějovská (Eds.), *Physical digitality: Proceedings of the 30th International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe* (Vol. 2, pp. 117–125). Czech Technical University in Prague, Faculty of Architecture. <https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2012.2.117>
- Chen, N., Lin, X., Jiang, H., & An, Y. (2024). Automated building information modeling compliance check through a large language model combined with deep learning and ontology. *Buildings*, 14(7), 1983. <https://doi.org/10.3390/buildings14071983>
- Deng, Z. (2025, June). *Towards Autonomous BIM Authoring via GUI Agent-based Computer Control* [Master's thesis, TUM School of Engineering and Design of the Technical University of Munich]. mediaTUM. https://mediatum.ub.tum.de/doc/1783618/pvixm3jk2jq4r4lu4jqcapi5o.2_master_thesis_redacted_version.pdf
- Dong, Y., Zhan, Z., Hu, Y., Doe, D. M., & Han, Z. (2025). *AI BIM coordinator for non-expert interaction in building design using LLM-driven multi-agent systems*. *Automation in Construction*, Volume 180, 106563. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106563>
- Du, C., Esser, S., Nousias, S., & Borrmann, A. (2026). Text2BIM: Generating building models using a large language model-based multiagent framework. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 40(2), 04025142. <https://doi.org/10.1061/JCCE5.CPENG-6386>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2009.07.002>
- Fernandes, D., Garg, S., Nikkel, M., & Guven, G. (2024). A GPT-powered assistant for real-time interaction with building information models. *Buildings*, 14(8), 2499. <https://doi.org/10.3390/buildings14082499>
- Guo, P., Xue, H., Ma, J., & Cheng, J. C. P. (2025). Advancing BIM information retrieval with an LLM-based query-domain-specific language and library code function alignment system. *Automation in Construction*, 178, 106374. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106374>
- Haq, M. O., & Kim, J. B. (2026). AI-integrated compliance checking in BIM to enhance healthcare accessibility. In *Humanistic computation and intelligence: Proceedings of the 31st International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA 2026)* (Vol. 1, pp. 641–650). Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia.
- Iversen, O., & Huang, L. (2026). Leveraging large language models for BIM-based automated compliance checking. *Automation in Construction*, 182, 106707. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106707>
- Jadhav, Y., & Barati Farimani, A. (2026). Large language model agent as a mechanical designer. *Journal of Engineering Design*, 1–37. <https://doi.org/10.1080/09544828.2026.2624356>
- Jang, S., Lee, G., Oh, J., Lee, J., & Koo, B. (2024). Automated detailing of exterior walls using NADIA: Natural-language-based architectural detailing through interaction with AI. *Advanced Engineering Informatics*, 61, 102532. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102532>

Tasarımın Erken Aşamasında Yapay Zekâ Ajanı Destekli Dışmerkezlik Değerlendirmesi: Karşılaştırmalı Bir Vaka Çalışması | Şahin, Ecem Berna; Alaçam, Sema; Bayer, Semih

- Republic of Türkiye Ministry of Environment and Urbanization (2018). *Turkish Building Earthquake Code*. <https://mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=24468&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5>
- Negroponte, N. (1970). *The Architecture machine: Toward a more human environment*. The MIT Press. <https://doi.org/10.7551/mitpress/8269.001.0001>
- Şahin E.B., Alaçam, S. & Bayer, S. (2026). Integrating AI Agents into BIM for Architectural Design Support: A Torsional Eccentricity Assessment Case. *5th International Graduate Research Symposium*, Istanbul.
- Tang, C., Tam, K.-M. M., & Herr, C. M. (2025). Archi-Agents: Approximating the architectural design process with collaborative specialized multi-agent system LLM and building information modeling. In *Architectural informatics: Proceedings of the 30th International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA 2025)* (Vol. 3, pp. 141–150). Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia.
- Wang, Y., Liu, Y., Cai, H., Wang, J., & Zhou, X. (2023). An automated fire code compliance checking jointly using building information models and natural language processing. *Fire*, 6(9), 358. <https://doi.org/10.3390/fire6090358>
- Yıldırım, Ş., & Alaçam, S. (2018). An investigation on algorithm aided BIM approaches to increase collaboration and optimisation in project phase: A case study. *ITU A/Z Journal of the Faculty of Architecture*, 15(1), 65–77. <https://doi.org/10.5505/ituifa.2018.44711>
- Ying, H., & Sacks, R. (2024). From automatic to autonomous: A large language model-driven approach for generic building compliance checking. *41st International Conference of CIB W78, Marrakech, Morocco, 2-3 October*, 15364-3. <http://itc.scix.net/paper/w78-2024-59>

NöroGeneratif Mimarlık: İnsan Verisine Dayalı Mekânsal Üretim İçin Kavramsal Bir Çerçeve

Betül Uçkan¹ ; Ayçin Atukeren² ; Bengü Özmutlu³ ; Aykut Dağ⁴ ; Tolga Aydoğdu⁵ ;

Umut Pektetik⁶ ; Ahmet Gün⁷ ; Ethem Güner⁸ ; Tülay Karakaş⁹ 

^{1, 6} İstanbul Medipol Üniversitesi; ^{1, 2, 3, 4, 7, 8, 9} İstanbul Teknik Üniversitesi; ⁵ İstanbul Bilgi Üniversitesi; ⁶ Mimar

Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi

¹betul.uckan@medipol.edu.tr; ²aycinatukeren@gmail.com; ³benguozmutlu@gmail.com;

⁴aaykutdag@gmail.com; ⁵tolgydd@gmail.com; ⁶umutcan.pektetik@medipol.edu.tr; ⁷ahmetgun@itu.edu.tr;

⁸ethemgurer@gmail.com; ⁹tulayerenoglu@gmail.com

Özet

Mimarlık disiplini uzun yıllar boyunca mekânı çoğunlukla fiziksel ve statik bir yapı olarak ele almış, insan-mekân ilişkisini ise işlevsel ve biçimsel boyutlar üzerinden değerlendirmiştir. Son yıllarda nörogörüntüleme teknolojilerindeki gelişmeler, mimari çevrenin insan üzerindeki bilişsel ve duygusal etkilerinin daha ayrıntılı biçimde incelenmesine olanak sağlamış ve nöromimarlık alanının gelişimine katkıda bulunmuştur. Bununla birlikte mevcut nöromimarlık araştırmalarının büyük bölümü insan-mekân ilişkisinin analizine odaklanmakta; elde edilen verileri doğrudan tasarım sürecinin üretken girdilerine dönüştüren bütüncül modeller sınırlı kalmaktadır. Benzer şekilde üretken tasarım yaklaşımları algoritmik ve parametrik sistemler aracılığıyla tasarım alternatifleri üretebilmekte, ancak insanın bilişsel ve duygusal durumlarını tasarım sürecine doğrudan dahil etmemektedir. Bu çalışma, söz konusu boşluğa yanıt olarak nöromimarlığın analitik birikimi ile üretken tasarım yaklaşımlarını bir araya getiren nörogeneratif mimarlık (neurogenerative architecture) kavramını önermektedir. Araştırma, kavramsal ve kuramsal bir çalışma olarak kurgulanmış; beyin-bilgisayar arayüzü (BCI), EEG tabanlı tasarım, nöroadaptif tasarım, nörotepkisel tasarım ve üretken tasarım alanlarında gerçekleştirilen çalışmalar karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda, insanın nörofizyolojik verilerini mekânsal üretimin aktif girdilerinden biri olarak ele alan bir kavramsal model geliştirilmiştir. Önerilen model, nörofizyolojik verilerin toplanması, işlenmesi, anlamlı insan durumu göstergelerine dönüştürülmesi, tasarım parametrelerine aktarılması ve hibrit mekânsal ortamlarda üretken sistemler aracılığıyla mekânsallaştırılması süreçlerini tanımlamaktadır. Modelde kullanıcıdan elde edilen veriler yalnızca analiz edilen çıktılar olarak değil, ışık, ses, görsel-işitsel atmosfer ve mekânsal davranışları etkileyen tasarım girdileri olarak değerlendirilmektedir. Böylece insan ve mekân arasında sürekli çalışan bir nörogeribildirim döngüsü kurulabilmekte ve mekân kullanıcı verilerine bağlı olarak eşzamanlı biçimde dönüşebilmektedir. Sonuç olarak çalışma, mekânı sabit bir nesne olarak değil, insan verilerinden beslenen, kullanıcıyla birlikte evrilen ve bilişsel durumlarla etkileşim kurabilen dinamik bir sistem olarak yeniden düşünmeyi önermektedir. Bu yönüyle nörogeneratif mimarlık, insan deneyimi ile hesaplamalı tasarım süreçleri arasında yeni bir ilişki kuran kavramsal bir çerçeve sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Nörogeneratif Mimarlık, Nöromimarlık, Üretken Tasarım, Beyin-Bilgisayar Arayüzü, Nörogeribildirim.

Neurogenerative Architecture: A Conceptual Framework for Spatial Production Based on Human Data

Betül Uçkan¹ ; Ayçin Atukeren² ; Bengü Özmutlu³ ; Aykut Dağ⁴ ; Tolga Aydoğdu⁵ ;

Umut Pektetik⁶ ; Ahmet Gün⁷ ; Ethem Gürer⁸ ; Tülay Karakaş⁹ 

^{1, 6} Istanbul Medipol University; ^{1, 2, 3, 4, 7, 8, 9} Istanbul Technical University; ⁵ Istanbul Bilgi University; ⁶ Mimar Sinan Fine Arts University (MSGSU)

¹betul.uckan@medipol.edu.tr; ²aycinatukeren@gmail.com; ³benguozmutlu@gmail.com;

⁴aaykutdag@gmail.com; ⁵tolgydd@gmail.com; ⁶umutcan.pektetik@medipol.edu.tr; ⁷ahmetgun@itu.edu.tr;

⁸ethemgurer@gmail.com; ⁹tulayerenoglu@gmail.com

Abstract

For many years, architecture has predominantly approached space as a physical and static construct, while the human-space relationship has been evaluated primarily through functional and formal dimensions. Recent advances in neuroimaging technologies have enabled a more detailed investigation of the cognitive and emotional effects of architectural environments on humans, contributing significantly to the development of the field of neuroarchitecture. However, most existing neuroarchitectural research focuses on analyzing the relationship between humans and space, while holistic models that transform the resulting data directly into generative inputs for the design process remain limited. Similarly, generative design approaches are capable of producing design alternatives through algorithmic and parametric systems, yet they rarely incorporate human cognitive and emotional states directly into the design process. In response to this gap, this study proposes the concept of neurogenerative architecture, which brings together the analytical foundations of neuroarchitecture and the methodological approaches of generative design. The research is structured as a conceptual and theoretical study and includes a comparative review of studies related to Brain-Computer Interfaces (BCI), EEG-based design, neuroadaptive design, neuroresponsive design, and generative design. Based on this review, a conceptual model is developed that considers human neurophysiological data as one of the active inputs of spatial production. The proposed model describes a process in which neurophysiological data are collected, processed, transformed into meaningful indicators of human states, translated into design parameters, and spatialized through generative systems within hybrid environments. Within this framework, data obtained from users are treated not merely as analytical outputs but as design inputs capable of influencing lighting conditions, soundscapes, audiovisual atmospheres, and spatial behaviors. Consequently, a continuous neurofeedback loop can be established between humans and space, allowing spatial environments to transform synchronously in response to user data. As a result, the study proposes reconsidering space not as a fixed object but as a dynamic system that is informed by human data, evolves together with its users, and interacts with cognitive states. In this sense, neurogenerative architecture offers a conceptual framework that establishes a new relationship between human experience and computational design processes.

Keywords: Neurogenerative Architecture, Neuroarchitecture, Generative Design, Brain-Computer Interface (BCI), Neurofeedback.

1. Giriş

Mekân, insanı yalnızca barındıran fiziksel bir çevre değil; algıyı, duygulanımı ve bilişi etkileyerek deneyimi örgütleyen etkin bir bağlamdır. İnsan yaşamı boyunca farklı mekânsal durumların dikkatini, düşünme biçimini ve yaratıcı potansiyelini dönüştürebildiğini deneyimler. Bir mekânın içinde bulunmak, onun tarafından çevrenmek ya da uzak bir manzaraya yönelmek gibi durumlar bilişsel ve duygusal süreçleri farklı biçimlerde etkileyebilir. Bu nedenle mekân, pasif bir zemin olmanın ötesinde deneyimin oluşumuna katılan aktif bir ortam olarak düşünülebilir. Buna karşın, mimarlık disiplini uzun süre mekânı çoğunlukla statik bir fiziksel kabuk olarak ele almıştır. İnsan-mekân ilişkisi çoğu zaman işlev, ergonomi ve biçim üzerinden değerlendirilmiş; algı, duygu ve bilinç gibi boyutlar ikinci planda kalmıştır.

Son yıllarda nörogörüntüleme yöntemlerinin gelişmesiyle birlikte mimari çevrenin insan üzerindeki etkisi yeni ölçüm teknikleri aracılığıyla incelenmeye başlanmıştır. EEG (*electroencephalography*), fNIRS (*functional near-infrared spectroscopy*), fMRI (*functional magnetic resonance imaging*), kortizol seviyesi, kalp ritmi ve deri iletkenliği gibi biyometrik ölçümler mimari çevrenin bilişsel ve duygusal etkilerinin izlenmesini mümkün kılmıştır (Karakas & Yıldız, 2020; Djebbara vd., 2022). Bu gelişmeler mimarlık ile nörobilim arasında disiplinlerarası bir araştırma alanı olarak nöromimarlığın ortaya çıkmasına zemin hazırlamıştır (Eberhard, 2009; Mallgrave, 2010; Arbib, 2012). Bununla birlikte, nöromimarlık araştırmalarının büyük bölümü insan ve çevre arasındaki ilişkinin analizine odaklanmaktadır (Ji vd., 2024; Taherysayah vd., 2025). Bu çalışmalar çoğunlukla mevcut mekânın insan üzerindeki etkisini ölçmekte; ancak insan deneyimini doğrudan tasarım sürecinin üretken bir girdisi hâline getirmemektedir. Bu nedenle veri üretimi ile tasarım pratiği arasındaki ilişki çoğu zaman dolaylı ve sınırlı kalmaktadır.

Öte yandan, 20. yüzyılın ikinci yarısından itibaren tasarım alanında yaygınlaşan üretken tasarım (*generative design*) yaklaşımları, algoritmik ve parametrik sistemler aracılığıyla tasarım alternatifleri üreten hesaplamalı yöntemler olarak tanımlanmaktadır (Alexander, 1964; Negroponte, 1970; Singh & Gu, 2012). Bu yaklaşımlar, tasarım kararlarının belirli parametreler ve kurallar doğrultusunda üretilebilmesini mümkün kılmaktadır. Ancak bu sistemlerde tasarım girdileri çoğunlukla performans kriterleri üzerinden tanımlanmakta, insan deneyimi ve bilişsel tepki genellikle üretim sürecinin dışında kalmaktadır. Bunun sonucu olarak mimarlık alanında geliştirilen pek çok üretim modeli mekânsal üretimi, ağırlıklı olarak hesaplama ve aşağıdan yukarı (*bottom-up*) sistem mantığı üzerinden ele almaktadır. Bu yaklaşım, öznel deneyimin taşıdığı anlam üretimi ve yatay ilişkilere dağılan algısal çeşitliliği çoğu zaman ihmal etmektedir. Oysa mimarlık yalnızca yapısal bir kurgu değil, aynı zamanda deneyim ve anlam üretimidir.

Bu bağlamda mimarlık alanında önemli bir kuramsal boşluk ortaya çıkmaktadır: insanın nörofizyolojik verisini doğrudan tasarım sürecinin üretken bir girdisi olarak ele alan bütünlük bir kavramsal çerçeve henüz yeterince geliştirilmemiştir. Bununla birlikte, mimarlıkta süregelen nörobilimsel araştırmalar çoğunlukla insan-mekân ilişkisinin etkilerini analiz etmeye ya da üretken tasarım prensiplerinde öznel deneyimi göz ardı ederek mekanik olarak tarif edilebilecek hesaplamalı üretim sistemlerine odaklanmaktadır. Ancak biliş ve duygu durumlarının mekânsal üretim süreçlerine üretken girdiler olarak doğrudan dahil edildiği bütünlük bir yaklaşım sınırlı kalmaktadır.

Bu çalışma söz konusu boşluğa yanıt olarak nörogeneratif (*neurogenerative*) mimarlık kavramını tartışmaya açmaktadır. Nörogeneratif mimarlık, nöromimarlığın analitik birikimi ile üretken tasarım yaklaşımlarını bir araya getiren bir tasarım anlayışı olarak tanımlanmaktadır. Bu yaklaşımda insanın nörofizyolojik verisi mekânsal üretimin aktif girdilerinden biri hâline gelmekte; insan ile mekân arasında yalnızca doğrusal bir veri aktarımı değil, karşılıklı geri beslemeye dayalı dinamik ve devingen bir etkileşim kurulmaktadır.

Bu yaklaşımın temel hedefi, mekânın insanın algısal, bilişsel ve duygusal durumlarıyla birlikte biçimlenebileceği bir model önermektir. Bu çerçevenin tartışılabilmesi için, insanın nörofizyolojik verileri doğrultusunda dönüşmesi öngörülen mekânın ölçeğinin sınırlandırılması gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında önerilen model, kullanıcının mekânsal oluşum sürecine doğrudan katılabildiği etkileşimli ortamlar üzerinden ele alınmaktadır. Fiziksel mekânın mevcut teknik kısıtları göz önünde bulundurulduğunda, bu yaklaşımın ilk uygulamalarının hibrit ortamlarda geliştirilmesi öngörülmektedir.

2. Yöntem

Bu araştırma kavramsal ve kuramsal bir çalışma olarak kurgulanmıştır. Çalışma kapsamında, nöromimarlık ve üretken tasarım alanlarının kesişiminde yer alan çalışmalar üzerine bir literatür incelemesi gerçekleştirilmiş ve ardından bu iki çalışma alanını birleştirmeyi hedefleyen nörogeneratif mimarlık kavramı önerilmiştir.

Literatür incelmesinde, özellikle “beyin-bilgisayar arayüzü” (brain-computer interface; BCI), “EEG tabanlı tasarım” (EEG-based design), “gerçek zamanlı EEG veri dönüşümü” (real-time EEG data translation), “nöroadaptif tasarım” (neuroadaptive design), “nörotepkisel tasarım” (neuroresponsive design) ve “üretken tasarım” (generative design) gibi kavramsal kümeler ele alınarak insan nörofizyolojik verilerinin mimari tasarım süreçlerinde nasıl kullanıldığı incelenmiştir. Bu çalışmalar, insan nörofizyolojik verilerinin mimari tasarım süreçlerinde nasıl kullanıldığı, tasarım kararlarına nasıl dönüştürüldüğü ve mekânsal üretim süreçlerindeki rolleri açısından karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Bu değerlendirme sonucunda, insan verisini mekânsal üretimin aktif girdilerinden biri olarak ele alan nörogeneratif mimarlık kavramsal çerçevesi geliştirilmiştir. Önerilen çerçeve, nörofizyolojik verilerin veri toplama, yorumlama, tasarım parametrelerine dönüştürme ve mekânsal üretim aşamalarından geçerek üretken bir tasarım mekanizmasına nasıl dönüştürülebileceğini açıklamayı amaçlamaktadır.

3. Literatür Araştırması

Son yıllarda mimarlık ve tasarım alanında EEG verilerinin tasarım süreçlerine entegrasyonu üzerine giderek artan sayıda çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmaların önemli bir bölümü, insanın bilişsel ve duygusal tepkilerini tasarım süreçlerine dahil etmeyi amaçlamaktadır. **Tablo 1**'de bu alanda geliştirilen bazı temsili çalışmalar ve kullanılan yöntemler özetlenmektedir.

Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde EEG ve beyin-bilgisayar arayüzü (BCI) teknolojilerinin tasarım süreçlerinde eşzamanlı kontrol ya da değerlendirme aracı olarak kullanılmaya başlandığı görülmektedir. Bu çalışmalar teknik açıdan önemli ilerlemeler sunmakla birlikte, literatür üç temel sınırlılığa işaret etmektedir:

- İlk olarak kavramsal bir çerçevenin eksikliği dikkat çekmektedir.
- İkinci sınırlılık, çalışmaların büyük oranda dijital ortamda/laboratuvarlarda gerçekleştirilmesidir. Bu nedenle insan ile fiziksel mekân arasında sürekli bir geri besleme döngüsü kuran sistemler sınırlı düzeyde kalmaktadır.
- Üçüncü olarak ise gerçek zamanlı geri besleme mekanizmaları çoğu çalışmada yeterince gelişmemiştir. Bu nedenle insan çoğu zaman mekânsal tasarım sürecine doğrudan katılan bir aktör değil, dolaylı bir tasarım parametresi olarak ele alınmaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışmalar sonucunda üretilen mekânsal tasarımların kullanıcı üzerindeki etkileri henüz yeterince ortaya konulamamaktadır. Bu durum, mevcut teknik imkânlar ile kavramsal vizyon arasında belirgin bir boşluğa işaret etmektedir.

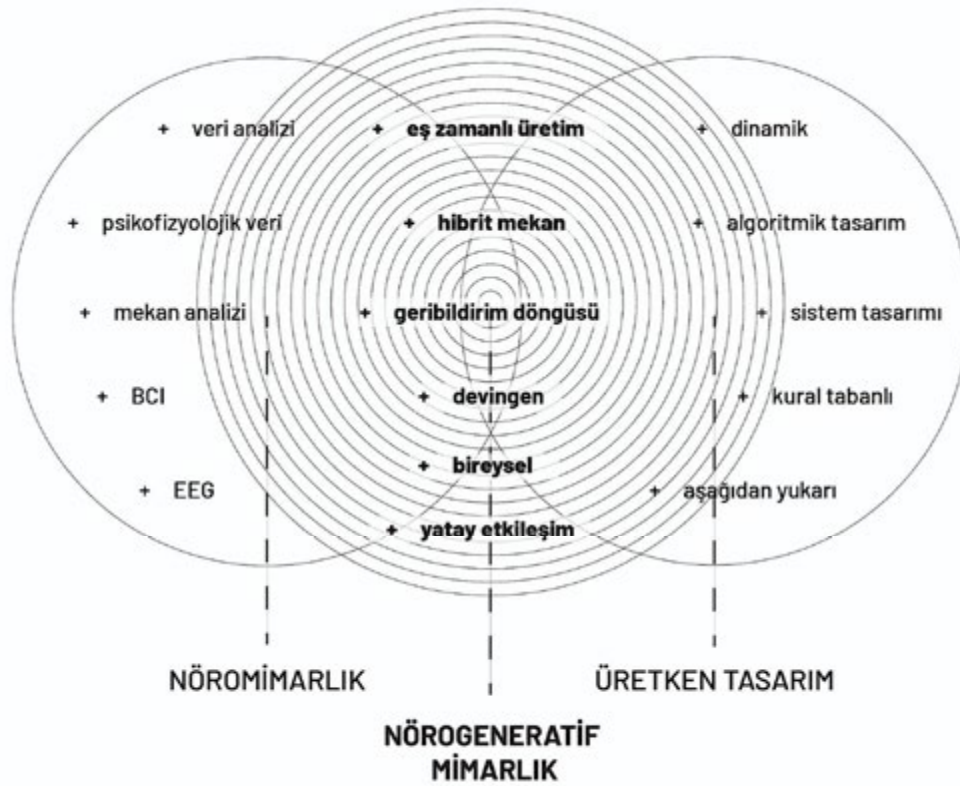
Tablo 1: Nöromimarlık ve Üretken Tasarım arakesitinde konumlanan çalışmalar.

ÇALIŞMA	■ BCI ROLÜ ■ KULLANILAN YÖNTEM ■ ÇALIŞMANIN AMACI	PROJE ÇIKTISI
BCI Generative Design Framework (Guo et al., 2024)	■ Eş zamanlı tasarım aracı ■ BCI + Üretken Algoritmalar ■ EEG sinyallerinin, bilgisayar arayüzünde, üretken tasarım sistemine bağlanması ve tasarımı optimize etmesi	
MindSculpt (Yang et al., 2021)	■ Eş zamanlı tasarım aracı ■ BCI (EEG) + CAD ■ EEG sinyalleri ile zihinsel olarak düşünülen geometrilerin, bilgisayar arayüzünde, doğrudan üretilmesi ■ Düşünceden -> dijital modele doğrudan geçiş	
Mindful Manifestation (Nguyen et al., 2019)	■ Eş zamanlı tasarım aracı ■ EEG + VR + Canlı Akış ■ EEG verisinin, VR ortamında parametrik form manipülasyonunda kullanılması	
Mental-Gen (Liu & Wang, 2024)	■ Eş zamanlı tasarım aracı ■ BCI + Üretken YZ ■ EEG sinyallerinin, bilgisayar arayüzünde, iç mekan tercihlerinin tasarım komutlarına çevrilmesi	
Encoding Shape Features with (Nguyen et al., 2019)	■ Eş zamanlı tasarım aracı ■ ERP (visual event-related potentials) ■ Kullanıcının farklı form seçeneklerine verdiği sinirsel tepkileri ölçülerek tasarım sisteminde form özelliklerinin seçilmesi	
Construction 5.0 (Almusaed et al., 2024)	■ Adaptif mekânsal sistem (Neuro-adaptive environments) ■ BCI + BIM + İnşaat 5.0 ■ İnsan biyometrik verileri kullanılarak yapı çevre davranışının adaptif biçimde yönlendirilmesi	
The Co-Created City (Tenea et al., 2025)	■ Tasarım değerlendirme aracı ■ EEG tabanlı kullanıcı deneyimi analizi ■ Farklı mekânsal senaryolara verilen nörofizyolojik tepkiler ölçülerek tasarım alternatiflerinin değerlendirilmesi	

4. Yeni Kavram Önerisi: NöroGeneratif Mimarlık

Bu çalışma, nöromimarlığın analitik birikimi ile üretken tasarım yaklaşımlarını bir araya getiren yeni bir kavramsal çerçeve olarak nörogeneratif mimarlık (neurogenerative architecture) yaklaşımını önermektedir. Bu yaklaşımda insan, tasarım sürecinin aktif bileşenlerinden biri olarak konumlandırılmaktadır (**Şekil 1**).

Nöromimarlık, temel olarak mekânın insan üzerindeki bilişsel ve duygusal etkilerini araştırırken (Eberhard, 2009), üretken tasarım mekânın algoritmik ve parametrik sistemler aracılığıyla nasıl üretilebileceğine odaklanmaktadır (Singh & Gu, 2012). Nörogeneratif mimarlık ise bu iki yaklaşımı bir araya getirerek insan verisinin mekânsal üretim süreçlerine doğrudan dahil edildiği bir tasarım paradigması önermektedir. Bu çerçevede temel soru şu şekilde formüle edilebilir: İnsan mekânı nasıl üretir ve mekân insanı nasıl dönüştürür? Bu soru, insanı tasarım sürecinde hem veri kaynağı hem de dönüşümün öznesi olarak yeniden konumlandırmaktadır.



Şekil 1: Nörogeneratif mimarlığın kavramsal çerçevesi.

Bu yaklaşımda mekân, sabit bir form olarak değil; kullanıcının bilişsel ve duygusal durumlarına göre şekillenebilen devingen bir sistem olarak ele alınmaktadır. EEG başta olmak üzere beyin-bilgisayar arayüzü (BCI) teknolojileri aracılığıyla elde edilen nörofizyolojik veriler, yalnızca dijital ortamda mekânsal tasarım ve değerlendirmesi için değil, fiziksel ortamda da mekânsal üretimi yönlendiren üretken sistemlere de girdi olarak aktarılabilir. Böylece mekân, kurulan bu sistemde yalnızca tasarım aşamasında düşünceyle biçimlenen bir nesne olmaktan çıkar; gerçek zamanlı veri akışlarıyla dönüşebilen hibrit ve adaptif bir sistem hâline gelir. Bu durumda veri, yalnızca analiz edilen bir çıktı değil, eşzamanlı olarak mekânsal üretimin aktif girdilerinden biri olarak işlev görmektedir.

Nörogeneratif mimarlık yaklaşımında tasarım süreci, insan verisi ile üretken sistemler arasında kurulan karşılıklı bir etkileşime dayanır. Bu ilişki tek yönlü ve doğrusal bir veri aktarımından ziyade yatay etkileşimli bir üretim döngüsü olarak düşünülmelidir. Kullanıcının bilişsel veya duygusal

durumuna ilişkin veriler üretken tasarım sistemlerini yönlendirebilir; buna karşılık eşzamanlı olarak deneyimlenen mekânsal ortam kullanıcıya geri bildirim sağlayabilir. Bu süreçte mekânsal biçimlenme ya da davranış parametreleri (fiziksel kabuk; aydınlatma, ses, görsel atmosfer; mekânsal organizasyon gibi parametreler) kullanıcı verisine bağlı olarak değişebilir.

4.1. Kavramsal Model Önerisi

Nörofizyolojik verilerin mekânsal üretime aktarılması süreci aşağıdaki gibi açıklanabilir (**Şekil 2**):



Şekil 2: Nörogeneratif sistem iş akış diyagramı.

İlk aşamada, EEG, kalp atım hızı (HR), deri iletkenliği (GSR) ve benzeri biyometrik veriler kullanıcıdan gerçek zamanlı olarak toplanmaktadır. Bu veriler EEG başlıkları, giyilebilir sensörler ve benzeri ölçüm cihazları aracılığıyla elde edilmekte ve kullanıcının anlık bilişsel ve fizyolojik durumuna ilişkin ham veri setlerini oluşturmaktadır. Ardından, elde edilen ham veriler ön işleme adımlarından geçirilerek analiz edilmektedir. Bu analiz sürecinde kullanıcının duygusal ve bilişsel durumunu yorumlamaya yönelik çeşitli yöntemlerden yararlanılabilir. Böylece nörofizyolojik ölçümler, tasarım sürecinde kullanılabilecek anlamlı insan durumu değişkenlerine dönüştürülebilir.

Sonraki aşamada, elde edilen bu göstergeler üretken tasarım sistemlerine parametre olarak aktarılmaktadır. Böylece nörofizyolojik durum değişkenleri; ışık yoğunluğu, renk sıcaklığı, ses karakteri, görsel-işitsel atmosfer ve yoğunluk gibi tasarım parametreleriyle ilişkilendirilebilmektedir. Parametrik modeller, algoritmik sistemler veya yapay zekâ destekli üretken tasarım araçları aracılığıyla bu parametreler sürekli olarak yeniden hesaplanmakta ve eşzamanlı olarak

güncellenmektedir. Bu aşama, insan verilerinin tasarım kararlarına dönüştürüldüğü temel hesaplamalı katmanı oluşturmaktadır. Kritik olan nokta, nörofizyolojik verilerin tasarım değişkenleri aracılığıyla mekânsal davranışları yönlendirmesidir. Veriler; ışık yoğunluğunun artması, ses katmanlarının çoğalması veya mekânsal yoğunluğun değişmesi gibi tasarım kararlarıyla ilişkilendirilebilir. Böylece insan durum göstergeleri ile mekânsal davranışlar arasında kural tabanlı veya öğrenen sistemler aracılığıyla çalışan bir tasarım çeviri katmanı kurulmaktadır.

Ardından, üretken sistem tarafından oluşturulan tasarım kararları hibrit bir mekânsal ortama aktarılmaktadır. Bu ortam; projeksiyon sistemleri, ışık, ses, dijital görsel katmanlar veya fiziksel mekânsal elemanlar aracılığıyla kurgulanabilir. *Soft robotik*, kinetik sistemler veya akıllı malzemeler gibi teknolojiler kullanılarak fiziksel mekânın da gerçek zamanlı olarak dönüşmesi sağlanabilir.

Son aşama, insan ile mekân arasındaki etkileşime odaklanmaktadır. Kullanıcıdan elde edilen nörofizyolojik veriler mekânsal atmosferi oluşturan bileşenlere dönüşmekte, değişen mekânsal koşullar ise kullanıcı üzerinde yeni bilişsel ve duygusal tepkiler üretmektedir. Böylece insan ve mekân arasında sürekli çalışan karşılıklı bir etkileşim döngüsü oluşmaktadır.

Bu karşılıklı etkileşim modeli, nörogeribildirim (*neurofeedback*) mantığıyla çalışan bir mekanizmanın kurulmasına olanak tanımaktadır. Nörogeribildirim yaklaşımı, bireyin beyin aktivitesine ilişkin sinyallerin gerçek zamanlı olarak algılanması ve bu sinyallere karşılık gelen geri bildirimler aracılığıyla bilişsel süreçlerin düzenlenebileceğini ortaya koyan çalışmalarla geliştirilmiştir (Kamiya, 1969). Bu bağlamda mekân yalnızca insan verisine tepki veren bir ortam değil, aynı zamanda kullanıcı deneyimini etkileyerek yeni verilerin oluşmasına katkı sağlayan aktif bir bileşen hâline gelmektedir. İnsan ve mekân arasında kurulan bu sürekli veri alışverişi, doğrusal bir etkileşimden ziyade devingen ve geri beslemeli bir ilişki ağı oluşturmaktadır.

Bu çerçevede nörogeneratif mimarlıkta mekân; insan verilerinden beslenen, kullanıcıyla birlikte eşzamanlı olarak dönüşen ve bilişsel durumlarla etkileşim kurabilen dinamik bir sistem olarak ele alınmaktadır. Böylece mimari tasarım, yalnızca önceden tanımlanmış bir form üretme pratiği olmaktan çıkarak, insan ve mekân arasında kurulan canlı, uyarlanabilir ve üretken bir ilişki süreci olarak yeniden düşünülmektedir.

5. Sonuç ve Gelecek Çalışmalar

Bu çalışma, nöromimarlık ile üretken tasarım alanlarının kesişiminde nörogeneratif mimarlık kavramını tartışmaya açmaktadır. Önerilen yaklaşım, insanın nörofizyolojik verilerinin yalnızca analiz edilen ölçümler olarak değil, mekânsal üretimin aktif girdilerinden biri olarak ele alınabileceğini ileri sürmektedir. Bu perspektif, mimari tasarım sürecini insan ile mekân arasında kurulan dinamik bir veri ilişkisi olarak yeniden düşünmeyi mümkün kılmaktadır.

Gelecek çalışmalar açısından önemli araştırma yönlerinden biri, bu yaklaşımın *genişletilmiş zihin* (*extended mind*) kuramı ile ilişkilendirilmesidir. Clark ve Chalmers'ın (1998) ortaya koyduğu bu kurama göre biliş yalnızca beyin içinde gerçekleşmez; bireyin çevresiyle kurduğu ilişkiler de bilişsel sistemin bir parçası hâline gelebilir. Bu perspektif, mekânın yalnızca deneyimlenen bir çevre değil, insan bilişinin uzantısı olarak ele alınabileceğini düşündürmektedir. Nörogeneratif mimarlık bağlamında bu yaklaşım, mekân ile biliş arasındaki etkileşimi daha geniş bir teorik çerçevede değerlendirme potansiyeli taşımaktadır.

Bu yaklaşımın metodolojik olarak ele alınabilmesi açısından Daniel Dennett'in *heterofenomenoloji* yaklaşımı da açıklayıcı bir çerçeve sunmaktadır. Dennett (1991) öznel deneyimin bütünüyle dışlanması yerine bireylerin deneyim anlatılarının sistemli biçimde toplanmasını ve karşılaştırılmasını önermektedir. Bu yaklaşım, çok katmanlı veri modellerine dayalı mekanların geliştirilmesine katkı sağlayabilir. Böylece nörogeneratif mekânsal sistemlerin bireysel bilişten kolektif bilişe doğru nasıl genişleyebileceği tartışılabilir. Çok kullanıcıli ortamlarda farklı bireylerden elde edilen nörofizyolojik

verilerin bir araya gelmesi, kolektif duygulanım ve dikkat örüntülerinin mekânsal tasarım süreçlerine dahil edilmesine olanak tanıyabilir. Bu durum, mekânın yalnızca bireysel deneyime değil, grup davranışlarına ve ortak bilişsel durumlara tepki verebilen adaptif sistemler olarak tasarlanmasına yönelik yeni araştırma yönleri açabilir.

Bu doğrultuda nörogeneratif mimarlık, mekânı sabit bir nesne olarak değil, insan ile karşılıklı etkileşim içinde sürekli üreyen dinamik bir ilişki süreci olarak yeniden düşünmeye yönelik kavramsal bir çerçeve sunmaktadır.

KAYNAKLAR

- Alexander, C. (1964). *Notes on the synthesis of form*. Harvard University Press.
- Almusaed, A., Yitmen, I., Almssad, A., & Myhren, J. A. (2024). Construction 5.0 and sustainable neuro-responsive habitats: Integrating the brain-computer interface and building information modeling in smart residential spaces. *Sustainability*, 16, 9393. <https://doi.org/10.3390/su16219393>
- Arbib, M. A. (Ed.). (2012). *Neuroscience for architecture: Seeking common ground*. MIT Press.
- Clark, A., & Chalmers, D. (1998). The extended mind. *Analysis*, 58(1), 7–19. <https://doi.org/10.1111/1467-8284.00096>
- Cutellic, P. (2019). Towards encoding shape features with visual event-related potential-based brain-computer interface for generative design. *International Journal of Architectural Computing*, 17(1), 88–102. <https://doi.org/10.1177/1478077119832465>
- Dennett, D. C. (1991). *Consciousness explained*. Little, Brown and Company.
- Djebbara, Z., Fich, L. B., Petrini, L., & Gramann, K. (2022). Sensorimotor brain dynamics reflect architectural affordances. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(15), e2112695119. <https://doi.org/10.1073/pnas.1900648116>
- Eberhard, J. P. (2009). *Brain landscape: The coexistence of neuroscience and architecture*. Oxford University Press.
- Guo, Z., Zhang, Z., Li, Z., Hu, Y., Qian, Y., Cheng, N., & Yuan, P. F. (2024). Brain-computer interface based generative design framework: An empirical multi-domain application exploration based on human-factors and form-generation interactive mechanisms. *Architectural Intelligence*, 3, 3. <https://doi.org/10.1007/s44223-024-00047-2>
- Ji, S.-Y., Kim, M.-K., & Jun, H.-J. (2025). Emotion analysis AI model for sensing architecture using EEG. *Applied Sciences*, 15(5), 2742. <https://doi.org/10.3390/app15052742>
- Kamiya, J. (1969). Operant control of the EEG alpha rhythm and some of its reported effects on consciousness. In C. T. Tart (Ed.), *Altered states of consciousness* (pp. 507–517). Wiley.
- Karakaş, T., & Yıldız, D. (2020). Exploring the influence of the built environment on human experience through a neuroscience approach: A systematic review. *Frontiers of Architectural Research*, 9(2), 236–247. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2019.10.005>
- Liu, Y., & Wang, H. (2024). Mental-Gen: A brain-computer interface-based interactive method for interior space generative design. *Automation in Construction*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.00962>
- Mallgrave, H. F. (2010). *The architect's brain: Neuroscience, creativity, and architecture*. Wiley-Blackwell.
- Negroponte, N. (1970). *The architecture machine*. MIT Press.
- Nguyen, D., Moleta, T. J., & Schnabel, M. A. (2019). Mindful manifestation: A method for designing architectural forms using brain activities. In M. Haeusler, M. A. Schnabel, & T. Fukuda (Eds.), *Intelligent & informed: Proceedings of the 24th CAADRIA Conference* (pp. 485–494). Victoria University of Wellington. <https://doi.org/10.52842/conf.caadria.2019.1.485>
- 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>
- Taherysayah, F., Westermann, C., & Liang, H.-N. (2025). Learning from neuroscience: Integrating users in design processes using brain imaging tools and virtual reality. *Intelligent Buildings International*, 17(1), 13–27. <https://doi.org/10.1080/17508975.2025.2479095>
- Tenea, S.-A., Berceanu, A., Nisioi, S., Robu-Movila, A., Pistol, C., & Burloiu, G. (2025). The co-created city: Neuroadaptive design for healthy environments. *International Journal of Architectural Computing*. <https://doi.org/10.1080/17508975.2025.2542804>
- Yang, Q., Cruz-Garza, J. G., & Kalantari, S. (2021). MindSculpt: Using a brain-computer interface to enable designers to create diverse geometries by thinking. In B. Bogosian, K. Dörfler, B. Farahi, J. García del

NöroGeneratif Mimarlık: İnsan Verisine Dayalı Mekânsal Üretim İçin Kavramsal Bir Çerçeve | Uçkan, B.; Atukeren, A.; Özmutlu, B.; Dağ, A.; Aydoğdu, T.; Pektetik, U.; Gün, A.; Gürer, E.; Karakaş, T.

Castillo y López, J. Grant, V. Noel, S. Parascho, & J. Scott (Eds.), *ACADIA 2021: Realignments – Toward Critical Computation. Proceedings of the 41st Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture* (pp. 182–193). ACADIA. <https://doi.org/10.52842/conf.acadia.2021.182>

MSTAS 26 “KAPSAM DIŞI”

XX. MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM ULUSAL SEMPOZYUMU

OTURUM 2

BİM, ENTEGRE TASARIM SÜREÇLERİ
ve SAYISAL İŞ AKIŞLARI

Integrating BIM and Real-Time Daylight Visualization in Architectural Design: A Method Using Revit and Unreal Engine

Ibrahim Juba ¹ ; Serbürent Vural ² 

^{1 2}Karadeniz Technical University

¹ibraheemabd2014@gmail.com; ²svural@ktu.edu.tr

Abstract

Architectural decision-making is increasingly supported by three-dimensional visualization systems and game engines such as Unreal Engine 5 (UE5). This study explores a workflow that links a Building Information Modeling (BIM) platform with a real-time visualization environment to investigate daylight behavior and solar movement within interior architectural spaces. The study proposes a methodological approach that integrates Revit as a BIM-based modeling tool with UE5 as an interactive real-time visualization environment to support early-stage architectural decision-making and spatial understanding. While specialized environmental simulation software provides accurate daylight and solar analysis, these tools often require long processing times and do not offer an interactive experience that allows designers and users to freely explore architectural spaces during the evaluation process. The proposed workflow begins with developing the architectural model in Revit, then the model transferred to UE5, where the Sun & Sky system is used to explore daylight behavior through immersive real-time visualization. In addition, an interactive control interface was developed using UE5's visual scripting system Blueprints (BP), allowing users to dynamically adjust and observe daylight changes throughout a full 24-hour cycle while freely navigating the three-dimensional environment. Two case studies were comparatively examined across the Revit and UE5 environments, in relation to real-world conditions, to evaluate the consistency of solar representation between both platforms. The study demonstrates the potential of real-time visualization environments as integrated design tools that combine solar representation, spatial perception, and interactive daylight exploration within early-stage architectural design processes. Although the proposed framework does not replace specialized environmental simulation tools, it demonstrates the potential of real-time visualization environments as integrated exploratory design tools that combine solar representation, spatial perception, and interactive daylight exploration within early-stage architectural design processes. In addition, the framework opens possibilities for future developments, including real-time artificial lighting integration, daylight mapping systems, responsive façade evaluation, adaptive shading strategies, and user-based spatial perception studies.

Keywords: Real-Time Daylight visualization, Architectural Decision-Making, Game Engine in Architecture, Interactive Visualization.

Mimari Tasarımda BIM ve Gerçek Zamanlı Günişığı Görselleştirmesinin Entegrasyonu: Revit ve Unreal Engine Kullanılarak Geliştirilen Bir Yöntem

Ibrahim Juba ¹ ; Serbülent Vural ² 

^{1 2}Karadeniz Teknik Üniversitesi

¹ibraheemabd2014@gmail.com; ²svural@ktu.edu.tr

Özet

Mimari karar verme süreçleri, üç boyutlu görselleştirme sistemleri ve Unreal Engine 5 (UE5) gibi oyun motorlarının kullanımıyla giderek daha fazla desteklenmektedir. Bu çalışma, iç mekânlarda gün ışığı davranışı ve güneş hareketlerini incelemek amacıyla Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) tabanlı bir platform ile gerçek zamanlı görselleştirme ortamını bir araya getiren bir iş akışını araştırmaktadır. Çalışma, erken tasarım aşamalarında mimari karar verme süreçlerini ve mekânsal algıyı desteklemek amacıyla Revit'i BIM tabanlı modelleme aracı, UE5'i ise etkileşimli gerçek zamanlı görselleştirme ortamı olarak bütünleştiren metodolojik bir yaklaşım önermektedir. Uzmanlaşmış çevresel simülasyon yazılımları gün ışığı ve güneş analizlerinde yüksek doğruluk sağlasa da, bu araçlar çoğu zaman uzun işlem süreleri gerektirmekte ve tasarımcıların veya kullanıcıların değerlendirme süreci sırasında mimari mekânları serbestçe deneyimleyebileceği etkileşimli bir ortam sunmamaktadır. Önerilen iş akışı, mimari modelin Revit ortamında oluşturulmasıyla başlamakta, ardından model UE5'e aktarılmakta ve burada Sun & Sky sistemi kullanılarak gün ışığı davranışı gerçek zamanlı ve sürükleyici bir görselleştirme ortamında incelenmektedir. Ayrıca, UE5'in görsel programlama sistemi olan Blueprints (BP) kullanılarak etkileşimli bir kontrol arayüzü geliştirilmiş; böylece kullanıcıların üç boyutlu ortam içerisinde serbestçe dolaşırken gün ışığındaki değişimleri 24 saatlik bir zaman döngüsü boyunca dinamik olarak gözlemleyebilmeleri sağlanmıştır. Revit ve UE5 ortamlarında oluşturulan iki farklı örnek çalışma, gerçek çevre koşullarıyla karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve her iki platformun güneş temsiliindeki tutarlılığı değerlendirilmiştir. Bulgular, gerçek zamanlı görselleştirme ortamlarının güneş hareketlerinin temsili, mekânsal algı ve etkileşimli gün ışığı keşfini bir araya getiren bütünleşik tasarım araçları olarak önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Önerilen yaklaşım, uzmanlaşmış çevresel simülasyon yazılımlarının yerini almayı amaçlamamakla birlikte, erken tasarım aşamalarında keşif odaklı ve etkileşimli bir değerlendirme ortamı sunmaktadır. Ayrıca çalışma; gerçek zamanlı yapay aydınlatma entegrasyonu, gün ışığı haritalama sistemleri, duyarlı cephelerin değerlendirilmesi, uyarlanabilir gölgeleme stratejileri ve kullanıcı temelli mekânsal algı araştırmaları gibi gelecekteki çalışmalar için yeni araştırma olanakları ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Gerçek Zamanlı Gün Işığı Görselleştirmesi, Mimari Karar Verme, Mimarlıkta Oyun Motorları, Etkileşimli Görselleştirme.

1. Introduction

Daylight plays an important role in architectural design, not only in terms of energy efficiency and visual comfort, but also in shaping how users perceive and experience space. Therefore, many studies emphasize the importance of adopting a human-centered approach that focuses on the occupant's spatial experience and perception of light (Amundadottir et al., 2017; Parpairi et al., 2002; Rockcastle et al., 2017; Rockcastle & Andersen, 2014). Although daylight is considered one of the main elements influencing architectural design (Holl, 2012; Zumthor, 2006), there are still limited methods that can realistically represent the dynamic nature of daylight and user experience before construction, while studying daylight in real environments is difficult because of the many changing conditions such as weather and sky variations (Bulow-Hube, 1995; Newsham et al., 2010). Although daylight research has developed clear measures for human comfort and daylight energy performance, the impact of lighting conditions on user perception and experience is still not fully understood (Chamilothori et al., 2019).

Previous studies on daylight and solar simulation in architecture have primarily relied on environmental analysis tools such as Ecotect, Ladybug, and ClimateStudio, which provide accurate quantitative data for evaluating daylight performance and energy efficiency (Salah, 2025; Salah & Kayili, 2022). Recent advancements in computational and parametric simulation have enabled more dynamic approaches to environmental evaluation, supporting responsive architectural systems that adapt to changing climatic and solar conditions (Salah & Tuna Kayılı, 2026). Although these tools offer high precision, their workflows often separate environmental evaluation from the spatial and experiential perception of daylight within architectural spaces.

Real-time rendering engines have started to appear in architectural processes in recent years, but their application has remained mostly visualization rather than analytical (Juba, 2025). The methodological potential of real-time game engines as dynamic solar evaluation environments incorporated into early-stage architectural decision-making has not received much attention in this context.

Building Information Modeling (BIM) supports integrated architectural workflows through centralized digital models that improve coordination, information management, and design efficiency throughout the design process (Zhang et al., 2022). In addition, BIM enables designers to evaluate and optimize design decisions during the early stages of architectural development through integrated digital environments and analytical capabilities (Fan et al., 2023). In this context, real-time visualization environments that provide interactive spatial and environmental exploration can be integrated with BIM-based digital models.

3D visualization platforms and Game engines such as UE5 are increasingly used to support architectural decision-making (Özeren et al., 2024). As sunlight affects the perception of place, depth, texture, visual and thermal comfort, and the dynamic development of shadows and light contrast inside a space, it is widely recognized that natural light plays a vital role in developing spatial experience (Baker & Steemers, 2014). Real-time virtual environments allow users to better understand spatial proportions, lighting conditions, materials, and interior configurations before physical implementation (Juba & Özeren, 2024). While specialized environmental simulation software offers exact simulations for solar and daylight analysis, these tools frequently have long processing and simulating times (Salah, 2025) and don't provide an instant interactive experience that allows users or designers to move freely inside the space while the simulation is running.

Traditional daylight studies typically rely on predefined representations of certain moments of the day, which may prevent designers from perceiving small changes in light and shadow (Reinhart et al., 2006). A real-time interactive daylight visualization environment, on the other hand, makes it

possible to see daylight changes and offers a deeper understanding of how interior spaces respond to solar movement over time.

Although UE5 was originally developed for video game production, it has increasingly become a powerful tool in architecture and interior design (Juba, 2025; Susi, 2022). According to (Epic Games, 2024), UE5 provides powerful tools for architects and designers through its ability to integrate BIM and CAD workflows into immersive real-time environments. Features such as Datasmith Direct Link enable seamless transfer of models and associated data, while real-time rendering technologies, dynamic global illumination, and the Sun & Sky system support interactive exploration of daylight and spatial conditions within architectural scenes.

Also, UE5 includes the Blueprint (BP), which is a visual programming environment that enables the creation of interactive mechanics without requiring traditional coding knowledge, making it accessible to designers and non-programmers alike (Chu & Zaman, 2021; Valcasara, 2015). This BP can be used to create an interactive element with the user like changing material, changing design, or also changing the solar movement during the day like the one used in this study.

Therefore, this study proposes a methodological workflow that integrates a BIM platform with a real-time visualization engine to support interactive daylight and solar exploration, enabling designers to evaluate spatial and environmental changes dynamically during the early stages of architectural design. In this context, the study investigates the potential of using Autodesk Revit as a BIM-based platform and UE5 as a real-time environment for exploring daylight behavior and spatial experience within interior spaces. Rather than relying solely on static visualizations or predefined still images, the research examines how real-time visualization can improve the understanding of daylight changes and solar movement within interior spaces over day.

2. Materials and Method

2.1 Method

The study proposes redefining real-time rendering environments not only as visualization platforms but also as interactive tools for solar representation and its impact on architectural space.

The method is based on a workflow in which the architectural model is first developed in Revit and then transferred to UE5. Within UE5, the Sun & Sky system is used to represent solar movement, allowing for interactive exploration of daylight behavior within a three-dimensional environment. Also, in this study, a BP code was implemented to allow the user to explore the space in an interactive way.

To evaluate the reliability of this approach, the solar representation results obtained in UE5 are compared with those generated in Revit, which is considered a reference tool due to its established accuracy in representing solar behavior. Also, the results of the solar representation using Revit and UE5 were compared with reality under the same hours for the study case. This comparison helps assess whether the real-time interactive environment can provide visually consistent and dependable results for spatial daylight exploration. **Figure 1** showing the workflow for this study.

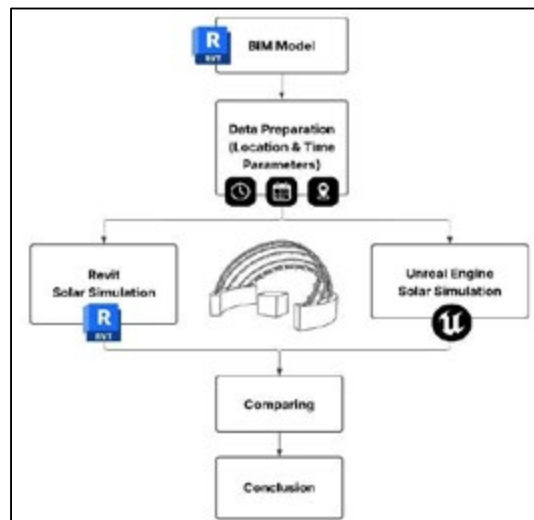


Figure 1: Overview of the proposed method.

This approach is particularly relevant for early-stage design, where rapid evaluation and spatial understanding are essential.

2.2 Case study

2.2.1 Trabzon, Turkey

The first selected case study is the Faculty of Architecture at Karadeniz Technical University, located in Trabzon, Türkiye **Figure 2**. The study specifically focuses on the main entrance area of the faculty building, particularly the southwest elevation of the entrance space, which experiences noticeable changes in daylight conditions during the day **Figure 3**.



Figure 2: The location of first case study (Google, 2026).

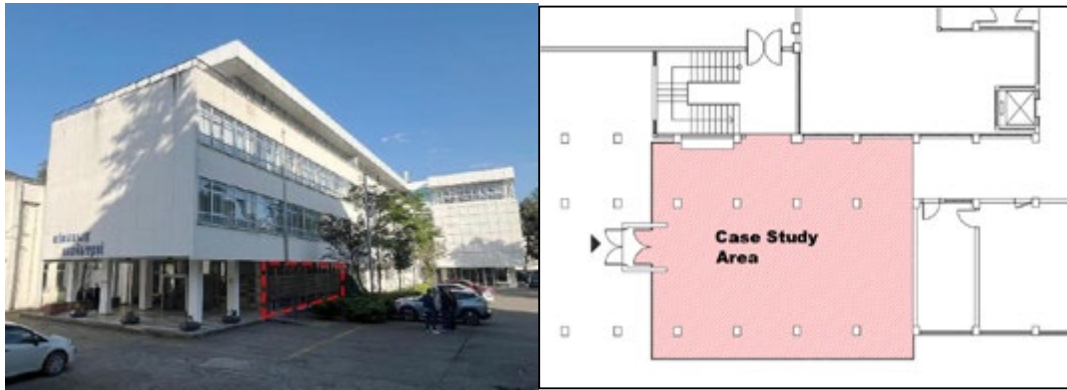


Figure 3: Left photo showing the building of the case study, the right photo showing the plan or area for case study.

2.2.2 Hebron, Palestine

To increase the reliability for this study, the second case study was selected in another place which is an office located on the sixth floor of an office building in Hebron, Palestine **Figure 4**. This additional sample was chosen from a different geographical context to further verify the validity of the proposed methodology and tool. The selected case study includes a window positioned on the eastern elevation **Figure 5**.



Figure 4: The location of the second case study (Google, 2026).



Figure 5: Left photo showing the building of the second case study, the right photo showing the plan.

2.3 Work development

The modeling process started in Autodesk Revit. After that the model was exported to UE5 for interactive real-time visualization, the exporting can be happen by exporting it as FBX file, or using Datasmith plugin. in UE5 the built-in Sun & Sky setting was used to have consistent solar representation **Figure 6**. To test the reliability of this system, the same geographic location and sun sitting of each case study was defined also in Revit in separately way to maintain consistent solar representation between both platforms.

In addition, a BP-based interactive interface was developed to allow users to dynamically control time parameters throughout a full 24-hour cycle **Figure 7**. This enabled real-time observation of changing sunlight, shadows, and daylight conditions within an interactive three-dimensional environment by the user for a selected date **Figure 8**.

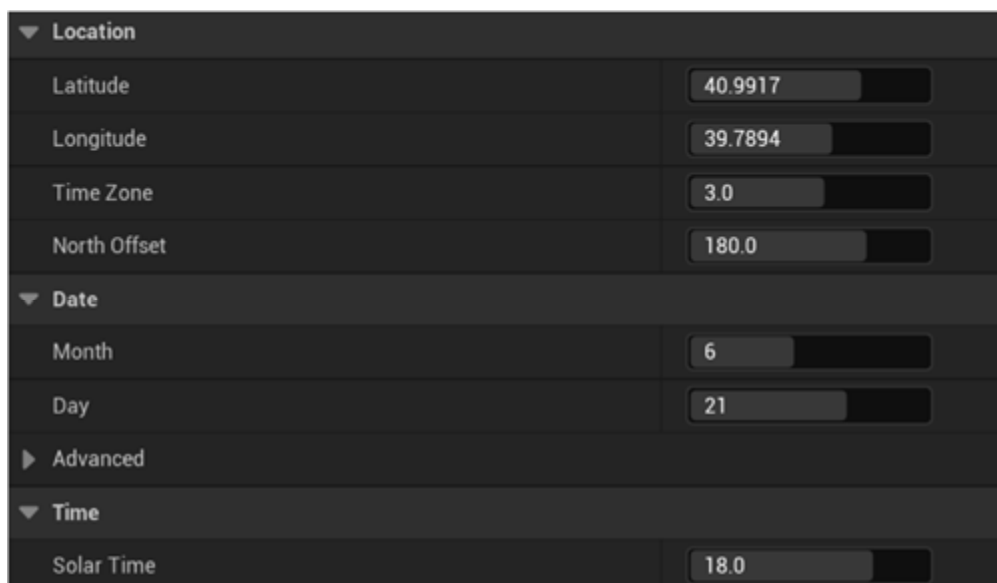


Figure 6: Sun sitting in UE5.

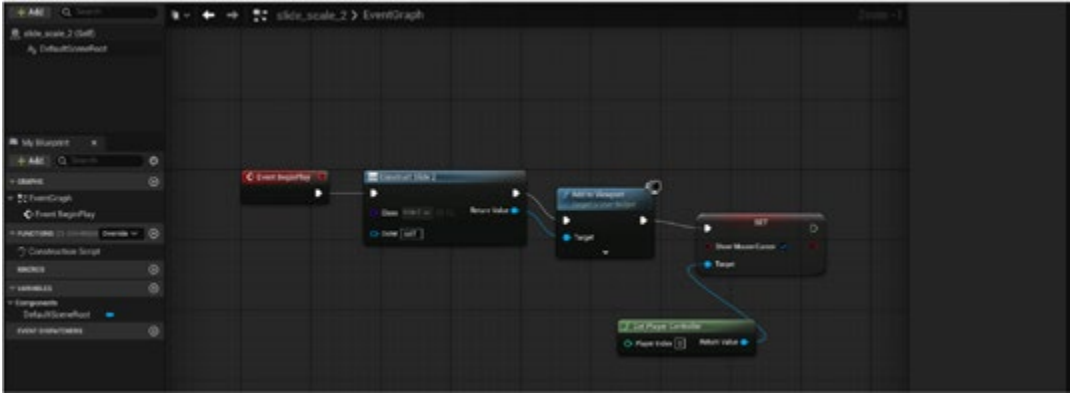


Figure 7: BP for changing sunlight.

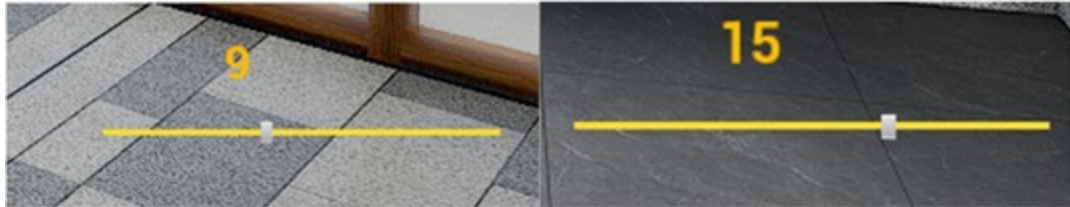


Figure 8: Sun slider to change the time by the user.

The significance of this approach lies in transforming the solar study from a static visualization process into an interactive experience. Instead of observing fixed scenarios, users can engage directly with the environment and explore how solar conditions change over time.

3. Application

After completing the project in the UE5 environment, a comparison table was created to evaluate the reliability of this method. The first table for the first case study **Table 1**, and the second for the second case study **Table 2**. The table includes a real photograph of the case study used as a reference for comparison at the same time setting. The comparison focuses primarily on the consistency of solar representation and daylight behavior rather than on rendering quality between the two platforms.

Table 1: Daylight and Solar Representation Results of the First Case Study at 12-05-2026

Real Photo	Revit	UE5
9:00		
11:00		
13:00		

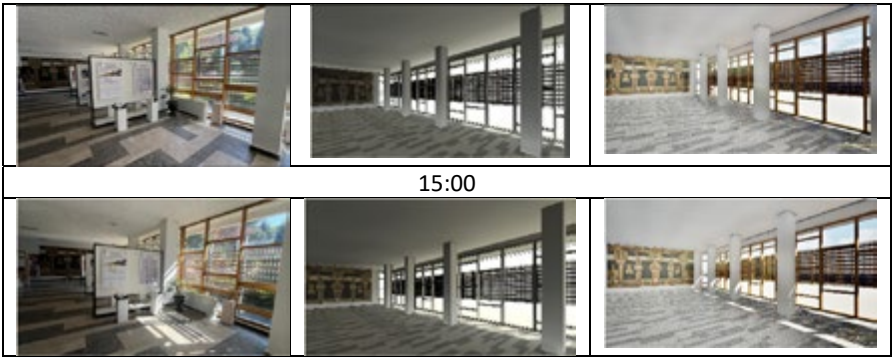


Table 2: Daylight and Solar Representation Results of the First Case Study at 10-05-2026

Real Photo	Revit	UE5
9:00		
11:00		
13:00		
15:00		

4. Findings and Conclusion

The findings show that the proposed method provides a flexible and interactive framework for exploring solar behavior within architectural spaces. By enabling real-time adjustment of temporal parameters, designers can efficiently test, compare, and refine multiple spatial configurations under varying solar conditions. This capability improves the responsiveness of early-stage design decision-making and supports a more informed evaluation of daylight conditions.

This approach enhances spatial understanding by allowing designers and users to freely navigate the architectural environment while observing real-time changes in solar angles, shadow projections, shading elements, and daylight distribution. As a result, daytime behavior can be explored from an experiential spatial perspective that is difficult to achieve through traditional modeling systems. The integration of solar representation with spatial exploration strengthens the relationship between daylight awareness and architectural design. The results indicate that real-time digital environments can function as interactive exploratory platforms that support design-oriented evaluation processes rather than relying solely on static visualization methods.

Furthermore, the method contributes to a clearer understanding of solar geometry and seasonal variation in relation to spatial form by presenting sunlight as a continuous and dynamic phenomenon over time.

To evaluate the consistency of the method, a comparative study was conducted between the solar representations in Autodesk Revit and UE5. The comparison showed a generally high level of consistency in shadow direction, daylight distribution, and overall solar behavior. However, minor differences were observed between the two environments in sun angle. Despite these variations, the results remain within an acceptable range, providing a sufficiently accurate approximation for real-time spatial exploration.

It is important to note that the interactive capabilities of UE5 offer additional value that extends beyond static comparison. The real-time adjustment of temporal parameters allows users to experience dynamic changes in sunlight, including variations in light color, intensity, and atmospheric effects, and their impact on spatial perception. This highlights the advantage of UE5 not only as a visualization tool but also as an experiential environment that enhances the understanding of daylight behavior within architectural spaces.

The reliability of the solar representation depends on the accuracy of input parameters, including location, date, time, and model configuration, as well as the surrounding environmental context such as nearby buildings or trees surrounding the site. For example, in the first case study, measurements could not be evaluated after 16:00 because adjacent buildings blocked direct sunlight from reaching the space. Although the study investigates the reliability, validity, and degree of agreement of the solar system in UE5 in comparison with Revit and real-world conditions, the strength of UE5 as a rendering engine provides a clear advantage in visualization, particularly in the representation of indirect lighting reflected on the space. While these aspects were not the primary focus of the study, they remain important and cannot be overlooked.

However, several limitations must be acknowledged. Changing the date within the system still requires manual adjustment by the designer, which may reduce workflow efficiency during repeated evaluations. In addition, the study primarily focuses on interactive visualization and experiential exploration rather than detailed quantitative daylight analysis. Furthermore, the proposed workflow was tested just on two of the case studies, and additional applications in different architectural and climatic contexts may offer more comprehensive validation.

Despite these limitations, the study establishes a foundation for further research. Future work may include the development of a more flexible interactive system that allows users to modify date and temporal parameters directly without requiring manual reconfiguration by the designer. Additional developments may involve the generation of daylight maps like those provided by advanced simulation software, also, trying to integrate artificial lighting systems alongside daylight representation in real time. The proposed workflow may also be extended to evaluate responsive façade systems and adaptive shading strategies under changing solar conditions. In addition, the system could support user-based evaluation studies investigating how real-time daylight visualization influences spatial perception and design decision-making.

REFERENCES

- Amundadottir, M. L., Rockcastle, S., Sarey Khanie, M., & Andersen, M. (2017). A human-centric approach to assess daylight in buildings for non-visual health potential, visual interest and gaze behavior. *Building and Environment*, 113, 5–21. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.09.033>
- Baker, N., & Steemers, K. (2014). *Daylight design of buildings: a handbook for architects and engineers*. Routledge.
- Bulow-Hube, H. (1995). Subjective reactions to daylight in rooms: Effect of using low-emittance coatings on windows. *Lighting Research and Technology*, 27(1), 37–44. <https://doi.org/10.1177/14771535950270010601>
- Chamilothori, K., Wienold, J., & Andersen, M. (2019). Adequacy of Immersive Virtual Reality for the Perception of Daylit Spaces: Comparison of Real and Virtual Environments. *LEUKOS*, 15(2–3), 203–226. <https://doi.org/10.1080/15502724.2017.1404918>
- Chu, E., & Zaman, L. (2021). Exploring alternatives with Unreal Engine's Blueprints Visual Scripting System. *Entertainment Computing*, 36, 100388. <https://doi.org/10.1016/j.entcom.2020.100388>
- Epic Games. (2024). *Unreal Engine Features for architecture*. <https://www.unrealengine.com/en-US/uses/architecture>
- Fan, W., Yan, B., Bao, Q., Zhao, Y., & Zhou, J. (2023). Green Evaluation for Building Interior Decoration Based on BIM-BN Technology. *Buildings*, 13(3), 744. <https://doi.org/10.3390/buildings13030744>
- Google. (2026). *Google Maps*. Google. <https://maps.google.com>
- Holl, S. (2012). *Steven Holl: Color Light Time*. Lars Müller Publishers.
- Juba, I. (2025). *Mimarlık Eğitiminde Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) ve Sanal Gerçeklik (VR) Entegrasyonun İç Mekan Tasarımındaki Rolü* [Karabük Üniversitesi]. <https://www.researchgate.net/publication/394511055>
- Juba, I., & Özeren, Ö. (2024). Exploring the Role of Building Information Modeling (BIM) and Virtual Reality (VR) Technologies in Interior Design: A Literature Review. *COMPUTATIONAL RESEARCH PROGRESS IN APPLIED SCIENCE & ENGINEERING*, 10(2), 1–12. <https://doi.org/10.61186/crpase.10.2.2899>
- Newsham, G. R., Cetegen, D., Veitch, J. A., & Whitehead, L. (2010). Comparing Lighting Quality Evaluations of Real Scenes with Those from High Dynamic Range and Conventional Images. *ACM Transactions on Applied Perception*, 7(2), 1–26.
- Özeren, Ö., Qurraie, B. S., Juba, I., & Amiri, M. H. (2024). The Effect of Perception and Experience of Students Toward VR in Architectural Education. *JOURNAL OF ACADEMIC SOCIAL RESOURCES (ASR JOURNAL)*, 9(6). <https://doi.org/10.5281/zenodo.14559540>
- Parpauri, K., Baker, N., Steemers, K., & Compagnon, R. (2002). The Luminance Differences index: a new indicator of user preferences in daylit spaces. *Lighting Research & Technology*, 34(1), 53–66. <https://doi.org/10.1191/1365782802li0300a>
- Reinhart, C. F., Mardaljevic, J., & Rogers, Z. (2006). Dynamic Daylight Performance Metrics for Sustainable Building Design. *LEUKOS*, 3(1), 7–31. <https://doi.org/10.1582/LEUKOS.2006.03.01.001>
- Rockcastle, S., Amundadottir, M., & Andersen, M. (2017). Contrast measures for predicting perceptual effects of daylight in architectural renderings. *Lighting Research & Technology*, 49(7), 882–903. <https://doi.org/10.1177/1477153516644292>
- Rockcastle, S., & Andersen, M. (2014). Measuring the dynamics of contrast & daylight variability in architecture: A proof-of-concept methodology. *Building and Environment*, 81, 320–333. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.06.012>
- Salah, F. (2025). *A MULTI-OBJECTIVE OPTIMISATION MODEL FOR RESPONSIVE KINETIC FAÇADES PERFORMANCE: KFOM 2025 PhD THESIS ARCHITECTURE*.

- Salah, F., & Kayili, M. T. (2022). *RESPONSIVE KINETIC FAÇADE STRATEGY AND DETERMINATION OF THE EFFECT ON SOLAR HEAT GAIN USING PARAMETRIC BIM-BASED ENERGY SIMULATION*.
<http://meridian.allenpress.com/jgb/article-pdf/17/1/71/3033503/i1943-4618-17-1-71.pdf>
- Salah, F., & Tuna Kayılı, M. (2026). Assessing Thermal Comfort in Office Buildings: A Parametric Study of Kinetic Louvers and Double-Skin Facades in Türkiye. *International Journal of Built Environment and Sustainability*, 13(2), 167–185. <https://doi.org/10.11113/ijbes.v13.n2.1573>
- Susi, J. (2022). *Interactive Architectural Visualization using Unreal Engine*.
- Valcasara, N. (2015). *Unreal engine game development blueprints*. Packt Publishing Ltd.
- Zhang, J., Dong, Z., Bai, X., Lindeman, R. W., He, W., & Piumsomboon, T. (2022). Augmented Perception Through Spatial Scale Manipulation in Virtual Reality for Enhanced Empathy in Design-Related Tasks. *Frontiers in Virtual Reality*, 3. <https://doi.org/10.3389/frvir.2022.672537>
- Zumthor, P. (2006). *Atmospheres: Architectural Environments – Surrounding Objects*. Birkhäuser – Publishers for Architecture.

Bina Enerji Performansı Analizinde BEP-TR 2 ve BIM Tabanlı Yaklaşımların Karşılaştırılması

Safiye Özlem Çağlar¹ ; Salih Ofluoglu² 

^{1,2}Antalya Bilim Üniversitesi

¹ozlem.caglar@std.antalya.edu.tr; ²salih.ofluoglu@antalya.edu.tr

Özet

Küresel ısınma ile mücadelede, binalarda enerji tüketimi ve enerji verimliliğinin doğru yöntemlerle değerlendirilmesi önem taşımaktadır. Bu makale, binaların iskân alma sürecinde zorunlu olan Enerji Kimlik Belgesi hesaplamalarında kullanılan BEP-TR2 (BEP-TR v.2) ile BIM tabanlı bir yaklaşım sunan Graphisoft ArchiCAD EcoDesigner Star yazılımını karşılaştırmaktadır. Güncel bir yöntem olan ve proje sürecinin farklı evrelerinde kullanılabilen BIM tabanlı enerji modelleme yaklaşımlarının, ayrıntılı veri kullanımı ve model entegrasyonu açısından önemli avantajlar sunduğu bilinmektedir. Bu çalışma kapsamında seçilen EcoDesigner Star, ArchiCAD ortamında aynı model verisi üzerinden enerji performans analizi yapılmasına olanak sağlamaktadır. Buna karşılık, BEP-TR2 yaklaşımının veri kullanımı ve modelleme süreci açısından bazı sınırlılıklara sahip olduğu farklı kaynaklarda ifade edilmektedir. Bu çalışmada BEP-TR2 ve ArchiCAD EcoDesigner Star kullanılarak enerji performansı simülasyonları gerçekleştirilmiş; iki yaklaşım, enerji analizi sonuçları ve modelleme süreçleri açısından karşılaştırılmıştır. Çalışma kapsamında işletme saatleri ile ısıtma ve soğutma yükleri bakımından farklılık gösteren, yaygın yapı tipleri arasından okul, ofis ve konut yapıları seçilmiştir. Bu yapılara ait enerji tüketimlerini eşit koşullarda karşılaştırabilmek amacıyla örneklerin inşaat alanlarının birbirine yakın olmasına dikkat edilmiştir. Ayrıca her iki ortamda, birbirine yakın ısı geçirgenlik değerlerine (U değeri) sahip yapı malzemeleri kullanılmıştır. Çalışma alanı olarak Antalya ili Kepez ilçesinde, çevresinde yapılaşma bulunan bir arazi seçilmiştir. Yapılan enerji performans analizleri sonucunda EcoDesigner Star ve BEP-TR2 ortamlarında hesaplanan enerji kullanımı değerleri arasında yüzdesel olarak ofis binasında %26,7, okul binasında %30,0, konut binasında ise %8,2 oranında farklılık olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle ofis ve okul yapılarında iki yazılım arasında elde edilen değer farklılıkları dikkat çekici düzeydedir. Bu durum, enerji performans değerlendirmelerinde kullanılan yöntemlerin, hesaplama yaklaşımlarının ve varsayımların sonuçlar üzerinde önemli bir etkiye sahip olabileceğini göstermektedir. Bu bulguların güvenilirliğini ve tutarlılığını daha kapsamlı biçimde değerlendirebilmek için, farklı hesaplama motorlarına sahip enerji simülasyon yazılımlarını da içerebilecek karşılaştırmalı çalışmalara ihtiyaç bulunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: BEP-TR2, BIM, Enerji Analizi, Bina Enerji Modellemesi.

A Comparison of BEP-TR 2 and BIM-Based Approaches in Building Energy Performance Analysis

Safiye Özlem Çağlar¹ ; Salih Ofluoğlu² 

^{1, 2}Antalya Bilim University

¹ozlem.caglar@std.antalya.edu.tr; ²salih.ofluoglu@antalya.edu.tr

Abstract

Accurate assessment of energy consumption and energy efficiency in buildings is essential in addressing global warming. This paper compares BEP-TR2 (BEP-TR v.2), which is used for Energy Performance Certificate calculations required during the building occupancy permit process in Türkiye, with Graphisoft ArchiCAD EcoDesigner Star, a BIM-based energy analysis tool. BIM-based energy modeling approaches, which can be utilized at various stages of the design process, are known to offer significant advantages in terms of detailed data utilization and model integration. The EcoDesigner Star software selected for this study enables energy performance analyses to be performed directly on the same building model within the ArchiCAD environment. In contrast, several sources have reported certain limitations of the BEP-TR2 approach regarding data utilization and the modeling process. In this study, energy performance simulations were carried out using both BEP-TR2 and ArchiCAD EcoDesigner Star. The two approaches were then compared in terms of energy analysis results and modeling workflows. School, office, and residential buildings were selected as case studies, representing common building types with differing operating schedules and heating and cooling demands. To ensure a fair comparison of energy consumption values, the selected examples were designed with similar gross floor areas. Furthermore, building materials with comparable thermal transmittance (U-value) characteristics were used in both environments. The study site was located in the Kepez district of Antalya, Türkiye, on a plot surrounded by existing urban development. The results of the energy performance analyses revealed differences in calculated energy consumption values between EcoDesigner Star and BEP-TR2 of 26.7% for the office building, 30.0% for the school building, and 8.2% for the residential building. The discrepancies observed in the office and school buildings are particularly noteworthy. These findings indicate that the methods, calculation approaches, and assumptions employed in energy performance assessments can significantly influence the results obtained. To evaluate the reliability and consistency of these findings more comprehensively, further comparative studies that may also involve energy simulation software based on different calculation engines are required.

Keywords: BEP-TR, BIM, Energy Analysis, Building Energy Modeling.

1. Giriş

Küresel ısınma dünya için en önemli sorunların başında gelmektedir ve son on yılda hızı belirgin biçimde artmıştır. Bu yükselişte insan faaliyetlerine bağlı sera gazı salınımı önemli bir yer tutmaktadır. Sera gazı salınımları çoğunlukla fosil temelli enerji kaynaklarının kullanımına temellendirilmektedir (IPCC, 2023). Küresel enerji kullanımının yaklaşık %30'u binalara bağlı olarak gerçekleşmektedir (IEA, 2025).

Dünyada birçok ülkede küresel ısınmayı azaltmak için enerji tüketimini azaltma ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimi teşvik etmeye yönelik yasa ve yönetmelikler bulunmaktadır. Örneğin, Türkiye'nin aday ülke olarak yer aldığı Avrupa Birliği'nde binaların enerji performansını artırmaya yönelik temel yasal düzenlemeler, Enerji Verimliliği Yönergesi (EED) 2012/27/EU ve Binaların Enerji Performansı Yönergesi (EPBD) 2010/31/EU kapsamında tanımlanmıştır (European Commission, 2010; 2012). Bunun yanı sıra, Avrupa Birliği enerji etiketleme (Energy Labelling) sistemi ve eko-tasarım (eco-design) mevzuatının da bina enerji verimliliğinin sağlanmasına önemli katkı sağlamaktadır (Maduta vd., 2023).

Türkiye'de Avrupa Birliği'ne uyum süreci kapsamında, binalarda enerji verimliliğinin artırılması ve enerjinin etkin kullanılması amacıyla yürürlükte olan Binalarda Enerji Performansı Direktifi (EPBD) hem mevcut, hem de yeni yapılara yönelik hükümler içermektedir. Bu yönetmelik kapsamında binalara içerisinde aydınlatma, ısıtma, soğutma, havalandırma, kojenerasyon, fotovoltaiik, sıhhi sıcak su ait yıllık enerji tüketimini gösteren bir Enerji Kimlik Belgesi (EKB) çıkartılması gerekmektedir. Binanın enerji kimlik belgesi sınıfı, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığının EPBD'deki hükümler çerçevesinde BEP-TR2 (Binalarda Enerji Performansı, 2. Versiyon – Türkiye) üzerinden hesaplanmakta olup, bu belge yalnızca BEP-TR2 eğitimi alan ve bakanlık tarafından bu eğitimi onaylanan kullanıcılar tarafından hazırlanmaktadır (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2008).

BEP-TR2 sistemi Türkiye'de enerji kimlik belgesi oluşturulmasında temel araç olarak kullanılmasına rağmen, bazı standart varsayımlara ve manuel veri girişine dayalı hesaplama yaklaşımı nedeniyle gerçek enerji tüketimi ile hesaplanan değerler arasında farklılıklar oluşabileceği ve özellikle farklı parametrelerin de dahil olabildiği detaylı enerji performansı analizleri için sınırlı kaldığı literatürde belirtilmektedir (Erikçi ve Zorer, 2015; Aydın ve Saylam, 2017; Harputlugil vd., 2019; Yılmaz ve Cesur, 2023). Bunun yanında BEP-TR2 yazılım ortamının güncel bina modelleme ve projelendirme yaklaşımı olan BIM (Building Information Modeling – Yapı Bilgi Modellemesi) ortamında üretilen verileri doğrudan kullanamaması da sistemin önemli sınırlılıklarından biri olarak değerlendirilebilir.

Yapı Bilgi Modellemesi veya daha yaygın adıyla BIM (Building Information Modeling) tabanlı bina enerji modelleme (BEM) yaklaşımı bina geometrisi, malzeme özellikleri ve mekanik sistemlere ilişkin verilerin dijital model üzerinden doğrudan aktarılmasına olanak sağlayarak enerji analiz süreçlerinin daha bütüncül ve otomatik şekilde yürütülmesini mümkün kılmaktadır (Gao vd., 2019; Bonomolo vd., 2021). Bina enerji modellemesi için BIM yazılımlarının kullanılmasının zaman tasarrufunun yanı sıra, verinin farklı programlara aktarımında oluşabilecek hataların ve eksik veri üzerinden çalışma yapılması gibi sorunların da önüne geçilebilmesine olanak sağlamaktadır (Hoo ve Wahab, 2020). BIM tabanlı enerji modelleme yaklaşımlarının, veri entegrasyonu ve otomatik veri aktarımı sayesinde BEP-TR2 sisteminde görülen manuel veri girişi ve varsayımlara dayalı hesaplama sınırlılıklarını azaltma potansiyeline sahip olduğu değerlendirilmektedir. Bu doğrultuda bu çalışma, BIM tabanlı enerji modelleme yöntemi ile BEP-TR2 yazılımını karşılaştırmalı olarak inceleyerek bina enerji performansı değerlendirme süreçlerinin geliştirilmesine yönelik olası avantajları ortaya koymayı ve literatüre özgün katkılar sunmayı amaçlamaktadır.

2. Bina Enerji Modellemesi ve Analiz yaklaşımları

Bina enerji modellemesi (BEM), bir yapının enerji tüketimini ve enerji performansını sayısal ortamda simülasyon yöntemleri ile analiz etmeye olanak sağlayan bir yaklaşımdır. Bu yöntem kapsamında bina geometrisi, yapı kabuğu özellikleri, malzemelerin termal karakteristikleri, kullanıcı davranışları ve HVAC sistemleri gibi çeşitli parametreler dikkate alınarak binanın enerji davranışı sanal bir model üzerinden değerlendirilmektedir (Çelebi, 2022). Enerji performans simülasyon araçları, bir binanın enerji tüketimi, termal konfor koşulları ve çevresel etkilerini incelemek için güçlü analiz araçları olarak kullanılmaktadır (Maile vd., 2007).

Bu kapsamda, enerji modelleme çalışmalarında kullanılacak yöntem veya yazılım aracının seçimi elde edilecek analiz sonuçlarının doğruluğu ve güvenilirliği açısından önem taşımaktadır. Bina enerji analiz modeli için program veya yöntem seçerken; kesinlik ve hassasiyet düzeyi, öğrenme ve kullanım kolaylığı, tekrarlanabilirlik, gerekli verilerin erişilebilirliği, elde edilen çıktının kalitesi ve projenin bulunduğu tasarım aşaması gibi faktörler dikkate alınarak seçim yapılmaktadır (ASHRAE, 1997).

Bu çalışmada enerji modelleme ve analiz yöntemleri iki temel kategoride ele alınmıştır:

Birinci kategori önceden tanımlanmış hesaplama prosedürleri ve standartlaştırılmış varsayımlar aracılığıyla binaların enerji verimliliğini analiz eden yönetmelik odaklı yaklaşımdır. Bu yaklaşımlarda hesaplamalar; genellikle standart iklim verileri, tanımlanmış kullanım senaryoları ve belirli kabuller temelinde yapılarak, farklı binaların enerji performansının karşılaştırılabilir bir biçimde değerlendirilmesine olanak tanır. Avrupa Birliği'nde uygulanan Binaların Enerji Performansı Direktifi (EPBD) uyarınca, üye devletlerin binalar için enerji performansı belgelendirme sistemleri kurmaları zorunludur (Avrupa Parlamentosu ve Konseyi, 2010). Bu doğrultuda; Birleşik Krallık, Almanya ve Fransa gibi ülkelerde binaların enerji performansı, ulusal yönetmeliklerle belirlenen hesaplama yöntemleri üzerinden değerlendirilmektedir. Türkiye'de, binaların enerji performansını değerlendirmek için geliştirilen BEP-TR2 ortamı benzer bir yaklaşım izlemektedir. Burada modelleme sürecinde binanın konumu, yönü, işlevi ve ısıtma, soğutma, sıcak su ve havalandırma taleplerini karşılamak için kullanılan sistemler vb. bilgiler tanımlanmaktadır. Bu ortamlara dair önemli sınırlılıklar; model oluşturma sürecinin zaman alıcı olması, manuel veri girişine bağlı hata riskinin yüksek olması, tasarım ve analiz süreçleri arasındaki entegrasyonun zayıf kalması ve disiplinler arası veri paylaşımının sınırlı olması olarak özetlenebilir. Bu sınırlılıklar, son yıllarda BIM tabanlı enerji modelleme yaklaşımlarının giderek daha fazla tercih edilmesinin temel nedenlerini oluşturmaktadır (Çelebi, 2022).

İkinci kategori, enerji modelleme ve hesaplama sürecinin bağımsız ve bu alanda uzmanlaşan yazılım ortamlarında gerçekleşmesi yaklaşımıdır. Bu yazılımlar EnergyPlus, DOE-2 ve TRNSYS gibi simülasyon motorları kullanarak enerji analizi yapmaktadır. Arka planda bu motorları kullanan çeşitli yazılımlar (DesignBuilder, IES VE, vb.) kullanıcıların bina modelini oluşturmaya, gerekli parametreleri girmesine ve analiz sonuçlarını görselleştirmesine olanak sağlayan arayüzler sunarlar. Bu kategoride değerlendirilebilecek olan BIM ortamı, ayrıntılı üç boyutlu modelleme özelliği sayesinde bina bileşenlerinin hassas bir temsili sunarak proje paydaşlarının yapının tüm özelliklerini daha kapsamlı şekilde anlamasına olanak sağlamaktadır (Begic ve Galic, 2021). BIM tabanlı BEM metodolojisi, enerji modelinin oluşturulması için mimari tasarım modelinde yer alan bilgileri girdi olarak kullanmakta ve farklı tasarım alternatiflerinin değerlendirilmesine imkân tanıyarak daha verimli tasarım kararlarının alınmasını desteklemektedir (Gao vd., 2019). BIM tabanlı enerji modelleme ortamlarında enerji performans analizlerinin gerçekleştirilebilmesi için bina konumu, kullanım amacı ve kullanım senaryoları gibi temel parametrelerin tanımlanması gerekmektedir. Ayrıca yapı elemanlarının malzeme özellikleri ile birlikte modellenmesi ve benzer kullanım özelliklerine sahip alanların termal zonlar şeklinde tanımlanması enerji analizinin temel adımlarını oluşturmaktadır. Bu termal zonlara ısıtma, soğutma, havalandırma ve sıcak su kullanımına ilişkin sistem verileri tanımlanmakta; ayrıca

bina kullanıcı sayısı, iç mekân sıcaklık aralıkları ve iklim verileri gibi parametreler de enerji performans hesaplamalarında dikkate alınmaktadır. Bu şekilde oluşturulan enerji modeli üzerinden binanın enerji tüketimi ve performansı farklı kullanım senaryoları altında analiz edilebilmektedir. BIM tabanlı enerji modelleme ortamlarına Autodesk Insight ve Graphisoft ArchiCAD EcoDesigner Star gibi yazılımlar örnek olarak verilebilir.

3. Çalışmanın Amacı ve Yöntemi

Bu çalışmada, yukarıda açıklanan BEP-TR2 gibi yönetmeliğe dayalı ve BIM temelli enerji modelleme ve hesaplama yöntemleri arasında elde edilen analiz sonuçları ve kullanım süreçleri açısından bir karşılaştırma yapılmaktadır. BEP-TR2 sistemini farklı yazılımlarla kıyaslayan araştırmalar yer almasına rağmen, BEP-TR2 ve BIM temelli enerji hesaplama ortamlarıyla karşılaştırmasına yönelik yeterli çalışma bulunmamaktadır (Erikci ve Gedik, 2015; Bilen vd., 2020; Zengin vd., 2023). Bu karşılaştırma ile her iki yaklaşımın veri kullanımı, modelleme süreci ve elde edilen sonuçlar üzerindeki etkileri değerlendirilmektedir. Yönetmeliğe dayalı yöntemler standart varsayımlar ve basitleştirilmiş hesaplama süreçleri ile uygulama kolaylığı sağlarken, veri kapsamı ve model temsil düzeyi açısından bazı sınırlılıklar içerebilmektedir. Buna karşılık BIM tabanlı enerji modelleme yaklaşımı, mimari modelden elde edilen ayrıntılı verilerin analiz sürecine aktarılmasına olanak sağlayarak daha kapsamlı değerlendirmeler yapılmasına imkân tanımaktadır. Bu çalışmanın temel katkısı, söz konusu iki yaklaşımın avantaj ve sınırlılıklarını analiz sonuçları üzerinden ortaya koyarak bina enerji performansı değerlendirme süreçlerinde kullanılan yöntemlerin güvenilirliği ve kullanım alanlarına ilişkin daha net bir değerlendirme yapılmasına katkı sağlamasıdır.

Çalışmada kullanılan yöntem enerji performansı simülasyonuna dayanmaktadır ve kanıta dayalı bir araştırma yaklaşımıdır. Kanıta dayalı araştırma yöntemi bir konu hakkında yapılan değerlendirmelerin somut veriler ve sistematik analizler üzerinden gerçekleştirilmesini ifade eder. Enerji performansı simülasyonu, bir binanın enerji tüketimi ve performansının bilgisayar ortamında oluşturulan sayısal modeller aracılığıyla analiz edilmesini sağlayan bir yöntemdir. Bu yöntemde bina geometrisi, yapı elemanlarının termal özellikleri, iklim verileri, kullanım senaryoları ve mekanik sistemler gibi çeşitli parametreler dikkate alınarak binanın enerji davranışı hesaplanmaktadır (Clarke, 2001). Simülasyon yöntemleri, gerçek sistemlerin davranışını temsil eden modeller aracılığıyla farklı senaryoların analiz edilmesine olanak sağlayan ve araştırmalarda deneysel incelemeye alternatif olarak kullanılan bir araştırma yaklaşımı olarak değerlendirilmektedir (Banks vd., 2010).

Enerji performansı simülasyonları için BEP-TR2 ve bir BIM uygulaması olan Graphisoft ArchiCAD EcoDesigner Star yazılım ortamları kullanılmıştır. BIM uygulaması olarak ArchiCAD'in tercih edilmesinin başlıca nedenleri arasında yaygın kullanılan BIM yazılımlarından biri olması, BIM ve BEM modellemesine olanak sağlayan entegre araçlar sunması ve uluslararası standartlarla uyumlu bir enerji analiz altyapısına sahip olması yer almaktadır. Ayrıca EcoDesigner Star eklentisi sayesinde enerji performans analizlerinin gerçekleştirilebilmesi ve oluşturulan BIM modelinin başka bir yazılıma aktarılmasına gerek kalmadan doğrudan analiz yapılabilmesi ortamın önemli avantajları arasındadır (Bonoloma vd., 2021).

Çalışmada enerji performans hesaplamalarının karşılaştırılabilmesi amacıyla toplam alanları birbirine yakın olacak şekilde tasarlanmış üç farklı işlevde bina tipi (okul, hastane ve konut) için yapı bilgi modeli oluşturulmuştur. Bu işlevlerin seçilmesinin temel nedeni, en sık karşılaşılan yapı tipleri olması ve yapı içi enerji yüklerinin birbirinden farklı olmasıdır. Böylece farklı kullanım senaryolarının enerji performansı analiz sonuçlarına nasıl yansıdığı incelenmiş ve benzer büyüklükteki yapılar için iki farklı uygulama ortamında elde edilen sonuçlar arasındaki farklılıkların değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Vaka çalışması için Antalya ili Kepez ilçesinde yer alan bir proje arazisi seçilmiş olup, arazinin çevresinde yoğun yapılaşma bulunmaktadır. ArchiCAD ortamında yapı ve yakın çevresi birlikte modellenilebilmiş olsa da BEP-TR2 yazılımında analiz yapılacak yapı dışında çevresel modeller

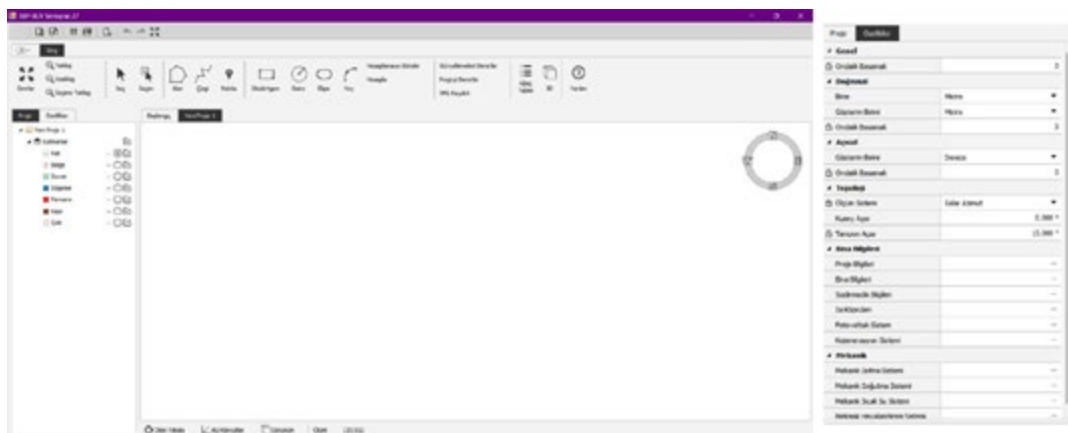
oluşturulamadığından yalnızca yapı bilgi modeli tanımlanabilmiştir. BEP-TR2 ve EcoDesigner Star ortamlarında oluşturulan modellerde mümkün olduğunca benzer yapı malzemeleri kullanılmış ve her iki uygulamada da yapı elemanlarına ait ısı geçirgenlik katsayılarının (U değerleri) aynı olacak şekilde tanımlanmasına özen gösterilmiştir.

3.1. BEP-TR 2 (Binalarda Enerji Performans Uygulaması)

Programın bu halinin yeterince iyi olmadığı ve dairesel formların bulunduğu yapı tiplerindeki sorunlar çalışmalar tarafından ortaya konmuştur (Eriki ve Gedik, 2015). Bakanlık programın ilk versiyonunu geliştirerek 2017 yılında BEP-TR2 versiyonunu çıkarmıştır. BEP-BUY ve BEP-İS adlı iki farklı alt modüle sahiptir. BEP-BUY modülü bina enerji performansını hesaplamak için kullanılan yazılımdır. BEP-İS ise verilerin sisteme işlenmesi için kullanılan online ortamdır. BEP-İS'e yalnızca Enerji kimlik belgesi uzmanlığı eğitimi almış ve sınavını geçmiş enerji kimlik belgesi uzmanları tarafından giriş yapılabilir. BEP-BUY modülü içerisine giriş yapıldığında binanın ait konum bilgileri; ruhsat tarihi; konstrüksiyon tipi; bitişğinde bir yapı olup olmadığı; yapı elemanlarının ısı köprüsü tipi; fotovoltaik kullanım varsa ona ait bilgileri; kojenerasyon sistemi, mekanik sıcak su, soğutma, ısıtma, havalandırma sistemi verileri eklenmektedir. Sonrasında sırasıyla kat, bölge, duvar döşeme katmanları çizilmektedir (**Şekil 1**). Çizim bu sırayla tamamlandıktan sonra kapı ve pencerelere ait veriler sırasız bir biçimde eklenebilir. Verileri çizerken ya da çizim tamamlandıktan sonra her katmanın verileri işlenmelidir. Katman verileri yazılım üzerinden de çizilebildiği gibi, programın içerisine .DWG dosyası olarak oluşturulmuş bir çizim de alıp sonrasında o çizimdeki çizgileri katman çizgilerine dönüştürülebilmekte veya referans çizgisi olarak da kullanılabilir. Bina enerji performansını hesaplamak için çizim sonrasında aşağıdaki listelenen bilgiler girilmelidir:

- Kat katmanı için zemin kat, bodrum kat veya ara kat olduğu bilgisi kat numarası, ve her kattaki referans noktası verisi seçilmelidir.
- Bölge katmanı için o bölgenin ne amaçla kullanılacağına ait yazılım içerisinde bulunan 39 adet tip içerisinden birisi tanımlanmalı; her bölgenin varsa ısıtma, soğutma, havalandırma, sıcak su verileri girilmelidir.
- Duvar ve döşeme katmanlarının her duvar ve döşeme için kullanılan bütün yapı malzemeleri verileri manuel olarak girilmelidir.
- Kapı ve pencere katmanları için yazılım içerisinde bulunan yapı malzemesi seçilmelidir.

Çizim tamamlandıktan sonra 'kontrol et' bölümü çalıştırılmaktadır. Bu bölümde hata çıkarsa hata olan bölümün numarası, katman adı ve katı yazmaktadır. Bu alandan hata alanı bulunabilir veya hata üzerine tıklanırsa çizimin o bölümüne ekran yaklaşmaktadır. Hata çıkmaması veya çıkan hataların düzeltilip tekrar kontrol edilmesi ardından hesaplama gönder bölümünden bina enerji performansı hesaplanmaktadır.

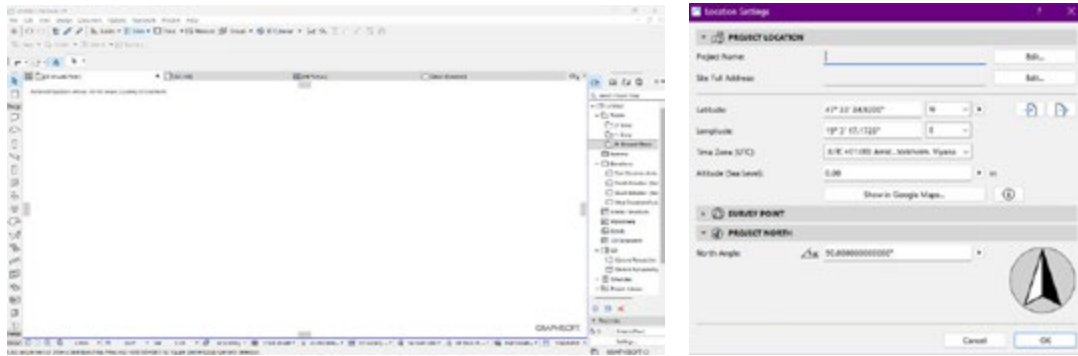


Şekil 1: BEP-BUY arayüzü

3.2. Graphisoft ArchiCAD - EcoDesigner Star

ArchiCAD BIM tabanlı modelleme araçlarından biridir ve bir açık standart olan buildingSMART IFC sertifikasına sahiptir. Program üzerinden enerji analizi, BIM programlarında tasarımı uyumlu çalışacak VIP-Core tabanlı hesaplama motoruna sahip olan EcoDesigner Star eklentisi ile yapılmaktadır. Bu eklenti, binaların tasarımını kolaylaştırmak ve onlar için sürdürülebilir çözümler önermek amacıyla oluşturulmuştur. EcoDesigner Star, UNI EN ISO 52016-1, ASHRAE 140-2017 ve UNI/TS 11300 gibi enerji performansı değerlendirme standartları tarafından belirlenen gereklilikleri karşılayabilmektedir (Bonoloma vd., 2021).

ArchiCAD üzerinden yapı elemanları proje aşamasında modellenirken, program içerisinde bulunan yapı malzemeleri seçilebildiği gibi, manuel olarak yapı elemanı için yapı malzemesi oluşturulabilmektedir. Program içerisinde arazinin konumunu belirlemek için yapının bulunduğu koordinatların sisteme girilmesi gerekmektedir. Google Maps üzerinden göster bölümünde konumun doğruluğu teyit edilebilmektedir (**Şekil 2**).

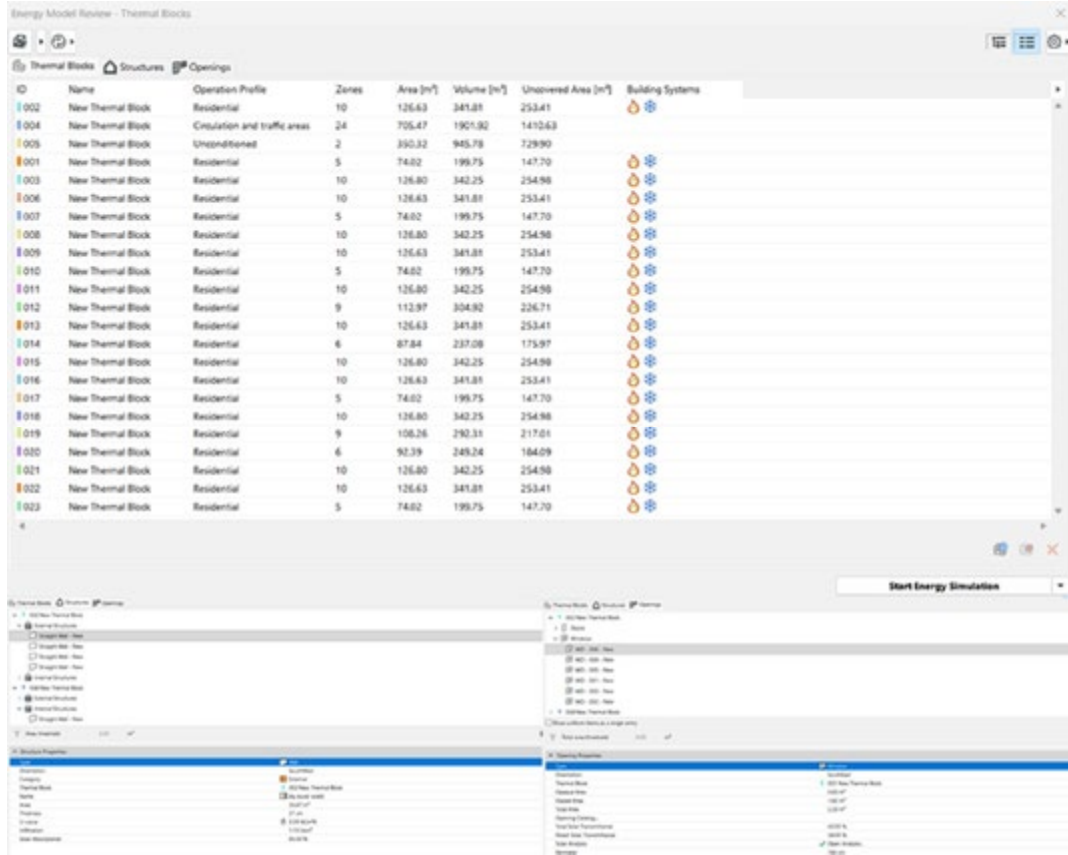


Şekil 2: ArchiCAD arayüzü ve proje konumlandırma bölümü

Yapı elemanlarının çizimi tamamlandıktan sonra, her tanımlanan oda veya alana zon atanması gerekmektedir. Atanan her zon için programın sunduğu 9 seçenekten biri seçilmelidir. Enerji analizi için:

- Yapının işlevi, hangi günlerde, saatlerde yılın ne kadarında kullanılacağına dair işletim bilgileri girilmelidir.
- İklim tipi için veri manuel olarak da seçilebilmekte, konum bilgisinden alanın sıcaklık, nem, solar radyasyon, rüzgar verisi otomatik olarak gelmektedir.
- Yapıda bulunan ısıtma, soğutma, havalandırma ve sıcak su sistemlerine ilişkin veriler girilmelidir.

Yazılımda enerji analizi bölümünde, termal blok kısmında her zon için benzer işlev ve kullanımda olanları gruplayarak termal blok oluşturulmaktadır. Her termal blok için ısıtma, soğutma, sıcak su ve havalandırma kullanılıyorsa, bunların tanımlanması gerekmektedir. Strüktür bölümünde proje çiziminden gelen yapı elemanlarına ilişkin veriler termal gruplara göre ayrılarak gösterilmektedir. Bu bölümde her bir yapı elemanının U ve R değerleri görünmektedir. Yapı elemanlarının malzemeleri bu bölümde farklı bir malzeme ile güncellenebilmekte veya manuel olarak değer girilebilmektedir. Kapı ve pencereler-bölümünde projede çizilmiş olan kapı ve pencerelere malzeme atanabilmektedir. Yazılımda kapı ve pencereler için solar analiz bölümü tanımlanmış olup bu analizi yapmadan enerji performans analizi başlatılamamaktadır (**Şekil3**).

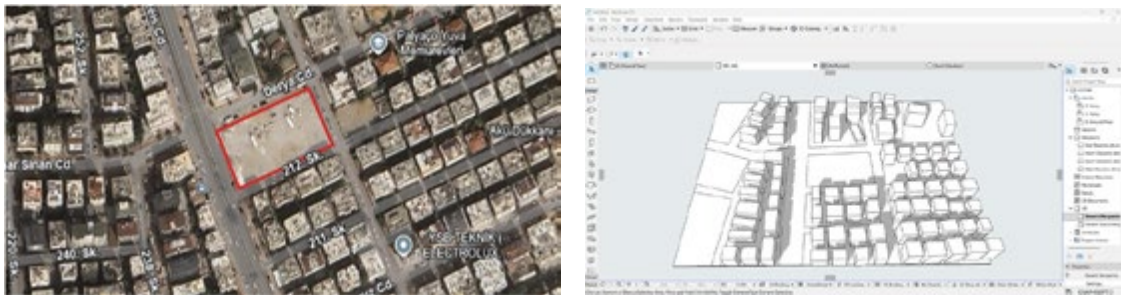


ID	Name	Operation Profile	Zones	Area [m²]	Volume [m³]	Uncovered Area [m²]	Building Systems
002	New Thermal Block	Residential	10	126.63	341.81	253.41	
004	New Thermal Block	Circulation and traffic areas	24	705.47	1901.92	1415.63	
005	New Thermal Block	Unconditioned	2	350.32	945.78	729.90	
001	New Thermal Block	Residential	5	74.02	199.75	147.70	
003	New Thermal Block	Residential	10	126.80	342.25	254.98	
006	New Thermal Block	Residential	10	126.63	341.81	253.41	
007	New Thermal Block	Residential	5	74.02	199.75	147.70	
008	New Thermal Block	Residential	10	126.80	342.25	254.98	
009	New Thermal Block	Residential	10	126.63	341.81	253.41	
010	New Thermal Block	Residential	5	74.02	199.75	147.70	
011	New Thermal Block	Residential	10	126.80	342.25	254.98	
012	New Thermal Block	Residential	9	112.97	304.80	226.71	
013	New Thermal Block	Residential	10	126.63	341.81	253.41	
014	New Thermal Block	Residential	6	87.84	237.08	175.97	
015	New Thermal Block	Residential	10	126.80	342.25	254.98	
016	New Thermal Block	Residential	10	126.63	341.81	253.41	
017	New Thermal Block	Residential	5	74.02	199.75	147.70	
018	New Thermal Block	Residential	10	126.80	342.25	254.98	
019	New Thermal Block	Residential	9	106.26	292.31	217.01	
020	New Thermal Block	Residential	6	92.39	249.24	184.09	
021	New Thermal Block	Residential	10	126.80	342.25	254.98	
022	New Thermal Block	Residential	10	126.63	341.81	253.41	
023	New Thermal Block	Residential	5	74.02	199.75	147.70	

Şekil 3: Ecodesigner Star arayüzü

4. Yöntem ve Bulgular

Çalışma kapsamında arazi seçimi yapılırken yapıyı gölgeleme ve rüzgar açısından etkileyecek çevre yapıların olmasına özen gösterilmiştir. Bu çerçevede Antalya ili, Kepez ilçesi Turgut Reis Caddesi üzerinde bulunan bir proje arazisi seçilmiştir (Şekil 4).



Şekil 4: Proje için seçilen arazi ve arazinin ArchiCAD ortamında modellenmiş hali

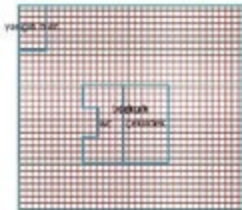
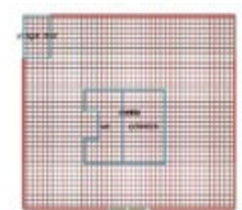
Daha önce belirtildiği gibi, BEP-TR ve EcoDesigner Star ortamlarında yapı elemanları için benzer U değerlerine sahip yapı malzemeleri seçilmiştir (Tablo 1). Döşemeler için BEP-BUY yazılımında döşeme tipi seçilmesi gerekmektedir, döşeme tipleri olarak örnek projelerde temel döşemesi ve ara kat döşemesi kullanılmıştır. Modellenen örnek projeler şehirde bulunan ve o işleve ait yapılara benzemektedir.

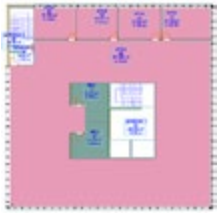
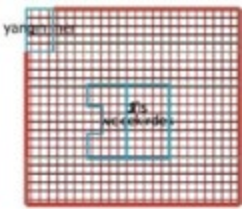
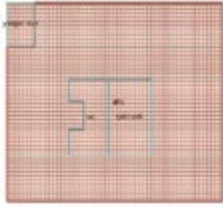
Tablo 1: Seçilen Yapı Elemanları için Malzeme Kalınlıkları

Yapı elemanı	Malzeme	Kalınlık
<i>Bodrum Kat Duvarı</i>	Agregasız sıva	2cm
	Donatılı beton	25cm
	Polistiren- parçacıklı köpük	5cm
	Kireç harcı	1cm
<i>Dış Duvar</i>	Kireç harcı	2cm
	Çimento harcı	1cm
	Yatay delikli tuğla ile duvar	13,5 cm
	Poliüretan sert köpük	5cm
	Çimento harcı	1cm
<i>İç Duvar</i>	Çimento harcı	1cm
	Yatay delikli tuğlala	13cm
	Çimento harcı	1cm
<i>Temel Döşeme</i>	Çimento harçlı şap	2.5 cm
	Membran	0.5cm
	Donatılı beton	10cm
	Membran	0.5cm
	Yüksek fırın cürufu	2cm
	Kum, çakıl, kırma taş	1.5cm
	Pvc kaplama	1cm
<i>Ara Kat Döşeme</i>	Çimento harçlı şap	2.5 cm
	Donatılı beton	10cm
	Çimento harcı	2.5 cm

Ofis binası, bodrum, zemin, 1., 2., 3., 4. normal kat olmak üzere toplam alanı 3.801,31 m²'dir. Yapının ortasında çekirdek, bodrum katta depo ve sığınak mekanları; zemin ve üst katlarda açık ofis ve toplantı odaları bulunmaktadır (**Tablo 2**). Ofisin ısıtılması ve sıcak su için ısı pompası; soğutulması için merkezi sistemli Chiller sistemi; havalandırma için besleme ve egzoz havalandırma sistemi kullanılmıştır. ArchiCAD'de önce zonlar oluşturulmuş, ofis, WC ve sirkülasyon alanı olarak program içerisindeki seçeneklerden seçilmiştir. Sonrasında zonlar WC ofis alanları ve sirkülasyon alanları olmak üzere 3 ayrı termal bloğa ayrılmıştır. BEP-BUY modülünde her bölgeye işlevine göre programın içerisinde bulunan bölge tipleri içerisinde bir tip seçilmiştir.

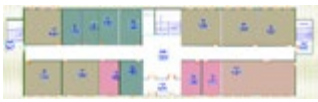
Tablo 2: Ofis Binası Kat Planları

	ArchiCAD	BEP-BUY
<i>Bodrum Kat</i>		
<i>Zemin Kat</i>		

1., 2., 3., Katlar		
4. Kat		

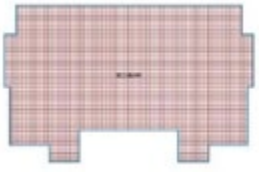
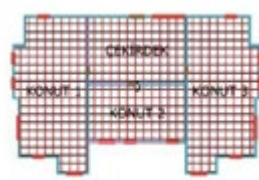
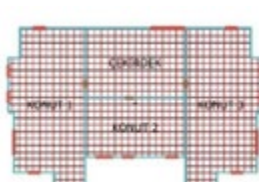
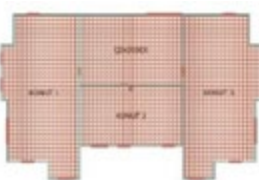
Okul binası, bodrum, zemin ve 1. normal kat olmak üzere toplam alanı 3.487,15 m²'dir . Bodrum katta teknik odalar, sığınak ve spor salonu; zemin katta kantin, WC, ofis odaları, sınıflar; 1.katta WC, idari ofisler, öğretmenler odası, sınıflar ve kütüphane bulunmaktadır (**Tablo 3**). ArchiCAD yazılımında termal bloklar sınıf, kütüphane, idari ofis, derslik, spor salonu, sirkülasyon alanı, WC'ler ve teknik hacim olmak üzere ayrılmıştır. BEP-BUY yazılımında sınıf, WC, sirkülasyon alanı, idari ofisler, kütüphane bölge tipi olarak seçilmiştir. İklimlendirme için ısıtma sisteminde kombi, soğutma sisteminde klima kullanılmıştır.

Tablo 3: Okul Binası Kat Planları

	ArchiCAD	BEP-BUY
Bodrum Kat		
Zemin Kat		
1. Kat		

Konut binası 8 kattan oluşmaktadır ve toplam 3.802,78 m² alana sahiptir. Bodrum katta sığınak ve teknik alanlar, üst katlarda ise her katta 3 daire olmak üzere 21 daire bulunmaktadır (**Tablo 4**). Yapıda iklimlendirme için kombi, klima ve sıcak su kullanımı için ise gün ısı kullanılmıştır. ArchiCAD yazılımında her daire içindeki zonlar ayrı ayrı olarak, sirkülasyon alanları, teknik hacim ve sığınak olmak üzere ayrı termal bloklara ayrılmıştır. BEP-BUY yazılımında yapı tipi olarak konut seçildiğinden, bölge tipi seçilirken sadece daire, çekirdek, sera seçenekleri bulunmaktadır. Bölge tipi seçimlerinde daire haricindeki alanlara çekirdek seçeneği seçilmiştir. Bölge tipi olarak daire seçilen alanlarda toplam mutfak ve salon metrekaresi, balkon uzunluğu bilgisi de eklenmektedir.

Tablo 4: Konut Binası Kat Planları

	ArchiCAD	BEP-BUY
<i>Bodrum kat</i>		
<i>Zemin Kat</i>		
<i>1., 2., 3., 4., 5. Normal Katlar</i>		
<i>6. Kat</i>		

Üç bina tipi üzerinden iki yazılımda yapılan analizlerin sonucu olan yıllık toplam enerji tüketim miktarı Tablo 5’de verilmektedir. ArchiCAD EcoDesigner Star yazılımında elde edilen sonuçların BEP-BUY yazılımına göre daha fazla olduğu görülmüştür. İki yazılım arasındaki sonuçların yüzdesel olarak farkı Ofis binasında %26.7, okul binasında %30, konut binasında ise %8.2 olarak hesaplanmıştır.

$$\text{Yüzde Fark} = \frac{|A - B|}{(A + B)/2} \times 100$$

(1)

Tablo 5: ArchiCAD EcoDesigner Star ve BEP-BUY (BEP-TR2)’nin Örnek Binalara Dair Enerji Tüketim Miktarları

	ArchiCAD EcoDesigner Star	BEP-BUY/BEP-TR2	FARK
OFİS BİNASI	191 MWh/yıl	146 MWh/yıl	%26.7
OKUL BİNASI	142 MWh/yıl	105 MWh/yıl	%30
KONUT BİNASI	215 MWh/yıl	198 MWh/yıl	%8.2

Literatürde bazı bina enerji modelleme çalışmalarında $\pm 15\%$ düzeyindeki sapmalar kabul edilebilir doğruluk sınırı olarak değerlendirilmektedir (Reeves vd., 2012). Bu bağlamda konut yapısında elde edilen %8.2’lik fark bu sınır içerisinde kalırken, ofis ve okul yapılarında elde edilen %26.7 ve %30.0’lik farklar daha dikkat çekici düzeydedir.

Ofis ve okul yapılarında yıllık enerji tüketim değerleri arasındaki farkların konut yapısına göre daha yüksek olmasının olası nedenlerinden biri, ArchiCAD ortamında yapının kullanım günleri, kullanım süreleri, kullanıcı yoğunluğu ve işletme senaryoları gibi verilerin ayrıntılı biçimde tanımlanabilmesidir.

Buna karşılık BEP-BUY yazılımında hesaplamalar, seçilen yapı işlevine ait ön tanımlı parametreler üzerinden gerçekleştirilmektedir. Ayrıca ArchiCAD'in BIM tabanlı yapısı sayesinde çevredeki yapıların ve yakın çevre koşullarının modele dahil edilebilmesi, enerji performansı sonuçlarını etkileyebilen önemli bir avantaj olarak değerlendirilmektedir.

İki farklı yazılımın kullanım süreçleri incelendiğinde, BEP-BUY ortamında enerji performans analizinin gerçekleştirilebilmesi için mevcut projenin program içerisinde yeniden modellenmesinin gerektiği görülmüştür. Bu durum, BIM modeli üzerinden doğrudan analiz yapılabilen ArchiCAD EcoDesigner Star'a kıyasla iş akışını uzatmaktadır.

5. Sonuçlar

Binaların tükettiği enerji miktarı, küresel ısınmayı etkileyen önemli faktörlerden biridir. Yukarıda ifade edildiği gibi, Türkiye'de binaların enerji performansını değerlendirmek ve yapı kullanım izin sürecinde enerji kimlik sınıfını belirlemek amacıyla BEP-TR2 yazılımı kullanılmaktadır. Bu çalışmada, Türkiye'de yaygın olarak kullanılan bu yazılım, okul, ofis ve konut yapı tipleri üzerinden BIM tabanlı bir enerji analiz aracı olan ArchiCAD EcoDesigner Star ile karşılaştırılmış ve her iki ortamda enerji performans analizleri gerçekleştirilmiştir.

Analiz sonuçları, iki yazılımın aynı yapılar için farklı enerji tüketim değerleri üretebildiğini göstermiştir. İncelenen yapı türleri arasında, iki yöntem arasında en yakın sonuçlar konut yapısında elde edilmiştir. Buna karşılık ofis ve okul yapılarında daha yüksek farklılıklar ortaya çıkmıştır. Kullanıcı yoğunluğu, çalışma saatleri, iç kazançlar ve havalandırma gereksinimleri gibi parametrelerin daha karmaşık olduğu bu yapı türlerinde, yazılımların kullandığı varsayımlar ve hesaplama yöntemleri sonuçlar üzerinde daha belirgin bir etki yaratabilmektedir. Elde edilen farklılıkların hangi ölçüde yazılımların hesaplama motorlarından, hangi ölçüde ise kullanıcı tarafından tanımlanan girdi parametrelerinden kaynaklandığının ortaya konulabilmesi için, farklı yapı tipleri ve iklim koşullarını içeren daha geniş kapsamlı doğrulama ve karşılaştırma çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışma bu yönde gerçekleştirilecek olan daha kapsamlı bir araştırmanın ilk aşamasını oluşturmaktadır.

Çalışma kapsamında ayrıca modelleme süreçleri de değerlendirilmiştir. BEP-TR2 sisteminde enerji performansı analizinin yapılabilmesi için tasarımın program içerisinde yeniden oluşturulması gerekmektedir. Her ne kadar .DWG formatındaki çizimler referans olarak programa aktarılabilse de, BEP-BUY'ın çizim mantığı geleneksel CAD ve BIM yazılımlarından farklı olduğundan bu dosyaların önceden düzenlenmesi ve modelin yeniden tanımlanması gerekmektedir. Bu nedenle, enerji performans analizlerinde kullanılacak yazılımların değerlendirilmesinde yalnızca hesaplama sonuçlarının değil, modelleme verimliliği, veri sürekliliği ve iş akışına entegrasyon gibi faktörlerin de dikkate alınması gerekmektedir.

Bu çalışma, BIM tabanlı ArchiCAD EcoDesigner Star yazılımı ile Türkiye'de enerji kimlik belgesi hesaplamalarında kullanılan BEP-TR2 uygulamasının karşılaştırılmasıyla sınırlıdır. Gelecekte farklı enerji simülasyon yazılımlarının da araştırmaya dahil edilmesi, elde edilen sonuçların güvenilirliğinin değerlendirilmesine, karşılaştırmalı analizlerin genişletilmesine ve bulguların doğrulanmasına katkı sağlayacaktır.

Teşekkür

Bu makale, Antalya Bilim Üniversitesi Mimarlık Bölümü'nde yürütülmekte olan bir yüksek lisans tez araştırmasının bir parçasını oluşturmaktadır.

KAYNAKLAR

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). (1997). *ASHRAE handbook: Fundamentals (I-P ed.)*. ASHRAE.

- Aydın, Ö., ve Saylam Canım, D. (2017). *Evaluation of the usability of the building energy performance calculation method (BEP-TR1) and the EPC application*. Journal of Architecture and Life, 2(2), 265–277. <https://doi.org/10.26835/my.334594>
- Banks, J., Carson, J. S., Nelson, B. L., ve Nicol, D. M. (2010). Discrete-event system simulation (5th ed.). Prentice Hall.
- Begić, H., ve Galić, M. (2021). *A systematic review of Construction 4.0 in the context of the BIM 4.0 premise*. Buildings, 11(8), 337. <https://doi.org/10.3390/buildings11080337>
- Bilen, K., Urmamen, E., Topcu, M. T., ve Solmaz, I. (2020). *Evaluations on the energy identity certificate and the usability of the calculation method of building energy performance (BEP)*. Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences, 11(1), 103–113.
- Bonomolo, M., Di Lisi, S., ve Leone, G. (2021). *Building information modelling and energy simulation for architecture design*. Applied Sciences, 11, 2252. <https://doi.org/10.3390/app11052252>
- Çelebi, B. (2022). *An investigation on the analysis results of BIM-based building energy simulation software* (Master's thesis, Mimar Sinan Fine Arts University).
- Clarke, J. A. (2001). *Energy simulation in building design* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
- Erikci, S. N., ve Zorer Gedik, G. (2015). *Evaluation of building form transformation and zone number calculation in different climate regions within the scope of the BEP-TR building energy performance calculation method*. In Proceedings of the 12th National HVAC Engineering Congress (pp. 1367–1380), İzmir, Türkiye.
- European Parliament and Council. (2010). *Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast)*. Official Journal of the European Union.
- Gao, H., Koch, C., ve Wu, Y. (2019). *Building information modelling based building energy modelling: A review*. Applied Energy, 238, 320–343. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.032>
- Harputlugil, G. U., Yilmazoglu, M. Z., ve Unlu, G. (2019). *Assessing the reliability of Turkish building energy performance tool (BEP-TR2) by case tests*. E3S Web of Conferences, 111, 04052.
- International Energy Agency. (2025). *World energy outlook 2025*. IEA. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2025>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *Climate change 2023: Synthesis report. Summary for policymakers*. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf
- Keng Hoo, C., Alwi, M., ve Wahab, A. (2020). *Building energy analysis of a school building using Revit* (Vol. 2020).
- Maduta, C., D'Agostino, D., Tsemekidi-Tzeiranaki, S., Castellazzi, L., Melica, G., ve Bertoldi, P. (2023). *Towards climate neutrality within the European Union: Assessment of the Energy Performance of Buildings Directive implementation in Member States*. Energy and Buildings, 298, 113716. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113716>
- Maile, T., Fischer, M., ve Bazjanac, V. (2007). *Building energy performance simulation tools: A lifecycle and interoperability perspective*.
- Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change of the Republic of Türkiye. (2008). Regulation on energy performance in buildings (Legislation No. 13594). <https://mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=13594&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5>
- Reeves, T., Olbina, S., ve Issa, R. R. A. (2012). *Validation of building energy modeling tools: Ecotect™, Green Building Studio™, and IES™*. In C. Laroque, J. Himmelsbach, R. Pasupathy, O. Rose, ve A. M. Uhrmacher (Eds.), *Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference* (pp. 1–12). Winter Simulation Conference. <https://doi.org/10.1109/WSC.2012.6465319>
- Yilmaz, D. G., ve Cesur, F. (2023). *A study for the improvement of the energy performance certificate (EPC) system in Turkey*. Sustainability, 15(19), 14074. <https://doi.org/10.3390/su151914074>
- Zengin, B., Polat, H., ve Yurtcan, U. E. (2023). *Cost and material analysis of BEP-TR method usage for energy efficiency in Türkiye: An example model evaluation*. 4(2), 19–26. <https://izlik.org/JA35DL82DH>

Mimaride BIM ve Yapay Zeka Entegrasyonu ile Otomatik Yönetmelik Kontrolü Üzerine Bibliyometrik Analiz

Ceren Akarsu¹  ; Nuray Benli Yıldız²  ; Yakup Turan³ 
^{1,2,3}Düzce Üniversitesi

¹ceren214022@ogr.duzce.edu.tr; ²nuraybenli@duzce.edu.tr; ³yakup213950@ogr.duzce.edu.tr

Özet

Mimari tasarım süreçlerinde Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) kullanımının giderek standartlaşması ve resmi kurumlarca talep edilmesi, tasarımcıların iş akışlarını köklü bir biçimde dönüştürmüştür. Ancak tasarım çıktıların ve yapı modellerinin yerel imar yönetmeliklerine, yangın standartlarına, iş güvenliği kodlarına ve erişilebilirlik kriterlerine uygunluğunun denetlenmesi süreçleri, günümüz pratiklerinde halen büyük oranda manuel incelemelere ya da katı kurallara dayalı yarı-otomatik yöntemlere bağımlıdır ve uzun mesailer gerektirmektedir. Bu çalışma, temelde iki ayrı kavram olan BIM ve Yapay Zeka (AI) teknolojilerinin entegre edilerek, tasarım sürecine dahil edilen bir karar destek aracı ile Otomatik Yönetmelik Uygunluk Denetimi (ACCC-Automated Code Compliance Checking) sağlanmasının literatürdeki yansımalarını incelemektedir. Web of Science veri tabanından elde edilen yayınlar, VOSviewer ve Bibliometrix (RStudio) yazılımları kullanılarak bibliyometrik olarak analiz edilmiştir. Bulgular, manuel iş yükünü hafifleterek mimarların tasarımın özüne daha fazla vakit ayırmasını sağlayan AI destekli ACCC sistemlerinin, özellikle son yıllarda ivme kazandığını göstermektedir. Geleneksel kural tabanlı (rule-based) algoritmaların yerini giderek makine öğrenmesi ve doğal dil işleme destekli hibrit sistemlere bıraktığı görülmektedir. Bu bağlamda, incelenen makalelerin literatüre sunduğu yöntemler, yaklaşımlar ve öne çıkan arayüzler derinlemesine tartışılmıştır. Bibliyometrik analiz sonucunda, geleneksel kural tabanlı denetim yaklaşımlarının yerini giderek makine öğrenmesi, doğal dil işleme ve semantik zenginleştirme temelli yöntemlerin aldığı; araştırmaların ise özellikle 2019 yılı sonrasında belirgin bir artış gösterdiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yapı Bilgi Modellemesi (BIM), Yapay Zeka (AI), Otomatik Yönetmelik Kontrolü (ACCC), Semantik Zenginleştirme, Bibliyometrik Analiz.

A Bibliometric Analysis of Automated Code Compliance Checking Through the Integration of BIM and Artificial Intelligence in Architecture

Ceren Akarsu¹  ; Nuray Benli Yıldız²  ; Yakup Turan³ 
^{1,2,3}Düzce University

¹ceren214022@ogr.duzce.edu.tr; ²nuraybenli@duzce.edu.tr; ³yakup213950@ogr.duzce.edu.tr

Abstract

The increasing standardization of Building Information Modeling (BIM) in architectural design processes, along with its mandate by public authorities, has fundamentally transformed designers' workflows. However, the compliance checking of design outputs and building models against local zoning regulations, fire standards, occupational safety codes, and accessibility criteria remains heavily dependent on manual reviews or rigid, rule based semi-automated methods in current practice, requiring extensive labor hours. This study examines the literature on the integration of two distinct paradigms—BIM and Artificial Intelligence (AI) technologies—to achieve Automated Code Compliance Checking (ACCC) as a decision support tool embedded within the design process. Publications retrieved from the Web of Science database were subjected to bibliometric analysis using VOSviewer and Bibliometrix (RStudio) software. Findings indicate that AI-driven ACCC systems, which alleviate manual workloads and enable architects to devote more time to the core of design, have gained significant momentum, particularly in recent years. It is observed that traditional rule-based algorithms are gradually being superseded by hybrid systems augmented with machine learning and natural language processing (NLP). In this context, the methods, approaches, and prominent interfaces introduced to the literature by the reviewed articles are discussed in depth. The bibliometric analysis indicated a gradual shift from traditional rule-based compliance checking approaches toward machine learning-, natural language processing-, and semantic enrichment-based methods, with research activity in the field demonstrating a marked increase, particularly after 2019.

Keywords: Building Information Modeling (BIM), Artificial Intelligence (AI), Automated Code Compliance Checking (ACCC), Semantic Enrichment, Bibliometric Analysis.

1. Giriş

Mimarlık, Mühendislik ve İnşaat (AEC) sektörü, dijitalleşme ve Endüstri 4.0 entegrasyonu vizyonu doğrultusunda son yirmi yılda veri odaklı büyük bir paradigma değişimi yaşamaktadır. Bu dönüşümün merkezinde yer alan Yapı Bilgi Modellemesi (BIM), bir yapının yaşam döngüsü boyunca ürettiği tüm geometrik ve fonksiyonel bilgileri tek bir dijital veri tabanında toplayarak parametrik tasarım, çalışma analizleri ve maliyet yönetimi gibi alanlarda devrim yaratmıştır (Ghaffarianhoseini et al., 2017). AEC sektöründeki gelişmeler, uluslararası bazı yerel idarelerin talepleri; son yıllarda BIM araçlarının kullanımını arttırmıştır. BIM kullanımı tasarım süreçlerinde olumlu gelişim sağlamış olsa da projelerin yasal mevzuat, yönetmelik ve standartlara uygunluk gibi kontrollerinin denetlenmesi çoğunlukla manuel kontroller ile devam ettirilmektedir. Bina tasarımlarının yönetmeliklere uygunluğunun manuel yöntemlerle kontrol edilmesi; zaman kaybı, maliyet artışı ve insan hatası risklerini beraberinde getirmektedir (Eastman et al., 2009).

Bu kısıtlamaları aşmak adına literatürde "Otomatik Yönetmelik Uygunluk Denetimi" (Automated Code Compliance Checking-ACCC) sistemleri geliştirilmeye başlanmıştır. İlk jenerasyon ACCC sistemleri, mimari modellerdeki parametrik verileri belirli mantıksal süzgeçlerden geçiren katı kural tabanlı (rule-based) algoritmalar üzerine inşa edilmiştir (Eastman et al., 2009). Mimarlık, mühendislik ve inşaat (AEC) sektörü; çok disiplinli yapısı, karmaşık süreçleri ve yoğun mevzuat gereksinimleri nedeniyle çözülmesi güç problemler barındırmaktadır. Bu bağlamda Yapay Zeka (AI), Makine Öğrenmesi (ML), Derin Öğrenme (DL) ve Doğal Dil İşleme (NLP) teknolojileri; BIM tabanlı otomatik kural denetimi ve karar destek süreçlerinde önemli araçlar hâline gelmiştir. Son yıllarda AI tabanlı çözümlerin inşaat mühendisliği ve yönetimi alanında hızla yaygınlaşması, sektörde dijital dönüşümü hızlandırmış ve bu alandaki araştırmaların artmasına katkı sağlamıştır (Darko et al., 2020; Pan & Zhang, 2021). Yapay zeka entegrasyonu, mimari nesnelerin anlamsal olarak anlamlandırılmasını, eksik veri yapılarının akıllı çıkarımlarla tamamlanmasını ve karmaşık mevzuat metinlerinin otonom olarak bilgisayar diline çevrilmesini olanaklı hale getirmiştir (Baduge et al., 2022; Bloch & Sacks, 2018).

Akademik literatürde BIM ve AI kesişimindeki çalışmaların muazzam bir ivmeyle artması, bu alandaki entegrasyon yöntemlerinin, kullanılan yazılımların ve kavramsal eğilimlerin sistematik bir şekilde incelenmesini gerekli kılmaktadır. Bu çalışmanın amacı, BIM ve Yapay Zeka entegrasyonu ile yürütülen otomatik yönetmelik kontrolü araştırmalarını bibliyometrik ve kavramsal bir yaklaşımla haritalandırmaktır. Bu doğrultuda, Web of Science veri tabanından elde edilen geniş veri seti üzerinden bilimsel trendler, en etkin yayın organları, kavramsal tematik gelişimler incelenmiş; literatürün sunduğu teknik yöntemler, yapay zeka yaklaşımları ve endüstriyel arayüzler derinlemesine analiz edilerek tartışılmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

Bu araştırmada, bilimsel literatürün gelişim eğilimlerini ve kavramsal ilişkilerini nicel yöntemlerle incelemeye olanak sağlayan bibliyometrik analiz yöntemi benimsenmiştir. Analiz verileri, kapsamlı indeksleme yapısı ve ayrıntılı atıf metadeta bilgileri nedeniyle Web of Science (WoS) Core Collection veri tabanından elde edilmiştir.

Çalışmada kullanılan tarama stratejisi, hem BIM ve yapay zeka ilişkisini geniş ölçekte incelemek hem de otomatik yönetmelik kontrolü (Automated Code Compliance Checking – ACCC) alanındaki spesifik çalışmaları belirlemek amacıyla iki ayrı gelişmiş mantıksal arama dizimi üzerinden oluşturulmuştur.

Sorgu 1: BIM ve Yapay Zeka Kesişimi:

TS = (("building information modeling" OR "building information modelling" OR BIM) AND ("artificial intelligence" OR "machine learning" OR "deep learning" OR "neural network" OR AI OR "generative design"))

Sorgu 2: ACCC Odaklı Yönetmelik Kontrolü:

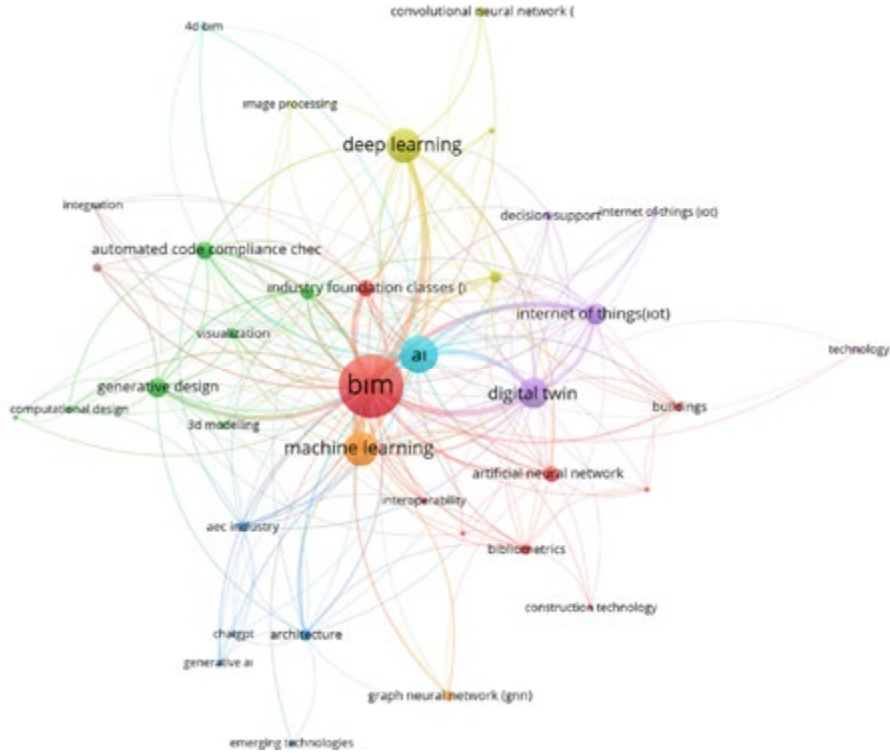
TS = (("building information modeling" OR BIM) AND ("code compliance" OR "rule checking" OR "automated rule checking"))

Elde edilen bibliyografik kayıtlar `.txt` formatlarında dışa aktararak analiz sürecine dahil edilmiştir. Verilerin performans analizleri, bibliyometrik göstergelerin hesaplanması ve bilimsel haritalama işlemleri için R programlama dili ekosisteminde geliştirilen açık kaynak kodlu Bibliometrix paketi ile bu paketin web tabanlı arayüzü olan Biblioshiny kullanılmıştır. Anahtar kelime ağları, birlikte kullanım (co-occurrence) analizleri ve yoğunluk temelli görselleştirmeler için ise VOSviewer (v1.6.20) yazılımından yararlanılmıştır. Elde edilen bulgular grafiksel olarak görselleştirilmiş ve sonraki bölümde akademik bir çerçevede değerlendirilmiştir.

3. Bibliyometrik Bulgular ve Görselleştirmeler

3.1. Veri Analizi

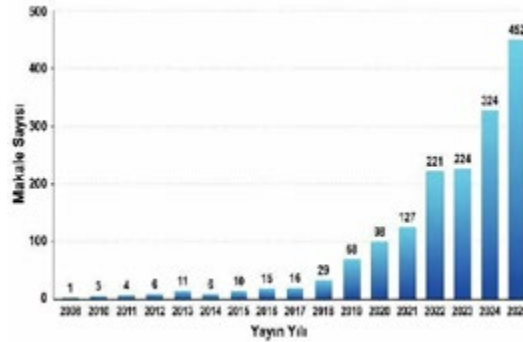
Veri setinin analizinde, birbirini tamamlayıcı özelliklere sahip olan VOSviewer ve R tabanlı Bibliometrix yazılımlarından yararlanılmıştır. Anahtar kelime eş-oluşum ağları ve kavramsal ilişkiler VOSviewer ile görselleştirilirken, literatürün performans göstergeleri ve tematik gelişimi Bibliometrix aracılığıyla analiz edilmiştir. VOSviewer ile oluşturulan eş-oluşum ağı incelendiğinde, literatürdeki kavramların belirli tematik kümeler etrafında yoğunlaştığı görülmektedir. Analiz sonuçları; BIM tabanlı veri yönetimi, birlikte çalışabilirlik, otomatik kural denetimi, yapay zeka, derin öğrenme ve dijital ikiz teknolojilerinin araştırma alanındaki temel odak noktalarını oluşturduğunu göstermektedir. Elde edilen ağ yapısı, BIM ekosisteminin yapay zeka destekli analiz, karar destek ve otomatik denetim mekanizmalarıyla bütünleşerek disiplinler arası bir araştırma alanına dönüştüğünü ortaya koymaktadır.



Şekil 1: Anahtar kelime eş-oluşumları

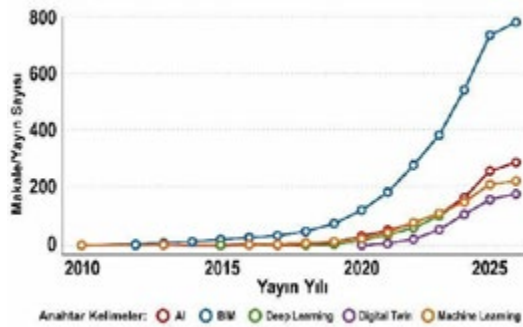
3.2. Yıllık Bilimsel Üretim ve Gelişim Trendi

Araştırma sorguları sonucunda elde edilen bibliyografik verilerin zamansal dağılımı incelendiğinde, alanın gelişim sürecinde belirgin bir kırılma noktası olduğu görülmektedir. 2010'lu yılların başına kadar BIM ve otomatik kural kontrolü çalışmalarının sınırlı sayıda kaldığı, ancak 2015 yılı sonrasında literatürde dikkate değer bir artış yaşandığı tespit edilmiştir. Özellikle 2019–2026 döneminde yayın sayılarında belirgin bir ivmelenme ve üstel büyüme eğilimi gözlemlenmiştir (**Şekil 2**). Bu artışın; derin öğrenme tabanlı yöntemlerin gelişmesi, hesaplama ve donanım kapasitelerinin güçlenmesi ile IFC gibi açık veri standartlarının yaygınlaşmasıyla ilişkili olduğu değerlendirilmektedir.



Şekil 2: Yıllara göre bilimsel üretim

Trend analizleri ve projeksiyon eğrileri, "Yapay Zeka" ve "Otomatik Denetim" kelimelerinin mimarlık literatüründeki ağırlığının her geçen yıl katlanarak arttığını ve konunun geçici bir popüleriteden ziyade mimarlık endüstrisinin ana akım araştırma rotası haline geldiğini ortaya koymaktadır (**Şekil 3**). Bu durum Şekil 2'de sunulan analitik trend projeksiyonu ile de desteklenmektedir.



Şekil 3: Anahtar kelimelere göre kümülatif bilimsel yayın sayılarının yıllara göre değişimi

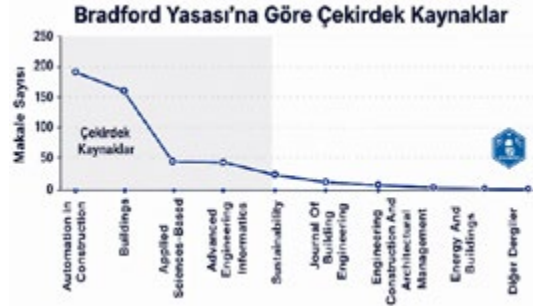
3.3. Kaynakların Analizi ve Bradford Yasası Çekirdek Dergiler

Alana ait yayınların hangi bilimsel kaynaklarda yoğunlaştığını belirlemek amacıyla Bradford Yasası analizi gerçekleştirilmiştir. Bradford Yasası, belirli bir araştırma alanındaki yayınların büyük bölümünü üreten sınırlı sayıda "çekirdek dergilerin" (core journals) tespit edilmesinde kullanılan temel bibliyometrik yaklaşımlardan biridir. Analiz sonuçlarına göre *Automation in Construction* dergisi, yayın sayısı, atıf yoğunluğu ve literatürdeki merkezi konumu bakımından alanın en önemli çekirdek dergisi olarak öne çıkmaktadır (**Şekil 4**). Bulgular, BIM, yapay zeka ve otomatik kural denetimi alanındaki çalışmaların önemli ölçüde bu dergi etrafında yoğunlaştığını göstermektedir.



Şekil 4: Bradford Yasası kapsamında en fazla yayın üreten ilk 15 dergi

Sektördeki dijitalleşme ve otomasyon odaklı araştırmaların temel yayın platformu konumunda bulunan bu çekirdek dergiye; daha geniş mimarlık, mühendislik ve yapı çevre perspektiflerini temsil eden "Buildings", "Applied Sciences" ve "Journal of Computing in Civil Engineering" dergileri ile sürdürülebilirlik eksenli çalışmalara odaklanan "Sustainability" dergisi takip etmektedir. Elde edilen bu hiyerarşik dağılım, Şekil 5'te sunulan Bradford Yasası analiz grafiğinde açık biçimde görselleştirilmektedir.



Şekil 5: Bradford Yasası kapsamında çekirdek kaynakların dağılımı

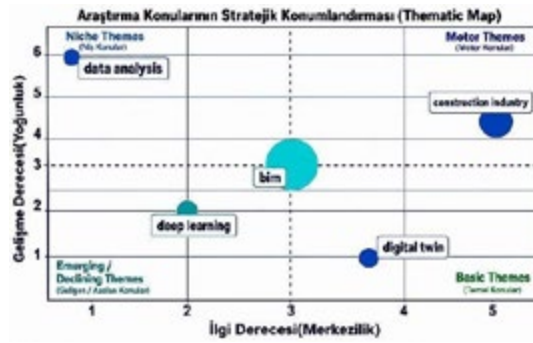
3.4. Kelime Analizleri ve Kavramsal Haritalama

Sektördeki entelektüel yapıyı anlamak adına yazar anahtar kelimeleri üzerinden "En Sık Kullanılan Kelimeler", "Estetik Kelime Bulutu" ve "Kelime Ortak Kullanım (Co-occurrence) Ağı" analizleri yapılmıştır. Kelime bulutu ve frekans görselleştirmelerinde en büyük boyuta sahip olan anahtarlar doğal olarak BIM, Building Information Modeling, Artificial Intelligence, Machine Learning ve Rule Checking terimleridir.



Şekil 6: Literatürde en sık kullanılan 20 anahtar kelimenin kullanım sıklığı dağılımı

Tematik Harita (Thematic Map) çıktısı incelendiğinde ise kavramların konumları alanın olgunluk düzeyini yansıtmaktadır. Geleneksel kural tabanlı algoritmalar (rule-based algorithms) ve statik çakışma analizleri artık "Temel Temalar" (Basic Themes) çeyreğine kaymıştır; yani bu teknolojiler alan için artık yenilikçi birer unsur olmaktan çıkıp standarda dönüşmüştür. Buna karşın, Büyük Dil Modelleri (LLM), Ontolojiler, Bilgi Grafikleri (Knowledge Graphs) ve Semantik Web Teknolojileri "Motor Temalar" (Motor Themes) yani alanı geleceğe taşıyan, gelişmişlik ve yoğunluk derecesi yüksek olan itici güçler olarak konumlanmaktadır (Şekil 7).



Şekil 7: Araştırma konularının stratejik konumlandırılması

3.5. Coğrafi Üretim Dağılımı ve İş Birlikleri

Ülkelere göre bilimsel üretim dağılımı incelendiğinde, BIM ve yapay zeka entegrasyonu alanında Çin Halk Cumhuriyeti'nin lider konumda olduğu, Çin'i ABD, Birleşik Krallık, Avustralya ve İtalya'nın takip ettiği görülmektedir (Şekil 8). Bulgular, alanın özellikle Asya-Pasifik bölgesi ve Kuzey Amerika merkezli gelişim gösterdiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 8: Ülkelere göre bilimsel üretim

4. BIM-AI ve ACCC Entegrasyonunda Yöntemler, Yaklaşımlar ve Arayüzler

Bibliyometrik bulguların ötesinde, incelenen literatürün Otomatik Yönetmelik Uygunluk Denetimi (ACCC) süreçlerine yönelik sunduğu yöntemsel yaklaşımların ve yapay zeka teknolojilerinin bu süreçlerdeki işlevsel katkılarının değerlendirilmesi önem taşımaktadır. Bu kapsamda çalışma; kural tabanlı sistemlerin işleyişi, yapay zeka destekli anlamsal zenginleştirme, üretken modellerin güncel kullanımları ve sektörel yazılım arayüzleriyle entegrasyonlar olmak üzere dört temel eksen üzerinden yapılandırılmıştır.

4.1. Kural Tabanlı Sistemlerin Mekanîği ve IFC Standartları

ACCC alanındaki en erken ve yaygın yaklaşımlardan biri, kural tabanlı (rule-based) denetim mekanizmalarıdır. Bu yaklaşımın teorik ve uygulama çerçevesi (Eastman et al., 2009) tarafından ortaya konmuştur.

Kural tabanlı sistemler, bina yönetmeliklerinde yer alan maddelerin bilgisayar tarafından işlenebilir mantıksal önermelere dönüştürülmesine dayanmaktadır. Bu süreçte, model verilerinin tescilli yazılım formatlarından bağımsız hâle getirilerek açık veri standardı olan IFC (Industry Foundation Classes) şemasına aktarılması önemli bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır (Boje et al., 2020).

(Eastman et al., 2009) tarafından tanımlanan iş akışı; kural yorumlama, model kontrolü, kural yürütme ve raporlama olmak üzere dört temel aşamadan oluşmaktadır. Bu sistemler özellikle geometrik ve sayısal verilerin açık biçimde tanımlandığı durumlarda yüksek doğrulukla çalışabilmektedir. Örneğin koridor genişliği gibi ölçülebilir parametreler, IFC şemasındaki nesne özellikleri üzerinden doğrudan sorgulanabilmektedir. Ancak bina yönetmeliklerinin doğal dil yapısı, yoruma açık ifadeler ve çok katmanlı koşul ilişkileri içermesi nedeniyle, her kuralın deterministik mantık yapılarıyla temsil edilmesi mümkün olmamaktadır.

4.2. İş Güvenliği ve Risk Analizinde Statik Kural Kontrolleri

Kural tabanlı ACCC sistemlerinin yalnızca bina tasarım süreçlerinde değil, şantiye güvenliği planlamasında da kullanıldığı dikkat çekmektedir. Bu kapsamda (Zhang et al., 2013) ve (Zhang et al., 2015) tarafından gerçekleştirilen çalışmalar, yüksekten düşme (fall hazard) risklerinin önlenmesine yönelik BIM tabanlı otonom güvenlik kontrol mekanizmalarına odaklanmıştır. Araştırmalarda, OSHA (Occupational Safety and Health Administration) iş güvenliği kuralları algoritmik denetim kurallarına dönüştürülmüş ve BIM modeli üzerinden potansiyel risk alanlarının otomatik olarak tespit edilmesi amaçlanmıştır.

Önerilen yöntemde, BIM modelindeki döşeme boşlukları (IfcOpeningElement) ve yapı kenarları belirlenerek bu veriler 4D BIM yaklaşımı kapsamında zaman boyutuyla ilişkilendirilmektedir. Böylece inşaat sürecinin hangi aşamasında hangi bölgelerde korkuluk (guardrail) gibi güvenlik önlemlerinin gerekli olduğu sistem tarafından otomatik olarak raporlanabilmektedir. Bununla birlikte, söz konusu kural tabanlı kontrollerin doğruluğu; BIM modelindeki geometrik tanımlamaların eksiksiz ve standartlara uygun biçimde oluşturulmasına büyük ölçüde bağlıdır.

4.3. Yapay Zeka Destekli Semantik Zenginleştirme (Semantic Enrichment)

Geleneksel IFC tabanlı veri aktarımlarında yaşanan en büyük problem, yazılımlar arası geçişlerde oluşan veri kaybı ve mimarın modeli tasarlarlarken nesnelere doğru anlamsal etiketleri (semantic tags) atamamış olmasıdır. Örneğin, bir çizimde dört duvar ve bir kapıdan oluşan mekanın bir "sığınak" mı yoksa "yatak odası" mı olduğunu Solibri gibi kural tabanlı bir yazılım sadece isme bakarak çözüyorsa ve isim girilmemişse kural kontrolü başarısız olmaktadır. Yapay zeka entegrasyonunun tasarıma kazandırdığı en büyük yeteneklerden biri bu noktada ortaya çıkan Semantik Zenginleştirme (Semantic Enrichment) yaklaşımıdır (Sacks et al., 2020). (Bloch & Sacks, 2018), konut projelerindeki oda tiplerinin otonom sınıflandırılması probleminde kural tabanlı çıkarım (rule-inferencing) ile Yapay Sinir Ağları (ANN) ve Destek Vektör Makineleri (SVM) gibi Makine Öğrenmesi (ML) algoritmalarını doğrudan kıyaslamışlardır. Kural tabanlı çıkarım sistemleri, mimarın çizim tarzındaki ufak değişikliklerde veya geometrik sapmalarda çökerken; makine öğrenmesi modelleri, nesnelerin birbirleriyle olan uzamsal ilişkilerini (topoloji) analiz ederek (örn. "eğer bu mekan ıslak hacme komşuysa ve belirli bir m² aralığındaysa mutfaktır") %90'ın üzerinde bir doğrulukla mahal tiplerini tahmin edebilmiştir. Yapay zeka, eksik veya hatalı modellenmiş BIM dosyalarını analiz edip anlamsal olarak zenginleştirerek, onları yönetmelik denetimine hazır kusursuz veri tabanlarına dönüştürmektedir.

4.4. Doğal Dil İşleme (NLP), LLM'ler ve Gerçek Zamanlı Tasarım Asistanlığı

Yapay zeka entegrasyonunun literatürdeki en güncel ve çığır açıcı evresi, metin tabanlı imar yönetmeliklerinin bilgisayar diline çevrilmesi sürecindeki insan müdahalesini tamamen ortadan kaldırmayı hedefleyen Doğal Dil İşleme (NLP) ve Büyük Dil Modelleri (LLM) yaklaşımlarıdır (Fernandes et al., 2024). Geleneksel yöntemlerde yazılım mühendisleri ve mimarlar bir araya gelerek yönetmelikleri elle koda dökerken, günümüzde üretken yapay zeka sistemleri bu metinleri doğrudan analiz edebilmektedir. (Fernandes et al., 2024) tarafından gerçekleştirilen araştırmada, Bina Bilgi Modelleri ile gerçek zamanlı diyalog kurabilen GPT tabanlı bir yapay zeka asistan mimarisi geliştirilmiştir. Bu sistemde, bulut tabanlı BIM sunucularındaki nesne verileri vektör veri tabanlarına aktarılmakta, LLM modelleri ise bir arayüz vasıtasıyla mimarın doğal dildeki sorularını algılayarak arka planda model geometrisini otonom sorgulamakta ve anlık uygunluk raporu üretebilmektedir. Bu durum, otomatik yönetmelik kontrolünü projenin sonunda yapılan statik bir onay aşaması olmaktan çıkarıp, mimarın tasarım geliştirme süreçlerinde anlık olarak danışabileceği dinamik bir karar destek mekanizmasına dönüştürmektedir.

4.5. Literatürde ve Endüstride Öne Çıkan Yazılım Ekosistemleri

Bibliyometrik analize dahil edilen çalışmaların metodoloji bölümleri incelendiğinde, teorik yaklaşımların uygulamaya aktarılmasında belirli yazılım platformlarının öne çıktığı görülmektedir. Özellikle Solibri Model Checker (SMC), Autodesk Revit API, Dynamo ve Navisworks; BIM tabanlı otomatik kural denetimi ve yapay zeka entegrasyonu çalışmalarında en yaygın kullanılan araçlar arasında yer almaktadır. Son yıllarda ise bulut tabanlı servisler ve API mimarileri doğrultusunda Autodesk Platform Services (APS) altyapısının literatürde daha görünür hâle geldiği dikkat çekmektedir (Fernandes et al., 2024).

5. Sonuç

Bu çalışmada, BIM ve yapay zeka entegrasyonu ile otomatik yönetmelik kontrolü (ACCC) alanındaki bilimsel literatür bibliyometrik analiz ve kavramsal değerlendirmeler çerçevesinde incelenmiştir. Elde edilen bulgular, alanın özellikle son yıllarda belirgin bir büyüme eğilimine girdiğini ve BIM, yapay zeka, derin öğrenme, dijital ikiz ve otomatik kural denetimi kavramlarının araştırma alanındaki temel tematik eksenleri oluşturduğunu göstermektedir. Literatürde öne çıkan çalışmaların büyük ölçüde yapay zeka destekli karar verme, semantik modelleme ve otomatik denetim mekanizmaları etrafında yoğunlaştığı görülmüştür.

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen değerlendirmeler, ACCC sistemlerinin ilk dönemlerde ağırlıklı olarak kural tabanlı ve deterministik yaklaşımlara dayandığını; güncel araştırmaların ise makine öğrenmesi, semantik zenginleştirme ve büyük dil modelleri gibi yapay zeka temelli yöntemlere yöneldiğini ortaya koymaktadır. Özellikle semantik zenginleştirme yaklaşımlarının, BIM modellerindeki eksik veya hatalı tanımlamaların otomatik olarak tamamlanmasına katkı sağlayarak yönetmelik denetim süreçlerini daha güvenilir ve verimli hâle getirdiği anlaşılmaktadır.

Geleneksel BIM tabanlı kontrol mekanizmalarının kendi iç dinamiklerinde çözmekte zorlandığı karmaşık uygunluk testlerinin, yapay zeka destekli sistemlerle birlikte daha otonom bir karar destek yapısına dönüşebileceği görülmektedir. Yapay zekanın sunduğu veri tamamlama, anlamsal çıkarım ve otomatik analiz yetenekleri; tasarımcıların manuel kontrol yükünü azaltırken, mekânsal kalite, kullanıcı deneyimi ve yapı detaylarına daha fazla odaklanabilmesine olanak sağlayabilecek önemli bir potansiyel sunmaktadır.

Bibliyometrik bulgular ve artan yayın eğilimleri, BIM ve yapay zeka entegrasyonunun gelecekte mimarlık, mühendislik ve inşaat sektörünün temel dijital dönüşüm bileşenlerinden biri hâline geleceğini göstermektedir. Bununla birlikte veri standardizasyonu, birlikte çalışabilirlik, model kalitesi ve yapay zeka tabanlı sistemlerin güvenilirliği gibi konular, alanın çözüm bekleyen temel araştırma problemleri arasında yer almaktadır. Gelecekteki çalışmaların; yönetmeliklerin makine tarafından işlenebilir yapılara dönüştürülmesi, bulut tabanlı denetim altyapılarının geliştirilmesi ve gerçek zamanlı yapay zeka destekli ruhsatlandırma sistemleri üzerine yoğunlaşacağı öngörülmektedir. Bu çalışma, BIM ve yapay zeka entegrasyonunun mevcut durumunu sistematik biçimde değerlendirerek gelecekteki akademik çalışmalar ve sektörel uygulamalar için bütüncül bir çerçeve sunmayı hedeflemiştir.

KAYNAKLAR

- 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. In *Automation in Construction* (Vol. 141). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104440>
- Bloch, T., & Sacks, R. (2018). Comparing machine learning and rule-based inferencing for semantic enrichment of BIM models. *Automation in Construction*, 91, 256–272. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.03.018>
- Boje, C., Guerriero, A., Kubicki, S., & Rezgui, Y. (2020). Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research. In *Automation in Construction* (Vol. 114). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103179>
- Darko, A., Chan, A. P. C., Adabre, M. A., Edwards, D. J., Hosseini, M. R., & Ameyaw, E. E. (2020). Artificial intelligence in the AEC industry: Scientometric analysis and visualization of research activities. In *Automation in Construction* (Vol. 112). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103081>
- Eastman, C., Lee, J. min, Jeong, Y. suk, & Lee, J. kook. (2009). Automatic rule-based checking of building designs. In *Automation in Construction* (Vol. 18, Number 8, pp. 1011–1033). <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2009.07.002>
- Fernandes, D., Garg, S., Nikkel, M., & Guven, G. (2024). A GPT-Powered Assistant for Real-Time Interaction with Building Information Models. *Buildings*, 14(8). <https://doi.org/10.3390/buildings14082499>
- Ghaffarianhoseini, A., Tookey, J., Ghaffarianhoseini, A., Naismith, N., Azhar, S., Efimova, O., & Raahemifar, K. (2017). Building Information Modelling (BIM) uptake: Clear benefits, understanding its implementation, risks and challenges. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 75, pp. 1046–1053). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.083>
- Pan, Y., & Zhang, L. (2021). Roles of artificial intelligence in construction engineering and management: A critical review and future trends. In *Automation in Construction* (Vol. 122). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103517>
- Sacks, R., Girolami, M., & Brilakis, I. (2020). Building Information Modelling, Artificial Intelligence and Construction Tech. *Developments in the Built Environment*, 4. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2020.100011>
- Zhang, S., Sulankivi, K., Kiviniemi, M., Romo, I., Eastman, C. M., & Teizer, J. (2015). BIM-based fall hazard identification and prevention in construction safety planning. *Safety Science*, 72, 31–45. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2014.08.001>
- Zhang, S., Teizer, J., Lee, J. K., Eastman, C. M., & Venugopal, M. (2013). Building Information Modeling (BIM) and Safety: Automatic Safety Checking of Construction Models and Schedules. *Automation in Construction*, 29, 183–195. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.05.006>

Yapı Bilgi Modelinin Varlık Yönetimi Modeline Dönüştürülme Sürecinde Veri İndirgenmesi

Emre Akdeniz¹ ; Salih Ofloğlu² 

¹BIMfarm; ²Antalya Bilim Üniversitesi

¹emre@bimfarm.net; ²salihofloğlu@antalya.edu.tr

Özet

BIM çalışma biçiminin kullanılmaya başlanması ile birlikte disiplinler arası veri alışverişinde yaşanan kayıpların önlenmesinin gerekliliği anlaşılmıştır. Özellikle imalat aşamasından sonra, var olan tasarım verisinin tesis ve varlık yönetimi safhasına yeterince aktarılamaması sebebiyle tesisin işletme sorunları ortaya çıkabilmektedir. Bu makale, yapıların tasarım, imalat, devreye alma ve kullanım sürecinde görev alan paydaşlar arası veri transferinde oluşabilecek kayıpların önlenmesi için bir yöntem önermektedir. Rafine edilmiş verinin hafiflemiş ve sayısal ortamda daha az yer kaplayan halinin kolay işlenebilir olmasına dikkat çekilmiştir. Veri kalitesi, birlikte çalışabilirlik, yapı bilgi modelleme, tesis yönetimi ve varlık yönetimi kavramları için sektörde kullanılan uluslararası standartlar ve yazılımlardan faydalanılmıştır. Çalışmada Revit programı içindeki paketlerden biri olan Dynamo ortamında, Dynamo düğüm noktaları ve buna ek olarak Dynamo içinde gömülü olan Python programlama dili yardımıyla 3 boyutlu modellerin manipüle edilerek sadeleştirilmesi amaçlanmıştır. Bir yapı bilgi modelinde yer alan LOD 300 veya üzerinde detay seviyesine sahip family modellerin Dynamo ortamına çağırılması, geometrik veri detay seviyesinin düşürülmesi, ortak BIM formatı olan ifc biçimine dönüştürülmesi amaçlanmıştır. Tesis yönetimi sürecinde kullanılabilecek yeterlikte anlamsal verinin geride bırakılmasına ya da üzerine eklenmesine çalışılmıştır. Elde edilen düşük boyuttaki ifc formatlı modelin tesis yönetimi yazılımında az yer kaplaması, kontrol ve sorgulama süreçlerinde verinin hızlı bir şekilde görselleştirilmesi sayesinde daha az elektrik enerjisi kullanımının meydana gelmesi beklenmektedir. Enerji sarfıyatı, halen elektrik üretimi için ağırlıklı fosil yakıt tüketilen bir ortamda karbon salımının düşürülmesine imkân vermesi öngörülmektedir. ifc biçiminin manipüle edilmesi sürecinde Dynamo düğümleri ve Python Sctript araçları kullanılmıştır. Yapının tesis yönetimi modelinin oluşturulması sürecinde nitelikli verinin süzülmesi ve geometrik veri ile birlikte anlamlı bir çıktı elde edilmesine odaklanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: BIM, Tesis Yönetimi, Varlık Yönetimi, Dynamo.

Data Reduction In The Process of Converting BIM to Asset Management Model

Emre Akdeniz¹ ; Salih Ofloğlu² 

¹BIMfarm; ²Antalya Bilim University

¹emre@bimfarm.net; ²salihofluoglu@antalya.edu.tr

Abstract

The adoption of Building Information Modeling (BIM) has highlighted the critical need to prevent data loss in interdisciplinary information exchange. Particularly after the construction phase, insufficient transfer of existing design data to the facility and asset management stage may lead to significant operational challenges. This paper proposes a method to minimize data loss during information transfer among stakeholders involved in the design, construction, commissioning, and operation phases of buildings. Special emphasis is placed on the processability of refined data in a lightweight format that occupies less storage space in digital environments. International standards and software widely adopted in the industry were utilized in addressing the concepts of data quality, interoperability, Building Information Modeling, facility management, and asset management. Within the scope of this study, three-dimensional models were manipulated and simplified using Dynamo node-based scripting and the Python programming language embedded within the Dynamo environment, which is an add-in package of Autodesk Revit. The study aimed to import LOD 300 or higher detail level family models from a building information model into the Dynamo environment, reduce the level of geometric data detail, and convert the resulting models into the Industry Foundation Classes (IFC) format as a common BIM exchange standard. Efforts were made to retain or append sufficient semantic data for use in facility management processes. The resulting low-size IFC model is expected to occupy less storage space in facility management software and enable faster data visualization during control and query processes, thereby contributing to reduced electricity consumption. In a context where fossil fuels remain the predominant source of electricity generation, this reduction in energy consumption is anticipated to facilitate a decrease in carbon emissions. Dynamo nodes and Python Script tools were employed throughout the IFC manipulation process. The study focused on filtering qualified data and producing meaningful output that integrates both semantic and geometric information for the development of a facility management model.

Keywords: BIM, Facility Management, Asset Management, Dynamo.

1. Giriş

Bir yapının tasarım, inşaat, kullanım ve yıkım aşamalarını içeren yaşam döngüsü sürecini yürüten Yapı Bilgi Modelleme (YBM) yöntemleri nitelikli tesis yönetimi için bir temel oluşturabilmektedir. 1960'lı yıllarda içerik tanımı yapılan ve önem kazanmaya başlayan tesis yönetimi faaliyetlerinde önceleri kâğıt belgeleme kullanılırken zaman içinde sayısal teknolojinin gelişmesi ile özelleştirilmiş yazılımlar tercih edilmeye başlanmıştır. Tasarım evresinde oluşturulan ve uygulama döneminde zenginleştirilen yapı bilgi modeli mahal ve varlık verilerini sayısal ortamda barındırmakta, buna ek olarak tesis ve varlık yönetimi için kullanılacak anlamsal veri bu modele yazılabilmektedir. Böylece yapının hizmet vermeye başlaması öncesinde bu nitelikli model yapının işletme birimine teslim edilerek nitelikli bir tesis yönetimi yapılabilmesi için temel oluşturulmaktadır. Bu işlemlerin gerçekleştirilebilmesi için süreci takip ve kontrol eden standartların uygulanması ve farklı disiplinler arasında sayısal veri aktarımının en az kayıpla sağlanması gereklidir.

1.1. Yapı Verimliliği Kontrol Süreçleri

İnşaat projelerinde kavramsal tasarımdan işletme aşamasına kadar geçen süreçte beklenen verimin alınabilmesini sağlamak amacıyla bazı kontrol süreçleri geliştirilmiştir. Bunlardan en yaygın olanı Birleşik Krallık'ta hazırlanmış ve uygulanmakta olan Government Soft Landing adlı bir destek programdır. Kısaca GSL olarak ifade edilen bu uygulama aşağıdaki başlıkların bu süreçte yönetimi ve kontrolü için kullanılmaktadır (UK BIM Framework, 2019).

- Fonksiyonellik ve Etkinlik: kullanıcı ihtiyaçlarının karşılanması
- Çevresel Verimlilik: enerji, su tüketimi ve atık yönetimi hedeflerine ulaşım
- Maliyet Verimliliği: inşaat ve işletme maliyetlerinin planlama ve kontrolü
- Tesis Yönetimi: yapıların fiziksel ve mali açılarından verimli şekilde yönetimi
- Devreye Alma, Eğitim ve Teslim: elektromekanik sistemlerin aktifleştirilmesi ve bu konuda gereken eğitimlerin verilmesi

Yapıların tasarım ve inşaat safhalarından devreye alma ve işletim aşamalarına geçişte binadan verim alınabilmesi için uygulanan diğer bir sistematik süreç ise ABD'de geliştirilmiş olan ve yapının tüm bileşenlerinin devreye alınması amacıyla geliştirilen Total Building Commissioning (TBC) prensiplerini kapsamaktadır. TBC aşamaları aşağıda sıralanmıştır.

- Ön Çalışma: tasarımı gözden geçirme ve dokümantasyon hazırlama
- İşlevsel Testler: sistemlerin planlı şekilde çalışmasını doğrulama amaçlı yapılan kontroller
- Devreye Alma: tüm elektromekanik sistemlerin test edilmesi ve optimize edilmesi
- İşletmeye Geçiş: eğitim, işletme ve bakım planları, uzun vadeli performans izleme

Government Soft Landing (GSL) ve Total Building Commissioning (TBC) uygulama programlarının birbirleri ile kesiştiği noktalar bulunmakla birlikte yapının yaşam döngüsündeki etkinliklerin devamlılık gösteren parçaları olduğu düşünülebilir. GSL tasarım aşamasından işletme başlangıcına kadar olan süreci, TBC ise devreye alma işlevinin hazırlıkları ve işletme devamlılığına odaklanmaktadır. Bu iki etkinlik arasında BIM çalışma biçimi kullanılabilmekte ve etkinlikler arası *süreklilik* sağlanabilmektedir. Bahsi geçen sürekliliğin en verimli şekilde gerçekleştirilmesi için disiplinler arası veri aktarımının mümkün olan en az kayıpla tamamlanması gereklidir.

1.2. Veri Kayıpları

Geleneksel yöntemlerle yürütülen inşaat projelerinin tasarım, planlama, inşaat ve işletme aşamalarında sıklıkla veri kayıpları meydana gelmektedir. Bu evre geçişleri sırasında bilgi aktarımındaki eksiklikler, projede zaman ve maddi kayıplara yol açmaktadır (Şekil 1).

Bu sorunların temel nedeni, disiplinler arası veri aktarımındaki başarısızlıklardır. Yapı yaşam döngüsünde farklı paydaşların ürettiği anlamsal ve geometrik veri etkin şekilde aktarılamadığında, verilerin tekrar oluşturulması zorunlu hale gelmektedir. Bu olumsuz sonuç iş akışının aksamasına ve proje sürecinin uzamasına neden olmaktadır. BIM literatüründe birlikte-çalışabilirlik, farklı uygulamalar arasında veri alışverişinin sorunsuz ilerlemesi olarak tanımlanmaktadır.

Sonuç olarak, disiplinler arası veri paylaşımındaki eksiklikler, BIM'in etkinliğini düşürmekte ve projelerde ek maliyetlere sebep olmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD) bulunan Ulusal Teknoloji ve Standartlar Enstitüsü'nün (NIST) hazırladığı 2004 yılı raporunda inşaat projelerinde paydaşlar arası veri aktarımının yetersizliği sebebiyle 2002 yılında ABD'deki maddi zararın 15.8 milyar dolara ulaştığı belirtilmektedir (NIST, 2004).



1.3. Veri Aktarımı Gereksinimi

BIM çalışma biçiminde bir disiplin tarafından hazırlanmış geometrik ve anlamsal veriyi farklı bir disipline aktarabilmek için veri dönüşümü gereklidir. Disiplinlerin kullandıkları yazılımlar ya da görev içeriklerinin farklılaşması sebebiyle veri okumalarında format dönüşümleri gerekebilir. Örneğin, yapı bilgi modelinde yer alan bir varlık modeli tesis yönetimi modeli olarak kullanılacağı durumda, TY için kullanılan yazılımın okuyabileceği formata dönüştürülmelidir. Buna ek olarak işletme senaryolarına cevap verebileceği şekilde yeni anlamsal verinin bu model üzerine yazılmasına açık olabilmelidir.

1.4. Veri Aktarım Türleri

BIM çalışma biçiminde sıklıkla kullanılan ortak veri dönüşüm formatları aşağıda listelenmiştir.

- Açık Standartlar: IFC, COBie, gbXML
- Özel Yazılımlar: Navisworks (.nwc), AutoCAD (.dwg, .dxf)
- Bulut ve API Çözümleri: Speckle, Autodesk Platform Services, Trimble Connect
- Açık Kaynak Yazılımları: BlenderBIM, Rhino.Inside

2. Varlık Yönetimi ve ifc Formatı

Varlık Yönetimi, bir tesiste bulunan ve bu tesisin faaliyetlerine hizmet eden, elektro-mekanik olan ve olmayan tüm nesnelerin işletim programıdır. Tesisten beklenen verimin alınabilmesi için tüm varlıkların doğru bir şekilde listelenmesi, amacına uygun şekilde kullanılması, bakımlarının düzenli olarak yapılması ve arıza olduğu durumda hızlı bir şekilde onarımının gerçekleştirilmesi gereklidir. Bu tür işlemler Varlık Yönetimi kapsamındadır. BIM destekli yürütülen inşaat projelerinde Yapı Bilgi

Model süreçlerinin Varlık Yönetimi ile tümleşik çalışması durumunda işletmeye alma ve bakım-onarım faaliyetlerinin daha hızlı değerlendirildiği gözlemlenmiştir (Eastman ve ark., 2018).

BIM kapsamında hazırlanan geometrik model ve anlamsal verinin Varlık Yönetimi yazılımlarına aktarımı veri dönüşümü ile gerçekleştirilmektedir. Sektörde en çok kullanılan veri dönüşüm formatı ifc olarak bilinmektedir. ifc, Industry Foundation Classes sözcüklerinin kısaltması olup Yapı Bilgi Modelleme uygulamalarında çok kullanılan bir ortak dosya formatıdır Bina ve altyapı projelerinde kullanılan bileşenlerin sınıflandırılarak sayısal ortamda tanımlanmasını amaçlamaktadır (Wikipedia, 2023).

2.1. ifc Formatının Olumsuz Özellikleri

Model verisi dönüşümünde en çok kullanılan format olsa da ifc'nin beklentileri eksiksiz bir şekilde karşıladığı söylenemez. Farklı yazılımlar arası veri dönüşümünde veri kayıpları, parametrik bilgilerin tam taşınamaması, malzeme ya da anlamsal verinin kısmen aktarılabilmesi gibi olumsuz sonuçlarla karşılaşabilmektedir (buildingSMART, 2024; BIM Corner, 2021).

2.2. Revit ve Dynamo Birlikteliği

Dynamo, Revit program içinde kullanılan bir görsel programlama platformudur. 2011-2012 yılları arasında Ian Keough tarafından geliştirilmeye başlanmış ve oldukça üretken bir araç olması sebebiyle 2015 yılından itibaren Autodesk tarafından tamamen Revit içinde yüklü olarak kullanılmasına karar verilmiştir.

2.3. ifc / Dynamo / Varlık Yönetimi

Yapı Bilgi Modelinde bulunan varlık modellerinin Tesis Yönetimi yazılımına aktarımında her bir modele ait kimlik belirleyicisi, geometrik bilgi, veri setleri ve yaşam döngüsü bilgileri yer almaktadır. Revit ortamında geometrik model üzerine eklenen bu nitelikli anlamsal veriler, Tesis Yönetimi yazılımında süzülmuş ve sınıflandırılmış bir işletme programı haline getirilmelidir. Bu çalışma, bahsedilen sürecin gerçekleştirilebilmesi için bir yöntem önerisi getirmektedir.

IFC, Dynamo ve Varlık Yönetimi birlikte kullanıldığında:

- Veri kaybını önler ve tutarlılığı artırır.
- Otomatik süreçler sayesinde hız ve doğruluk sağlar.
- Bina yaşam döngüsü boyunca verimli bir varlık yönetimi yapılmasına olanak tanır.
- Bu üçlü entegrasyon, modern bina yönetiminde verimlilik, sürdürülebilirlik ve maliyet tasarrufu sağlar.

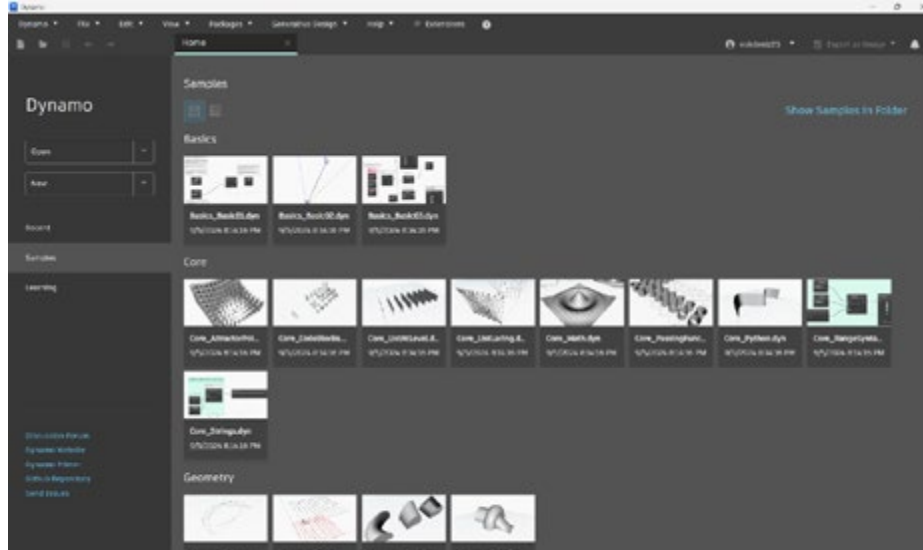
Ifc, yapısı gereği hem geometrik hem de anlamsal bilgi içermektedir. Bu bilgiler tasarım ve inşaat uygulama aşamalarında faydalı olabilir fakat devam eden süreçte işletme aşamasına gelindiğinde ise gerekli olmayabilir. Örneğin uygulama detayı açısından zenginlik gösteren bir model, tesis yönetimi yazılımında modeli ağırlaştırabilir ya da inşaat sürecinde imalata yönelik bilgiler barındıran bir ifc modelin tesis yönetimi sürecinde bu türde bilgilere gerek duyulmayabilir.

3. Model Sadeleştirme Önerisi

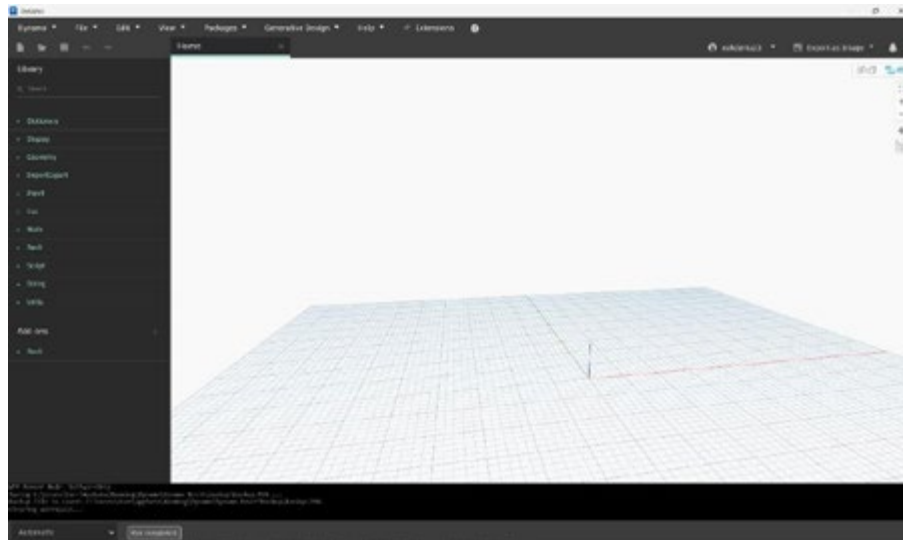
Yapı bilgi modelinde yüksek yoğunlukta veriye sahip bir ifc modelin varlık yönetimi modeline dönüştürülmesinde sadeleştirme gerekebilir. Revit ortamı içine çekilmiş bir model Dynamo komutları ile Dynamo ekranında görüntülenebilmektedir. Dynamo komutları ile bu modelden geometrik ve anlamsal veri ayrıştırması yapılabilecek şekilde veri çekilebilmektedir. Veri ayrıştırması yapıldıktan sonra, geometrik ve anlamsal verinin sadeleştirilmesi işlemine geçilmektedir.

3.1. Dynamo Ortami

Model Revit sahnesi içine çağırıldıktan sonra Revit üst menüden Manage > Dynamo seçimi ile yazılımın arayüzüne ulaşılmaktadır (Şekil 2). Gelen Dynamo açılış ekranında File > New > Home Workspace yolu izlenerek yeni bir çalışma ekranı açılmaktadır (Şekil 3).



Şekil 2: Dynamo açılış ekranı (Yazar arşivi)



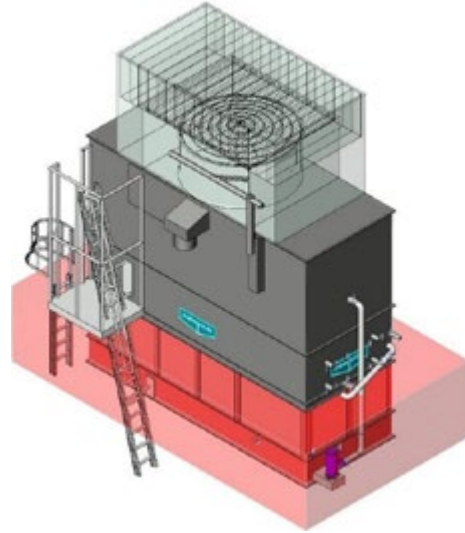
Şekil 3: Dynamo yeni çalışma ekranı (Yazar arşivi)

3.2. Geometrik Veri Sadeleştirme

Revit ortamındaki yüksek LOD'ye sahip bir modelin TY yazılımına aktarılması sırasında aynı detay seviyesinde bulunma zorunluluğu olmayabilir. TY yazılımı, işletme ve bakım odaklı çalışma formatına sahiptir ve tesis içindeki bir varlığın gerçekçi bir modeline gereksinimi yoktur, şematik bir gösterim yeterli olabilmektedir. Makale için seçilen örnekte Evapco markasına ait bir soğutma kulesinin modeli seçilmiştir (Şekil 4), (Evapco, 2026). Bu modelin seçilme sebebi, daha önce makale yazarları tarafından hazırlanan ve BIM destekli tesis yönetimi içerikli yüksek lisans tezinde yer alan bir vaka çalışmasında kullanılmış olmasıdır (Akdeniz, 2023). Ayrıca söz konusu model, parametrik modelleme standartlarını sağlayan detaylı bir Revit family nesnesi olma özelliğini göstermektedir (Şekil 5).

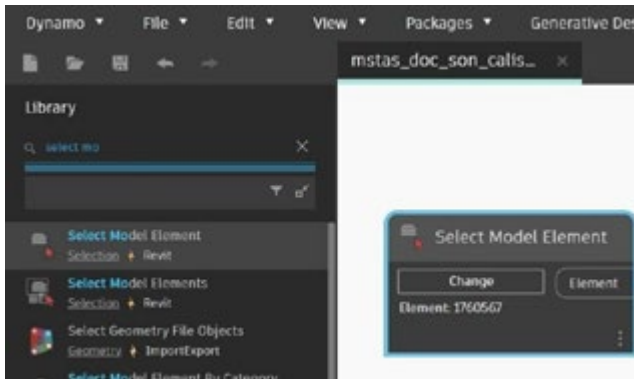


Şekil 4: Soğutma Kulesi – Cooling Tower (Yazar arşivi)

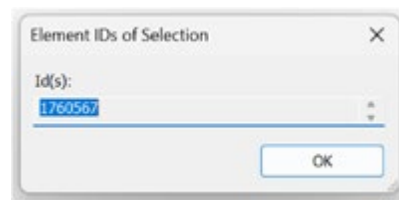


Şekil 5: Family nesne görünümü (Yazar arşivi)

Dynamo sahnesi başlangıçta Revit ekranından bağımsız bir arayüz olarak çalışmaktadır. İki ortam arasında bağ kurabilmek için Revit sahnesindeki modelin Dynamo ortamında tanıtılması gerekmektedir. İşlem yapılacak modelin Dynamo sahnesine çekilebilmesi için *Select Model Element* komutu kullanılmıştır (Şekil 6). Komutun adında yer alan *Element* ifadesi, yapısında hem geometrik hem de anlamsal veri barındıran modelleri tanımlamak için kullanılmaktadır. Dynamo ortamında bu tür ayrımlara önem verilmektedir.



Şekil 6: Select Model Element komutu (Yazar arşivi)

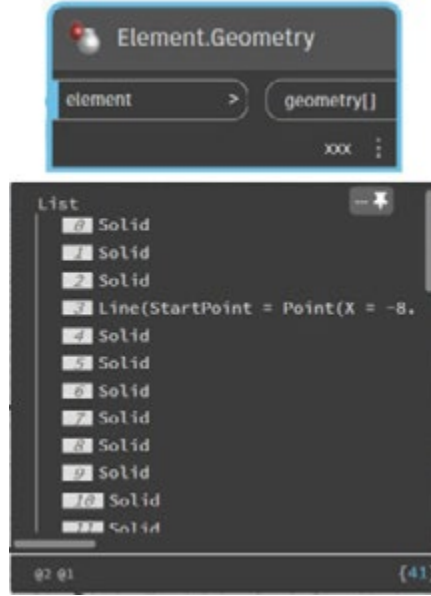


Şekil 7: ID no görünümü (Yazar arşivi)

Select Model Element komutu ile nesne Revit ekranında seçim yapıldığı durumda, Dynamo ekranında tanınır ve Element ID numarası bu pencerede görülür. Kullanılan örnekte 1760567 no'lu ID numarası seçilen soğutma kulesi modeline aittir. Aynı ID numarası Revit ekranında aynı model seçili halde iken Revit üst menü > Manage > Inquiry > IDs of Selection seçimi ile görülebilmektedir (Şekil 7).

Seçilen elementi hem Dynamo ekranında görebilmek hem de modelin geometrisi üzerinde işlem yapılabilir bir formata çevirebilmek için *Element.Geometry* komutu kullanılmıştır. Bu komut Element'in görsel/fiziksel formunu sayısal veriye dönüştürür ve manipüle edilebilir hale getirir.

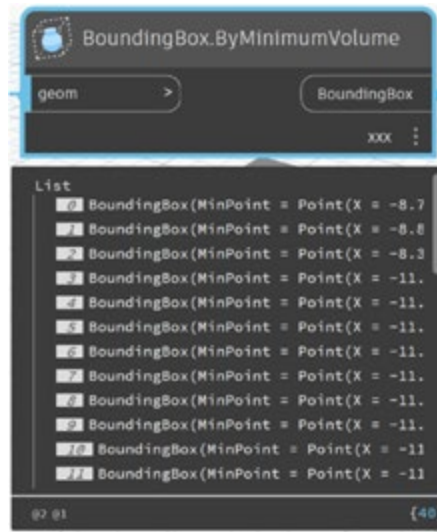
Makalede hedeflenen veri hafifletmesi için ilk aşama Element'in Geometry'e dönüştürülmesidir (Şekil 8).



Şekil 8: Element.Geometry komutu ve geometri içeriği (Yazar arşivi)

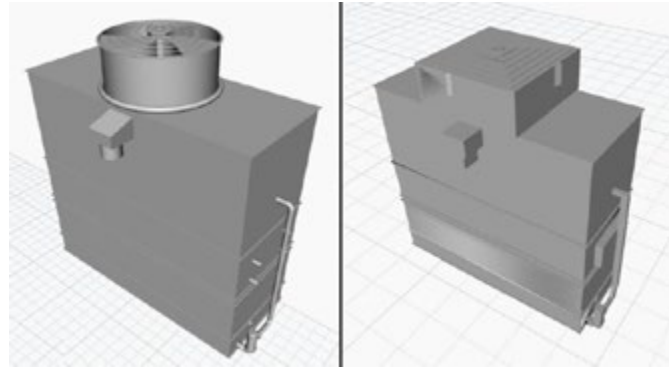
Element.Geometry komutunun alt tarafında görülen pencere, geometrinin içeriğini yansıtmaktadır. Pencerenin sağ alt köşesinde bulunan 41 sayısı, geometri içeriğindeki bileşen sayısını ve listelenmiş haldeki Solid yazıları ise bu bileşenlerin tipini belirtmektedir.

Bu işlemden sonra uygulanacak en önemli ikinci işlem ise bu bileşenlerin Bounding Box komutu ile sadeleştirilmesin sağlanmasıdır. Bounding Box ifadesi çoğu modelleme programında karşılaşılan bir özelliktir. Bounding Box, bir 3 boyutlu nesneyi tam olarak içine sığacağı şekilde sınırlayan en küçük dikdörtgenler prizması yani bir kutudur. Nesnenin gerçek geometrisinin yerine kapladığı uzaydaki sınırlarını görselleştirir. Dynamo ortamında komut arama satırına BoundingBox sözcüğü yazılınca çok sayıda seçenek görülebilmektedir. Bunun sebebi ise farklı nesne ya da geometri özelliklerine ya da Dynamo sahnesindeki durumuna göre farklı tiplere sahip olmasıdır. Bu çalışmada *BoundingBox.ByMinimumVolume* komutu kullanılmıştır (Şekil 9).



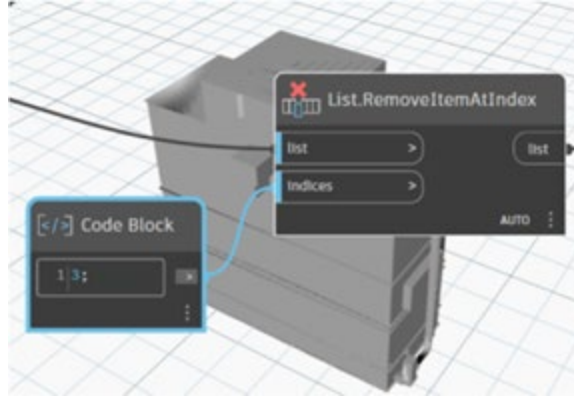
Şekil 9: BoundingBox.ByMinimumVolume komutu (Yazar arşivi)

Böylece her bir Solid nesne kendi içinde sınırlayıcı kutusu içerisinde kalabilecektir. Bu işlemin önemi, dairesel ya da organik formlara sahip modellerde çok sayıda vertex'e sahip olması durumunda bu bileşenlerin kutu formlarına çevrilerek vertex yoğunluğunun azaltılmasına dayanmaktadır (Şekil 10). Bu aşamada Dynamo araçları kullanılarak, geometrik modeli oluşturan her bir bileşen kendi hacimsel sınırları içinde ve daha az sayıda vertex'ten oluşacak şekilde sadeleştirilmiştir.



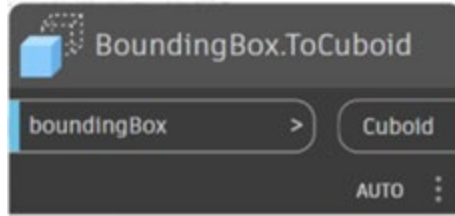
Şekil 10: BoundingBox komutu sonrasında modeldeki değişim (Yazar arşivi)

Şekil 9 incelendiğinde listenin sağ alt köşesinde 40 yazdığı görülmektedir. Şekil 8'deki 41 adet öge burada 40'a inmiştir. Bunun sebebi, Şekil 8'deki 3 no'lu indisin Bounding Box'a geçiş aşamasında hata vermesinden dolayı listeden çıkarılmasıdır. Tümü Solid özellikte olmadığı için bu aşama gereklidir. Bu işlem *List.RemoveItemAtIndex* komutu ile sağlanmıştır (Şekil 11).



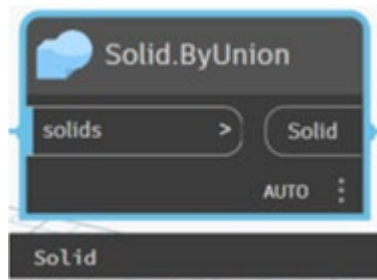
Şekil 11: BoundingBox komutu 3 no'lu indisin kaldırılması (Yazar arşivi)

BoundingBox ile elde ettiğimiz ürün artık bir sanal nesnedir. Bir sonraki işlem BoundingBox ile elde edilen geometrinin *BoundingBox.ToCuboid* komutu ile liste yapısından tekrar geometri özelliğine çevrilmesi şeklinde olacaktır (Şekil 12).



Şekil 12: BoundingBox.ToCuboid ile listeden geometry'e dönüşüm (Yazar arşivi)

Bir sonraki işlem, parçalanmış haldeki Solid bileşenlerinin tek bir listede toplanması ve ürünün Dynamo' tarafından tek bir nesne olarak tanınması şeklinde olacaktır. Bu işlem için Solid birleştirmesini sağlayan *Solid.ByUnion* komutu kullanılmıştır. Bu noktada dikkat edilmesi gereken değişim, komut penceresinin altında yalnızca bir adet Solid nesnesinin görülmesidir. Daha önce 40 adet olarak görülen bileşen bu komut ile tek bir nesneye dönüşmüştür (Şekil 13).



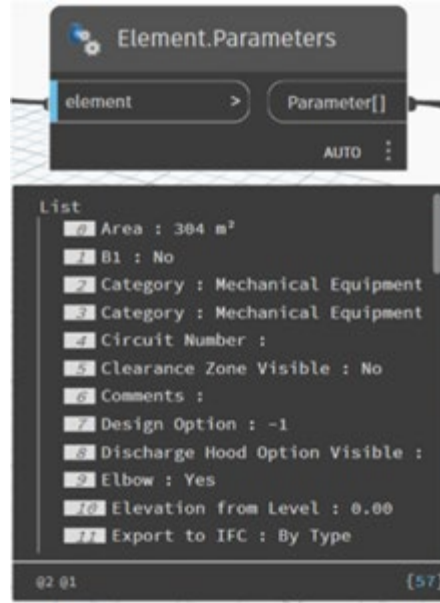
Şekil 13: Solid.ByUnion ile tek bir nesneye dönüştürme (Yazar arşivi)

3.3. Anlamsal Veriyi Sadeleştirme

Modelde yüksek detay seviyesine sahip geometrik veri bulunduğu gibi, detaylı anlamsal veri de bulunabilmektedir. Bu tür veriler çoğunlukla metinsel özelliktedir ve yapı bilgi modelinin oluşturulması sürecinde imalata yönelik bilgiler taşıyabilmektedir. Örnek olarak 4D planlama verileri, şantiye safhaları, yapım sırası, metraj verileri ve birim fiyat bilgileri gibi imalata yönelik bilgiler tesis yönetimi aşamasına geçildiği durumda görevini tamamlamış ve önemsiz hale gelmiş olur. Varlık

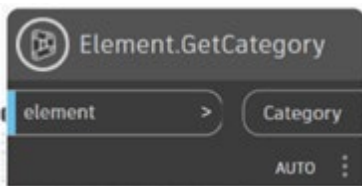
yönetimi sürecinde, söz konusu nesnenin görevi, sınıfı, imalat yılı, garanti bilgileri, teknik özellikleri gibi bilgilere sahip olmak işletme ve bakım faaliyetleri açısından gereklidir. Tesis yönetimi yazılımı için kullanılacak modelde, işlevini yitirmiş verilerin temizlenerek gerekli olanların bırakılması ve varlık yönetimi için lazım olan yeni bilgilerin yazılması, tesis yönetimi yazılımının verimli kullanılmasını sağlamaktadır.

Bu aşamada ilk family modelin temel özelliklerinin korunması tercih edilmiştir. İlk family modelin özelliklerinin alınabilmesi için *Element.Parameters* komutu kullanılmıştır. Bu listede 57 adet anlamsal veri satırı bulunmaktadır ve tümü family modele aittir (Şekil 14).

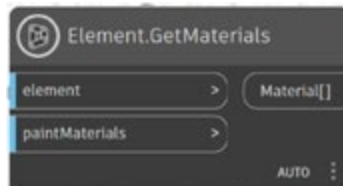


Şekil 14: Element.Parameters ile family model özelliklerinin edinimi (Yazar arşivi)

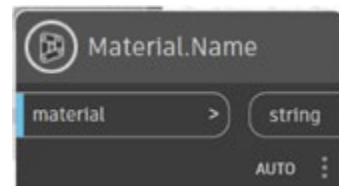
Bunlara ek olarak *Element.GetCategory*, *Element.GetMaterials* ve *Material.Name* özellikleri ilk family modelden alınarak yeni modele eklenmesi tercih edilmiştir (Şekil 15, Şekil 16, Şekil 17).



Şekil 15: Element.GetCategory



Şekil 16: Element.GetMaterial



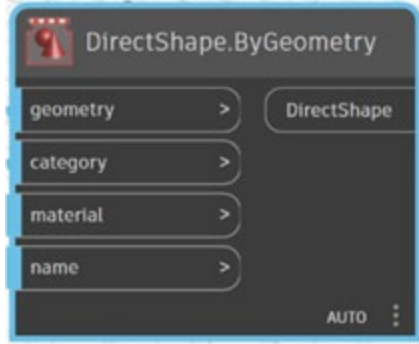
Şekil 17: Material.Name

Bu özelliklerin korunması tamamen çalışmayı yürüten kişinin kararlarına bağlıdır. Ayrıca tüm bu özellikler liste haline getirilerek istenilen özellikler silinebilmekte ve düzenlenmesi gereken değerler korunabilmektedir.

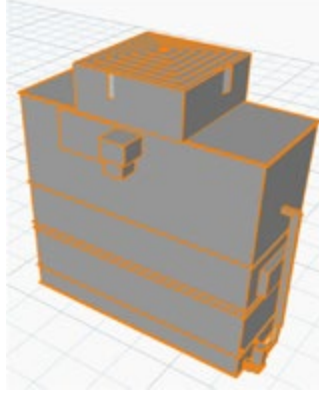
3.4. Geometrik ve Anlamsal Veri Birleşimi

Sadeleştirilen geometri ve anlamsal veri yine Dynamo kullanılarak tekrar birleştirilir ve anlamsal veriye sahip bir 3 boyutlu model oluşturulur ve Revit ortamına tekrar yüklenebilir ya da doğrudan tesis yönetimi yazılımına çağrılabilir. Hem geometrik hem de anlamsal bilgi olarak daha az yüklü model, tesis yönetimi yazılımının daha hızlı, daha verimli ve daha az enerji harcayarak çalışmasını

sağlayabilir. Elde edilen geometrik ve anlamsal verinin tekrar Element olarak çıktı alınabilmesi *DirectShape.ByGeometry* komutu kullanılır (Şekil 18).



Şekil 18: DirectShape.ByGeometry (Y.a.)



Şekil 19: Element ürünü (Y.a.)



Şekil 20: Python Script

Şekil 15, 16 ve 17’de verilen *Element.GetCategory*, *Element.GetMaterials* ve *Material.Name* özellikleri ile Şekil 14’te verilen Geometry çıktısı birleştirilerek tek bir Element elde edilebilmektedir (Şekil 19). Bu işlemde sonra Element üzerinde bir anlamsal veri girişi yapılmak istenebilir. Çalışmanın bu aşamasında Dynamo’nun etkin özelliklerinden biri olan *Python Script* aracı kullanılmıştır (Şekil 20). *Python Script*, standart Dynamo komutlarının yetersiz kaldığı durumlarda, bir iş akışının bir algoritma ile tamamlanmasını sağlamaktadır. Şekil 20’de görülen

IN[0]: Modele ait Geometriyi işaret eder.

IN[1]: Revit ekranında Modele ait Identity Data bölümündeki Mark değerini gösterir.

IN[2]: Revit ekranında Modele ait IFC Parameters bölümündeki IfcDescription değerini gösterir.

IN[3]: Revit ekranında Modele ait Identity Data bölümündeki Comments değerini gösterir.

IN[4]: Revit ekranında Modele ait IFC Parameters bölümündeki IfcName değerini gösterir.

Bu satırlar çalışmayı yapan kişinin tercihidir ve hangi satırların tanımlanması gerektiğine çalışmayı yapan kişinin kararlarına bağlıdır. Tüm ayarlamalar Python Script penceresinde yazılan Python kodu ile oluşturulmaktadır (Şekil 21).



Şekil 21: Python Script penceresi (Yazar arşivi)

Yazılan Python kodu aşağıda verilmiştir.

```
import clr
clr.AddReference('RevitAPI')
clr.AddReference('RevitServices')
from RevitServices.Persistence import DocumentManager
from RevitServices.Transactions import TransactionManager
from Autodesk.Revit.DB import *

doc = DocumentManager.Instance.CurrentDBDocument
element = UnwrapElement(IN[0])

# Identity Data değerleri
mark_value = IN[1]
description_value = IN[2]
comments_value = IN[3]
ifcName_value = IN[4]

TransactionManager.Instance.EnsureInTransaction(doc)

params = {
    "Mark": mark_value,
    "Description": description_value,
    "Comments": comments_value,
    "IfcName": ifcName_value, # IFC'de Name olarak görünür
    "IfcDescription": description_value # IFC'de Description olarak görünür
}

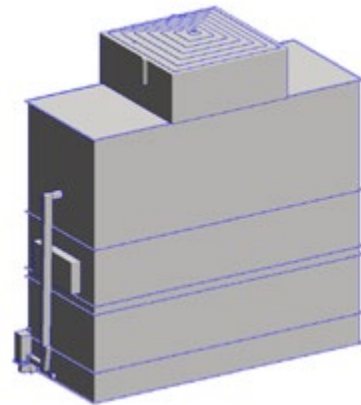
for param_name, value in params.items():
    p = element.LookupParameter(param_name)
    if p and not p.IsReadOnly and value:
        p.Set(str(value))

TransactionManager.Instance.ForceCloseTransaction()
```

OUT = element

Tüm bu işlemlerin ardından oluşturulan Element, Revit ekranında görünür hale gelmektedir ve seçildiği durumda Properties penceresinde eklenen anlamsal veri görünür hale gelmektedir (Şekil 22).

Identity Data	
Image	
Comments	Cooling Tower
Mark	Climate Control
Phasing	
Phase Created	New Construction
Phase Demolished	None
IFC Parameters	
Export to IFC	By Type
Export to IFC As	
IFC Predefined Type	
IfcGUID	11tAjaAd5BwAXISghZIRR1
IfcDescription	Closed-Circuit-Cooler Evapco ATWB S...
IfcName	Evapco Cooling Tower
IfcPresentationLayer	



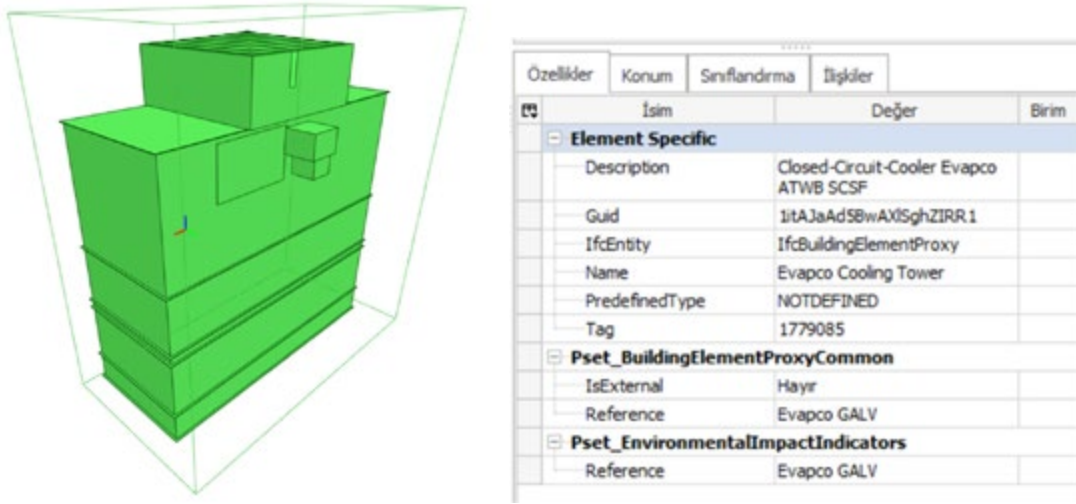
Şekil 22: Üretilen Element özellikleri ve modeli

Ürün bu hali ile ifc formatına çevrilmeye hazır durumdadır. Seçilen model File>Export>IFC yolu ile ifc formatlı çıktı alınır. Kıyaslama yapabilmek amacıyla ilk modelin ifc formatlı çıktısı ile yeni oluşturulan modelin ifc dosya boyutu kıyaslanmıştır (Şekil 23).

mstas_1_original_cool_tower.ifc.ifc.ifc	12.05.2026 00:54	Industry Foundation ...	3.931 KB
yeni.ifc	1.06.2026 22:56	Industry Foundation ...	108 KB

Şekil 23: Üretilen model ve orijinal model arasındaki dosya boyutu farkı (Yazar arşivi)

Tüm çalışmaların sonucunda orijinal modelin boyutu 3.931 kB iken yeni modelin boyutu 108 KB olarak gözlemlenmiştir. Özetle yeni model yaklaşık olarak 1/36.40 kadar hafiflemiştir. Ifc model görüntülemesi için kullanılan BIMVision programında ise hem geometrik hem de anlamsal veri çalışılan sonucu vermektedir (Şekil 24).



Şekil 24: Üretilen modelin BIMVision programında gösterimi

4. Veri Sadeleştirme ve Enerji Kullanımı Bağlantısı

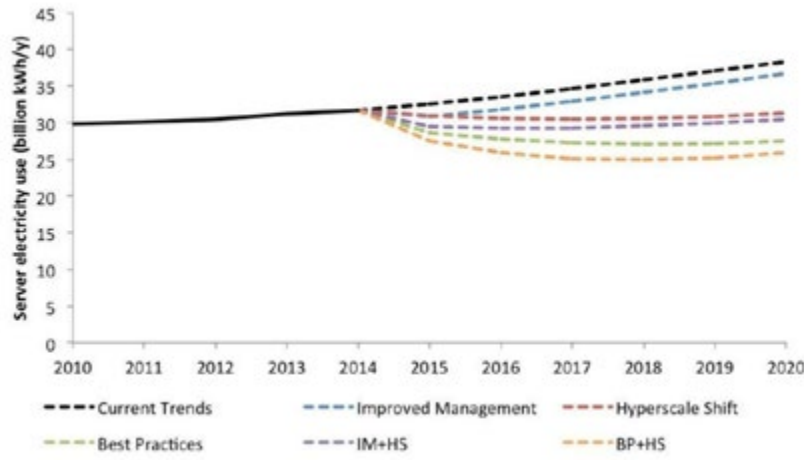
Çalışmanın bu aşamasına kadar hazırlanan bölümü varlık model boyutunun düşürülerek sadeleştirilmesi yönündeydi. Geline nokta bu sonuçların bir veri merkezinde depolanması ve buna bağlı olarak enerji sarfiyatına etkileri hakkında bilgi verilecektir.

Veri merkezlerinde sunucu depolama kapasitesi ile enerji tüketimi arasındaki doğrusal ilişki göz önünde bulundurulduğunda, IFC model boyutlarında sağlanan azalmanın hem depolama maliyetleri hem de enerji tüketimi üzerinde olumlu etkiler doğurabileceği değerlendirilmektedir. Literatürde, veri merkezlerinde depolanan verinin boyutu ile enerji tüketimi arasındaki ilişkiyi inceleyen çalışmalar mevcuttur. Depolama boyutundaki her anlamlı azalma, sunucu donanımının daha uzun süre verimli çalışmasına ve soğutma gereksinimlerinin düşürülmesine katkı sağlayabilecektir.

Sayısallaştırılmış tesis ya da varlık yönetimi için kullanılan dosyalar için yerel sunuculardan ya da veri merkezlerinden hizmet alınmaktadır. Her iki depolama tercihinde de dikkat edilen en önemli kriterlerden biri depolama alanı boyutudur. Verilerin saklandığı alan büyüdükçe, bunun için gerekli enerji gereksinimi de artış göstermektedir. Veri merkezleri ve enerji sarfiyatı bağlantılı 2 adet çalışma incelenmiş ve yayın tarihlerine göre aşağıda özetlenmiştir. Veri boyutunun düşürülmesi ile enerji harcama miktarının orantılı olduğu konusunda fikir verebileceği düşünülmektedir.

4.1. Veri Merkezi ve Enerji Kullanımı İlişkisini İnceleyen Çalışmalar

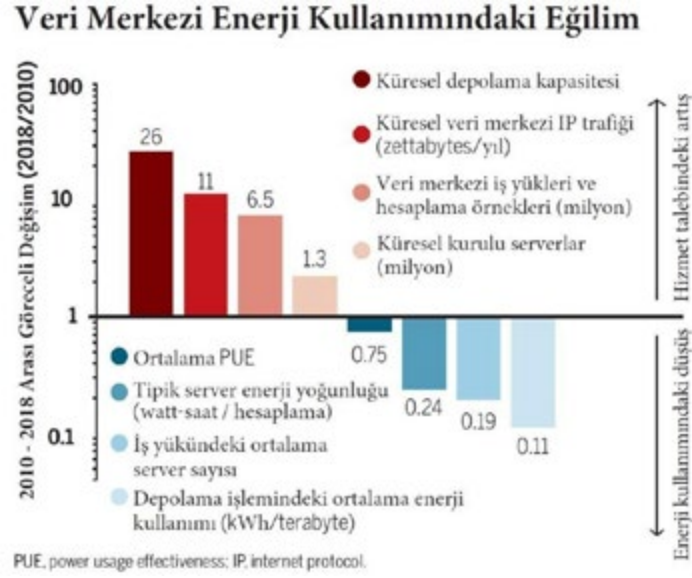
2016 yılında Shebabi ve ark. tarafından hazırlanan Veri Merkezi Enerji Kullanım Raporu'nda, doğrudan "veri dosyasının düşürülmesi" gibi bir kavram incelenmemiş fakat gereksiz ya da verimsiz sunucuların devre dışı bırakılmasının daha az enerji harcamasına katkıda bulunacağı yönünde sonuçlara ulaşmıştır (Shebabi ve ark., 2016a). Rapor, "zombie" sunucular olarak adlandırılan ve hiçbir faydalı işlemi yerine getirmediği halde enerji tüketen sunucuların varlığından söz ediyor. ABD veri merkezlerindeki aktif çalışır fakat verimsiz halde bulunan sunucu oranının %10 ile %30 arasında olduğu tahmin ediliyor. İyi kurgulanmış bir senaryo ile veri merkezlerindeki işlevsiz sunucuların %10'u ve servis sağlayıcı merkezlerindeki sunucuların ise %5'i devre dışı bırakıldığında 2020'ye kadar toplam enerji tüketiminde %10'luk bir tasarruf sağlanabileceği öngörülüyor (Şekil 25).



Şekil 25: Veri merkezi işletim senaryolarına göre enerji sarfiyat karşılaştırmaları (Shebabi ve ark., 2016b)

2020 yılına ait, Masanet ve ark. tarafından yapılan çalışmada depolama yoğunluğunun ve verimliliğinin artması ile enerji tüketiminin azalması arasında güçlü bir bağlantı kurulmaktadır (Masanet ve ark., 2020). Yapılan çalışmanın sonuçları Şekil 26'de gösterilmiştir.

- Depolama sürecinde: depolama sürücülerindeki yoğunluk ve verimlilik kazanımları sayesinde, terabyte başına düşen watt tüketimi yaklaşık dokuz kat azalmıştır. Buna ek olarak, toplam depolama kapasitesi 25 kat artmış olmasına rağmen enerji kullanımının yalnızca üç kat arttığı ölçülmüştür. Özetle, daha yüksek boyutta veri, daha az enerjiyle depolanabilmektedir.
- Hesaplama sürecinde: sanallaştırma ve işlemci verimliliği sayesinde sunucu başına hesaplama gücü beş kat artmış, sunucu enerjisi tüketimindeki artış ise yalnızca %25 olmuştur.
- Sonuç olarak: 2010-2018 arasında global veri merkezi iş yükleri altı kat, IP trafiği on kat artmasına karşın toplam enerji tüketimi yalnızca %6 yükselmiştir.



Şekil 26: Veri merkezi enerji kullanım eğilimi (Masanet ve ark., 2020)

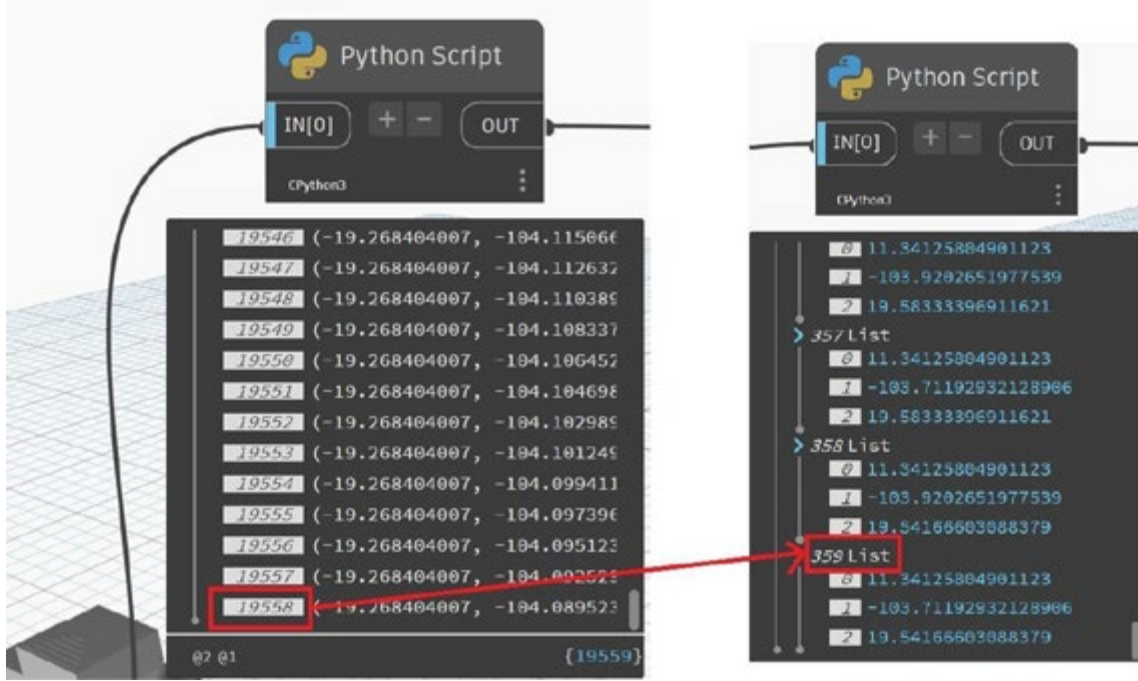
Masanet ve arkadaşlarının çalışması, bu makalede amaçlanan veri indirgenmesi işlemi ile doğrudan bağlantılı görülmemiştir fakat işlenmesi gereken ham veri miktarının azaltılması düşüncesi, depolama ve işlemci yükünün düşürülmesini sağlaması açısından dolaylı yönden bu makaleye destek verdiği kabul edilmiştir.

5. Sonuçlar ve Değerlendirme

Önerilen Dynamo tabanlı yöntemde bir soğutma kulesi varlık modeli için örnek olarak kullanılmıştır. Test modelinde uygulanan veri indirgeme yöntemi sonucunda IFC formatında dışa aktarılan dosya boyutlarında belirgin bir azalma gözlenmiştir.

Orijinal IFC modeli ile önerilen yöntem uygulandıktan sonra oluşturulan hafifletilmiş IFC modeli karşılaştırıldığında, ilk modeli oluşturan vertex'lerin sayısı 19.559 iken boyut sadeleştirme sonucunda 360 adede düştüğü gözlemlenmiştir (Şekil 27). Geometrik veri sadeleştirme aşamasında vertex noktalarının sayısının azaltılması ile elde edilen boyut düşüşü, anlamsal veri sadeleştirme aşamasında, kullanılmayan parametrelerin silinmesi ile daha da hafifletilmiştir.

Test edilen modelde geometrik ve anlamsal veri sadeleştirme işlemleri birlikte uygulandığında, orijinal modele göre dosya boyutunda önemli bir düşüş elde edilmiştir. Kullanılan yöntemin tek bir varlık modelinde bu sonucu vermesi, geniş ölçekli tesis yönetimi modellerinde daha etkin verim elde edilebileceğini düşündürmektedir.



Şekil 27: İlk ve son model arasındaki vertex sayısı farkı (Yazar arşivi)

KAYNAKLAR

- Akdeniz, E. (2023). Otel işletmelerinde varlık ve mahal yönetimi için BIM-destekli tesis yönetimi uygulaması (Tez No. 841740) [Yüksek lisans tezi, MİMAR SİNAN GÜZEL SANATLAR ÜNİVERSİTESİ]. Ulusal Tez Merkezi.
- BIM Corner. (2021). Everything worth knowing about the IFC format. Son Erişim Tarihi: Şubat 11, 2025 <https://bimcorner.com/everything-worth-knowing-about-the-ifc-format/>
- buildingSMART International. (2024). IFC formats. Son Erişim Tarihi: Şubat 6, 2025, <https://technical.buildingsmart.org/standards/ifc/ifc-formats/>
- Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R. and Lee, G. (2018). BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers, 4.0 Executive Summary, pp. 130-149, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ.
- Evapco.com. (2026). Evapco endüstriyel tip soğutma ekipmanları resmi web sitesi, Son Erişim Tarihi: Mayıs 30, 2026, https://www.evapco.com/resources?search_direction=product_line&product_group=13&product_model=
- Heimig-Elschner, T., Du, C., Scheuven, A., Borrmann, A., Beetz, J. (2025). A modular reference architecture for MCP-Servers enabling agentic BIM interaction. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2601.00809>
- Jha, R., Jha, R., Islam, M. (2025) Forecasting US data center CO2 emissions using AI models: emissions reduction strategies and policy recommendations. Front. Sustain. 5:1507030. doi: 10.3389/frsus.2024.1507030, Son Erişim Tarihi: Mayıs 31, 2026, <https://www.frontiersin.org/journals/sustainability/articles/10.3389/frsus.2024.1507030/full>
- Masanet, E., Shehabi, A., Lei, N., Smith, S., & Koomey, J. (2020). Recalibrating global data center energy-use estimates. Science, 367(6481), 984–986, DOI: 10.1126/science.aba3758, Son Erişim Tarihi: Mayıs 31, 2026, https://datacenters.lbl.gov/sites/default/files/Masanet_et_al_Science_2020.full_.pdf
- NIST. (2004). National Institute of Standards and Technology official web-site, Cost Analysis of Inadequate Interoperability in the U.S. Capital Facilities Industry, NIST GCR 04-867 Report, Son Erişim Tarihi: 13.02.2025, <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/gcr/2004/nist.gcr.04-867.pdf>
- Shehabi, A., Smith, S.J., Horner, N., Azevedo, I., Brown, R., Koomey, J., Masanet, E., Sartor, D., Herrlin, M., Lintner, W. (2016a). United States Data Center Energy Usage Report. Lawrence, Berkeley National

- Laboratory, Berkeley, California. LBNL-1005775, Son Erişim Tarihi Mayıs 30, 2025, https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/lbnl-1005775_v2.pdf
- Shehabi, A., Smith, S.J., Horner, N., Azevedo, I., Brown, R., Koomey, J., Masanet, E., Sartor, D., Herrlin, M., Lintner, W. (2016b). United States Data Center Energy Usage Report. Lawrence, Berkeley National Laboratory, Berkeley, California. LBNL-1005775, pp.37, Son Erişim Tarihi Mayıs 30, 2025, https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/lbnl-1005775_v2.pdf
- Teicholz, P. (2013). BIM For Facility Managers, *Introduction* (pp.1-15). John Wiley & Sons, Hoboken, NJ
- UK BIM Framework (2019). *Government Soft Landings*. www.ukbimframework.org. (2019, Nov). *Revised guidance for the public sector on applying BS8536 parts 1 and 2*. UK BIM Framework. Son Erişim Tarihi Şubat 4, 2025, https://ukbimframework.org/wp-content/uploads/2019/11/GSL_Report_PrintVersion.pdf
- Wikipedia. (2023). Industry Foundation Classes. Wikipedia, The Free Encyclopedia. Son Erişim Tarihi Şubat 12, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Industry_Foundation_Classes

MSTAS 26 “KAPSAM DIŞI”

XX. MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM ULUSAL SEMPOZYUMU

OTURUM 3

SAYISAL TASARIM KURAMLARI,
TARİHİ ve ELEŞTİREL YAKLAŞIMLAR

Synthetic Ontologies: Monadology and Autopoiesis as Frameworks for Bio-Digital Design

Melih Kamaoğlu¹ 

¹Karadeniz Technical University

¹melihkamaoglu@ktu.edu.tr

Abstract

This paper examines Dennis Dollens' bio-digital design theory as a significant attempt to rethink the relationship between biological processes, computation, and architecture. Since the 1990s, digital architecture has incorporated biological evolution through two broad approaches: the simulation of biological processes through digital computation and the direct integration of material or living processes into design and fabrication. Within the first approach, Dollens' work belongs to the morphogenetic strand of bio-digital design, where architectural form is generated through growth, branching, recursion, and developmental transformation rather than through population-based optimisation. His digital-botanic architecture uses botanical observation, Xfrog software, Lindenmayer-system-based procedures, and plant morphology to translate natural growth logics into architectural geometries.

The paper critically reconstructs Dollens' theoretical framework through two interconnected clusters. The first examines monadology, immanence, and extended phenotype in relation to digital-botanic architecture, showing how Dollens frames design, computation, and architectural production as continuations of natural processes. The second examines morphogenesis, autopoiesis, and extended cognition in relation to his later question of whether buildings can think. Through Alan Turing's reaction-diffusion models, Maturana and Varela's theory of autopoiesis, and Clark and Chalmers' extended mind hypothesis, Dollens expands bio-digital design from the generation of plantlike forms toward the possibility of responsive, living, or semi-living architectural systems.

The analysis argues that Dollens' framework is theoretically rich and valuable because it directs architecture toward environmental responsiveness, biological agency, and a deeper integration of computation with material and ecological processes. However, it also identifies a gap between conceptual ambition and architectural realisation. Dollens' projects successfully simulate aspects of biological growth, but they remain largely representational and speculative rather than materially self-producing or metabolically operative. The paper therefore suggests that the future relevance of Dollens' work lies in expanding computation beyond digital modelling. Understanding biological processes themselves as forms of physical computation may provide a way forward for achieving the responsive and ecological architecture that his work anticipates. In this sense, Dollens' contribution is not only formal or theoretical, but also directional: it identifies the thresholds that bio-digital architecture must cross to move from digital growth analogies toward materially embedded biological and physical computation.

Keywords: Bio-Digital Architecture, Morphogenesis, Autopoiesis, Monadology, Computational Design.

Sentetik Ontolojiler: Biyodijital Tasarımın Kuramsal Çerçevesi Olarak Monadoloji ve Otopoyez

Melih Kamaoğlu¹ 

¹Karadeniz Teknik Üniversitesi

¹melihkamaoglu@ktu.edu.tr

Özet

Bu makale, Dennis Dollens'in biyodijital tasarım kuramını biyolojik süreçler, hesaplama ve mimarlık arasındaki ilişkiyi yeniden düşünmeye yönelik önemli bir girişim olarak incelemektedir. 1990'lardan itibaren dijital mimarlık, biyolojik evrimi iki temel yaklaşım üzerinden bünyesine katmıştır: biyolojik süreçlerin dijital hesaplama yoluyla simüle edilmesi ve maddi ya da canlı süreçlerin tasarım ve üretime doğrudan entegre edilmesi. Dollens'in çalışmaları, bu yaklaşımlardan ilki kapsamında, mimari formun popülasyon temelli optimizasyon aracılığıyla değil; büyüme, dallanma, özyineleme ve gelişimsel dönüşüm süreçleri üzerinden üretildiği biyodijital tasarımın morfogenetik kolunda yer almaktadır. Dollens'in dijital-botanik mimarlığı; botanik gözlemden, Xfrog yazılımından, Lindenmayer sistemi temelli prosedürlerden ve bitki morfolojisinden yararlanarak doğal büyüme mantıklarını mimari geometrilere tercüme etmektedir.

Makale, Dollens'in kuramsal çerçevesini birbiriyle bağlantılı iki kavramsal küme üzerinden eleştirel biçimde yeniden yapılandırmaktadır. İlk küme, monadoloji, içkinlik ve genişletilmiş fenotip kavramlarını dijital-botanik mimarlıkla ilişkili olarak incelemekte; Dollens'in tasarımı, hesaplamayı ve mimari üretimi doğal süreçlerin devamı olarak nasıl kavramsallaştırdığını ortaya koymaktadır. İkinci küme ise morfogenez, otopoyez ve genişletilmiş biliş kavramlarını, Dollens'in ilerleyen dönemlerde gündeme getirdiği yapıların düşünüp düşünemeyeceği sorusuyla ilişkili olarak ele almaktadır. Dollens, Alan Turing'in tepkime-difüzyon modelleri, Maturana ve Varela'nın otopoyez kuramı ile Clark ve Chalmers'in genişletilmiş zihin hipotezi aracılığıyla biyodijital tasarımın kapsamını bitkisel biçimlerin üretilmesinden duyarlı, canlı veya yarı canlı mimari sistemlerin olanaklılığına doğru genişletmektedir.

Yapılan değerlendirme, Dollens'in kuramsal çerçevesinin mimarlığı çevresel duyarlılığa, biyolojik süreçlerin etkin rolüne ve hesaplamanın maddi ve ekolojik süreçlerle daha derin bir biçimde bütünleşmesine yöneltmesi bakımından kuramsal açıdan zengin ve değerli olduğunu ileri sürmektedir. Bununla birlikte, kavramsal hedefler ile mimari gerçekleştirim arasında bir boşluk bulunduğunu da ortaya koymaktadır. Dollens'in projeleri biyolojik büyümenin belirli yönlerini başarıyla simüle etmekle birlikte, maddi anlamda kendi kendini üreten veya metabolik olarak işleyen sistemlerden ziyade, temsili ve spekülatif nitelikte kalmaktadır. Bu nedenle makale, Dollens'in çalışmalarının gelecekteki öneminin hesaplamanın dijital modellemenin ötesine genişletilmesinde yattığını öne sürmektedir. Biyolojik süreçlerin kendilerinin fiziksel hesaplama biçimleri olarak anlaşılması, Dollens'in çalışmalarında öngörülen duyarlı ve ekolojik mimarlığın gerçekleştirilmesi için ileriye dönük bir yol sunabilir. Bu anlamda Dollens'in katkısı yalnızca biçimsel veya kuramsal değil, aynı zamanda yön göstericidir. Çünkü onun yaklaşımı biyodijital mimarlığın dijital büyüme analogilerinden maddi olarak entegre edilmiş biyolojik ve fiziksel hesaplama geçebilmesi için aşması gereken eşikleri ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Biyodijital Mimarlık, Morfogenez, Otopoyez, Monadoloji, Hesaplamalı Tasarım.

1. Introduction

Since the early 1990s, digital architecture has increasingly turned to biological evolution not only as a source of metaphor but also as a generative framework for design (Cogdell, 2018; Steadman, 2008). Within this trajectory, two broad approaches can be distinguished (Kamaoğlu, 2025). The first approach treats biological processes as phenomena that can be represented, modelled, and simulated through digital computation. Evolutionary mechanisms such as variation, selection, mutation, adaptation, and growth are translated into algorithmic procedures, allowing architects to generate, evaluate, and refine architectural forms within virtual environments (Kamaoğlu, 2023b). The second approach seeks to work with biological and material processes more directly, treating matter, energy, and living systems as active agents in design and fabrication. In this case, computation is not limited to symbolic operations performed by digital machines but is understood as a physical process enacted through chemical reactions, material behaviours, environmental feedback, and living organisms (Kamaoğlu, 2024).

Within the first approach, two further tendencies can be identified. One follows Neo-Darwinian models of evolution, especially population-based processes of variation, selection, and inheritance (Kamaoğlu, 2023a; Kamaoğlu & Yıldırım, 2025). In architectural design, this logic is commonly translated into evolutionary algorithms and optimisation procedures, where populations of design alternatives are generated and evaluated according to fitness criteria (Frazer, 1995; Hensel et al., 2004). The other tendency is grounded in morphogenesis and developmental biology. Rather than focusing on competition between discrete variants, this approach investigates how form emerges through growth, differentiation, feedback, and environmental interaction. Here, architectural form is conceived as something that develops over time through recursive and rule-based procedures (Chu, 2004; Lynn, 1999). These two tendencies are not mutually exclusive, yet they foreground different scales of evolutionary thinking: one centred on selection among alternatives, the other on the developmental transformation of form.

The work of architect and researcher Dennis Dollens can be located within this second tendency. Since the mid-1990s, Dollens has developed a body of work that he describes as digital-botanic architecture, combining botanical observation, computational modelling, and speculative architectural design (Dollens, 2005a). His projects examine how plant structures, branching systems, seeds, shells, and other natural formations can inform the generation of architectural geometries (Dollens, 2003). Rather than using nature only as an image to be copied, Dollens treats biological form as a source of procedural information. His engagement with Louis Sullivan's ornamental theory further connects architectural form to growth, allowing ornament, structure, and surface to be reinterpreted through digital-botanic procedures (Dollens, 2005b).

Dollens' design method is closely tied to computational growth systems, especially Xfrog software and Lindenmayer-system-based procedures. These tools make it possible to simulate branching, recursion, and plantlike development, translating botanical growth into architectural form (Dollens, 2005a). However, Dollens' contribution is not limited to form generation. Across his writings, he develops a broader theoretical claim: architecture should not be understood as separate from nature, but as one of nature's extensions (Dollens, 2009). In this framework, human design, computation, and architectural production are positioned as continuations of natural processes rather than external interventions imposed upon them.

This claim becomes more complex in Dollens' later work on Alan Turing, autopoiesis, and extended cognition (Dollens, 2014). Turing's morphogenetic models and drawings allow Dollens to connect biological pattern formation, computation, and generative design. At the same time, the theory of autopoiesis and extended mind hypothesis support his question of whether buildings can think, live, or participate in metabolic and bioremedial environmental processes (Dollens, 2015a). Through this

shift, Dollens moves from the simulation of botanical growth toward a speculative framework in which buildings, materials, organisms, technologies, and environments might form interconnected cognitive and ecological systems. His notion of autopoietic-extended design therefore expands bio-digital architecture from the digital generation of plantlike forms to the possibility of responsive, living, or semi-living architectural systems.

This ambition makes Dollens' work a useful case for examining the conceptual limits of bio-digital design. His writings bring together biological morphology, computational simulation, monadology, immanence, extended phenotype, autopoiesis, and extended cognition. Yet these references do not all have the same role in the design process. Some are connected to operative procedures, especially the recursive generation of form through plant simulation and Lindenmayer-system logic. Others function as philosophical arguments that support the idea that architecture belongs to nature or may eventually become cognitively and metabolically integrated with its environment. The main question is not simply whether Dollens' work is biologically inspired. The more important question is how far its biological and philosophical claims are operationally embedded in architectural design procedures.

This paper critically reconstructs Dollens' bio-digital design theory through two theoretical clusters. The first examines monadology, immanence, and extended phenotype in relation to digital-botanic architecture, focusing on how botanical growth and recursive computation support the claim that architecture extends natural processes. The second examines Turing's morphogenesis, autopoiesis, and extended cognition in relation to Dollens' later question of whether buildings can think. Through close reading and conceptual analysis of Dollens' writings and their primary theoretical references, the paper evaluates the distinction between formal simulation and ontological integration. It argues that Dollens' work is significant because it reveals the conceptual thresholds of bio-digital design. However, its architectural outcomes remain largely representational and speculative rather than materially self-producing or metabolically operative. The paper concludes by identifying the limits of synthetic ontologies in bio-digital design and the conditions required for moving from digital growth analogies toward materially embedded biological computation.

2. Monadology, Immanence and Extended Phenotype

Dollens' idea of digital-botanic architecture begins from the assumption that architectural form can be generated through the study and transformation of botanical growth. In this context, plants are not treated only as visual precedents or decorative motifs. They are understood as systems of structural organisation, morphological development, and environmental adaptation (Dollens, 2005a). Dollens' early work on the TumbleTruss project demonstrates this approach clearly (Dollens, 2005b). The tumbleweed is examined as a dynamic natural truss whose interlocking stems, barbs, branches, and seed-dispersal behaviour offer a model for irregular structural networks. Its spherical form, mobile behaviour, and capacity to absorb and redistribute forces provide a biomimetic basis for imagining architectural shells, walls, roofs, and connective systems. In this sense, the plant is translated into architecture not by direct imitation but by extracting principles of growth, connection, and structural performance.

This method also explains Dollens' interest in Louis Sullivan's ornamental theory (Sullivan, 1967). Sullivan's 'A System of Architectural Ornament' is important for Dollens because it presents ornament as a developmental process rather than as applied decoration. Sullivan's drawings transform simple seedlike or leaflike forms into complex ornamental organisations, suggesting that architectural form may unfold through internal rules of growth (Menocal, 1981; Sprague, 1979). Dollens reinterprets this logic through digital tools. In his reading, Sullivan's ornament becomes a proto-computational system: a set of graphic and morphological instructions that can be digitally reactivated. The façade of Sullivan's Merchant's National Bank, for example, is not treated simply as

a historical object but as a built drawing whose vegetal geometries can be extended into new digital structures (Dollens, 2005b). Through this operation, ornament, surface, and structure are brought into a shared developmental framework.

The operative mechanism of this transformation is computational growth. Dollens uses Xfrog software and Lindenmayer-system-based procedures to generate plantlike branching, recursive development, and complex spatial organisations (Lindenmayer, 1968). These systems allow botanical observations and Sullivanian ornamental principles to be translated into digital “seeds” that grow into architectural geometries. A tree generated in Xfrog may become a column, a branching system may become a support structure, and plantlike leaves or pods may be scaled and transformed into architectural components (Dollens, 2005a). In this sense, the design process is morphogenetic: form is not imposed as a finished composition but develops through recursive procedures that simulate growth and differentiation. The designer does not simply draw a final object; rather, the designer selects, adapts, and guides a generative system.

This is the point at which Dollens’ work becomes theoretically significant. His digital-botanic projects are not presented merely as experiments in biomimetic form generation. They are also framed through a broader philosophical argument about the continuity between nature, consciousness, computation, and architecture. Dollens proposes that design and architecture should be understood as parts of nature because they emerge from consciousness and thinking, which are themselves natural processes (Dollens, 2009). His argument depends on a chain of relations: consciousness belongs to life, life belongs to nature, design belongs to consciousness, and therefore design and architecture belong to nature. This is not offered as a technical proof but as a conceptual hypothesis for rethinking architecture as a natural extension rather than an artificial object standing outside nature.

The theory of monadology plays an important role in this argument. In Leibniz’s philosophy, monads are simple substances whose internal states represent a plurality within unity. They do not function as material particles in a mechanical sense; rather, they are metaphysical units through which the order of the world is expressed (Strickland, 2014). Dollens appropriates this concept in order to give idea generation a quasi-organic and generative status. The monad becomes a way of describing the seedlike quality of thought: a small, internal, generative unit capable of unfolding into form (Dollens, 2009). When connected to digital-botanic design, this allows Dollens to interpret design ideas, algorithmic procedures, and botanical growth as different expressions of a shared generative logic.

However, Dollens does not use monadology in isolation. He combines it with immanence, especially through Deleuzian interpretations of becoming and emergence (Deleuze, 2001; Dollens, 2009). Immanence allows him to avoid treating form as something imposed from outside. Instead, form is understood as emerging from within the process itself. In the digital-botanic workflow, this philosophical idea resonates with computational growth: branching structures, ornamental transformations, and architectural geometries appear to unfold from internal rules rather than from external composition. This connection gives Dollens’ work its synthetic character. Botanical forms, digital algorithms, philosophical concepts, and architectural projects are woven together to support the claim that architecture can grow from within nature’s own processes.

The third element in this cluster is extended phenotype theory (Dawkins, 1982). Dawkins’ concept of the extended phenotype expands the effects of genes beyond the organism’s body, including structures and environmental modifications produced by organisms. Dollens adapts this concept to architecture by suggesting that human constructions may be understood as extensions of biological and cognitive processes (Dollens, 2009). Shelters, tools, crafts, buildings, and cities become material consequences of thought, need, and environmental interaction. From this perspective, architecture is not merely a cultural artefact but a kind of extended natural production. Human design activity

becomes comparable, at least conceptually, to nests, hives, burrows, and other organism-produced structures.

This connection is central to Dollens' biodigital hypothesis. If design is produced by human consciousness, and consciousness is part of nature, then architectural production can be seen as a continuation of natural processes. Extended phenotype theory gives this claim a biological vocabulary, while monadology and immanence give it a metaphysical and philosophical structure. Together, they allow Dollens to argue that ideas may extend into material form and that buildings may be understood as naturalised products of thought, computation, and fabrication. His digital-botanic architecture therefore operates on two levels. At the procedural level, it uses computational growth systems to simulate plantlike development. At the conceptual level, it uses philosophical and biological theories to argue that this process belongs to nature rather than merely representing it.

Yet this synthesis also reveals a methodological limitation. The strongest operational component in Dollens' design system is the recursive generation of form through digital tools. Xfrog and Lindenmayer-system-based procedures make growth visible and manipulable, but they do not make architectural systems biologically alive or materially self-producing. The monad, immanence, and extended phenotype function mainly as conceptual bridges between natural growth, human thought, and architectural production. They help Dollens construct an ontology in which architecture is continuous with nature, but they are not themselves directly translated into design operations. The result is a powerful theoretical framework for understanding bio-digital design as a naturalised process, but one whose material implementation remains largely representational.

Therefore, Dollens' digital-botanic architecture should be understood neither as simple biomimicry nor as fully realised biological computation. Its importance lies in the way it exposes the intermediate condition of bio-digital design. On the one hand, botanical growth and recursive computation are operationally present in the generation of form. On the other hand, the deeper ontological claim that architecture is nature depends on philosophical extensions that exceed the technical capacity of the design tools. This tension is productive because it clarifies the central problem of synthetic ontology in bio-digital architecture: the movement from simulated growth to naturalised architectural existence remains conceptually compelling, but technically and materially incomplete.

3. Computational Morphogenesis, Autopoiesis, and Extended Cognition

Dollens' later work shifts the focus of digital-botanic architecture from botanical growth simulation toward a broader question concerning cognition, life, and architectural agency. While his earlier projects derive architectural form from plant morphology and recursive growth systems, his later writings ask whether buildings might become more than generated forms. The question "Can buildings think?" becomes the central provocation of this phase (Dollens, 2014). Dollens does not use this question to claim that buildings could think in the same way as human beings. Rather, he uses it to investigate whether architecture might participate in distributed, environmental, material, and biological processes that resemble cognition at non-human scales (Dollens, 2015a). In this sense, the question functions as a conceptual bridge between generative design, biological life, artificial intelligence, and ecological performance.

The computer scientist Alan Turing plays a central role in this shift. For Dollens, Turing is important not only as a foundational figure in computation and artificial intelligence but also as a thinker of morphogenesis (Dollens, 2014). Turing's 1952 paper proposed that biological pattern formation could emerge through systems of reacting and diffusing chemical substances (Turing, 1952). A homogeneous system, under certain conditions, could become unstable and develop spatial patterns through reaction-diffusion processes. This account is significant because it connects computation, chemistry, and biological development without reducing form to external design. Pattern emerges

from internal interaction, instability, and environmental conditions. This makes Turing's morphogenesis highly attractive for bio-digital architecture, where the central ambition is to understand form as something that develops rather than something imposed.

Dollens interprets Turing's morphogenetic drawings and models as a form of design patrimony for generative architecture (Dollens, 2015a). He argues that Turing's nature-to-computation images provide an overlooked lineage for digital and bio-generative design. These drawings are read not merely as scientific diagrams but as visual evidence that natural processes can be decoded, diagrammed, and translated into computational procedures. Turing's work demonstrates that natural pattern formation can be understood algorithmically, and this supports the movement from botanical simulation toward a more general theory of architecture as computationally and biologically informed morphogenesis.

However, Dollens does not stop at Turing's mathematical biology. He connects Turing's morphogenesis to the theory of autopoiesis developed by Humberto Maturana and Francisco Varela (Dollens, 2014). Autopoiesis defines living systems as self-producing organisations (Maturana & Varela, 1980). An autopoietic system produces and maintains the components that constitute the network that produces it, while preserving its identity as a distinguishable unity. The paradigmatic example is the living cell, in which molecular processes produce the components and boundary conditions that sustain the cell as a living system. This theory allows Dollens to move beyond the visual and formal consequences of morphogenesis toward the organisational logic of life itself. If morphogenesis explains the emergence of pattern and form, autopoiesis addresses the maintenance of living organisation.

In architectural terms, this shift is significant because it changes the meaning of "growth." In the earlier digital-botanic work, growth is primarily simulated as a formal and geometric process. In the autopoietic framework, growth is connected to self-production, boundary formation, environmental interaction, and the maintenance of organisational identity. Dollens uses autopoiesis to imagine an architecture that could interact with its environment in a more active and life-like manner (Dollens, 2015b). Buildings would not merely imitate organisms or be shaped like plants; they would participate in exchanges of matter, information, and energy. This is why his later work refers to metabolic functions, bioremediation, plant intelligence, bacterial sense-making, synthetic biology, and living technologies (Dollens, 2020). These references expand architecture from digital form generation toward the possibility of responsive and biologically active systems.

The idea of extended cognition provides the second major theoretical support for this move. Clark and Chalmers' extended mind hypothesis challenges the idea that cognition is contained entirely within the skull and skin. They argue that cognitive processes may extend into the environment when external objects, tools, or systems actively participate in thinking (Clark & Chalmers, 1998). Dollens adapts this idea to architecture by treating buildings, materials, technologies, organisms, and environments as potentially coupled systems (Dollens, 2015a). If cognition can be distributed across bodies and external resources, then architectural systems may be understood not only as inert containers but as cognitive-state objects or interfaces within larger environmental processes (Dollens, 2014). In this framework, a building's intelligence would not be human-like consciousness but a form of distributed responsiveness emerging from material, biological, technological, and environmental relations.

The notion of autopoietic-extended design emerges from this combination (Dollens, 2015a). Dollens hybridises autopoiesis with extended cognition in order to construct a research protocol for bioresponsive architecture. This protocol seeks to identify biological domains from which design may source data, insight, and operative models, including biosemiotics, sensory plants, biocomputation, bacterial intelligence, and synthetic biology (Dollens, 2020). It is therefore less a finished

architectural method than a theoretical and pedagogical scaffold. Its purpose is to guide architectural research toward systems in which living or semi-living processes might eventually become part of building performance.

At this point, Dollens' bio-digital theory becomes more ambitious but also more difficult to evaluate. The theoretical framework suggests that architecture could become cognitively and metabolically entangled with its environment. Yet the architectural examples remain largely speculative. The use of autopoiesis establishes criteria for life-like organisation, but Dollens' projects do not demonstrate buildings that maintain themselves through operational closure or produce their own components in the biological sense. Similarly, extended cognition supports the idea that buildings may be part of distributed cognitive systems, but it does not by itself make architectural materials cognitive. The theoretical connection is powerful because it expands the conceptual field of architecture, but it does not automatically produce a materially autonomous or living architectural system.

This limitation is especially important because autopoiesis is a demanding biological concept. A system cannot be considered autopoietic simply because it responds to data, changes shape, or incorporates environmental feedback. It must maintain the network of processes that produces its own organisation. Most digital and architectural systems remain externally designed, externally maintained, and externally evaluated. They may simulate biological behaviour or incorporate biological references, but they do not achieve the self-producing closure that autopoiesis requires. In this sense, Dollens' autopoietic architecture remains closer to a speculative ontology than a realised technical and material condition.

Nevertheless, Dollens' later work is important because it clarifies what is missing from purely digital morphogenesis. Turing provides a model of pattern formation through reaction and diffusion; autopoiesis provides a model of living organisation; extended cognition provides a model of environmental coupling. Together, these theories move bio-digital architecture beyond the production of plantlike geometries and toward the question of how architecture might become materially, cognitively, and ecologically operative. The value of Dollens' work lies not in proving that buildings can already think or live, but in identifying the conceptual conditions under which such a claim could be meaningfully tested.

The autopoietic phase of Dollens' work should be understood as a speculative extension of digital-botanic architecture rather than its completed material realisation. It pushes the morphogenetic logic of growth toward questions of life, cognition, and metabolic exchange, but it does not yet overcome the gap between computational representation and biological operation (Floridi, 2009). This gap is precisely what makes Dollens' theory significant for a critical study of synthetic ontologies. His work shows how architecture can borrow from biology, computation, and cognitive science to imagine new forms of environmental agency, while also revealing the difficulty of translating those borrowings into materially self-producing architectural systems.

4. Limits and Trajectories: From Digital to Biological Computation

The value of Dollens' bio-digital design theory lies not only in the forms it produces, but also in the direction it establishes for rethinking the relationship between biological processes, computation, and architecture. His work consistently challenges the idea that architecture is an inert object designed from the outside and imposed upon a passive environment. Instead, he imagines architecture as a participant in broader natural, cognitive, and ecological processes. This ambition gives his theoretical framework an important place in bio-digital design discourse. Even when his projects remain speculative or digitally representational, they point toward a more responsive understanding of architectural production.

Dollens' emphasis on growth, self-organisation, environmental interaction, and biological intelligence is particularly significant because it moves architecture beyond the conventional use of nature as metaphor or visual inspiration. In his work, plants, organisms, cells, and biological systems are not simply sources of aesthetic analogy. They are treated as models of organisation and potential agents of architectural transformation. This shift is important because it reframes responsiveness as something deeper than mechanical adaptation or digital interactivity. A responsive architecture, in this sense, would not only adjust its components according to pre-programmed parameters; it would participate in continuous exchanges with its environment through material, metabolic, and informational processes.

This is where Dollens' theoretical framework becomes especially rich. By connecting digital-botanic design to extended phenotype, autopoiesis, and extended cognition, he expands the scope of architectural agency. Architecture is no longer considered only as a designed product, but as an extended consequence of thinking, computation, fabrication, organismic behaviour, and environmental coupling. This theoretical move is powerful because it allows architecture to be considered across multiple scales: from the internal rule of a digital seed to the growth of a plantlike structure, from the cognitive activity of the designer to the possible metabolic activity of building materials, and from formal generation to ecological performance. Dollens' work therefore opens a conceptual field in which architecture can be discussed as a synthetic system linking biological, technological, and environmental domains.

However, the difficulty lies in the passage from conceptual synthesis to material operation. In Dollens' projects, computation is still mostly understood through digital simulation, modelling, and representation. Lindenmayer systems, Xfrog models, and computational morphogenesis are effective in producing formal complexity and in translating biological growth into architectural geometry. Yet they do not fully reproduce the open-ended, situated, and materially embedded dynamics of biological processes. They simulate selected aspects of growth while leaving the biological process itself outside the architectural system. As a result, the architectural outcome often remains a digital or fabricated representation of growth rather than a structure that grows, adapts, or maintains itself through biological activity.

This limitation does not weaken the importance of Dollens' work. Rather, it clarifies the next step required by the theoretical ambition of bio-digital architecture. If architecture is to move beyond the simulation of biological processes, then computation itself must be reconsidered. The question should not only be how digital computation can model biological processes, but also how biological processes may themselves be understood as computational. In this broader sense, computation is not limited to symbolic operations carried out by machines. It may also occur through physical, chemical, and biological interactions in which matter processes information, responds to conditions, and produces organised behaviour. Reaction-diffusion systems, cellular communication, plant sensing, microbial metabolism, material self-organisation, and ecological feedback all suggest forms of computation that are not reducible to digital representation.

Such an expanded understanding of computation may provide a way forward for achieving what Dollens' work anticipates. His dream of architecture that thinks, grows, or participates in living systems should not be interpreted as a claim that buildings will become conscious like human beings. It is better understood as a call for architectural systems that become more deeply coupled with their environments. This would require buildings and components that do not merely receive environmental data but engage in material exchange; materials that do not only change shape but respond through internal organisation; and biological systems that are not only represented in software but integrated into construction, maintenance, remediation, and adaptation. In this direction, biological computation could become a bridge between digital design and living architectural performance.

From this perspective, Dollens' synthetic ontology should be seen as productive framework. Its limitation is that it often moves faster conceptually than technically. Its potential is that it identifies the conceptual thresholds that architectural design must cross if it is to become genuinely bio-digital. The first threshold is the movement from biological analogy to biological operation. The second is the movement from digital simulation to physical and biological computation. The third is the movement from responsive form to responsive material organisation. These thresholds do not invalidate Dollens' theoretical project; they make its significance clearer. His work shows that the central problem of bio-digital architecture is not simply how to generate forms that look biological, but how to embed biological modes of organisation, responsiveness, and environmental exchange into architectural structures.

The limits of Dollens' work should be understood as part of a transitional moment in bio-digital design. His projects belong to a period in which digital tools made biological growth visible, manipulable, and architecturally suggestive, while material technologies were not yet capable of realising the full implications of living, metabolic, or self-producing architecture. Today, developments in responsive materials, biofabrication, synthetic biology, microbial systems, and material computation make it possible to reconsider his theoretical propositions with renewed relevance (Armstrong, 2020; Beckett, 2021; Dade-Robertson, 2020). These developments suggest that the future of bio-digital architecture may depend less on more accurate digital representations of nature and more on the architectural integration of biological processes as computational and material agents.

5. Conclusion

This paper has examined Dennis Dollens' bio-digital design theory as a significant attempt to rethink the relationship between biological processes, computation, and architecture. By locating his work within the morphogenetic strand of bio-digital design, the analysis has shown that Dollens focuses on growth, branching, recursion, self-organisation, and developmental transformation. Through digital-botanic architecture, botanical observations and computational growth systems are used to generate architectural forms that appear to emerge through processes of development rather than through conventional composition.

The paper has argued that Dollens' contribution lies in the theoretical expansion of this design procedure. Monadology, immanence, and extended phenotype allow him to frame architecture as an extension of natural processes, while autopoiesis and extended cognition allow him to move toward questions of life, agency, responsiveness, and environmental coupling. In this sense, his work is not limited to biomimetic form generation. It offers a rich synthetic ontology in which architecture, computation, cognition, and nature are understood as interconnected domains.

At the same time, the analysis has identified a critical gap between Dollens' conceptual claims and their architectural realisation. His projects successfully demonstrate how digital tools can simulate biological growth and translate plant morphologies into architectural geometries. However, they do not fully achieve the material self-production, metabolic exchange, or operational closure implied by autopoiesis. Nor do they yet establish architectural systems in which biological processes function as active computational agents. The result is a productive framework: conceptually powerful, technically suggestive, but still largely representational and speculative.

This limitation clarifies the threshold that bio-digital architecture must cross. Dollens points in the right direction by insisting that architecture should become more responsive, more environmentally coupled, and more deeply informed by the organisational logic of living systems. The way forward lies in expanding the concept of computation beyond digital simulation. Biological processes

themselves may be understood as forms of physical computation, operating through chemical interaction, material transformation, cellular communication, plant sensing, microbial metabolism, and ecological feedback.

The future relevance of Dollens' theoretical framework depends on the movement from digital representation to physical and biological operation. A genuinely bio-digital architecture would not merely imitate natural forms or simulate growth through software. It would integrate biological processes into the material, performative, and environmental life of architectural systems. Dollens' work remains important because it formulates this ambition with unusual theoretical richness. It shows that the central challenge of bio-digital design is not simply to make architecture look biological, but to rethink how architecture might compute, respond, and evolve through its own material and ecological relations.

Acknowledgments

This paper is dedicated to the memory of Dennis Dollens, whose visionary work made a significant contribution to the theory and practice of bio-digital design in architecture. Through his investigations into digital-botanic architecture, morphogenesis, autopoiesis, extended cognition, and the possibility of living and responsive architectural systems, Dollens opened an important intellectual path for rethinking the relationship between nature, computation, and architectural production. His work continues to inspire critical reflection on how architecture might move beyond the representation of biological processes toward more deeply integrated ecological, material, and computational futures.

REFERENCES

- Armstrong, R. (2020). *Experimental Architecture: Designing the Unknown*. Routledge.
- Beckett, R. (2021). Probiotic design. *The Journal of Architecture*, 26(1), 6-31.
- Chu, K. (2004). Metaphysics of Genetic Architecture and Computation. *Perspecta*, 35, 74-97.
- Clark, A., & Chalmers, D. (1998). The Extended Mind. *Analysis*, 58, 7-19.
- Cogdell, C. (2018). *Toward a Living Architecture? Complexism and Biology in Generative Design*. University of Minnesota Press.
- Dade-Robertson, M. (2020). *Living Construction*. Routledge.
- Dawkins, R. (1982). *The Extended Phenotype: The Gene as the Unit of Selection*. Oxford University Press.
- Deleuze, G. (2001). *Pure immanence: essays on a life* (A. Boyman, Trans.). Zone Books.
- Dollens, D. (2003). Towards a Genetic Architecture / Hacia una arquitectura genética. In *Genetic Architectures / Arquitecturas Genéticas* (pp. 70-87). SITES Books and ESARQ (UIC).
- Dollens, D. (2005a). *Digital-Botanic Architecture*. SITES Books.
- Dollens, D. (2005b). A System of Digital-Botanic Architecture. *Leonardo*, 38(1), 14-21.
- Dollens, D. (2009). Architecture as Nature: A Biodigital Hypothesis. *Leonardo*, 42(5), 412-420.
- Dollens, D. (2014). Alan Turing's Drawings, Autopoiesis and Can Buildings Think? *Leonardo*, 47(3), 249-253.
- Dollens, D. (2015a). Autopoiesis + Extended Cognition + Nature = Can Buildings Think? *Communicative & Integrative Biology*, 8(4), 1-10.
- Dollens, D. (2015b). *Digital-Botanic Architecture 3: Autopoietic Architecture: Can Buildings Think?* https://issuu.com/exodesic/docs/d-ba3_autopoietic_architecture
- Dollens, D. (2020). *Digital Botanic Architecture 4: An EcoMarxist Cast: Biointelligent Architectures: Dialectics, Forests, Forensics, Microbes, AI, Buildings*. SITES Books.
- Floridi, L. (2009). Against digital ontology. *Synthese*, 168(1), 151-178.
- Frazer, J. (1995). *An Evolutionary Architecture*. Architectural Association.
- Hensel, M., Menges, A., & Weinstock, M. (Eds.). (2004). *Emergence: Morphogenetic Design Strategies*. Wiley-Academy.
- Kamaoğlu, M. (2023a). Digital Neo-Darwinism in Architecture: From Logic to Materiality. 5th International Conference for BioDigital Architecture & Genetics, Barcelona, Spain.
- Kamaoğlu, M. (2023b). The idea of evolution in digital architecture: Toward united ontologies? *International Journal of Architectural Computing*, 21(4), 622-634.

- Kamaoğlu, M. (2024). Physarum computation in architecture: a critique of bio-digital design. *Architectural Research Quarterly*, 28(4), 387-398.
- Kamaoğlu, M. (2025). *Evolution and Computation in Architecture: A Critique of Bio-Digital Design* [PhD Thesis, University College London]. London.
- Kamaoğlu, M., & Yıldırım, D. Y. (2025). Process versus Object: Evolutionary Architecture Theories of John Frazer and Eugene Tsui. *METU Journal of the Faculty of Architecture*, 42(2), 51-69.
- Lindenmayer, A. (1968). Mathematical models for cellular interactions in development I. Filaments with one-sided inputs. *Journal of Theoretical Biology*, 18(3), 280-299.
- Lynn, G. (1999). *Animate Form*. Princeton Architectural Press.
- Maturana, H., & Varela, F. (1980). *Autopoiesis and Cognition: The Realization of the Living*. D. Reidel Publishing Company.
- Menocal, N. G. (1981). *Architecture as Nature: The Transcendentalist Idea of Louis Sullivan*. The University of Wisconsin Press.
- Sprague, P. E. (1979). *The Drawings of Louis Henry Sullivan*. Princeton University Press.
- Steadman, P. (2008). *The Evolution of Designs: Biological Analogy in Architecture and the Applied Arts* (Revised ed.). Routledge.
- Strickland, L. (2014). *Leibniz's Monadology: A New Translation and Guide*. Edinburgh University Press.
- Sullivan, L. H. (1967). *A System of Architectural Ornament*. The Eakins Press. (1924)
- Turing, A. M. (1952). The Chemical Basis of Morphogenesis. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B, Biological Sciences*, 237(641), 37-72.

Kolektif Bellek Olarak Mimarlık: Nimonik Tuğlalar ile Dağıtık Eyleycilik ve Mekân Hafızası

Sinan Ayaz ¹ ; Sema Alaçam ² 

^{1,2}İstanbul Teknik Üniversitesi

¹ayazs24@itu.edu.tr; ²alacams@itu.edu.tr

Özet

Etkileşimli ve hesaplamalı mimari sistemler, çevresel girdilere hareket ve biçim değişimi yoluyla yanıt verebilmekte; ancak bu yanıtların fiziksel sistem üzerinde zaman içinde iz bırakması ve mekân hafızası üretme potansiyeli sınırlı biçimde araştırılmaktadır. Bu çalışma, çevresel karşılaşmaların yalnızca anlık tepkilere değil, maddi konfigürasyon değişimleri aracılığıyla nimonik mekânsal izlere dönüşebilme olasılığını incelemektedir. “Nimonik” kavramı, hatırlamaya aracılık eden düzenekleri ve pratikleri ifade etmek üzere kullanılmakta; Nimonik Tuğlalar, belirli bir içeriği depolayan nesnelerden çok, etkileşimlerin fiziksel iz niteliği kazanabileceği modüler bir düzenek olarak önerilmektedir. Kolektif bellek, nimonik pratikler, dağıtık eyleycilik ve belleğin maddeselleşmesi tartışmalarından hareketle çalışma, mekân hafızasını temsil edilen veya merkezî olarak depolanan bir içerik yerine, insan ve insan dışı eyleyciler arasındaki ilişkiler içinde oluşabilecek performatif bir süreç olarak ele almaktadır. Araştırma, tasarım nesnesini kuramsal bir soruyu inceleyen bilgi üretici bir araç olarak değerlendiren tasarım yoluyla araştırma yaklaşımına dayanmaktadır. Bu kapsamda geliştirilen Nimonik Tuğlalar sistemi, Rhinoceros/Grasshopper ortamında yürütülen sayısal tasarım çalışmaları ile fiziksel prototipleme sürecini bir araya getirmektedir. Prototip, PLA malzemeden üç boyutlu baskı ile üretilen modüler birimler, HC-SR04 ultrasonik mesafe sensörü, Arduino Nano mikrodenetleyici, SG90 servo motor ve manyetik bağlantılardan oluşmaktadır. Yakınlık verisi, modüllerin konum ve açı değişimi üreteceği mekanik harekete dönüştürülmüş; miknatıs kuvveti, motor torku, sürtünme ve sensör kararlılığı sistem davranışını belirleyen maddi ve teknik eşikler olarak değerlendirilmiştir. Üç modülden oluşan prototip üzerinde yürütülen deneyler, kullanıcı yakınlığının modüler hareketleri tetikleyebildiğini ve birden fazla modülün birlikte görünür konfigürasyon farklılaşmaları oluşturabildiğini göstermiştir. Modüllerin yerel tepkilerinin ortak bir yüzey davranışına dönüşmesi, dağıtık eyleyciliğin prototip düzeyindeki karşılığını görünür kılmaktadır. Bununla birlikte, etkileşim sona erdiğinde modüllerin başlangıç konumuna dönmesi, sistemin mevcut aşamada kalıcı veya yarı kalıcı bir mekân hafızası ürettiğinin ileri sürülemeyeceğini ortaya koymaktadır. Çalışmanın özgün katkısı, bu sınırı açıkça tanımlayarak, tepkisel mimarlıktan nimonik bir mekânsal sisteme geçişin fiziksel iz kalıcılığı, tekrarlı etkileşim ve kolektif örüntü sürekliliği üzerinden araştırılabileceği deneysel bir çerçeve önermesidir.

Anahtar Kelimeler: Nimonik Tuğlalar, Kolektif Bellek, Dağıtık Eyleycilik, Mekân Hafızası, Tepkisel Mimarlık.

Architecture as Collective Memory: Distributed Agency and Spatial Memory through Mnemonic Bricks

Sinan Ayaz ¹ ; Sema Alaçam ² 

^{1,2}Istanbul Technical University

¹ayazs24@itu.edu.tr; ²alacams@itu.edu.tr

Abstract

Interactive and computational architectural systems can respond to environmental inputs through movement and formal transformation; however, the potential of these responses to leave traces on physical systems over time and contribute to spatial memory remains underexplored. This study investigates whether environmental encounters can be transformed not merely into immediate reactions, but into mnemonic spatial traces through material configuration changes. The term “mnemonic” is used to refer to arrangements and practices that mediate remembering; accordingly, Mnemonic Bricks are proposed not as objects that store predetermined content, but as a modular system through which interactions may acquire the quality of physical traces. Drawing on discussions of collective memory, mnemonic practices, distributed agency, and the materialization of memory, the study conceptualizes spatial memory not as represented or centrally stored information, but as a performative process that may emerge through relations between human and nonhuman actants. The research adopts a Research through Design approach, in which the designed artefact serves as a means of investigating a conceptual question. The developed Mnemonic Bricks system combines computational design studies conducted in Rhinoceros and Grasshopper with a physical prototyping process. The prototype consists of modular units fabricated from PLA through three dimensional printing, an HC SR04 ultrasonic distance sensor, an Arduino Nano microcontroller, an SG90 servo motor, and magnetic connections. Proximity data were translated into mechanical movement producing changes in the position and angle of the modules, while magnetic force, motor torque, friction, and sensor stability were evaluated as material and technical thresholds shaping the system’s behaviour. Experiments conducted with a prototype consisting of three modules demonstrated that user proximity can trigger modular movement and that multiple modules can collectively produce visible configuration differences. The transformation of local reactions into a shared surface behaviour makes distributed agency observable at the prototype level. Nevertheless, the modules returned to their initial positions after the interaction ended, indicating that the current system cannot yet be claimed to produce permanent or semi permanent spatial memory. The original contribution of the study lies in explicitly defining this limitation and proposing an experimental framework through which the transition from responsive architecture to a mnemonic spatial system can be investigated in terms of physical trace persistence, repeated interaction, and the continuity of collective patterns.

Keywords: Mnemonic Bricks, Collective Memory, Distributed Agency, Spatial Memory, Responsive Architecture.

1. Giriş

Etkileşimli ve hesaplamalı mimari sistemler, çevresel girdileri algılayarak hareket, biçim değişimi, ışık veya ses gibi çıktılara dönüştürebilen dinamik düzeneklerin geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Ancak bu sistemlerin önemli bir bölümü, girdiye karşılık veren anlık ve geri döndürülebilir tepkiler üretmekte; etkileşimin sistem üzerinde zaman içinde iz bırakması, birikmesi ya da sonraki davranışları etkilemesi sınırlı biçimde ele alınmaktadır. Bu durum, mimari bir sistemin yalnızca çevresine tepki veren bir arayüz olmaktan çıkarak, karşılaşmaların etkisini bünyesinde taşıyan bir mekân hafızası geliştirmesinin nasıl mümkün olabileceği sorusunu gündeme getirmektedir. Bu çalışma, çevresel girdinin yalnızca anlık bir harekete değil, maddi konfigürasyon değişimleri aracılığıyla nimonik bir mekânsal iz üretme potansiyeline dönüşebileceği varsayımından hareket etmektedir.

Bu problem, belleğin nasıl tanımlandığıyla doğrudan ilişkilidir. Bellek, bireysel zihinde saklanan ve gerektiğinde geri çağrılan sabit bir içerik olarak ele alındığında, mekân yalnızca hatırlanan olayların gerçekleştiği ya da temsil edildiği bir arka plan gibi görünür. Buna karşılık Halbwachs'ın (1992) kolektif bellek yaklaşımı, hatırlamanın bireysel bilincin ötesinde, toplumsal ilişkiler ve mekânsal çerçeveler içinde kurulduğunu ortaya koymaktadır. Bu bakış açısından mekân, belleğin dışsal bir kabı değil, hatırlamanın biçimlenmesine katılan ilişkisel bir ortamdır. Olick ve Robbins (1998) ise kolektif belleği durağan bir bütünlük olarak değil, farklı araçlar, pratikler ve bağlamlar içinde tekrar tekrar üretilen nimonik pratikler üzerinden ele almayı önermektedir. Dolayısıyla kolektif bellek, yalnızca neyin hatırlandığıyla değil, hatırlamanın hangi maddi, mekânsal ve teknolojik araçlar yoluyla üretildiğiyle de ilişkilidir.

Bu çalışmada kullanılan “nimonik” terimi, hatırlamaya aracılık eden düzenekleri ve pratikleri ifade eden “*mnemonic*” kavramıyla ilişkilidir. Draaisma (2000), yazı yüzeylerinden fotoğrafa ve bilgisayar belleğine uzanan yapay bellek araçlarının yalnızca bilgiyi saklamadığını, hatırlama ve unutmayı nasıl kavramsallaştırdığımızı da biçimlendirdiğini belirtmektedir. Mandolessi (2023) ise güncel bellek tartışmalarında belleğin kişiler, nesneler, teknolojiler, mekânlar, davranışlar ve ifadeler arasındaki dinamik ilişkilerden oluşan nimonik düzenekler (*mnemonic assemblages*) içinde gerçekleştirildiğini vurgulamaktadır. Bu bağlamda Nimonik Tuğlalar, belirli bir içeriği temsil eden veya veriyi merkezî bir kayıt ortamında depolayan mimari nesneler olarak değil; çevresel karşılaşmaların algılanması, harekete çevrilmesi ve modüler bileşenler arasında fiziksel iz üretmesi potansiyelini araştıran deneysel bir sistem olarak ele alınmaktadır.

Sistemin bu niteliği, mimari bileşenleri pasif yapı elemanları olmaktan çok, mekânsal davranışın oluşumuna katılan eyleyciler olarak değerlendirmeyi gerekli kılmaktadır. Latour'un eyleyici (*actant*) kavramından hareketle Bennett (2010), insan ya da insan dışı bileşenlerin etkide bulunma ve olayların seyrinde farklılık yaratma kapasitesinin, önceden varsayılan bir özellikten çok ilişkisel performansları üzerinden anlaşılabilceğini belirtmektedir. Nimonik Tuğlalar sisteminde de kullanıcı yakınlığı, sensör verisi, mikrodenetleyici, servo motor, manyetik bağlantı, sürtünme ve modüler komşuluklar birlikte mekânsal hareketi üretmektedir. Bu nedenle çalışmada “dağıtık eyleycilik”, hareketin tekil bir modüle veya merkezî bir kontrol birimine ait olmadığı; sistemin farklı bileşenleri arasındaki ilişkilerden ortaya çıktığı bir davranış biçimini tanımlamaktadır.

Bu doğrultuda araştırma, tasarım nesnesini kuramsal bir soruyu sınamak üzere geliştirilen bilgi üretici bir araç olarak ele alan tasarım yoluyla araştırma yaklaşımına dayanmaktadır (Zimmerman ve Forlizzi, 2014). Çalışma kapsamında geliştirilen Nimonik Tuğlalar prototipi, üç boyutlu baskı ile üretilen modüler birimler, sensörler, mikrodenetleyiciler, servo motorlar ve manyetik bağlantılar aracılığıyla çevresel girdilerin yerel hareketlere ve kolektif mekânsal konfigürasyonlara dönüşme biçimini incelemektedir. Araştırmının temel sorusu, yerel olarak algılayan ve hareket eden modüler mimari bileşenlerin, dağıtık eyleycilik ve maddi konfigürasyon değişimi yoluyla nimonik bir mekânsal iz üretme potansiyeline sahip olup olmadığıdır. Çalışmanın özgün katkısı, mekân hafızasını temsil edilen ya da merkezî olarak depolanan bir içerik olarak değil, insan ve insan dışı eyleyciler, maddi dirençler,

hareket örüntüleri ve fiziksel izler arasındaki ilişkiler üzerinden araştırılabilen performatif bir mimari süreç olarak kavramsallaştırmasıdır.

2. Kavramsal Arka Plan

2.1. Kolektif Bellek

Bu çalışma kapsamında kolektif bellek, mekânsal bir sistemin içine doğrudan yerleştirilebilecek veya teknik bir düzenek aracılığıyla bütünüyle üretilebilecek bir içerik olarak değil; çevresel karşılaşmalar, maddi izler ve mekânsal etkileşimler aracılığıyla oluşma potansiyeli taşıyan ilişkisel bir süreç olarak ele alınmaktadır. Halbwachs'ın (1992) yaklaşımında bellek, bireyin kendi zihinsel alanında bağımsız biçimde sakladığı bir içerikten çok, içinde bulunduğu toplumsal çerçeveler aracılığıyla yeniden kurduğu bir olgudur. Bu açıdan bir mekânsal düzenek, kolektif belleği tek başına taşıyan veya üreten bir nesne olarak değerlendirilemez; ancak hatırlamanın gerçekleşebileceği karşılaşmaları, tekrarları ve ilişkileri yapılandıran bir aracı olabilir.

Bu ayrım, Olick ve Robbins'ın (1998) kolektif belleği nesneleşmiş bir bütün olarak ele almak yerine, farklı toplumsal alanlarda gerçekleşen nimonik pratikler üzerinden inceleme önerisiyle açıklık kazanmaktadır. Nimonik pratik yaklaşımı, belleği yalnızca korunacak ya da temsil edilecek bir içerik olmaktan çıkararak, belirli araçlar ve davranışlar yoluyla yeniden üretilen bir süreç olarak değerlendirmeyi mümkün kılar. Bu bağlamda Nimonik Tuğlalar'ın kolektif bellekle ilişkisi, önceden belirlenmiş anıları depolamasından veya görünür kılmasından değil; çevresel etkilerin fiziksel sistem üzerinde iz bırakabileceği, bu izlerin yeniden karşılaşmalara açık hâle gelebileceği ve zaman içinde anlamlandırılabilmesi bir mekânsal etkileşim ortamı önermesinden kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla sistem, kolektif belleğin kendisi değil, nimonik pratiklerin oluşma koşullarını araştırıran deneysel bir aracı olarak konumlanmaktadır.

Hatırlamanın araçlar üzerinden kurulması, belleğin maddi ve teknolojik ortamlarla ilişkisini de önemli hâle getirmektedir. Draaisma (2000), yazı yüzeylerinden fotoğrafa ve bilgisayar belleğine kadar uzanan yapay bellek araçlarının yalnızca bilgiyi korumadığını, belleğe ilişkin düşünme biçimlerini de dönüştürdüğünü göstermektedir. İz bırakma, silinme, yeniden yazılma ve depolama gibi kavramlar, belleğin farklı araçlar üzerinden kavramsallaştırılmasının sonuçlarıdır. Nimonik Tuğlalar, bu tarihsel araçlara doğrudan benzer bir depolama mekanizması önermemekle birlikte, hatırlamanın fiziksel bir sistemde konfigürasyon değişimi ve maddi iz üzerinden düşünülebileceği yeni bir araştırma düzlemi açmaktadır. Bu yönüyle çalışma, belleği sembolik bir temsil veya dijital kayıt problemi olarak değil, fiziksel davranışın sürekliliği ve dönüştürülebilirliği üzerinden tartışmaktadır.

Mekânın bellekle ilişkisi, yalnızca izlerin korunmasıyla değil, bu izlerin kullanım ve etkileşim içinde yeniden kurulmasıyla da bağlantılıdır. Duindam (2018), mekânı belleği değişmeden taşıyan sabit bir ortam olarak değil, kullanıcılar, müdahaleler, nesneler ve davranışlar yoluyla sürekli yeniden üretilen performatif bir düzenek olarak ele almaktadır. Bu yaklaşım, Nimonik Tuğlalar açısından mekân hafızasının tekil bir fiziksel izin kalıcılığına indirgenemeyeceğini; izin etkileşim, tekrar ve değişen mekânsal durumlar içinde anlam kazanması gerektiğini göstermektedir.

Mandolessi'nin (2023) nimonik düzenekler (*mnemonic assemblages*) kavramı, söz konusu ilişkisel yaklaşımı teknolojik ve mekânsal sistemler bağlamında genişletmektedir. Bu yaklaşıma göre bellek, tekil nesnelerde sabitlenen bir içerik olmaktan çok; kişiler, nesneler, teknolojiler, mekânlar ve davranışların dinamik birlikteliğinde gerçekleşmektedir. Mimarlık alanında Biçer vd. (2025), kolektif belleğin fiziksel mekânda belirli mimari öğeler ve deneyim biçimleri aracılığıyla görünür hâle gelebileceğini tartışmaktadır. Nimonik Tuğlalar ise bu ilişkiyi sabit mekânsal temsiller üzerinden değil, çevresel girdilere bağlı olarak değişebilen modüler konfigürasyonlar üzerinden araştırmaktadır. Bununla birlikte, sistemin ürettiği her fiziksel hareketin doğrudan bellek olarak değerlendirilmesi mümkün değildir. Bu hareketin nimonik bir nitelik kazanabilmesi, izlerin korunması, tekrarlarla yeniden etkinleşmesi ve kullanıcılar tarafından anlamlandırılabilmesi bir ilişki alanı oluşturmasıyla

bağlantılıdır. Bu nedenle kolektif bellek kavramı, bu çalışmada prototipin doğrulanmış bir çıktısını değil, mekân hafızası oluşturma potansiyelinin değerlendirildiği kuramsal çerçeveyi tanımlamaktadır.

2.2. Dağıtık Eyleycilik

Nimonik Tuğlalar sisteminde mekânsal davranış, yalnızca insan tasarımcının önceden belirlediği bir biçimin uygulanması ya da kullanıcının doğrudan komutu olarak ele alınmamaktadır. Latour'un eyleyici (*actant*) kavramından hareketle Bennett (2010), insan ya da insan dışı bileşenlerin etkide bulunma ve olayların seyrinde farklılık yaratma kapasitesinin, ilişkiler içindeki performansları aracılığıyla anlaşılabilirliğini belirtmektedir. Bu çerçevede modüller, sensörler, aktüatörler, manyetik bağlantılar ve maddi dirençler, yalnızca teknik parçalar değil, sistemin ürettiği hareketi ve konfigürasyon değişimini biçimlendiren eyleyciler olarak değerlendirilmektedir. Dolayısıyla mimari eleman, pasif bir yapı taşı olmaktan çıkarak çevresiyle kurduğu ilişki üzerinden mekânsal oluşuma katılan bir bileşene dönüşmektedir.

Her bir modülün yerel girdiyi algılayarak tepki üretmesi, sistem davranışının merkezî bir kontrol yerine bileşenler arası ilişkilerden ortaya çıkması bakımından önemlidir. Dinamik ve belirsiz ortamlarda yerel bilgiye dayalı dağıtık karar verme modellerini ele alan Barber vd. (2001), çok etmenli sistemlerde bireysel bileşenlerin eylemlerinin sistem düzeyindeki davranışı birlikte biçimlendirebildiğini göstermektedir. Nimonik Tuğlalar, bağımsız planlama veya çatışma çözme kapasitesine sahip hesaplamalı ajanlardan oluşan bir sistem değildir; ancak modüllerin yerel tepkilerinin kolektif bir konfigürasyona dönüşme potansiyeli bakımından dağıtık davranış mantığıyla ilişkilendirilebilir. Bu nedenle çalışmada dağıtık eyleycilik, tekil modüllerin "hatırlaması" değil, insan ve insan dışı bileşenlerin etkileşimiyle fiziksel iz üretilebilmesinin kuramsal koşulu olarak ele alınmaktadır.

Bu tartışmanın güncel teknolojik karşılığı, algılama, aktüasyon ve işlemeyi bütünleşik modüller yapılarında bir araya getiren robotik araştırmalarda görülmektedir. Li vd. (2025), programlanabilir algılama, hareket üretimi ve gömülü karar verme bileşenlerini bütünleştiren esnek elektronik robotların çevresel koşullara uyarlanabilir davranışlar geliştirebildiğini ortaya koymaktadır. Nimonik Tuğlalar, gömülü yapay zekâya veya özerk öğrenme kapasitesine sahip bir robotik sistem olarak önerilmemektedir; ancak çevresel algının fiziksel hareket ve modüler konfigürasyon değişimine dönüştürülmesi bakımından bu araştırmalarla ortak bir tasarım problemini paylaşmaktadır. Bu çalışmadaki ayırt edici yön, söz konusu bütünleşmeyi hareket kabiliyeti veya çevresel uyarlanma amacıyla değil, mekânsal izin nimonik kapasiteye dönüşme olasılığı bakımından sorgulamasıdır.

2.3. Belleğin Maddeselleşmesi

Kolektif belleğin mekânsal boyutu, hatırlamanın yalnızca zihinsel veya temsili bir süreç olmadığını; maddi çevrenin düzenlenişi, dönüşümü ve taşıdığı izlerle de kurulduğunu göstermektedir. Yılmaz (2010), *ars memoriae* geleneği üzerinden imge ile yer arasındaki ilişkinin mimari mekânda hatırlamayı harekete geçiren maddi bir düzeneğe dönüşebileceğini tartışmaktadır. Nimonik Tuğlalar bu ilişkiyi sabit bir temsil üzerinden değil, çevresel girdinin fiziksel biçim değişimine aktarılması üzerinden yeniden ele almaktadır. Böylece bellek, yapıya yüklenen hazır bir anlamdan çok, etkileşimle oluşabilecek konfigürasyon farklılıklarında araştırılan bir kapasite hâline gelmektedir.

Bu bağlamda sistemdeki veri aktarımı, dijital girdinin mekanik davranışa çevrildiği bir dönüştürüm (*transduction*) süreci olarak değerlendirilebilir. Servo motorlar ve manyetik bağlantılar aracılığıyla gerçekleşen yer değiştirme, çevresel etkinin modüler yüzey üzerindeki fiziksel karşılığını üretmektedir. Draaisma'nın (2000) tartıştığı yapay bellek araçlarında olduğu gibi, burada da temel mesele yeni girdilere yanıt verebilme ile önceki etkinin izini koruyabilme arasındaki ilişkidir. Modül hareketinin manyetik tutunma veya sürtünme eşiğiyle korunması "hatırlama"; başlangıç durumuna dönmesi ise "unutma" yönünde okunabilecek maddi durumlar üretmektedir.

Menges'in (2012) hesaplamanın maddi boyutları (Material Computation) yaklaşımı doğrultusunda bu davranış, yalnızca kod ile yönetilen bir çıktı olarak değil, malzeme ve bağlantı özelliklerinin hesaplama sürecine katıldığı bir performans olarak ele alınabilir. Nimonik Tuğlalar'ın tepkisel mimarlığın ötesindeki potansiyeli, çevresel veriyi anlık harekete dönüştürmesinde değil, bu hareketin süreli veya birikimli fiziksel izlere dönüşebilme olasılığında yatmaktadır. Mevcut prototip bu olasılığı araştırmaya açmakta; mimari sistemi, kalıcı hafıza ürettiği kanıtlanmış bir arşiv olarak değil, maddesel bir nimonik arşivin oluşma koşullarını sınavan deneysel bir düzenek olarak konumlandırmaktadır.

3. Tasarım Yoluyla Araştırma

3.1. Araştırma Kurgusu

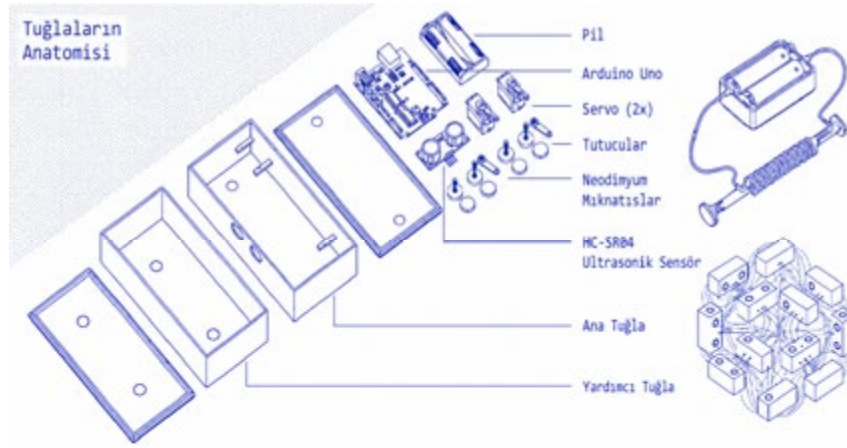
Çalışma, tasarım nesnesini yalnızca nihai bir ürün olarak değil, kuramsal bir sorunun fiziksel ve sayısal prototipler aracılığıyla incelendiği bilgi üretici bir araç olarak ele alan tasarım yoluyla araştırma yaklaşımına dayanmaktadır. Tasarım problemlerini birbirine bağlı ve yinelemeli karar süreçleri olarak ele alan Jonassen'ın (2012) yaklaşımı doğrultusunda, prototipleme süreci de modül geometrisi, algılama aralığı, aktüasyon biçimi ve bağlantı davranışına ilişkin kararların fiziksel denemelerle yeniden değerlendirildiği bir araştırma döngüsü olarak kurgulanmıştır. Bu doğrultuda Nimonik Tuğlalar, çevresel girdiye tepki veren modüler bir sistemin, yerel hareketleri kolektif konfigürasyon değişimlerine dönüştürme ve bu değişimler aracılığıyla fiziksel iz üretme potansiyelini araştırmak üzere geliştirilmiştir. Araştırma süreci, birbirini besleyen üç aşama üzerinden yürütülmüştür: modüler davranışın sayısal ortamda tasarlanması, fiziksel prototipin üretilmesi ve prototip davranışının deneysel olarak gözlemlenmesi.

3.2. Sayısal Tasarım, Benzetim ve Prototipleme

İlk aşamada modüler birimlerin komşuluk ilişkileri ve çevresel girdilere bağlı hareket olasılıkları Rhinoceros/Grasshopper ortamında geliştirilen sayısal modeller aracılığıyla incelenmiştir. Bu aşamada tekil bir modülün hareketinden çok, birden fazla modülün yerel girdilere bağlı olarak oluşturabileceği kolektif yüzey farklılaşmaları araştırılmıştır. Sayısal çalışma, fiziksel prototipte değerlendirilecek modül geometrisi, bağlantı biçimi ve hareket senaryolarının geliştirilmesine temel oluşturmuştur. Şekil 1'de sunulan diyagramatik temsil, bu aşamada araştırılan davranış mantığını özetlemektedir. Buna göre, modüllerin kullanıcı yakınlığına verdiği yerel tepkiler, sabit bir duvar yüzeyinde geçici açıklıklar ve yüzey farklılaşmaları oluşturabilecek kolektif bir mekânsal davranış olarak ele alınmıştır. Görsel, gerçekleştirilmiş fiziksel sonucu belgelemekten çok, sayısal tasarım ve prototipleme sürecinde sınavan etkileşim senaryosunu görünür kılmaktadır. Bu davranış senaryosunun fiziksel olarak araştırılabilmesi için gerekli modüler yapı ve teknik bileşenler ise Şekil 2'de gösterilmektedir.

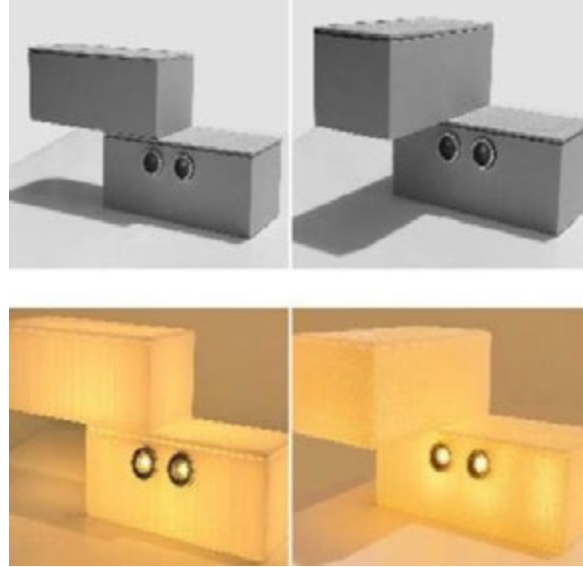


Şekil 1: Nimonik Tuğlaların Dağıtık Mekânsal Tepkisinin Diyagramatik Temsili

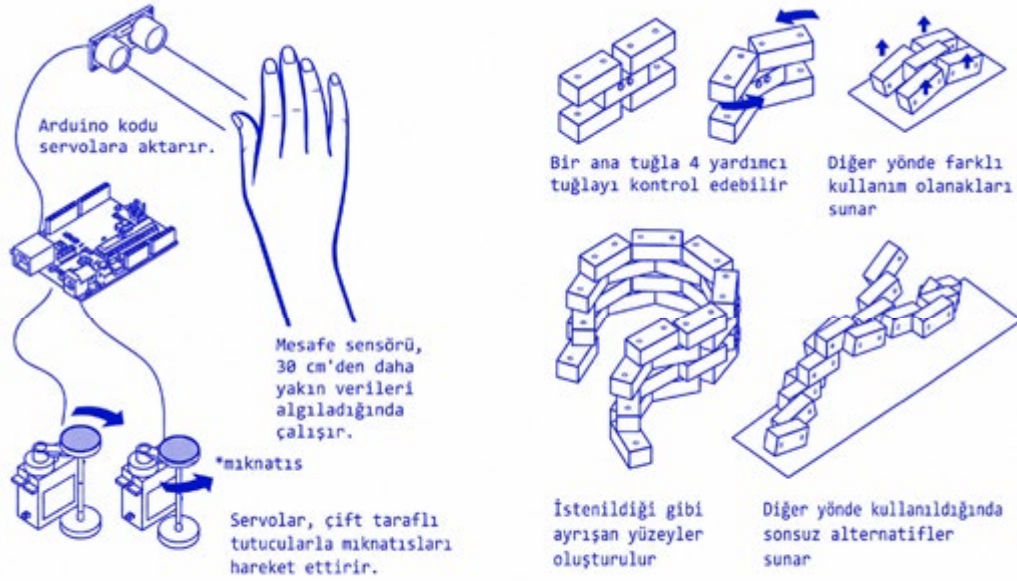


Şekil 2: Nimonik Tuğlaların Teknik Bileşenleri

Fiziksel prototip, 3B yazıcı ile PLA malzemeden üretilen yaklaşık 5×13 cm boyutlarındaki modüler birimler üzerinden geliştirilmiştir. Her bir modül, çevresel yakınlığı algılamak üzere HC-SR04 ultrasonik mesafe sensörü, veriyi işlemek üzere Arduino Nano mikrodeneetleyici ve mekanik hareket üretmek üzere SG90 servo motor içerecek biçimde tasarlanmıştır. Modüller arasındaki fiziksel ilişki, hareket sırasında tutunma ve yer değiştirme olasılıklarını araştırmak amacıyla manyetik bağlantılar üzerinden kurulmuştur. Prototipin elektronik ve mekanik bileşenleri Şekil 2’de, üretilen fiziksel modüller ise Şekil 3’te gösterilmektedir.



Şekil 3: Nimonik Tuğla Prototipi



Şekil 4: Nimonik Tuğlalar Sisteminde Algılama, Aktüasyon ve Konfigürasyon Üretimi İlişkisi

Şekil 3'te, geliştirilen modüllerin bir araya gelerek farklı fiziksel ilişkiler oluşturabildiği prototip durumları görülmektedir. Bu örnekler, sayısal ortamda tanımlanan komşuluk ve hareket senaryolarının fiziksel modüller üzerinden sınanmasına yönelik ilk kurulumları temsil etmektedir. Şekil 4 ise sistemin işleyişini teknik ve mekânsal düzeyleri birlikte içerecek biçimde açıklamaktadır: kullanıcı yakınlığı sensör aracılığıyla algılanmakta, elde edilen veri mikrodenetleyici üzerinden servo motorlara aktarılmakta ve manyetik bağlantılarla kurulan modül ilişkisi fiziksel harekete dönüşmektedir. Böylece görseller, çevresel girdinin algılanmasından kolektif konfigürasyon üretimine uzanan prototipleme akışını birlikte görünür kılmaktadır.

3.3. Yineleme ve Değerlendirme Ölçütleri

Prototipleme süreci, sayısal modelde öngörülen hareketin fiziksel bileşenler arasındaki kuvvet ve direnç ilişkileriyle yeniden sınındığı iteratif bir süreç olarak yürütülmüştür. İlk denemelerde düşük çekim kuvvetli mıknatısların modüller arasındaki tutunmayı yeterince sağlayamadığı; yüksek çekim kuvvetli neodimyum mıknatısların ise servo motorun yer değiştirme hareketini sınırladığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle mıknatısların modül yüzeyindeki yerleşimi yeniden düzenlenmiş ve hareketi kolaylaştıracak düşük sürtünmeli ara yüzey çözümleri denenmiştir. Bu iterasyon, manyetik tutunma ile motor torku arasındaki dengenin, hareketin oluşması kadar fiziksel izin korunabilmesi açısından da belirleyici olduğunu göstermiştir.

Enerji sürekliliği ve sensör verisinin kararlılığı da prototip davranışını etkileyen diğer parametrelerdir. Modüllerin bağımsız pil kullanımıyla çalıştırıldığı ilk denemelerde, servo motorların anlık enerji talebinin hareket kararsızlıklarına ve sensör verisinde sapmalara yol açtığı görülmüştür. Bu nedenle güç dağıtımı yeniden düzenlenmiş; sensör verisindeki dalgalanmaların gereksiz hareket üretimini azaltmak amacıyla yazılım düzeyinde hareketli ortalama filtresi ve eşik kontrolü uygulanmıştır.

Deneyisel değerlendirme iki temel ölçüt üzerinden yapılandırılmıştır. Birinci ölçüt, sistemin yakınlık girdisini algılayarak tutarlı bir mekanik harekete dönüştürme kapasitesini ifade eden **tepkiselliktir**. İkinci ölçüt ise girdi ortadan kalktıktan sonra oluşan konfigürasyon değişiminin ne ölçüde korunduğunu değerlendiren **fiziksel iz kalıcılığıdır**. Bu ikinci ölçüt, sistemin nimonik kapasitesinin

değerlendirilmesi bakımından belirleyicidir; çünkü çevresel girdiye anlık tepki verilmesi tek başına mekân hafızasının oluştuğunu göstermemektedir.

4. Bulgular ve Tartışma

4.1. Deneysel Çalışmaların Bulguları

Üç modülden oluşan fiziksel prototip üzerinde gerçekleştirilen denemeler, yakınlık verisinin modüler birimlerde hareket üretmek üzere kullanılabildiğini göstermiştir. HC-SR04 sensörü ile yaklaşık 20 cm algılama aralığında yürütülen deneylerde, kullanıcı yakınlığına bağlı olarak servo motor hareketlerinin tetiklendiği ve modüllerin konfigürasyonunda görünür farklılaşmalar oluştuğu gözlemlenmiştir. Servo motor gücünün artırılması, hareketin hızını ve genliğini etkilerken; N52, 5 mm manyetik bağlantılar modüllerin birbirine tutunması ile hareket edebilmesi arasında işlevsel bir denge sağlamıştır. Kullanılan deney parametreleri ve gözlemler Tablo 1’de sunulmaktadır.

Tablo 1: Deney Parametreleri ve Gözlemlenen Sonuçlar

Parametre	Değer	Gözlem
<i>Sensör aralığı</i>	20cm	Yakınlık algılandı ve hareket varyasyonları üretildi
<i>Servo motor gücü</i>	%5–100	Güç arttıkça hareket hızı ve genliği arttı
<i>Mıknatıs kuvveti</i>	N52, 5 mm	Tutunma sağlanırken hareket olanağı korundu
<i>Modül sayısı</i>	3	Kolektif davranışa ilişkin başlangıç gözlemleri elde edildi

Tablo 1’de verilen parametreler, yalnızca prototipin teknik özelliklerini belgelemek için değil, 3.3’te tanımlanan tepkisellik ve fiziksel iz kalıcılığı ölçütlerini yorumlamak için kullanılmıştır. Sensör aralığı ve servo motor gücü, sistemin çevresel girdiye yanıt üretme kapasitesiyle; mıknatıs kuvveti ve modül sayısı ise hareketin kolektif konfigürasyona dönüşmesi ve bu konfigürasyonun korunabilme olasılığıyla ilişkilidir. Bu nedenle deneyler, yalnızca modüllerin hareket edip etmediğini değil, üretilen hareketin nimonik bir iz için hangi fiziksel koşullara bağlı olduğunu anlamaya yönelik başlangıç değerlendirmeleri olarak ele alınmıştır.

Deneylerde üç temel davranış biçimi izlenmiştir. İlk olarak, birden fazla modülün yakınlık girdisine tepki vermesiyle, tekil hareketlerin ötesine geçen konfigürasyon farklılıkları oluşmuştur. Şekil 1’de kavramsal olarak gösterilen bu durum, modüllerin birlikte açıklıklar ve yüzey farklılaşmaları oluşturabilme potansiyelini görünür kılmaktadır. İkinci olarak, oluşan açıklıkların etkileşim sürdüğü süre boyunca korunduğu, etkileşim sona erdiğinde ise modüllerin kademeli olarak başlangıç konumlarına döndüğü gözlemlenmiştir. Üçüncü olarak, yaklaşım açısı, yakınlık süresi ve tetiklenme sıralamasındaki farklılıkların aynı başlangıç düzeninde farklı hareket örüntüleri oluşturabildiği görülmüştür.

Bu bulgular, mevcut prototipin çevresel girdiye tepki verme ve çoklu modüller aracılığıyla kolektif konfigürasyon değişimi üretme kapasitesini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, modüllerin etkileşim sonrasında başlangıç konumuna dönmesi, sistemin bu aşamada kalıcı veya yarı kalıcı fiziksel hafıza ürettiğinin ileri sürülemeyeceğini göstermektedir. Dolayısıyla deneyler, tamamlanmış bir nimonik arşivi doğrulamaktan çok, tepkisel davranışın nimonik bir mekânsal iz üretimine dönüşebilmesi için geliştirilmesi gereken maddi ve mekanik eşikleri belirlemektedir.

4.2. Mimari Tasarımda Yeni Perspektifler

Elde edilen bulgular, Nimonik Tuğlalar’ın tepkisel mimarlık ile mekân hafızası arasında araştırmaya açık bir ara düzlem oluşturduğunu göstermektedir. Prototip, çevresel karşılaşmayı bir hareket çıktısına dönüştürmekte ve modüller arasındaki ilişkiler aracılığıyla kolektif bir yüzey davranışı

üretebilmektedir. Bu yönüyle sistem, çevresel girdinin yalnızca görsel veya işitsel bir arayüz üzerinden temsil edilmesi yerine, fiziksel konfigürasyon değişimi olarak deneyimlenmesine olanak tanımaktadır.

Bununla birlikte, 2. bölümde kurulan kuramsal çerçeve doğrultusunda, her konfigürasyon değişiminin doğrudan hatırlama veya kolektif bellek olarak yorumlanması mümkün değildir. Mevcut prototipte gözlenen davranış, çevresel etkinin algılanması ve yerel hareketlerin ortak bir mekânsal duruma dönüşmesi bakımından dağıtık eyleyciliğe ilişkin bir başlangıç bulgusu sunmaktadır. Nimonik nitelik ise ancak hareketin belirli bir süre korunması, tekrarlı girdiler karşısında birikimli farklılaşmalar üretmesi ve önceki durumların sonraki davranışı etkilemesi durumunda güçlenebilecektir.

Bu bakımdan teknik iterasyonlar, yalnızca uygulamaya ilişkin sorun giderme adımları olarak değil, belleğin maddeselleşme koşullarını belirleyen deneysel bulgular olarak değerlendirilmiştir. Manyetik tutunmanın zayıf olması durumunda modüller kararlı bir konfigürasyon oluşturamamakta; aşırı güçlü olması durumunda ise aktüasyon hareketi gerçekleşmemektedir. Benzer biçimde enerji dalgalanmaları ve sensör verisindeki kararsızlıklar, oluşan hareket örüntülerinin okunabilirliğini azaltmaktadır. Dolayısıyla sistemin olası mekân hafızası, yalnızca yazılımsal bir kayıt işlevine değil, algılama, aktüasyon, tutunma ve maddi direnç arasındaki dengeli ilişkiye bağlıdır.

Mevcut deney düzeneği, üç modüllü sınırlı bir prototip ve yakınlık temelli tekil bir girdi türü üzerinden yürütülmüştür. Bu nedenle kolektif örüntünün daha geniş yüzeylerde nasıl kararlılık göstereceği veya birden fazla kullanıcının eş zamanlı etkileşiminin konfigürasyonlar üzerinde nasıl farklılaşmalar üreteceği bu çalışma kapsamında değerlendirilememektedir. Bununla birlikte, bu sınırlılık sistemin araştırma değerini azaltmamakta; nimonik mekânsal davranışın ilerleyen aşamalarda ölçek, etkileşim yoğunluğu ve iz süresi üzerinden ölçülebileceği parametreleri görünür kılmaktadır.

Çalışmanın özgün katkısı, bu aşamada fiziksel hafızanın gerçekleştirildiğini ileri sürmekten çok, çevresel verinin maddi konfigürasyon değişimine dönüşmesi ve bu değişimin iz niteliği kazanabilmesi için gerekli ilişkisel ve fiziksel koşulları görünür kılmasında bulunmaktadır. İzleyen prototipleme aşamalarında, modüllerin girdi sonrasındaki konum korunumu, tekrar eden etkileşimlere bağlı deformasyon farklılıkları ve modül sayısı arttığında kolektif örüntülerin sürekliliği ölçülebilir parametreler olarak ele alınabilir. Böylece Nimonik Tuğlalar, tepkisel bir yüzey önerisinden, geçmiş etkileşimlerin maddi etkisini taşıyabilen nimonik bir mekânsal sistem araştırmasına doğru geliştirilebilir.

5. Sonuç

Bu çalışma, çevresel girdilere tepki veren modüler mimari bileşenlerin, maddi konfigürasyon değişimleri aracılığıyla nimonik bir mekânsal iz üretme potansiyelini araştırmıştır. Tasarım yoluyla araştırma yaklaşımı kapsamında geliştirilen Nimonik Tuğlalar prototipi, yakınlık verisinin yerel hareketlere ve çoklu modüller arasında oluşan mekânsal farklılaşmalara dönüştürülebileceğini göstermiştir. Böylece mimari eleman, yalnızca önceden tanımlanmış bir formun pasif bileşeni olarak değil, çevresel karşılaşmalar, teknik araçlar ve maddi dirençler içinde davranış üreten bir eyleyici olarak ele alınmıştır.

Çalışmanın temel katkısı, mekân hafızasını sabit bir temsil veya merkezî bir veri depolama problemi olarak değil, algılama, aktüasyon, bağlantı ve fiziksel iz arasındaki ilişkiler üzerinden araştırılabilecek performatif bir süreç olarak kavramsallaştırmasıdır. Prototipleme sürecinde manyetik tutunma, motor torku, sürtünme ve sensör verisinin kararlılığı arasındaki ilişkinin, sistemin yalnızca hareket üretmesi için değil, bu hareketin iz niteliği kazanabilmesi için de belirleyici olduğu görülmüştür. Bu yönüyle çalışma, tepkisel mimarlık ile nimonik bir mekânsal sistem arasında, maddi davranış üzerinden tartışılabilir bir araştırma alanı önermektedir.

Bununla birlikte, mevcut prototip çevresel girdiye tepki ve kolektif konfigürasyon değişimi üretebilmesine karşın, kalıcı veya yarı kalıcı bir mekân hafızasını henüz doğrulamamaktadır. Etkileşim sona erdiğinde modüllerin başlangıç konumuna dönmesi, nimonik kapasitenin fiziksel iz kalıcılığı, tekrarlı etkileşimler ve önceki durumların sonraki davranışlar üzerindeki etkisi üzerinden geliştirilmesi gerektiğini göstermektedir. Gelecek çalışmalarda modül sayısının artırılması, girdi sonrasında konum korunumu ile deformasyon farklılıklarının ölçülmesi ve farklı çevresel veri türlerinin sisteme dahil edilmesi, Nimonik Tuğlalar'ın tepkisel bir prototipten geçmiş etkileşimlerin maddi etkilerini taşıyabilen bir mekânsal hafıza sistemine doğru geliştirilmesini sağlayacaktır.

Teşekkür

Bu çalışma, İstanbul Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bilişim Anabilim Dalı, Mimari Tasarımda Bilişim Lisansüstü Programı bünyesinde yürütülen MBL516E *Interaction Tools and Environments in Digital Design* başlıklı seçmeli yüksek lisans dersi kapsamında geliştirilmiştir.

KAYNAKLAR

- Barber, K. S., McKay, R., MacMahon, M., Martin, C. E., Lam, D. N., Goel, A., Han, D. C., & Kim, J. (2001). Sensible agents: An implemented multi-agent system and testbed. In *Proceedings of the Fifth International Conference on Autonomous Agents (AGENTS '01)* (pp. 92–99). Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/375735.376007>
- Bennett, J. (2010). *Vibrant matter: A political ecology of things*. Duke University Press. <https://doi.org/10.1215/9780822391623>
- Biçer, Ü., Erdiñç, S. Y., & Erkartal, P. Ö. (2025). FORMS OF REMEMBERING: Spaces of Memory & Memory of Spaces. *Mekansal Araştırmalar Dergisi*. <https://doi.org/10.71298/maddergi.1777986>
- Draaisma, D. (2000). *Metaphors of memory: A history of ideas about the mind* (P. Vincent, Trans.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1002/jhbs.1122>
- Duindam, D. (2018). The Dynamics of Sites of Memory. In *Fragments of the Holocaust: The Amsterdam Hollandsche Schouwburg as a Site of Memory* (pp. 25–44). Chapter, Amsterdam University Press. <https://doi.org/10.1017/9789048538256.002>
- Halbwachs, M. (1992). *On collective memory* (L. A. Coser, Ed. & Trans.). University of Chicago Press.
- Jonassen, D. H. (2012). Designing for decision making. *Educational Technology Research and Development*, 60(2), 341–359. <https://doi.org/10.1007/s11423-011-9230-5>
- Li, J., Xu, Z., Li, N., Zhang, K., Xiong, G., Sun, M., Hou, C., Ji, J., Zhang, F., Zhong, J., & Huang, Y. (2025). AI-embodied multi-modal flexible electronic robots with programmable sensing, actuating and self-learning. *Nature Communications*, 16. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-63881-6>
- Mandolessi, S. (2023). The digital turn in memory studies. *Memory Studies*, 16(6), 1513–1528. <https://doi.org/10.1177/17506980231204201>
- Olick, J. K., & Robbins, J. (1998). Social memory studies: From “collective memory” to the historical sociology of mnemonic practices. *Annual Review of Sociology*, 24, 105–140. <https://doi.org/10.1146/annurev.soc.24.1.105>
- OpenAI. (2026). *ChatGPT Images* [Yapay zekâ destekli görsel üretimi ve metin akışının düzenlenmesi]. Erişim tarihi: 1 Haziran 2026
- Zimmerman, J., & Forlizzi, J. (2014). Research through design in HCI. In J. S. Olson & W. A. Kellogg (Eds.), *Ways of knowing in HCI* (pp. 167–189). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-0378-8_8

Üretken Yapay Zekâ Tasarımda Yaratıcı Özne midir? Araç-Özne Ayrımı İçin Kavramsal Bir Çerçeve

Çetin Tüker ¹ 

¹Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi

¹cetintuker@gmail.com

Özet

Üretken yapay zekâ sistemleri, yakın dönem mimarlık ve tasarım literatüründe giderek araç tanımını aşan bir kavramsal dille; eş tasarımcı, tasarım partneri ya da ortak yaratıcı gibi nitelemelerle anılmaktadır. Bu isimlendirmeler, söz konusu sistemlere niyet, bilinçli katkı ve karşılıklı taahhüt gibi insana özgü kapasiteleri örtük olarak atfederek, yaratıcılığı tasarım sürecinin bilişsel ve nedensel yapısından koparma ve araç ile özne arasındaki ayrımı bulanıklaştırma riski taşımaktadır. Bu bildiri, üretken yapay zekâ sistemlerinin yaratıcı özne değil, tasarımcının bilişsel işlevlerini destekleyen gelişmiş bilişsel iskeleler olarak kavranması gerektiğini ileri sürmekte ve araç ile özne arasındaki ayrımın belirli ölçütlerle sınanabileceğini savunmaktadır. Çalışma, yaratıcı özneyi üç asgari koşul üzerinden tanımlamıştır: tasarımın amaç ve hedeflerini belirleyip süreç boyunca tutarlı biçimde sürdürebilme (niyet), kararları bağlam-kısıt-sonuç zinciri içinde gerekçelendirebilme ve alınan kararlar ile ortaya çıkan öneri arasında izlenebilir bir süreklilik kurabilme. Bu koşulların kuramsal temeli, insan bilişine (çalışma belleği, uzun süreli bellek, şema kuramı ve dış temsillerin bilişsel yükü dağıtan rolü) dayanarak açıklanmıştır. Buna karşılık üretken modellerin, anlam ve nedensellik kurmak yerine istatistiksel örüntüleri yeniden örnekleyen işleyişi ile bu işleyişi besleyen eğitim verisinin örtük ve sürece ilişkin bilgiyi yapısal olarak dışarıda bırakan epistemik sınırları gösterilmiştir. Üç koşul, uygulamada kullanılabilecek üç soruluk bir ayırt etme çerçevesine dönüştürülmüş; bu çerçeve, özellikle eğitim ve stüdyo bağlamlarında araç-özne ayrımını hızlıca tartışmaya açan kavramsal ve yorumlayıcı bir araç olarak önerilmiştir. Bildiri, üretken sistemlerin varyasyon üretimi ve temsil geliştirme gibi alanlarda güçlü destekler sunsa da tasarım kararının faili olamayacağı; kullanılan kavramsal dilin ise tasarım pratiğini ve eğitiminde failliğin konumlandırılmasını doğrudan etkileyen, dikkatle seçilmesi gereken bir mesele olduğu sonucuna varır.

Anahtar Kelimeler: Yapay Zekâ, İnsan Bilişi, Tasarım Bilişi, Yaratıcılık.

Is Generative Artificial Intelligence a Creative Agent in Design? A Conceptual Framework for the Tool–Agent Distinction

Çetin Tüker ¹ 

¹Mimar Sinan Fine Arts University

¹cetintuker@gmail.com

Abstract

In recent architecture and design literature, generative artificial intelligence systems are increasingly described through a conceptual vocabulary that exceeds the definition of a tool, with characterizations such as co-designer, design partner, or co-creator. By implicitly attributing human-specific capacities (such as intention, conscious contribution, and mutual commitment) to these systems, such labels risk detaching creativity from the cognitive and causal structure of the design process and blurring the distinction between tool and agent. This paper argues that generative artificial intelligence systems should be understood not as creative agents but as advanced cognitive scaffolds that support the designer's cognitive functions, and it contends that the distinction between tool and agent can be tested against specific criteria. The study defines the creative agent through three minimal conditions: the ability to establish the aims and goals of a design and sustain them consistently throughout the process (intention); the ability to justify decisions within a context–constraint–outcome chain; and the ability to maintain a traceable continuity between the decisions made and the resulting proposal. The theoretical basis of these conditions is explained through human cognition (working memory, long-term memory, schema theory, and the role of external representations in distributing cognitive load). In contrast, generative models are shown to operate by resampling statistical patterns rather than constructing meaning and causality, and the training data underlying this operation is shown to have epistemic limits that structurally exclude tacit and process-related knowledge. The three conditions are translated into a three-question discrimination (tool-versus-agent differentiation) framework for practical use; this framework is proposed as a conceptual and interpretive tool that can quickly open the tool–agent distinction to discussion, particularly in educational and studio contexts. The paper concludes that, although generative systems offer strong support in areas such as variation generation and representation development, they cannot be the agent of a design decision, and that the conceptual language employed is a matter requiring careful choice, as it directly shapes how agency is positioned in design practice and education.

Keywords: Generative AI, Human Cognition, Design Cognition, Creativity.

1. Problem Durumu

Üretken yapay zekâ sistemleri yakın dönem mimarlık literatüründe bazı çalışmalarda araç tanımını aşan bir kavramsal dil içinde konumlandırılmakta, yalnızca gelişmiş araçlar olarak değil giderek işbirlikçi ortaklar, yaratıcı aktörler ya da tasarım sürecine ortak özneler olarak tartışılabilmektedir. Nitekim bu sistemler kimi çalışmalarda tasarım sürecine eşlik eden bir eş aktör (co-designer, co-pilot, co-design assistant) olarak (Blaas & Pelosi, 2023), kimi çalışmalarda bir tasarım partneri (design partner) olarak (Cheung et al., 2023) nitelenmekte; tasarım pedagojisi bağlamında ise yaratıcı fikir üretimini kolaylaştıran bir işbirlikçi ve kışkırtıcı (collaborator and provocateur) olarak konumlandırılmaktadır (Medel-Vera et al., 2025).

Görsel ideasyon ve tasarım eğitimi bağlamlarında da metinden görüntü üreticilerinin insan-makine ortak üretimi ve üretime ortak araç eksenlerinde tartışıldığı; bu sistemlere ortak yaratıcı (co-creator, collaborative creator) rolü atfeden (Baudoux, 2024) ve öğrencilerin yapay zekâyı araç ile ortak tasarımcı kutupları arasında bir yere konumlandırma eğiliminde olduğunu gösteren (Çelik et al., 2023) çalışmalar olduğu görülmektedir.

Bu isimlendirmeler, LLM'lerin bilinçli olduğunu, düşünebildiğini, ortak karar alabileceğini ve bu ortaklık ilişkisine iradi olarak girdiğini örtük olarak varsayar. Tahmin edilebileceği üzere bu varsayımlar çeşitli sorunlar içermektedir. Öncelikle bu kavramlar antropomorfiktir ve belirli insana özgü kapasiteleri (niyet, karşılıklı taahhüt, bilinçli katkı) gerektirir; ancak ne LLM'lerin ne de metinden görüntü üreticilerinin ontolojisi bu kapasiteleri içerir. Ek olarak bu varsayımlar, yaratıcılığı bilişsel yapıdan koparmaktadır. Burada söz konusu olan, bir tasarım problemine yönelen ve onu çözmeyi amaçlayan fonksiyonel yaratıcılıktır. Bu tür bir yaratıcılık, doğası gereği bir amaca dönük üretimdir; biliş yokluğunda çıktı bir problemi giderebilse dahi, bu sonuç amaca dönük bir üretim değil, rastlantısal bir denk gelmedir.

İş birliği kavramı, tarafların ortak bir amacı anlayan, katkısını bilinçli olarak yönlendiren ve bu ilişkiye iradi olarak katılan özneler olmasını zorunlu kılar. Yani iş birliğine giren her katılımcının kendi bilişi olmalı ve bilişsel süreçlerinin sonucunda bu ilişkiye girme kararını almış olmalıdır. LLM'ler ve metinden görüntü üreten yapay zekâların düzgün cümleler kurabilmesi ve kendilerinden istenene benzeyen görüntüler üretebilmesi, şekilsel olarak iş birliğine benzeyebilir; ancak bu benzerlik, arkasında iş birliğinin gerektirdiği bilişin bulunduğunu göstermez.

Ortaklık (partnership) ise daha güçlü bir iddiadır: yalnızca bilişi değil, karşılıklı taahhüdü, hesap verebilirliği ve bir tür iradeyi de ima eder. İki tarafın da bu ilişkiye girmeyi seçtiği bir çerçevedir. Yapay zekâların ontolojisi bu kapasiteleri içermeyeceği için, bilişlerinden de söz edilemez; dolayısıyla böyle bir çerçeve açıkça kurulamaz.

Yapay zekâlara ortak tasarımcı veya işbirlikçi partner rolü atayan yorumlar veya isimlendirmeler, bilinçli veya bilinçsiz olarak yaratıcılığı tasarım sürecinin bilişsel ve nedensel yapısından koparmaktadır. Bu yaklaşım, tasarımı çıktının biçimsel özelliklerine indirgemekte ve böylece araç ile özne arasındaki ayrımı bulanıklaştırmaktadır. Bu indirgeme, öznel bilişsel katkısı görünmezleştirdiği ölçüde, ortaya çıkan yenilik ve değer atfını üretim sürecinin karar vericisine değil kullanılan araca yönlendirmektedir. Böylece etkin öznenin kim olduğu sorusu çıktı merkezli bir okuma içinde belirsizleşmekte ve araç ile özne arasındaki sınır pratikte silikleşmektedir.

2. Amaç ve Kapsam

Bu bildiri, üretken yapay zekâ sistemlerinin yaratıcı özne değil, tasarımcının bilişsel işlevlerini destekleyen gelişmiş bilişsel iskeleler olarak kavranması gerektiğini; araç ve özne arasındaki ayrımın da niyet, gerekçelendirme ve izlenebilirlik ölçütleriyle sınanabileceğini ileri sürmektedir. Bu savı desteklemek için, tasarımcının bilişsel katkısını oluşturan niyet kurma, problem çerçeveleme, ardışık

karar verme, geri besleme ile yineleme ve gerekçelendirme gibi süreçler ile üretken yapay zekâ sistemlerinin hesaplamalı işleyişi arasındaki yapısal farklılıklar kavramsal bir çerçevede analiz edilmektedir. Bu nedenle, üretken sistemlerin tasarım sürecindeki konumunu tartışabilmek için öncelikle yaratıcı öznenin hangi asgari ölçütlerle tanımlanabileceğinin açıklığa kavuşturulması gerekir.

3. Yaratıcı Özne Kimdir

Bu çalışma bağlamında yaratıcı özne şu üç asgari koşula sahip olmalıdır:

- (i) tasarım brifini esas alarak tasarımın amacını ve hedeflerini belirleyebilir; süreç boyunca bu hedefleri izleyebilir, sürdürülebilir ve yeni koşullar ortaya çıktığında tutarlı biçimde güncelleyebilir.
- (ii) tasarım kararlarını bağlam-kısıt-sonuç zinciri içinde gerekçelendirebilir.
- (iii) tasarım sürecinde aldığı kararlar ile ortaya çıkan öneri arasında izlenebilir ve tutarlı bir açıklama ilişkisi kurabilir.

Bir başka deyişle bu çalışmada yaratıcı özne, yalnızca biçimsel çeşitlilik üretebilen değil, niyet kurabilen, kararlarını gerekçelendirebilen ve bu kararlarla ortaya çıkan sonuçlar arasında izlenebilir bir süreklilik kurabilen bir aktör olarak tanımlanmaktadır. Bu üç koşul aynı zamanda, ilerleyen bölümlerde önerilecek kısa ayırt etme çerçevesinin de kavramsal temelini oluşturmaktadır: İlk koşul hedef ve niyetin kurulup sürdürülebilmesine, ikinci koşul kararların bağlam ve kısıtlarla ilişkilendirilerek gerekçelendirilmesine, üçüncü koşul ise kararlar ile ortaya çıkan çıktı arasındaki tutarlılığın sınanmasına karşılık gelmektedir. Bu nedenle söz konusu koşulların insan tasarım sürecinde nasıl gerçekleştiği ile üretken yapay zekâ sistemlerinde neden aynı biçimde kurulamadığı, tasarım bilişi ve üretken modellerin işleyiş sınırları üzerinden karşılaştırmalı olarak ele alınacaktır.

Bu karşılaştırmada özellikle iki nokta belirleyicidir: Birincisi, insan tasarımcının dış temsilleri (eskiz, model, not) düşünmenin sürekliliğini koruyan ve çalışma belleğinin yükünü azaltan bilişsel destekler olarak kullanmasıdır. İkincisi, dile dayalı üretken sistemlerde sözel girdi ile görsel çıktı arasındaki ilişkinin gerekçeye dayalı bir karar zincirine değil, istatistiksel bir eşleştirmeye dayanmasıdır. Bu nedenle sözel olarak kurulan bağlamsal çerçeveden görsel üretime geçildiğinde, kararların neden o yönde alındığını izlenebilir kılan gerekçesel süreklilik kurulamaz.

4. Tasarım Bilişi ve Dış Temsiller

Tasarım ürünü (ve tasarım süreci içindeki çıktılar; maketler, eskizler, çizimler ve tasarımı açıklayan sözcükler), tasarımcının zihninde yürüyen fikir geliştirme ve problem çözme sürecinin dışa vurulmuş temsilleri olarak görülebilir. Bu dış temsiller, tasarım sürecindeki yinelemeler boyunca düşünmeyi görünür kılar (Scaife & Rogers, 1996), insan çalışma belleğinin sınırlı kapasitesinin bir uzantısı olarak çalışarak bilişsel yükü azaltır ve çalışma belleğine destek olur (Zhang & Norman, 1994).

Çalışma belleği, görsel ve mekânsal bilgiyi geçici olarak tutan görsel-mekânsal taslak (visuospatial sketchpad) ile sözel-işitsel bilgiyi tutan fonolojik döngüden (phonological loop) ve bu alt sistemleri yöneten, dikkati yönlendiren merkezî yöneticiden (central executive) oluşur (Baddeley & Hitch, 1974). Modele sonradan eklenen epizodik tampon (episodic buffer) ise farklı kaynaklardan gelen bilgiyi bütünleştiren geçici bir depo işlevi görür (Baddeley, 2000). Bu sistemin kapasitesi sınırlıdır; bu nedenle tasarımcı, karmaşık bir biçimi ya da ilişkiler bütününe yalnızca görsel-mekânsal taslakta zihinsel olarak canlandırmakta zorlanır. İşte tam da bu noktada eskiz, maket ve çizim gibi dış temsiller devreye girer: Tasarımcı, zihninde tutmakta zorlandığı bilgiyi bu dış ortamlara aktararak (offloading) çalışma belleğinin yükünü hafifletir, ardından bu temsilleri yeniden algılayıp işleyerek yeni kararlar üretir, bu kararları zihninde canlandırır ve tekrar dış temsiller üzerinde sınar. Böylece dış temsiller, tasarım sürecindeki yinelemeler boyunca düşünmeyi görünür kılar ve çalışma belleğinin sınırlı kapasitesinin bir uzantısı olarak çalışarak bilişsel yükü azaltır.

Çalışma belleği anlık işlemenin sahnesiyse, uzun süreli bellek bu sahneye malzeme sağlayan dağarcıktır. Tasarımda problem çözmeye bağlam içinde ilerler; kararlar genellikle gerekçelerle birlikte kurulur ve seçenekler beklenen sonuçları üzerinden değerlendirilir (Cross, 2001). Bu gerekçelendirme ve değerlendirme, tasarımcının önceki bilgi ve deneyimlerini barındıran uzun süreli belleğinden beslenir. Çalışma belleği bilgiyi anlık olarak işlerken, uzun süreli bellek bu bilgiyi kalıcı biçimde depolayan ve kapasitesi pratikte sınırsız kabul edilen sistemdir (Atkinson & Shiffrin, 1968). Ancak bu depolama, yığılmış ve birbirinden kopuk kayıtlar biçiminde değildir. Şema kuramına göre bilgi ve deneyimler, uzun süreli bellekte dağınık ve bağımsız içerikler olarak değil, belirli durumlara, kavramlara ve eylem örüntülerine ilişkin ilişkisel bilişsel yapılar, yani şemalar halinde örgütlenerek depolanır (R. C. Anderson, 1977; Bartlett, 1932; Rumelhart, 1980). Bu nedenle yeni bir durumla karşılaşıldığında birey, gelen bilgiyi doğrudan ve nötr biçimde işlemlemek yerine, önceki deneyimlerden türeyen bu şemalar aracılığıyla yorumlar; böylece algılama, anlamlandırma, çıkarım yapma ve karar verme süreçleri mevcut bilişsel örgütlenmeden etkilenir. Tasarımcı için bu, bağlam okumasının, gerekçelendirmenin ve karar vermenin doğrudan kendi bilgi birikimiyle (şema dağarcığıyla) ilişkili olması anlamına gelir (Alba & Hasher, 1983).

Bu şemalarda örgütlenen bilgi tek türden değildir. Geleneksel olarak bildirimsel bilgi (bir şeyin "ne" olduğuna dair, sözel olarak ifade edilebilen olgusal bilgi) ile işlemsel/yöntemsel bilgi (bir şeyin "nasıl" yapılacağına dair beceri) ayrımı yapılır (J. R. Anderson, 1983; Ryle, 1949). Bunun yanında, büyük ölçüde sözelleştirilemeyen örtük bilgi (tacit knowledge) gelir. Yani bireyin deneyim yoluyla edindiği, çoğu zaman farkında bile olmadan kullandığı, kurallara indirgenemeyen bilgi (Polanyi, 1966). Tasarım bilgisinin önemli bir bölümü tam da bu örtük, deneyimsel ve bedenli (embodied) katmanda yer alır; tasarımcının bir oranı "gözüyle tartması" ya da bir çözümün "yanlış durduğunu" gerekçesini hemen dile dökmeden sezmesi bu tür bilginin tezahürüdür (Schön, 1983). Dolayısıyla tasarımcının kararlarını besleyen bilgi havuzu, yalnızca yazıya dökülmüş olguların değil, büyük ölçüde dile tam çevrilemeyen yöntemsel, örtük ve bedensel bilginin toplamıdır (ve bu toplamın önemli bir kısmı, yalnızca metne yansımış veriyle çalışan sistemlerin erişim alanı dışındadır). Bu nedenle tasarım çıktıları, istatistiksel örüntü üretiminin dışavurumu değil, şema temelli anlamlandırma, nedensel gerekçelendirme ve amaçlı karar verme sürecinde oluşan zihinsel ürünün temsilleridir.

Bir başka deyişle dış temsiller, tasarımcının zihinsel süreçlerinden kopuk çıktılar değil, niyet, karar ve değerlendirme döngüsünün maddi ve izlenebilir uzantılarıdır. Bu nedenle tasarım sürecinde kullanılan araçlar, yaratıcı öznenin yerine geçen yapılar olarak değil, onun bilişsel işleyişini dışarıdan destekleyen yardımcı düzenekler olarak anlaşılmalıdır. Üretken yapay zekâ sistemlerinin sınırları da tam bu noktada görünür hale gelir: Bu sistemler güçlü üretim kapasitesine sahip olsalar da, insan tasarımcının dış temsiller aracılığıyla sürdürdüğü niyet-karar-çıktı sürekliliğini aynı yapısal bütünlük içinde kuramazlar.

5. Üretken Modellerin İşleyiş Sınırları

Tasarım alanında yaygın olarak kullanılan üretken yapay zekâ sistemleri (büyük dil modelleri ve difüzyon tabanlı görsel üretim modelleri) anlam kurma, nedensel ilişki tesis etme ve kavramsal şema oluşturma temelli bir bilişsel yapıya sahip değildir. Dolayısıyla mimari tasarımda yaratıcı eylemin öznesi olarak konumlandırılmazlar. Diğer taraftan üretken yapay zekâ araçları günümüzde yaygın kullanılan fotoğraf editörleri, ya da teknik çizim ortamları gibi pasif araçlardan da farklıdır. Üretken yapay zekâ sistemleri, yaratıcı özne olan insan tasarımcıyı bilgiye ulaşmadaki ve görselleştirmedeki hızı, enformasyon parçaları arasında ilk anda görülmesi zor olabilecek bağlantıları ortaya koymadaki etkililiği ve örüntü tanımadaki başarısı ile yaratıcı öznenin bilişsel işlevlerini destekleyen böylelikle yaratıcılığa zemin hazırlayan birer bilişsel iskele (scaffold) veya uzantı (extension) olarak konumlandırılabilir.

Büyük dil modelleri (Large Language Models - LLM) ve görsel üretim modelleri eğitim verisi olarak kullanılan kaynaklara bağlı olarak dilde ve görüntüde gözlenen örüntüleri istatistiksel olarak modelleyerek üretim yapar. Büyük dil modellerinde temel hedef, bağlam verildiğinde bir sonraki sözcük/işaret dizisini olasılıksal olarak (otoregresif, yani önceki dizgeye koşullu olarak adım adım) tahmin etmektir (Bender et al., 2021). Görsel üretim tarafında difüzyon modelleri ise, rastlantısal gürültüden başlayan ve öğrenilmiş olasılık yoğunlukları doğrultusunda kademeli geri-çözümlemeyle görüntü örnekleyen bir süreç uygular (Ho et al., 2020). Difüzyon modellerine ek olarak GAN tabanlı ve transformer/otoregresif yaklaşımlar gibi diğer üretken model aileleri bulunsun da bu ailelerin ortak noktası üretimi nedensel temsilden değil öğrenilmiş olasılık dağılımları üzerinden ve verilen anahtar kelimelerle koşullanarak gerçekleştirmeleridir (Esser et al., 2021; Goodfellow et al., 2014; Ho et al., 2020).

Yapay zekânın eğitimi sırasında öğrenilen şey, tasarım problemi bağlamında neden-sonuç-temsili ilişkileri değildir; dil ve görsel veride hangi bağlamda hangi devamın (kelime, görsel belirteç/token veya piksel düzeyi örüntü) daha olası olduğu bilgisidir (Radford et al., 2019). Üretim, kavramsal bağlamın anlaşılmasına değil, eğitim verisinde yüksek olasılıklı örüntülerin yeniden örneklenmesine dayanır. Bu durum, çıktının ilk bakışta tutarlı görünmesine rağmen, tutarlılığın nedensel bir modelden değil, örüntü sürekliliğinden türemesi anlamına gelir (Bender et al., 2021; Ho et al., 2020). Ayrıca bağlamın içeriği, modelin maruz kaldığı eğitim verisiyle sınırlıdır; bu da çıktılarda eğitim verisinin baskın eğilimlerinin ve yanlışlıklarının yeniden üretilmesi riskini artırır (Bender et al., 2021).

Bu örüntü-temelli işleyişin doğrudan bir sonucu, modelin bir önermenin doğruluğunu değerlendirme yetisinden yoksun olmasıdır. Model, bir ifadenin doğru ya da yanlış olduğunu nedensel bir dünya modeline başvurarak sınamaz; yalnızca eğitim verisinde o ifadenin hangi sıklıkta ve hangi bağlamlarla birlikte görüldüğünü esas alır. Dolayısıyla bir görüşün eğitim verisindeki baskınlığı, modelin onu "olası" ve dolayısıyla üretilmeye değer kabul etmesi için yeterlidir; o görüşün gerçeklikle ilişkisi belirleyici değildir. Eğitim verisinde belirli bir iddianın lehine olan metinler baskın olsaydı, model bu iddiayı (olgusal değerinden bağımsız olarak) yüksek olasılıklı bir devam olarak üretebilirdi. Bu, modelin epistemik açıdan güvenilir bir bilgi kaynağı ya da bir gerekçelendirme ortağı olmadığını gösterir: ürettiği çıktının ölçütü doğruluk değil, istatistiksel olasıdır.

Bu çerçevede, üretken modellerin gerçeklikle bağı kopuk çıktıları için yaygın kullanılan "halüsinasyon" terimi de yeniden düşünülmelidir. Terim, modele yanılan, yanlış algılayan bir özne iması yüklediği için antropomorfiktir ve olguyu olduğundan farklı betimler. Daha temel bir sorun ise terimin gözlemciye bağlı olmasıdır: Model her çıktısını aynı mekanizmayla, yani olasılıksal örüntü yeniden örneklemesiyle üretir; doğru kabul ettiğimiz çıktı ile "halüsinasyon" dediğimiz çıktı arasında üretim biçimi açısından hiçbir fark yoktur. Aradaki tek fark, çıktının olgusal gerçeğe uymadığını bizim tespit edemediğimizdir. Uyumsuzluğu fark ettiğimizde "halüsinasyon" deriz, fark edemediğimizde aynı türden çıktıyı doğru bilgi olarak kabul ederiz. Dolayısıyla "halüsinasyon", çıktının bir özelliği değil, gözlemcinin ona ilişkin yargısıdır; bu da model çıktısının her durumda gerçeklikle nedensel bir bağ taşımadan üretildiği gerçeğini gizler. Bu anlamda modelin ya hiç halüsinasyon görmediği ya da sürekli halüsinasyon içinde olduğu söylenebilir. Söz konusu çıktılar rastgele bir gürültü de değildir; *promptun* ve eğitim verisinin daralttığı bir olasılık alanı içinde, fakat bu alanın gerçeklikle herhangi bir nedensel bağı bulunmadan üretilirler. Bu durumu "daraltılmış rastlantısallık" olarak adlandırmak mümkündür: Çıktı, bağlam tarafından sınırlandırılmış bir uzayda olasılıksal olarak biçimlenir; ancak bu sınırlandırma onun gerçeklikle uygunluğunu değil yalnızca istatistiksel olasıdır.

Yapay zekânın ürettiği görüntülerin bir sebep – sonuç ilişkisine dayanmıyor olması sorunu (süreksizlik), *prompt* ile görsel üretim modeline tasarımın bağlam bilgisi aktarıldıktan sonraki aşamada, görsel üretim modellerine geçildiğinde daha da belirginleşmektedir. LLM, *promptu* istatistiksel olarak işleyerek bağlamsal bir metin çerçevesi üretebilir; ancak bu çerçeve, görsel üretim modeline aktarıldığında nedensel bir tasarım modeli değil, yalnızca örüntüsel bir koşullandırma girdisi

işlevi görür yani bağlam–sebeup–sonuç (tasarım kararı–tasarım ürünü) sürekliliği bozulur. Bir başka deyişle, görüntü üreten modellerde üretim süreci, rastlantısal gürültüyle başlatılan ve eğitim verilerinden öğrenilmiş olasılık yoğunlukları doğrultusunda, *prompt* girdisi ile belirlenen koşullandırmanın etkisi altında kademeli olarak geri çözölen bir örnekleme sürecine dayandığından (Ho et al., 2020), ortaya çıkan görsel sonuç, tasarımcı zihnindeki bağlam – sebep – sonuç ilişkilerinin ya da nedensel bir sürekliliğin dış temsili değil, istatistiksel olarak eğitim verisindeki görsel örüntülerin, LLM’den gelen koşullandırma girdisi çerçevesinde rastlantısallık içeren bir yakınsamasıdır (Ho et al., 2020). Görsel çıktının tutarlı veya anlamlı görünmesi, kavramsal bir bağlamın kavranmasından değil, olasılık uzayında yüksek ağırlığa sahip örüntülerin yeniden yapılandırılmasından ve gözlemcinin bu görüntüyü kendince anlamlandırmasından kaynaklanmaktadır.

6. Eğitim Verisinin Epistemik Sınırları

Bu sistemlerin tasarım sürecinin öznesi olarak konumlandırılmamasının bir diğer nedeni, mimarilerinden bağımsız olarak, eğitildikleri verinin niteliğinde yatar. Bu sınırlılık yalnızca veri miktarı ya da yanlılığıyla ilgili değildir; verinin türüyle, yani hangi tür bilgiyi taşıyıp hangisini taşıyamadığıyla ilgilidir. Üretken modeller, tasarım bilgisinin yalnızca belirli bir kesitini içeren bir korpustan öğrenir ve bu kesit, tasarım sürecini öznesi kılan bilgi türlerini yapısal olarak dışarıda bırakır.

Bunun ilk boyutu, örtük bilginin yazıya geçerken uğradığı kayıptır. Daha önce belirtildiği gibi, tasarım uzmanlığının önemli bir bölümü sözcelleştirilemeyen, deneyimsel ve bedenli bir örtük bilgi katmanında yer alır (Polanyi, 1966; Schön, 1983). Üretken modellerin eğitildiği veri ise, tanımı gereği, bu bilginin yalnızca dile ya da görsele dökülebilmüş kısmından oluşur. Bir tasarımcının bir oranı sezgisel olarak "doğru bulması" ya da bir çözümün neden işlemediğini gerekçesini dile dökmeden görmesi türünden bilgi, yazılı ve görsel korpusta temsil edilmez. Dolayısıyla model, en iyi ihtimalle tasarım bilgisinin sözcelleşebilen kabuğunu görür; uzmanlığı asıl taşıyan örtük çekirdeğe yapısal olarak erişemez.

İkinci ve daha belirleyici boyut, sürece ilişkin verinin yokluğudur. Modellerin eğitildiği korpus, büyük ölçüde tasarım sürecinin ürünlerinden oluşur: tamamlanmış projeler, görseller ve bunları betimleyen metinler. Oysa bir tasarımın *brieften* sonuca nasıl çerçeveselendiği, hangi alternatiflerin neden elendiği, hangi kısıtların kararları nasıl dönüştürdüğü ve çözümün hangi geri besleme döngüleriyle olgunlaştığı (yani karar sürecinin kendisi) sistematik olarak kayıt altına alınmaz; süreç, dışa vurulan nihai ürünün ardında görünmez kalır. Bu nedenle model, bir tasarım kararının nasıl üretildiğini değil, yalnızca o kararın sonucunu gözlemler. Karar dizisini, yani niyetin sonuca dönüştüğü yolu öğrenebileceği bir veri mevcut değildir; model ancak sonuçları taklit edebilir, bu sonuçları doğuran süreci değil.

Bu iki boyut birlikte düşünüldüğünde, eksikliğin geçici ya da yalnızca veri toplama meselesi olmadığı görülür. Sürece ilişkin veri ileride sistematik biçimde toplanabilse dahi (örneğin sesli düşünme protokolleri, tasarım günlükleri ya da eskiz dizileri yoluyla), kaydedilebilen şey yine yalnızca sürecin sözcelleştirilebilen veya çizime dökülebilen kesiti olurdu; tasarımcının örtük bilgisine dayanan kısmı bu kayıta da temsil edilemezdi.

Sonuç olarak, üretken modellerin tasarım kararının faili olarak konumlandırılmaması yalnızca mimari bir sınır değil, aynı zamanda epistemik bir sınırdır. Önceki bölümde gösterildiği gibi bu sistemler nedensel bir karar zinciri kurma yetisinden yoksundur; bu bölümde ise, böyle bir zinciri öğrenebilecekleri bir veri türünün de bulunmadığı ortaya konmuştur. Niyet, gerekçelendirme ve karar–çıktı sürekliliği hem modelin işleyişinde hem de onu besleyen veride karşılığı olmayan kapasitelerdir; dolayısıyla bu sistemler, insan tasarımcının yerine geçen bir özne olarak değil, onun bilişsel işleyişini dışarıdan destekleyen araçlar olarak anlaşılmalıdır.

7. Eş Tasarımcı Yanılsaması

Tasarım süreçlerinde üretken yapay zekâ modellerinin yaratıcı özne ya da eş tasarımcı gibi konumlandırılmasına yol açan yanılgı, çoğunlukla yapay zekâ aracının hangi aşamada güçlü olduğunun karıştırılmasından kaynaklanır. Birincisi, üretken modeller kısa sürede çok sayıda ve biçimsel olarak karmaşık çıktı üretebildiği için bu üretim kapasitesi, tasarımın tamamına genellenerek hızlı üretim yapabilen aracın yaratıcı özne olduğu izlenimi doğar. Oysa üretimle (generation) elde edilen çeşitlilikle, üretilenin amaca göre değerlendirmesi (evaluation) aynı şey değildir. Dahası çok sayıda çeşitli üretim, hedefe göre seçimle (goal-directed selection) de özdeşleştirilemez. Yaratıcı öznenin belirleyici bileşeni, seçeneklerin bağlam ve kısıtlar altında hedefler doğrultusunda seçilmesi ve bu seçimin gerekçelendirilmesidir. Biçimsel çeşitlilik tek başına bu işlevi üstlenmez.

İkincisi, büyük dil modellerinin gerekçe benzeri metinler üretebilmesi, bu metinlerin gerekçeli tasarım kararlarına benzemesi nedeniyle bir karar verme yanılsaması yaratabilir. Ancak gerekçe metni üretmek, kararın gerçekten o gerekçelerle kurulduğunu veya verilen kararın üretilen sonuçlarla sınındığını göstermez. Başka bir deyişle gerekçeyi dile getirmek ile gerekçeye göre seçmek ve bu seçimin sonuçlarını izlemek farklıdır.

Üçüncüsü, yapay zekâ ajanlarının çok adımlı görev akışları kurabilmesi ve dış araçlar çağırarak süreci yürütebilmesi, pratikte bir iş yapma yetkinliği sergilese de bu durum tasarım kararının faili olduğu anlamına gelmez. Burada eksik olan unsur, sistemin tasarım sürecinde aldığı kararlar ile ortaya çıkan öneri arasında izlenebilir ve tutarlı bir açıklama ilişkisi kurabilmesidir; yani "bu kararı şu varsayımlara dayanarak verdim, bu nedenle şu sonuç ortaya çıktı" biçiminde, gerekçe ile çıktıyı birbirine nedensel olarak bağlayan bir zincir kurabilmesidir.

İlk bakışta bazı mekanizmaların bu boşluğu doldurduğu düşünülebilir; örneğin düşünce zinciri (chain-of-thought) yönlendirmesi ya da araç kullanan (ReAct türü) ajanlar, kararlarını adım adım gerekçelendiriyormuş gibi görünen ara metinler üretir (Wei et al., 2022; Yao et al., 2023). Ancak bu ara metnin, modelin çıktıya gerçekte hangi süreçle ulaştığını sadakatle yansıttığının bir güvencesi yoktur; ara adımlar üretimi etkilese bile, bunların kararın gerçek gerekçesi mi yoksa sonradan üretilmiş, makul görünen bir anlatı mı olduğu sistemin kendisinden ayırt edilemez (Turpin et al., 2023). Başka bir deyişle, üretilen açıklama izlenebilir bir gerekçe zinciri görünümü taşısa da bu görünüm onun kararın gerçek nedensel temsili olduğunu güvence altına almaz.

Bu kopukluk, metinden görsele geçişte daha da belirginleşir. Görsel üretim modeline aktarılan şey, tasarım kararının kendisi değil, onun dile dökülüp kodlanmış bir temsildir; bu temsil bir metin kodlayıcı aracılığıyla sürekli bir anlam uzayına gömülür ve modeli koşullandıran girdi olarak iş görür (Radford et al., 2021; Rombach et al., 2022). Söz konusu temsil ne kadar zengin olursa olsun, kararın ardındaki örtük ve çok katmanlı gerekçe yapısını değil, yalnızca onun sözelleştirilebilen kesitini taşır. Oysa gerçek bir tasarım kararındaki ilişki, sözelleştirilebilir bir eşleşmeye indirgenemez: Kavramsal, kültürel, ekonomik, geometrik ve algısal pek çok unsurun (büyük bölümü örtük olan bir bilgi bütünü) bileşkesidir. Üretken sistemler bu çok katmanlı ilişkiyi kuramaz; yalnızca onun dile yansıyabilen bir kesitini girdi olarak alır. Dolayısıyla mevcut büyük dil modeli ve görsel üretim mimarilerinde, sistemin gerekçe ile çıktı arasında izlenebilir ve nedensel bir açıklama zincirini kendiliğinden sunma kapasitesi bulunmaz; üretilen açıklama da görsel de kararın nedensel temsili değil, örüntüsel bir yakınsamadır.

Bu üç unsur birlikte, araç düzeyindeki üretim ve yürütme yeteneklerinin, tasarım kararını kuran ve gerekçelendiren öznel bir eylemle karıştırılmasına ve dolayısıyla yaratıcı özne/eş tasarımcı atfına zemin hazırlayabilmektedir.

8. Önerilen Ayırt Etme Çerçevesi

Tasarım alanında özne ile araç arasındaki çizginin bulanıklaştığı durumlarda, aşağıdaki üç soruluk kısa test hızlı bir ayırt etme çerçevesi sunar. Yaratıcı öznenin üç koşulu, önerilen ayırt etme çerçevesinde üç ayrı soru halinde işlemselleştirilmektedir: ilk soru hedef ve kısıtların kurulup güncellenebilmesini, ikinci soru kararların gerekçelendirilmesini, üçüncü soru ise kararlar ile çıktı arasındaki izlenebilir ilişkinin sınanmasını amaçlamaktadır:

- a. Test edilen aktör/sistem, tasarım *brief*ini esas alarak tasarımın amacını, hedeflerini ve ilgili kısıtları belirleyebiliyor; süreç içinde yeni koşullar ortaya çıktığında bu hedef ve kısıtlarla ilişkili çözüm yönelimini tutarlı biçimde sürdürebiliyor veya güncelleyebiliyor mu?
- b. Test edilen aktör/sistem, aldığı tasarım kararlarını bağlam, kısıtlar ve beklenen sonuçlar arasında kurduğu ilişki üzerinden gerekçelendirebiliyor mu?
- c. Test edilen aktör/sistem, tasarım sürecinde aldığı kararlar ile ortaya çıkan öneri arasında izlenebilir ve tutarlı bir açıklama ilişkisi kurabiliyor mu?

Bu üç soruluk yapı, bu çalışma kapsamında ampirik olarak doğrulanmış bir ölçüm aracı olarak değil, araç-özne ayrımını tartışmaya açan kavramsal ve yorumlayıcı bir ayırt etme çerçevesi olarak önerilmektedir. Gelecek çalışmalar, bu çerçevenin farklı tasarım problemleri ve stüdyo bağlamları üzerinde örnek olaylar aracılığıyla sınanmasına odaklanabilir.

9. Sonuç

Bu bildiri, üretken yapay zekâ sistemlerinin tasarımda yaratıcı özne olarak değil, tasarımcının bilişsel işlevlerini destekleyen gelişmiş araçlar olarak kavranması gerektiğini ileri sürmüştür. Bu ayırım, yaratıcı özneyi niyet kurma, kararlarını bağlam ve kısıtlar içinde gerekçelendirme ve bu kararlar ile ortaya çıkan öneri arasında izlenebilir ve tutarlı bir açıklama ilişkisi (sürekliliği) kurabilme ölçütleri üzerinden tanımlayan kavramsal bir çerçeveye dayanmaktadır. Bildirideki tartışma, insan tasarımcının şema temelli anlamlandırma ve nedensel karar verme süreçleri ile üretken modellerin örüntü temelli olasılıksal üretim mantığı arasındaki farkın, araç ile özne ayrımını kurmak açısından belirleyici olduğunu savunmaktadır. Bu nedenle üretken sistemler, tasarım sürecinde varyasyon üretimi, temsil geliştirme ve iletişim gibi alanlarda güçlü destekler sunabilse de tasarım kararının faili olarak değerlendirilemez.

Bu ayırımın yalnızca kavramsal değil, pratik bir önemi de vardır. Bir sistemi "araç" olarak mı yoksa "ortak" ya da "eş tasarımcı" olarak mı adlandırdığımız masum bir terim tercihi değildir; araştırma sorularını, yaratıcılığın ve özgünlüğün kime atfedileceğini ve özellikle tasarım eğitiminde öğrencinin kendi bilişsel failliğini nasıl konumlandıracağını doğrudan biçimlendirir. Yapay zekâyı bir eş tasarımcı olarak çerçeveleyen bir dil, tasarım kararının asıl failini (öğrenciyi ya da tasarımcıyı) görünmez kılma ve yaratıcı sorumluluğu araca devretme riski taşır. Dolayısıyla doğru kavramsal dilin kurulması, yalnızca terminolojik bir titizlik değil, tasarım pratiğinin ve eğitiminin faillğe ilişkin temel varsayımlarını koruma meselesidir.

Bu ayrımı uygulamada görünür kılmak için önerilen üç soruluk çerçeve, özellikle eğitim ve stüdyo bağlamlarında hızlı bir kavramsal ayırt etme aracı olarak kullanılabilir. Bununla birlikte bu çerçeve bir ölçüm aracı değil, yorumlayıcı bir değerlendirme yardımcısıdır; bu nedenle farklı tasarım problem türleri ve değerlendirme bağlamlarında ayrıca sınanması gerekir.

KAYNAKLAR

- Alba, J. W., & Hasher, L. (1983). Is memory schematic? *Psychological Bulletin*, 93(2), 203–231.
<https://doi.org/10.1037/0033-2909.93.2.203>
- Anderson, R. C. (1977). The notion of schemata and the educational enterprise: General discussion of the conference. In R. C. Anderson, R. J. Spiro, & W. E. Montague (Eds.), *Schooling and the acquisition of knowledge* (pp. 415–431). Lawrence Erlbaum Associates.
- Anderson, J. R. (1983). *The architecture of cognition*. Harvard University Press.
- Atkinson, R. C., & Shiffrin, R. M. (1968). Human memory: A proposed system and its control processes. In K. W. Spence & J. T. Spence (Eds.), *The psychology of learning and motivation* (Vol. 2, pp. 89–195). Academic Press.
- Baddeley, A. D. (2000). The episodic buffer: A new component of working memory? *Trends in Cognitive Sciences*, 4(11), 417–423.
- Baddeley, A. D., & Hitch, G. (1974). Working memory. In G. H. Bower (Ed.), *The psychology of learning and motivation* (Vol. 8, pp. 47–89). Academic Press.
- Bartlett, F. C. (1932). *Remembering: A study in experimental and social psychology*. Cambridge University Press.
- Baudoux, G. (2024). The benefits and challenges of AI image generators for architectural ideation: Study of an alternative human-machine co-creation exchange based on sketch recognition. *International Journal of Architectural Computing*, 22(2), 201–215. <https://doi.org/10.1177/14780771241253438>
- Bender, E. M., Gebru, T., McMillan-Major, A., & Shmitchell, S. (2021). On the dangers of stochastic parrots: Can language models be too big? In *Proceedings of the 2021 ACM Conference on Fairness, Accountability, and Transparency (FAccT '21)* (pp. 610–623). Association for Computing Machinery.
<https://doi.org/10.1145/3442188.3445922>
- Blaas, Q., Pelosi, A., & Brown, A. (2023). Reconsidering artificial intelligence as co-designer: Using machine learning in architecture from a designer's perspective. In W. Dokonal, U. Hirschberg, & G. Wurzer (Eds.), *eCAADe 2023: Digital design reconsidered* (Vol. 2, pp. 559–566). eCAADe.
<https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2023.2.559>
- Cheung, V., Dall'Asta, J. C., & Di Marco, M. (2023). Exploring large language model as a design partner through verbal and non-verbal conversation in architectural design process. *Blucher Design Proceedings*, 12(3), 1059–1070. <https://doi.org/10.5151/sigradi2023-65>
- Cross, N. (2001). Designerly ways of knowing: Design discipline versus design science. *Design Issues*, 17(3), 49–55.
- Çelik, A. T., Kurtuluş, Ş., Karabay, E., & Özdemir, S. (2023). Integrating AI image generation to first-year design studio: "Invisible Cities" reimagined with AI. In *Proceedings of ASCAAD 2023* (pp. 976–995).
- Esser, P., Rombach, R., & Ommer, B. (2021). Taming transformers for high-resolution image synthesis. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (pp. 12873–12883).
- 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. D. Lawrence, & K. Q. Weinberger (Eds.), *Advances in Neural Information Processing Systems* (Vol. 27). Curran Associates.
- Ho, J., Jain, A., & Abbeel, P. (2020). Denoising diffusion probabilistic models. In *Advances in Neural Information Processing Systems* (Vol. 33, pp. 6840–6851). Curran Associates.
- Medel-Vera, M. C., Britton, S., & Gates, W. F. (2025). An exploration of the role of generative AI in fostering creativity within architectural learning environments. *Computers & Education: Artificial Intelligence*, 9, 100501. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2025.100501>
- Polanyi, M. (1966). *The tacit dimension*. University of Chicago Press.
- Radford, A., Wu, J., Child, R., Luan, D., Amodei, D., & Sutskever, I. (2019). Language models are unsupervised multitask learners. *OpenAI Technical Report*, 1(8), 9.
- 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). Learning transferable visual models from natural language supervision. *Proceedings of the 38th International Conference on Machine Learning (ICML)*, 8748–8763.
- Rombach, R., Blattmann, A., Lorenz, D., Esser, P., & Ommer, B. (2022). High-resolution image synthesis with latent diffusion models. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 10684–10695.
- Rumelhart, D. E. (1980). Schemata: The building blocks of cognition. In R. J. Spiro, B. C. Bruce, & W. F. Brewer (Eds.), *Theoretical issues in reading comprehension* (pp. 33–58). Lawrence Erlbaum Associates.

- Ryle, G. (1949). *The concept of mind*. Hutchinson.
- Scaife, M., & Rogers, Y. (1996). External cognition: How do graphical representations work? *International Journal of Human-Computer Studies*, 45(2), 185–213.
- Schön, D. A. (1983). *The reflective practitioner: How professionals think in action*. Basic Books.
- Turpin, M., Michael, J., Perez, E., & Bowman, S. R. (2023). Language models don't always say what they think: Unfaithful explanations in chain-of-thought prompting. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 36, 74952–74965.
- Wei, J., Wang, X., Schuurmans, D., Bosma, M., Ichter, B., Xia, F., Chi, E., Le, Q., & Zhou, D. (2022). Chain-of-thought prompting elicits reasoning in large language models. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 35, 24824–24837.
- Yao, S., Zhao, J., Yu, D., Du, N., Shafran, I., Narasimhan, K., & Cao, Y. (2023). ReAct: Synergizing reasoning and acting in language models. In *The Eleventh International Conference on Learning Representations (ICLR 2023)*.
- Zhang, J., & Norman, D. A. (1994). Representations in distributed cognitive tasks. *Cognitive Science*, 18(1), 87–122.

From Tool Operation to Process-Oriented Design Reasoning: Tracing Student Learning Trajectories in Robotic Fabrication

Begüm Hamzaoglu¹ 

¹Istanbul Technical University

¹hamzaoglu@itu.edu.tr

Abstract

This study investigates the development of design reasoning through robotic fabrication, drawing on a pedagogical experiment conducted in a graduate-level course. Situated within computational design education, it examines how students articulated relationships among material behaviour, computational abstraction, tooling, setup configuration, and robotic movement while developing material-specific fabrication processes. The research was conducted with five student groups working with steel rod, laminated steel wire, kinetic sand, aluminium sheet, and concrete in flexible formwork. Following a preliminary robotic drawing exercise, the main projects were organised through three stages: analogue material exploration, computational abstraction and custom tooling, and robotic implementation with iterative material feedback. A shared brief required each group to develop a repeatable process for producing permeable modular units.

The study adopted a qualitative, exploratory approach based on reflective narrative responses and written and visual process documentation. These materials were analysed thematically to identify recurring patterns in how students described fabrication decisions, constraints, revisions, and broader design possibilities. The analysis identified three interrelated learning trajectories. The first traced the translation of tactile, temporal, and geometric observations into computational and robotic variables. The second captured process-oriented reasoning through the co-configuration of tools, fixtures, movement strategies, material conditions, and situated human intervention. The third showed how students recognised fabrication workflows as adaptable and reconfigurable, projected their underlying logic into broader applications and scales, and approached fabrication systems as structures for inquiry, comparison, or feedback.

Across the projects, robotic implementation remained a continuing site of material learning, as physical trials generated information through which parameters, tools, setups, and movement decisions were revised. Taken together, the three trajectories provide conceptual inputs for interpreting process formation in material-led robotic fabrication and inform four pedagogical directions: positioning analogue exploration as part of parameter formation; treating end-effector, fixture, and setup development as core design work; using structured process documentation to relate material and robotic conditions to subsequent revisions and outcomes; and creating opportunities to examine how fabrication systems may be reconfigured, aggregated, transferred, or developed as research and evaluation platforms. These implications provide a basis for aligning studio briefs, documentation formats, and assessment criteria with process formation, and may support the future development of a more integrated pedagogical framework connecting robotic fabrication with architectural design reasoning.

Keywords: Robotic fabrication, Computational design education, Design pedagogy, Material experimentation.

Araç Kullanımından Süreç Odaklı Tasarım Akıl Yürütmesine: Robotik Fabrikasyonda Öğrenci Öğrenme Süreçlerinin İzlenmesi

Begüm Hamzaoglu¹ 
¹İstanbul Teknik Üniversitesi
¹hamzaoglu@itu.edu.tr

Özet

Bu çalışma, lisansüstü düzeyde yürütülen bir ders kapsamında gerçekleştirilen pedagojik bir deneye dayanarak robotik fabrikasyon yoluyla tasarım akıl yürütmesinin gelişimini incelemektedir. Hesaplamalı tasarım eğitimi bağlamında ele alınan çalışma, öğrencilerin malzemeye özgü fabrikasyon süreçleri geliştirirken malzeme davranışı, hesaplamalı soyutlama, araç ve takım geliştirme, kurulum yapılandırması ve robotik hareket arasındaki ilişkileri nasıl ifade ettiklerine odaklanmaktadır. Araştırma; çelik çubuk, lamine çelik tel, kinetik kum, alüminyum levha ve esnek kalıp içinde beton ile çalışan beş öğrenci grubuyla gerçekleştirilmiştir. Ön hazırlık niteliğindeki robotik çizim çalışmasının ardından ana projeler üç aşamada yürütülmüştür: analog malzeme araştırması, malzeme gözlemlerinin parametreler ve süreç ilişkileri üzerinden soyutlanması ve özel araç geliştirme ile yinelenmeli malzeme geri bildirimi içeren robotik uygulama. Ortak proje çerçevesi, her grubun geçirgen modüler birimlerin üretimine yönelik tekrarlanabilir bir süreç geliştirmesini gerektirmiştir.

Çalışmada, öğrencilerin üretim süreçlerine ilişkin yazılı değerlendirmelerine ve yazılı ve görsel süreç dokümantasyonuna dayanan nitel ve keşfedici bir yaklaşım benimsenmiştir. Bu materyaller, öğrencilerin fabrikasyon kararlarını, kısıtları, revizyonları ve daha geniş tasarım olanaklarını tanımladıklarında tekrar eden örüntüleri belirlemek amacıyla tematik olarak analiz edilmiştir. Analiz sonucunda birbiriyle ilişkili üç öğrenme yörüngesi belirlenmiştir. İlk yörünge, dokunsal, zamansal ve geometrik gözlemlerin hesaplamalı ve robotik değişkenlere dönüştürülmesini izlemektedir. İkinci yörünge; araçların, sabitleme elemanlarının, hareket stratejilerinin, malzeme koşullarının ve bağlama özgü insan müdahalelerinin birlikte yapılandırılması yoluyla gelişen süreç odaklı akıl yürütmeyi ortaya koymaktadır. Üçüncü yörünge ise öğrencilerin fabrikasyon iş akışlarını uyarlanabilir ve yeniden yapılandırılabilir sistemler olarak değerlendirdiklerini, bu sistemlerin altında yatan mantığı farklı uygulama ve ölçeklere taşıdıklarını ve fabrikasyon sistemlerini araştırma, karşılaştırma ve geri bildirim yapıları olarak ele aldıklarını göstermektedir.

Projeler boyunca robotik uygulama, fiziksel denemelerin parametrelerin, araçların, kurulumların ve hareket kararlarının yeniden değerlendirilmesini sağlayan bilgiler üretmesi nedeniyle devam eden bir öğrenme alanı olarak işlev görmüştür. Birlikte değerlendirildiğinde bu üç yörünge, malzeme odaklı robotik fabrikasyonda süreç oluşumunun yorumlanmasına yönelik kavramsal girdiler sunmakta ve dört pedagojik yönelime işaret etmektedir: analog araştırmanın parametre oluşturma sürecinin bir parçası olarak konumlandırılması; uç eleman, sabitleme elemanı ve kurulum geliştirme süreçlerinin temel tasarım çalışmaları olarak ele alınması; malzeme ve robotik koşulların sonraki revizyon ve sonuçlarla ilişkilendirilmesi için yapılandırılmış süreç dokümantasyonunun kullanılması; fabrikasyon sistemlerinin yeniden yapılandırılma, bir araya getirilme, aktarılma veya araştırma ve değerlendirme platformları olarak geliştirilme biçimlerinin incelenmesine olanak tanınması. Bu çıkarımlar, robotik fabrikasyon ile mimari tasarım akıl yürütmesini ilişkilendiren daha bütünsel bir pedagojik çerçevenin geliştirilmesine katkı sağlayabilir.

Anahtar Kelimeler: Robotik fabrikasyon, Hesaplamalı tasarım eğitimi, Tasarım pedagojisi, Malzeme araştırmaları.

1. Introduction

Computational design education has increasingly incorporated digital fabrication and robotic technologies into architectural curricula. Foundational studies have framed industrial robots as open and reconfigurable interfaces through which designers can engage with geometry, programming, custom tools, and fabrication processes (Brell- Çokcan & Braumann, 2013). Their fabrication logic emerges through the coordinated, project-specific configuration of end-effectors, toolpaths, workcell arrangements, robot movements, and material-handling strategies. Compared with more standardised model-to-machine workflows, this shifts attention from the geometry of the final outcome towards the process logic through which it is generated (Gramazio & Kohler, 2014). Consequently, robotic fabrication engages students in reasoning through the interdependence of tools, materials, movement, and fabrication decisions, positioning process configuration itself as part of architectural design reasoning.

Craft-informed and embodied perspectives provide a pedagogical orientation for integrating robotics into architectural curricula by foregrounding the situated coordination of material, tool, and movement. Research connecting craft practices with computational design emphasises material behaviour, tacit knowledge, and embodied tool interaction as integral to robotic fabrication processes (Cheatle & Jackson, 2023; Veliz Reyes et al., 2019). Correspondingly, pedagogical experiments have used material exploration and human–material dialogue to introduce robotic learning, often asking students to analyse or enact manual operations before translating them into robotic kinematic logics (Llach et al., 2016; Tvede Hansen, 2023; Yazar et al., 2023). Preliminary material testing, custom end-effector development, and iterative toolpath revision further support this transition from embodied experience to computational abstraction and robotic implementation (Hunt, 2023; Raspall, 2015).

Existing research has associated robotic fabrication in architectural education with several pedagogical benefits. Alongside enabling engagement with complex and non-standard geometries, robotic workflows can strengthen connections between computational modelling and physical construction and support reflection-in-action through iterative making (Jensen et al., 2020; Sweet, 2016). Such perspectives direct pedagogical attention towards the ways in which material feedback, technical constraints, and process development become available for observation and reflection. Robotic fabrication has also been connected to material efficiency and the reuse of unconventional or recycled material streams, extending its relevance to broader curricular discussions of sustainability (Shi et al., 2020). What remains less clearly articulated is how these learning dynamics unfold within students' design reasoning and how insights into these processes can inform the pedagogical and curricular integration of robotic fabrication in architectural education.

The present study uses a graduate-level digital fabrication course as a focused empirical setting to examine how students move across analogue material experimentation, computational abstraction, tooling development, and robotic implementation. Drawing on student reflections and process documentation, it identifies emerging learning trajectories through which material observations, technical constraints, and fabrication decisions become interrelated. The resulting conceptual inputs may inform the development of project briefs, documentation formats, assessment criteria, and curricular sequencing, while supporting future pedagogical models for the more comprehensive integration of robotic fabrication within architectural curricula.

2. Methodology

The study adopted a qualitative, exploratory approach using thematic analysis of student reflections and written and visual process documentation from five group projects. Initial coding focused on how fabrication decisions and relationships among process components were articulated or documented, including recurring references to material behaviour, computational abstraction,

tooling and setup, robotic constraints, iteration, and the extension of fabrication logic beyond the immediate prototype. The codes were compared across the projects and clustered into trajectory-specific focused categories, with each coded segment assigned a primary focused code and learning trajectory. The analysis examined the transitions from material exploration to computational abstraction and robotic implementation, with particular attention to the relationships through which design reasoning became visible. Recurrent cross-case patterns informed the three learning trajectories presented in the findings.

3. The Material-Led Learning Framework for Robotic Fabrication

All groups followed a structured, three-stage workflow designed to support the transition from manual experimentation to robotic implementation. During the course, students worked primarily with Rhinoceros and Grasshopper, together with KUKA|prc for robotic simulation and control (Association for Robots in Architecture, n.d.; Braumann & Brell-Cokcan, 2011). They also had access to a six-axis KUKA KR 6 R900 sixx robotic arm and a 3D printer for prototyping custom end-effectors, fixtures, and auxiliary components.

Before the main fabrication brief, a preliminary robotic drawing workshop introduced students to the relationship between manual experimentation, tool behaviour, computational path development, and robotic execution. Each group selected a different drawing instrument, including technical pens, felt-tip markers, and oil pastels, and first tested it manually to observe how variables such as pressure, contact angle, movement speed, and repeated passes affected the resulting trace. These observations subsequently informed the design or adaptation of tool holders and the development of tool-specific path and movement parameters. As illustrated in **Figure 1**, the exercise familiarised students with translating the physical characteristics of a tool and its marks into computational and robotic decisions.

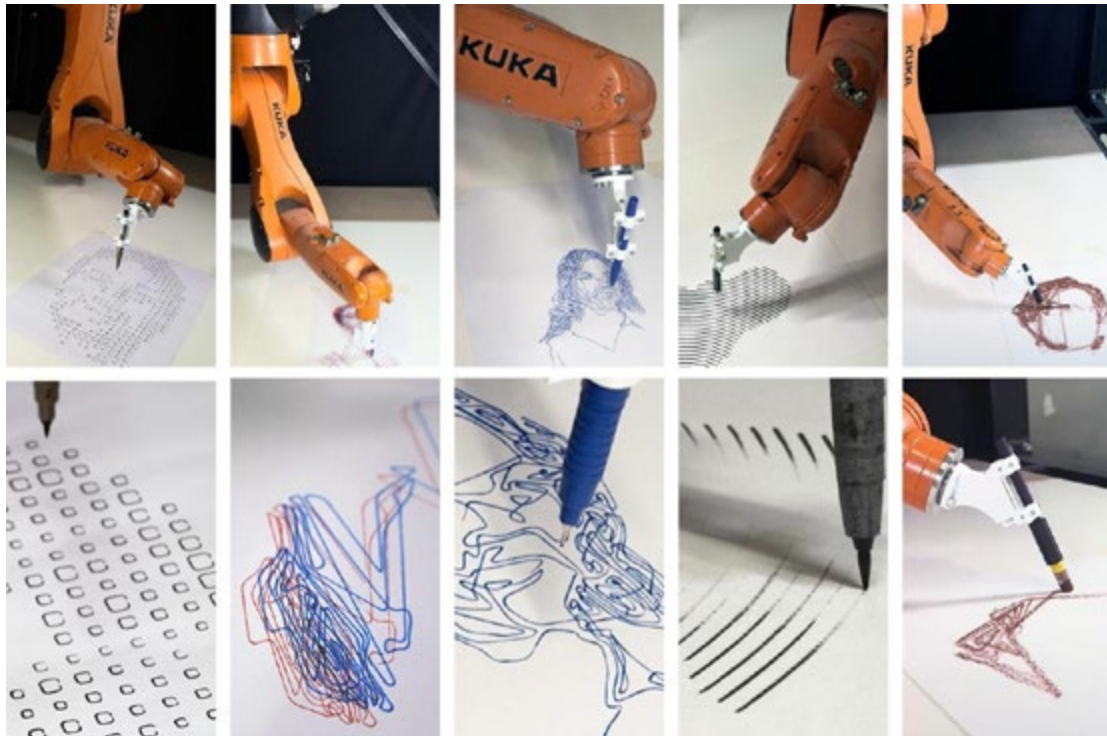


Figure 1: Selected robotic drawing experiments using different drawing instruments, showing tool-specific configurations, robotic execution, and resulting traces.

Building on this initial exercise, the material-specific projects followed the three-stage learning framework outlined below and summarised in **Figure 2**.

3.1. Analogue Material Exploration

Students began with hands-on experiments to investigate the behaviour of their selected materials. These tests focused on properties and responses relevant to fabrication, including elasticity, stiffness, resistance, deformation, tension, flow, surface interaction, and curing time. Students documented how the materials responded to different forms of manual manipulation and identified operational ranges, limits, and recurring behaviours that could guide the subsequent development of the fabrication process.

This stage established an experiential basis for computational abstraction. The observations generated through physical testing informed the selection of material-specific parameters and helped students identify which aspects of material behaviour needed to be controlled, accounted for, or investigated further during robotic implementation.

3.2. Computational Abstraction and Tooling

In the second stage, students translated observations from the manual experiments into geometric, fabrication-related, and robotic parameters. Material responses were interpreted through variables such as pushing distance, rotation angle, toolpath depth, movement sequence, spacing, tool orientation, curing duration, and fixture configuration. Using KUKA|prc within the Rhinoceros–Grasshopper environment, students began developing and simulating robotic paths while considering reachability, axis configuration, singularities, collision risk, and workspace limitations.

In parallel, each group designed or adapted the physical systems required to implement these operations, including material-specific end-effectors, fixtures, supports, and components for holding, guiding, or positioning the material. A standardised grid-based worktable provided a common reference for locating fixtures and coordinating the material setup with the robotic workspace. Computational planning, tooling, and setup development therefore evolved together, as changes in tool geometry, material placement, or constraint configuration altered both the available robot movements and the anticipated material transformation.

3.3. Robotic Implementation and Feedback

In the final stage, the simulated processes were physically implemented using the robotic arm. Students used KUKA|prc to manage successive fabrication iterations, comparing material outcomes with the intended geometric and process logic.

Observations from physical trials prompted revisions to toolpaths, parameter values, movement sequences, end-effector geometries, fixture arrangements, and material preparation strategies. Robotic implementation thus became a continuing site of material inquiry, in which fabrication feedback informed computational decisions and physical configurations through repeated cycles of simulation, execution, observation, and adjustment.

By maintaining a shared pedagogical sequence while leaving material selection, tooling, and process development open to each group, the framework provided a common basis for comparison without prescribing uniform fabrication outcomes. This made it possible to examine how different material behaviours redirected computational abstraction, robotic planning, and iterative decision-making across the five projects.

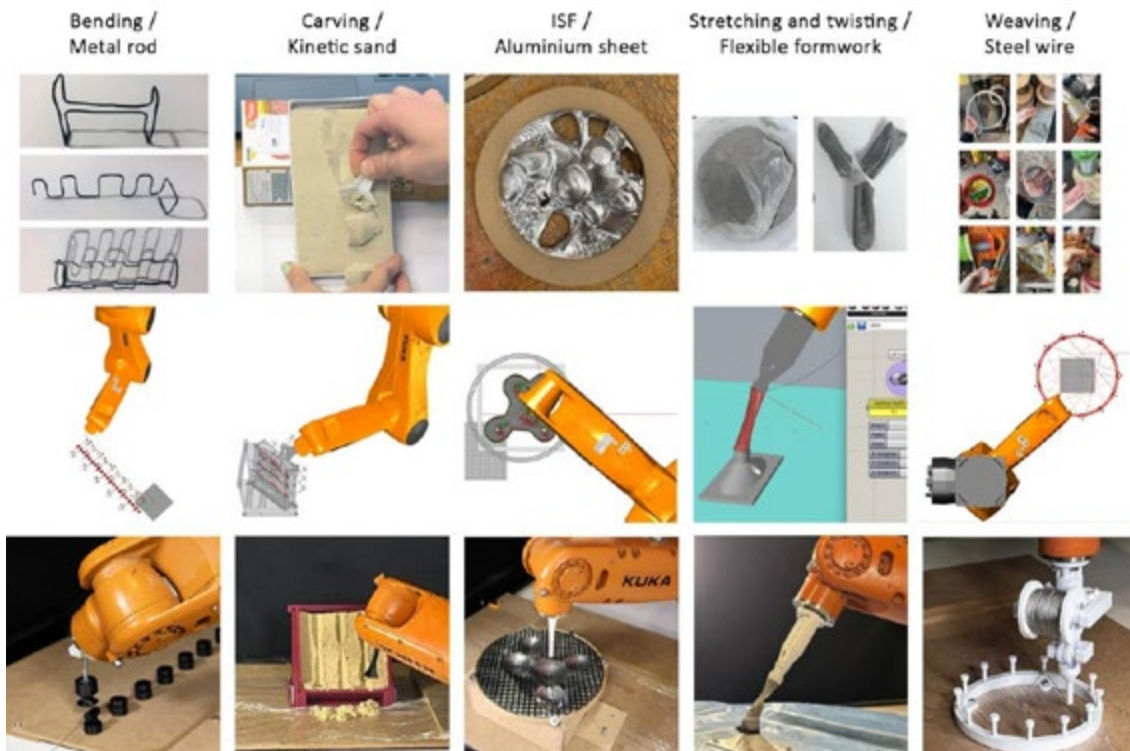


Figure 2: Material-led learning workflow showing the transition from analogue experimentation to computational abstraction and robotic implementation across student projects. From left to right: bending with metal rod (Ayşe Ebrar Kavak, Kevser Özden, Yaren Karakaya); carving with kinetic sand (Azat Kılınc, Buse Elif Kule, Ulvin Görkem Canbulat); incremental sheet forming with aluminium sheet (Hamdi Çakır, Hasan Berkay Coşer); stretching and twisting with flexible formwork (Ahmet Ege Sert, Hilal Yivci, Şeyma Olcay); and weaving with steel wire (Kenan Emre Yılmaz, Sinan Ayaz).

4. Findings: Emerging Learning Trajectories

Table 1 presents the nine focused codes derived from the initial coding. Frequency denotes the number of coded textual or visual segments assigned to each focused code, while group coverage indicates the number of projects in which it appeared. Taken together, the focused codes reveal three recurring transitions in how students articulated design reasoning: translating material observations into operational variables; coordinating tooling, setup, movement, and feedback as an interconnected process; and extending fabrication logic beyond the immediate prototype. The following sections examine each trajectory through the student reflections and process documentation.

4.1. From Tactile Intuition to Parametric Logic

The first trajectory describes how observations of material and geometric conditions became operational within computational and robotic processes. It comprised material response translated into parameters (11 coded segments; 4/5 groups), behavioural thresholds informing abstraction (3 segments; 3/5 groups), and temporal and geometric conditions encoded as process variables (11 segments; 4/5 groups).

Students described how analogue experimentation helped them identify material capacities, limits, and characteristic responses before translating these observations into fabrication criteria. The steel-wire group stated:

“The material’s flexibility, breaking behaviour, and strength required us to adjust the force needed to wind the wire smoothly from the spool and the angle between the wire and the KUKA end-effector. To prevent slack, we also calculated the arrangement of the anchor pins and the winding method around them.” (Steel-wire weaving group, reflection)

The group’s process documentation further indicated that, after each rotation, the tool height was incremented according to wire thickness to maintain clearance and prevent interference with previously placed layers. Comparable translations appeared across the other projects. In kinetic-sand carving, deformation and load-bearing behaviour informed carving depth and toolpath development. In incremental sheet forming, combinations of process parameters were organised as a deformation sequence. In flexible formwork, increasing rotation produced thinner concrete sections and more pronounced deformation, connecting robotic movement with geometric outcome.

Material knowledge continued to develop during robotic implementation. In rod bending, unexpected elastic recovery and sequence-dependent deformation prompted revisions to geometry and toolpath organisation. Taken together, the student reflections and process records show that analogue material testing helped students identify relevant variables, establish operational thresholds, differentiate relationships among parameters, and revise fabrication decisions through subsequent robotic trials. This supports the interpretation that material exploration provided an experiential basis for robotic parameterisation and continued recalibration.

4.2. Developing Process-Oriented Reasoning

The second trajectory concerns the coordinated development and revision of tooling, setup, movement, constraints, human intervention, and material feedback. It comprised tooling–setup–movement co-configuration (21 coded segments; 5/5 groups), constraints and failures redirecting the process (7 segments; 4/5 groups), and iterative relations made visible through documentation (10 segments; 5/5 groups).

The kinetic-sand group described robotic fabrication as a cyclical process in which material, tool, and movement decisions had to be reconsidered together:

“Robotic fabrication offered a cyclical process requiring continuous feedback and reassessment. We had to consider material behaviour, robotic-arm movement, and design decisions simultaneously. In particular, the deformation behaviour of kinetic sand required the toolpath, carving depth, and end-effector design to be reorganised throughout the process.” (Kinetic-sand group, reflection)

This interdependence appeared in different forms across the projects. In sand carving, excessive material removal exposed a mismatch among tool geometry, carving depth, and mechanical resistance, prompting coordinated revisions. In flexible formwork, robot-axis limitations and concrete deformation reshaped the intended movement strategy. In steel-wire weaving, manual interventions at selected stages supported tension control and workflow stability, showing that process reasoning can also involve decisions about the distribution of human and robotic actions.

Written and visual records traced these developments through staged prototypes, revised trials, parameter comparisons, and error analyses. Kinetic-sand documentation recorded the transition to a revised tool-and-depth configuration. Incremental sheet forming related process parameters to error indicators, while flexible-formwork records connected analogue trials, tool development, and robotic execution. These records linked material and robotic conditions with subsequent revisions and outcomes.

Taken together, the student reflections and process documentation show that students revised tools, fixtures, movement strategies, and manual interventions in response to material behaviour, kinematic constraints, and unexpected fabrication outcomes. This indicates that process-oriented reasoning was articulated through the co-configuration of material, tooling, setup, robot movement, and situated human action.

Table 1: Learning trajectories, focused codes, frequencies, group coverage, and related initial codes

Learning trajectory	Focused code	Frequency	Group coverage	Representative initial-code keywords
From Tactile Intuition to Parametric Logic	Material response translated into parameters	11	4/5	toolpath as material-defining parameter; local deformation as controlled variability; elastic recovery; digital motion updated by material behaviour; re-evaluating geometry; deformation affecting toolpath; load-bearing behaviour; re-evaluation of predefined geometry; sequencing shapes form; structural stability during carving; tension-based revision; rotation angle governs thinning; reproducible fluid form characteristics
	Behavioural thresholds informing abstraction	3	3/5	sensory testing; material properties shaping process; material limits; tension stability; stiffness-flexibility balance; combining softness and durability for controlled deformation
	Temporal and geometric conditions encoded as process variables	11	4/5	sequence-dependent deformation; deformation sequence; setting time as design parameter; sequence of force application; sequence as control logic; emergent form; material-constraint interaction; fluid-to-rigid transition as design input; curing as process variable; vertical increment
Developing Process-Oriented Reasoning	Tooling–setup–movement co-configuration	21	5/5	relationships over final form; tension-control tool; curing wait embedded in robotic sequence; gravity-assisted inclined mould logic; setup components as integrated system; motion revision; toolpath revision; axis reconfiguration; parametric control linked to tool design; movement aligned with material action; flexible mould stretched between robot and table; tool geometry–removed volume relation
	Constraints and failures redirecting the process	7	4/5	tool fracture from excessive removal; tension redistribution; stress during release; rotation limitation; end-effector redesign; toolpath revision; constraint geometry affecting deformation; distributed bending; material selection linked to tool compatibility
	Iterative relations made visible through documentation	10	5/5	error analysis; process sequencing; iterative setup refinement; iterative parameter revision; same code, different outcomes; temporal fabrication record; iterative execution; optimal parameter search; process matrix
From Fabrication Logic to Multi-Scalar Design Reasoning	Recognising fabrication logic as adaptable and reconfigurable	5	3/5	variable frame logic; reverse moulding logic; process-driven motion; adaptable system; repeatable pattern generation; scalable fabrication system; adaptable workflow; reconfigurable moulding cycle
	Projecting fabrication logic into broader applications and scales	11	3/5	unit-module-pattern aggregation; transfer to other applications; structural transfer; product-scale transfer; scalable logic; architectural-scale transfer; modular applications; architectural-scale applicability; scalable anchoring system; modular joining through embedded reinforcement
	Reframing fabrication as a research, evaluation, or feedback framework	12	5/5	robot as research interface; robot as design interface; reframing from product to system performance; physical–digital comparison potential; planned vs executed depth; parameter-to-error matrix; exploration over optimization; material behaviour-revealing system; inquiry setup; learning through limitation

4.3. From Fabrication Logic to Multi-Scalar Design Reasoning

The third trajectory captures how students reconsidered the fabrication experiments in terms of adaptability, broader application, and inquiry or evaluation. It comprised recognising fabrication logic as adaptable and reconfigurable (5 coded segments; 3/5 groups), projecting fabrication logic into broader applications and scales (11 segments; 3/5 groups), and reframing fabrication as a research, evaluation, or feedback framework (12 segments; 5/5 groups).

Internal adaptability became visible when students recognised that a fabrication workflow could retain its underlying logic while its geometry, parameters, material conditions, or production cycles changed. Examples included adjustable frame and anchor configurations in wire weaving, a reusable reverse-moulding cycle in sand carving, and a repeatable yet variable process in flexible formwork.

Students also projected fabrication logics beyond the immediate prototype. The flexible-formwork group explained:

“The system could be used for experimental module production and at different architectural scales, such as façade systems, shell structures, and modular surface applications.” (Flexible-formwork group)

The group’s documentation connected unit production, embedded-wire joining, modular assembly, and larger pattern formation. Rod bending was projected into furniture and lighting applications, while wire weaving was considered in relation to structural systems. This form of projection appeared in three groups and therefore represented a more specific trajectory within the wider dataset.

A more widely distributed pattern involved approaching fabrication as a means of inquiry or evaluation. The rod-bending setup was described as a research interface for revealing material behaviour; the weaving project shifted towards investigating system performance; kinetic-sand carving proposed physical–digital depth comparison; and incremental sheet forming related process parameters to geomorphometric error indicators.

Taken together, the student reflections and project documentation show that fabrication workflows were interpreted through three distinct extensions beyond the immediate prototype: internal reconfiguration, projection into broader applications or scales, and use as a structure for inquiry, comparison, or feedback. This points to a form of broader design reasoning that included spatial aggregation alongside the operational and research capacities of the fabrication system.

5. Discussion and Conclusion

The findings indicate that analogue material testing contributed to design reasoning through the identification and organisation of material–process relationships. Students selected material properties relevant to fabrication, translated qualitative observations into operational criteria, differentiated relationships among parameters, and reconsidered decisions by comparing intended and physical outcomes. This positions material exploration within the iterative processes of abstraction, evaluation, and revision associated with design reasoning. Abstraction, in this context, involved making material behaviour explicit and operational within computational and robotic processes.

Robotic implementation remained a continuing site of material inquiry. Preliminary tests established initial parameter ranges and process assumptions, while physical execution revealed behaviours that could not be fully anticipated through manual exploration or digital simulation. Spring-back, tension redistribution, deformation, tool resistance, and cross-sectional thinning generated information through which geometry, movement sequence, tooling, and setup were recalibrated. The workflow

therefore operated through repeated movement between material observation, computational interpretation, robotic execution, and revision.

A second implication concerns process co-configuration. The presence of tooling–setup–movement co-configuration across all five groups indicates that students’ decisions extended beyond robotic programming. End-effectors, fixtures, material placement, movement strategies, timing, and human intervention developed as interdependent components of each fabrication system. Tool design was particularly significant because it mediated the relationship between material behaviour and robotic action. Predetermined tools may remain practical in courses with limited time or technical support, while opportunities for tool adaptation can make process formation more visible as a design problem. Custom end-effectors, fixtures, and auxiliary systems can therefore be treated as core studio outputs alongside computational definitions and fabricated components.

The findings also reinforce the value of structured process documentation in robotic fabrication education. Robotic workflows distribute decisions across toolpaths, end-effectors, fixtures, robot poses, movement sequences, speeds, material conditions, and situated human interventions. The student reflections and project records show that a change in one component frequently required revisions elsewhere in the fabrication system. Documentation formats could connect an observed material or robotic condition with its interpretation, the resulting parameter or setup change, and the outcome of the following trial. This robot-specific form of reflective documentation would make distributed decision chains easier to trace and help students explain how fabrication processes evolved.

A further pedagogical implication concerns the framing of project outcomes. The analysis distinguished among the internal reconfigurability of a fabrication system, its projection into broader applications or scales, and its development as a research or evaluation structure. Studio briefs and reviews could create dedicated opportunities for students to examine each possibility. Relevant tasks may include generating controlled variations through the same workflow, developing component-to-assembly relationships, adapting fabrication logic to an unfamiliar design problem, or defining methods for comparing intended and fabricated outcomes. Such tasks would also help distinguish substantive process transfer from general statements about possible architectural application.

Taken together, the findings point to four directions for robotic fabrication pedagogy: positioning analogue exploration as part of parameter formation; treating tooling, fixtures, and setup development as design work; formalising relationships among material feedback, robotic constraints, revisions, and outcomes through structured process documentation; and creating space for students to examine how fabrication systems may be reconfigured, aggregated, transferred, or extended into research and evaluation frameworks. These directions provide conceptual inputs for aligning studio briefs, documentation formats, and assessment criteria more explicitly with process formation.

Robotic fabrication projects that establish adaptable workflows, modular systems, or evaluative methods hold strong potential to serve as pedagogical platforms that connect teaching with collaborative interdisciplinary research within architectural design education. The present study highlights how robotic fabrication can enable such connections, while their long-term educational impact remains to be investigated.

Further research could extend existing investigations by examining how the identified trajectories develop across different educational levels, cohort sizes, and programme structures, as well as in relation to adjacent courses. More structured process logs, individual transfer tasks, and sustained observation could provide additional evidence of how students develop process-oriented reasoning and apply it through robotic workflows when addressing unfamiliar architectural design problems.

Such work may support a more informed integration of robotic fabrication beyond isolated or highly specialised teaching formats.

Acknowledgements

I would like to thank former students Ahmet Ege Sert, Ayşe Ebrar Kavak, Azat Kılınc, Buse Elif Kule, Hamdi Çakır, Hasan Berkay Coşer, Hilal Yivci, Kenan Emre Yılmaz, Kevser Özden, Sinan Ayaz, Ulvin Gökem Canbulat, Yaren Karakaya and Şeyma Olcay for providing material about their projects.

REFERENCES

- Association for Robots in Architecture. (n.d.). KUKA|prc: Parametric robot control [Computer software]. <https://robotsinarchitecture.com/kuka-prc/>
- Braumann, J., & Brell-Cokcan, S. (2011). *Parametric Robot Control: Integrated CAD/CAM for Architectural Design*. 242–251. <https://doi.org/10.52842/conf.acadia.2011.242>
- Brell-Çokcan, S., & Braumann, J. (2013). Industrial Robots for Design Education: Robots as Open Interfaces beyond Fabrication. In J. Zhang & C. Sun (Eds), *Global Design and Local Materialization* (Vol. 369, pp. 109–117). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-38974-0_10
- Cheatle, A., & Jackson, S. (2023). (Re)collecting Craft: Reviving Materials, Techniques, and Pedagogies of Craft for Computational Makers. *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*, 7(CSCW2), 1–23. <https://doi.org/10.1145/3610041>
- Gramazio, F., & Kohler, M. (Eds). (2014). *Made by robots: Challenging architecture at a larger scale*. John Wiley & Sons.
- Hunt, E. (2023). Introducing Robotics to Students Through Novel Architectural Fabrication. *Building Technology Educators' Society*, (1). <https://doi.org/10.7275/btes.1969>
- Jensen, M. B., Foged, I. W., & Andersen, H. J. (2020). A framework for interactive human–robot design exploration. *International Journal of Architectural Computing*, 18(3), 235–253. <https://doi.org/10.1177/1478077120911588>
- Llach, D. C., Bidgoli, A., & Darbari, S. (2016). Of Hands and Robots: Creativity and Learning in Architectural Robotics. *Proceedings of the 6th Annual Conference on Creativity and Fabrication in Education*, 70–73. <https://doi.org/10.1145/3003397.3003406>
- Raspall, F. (2015). A procedural framework for design to fabrication. *Automation in Construction*, 51, 132–139. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.12.003>
- Shi, X., Fang, X., Chen, Z., Phillips, T. K., & Fukuda, H. (2020). A Didactic Pedagogical Approach toward Sustainable Architectural Education through Robotic Tectonics. *Sustainability*, 12(5), 1757. <https://doi.org/10.3390/su12051757>
- Sweet, K. (2016). Resurrecting the master builder: A pedagogical strategy for robotic construction. *Automation in Construction*, 72, 33–38. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.07.001>
- Tvede Hansen, F. (2023). Human–Material Dialogues Through the Use of Robotics: Embodied Craft Learning in an Architectural Educational Context Exploring Patterns in Clay. *FormAkademisk*, 16(4). <https://doi.org/10.7577/formakademisk.5442>
- Veliz Reyes, A., Jabi, W., Gomaa, M., Chatzivasileiadi, A., Ahmad, L., & Wardhana, N. M. (2019). Negotiated matter: A robotic exploration of craft-driven innovation. *Architectural Science Review*, 62(5), 398–408. <https://doi.org/10.1080/00038628.2019.1651688>
- Yazar, T., Oral-Karakoç, H., Gündüz, G., & Yabanigül, M. N. (2023). Integrating Robotic Fabrication into the Basic Design Studio. *Nexus Network Journal*, 25(4), 999–1013. <https://doi.org/10.1007/s00004-023-00648-w>

MSTAS 26 “KAPSAM DIŞI”

XX. MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM ULUSAL SEMPOZYUMU

OTURUM 4

YAPAY ZEKÂ ve GELİŞMİŞ HESAPLAMALI SİSTEMLER

From Parametric Design to Digital Fabrication: Optimizing the Barkat CLT Construction System

Muhammed Emin Akyürek¹ ; Erdem Köymen² 

^{1,2} Istanbul Sabahattin Zaim University

¹muhammed.akyurek@izu.edu.tr; ²erdem.koymen@izu.edu.tr

Abstract

The transition towards sustainable building practices has significantly elevated the role of engineered timber in contemporary architecture, particularly for large-span structures. This study investigates the structural, economic, and manufacturing optimization of "Barkat," an innovative timber folded plate construction system. Specifically designed to accommodate expansive spatial requirements, such as those frequently found in worship volumes, the research comprehensively evaluates ten distinct Barkat typologies. The primary objective is to analyze these typologies across a multidimensional framework encompassing structural performance, material consumption, and industrial manufacturing efficiency, ultimately striving to minimize overall structural construction costs. A core component of this research involves evaluating the structural integrity of the proposed folded plate configurations against the rigorous L/300 deflection limit. The study explores the critical material thresholds and breaking points dictated by increasing span dimensions. Initially, the research assesses the industrial limits of standard plywood sheets, defined by a maximum thickness of 50 mm and standard dimensions of 150 x 300 cm. However, as the architectural span approaches and exceeds 12 meters, the study demonstrates that traditional plywood reaches its structural boundary state. Consequently, the research extensively models the inevitable transition scenario to Cross-Laminated Timber (CLT) panels, which provide the requisite geometric stability and load-bearing capacity for such extensive spans. To bridge the gap between structural theory and industrial fabrication, the research incorporates advanced two-dimensional nesting simulations utilizing Alphacam software. These simulations are pivotal in analyzing material waste and production efficiency. A comparative matrix analysis is conducted to evaluate the nesting efficiencies of various typologies (e.g., T01 and T05), specifically comparing the performance of standard local market plates (2.00 x 6.00 m) against industrial macro master panels (3.45 x 16.00 m). The simulation results reveal a profound correlation between optimal panel thickness, total component count, and the estimated structural cost. The data conclusively indicates that utilizing industrial macro master panels drastically reduces offcut waste, thereby maximizing nesting efficiency. Ultimately, the study provides a vital integrated design framework for architects and engineers, proving that simultaneously optimizing morphological configuration, material selection (transitioning from plywood to CLT), and nesting strategies can yield structurally robust, environmentally sustainable, and economically viable large-span timber architectures.

Keywords: Cross-Laminated Timber (CLT), Folded Plate Structures, Parametric Design, Digital Fabrication, Structural Optimization.

Parametrik Tasarımdan Dijital Üretime: Barkat CLT Yapım Sisteminin Optimizasyonu

Muhammed Emin Akyürek¹ ; Erdem Köymen² 

^{1,2} İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi

¹muhammed.akyurek@izu.edu.tr; ²erdem.koymen@izu.edu.tr

Özet

Günümüzde kaynak kıtlığı ve ekolojik kaygılar nedeniyle geniş açıklıklı yapılarda hafiflik ve yapısal verimlilik arayışları ön plana çıkmaktadır. Bu bağlamda çalışma, Mimar Sinan'ın orta ölçekli merkezi planlı camilerindeki tarihi oransal düzeni (10:5:10 düşey mekânsal hiyerarşi ve ¾ en-boy oranı), Grasshopper tabanlı parametrik bir model üzerinden çağdaş bir ahşap katlanmış plak sistemi olan "Barkat"a uyarlamaktadır. Çalışmanın amacı, Barkat'ın yapısal estetik kısıtlarını bozmadan 12x12 metrelik ideal açıklığı endüstriyel kısıtlara uygun, güvenli ve ekonomik bir şekilde geçebilmektir. Yöntem, farklı duvar ve kuşak tiplerinin melezlenmesiyle oluşturulan 10 temel tasarım tipolojisi üzerinden kurgulanmaktadır. TBDY 2018 ve TABY 2024 yönetmeliklerinin zorunlu kıldığı maksimum L/300 sehim limiti doğrultusunda, Karamba3D ve Opossum algoritmaları kullanılarak strüktürel optimizasyonlar gerçekleştirilmiştir. Ön analizler, standart endüstriyel kontrplağın statik ve üretim sınırlarının 6-9 metre aralığında tükendiğini göstermiş; bu sebeple 12 metrelik hedef açıklık için 30-42 mm kalınlık aralığında Çapraz Lamine Ahşap (CLT) panellere geçiş yapılması yapısal bir zorunluluk olarak belirlenmiştir. Elde edilen minimum kesitli 3B formlar, Alphacam yazılımı üzerinden plaka yerleşim (nesting) simülasyonlarına tabi tutularak her bir varyasyonun dijital fabrikasyon firesi ve kaba inşaat maliyetleri hesaplanmıştır. Çok boyutlu analiz sonuçları, ahşap katlanmış plak sistemlerde yalnızca teorik yapısal kütleyi azaltmaya odaklanan tek yönlü optimizasyon yaklaşımlarının yanıltıcı olduğunu ortaya koymaktadır. En az parçaya sahip olan yalın modeller (T01) teorik kütle açısından en hafif ve ucuz seçenek olarak öne çıksa da, yerel Pazar standartlarındaki 2x6 m plakalar kullanıldığında devasa hammadde israfına yol açmaktadır. Buna karşın, duvar başlığı ve Türk üçgeni gibi alt bölümlenmelerle montajı karmaşıklaşan tipler (T05, T10), sağladıkları yüksek geometrik rijitlik ve yerleşim oranları ile malzeme firesini minimize ederek yerel ölçekte çok daha rasyonel bir denge kurmaktadır. Sonuç olarak araştırma, hammadde verimliliği ile CNC altyapı erişilebilirliği (standart 3 eksenli tezgahlara karşı endüstriyel portal CNC zorunluluğu) arasında stratejik bir ödünleşim olduğunu kanıtlamakta; bölgesel teknolojik kapasitelere göre şekillenen üç temel üretim senaryosu sunarak kavramsal tasarım ile yapım yönetimi arasındaki boşluğu dijital bir iş akışıyla kapatmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Ahşap Katlanmış Plak, Yapısal Optimizasyon, Üretim Simülasyonu, Çapraz Lamine Ahşap (CLT), Yapım Yönetimi, Mimar Sinan Camileri.

1. Introduction

Today, due to resource scarcity and ecological concerns, the pursuit of lightness and structural efficiency has become highly prominent in long-span structures. Folded-plate structures, which derive their strength from geometry rather than mass, are among the prevalent solutions responding to this pursuit (Samuelsson&Vestlund, 2015; Schenk, 2011; Weinand, 2017). Although these systems, rooted mathematically in origami principles, have historically found limited application due to the complexities of formwork labor, the advent of industrial timber technologies holds revolutionary potential to overcome these barriers. This is particularly true given the high strength-to-weight ratio and CNC-machinability of Cross-Laminated Timber (CLT) panels (Robeller, 2015).

However, despite timber being a highly valuable raw material in terms of ecological impact and cost, the production of multi-angled and complex geometries such as folded plates leads to a significant amount of material waste during digital fabrication (CNC nesting) processes. In addition to this high waste rate, which inherently contradicts the sustainability claims of timber construction, there are major technical challenges involved in sourcing the massive macro-panels required to meet structural capacities within local markets. Furthermore, transporting these oversized panels under international highway logistics standards and machining them on standard workshop CNC routers present significant operational hurdles. This situation forces the construction of innovative timber systems into an economic and technological bottleneck. Consequently, for such systems to proliferate in real-world applications, it is essential to develop an integrated efficiency approach that goes beyond mere static performance to proactively minimize material waste, supply constraints, and production complexity.



Figure 1: A representative visual of the morphological configuration of the Barkat timber folded plate construction system, organized according to the 6x6m-sized worship volume.

In the contemporary architectural context, the development of digital design and fabrication technologies surpasses the structural limitations of traditional construction methods, paving the way for new performance-oriented formal expressions. The "Barkat" project (Figure 1) is a cumulative research initiative that synthesizes these technological possibilities with the rational solutions of classical Ottoman architecture, specifically the structural geometry found in Mimar Sinan's mosques. The conceptual foundation of the system, initially established in a doctoral dissertation (Akyürek,

2023), was presented at the ICMA-ITU 2025 conference (Akyürek&Ökten, 2025). Its spatial and formal dynamics were discussed in the *Journal of Islamic Architecture* (Akyürek, 2024), and its parametric design algorithms were introduced to the literature through the *Nexus Network Journal* (Köymen&Akyürek, 2026). The thermal performance limits of the system were tested via hot-box experiments conducted across three different typologies (Akyürek&Taştan, 2026). The physical manufacturability of the system was realized through 1/10 scale prototypes (B01 and B02) supported by the Scientific Research Projects (BAP) (Project No: 2024-400-20). The system has secured its design registration (No: 2025/005266) and reinforced its practical applicability by establishing an intellectual property foundation through an ongoing utility model application process.

The present study proposes an integrated workflow that tests the theoretical framework of the Barkat project against material physical limits and actual production constraints. Instead of generating countless geometric variations driven purely by formal explorations as seen in previous studies, this phase focuses on a full-scale, physically manufacturable core structure (prototype) scenario. Accordingly, the reference model coded "n3, k8", which was observed to offer the most rational balance of feasible dimensions, structural thickness, and cost, has been placed at the center of the research. Based on this reference model, the characteristic proportions of Mimar Sinan's mid-scale mosques (the 10:5:10 vertical hierarchy, and 3/4 or 4/5 aspect ratios) were defined as rigid boundary conditions (hard constraints) to preserve the architectural integrity of the generative algorithm.

The research initiated its production scenario by pushing the structural limits of plywood in small-scale structures (6-9m). Upon reaching the material limit state where the geometric and static capacities of standard plywood were exhausted, the study transitioned to the CLT industry, which provides a far more rational material solution for spanning the ideal worship volume of 12 x 12 meters. The methodological originality of the study lies in optimizing 10 distinct design typologies based strictly on the deflection limit ($L/300$) in accordance with the TBDY 2018 and TABY 2024 codes using Karamba3D and Opossum, followed by subjecting the resulting minimum cross-sections to CNC nesting simulations via Alphacam. Through this integrated approach, the disconnect between conceptual design and construction management is bridged, demonstrating via a seamless digital workflow how aesthetic and historical proportions can successfully align with structural safety limits and industrial fabrication constraints.

2. Materials and Methods

This section provides a step-by-step explanation of geometric proportions, scale factors, material constraints, parametric modeling, structural analysis with optimization processes, production scenarios, and cost calculation methods.

2.1. Historical Proportions and Boundary Conditions

The methodological framework of this study is established by translating the structural proportions representing Mimar Sinan's mid-scale, centrally planned mosque typologies (e.g., Azapkapı Sokollu, Atik Valide, Gazi Ahmet Pasha) into a Grasshopper-based parametric model via the Barkat system. Within this scope, the building width-to-height ratio ($\approx 4/5$), the dome diameter-to-building width ratio ($\approx 3/4$), and the vertical hierarchy of the wall, transition drum, and dome (10:5:10) constitute the primary framework of the generative algorithm. To prevent the optimization engine (Opossum) from generating distorted or deformed variations that would compromise the architectural integrity driven purely by mathematical optimization, these fundamental historical proportions are fixed as hard boundary conditions. Other secondary dimensions left open to optimization are restricted within very narrow tolerance ranges to prevent any degradation of the architectural character of the Mimar Sinan archetype (Figure 2).

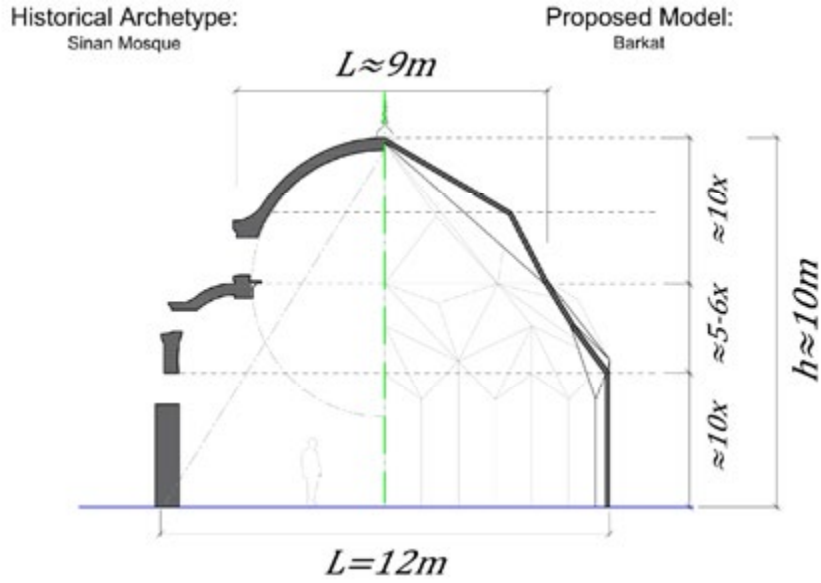


Figure 2: Comparative cross-sectional analysis and proportional definitions of the mid-scale mosque typology from the Mimar Sinan era and the Barkat system.

2.2. Material Limit State and Scale Optimization

To test the physical production limits of the design, an initial production simulation was conducted using standard plywood sheets (150 x 300 cm) on small-scale models (Figure 3). However, the rational upper limit of 50 mm thickness in industrial plywood manufacturing imposed strict structural constraints as the spans increased. To increase load-bearing capacity in line with the load-transfer hierarchy, progressively decreasing cross-sectional thicknesses in the walls, transition drums, and domes were evaluated, along with double-skin plate configurations that offer building physics advantages (moisture, thermal, and acoustic insulation).

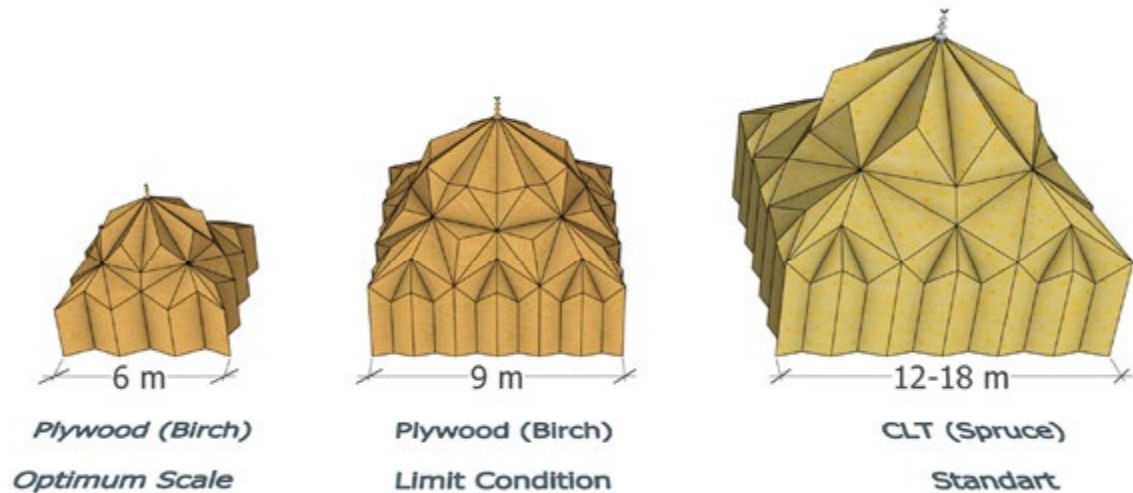


Figure 3: Material breaking points depending on span dimensions: Industrial limits of plywood sheets (left, 50mm thickness and 150x300cm dimensions), boundary state (center), and the transition scenario to Cross-Laminated Timber (CLT) panels for 12-meter spans (right).

Aside from the high labor and assembly complexities associated with double-skin systems, significant formal interventions were required to overcome the 150 x 300 cm dimensional threshold. Throughout this process, while the main wall panels were kept monolithic to preserve aesthetic and

structural integrity, various geometric adaptations were attempted, such as subdividing the dome plates into sub-elements, increasing the drum height, flexing the building aspect ratios (3/4, 4/5), altering the wall capital angles, and utilizing double-group wall configurations to reduce panel sizes (see Akyürek 2024; Köymen and Akyürek, 2026).

Despite all applied formal flexibilities and manufacturing optimizations, the limit state that ensures both structural safety and feasibility regarding waste/cost for plywood was found to break down at a 9-meter span. Following these preliminary analyses, which indicated a sharp material limit state, plywood utilization was positioned as a viable alternative for small recreational structures spanning 6-9 meters. Conversely, transitioning to the fabrication constraints of Cross-Laminated Timber (CLT) which can reach dimensions of 3.45 x 16.00 m and thicknesses exceeding 100 mm, was deemed a rational necessity for the primary 12 x 12 meter research model, which represents the average span of Sinan's mid-scale mosques and constitutes the ideal worship volume for a neighborhood scale.

2.3. Advanced Parametric Modeling

Based on the specified 12 x 12 m scale and CLT material parameters, eight fundamental design variations were generated by cross-referencing two distinct wall typologies (plain/D1 and with capital/D2) with four different transition drum variations (V1-V4) (Figure 4). The "Turkish triangle" (diamond pattern) subdivision, which possesses the potential to enhance the surface stiffness of the system, was not introduced as a routine variable across all models to avoid unnecessarily inflating the computational load. Instead, to comparatively evaluate the structural impact of this subdivision, it was integrated exclusively into two selected reference models (T09 and T10), thereby narrowing the total analysis pool down to 10 specific typologies.

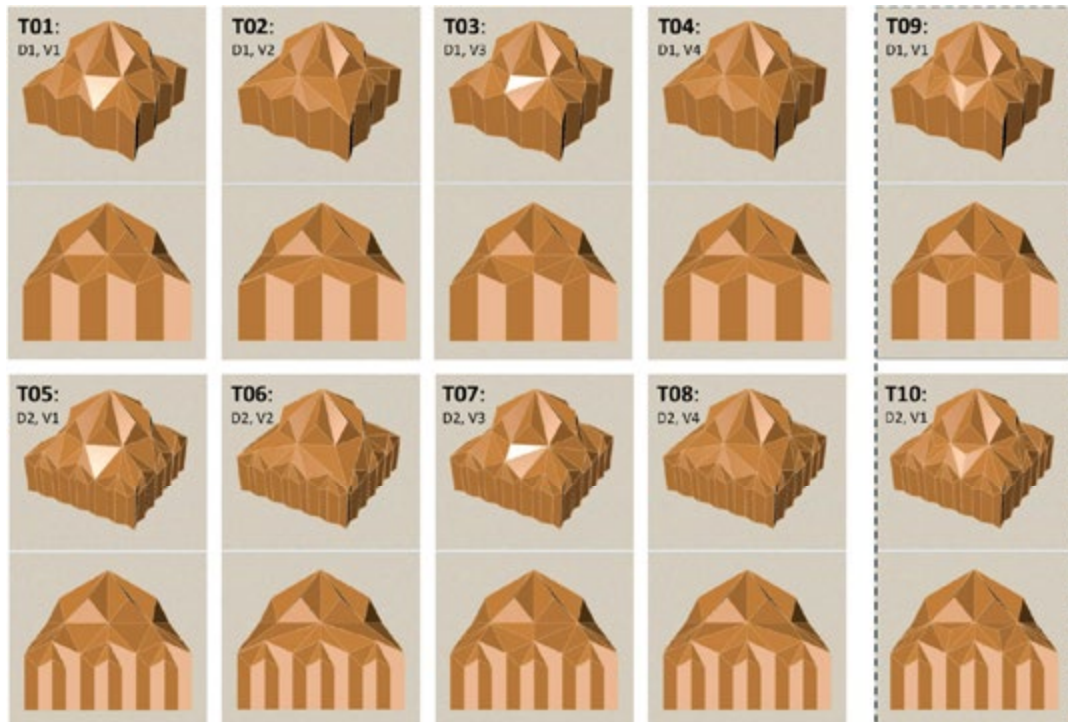


Figure 4: The 10 fundamental Barkat design variations generated via the Grasshopper interface: A geometric matrix illustrating different wall typologies (D1-plain / D2-with capital) and transition drum variations (V1-V4).

2.4. Structural Analysis and Optimization

The 10 established typologies were subjected to Finite Element Analysis (FEA) using Karamba3D. In the parametric model, the mechanical properties of the material were assigned to orthotropic shell elements, referenced from contemporary CLT handbooks (KLH, 2012; Swedish Wood, 2019). Since this study operates under an early-stage design scenario, the boundary conditions at the base of the walls and the edge connections between plates were simplified and assumed to be completely rigid.

In the loading scheme, in accordance with the Turkish codes TBDY 2018 and TABY 2024, snow and wind loads neglecting the complex aerodynamic effects of the structural form at this preliminary design level, were applied as a uniform distributed load with an average value of 0.8 kN/m^2 across the structure. Seismic loads were defined as an Equivalent Seismic Load with a coefficient of 0.4 in both the X and Y directions. Furthermore, within the framework of preliminary design assumptions, additional safety factors were not applied to the load combinations, and the structural optimization loop was based entirely on the Serviceability Limit State (SLS) (Figure 4).

2.5. Production Simulation and Cost Calculation

The objective function of the Opossum optimization plugin focuses on the deflection limit, recognized as the primary constraint in timber structures and contemporary engineering trends, rather than stress values, which are typically not the critical threshold in folded-plate systems. The maximum allowable deflection limit of $L/300$ stipulated by regulations was defined as a hard constraint within the optimization algorithm. While strictly preserving the forms and historical proportions of these 10 variations, Opossum searched for the thinnest possible CLT cross-section (continuous variable) capable of safely supporting the structure without exceeding the designated $L/300$ deflection limit.

Following the optimization, the 3D forms with determined minimum thicknesses were unrolled into planar plates within Grasshopper (Figure 5). These plates were then subjected to nesting simulations onto CLT panels using Alphacam software to derive the production waste rates and structural rough construction costs for each variation.

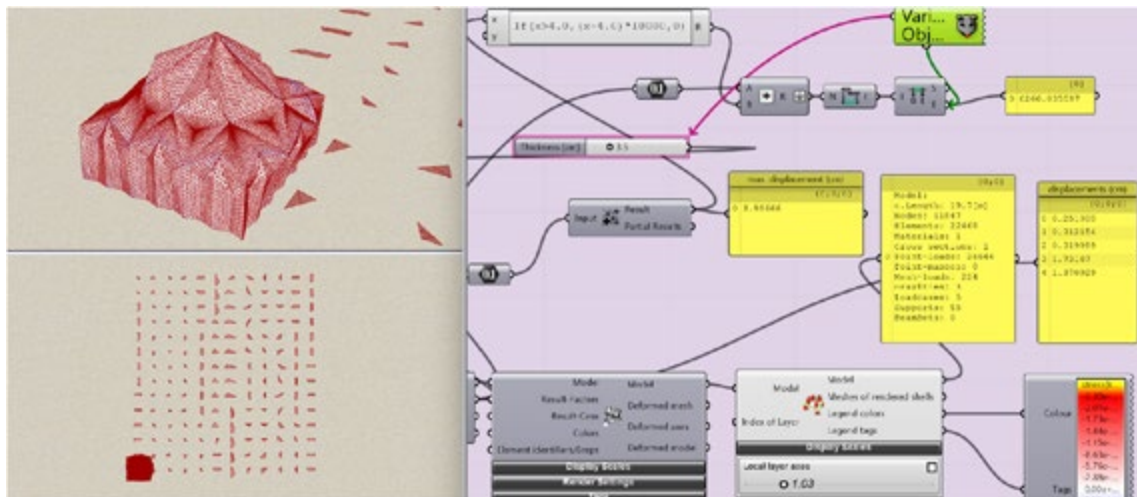


Figure 5: The seamless digital fabrication workflow of the Barkat system: Simultaneous execution of Karamba3D structural analysis, cross-section optimization via the Opossum algorithm, and 2D unrolling simulations for the CNC nesting preparation phase within the Grasshopper environment.

3. Results and Discussion

The iterations performed by the Opossum optimization algorithm across 10 different Barkat typologies, operating under the strict L/300 deflection limit (maximum 4 cm), have revealed the critical engineering equations governing form, stiffness, and construction complexity, extending far beyond a mere search for cross-sectional thickness (Figure 5; Table 1). An examination of the preliminary Karamba3D analysis results indicates that the T01 (Plain Wall - V1) model, which features one of the lowest component counts (80 pieces), completed its optimization with an exceptionally thin CLT cross-section of 30 mm and a minimum total mass of 5.42 tons. However, when transitioning from the plain wall (D1) typology to the V2, V3, and V4 transition drum variations (T02-T04), the thickness requirement rapidly escalates to the 38-40 mm band.

Table 1: Comparison matrix of material consumption, industrial manufacturing (nesting) efficiency, and structural construction cost for 10 Barkat typologies optimized according to the L/300 deflection limit.

Code	Wall Type	Transition Drum	Turkish Triangle	Optimum Thickness	Total Component Count	CLT Panel Quantity	Net Plate Area	Gross Plate Area	Total Mass	Waste Rate	Material Cost
T01	Plain (D1)	V1	None	30 mm	80 pcs.	10 pcs.	422 m ²	552 m ²	5.42 Ton	% 23.6	16560 €
T02	Plain (D1)	V2	None	39 mm	80 pcs.	11 pcs.	430 m ²	607 m ²	7.04 Ton	% 29.2	23681 €
T03	Plain (D1)	V3	None	38 mm	80 pcs.	11 pcs.	422 m ²	607 m ²	6.74 Ton	% 30.5	23074 €
T04	Plain (D1)	V4	None	40 mm	80 pcs.	11 pcs.	422 m ²	607 m ²	7.12 Ton	% 30.5	24288 €
T05	With capital (D2)	V1	None	37 mm	152 pcs.	9 pcs.	425 m ²	496 m ²	6.61 Ton	% 14.5	18382 €
T06	With capital (D2)	V2	None	40 mm	152 pcs.	9 pcs.	433 m ²	496 m ²	7.27 Ton	% 12.8	19872 €
T07	With capital (D2)	V3	None	42 mm	152 pcs.	9 pcs.	425 m ²	496 m ²	7.50 Ton	% 14.5	20866 €
T08	With capital (D2)	V4	None	42 mm	152 pcs.	9 pcs.	425 m ²	496 m ²	7.51 Ton	% 14.5	20866 €
T09	Plain (D1)	V1	Exist	30 mm	96 pcs.	10 pcs.	423 m ²	552 m ²	5.33 Ton	% 23.4	16560 €
T10	With capital (D2)	V1	Exist	35 mm	168 pcs.	10 pcs.	426 m ²	552 m ²	6.26 Ton	% 22.8	19320 €

The alteration in wall typology creates a sharp break in structural stiffness. The T05 variation, representing the wall type with a capital (D2), exhibited a 7 mm increase in thickness (37 mm) and approximately a 1.2-ton increase in total weight compared to the baseline D1 type (T01). In the other transition drum variations of the D2 type (T06-T08), this thickness climbs up to 42 mm. More importantly, the total component count, which is 80 in the plain scheme, nearly doubles to 152 in the capital-included scheme. On the other hand, the T09 and T10 reference models, where "Turkish triangle" subdivisions are integrated into the V1 drum types to increase the moment of inertia on the

shell surfaces, demonstrate how geometric stiffness optimizes mass. For instance, the 37 mm shell thickness in the T05 variation drops to 35 mm in the T10 variation featuring the Turkish triangle, reducing the total structural weight by 350 kg. The increase in geometric complexity (16 additional components) improved thin-shell stiffness, thereby reducing the overall weight (Table 1).

The preliminary static optimization data indicates a difference of approximately 840 kg in weight and more than double the component count between the simplest scheme, T01, and the most complex scheme, T10. Thus, in terms of purely theoretical mass, T01 emerges as the most efficient system. However, in systems reliant on digital fabrication like Barkat, this efficiency is a unilateral illusion unless the layout (nesting) of plate surface areas (net area) onto industrial panels is factored into the equation. In this context, the production simulations of the study were tested via comparative case analyses across two different scales: global industrial standards (3.45 x 16.00 m) and local market realities (2.00 x 6.00 m) (Figure 6).

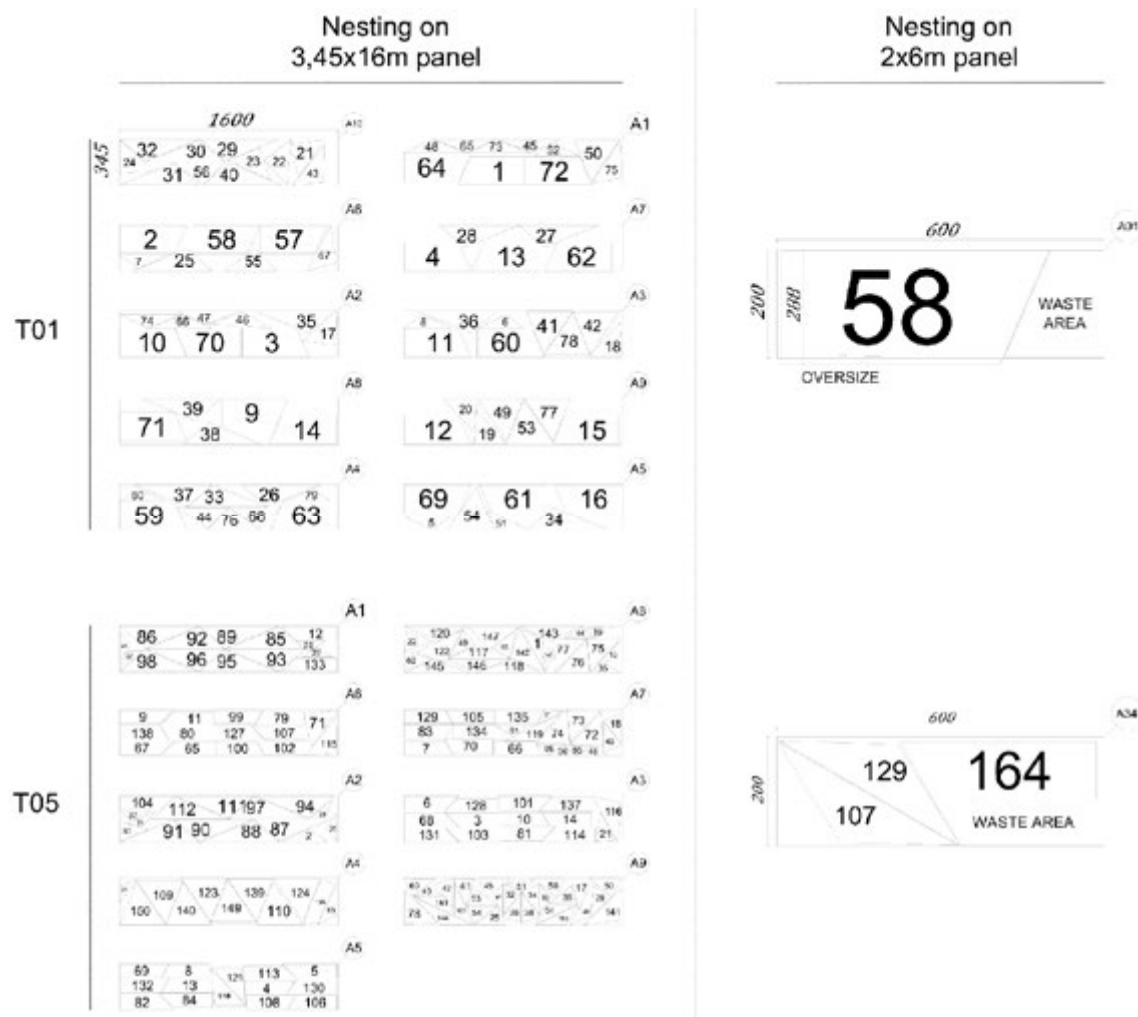


Figure 6: Two-dimensional matrix analysis of Alphacam nesting simulations: Comparison of nesting efficiencies of T01 and T05 typologies on standard local market plates (2.00 x 6.00 m) and industrial macro master panels (3.45 x 16.00 m).

In the industrial master panel (3.45 x 16.00 m) nesting simulations executed in Alphacam software, 20 mm safety clearances were left between components to account for CNC router bit diameters and vacuum tolerances. In accordance with industrial supply standards, fractional panel requirements

were treated as systemic waste and strictly rounded up to the next whole number. The estimated structural cost was calculated based on a unit volume index ($1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ €}$) obtained through direct communication with suppliers. An analysis of the figures reveals that the T01 variation is more advantageous within the plain wall (D1) group, requiring 9 master panels with a budget of €14,904. However, although the mathematical waste rate climbs to the 30% band in the T02, T03, and T04 schemes, the nesting layouts revealed that only two pieces were cut from the 10th (final) panel of these typologies, preserving the remaining major body of the board entirely intact. In workshop practice, these large raw pieces do not constitute sheer scrap waste but are directly utilizable remnants for manufacturing modular furniture or secondary elements. Conversely, in the T05-T08 group, where the wall typology evolves into the capital-included (D2) scheme, the components fit seamlessly into the master panels, consuming exactly 9 boards each and achieving a minimum waste threshold of 12.8%. Similarly, in the Turkish triangle-integrated T09 and T10 variations, only 4 and 2 pieces were cut from their final panels respectively, preserving raw material integrity (Table 1; Figure 6: Left).

Plotting these typologies into a multi-objective optimization matrix based on the parameters of thickness, cost, and assembly complexity rendered the structural characters within the design space visible through sharp clustering (Figure 7). Observing the distribution on the graph, the T02, T03, and T04 typologies belonging to the plain wall (D1) scheme form an isolated cluster in the upper-right region, characterized by high thickness (38-40 mm) and high cost (€23,000-€24,000 band). Despite having a low component count (80 pieces / small bubble diameter), these typologies suffer from low geometric stiffness, thereby increasing thickness and gross area consumption, making them economically inefficient. In contrast, although the T05-T08 group (capital-included D2 scheme) increases assembly complexity as the component count rises to 152 (medium bubble diameters), it establishes a structural equilibrium by settling into a much more stable and rational cost trajectory (€18,000-€21,000) on the graph axis.

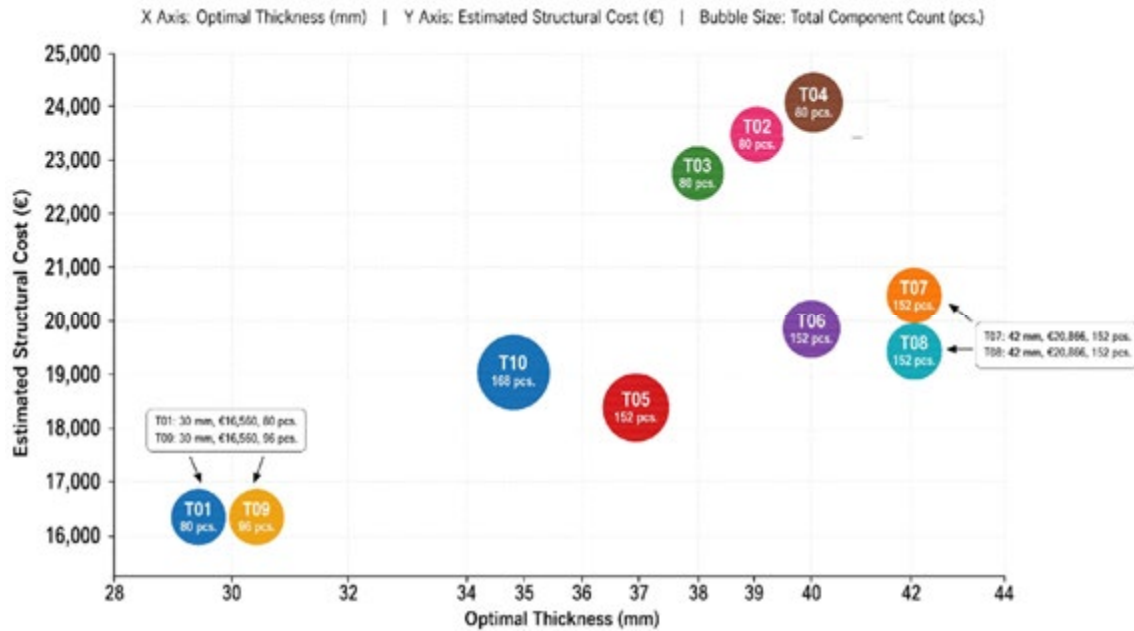


Figure 7: Performance comparison of Barkat typologies based on minimum CLT thickness, estimated structural cost, and construction complexity parameters.

The most radical extreme boundaries of the matrix are defined by the T01, T09, and T10 variations. The T01 and T09 schemes perfectly overlap in the bottom-left corner of the graph (the most economical and thinnest region) with an optimum thickness of 30 mm and an estimated cost of €16,560. However, T09 distinguishes itself with a larger bubble diameter (96 pieces) due to the integrated Turkish triangles. The T10 variation, positioned almost as an independent benchmark right in the center of the matrix, represents the highest assembly complexity with the largest bubble diameter (168 pieces). Yet, with its balance of 35 mm thickness and a €19,320 cost, it graphically validates the trade-off between stiffness and the cost of component quantity. This multi-dimensional performance distribution rationally proves that an optimization aiming solely at reducing material mass remains incomplete unless production and assembly complexity parameters are incorporated (Figure 7).

However, this industrial optimization success faces a radical failure and logistical breakdown when scaled down to the 2.00 x 6.00 m panels (CLT or SWP / Solid Wood Panel) easily procurable in the local Turkish market (Figure 6: Right). When schemes with plain walls (e.g., T01: V1-D2) were tested on local 2 x 6 m boards, an unfavorable scenario emerged where multiple main elements could not fit into a single panel due to the width constraints of the large-scale wall panels. In this simulation, geometric constraints dictated that only a single wall plate could be nested within each of the 15 panels. Consequently, the local panel scenario resulted in a total consumption of 64 panels (768 m² gross area) and generated a massive sheer waste of 342 m², accounting for nearly half of the net area (426 m²). In contrast, utilizing the 3.45 x 16.00 m master panels reduces the total area to 552 m², limiting the net scrap waste to just 126 m². In the capital-included type where walls are subdivided (e.g., T05: V1-D2), although the wall panels manage to fit within the board, they still induce significant material waste. This situation can only be rendered efficient by increasing the number of wall units (e.g., utilizing n4, k8 instead of n3, k8) or by designing the wall unit to consist of five vertical components instead of four (see Figure 1: Entrance facade x side facade).

This macro-scale master panel preference, which concludes in favor of sustainability, consequently, brings forth a technological and infrastructural dilemma. The flawless, millimeter-precision machining of an industrial master panel (3.45 x 16.00 m) is unachievable with the standard 3-axis CNC routers found in local timber workshops. Cutting raw masses of these dimensions necessitates industrial gantry CNC machining centers equipped with high torque, superior vacuum power, and massive bridge spans. Therefore, it is an architectural reality that within the digital fabrication loop of the Barkat construction system, a strategic trade-off decision must be made between reducing material waste (master panel) and localizing production accessibility (2 x 6 m), contingent upon regional technological infrastructure capabilities.

4. Conclusions

This study demonstrates the scalability, structural reliability, and industrial manufacturability of the Barkat timber folded-plate system through a multi-dimensional computational optimization framework. By preserving the geometric proportions of classical Ottoman architecture from the Mimar Sinan era (the 10:5:10 vertical spatial hierarchy and 3/4 aspect ratio) as rigid boundary conditions, a rational balance between structural safety and architectural integrity was achieved. The integrated evaluation of structural analysis (Karamba3D) and manufacturing simulations (Alphacam) reveals that transitioning from plywood to Cross-Laminated Timber (CLT) panels (30–42 mm) becomes essential for 12-meter spans to satisfy the regulatory $L/300$ (<40mm) deflection limit. Furthermore, the nesting comparisons indicate that mere mass reduction is an insufficient optimization criterion for form-active systems; the critical trade-off between raw material efficiency and technological infrastructure accessibility must be strategically managed. To guide practical application, the research outlines three fundamental production scenarios corresponding to regional technological capacities:

- **Plywood Scenario (Micro Scale):** In regions lacking CLT access, spans up to 6 meters can be safely constructed using standard industrial plywood. This limit can be extended to 9 meters by employing a subdivision strategy that fragments the dome components.
- **Local CLT Scenario (2 x 6 m Boards):** When restricted to standard local market boards and 3-axis CNC routers, multi-component variations (e.g., T05, T09, T10) are preferable. To minimize nesting waste, these models require geometric interventions such as increasing the number of wall units (e.g., n4, n5), grouping vertical wall components into fives instead of fours, reducing the wall plate height, and narrowing the wall folding angle.
- **Industrial CLT Scenario (3.45 x 16 m Master Panels):** Given access to macro panels and high-tech industrial gantry CNC machining centers, the plain T01 variation (lowest component count) stands out as the most rational option in terms of structural lightness, ease of assembly, and maximum economic efficiency.

In the future phases of the research, the structural optimization outputs are planned to be cross-validated using alternative finite element analysis (FEA) software and calibrated through prototype-scale load testing. Expanding the research horizon toward construction management, subsequent studies will focus on the chronometric measurement of fluctuating labor and assembly times relative to increased component counts, the supply chain logistics of mechanical fasteners within folded-plate joints, and their integration into holistic cost analysis models to assess cumulative financial impacts on overall project feasibility.

REFERENCES

- Akyürek, M. E. (2023). *Mescit Mimarisinin Kavramsal Çerçevesinde Sinan'ın Camilerini Günümüze Bir Uyarlama Modeli*. [PhD Dissertation, Istanbul Sabahattin Zaim University].
- Akyürek, M. E. (2024). A Topological And Technological Transformation Model Of Mimar Sinan's Mosques To The Present. *Journal Of Islamic Architecture*, 8(1), 91-105. <https://doi.org/10.18860/jia.v8i1.23694>
- Akyürek, M. E., & Ökten, Ö. S. (2025). A Conceptual Designing Model For Form In Mosque Architecture. *4th International Conference On Mosque Architecture* içinde. İstanbul.
- Akyürek, M. E., & Taştan, İ. A. (2026). Functional Adaptation and Building Envelope Performance in Contemporary Timber Folded Plate Structures. In M. Nikoofam & A. Mobaraki (Eds.), *9th International Conference of Contemporary Affairs in Architecture and Urbanism – Abstract proceedings of ICCAU2026, 7-8 May 2026* (s. [3]). Alanya University.
- KLH (2012). *Component Catalogue for Cross Laminated Timber Structures*. Teufenbach-Katsch: KLH Massivholz GmbH.
- Köymen, E., & Akyürek, M. E. (2026). A Parametric Design Method For The Wooden Turkish Triangle Plated Structure (Barkat) Model. *Nexus Network Journal*, 28, 249-170. <https://doi.org/10.1007/s00004-025-00856-6>
- Robeller, C. (2015). Integral mechanical attachment for timber folded plate structures [PhD Dissertation, École Polytechnique Fédérale de Lausanne]. EPFL Infoscience. <https://doi.org/10.5075/epfl-thesis-6512>
- Samuelsson, C., & Vestlund, B. (2015). *Structural folding: A parametric design method for origami architecture* (Master's thesis, Department of Applied Mechanics, Chalmers University of Technology).
- Schenk, M. (2011). *Folded shell structures* (Doctoral dissertation, University of Cambridge, Clare College).
- Swedish Wood (2019). *The CLT Handbook: CLT structures – facts and planning*. Stockholm: Svenskt Trä.
- TABY (2024). Ahşap Binaların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik (Design, Calculation, and Construction Principles of Timber Buildings). T.C. Resmi Gazete (Sayı: 32491). <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2024/03/20240324-1.htm>
- TBYD (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (Turkish Building Earthquake Code) (TBDY-2018). T.C. İçişleri Bakanlığı. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/03/20180318M1-2.htm>
- Weinand, Y. (Ed.). (2017). *Advanced timber structures: Architectural designs and digital dimensioning*. Birkhäuser.

Mimarlıkta İşbirlikçi Zekâ: Tasarım Eğitiminde Üretken Yapay Zekâ Entegrasyonu için İBE Tabanlı Bir Çerçeve

Çisem Nur Demirci¹  ; Ecem Fettahoğlu²  ; Selin Oktan³  ; Serbülent Vural⁴ 

^{1,2,3,4}Karadeniz Teknik Üniversitesi

¹cisemdemirci21@gmail.com; ²ecem-fettahoglu@hotmail.com;

³oktanselin@gmail.com; ⁴svural@ktu.edu.tr

Özet

Üretken yapay zekâ (ÜYZ) sistemlerinin mimarlık pratiği ve eğitimine entegrasyonu, tasarım sürecinde insan ile dijital araç arasındaki ilişkinin yeniden tanımlanmasını gerektirmektedir. Geleneksel dijital tasarım araçları komut-temelli ve araçsal bir konumda yer alırken, ÜYZ sistemleri tasarım sürecine öneri üreten, alternatif geliştiren ve karar süreçlerine katılan etkin aktörler olarak dahil olmaktadır. Bu dönüşüm; tasarımcı rolünü, algoritmik yazarlık (istem-tabanlı üretim) kavramını ve pedagojik yaklaşımları yeniden düşünmeyi zorunlu kılmaktadır. Bu çalışma, ÜYZ'yi bir araç değil "ortak-tasarımcı" olarak konumlandıran İşbirlikçi Zekâ (Collaborative Intelligence) yaklaşımını İnsan-Bilgisayar Etkişi (İBE) çerçevesinde ele almaktadır. Araştırma, bir yüksek lisans dersi kapsamında yürütülen yapay zekâ destekli tasarım çalışmalarına dayanmakta; 17 gönüllü katılımcıyla gerçekleştirilen stüdyo süreci nitel içerik analizi yöntemiyle incelenmektedir. ÜYZ sistemleri tasarımcı, ortak-tasarımcı ve teknik yardımcı olmak üzere üç farklı rol konfigürasyonunda konumlandırılmış; bu rollerin aynı stüdyo süreci içinde karşılaştırmalı olarak deneyimlenmesi, şeffaflık, geri bildirim, kullanıcı kontrolü ve güven olmak üzere dört İBE ilkesi çerçevesinde analiz edilmiştir. Bulgular, üç konfigürasyonun farklılaşan örüntüler sergilediğini ortaya koymuştur. Tasarımcı ağırlıklı konfigürasyonda ortalama %92,9 insan katkısıyla yüksek bağlamsal tutarlılık sağlanmış; ancak ÜYZ'nin potansiyeli sınırlı kalmıştır. ÜYZ ağırlıklı süreçte üretim hızı artarken şeffaflık azalmış, bağlamsal karar kalitesi düşmüş ve tasarımcıların yeniden belirleyici konuma geçmesi zorunlu olmuştur. Hibrit ortaklık modeli ise dört temada da en dengeli deneyimi üretmiş; işbirlikçi modelin tasarım sürecini hızlandırmak ile birlikte tasarımcının eleştirel ve stratejik karar verici rolünü güçlendirdiği gözlemlenmiştir. Çalışma, mimarlık eğitiminde ÜYZ entegrasyonu için İBE temelli pedagojik bir çerçeve önermektedir. Şeffaflık, geri bildirim, kullanıcı kontrolü ve güven ilkelerini mimarlık stüdyosunun kendine özgü koşulları-belirsizlik, estetik yargı ve mekânsal anlam üretimi-bağlamında yeniden yorumlayan bu çalışma; aynı stüdyo süreci içinde üç farklı ÜYZ rol konumlandırmasını karşılaştırmalı olarak inceleyen nadir çalışmalardan biri olarak hem insan-yapay zekâ etkileşimi literatürüne hem de mimarlık pedagojisi alanına kuramsal ve ampirik katkı sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: İşbirlikçi Zekâ, Üretken Yapay Zekâ, İnsan-Bilgisayar Etkişi, Mimarlık Eğitimi, Tasarım Pedagojisi.

Collaborative Intelligence in Architecture: An HCI-Based Framework for Generative AI Integration in Design Education

Çisem Nur Demirci¹  ; Ecem Fettahoğlu²  ; Selin Oktan³  ; Serbürent Vural⁴ 
^{1,2,3,4}Karadeniz Technical University

¹cisemdemirci21@gmail.com; ²ecem-fettahoglu@hotmail.com;

³oktanselin@gmail.com; ⁴svural@ktu.edu.tr

Abstract

The integration of generative AI (GenAI) systems into architectural practice and education necessitates a fundamental redefinition of the relationship between the human designer and digital tools. While conventional digital design tools occupy a command-based, instrumental role, GenAI systems engage actively in the design process by generating proposals, developing alternatives, and participating in decision-making. This transformation compels a rethinking of the designer's role, the concept of algorithmic authorship (prompt-based production), and pedagogical approaches. This study examines the Collaborative Intelligence approach – which positions GenAI not as a tool but as a co-designer – within a Human–Computer Interaction (HCI) framework. The research is grounded in AI-assisted design studio work conducted within a graduate-level course, involving 17 volunteer participants whose studio processes were analyzed through qualitative content analysis. GenAI systems were configured across three distinct roles – designer, co-designer, and technical assistant – and the comparative experience of these roles within a single studio process was analyzed under four HCI principles: transparency, feedback, user control, and trust. Findings reveal distinctly differentiated patterns across the three configurations. The designer-led configuration maintained high contextual coherence, averaging 92.9% human contribution, but left GenAI's potential underutilized. The GenAI-led process increased output speed yet reduced transparency, compromised contextual decision quality, and compelled students to reassert their authority at critical junctures. The hybrid collaboration model produced the most balanced outcomes across all four themes; the collaborative model was found to accelerate the design process while simultaneously strengthening the designer's critical and strategic decision-making role. The study proposes an HCI-based pedagogical framework for GenAI integration in architectural education. Reinterpreting the principles of transparency, feedback, user control, and trust within the distinctive conditions of the architectural studio -ambiguity, aesthetic judgment, and spatial meaning-making-this work is among the few studies to comparatively examine three distinct AI role configurations within a single studio process. It offers both theoretical and empirical contributions to the fields of human–AI interaction and architectural design pedagogy.

Keywords: Collaborative Intelligence, Generative Artificial Intelligence, Human–Computer Interaction, Architectural Education, Design Pedagogy.

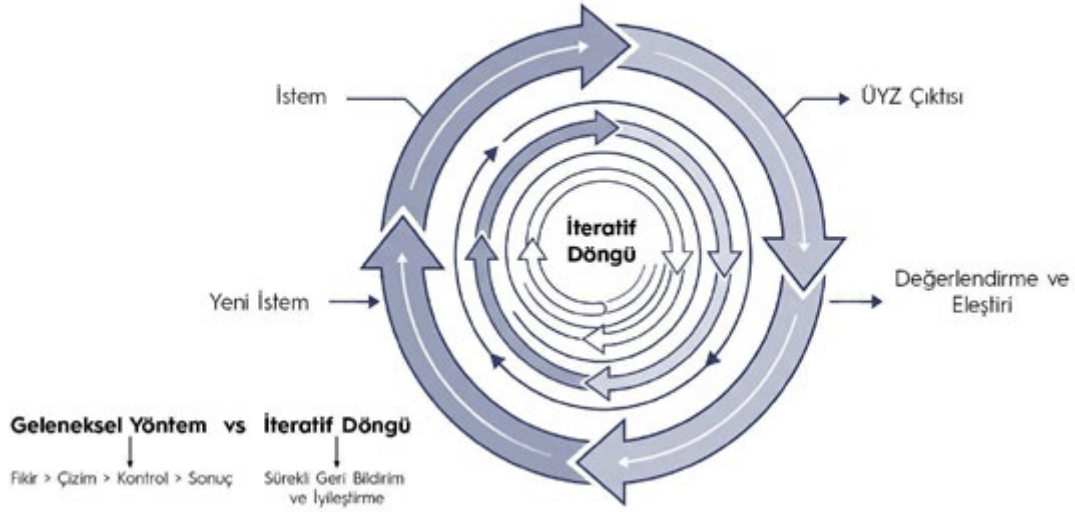
1. Giriş

Dijital tasarım teknolojilerinin mimarlık pratiğine eklemlenmesi, tasarımcı ile araç arasındaki ilişkiyi köklü biçimde dönüştürmektedir. Bilgisayar destekli tasarımın erken döneminde dijital araçlar çizim ve temsil işlevleriyle sınırlı kalırken, sayısal tasarım süreçleriyle birlikte algoritmik düşünme tasarımın merkezine oturmuştur. Oxman'ın (2017) tanımladığı "sayısal tasarım devrimi", mimarlıkta tasarım mantığının veri, parametre ve performans üzerinden yeniden kurgulandığını ortaya koymaktadır. Carpo (2017; 2023) ise otomasyon ve yapay zekâ çağında tasarımın seri üretim mantığından çeşitlilik üretimine doğru kaydığını ve bu süreçte tasarımcı kimliğinin de yeniden tanımlandığını vurgulamaktadır. Bu bağlamda üretken yapay zekâ (ÜYZ) sistemleri, yalnızca görsel üretim süreçlerinde değil; form üretme, kavramsal çerçeve geliştirme, senaryo kurgulama ve tasarım alternatifleri üretme süreçlerinde de giderek daha aktif bir rol üstlenmektedir. Geleneksel dijital araçların, araçsal ve komut-temelli konumunun aksine; ÜYZ sistemleri tasarım sürecine öneri üreten, alternatif geliştiren ve karar süreçlerine katılan aktif aktörler olarak dahil olmaktadır. Bu dönüşüm; tasarımcı rolünü, algoritmik yazarlık (istem tabanlı üretim) kavramını ve pedagojik yaklaşımları yeniden düşünmeyi zorunlu kılmaktadır (Gül vd., 2025; Özorhon vd., 2025). Böylece tasarım süreci, insan zihni ile tasarım ortamı arasında gerçekleşen tek yönlü bir üretim eyleminden karşılıklı etkileşime dayalı çok yönlü bir diyaloga dönüşmektedir. Bu dönüşüm, müelliflik kavramını da yeniden sorgulatmaktadır: mimarın rolü sıfırdan form üretmekten, ÜYZ'nin sunduğu sayısız olasılık arasından stratejik biçimde seçip yönlendiren bir karar vericiye evrilmektedir (Carpo, 2023; Oxman, 2017). Yaratıcılık ortadan kalkmamakta; biçim bulma eylemi yerini anlam oluşturma ve bağlam kurma eylemine bırakılmaktadır. İnsan Bilgisayar Etkileşimi (İBE), insan ve makine arasındaki ilişkinin araçsal bir girdi-çıkı mekanizması olmaktan çıkarak; bağlamsal bir etkileşime evrilmesini ifade etmektedir (Suchman, 2007; Hollan, Hutchins ve Kirsh, 2000). İnsan-ÜYZ etkileşimini değerlendirmeye yönelik güncel İBE çerçevelerinde şeffaflık, geri bildirim, kullanıcı kontrolü ve güven olmak üzere dört temel ilke merkezi bir konum taşımaktadır (Amershi vd., 2019). Bununla birlikte bu ilkelerin mimari tasarım bağlamında yeniden yorumlanması gerekmektedir; zira tasarım süreci yalnızca problem çözme değil, aynı zamanda belirsizlik içinde anlam üretme pratiğidir (Schön, 1983; Cross, 2006). Ihde'nin (1990) post-fenomenolojik yaklaşımında teknoloji, insan algısını hem genişleten hem daraltan bir aracı varlık olarak tanımlanır; "ötekileşme ilişkisi" bağlamında, insanın teknolojiyle sanki bir "başka zihinle" etkileşime girer gibi ilişki kurduğu öne sürülür. Bu durum, tasarımcının ÜYZ ile kurduğu etkileşimin ontolojik boyutunu gündeme getirmektedir.

1.1. İBE Bağlamında Şeffaflık, Geri Bildirim, Kullanıcı Kontrolü ve Güven İlkeleri

Şeffaflık, yapay zekâ sisteminin karar alma mekanizmalarının kullanıcı tarafından anlaşılabilir olmasını ifade etmektedir. Amershi vd. (2019) şeffaflığı, kullanıcının sistemin "neden bu çıktıyı ürettiğini" anlamasını sağlayan bir bilgilendirme kapasitesi olarak tanımlamaktadır. Daha geniş bir perspektiften ise şeffaflık, ÜYZ sistemlerinde, hesap verebilirlik ve açıklanabilirlik tartışmalarının merkezinde yer almakta; "kara kutu" sistemlerin kullanıcı üzerindeki güç dengesizliğine dikkat çekmektedir (Holter ve El-Assady, 2024). Mimari tasarım sürecinde şeffaflık, ÜYZ'nin nasıl çalıştığını anlamak ile sınırlı kalmamakta; tasarımcının sistemin üretim mantığını izleyerek eleştirel bir mesafe kurma kapasitesine dönüşmektedir.

Geri bildirim, kullanıcı eylemi ile sistem yanıtı arasındaki döngüsel bilgi alışverişini ifade etmektedir. İBE bağlamında geri bildirim; sistemin kullanıcının eylemlerini algılayıp zamanlı ve anlaşılır biçimde yanıtlaması olarak tanımlanmaktadır (Amershi vd., 2019). Tasarım süreçleri bağlamında geri bildirim, tasarımcının çıktıları değerlendirerek bir sonraki adımı şekillendirdiği iteratif döngülerle bütünleşmektedir (Schön, 1983). Mimari tasarımda geri bildirim, doğrusal bir bilgi akışı değil; istem (prompt)-ÜYZ çıktısı-değerlendirme-yeni istem döngüsü biçiminde işleyen ve her turda tasarımcının eleştirel kapasitesini geliştiren iteratif bir yapı olarak deneyimlenmektedir. (Şekil 1)



Şekil 1. Mimari Tasarımda Geri Bildirim Döngüsü

Kullanıcı kontrolü, bireyin sistem üzerine etki edebilme, yönlendirme ve gerektiğinde müdahale edebilme kapasitesini ifade etmektedir. Amershi vd. (2019), kullanıcı kontrolünü sistemin çıktılarına düzeltebilme, geri alabilme ve kararları özelleştirebilme olarak tanımlar. Karar verme alanında kontrol, insan faaliyetinin makine üretimi üzerindeki belirleyiciliği olarak ele alınmakta; bu durum “yetersiz otomasyon” ile “aşırı otomasyon” arasındaki denge sorununu gündeme getirmektedir (Holter ve El-Assady, 2024). Tasarım sürecinde kullanıcı kontrolü yalnızca sistemin komutlarına yanıt vermesini sağlamakla kalmayıp; tasarımcının ÜYZ’nin ürettiği geniş olasılıklar havuzunu bağlam, estetik yargı ve mekânsal sezgiyle stratejik biçimde seçip yönlendirme kapasitesine dönüşmektedir.

Güven, kullanıcının yapay zekâ sisteminin çıktılarına ve karar mekanizmalarına duyduğu itimatı ifade etmektedir. İBE bağlamında güven; algılanan yeterlilik, dürüstlük ve iyi niyet boyutlarıyla tanımlanmakta; yetersiz güvenin sistem reddine, aşırı güvenin ise otomasyon yanlılığına (automation bias) yol açtığı gösterilmektedir (Amershi vd., 2019). Tasarım bağlamında ise güven, yaratıcı süreçlere katılan bir sistem için “ne zaman ve ne ölçüde inanılacağı” sorusunu beraberinde getirmektedir. Mimari tasarımda güven, teknik bir kabul meselesinin ötesine geçmekte; tasarımcının ÜYZ’ye ne zaman, hangi aşamada ve hangi kararlar için itimat edeceğini belirleme pratiğiyle bütünleşmektedir.

İBE literatüründe belirgin bir eksik bulunmaktadır: mevcut çalışmalar ÜYZ–insan etkileşimini ağırlıklı olarak üretim verimliliği ve biçimsel çeşitlilik ekseninde ele almakta; İBE’nin dört temel ilkesi olan şeffaflık, geri bildirim, kullanıcı kontrolü ve güvenin mimarlık stüdyosunun kendine özgü koşullarında –belirsizlik, estetik yargı ve mekânsal anlam üretimi– nasıl deneyimlendiğini ampirik olarak incelememektedir. Bu ilkelerin mimari tasarım sürecine nasıl yansıdığı; hangi aşamada şeffaflığın arttığı ya da azaldığı, geri bildirim döngülerinin tasarım kararlarını nasıl dönüştürdüğü, kullanıcı kontrolünün stratejik bir karar verme yetkinliğine nasıl evrildiği ve güven ilişkisinin otomasyon yanlılığından eleştirel iş birliğine nasıl geçtiği yanıt bekleyen sorular olarak kalmaktadır. Bu çalışma söz konusu boşluğu doğrudan ele almaktadır. Dolayısıyla ÜYZ’nin mimarlık stüdyosuna entegrasyonunu teknik bir adaptasyon olarak değil, İBE bağlamında yeniden tanımlanan bir “işbirlikçi zekâ” modeli olarak kavramsallaştıran bu araştırma; şeffaflık, geri bildirim, kullanıcı kontrolü ve güven ilkelerinin aynı stüdyo süreci içinde üç farklı ÜYZ konumlandırması -tasarımcı, ortak-tasarımcı ve teknik yardımcı- üzerinden nasıl farklılaştığını ve bu farklılaşmanın tasarım kararları ile eleştirel katılım üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak incelemektedir. Böylece çalışma; dört İBE ilkesinin mimarlık

stüdyosu bağlamındaki ampirik karşılığını ortaya koyarak hem insan-yapay zekâ etkileşimi literatürüne hem de mimarlık pedagojisi alanına kuramsal ve ampirik düzlemde katkı sunmayı hedeflemektedir.

2. Amaç, Kapsam ve Yöntem

Çalışmanın amacı; üretken yapay zekâ (ÜYZ) araçlarının mimari tasarım stüdyolarına entegrasyon sürecini incelemek ve öğrencilerin bu teknolojiyle kurdukları etkileşimin niteliğini Amershi vd. (2019) tarafından ortaya konulan İBE ilkeleri (şeffaflık, karar verme, güven ve geri bildirim) temelinde değerlendirmektir. Nitel araştırma yöntemlerinden olgubilim ve durum çalışması desenleri temelinde kurgulanan araştırma, insan-ÜYZ etkileşimini değerlendirmek için İBE bağlamında kapsamlı bir çerçeve sunan Amershi vd.'nin (2019) ilkelerini referans almaktadır. Bu kapsamda stüdyo süreci; Şeffaflık, Karar-Verme, Güven ve Geri Bildirim temaları üzerinden, mimari tasarımın belirsizlik içinde anlam üretme ve estetik yargı gibi özgün dinamikleriyle yeniden yorumlanarak değerlendirilmiştir. Araştırmanın çalışma grubunu, Karadeniz Teknik Üniversitesi Mimarlık Bölümü yüksek lisans programında öğrenim gören ve amaçsal örnekleme yöntemiyle belirlenen 17 katılımcı oluşturmaktadır. Katılımcı gizliliği kapsamında öğrenci isimleri K1-K9 kodlarıyla rumuzlanmıştır. Süreçte geleneksel modelleme araçları (AutoCAD, SketchUp, Forma) ile görsel (Stable Diffusion, Midjourney) ve metin tabanlı (Gemini, ChatGPT) ÜYZ modellerini entegre biçimde kullanan katılımcılar, elde ettikleri verileri akademik bir rapora dönüştürmüşlerdir. ÜYZ'nin pasif bir araçtan ziyade bir 'ortak eyleyici' (Coeckelbergh, 2020) olarak konumlandırıldığı bu uygulamada öğrenciler, istem okuryazarlığı becerileri ve karar verici bir yaklaşımla tasarım kararlarını yönetmişlerdir. Süreç boyunca toplanan öğrenci raporları, istem-çıktı arşivleri ve geri bildirim formları; içeriksel ve bağlamsal yorumlama teknikleriyle çözümlenerek Amershi vd. (2019) tarafından tanımlanan etkileşim ilkeleri ekseninde sistematik olarak analiz edilmiştir.

2.2. İBE İlkelerinin Operasyonel Tanımları

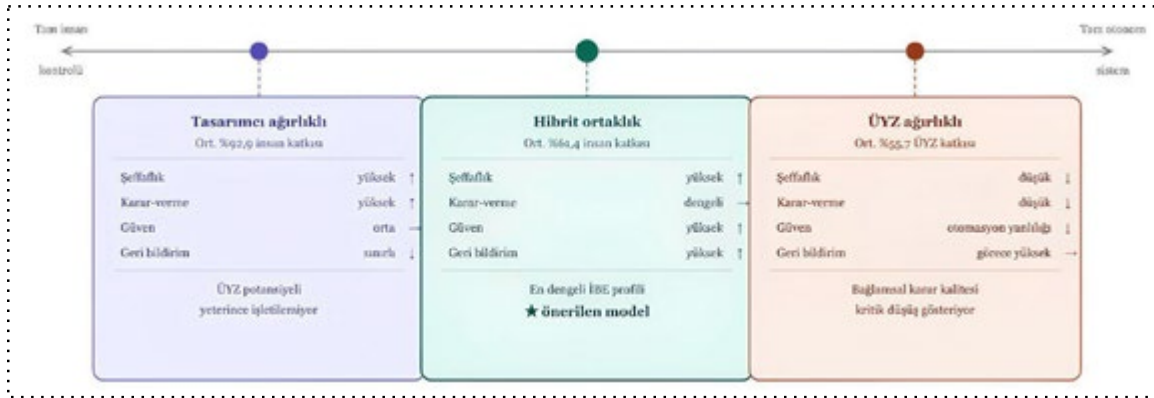
Bu çalışmada dört İBE ilkesi, genel literatür tanımlarının ötesinde mimarlık stüdyosuna özgü biçimde işlevselleştirilmiştir. Aşağıdaki tanımlar, ilkelerin veri analizinde nasıl kodlandığını ve hangi davranış örüntüleriyle eşleştirildiğini açıklamaktadır.

- **Şeffaflık:** Sistemin yeteneklerini, sınırlarını ve belirli bir çıktıyı neden ürettiğini kullanıcıya açıkça ifade edebilme kapasitesidir (Amershi vd., 2019). Mimari stüdyo bağlamında bu ilke; öğrencilerin (tasarımcıların) girdikleri metinsel istemlerin sistem tarafından nasıl bir algoritmik mantıkla yorumlandığını anlamlandırması ve sistemi bir 'kara kutu' olmaktan çıkarması olarak ele alınmıştır.
- **Kontrol ve Karar-Verme:** Sistemin yüksek otonomisine rağmen, kullanıcının makineyi kolayca yönlendirebilmesi, hataları verimli bir şekilde düzeltebilmesi ve sürecin dizginlerini eş zamanlı olarak elinde tutmasıdır (Amershi vd., 2019). Bu durum, ÜYZ'nin çok sayıda alternatif sunmasına karşın, bağlamsal filtrenin, inisiyatifin ve nihai sorumluluğun tasarımcıda kalmasını ifade etmektedir.
- **Güven:** Kullanıcının, sistemin ürettiği sonuçları ne ölçüde öngörülebilir ve güvenilir bulduğudur. Amershi vd. (2019), bu ilişkinin körü körüne bir kabule dönüşmemesi gerektiğinin altını çizer. Tasarım sürecinde güven; makinenin sunduğu estetik veya yapısal çıktıları itimat edilirken aynı zamanda eleştirel bir denetimin devrede olduğu "uygun itimat" boyutunda değerlendirilmiştir.
- **Geri Bildirim:** Kullanıcının, sistemin sunduğu sonuçlara karşı sürekli, anlık ve ayrıntılı geri dönüşler sağlayabilmesi ve sistemin de bu davranışlardan öğrenmesidir (Amershi vd., 2019). Bu ilke, tasarım eyleminin mekanik ve doğrusal bir üretim olmaktan çıkarak, iteratif (döngüsel) ve karşılıklı etkileşime dayalı bir ortaklığa dönüşmesini sağlamaktadır.

3. Bulgular ve Tartışma

Literatürde ÜYZ teknolojilerinin tasarım süreçlerine entegrasyonu genellikle bir spektrum üzerinde değerlendirilmektedir: bir uçta tüm inisiyatifin insanda olduğu geleneksel süreçler yer alırken, diğer

uçta karar alma yetkisinin tamamen makineye devredildiği tam otonom sistemler bulunmaktadır (Holter ve El-Assady, 2024). Öğrenci raporları bu spektrumun iki ucunu da deneyimlemiş ve ikisinin de tek başına yetersiz kaldığını ortaya koymuştur: tasarımcı ağırlıklı süreçte ÜYZ'nin potansiyeli büyük ölçüde göz ardı edilmekte, ÜYZ ağırlıklı süreçte ise bağlamsal okuma, mekânsal sezgi ve mimari uygulanabilirlik açısından ciddi kısıtlılıklar ortaya çıkmaktadır. Stüdyo çalışmalarından elde edilen bulgular, spektrumun tam ortasında yer alan ve insanın yapay zekâ ile ortaklaşa yenilik yaptığı "işbirlikçi zekâ" alanına işaret etmektedir (Peeters vd., 2021). Bu spektrumu sistematik biçimde inceleyebilmek amacıyla stüdyo süreci, tasarım kararlarının hangi aktörde yoğunlaştığına göre üç farklı rol konfigürasyonuna ayrılmıştır. Birinci konfigürasyonda ÜYZ, tasarım sürecine liderlik etmiş; insan yalnızca gözlem ve düzeltme işlevleriyle sınırlı kalmıştır. İkinci konfigürasyonda insan tasarımcı sürece liderlik etmiş, ÜYZ görselleştirme ve alternatif üretiminde yardımcı bir araç olarak kullanılmıştır. Üçüncü ve en verimli bulunan konfigürasyonda ise insan ve ÜYZ arasında iteratif ve karşılıklı etkileşime dayalı dengeli bir iş birliği kurulmuştur. Bu üç konfigürasyonun aynı proje bağlamında ve aynı katılımcılarla deneyimlenmesi, rol farklılaşmasının tasarım kararları ve pedagojik çıktılar üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı biçimde değerlendirmeye olanak tanımıştır. (Şekil 2)



Şekil 2. İBE spektrum modeli ve üç rol konfigürasyonunun konumu (Holter ve El-Assady, 2024 uyarlanmıştır.)

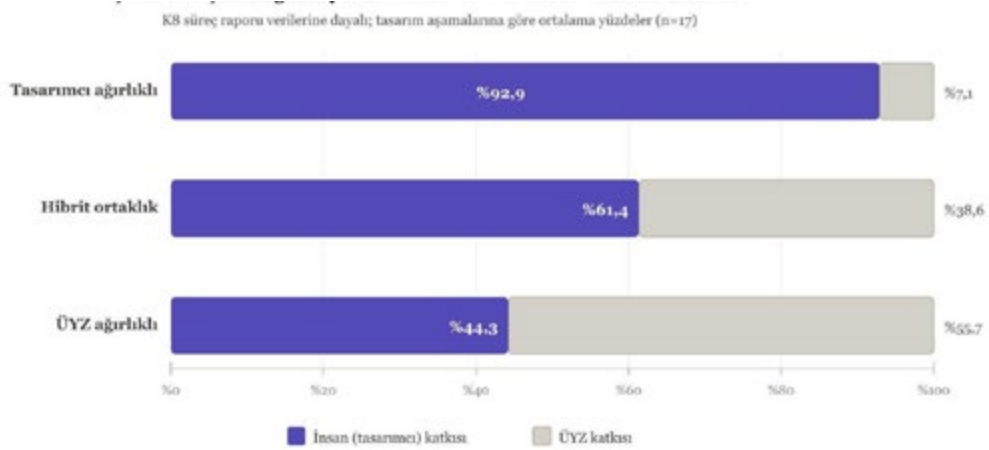
Raporlardan elde edilen bulgular, dört temanın üç konfigürasyonda tutarlı ve karşılaştırılabilir örüntüler sergilediğini ortaya koymaktadır. ÜYZ ağırlıklı konfigürasyonda başlangıçta yüksek üretim hızı ve çeşitlilik gözlemlenmiş; ancak şeffaflık azalmış, güven körü körüne teslimiyete dönüşmüş ve bağlamsal karar kalitesi düşmüştür. Tasarımcı ağırlıklı konfigürasyonda kontrol ve bağlamsal tutarlılık yüksek kalmış; fakat geri bildirim döngüsü sınırlı kalmış ve ÜYZ'nin potansiyeli yeterince işletilememiştir. Hibrit ortaklık konfigürasyonu ise dört temada da en dengeli deneyimi üretmiş; özellikle istem okuryazarlığının gelişimiyle birlikte şeffaflığın artması, karar sorumluluğunun tasarımcıda kalması, güvenin eleştirel bir iş birliğine dönüşmesi ve geri bildirim döngüsünün iteratif bir öğrenme yapısına evrilmesi bu konfigürasyona özgü çıktılar olarak tespit edilmiştir. Bu genel örüntü, K1'in ifadesi ile "yapay zekânın mimari tasarım sürecindeki rolünü salt bir sonuç üreticisi olarak değil, sürecin farklı aşamalarında değişen ağırlıklara sahip, yönlendirici değil fakat etkileyici bir aktör" olarak kavramsallaştırmayı gerektirmektedir. K2 ise hibrit süreci "iteratif bir geri besleme döngüsü" olarak tanımlamış ve tasarımcının bu süreçte bir üreticiden ziyade "bir karar verici gibi çalışarak yapay zekânın sunduğu üretim havuzunu eleştirel biçimde organize ettiğini" aktarmıştır. Bu tespitler, aşağıdaki alt bölümlerde dört tema üzerinden ayrıntılı biçimde ele alınmaktadır. Bu bölümde, Mimarlıkta Yapay Zekâ dersi kapsamında yürütülen stüdyo çalışmalarına katılan öğrencilerin süreç raporları; Şeffaflık, Karar-Verme (Etkenlik), Güven ve Geri Bildirim olmak üzere dört İBE teması çerçevesinde tematik içerik analizi yöntemiyle incelenmiştir. Raporlar, öğrencilerin ÜYZ araçlarıyla (ChatGPT, Gemini, Midjourney, Stable Diffusion, Lexica) üç farklı tasarım rolü üzerinden deneyimledikleri süreci yansımacı bir anlatımla aktardıkları birincil veri kaynağı niteliğindedir.

3.1. Şeffaflık: “Kara Kutu” Deneyiminden Prompt Okuryazarlığına

Raporların tamamında ortak bir başlangıç deneyimi dikkat çekmektedir: öğrenciler, stüdyo sürecinin erken aşamalarında ÜYZ sistemlerini nasıl çalıştığı belirsiz bir kara kutu olarak algılamıştır. K9, raporunda bu durumu şu biçimde ifade etmektedir: ÜYZ’nin süreci yöneten stratejik bir karar verici rolüne büründürüldüğü ilk fazda, sistemin kavramsal hızı insan beyninin çok ötesine geçmiş; ancak bu hız, sonuçların nasıl üretildiğinin anlaşılabilmesi ile birlikte bir belirsizlik alanı oluşturmuştur. Süreç ilerledikçe öğrencilerin şeffaflık algısının dönüştüğü gözlemlenmiştir. K8’in raporunda ise, istem okuryazarlığının gelişimiyle birlikte “hangi girdi hangi çıktıyı üretiyor” sorusunun yanıt bulmaya başladığı ve bunun tasarım sürecinde eleştirel bir konumlanmayı beraberinde getirdiği aktarılmaktadır. Benzer biçimde K7, ders dönemi boyunca yararlandığı ÜYZ araçlarının üç boyutlu görselleştirme kapasitesinin kayda değer biçimde geliştiğini ve başlangıçta görsellerin en-boy oranını bozan, malzemeleri hatalı yorumlayan bir sisteme dönüştüğünü gözlemlemiş; bu değişimin kendisini sistemi izleyen bir gözlemci konumuna taşıdığını belirtmiştir. K6 ise ÜYZ’nin erken aşamada bütünüyle yönetildiği deneyimde sistemin arsa bilgileri, koordinat ve fonksiyon programı gibi girdileri işleyerek ürettiği çıktıların, insan merkezli mimari sezgilerden nasıl kopabildiğini açık biçimde gözlemlediğini aktarmaktadır. Bu bulgular, şeffaflık ilkesinin mimarlık stüdyosu bağlamında yalnızca sistemin anlaşılabilirliği olarak değil; aynı zamanda tasarımcının sistemi izleyerek eleştirel bir mesafe kurma kapasitesi olarak deneyimlendiğini göstermektedir.

3.2. Karar–Verme ve Etkenlik: Tasarımcının Stratejik Biçimde Seçip Yönlendirici Konumu

Öğrenci raporlarında en fazla işlenen tema, tasarım kararlarının kimin elinde olduğu sorusudur. Üç rol senaryosu karşılaştırmalı olarak değerlendirildiğinde raporlar tutarlı bir örüntü ortaya koymaktadır: (Şekil 3) ÜYZ ağırlıklı süreçte karar etkinliği en düşük, hibrit ortaklık sürecinde ise en yüksek tasarım kalitesi elde edilmiştir. K8’in raporundaki nicel veriler bu örüntüyü somutlaştırmaktadır: tasarımcı ağırlıklı süreçte bilgi toplama (%95 insan), konsept/form (%100 insan) ve plan–detay (%100 insan) aşamalarında tasarımcı tam kontrol sağlarken genel ortalama %92,9 insan katkısı olarak hesaplanmıştır. Hibrit süreçte bu oran %61,4 insan / %38,6 ÜYZ biçiminde dengelenmiş; çözüm alternatifleri ve sunum aşamalarında (%50–%50) en yüksek işbirliği düzeyi gözlemlenmiştir. ÜYZ ağırlıklı süreçte ise ortalama %55,7 ÜYZ hâkimiyeti yaşanmış, ancak planlama ve detaylandırma aşamasında tasarımcının yeniden belirleyici konuma geçmesi zorunlu hale gelmiştir. K3’nin raporunda bu kırılma noktası açıkça tanımlanmaktadır: ÜYZ’nin liderlik ettiği ikinci aşamada yapay zekânın ürettiği formlar mimari olarak uygulanabilir bulunmamış ve “süreç yeniden tasarımcı merkezli bir yapıya evrilmiştir.” K2 ise ÜYZ’ye hiçbir ön bilgi verilmeden mekânsal durum gönderildiğinde sistemin üretim yapamadığını, ancak “Sen planlama alanında uzman bir plancısın” biçiminde görev tanımlaması yapıldıktan sonra süreci yönetebilir hale geldiğini belirtmiştir. Bu bulgu, ÜYZ’nin bağlamsal görev tanımlı olmaksızın karar veremediğini ve tasarımcının yönlendirici rolünün hiçbir senaryoda ortadan kalkmadığını göstermektedir. K5’nin raporunda hibrit sürecin bu açıdan en dengeli modeli temsil ettiği vurgulanmaktadır: “Yapay zekâ, tasarım sürecini tek başına yürüten otonom bir aktör değil, tasarımcının kontrolünde çalışan ve ortak eyleycilik dinamiklerine dayanan bir karar–verme ortağı olarak konumlanmaktadır.”



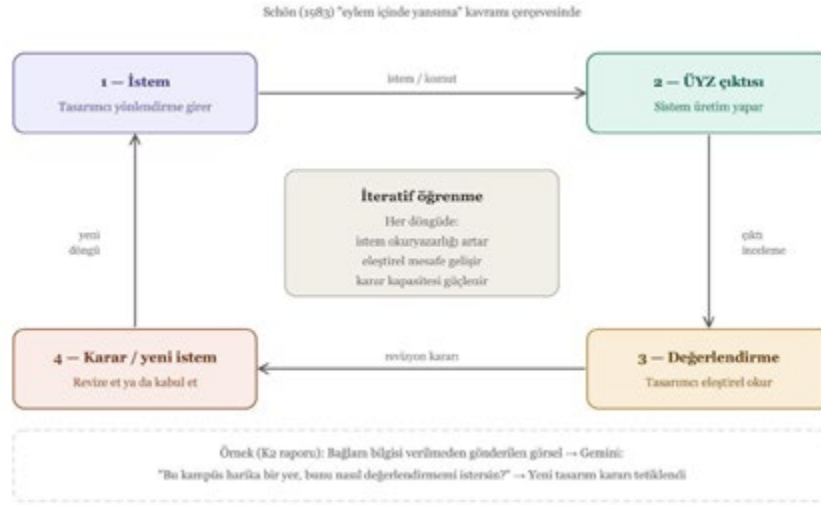
Şekil 3. Üç konfigürasyonda insan ve ÜYZ karar katkısı oranları

3.3. Güven: Otomasyon Yanlılığından Eleştirel İş Birliğine

Raporlarda güven teması, başlangıçta ÜYZ çıktılarına duyulan aşırı itimat ile zaman içinde gelişen eleştirel mesafe arasındaki gerilim üzerinden işlenmektedir. K1, süreç raporunda tasarımcı ile araç arasındaki ilişkinin “geleneksel üretim biçimlerinden farklı olarak daha etkileşimli ve çok katmanlı bir yapıya büründüğünü” vurgulayarak başlangıç aşamasında görsel açıdan güçlü ÜYZ çıktılarının bağlamsal ve mekânsal kararlar açısından her zaman yeterli olmadığını gözlemlemiştir. K4 ise raporunda mimarlığın yapay zekâyla karşılaşmasını CAD veya BIM’den niteliksel olarak farklı bir geçiş olarak tanımlamaktadır: “Yapay zekânın mimarlığa entegrasyonu, yalnızca temsile değil, doğrudan tasarım düşüncesinin üretimine müdahil olmaktadır.” Bu tanım, güven olgusunun teknik bir kabul sorununu aştığını; ontolojik bir dengeleme gerektirdiğini ortaya koymaktadır. K8’in raporundaki ÜYZ ağırlıklı süreç analizi de bu bulguyu desteklemektedir: ÜYZ’nin erken aşamalarda bağlamsal okumasındaki yetersizliğin fark edilmesiyle birlikte öğrenci “düzenleyici ve sınırlayıcı bir rol’e bürünmüş; güven ilişkisi körü körüne teslimiyetten eleştirel işbirliğine dönüşmüştür. K9’un raporunda bu dönüşüm sürecin en kritik kazanımı olarak tanımlanmaktadır: “ÜYZ, nihai karar verici değil; kimi zaman teknik bir asistan, kimi zaman aktif bir üretici, kimi zaman ise denetlenmesi gereken bir veri kaynağı olarak konumlandırılmıştır.” Bu çok katmanlı güven konfigürasyonu, üç rollü modelin pedagojik olarak en güçlü çıktısı olarak değerlendirilebilir.

3.4. Geri Bildirim: İteratif Döngünün Tasarım Düşüncesine Etkisi

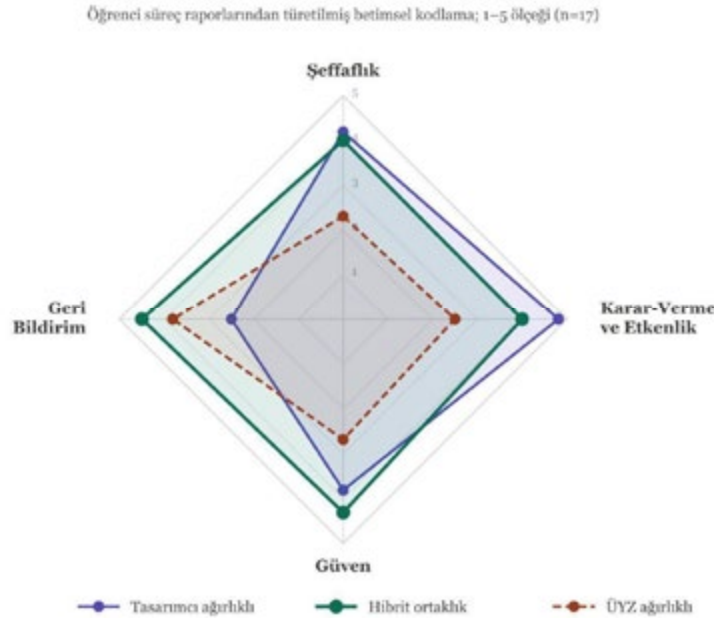
Öğrenci raporlarında geri bildirim döngüleri, tasarım sürecinin doğrusal olmayan yapısını en belirgin biçimde açığa çıkaran tema olarak öne çıkmaktadır. Raporların büyük çoğunluğunda prompt-çıkıtda değerlendirme-yeni prompt döngüsü, Schön’ün (1983) “eylem içinde yansıma” kavramıyla örtüşen bir iterasyon yapısı olarak betimlenmiştir. K2’ün raporunda bu döngü somut prompt örnekleriyle belgelenmektedir: yapay zeka modeline (ChatGPT, Gemini vb.) hiçbir bağlam bilgisi verilmeden gönderilen mekânsal görsel, sistemin “Bu kampüs harika bir yer, bunu nasıl değerlendirmemi istersin?” biçiminde bir karşı soru üretmesiyle sonuçlanmıştır. Bu karşı soru öğrencide yeni bir tasarım kararını tetiklemiş ve döngü yeniden başlamıştır. K9’nun raporunda ise ÜYZ’nin karar verici rolünde çalıştırıldığı fazda sistemin “insan beyninin kavramsal hızının çok ötesinde” ürettiği ve bu hızın tasarımcıda seçici bir geri bildirim pratiği geliştirmeye zorladığı aktarılmaktadır. K3’nin raporundaki “dengeli ortaklık” fazında geri bildirim döngüsü en olgunlaşmış biçimine ulaşmıştır: insan ve ÜYZ’nin ortak katkısıyla geliştirilen net tasarım yaklaşımında ÜYZ’den yalnızca görsel üretmesi değil; alan içi hareket akışlarını analiz etmesi, kullanım senaryoları önermesi ve uygulanabilir yapısal çözümler geliştirmesi talep edilmiştir. Bu çok katmanlı geri bildirim yapısı, ÜYZ’nin salt bir asistan değil diyalog partneri olarak konumlandırıldığının en belirgin kanıtı olarak değerlendirilebilir. (Şekil 4)



Şekil 4. İnsan-ÜYZ iteratif geri bildirim döngüsü

3.5. Tematik Analiz Özeti: Üç Rol Modelinde İBE Örüntüleri

Öğrenci raporlarından elde edilen bulgular, dört İBE temasının üç rol modelinde farklılaşan bir örüntü sergilediğini ortaya koymaktadır. Tasarımcı ağırlıklı süreçte şeffaflık ve karar etkinliği en yüksek düzeyde deneyimlenirken, geri bildirim döngüsü ve ÜYZ'nin potansiyelinden yararlanma sınırlı kalmaktadır. ÜYZ ağırlıklı süreçte hız ve çeşitlilik artmakta; ancak şeffaflık, güven ve bağlamsal karar kalitesi belirgin biçimde düşmektedir. Hibrit ortaklık modeli ise dört temada da en dengeli deneyimi üretmekte; özellikle güven-eleştiri ilişkisinin ve geri bildirim döngüsünün en olgun biçimde kurulduğu yapı olarak öne çıkmaktadır. Bu bulgular, Amershi vd.'nin (2019) İBE ilkelerinin mimarlık stüdyosu bağlamında yeniden yorumlanmasını gerektirdiği tezini ampirik olarak desteklemektedir: şeffaflık, salt sistem anlaşılabilirliği değil; eleştirel gözlem kapasitesi olarak; kontrol, kullanıcı komut hâkimiyeti değil; stratejik biçimde seçip yönlendirme olarak; güven ise körü körüne kabul değil; yansımacı işbirliği olarak yeniden tanımlanmaktadır. Geri bildirim ise doğrusal bir bilgi akışından iteratif ve karşılıklı bir öğrenme yapısına dönüşmektedir. (Şekil 5)



Şekil 5. Dört İBE temasının üç konfigürasyonda karşılaştırmalı derecelendirmesi

4. Sonuç

Bu çalışma, ÜYZ'nin mimari tasarım stüdyolarına entegrasyonunu teknik bir adaptasyon olarak değil, İBE bağlamında yeniden tanımlanan bir "işbirlikçi zekâ" modeli olarak ele almıştır. 17 yüksek lisans öğrencisinin katılımıyla yürütülen stüdyo süreci, aynı proje bağlamında üç farklı ÜYZ konumlandırmasının –tasarımcı, ortak-tasarımcı ve teknik yardımcı– karşılaştırmalı olarak deneyimlenmesine olanak tanımış; bu rol farklılaşmasının etkileşim örüntüleri, karar kalitesi ve pedagojik çıktılar üzerindeki farklılaşan etkilerini Şeffaflık, Karar–Verme, Güven ve Geri Bildirim temaları çerçevesinde ampirik olarak ortaya koymuştur. Böylece çalışma, literatürdeki mevcut stüdyo çalışmalarının büyük çoğunluğunun yapmadığını gerçekleştirmektedir: ÜYZ'yi tekil ve sabit bir konumda değil, dinamik ve değiştirilebilir bir rol içinde inceleyerek rol geçişlerini bizzat veri kaynağına dönüştürmektedir. Bulgular, üç konfigürasyon arasında tutarlı ve karşılaştırılabilir örüntüler ortaya koymuştur. Tasarımcı ağırlıklı konfigürasyonda ortalama %92,9 oranında insan katkısıyla yüksek bağlamsal tutarlılık ve mimari kontrol sağlanmış; ancak ÜYZ'nin alternatif üretim potansiyeli büyük ölçüde kullanılamamıştır. ÜYZ ağırlıklı konfigürasyonda başlangıçta geniş bir olasılıklar havuzu oluşmuş, ancak alan tanımı, kullanıcı deneyimi ve mekânsal sezgi gerektiren aşamalarda mimari uygulanabilirlik kritik biçimde düşmüştür; bu noktada tasarımcıların yeniden belirleyici konuma geçmesi zorunlu hale gelmiştir. Hibrit ortaklık konfigürasyonunda ise ortalama %61,4 insan / %38,6 ÜYZ dengesiyle dört İBE temasında da en yüksek bütünlük performans elde edilmiştir: prompt okuryazarlığının gelişimiyle şeffaflık artmış, karar sorumluluğu tasarımcıda kalmış, güven eleştirel bir iş birliğine dönüşmüş ve geri bildirim döngüsü iteratif bir öğrenme yapısı kazanmıştır. Bu bulgular, İBE ilkelerinin mimarlık stüdyosu bağlamında yalnızca teknik bir uyarlama değil, kavramsal bir yeniden tanımlama gerektirdiğini ortaya koymaktadır. Şeffaflık, sistem anlaşılabilirliğinden eleştirel gözlem kapasitesine; kontrol, komut hâkimiyetinden stratejik bir karar verici yönlendirmeye; güven, otomasyon kabulünden yansımacı iş birliğine; geri bildirim ise doğrusal bilgi akışından iteratif ve karşılıklı bir öğrenme yapısına dönüşmektedir. Bu dört kavramsal dönüşüm, "işbirlikçi zekâ" modelinin kuramsal çekirdeğini oluşturmakta ve hem insan–ÜYZ iş birliği literatürüne (Haase ve Pokutta, 2024; Weber vd., 2024) hem de mimarlık pedagojisi alanına (Gül vd., 2025; Özorhon vd., 2025) özgün bir katkı sunmaktadır.

Çalışmadan elde edilen başlıca çıkarımlar şu biçimde özetlenebilir:

- Tasarımcı rolü üretimden karar verici rolüne kaymaktadır: mimar, ÜYZ'nin sunduğu geniş olasılıklar havuzunu bağlam, estetik yargı ve mekânsal sezgiyle yöneten stratejik bir karar verici konumuna geçmektedir. Bu geçiş, müelliflik kavramını ortadan kaldırmamakta; yaratıcılığı biçim bulmaktan anlam seçmeye ve bağlam kurmaya dönüştürmektedir (Carpo, 2023).
- Karar sorumluluğu hiçbir konfigürasyonda ortadan kalkmamaktadır: ÜYZ'nin ağırlıklı olduğu süreçlerde dahi tasarımcının mimari uygulanabilirlik, bağlamsal uyum ve etik değerlendirme aşamalarında belirleyici konuma döndüğü gözlemlenmiştir. Bu bulgu, tasarımcının eleştirel pozisyonunun makine üretimiyle değil; makine üretimine rağmen değil, makine üretimiyle birlikte daha da merkezileştiğini göstermektedir.
- İBE temelli hibrit model, eleştirel filtre olmaksızın kullanılan ÜYZ'nin yaratabileceği yüzeyselleşme riskini bertaraf etmekte; tasarım ile araştırma arasındaki geçişleri çoğaltarak yeni üretim olasılıklarını açığa çıkarmaktadır. Bu model, ÜYZ'yi tehdit değil, insan yaratıcılığını genişleten bir bilişsel ortak olarak konumlandıran pedagojik bir çerçeve sunmaktadır.

Bu çalışmanın bazı sınırlılıkları bulunmaktadır. Araştırma, tek üniversitenin yüksek lisans programında ve belirli bir alan pratiği (kampüs mekânı tasarımı) bağlamında yürütülmüştür; bulguların farklı kültürel bağlamlara, mimari ölçeklere ve lisans düzeyindeki stüdyolara genellenebilirliği ayrı çalışmalarla sınanmalıdır. Öte yandan öğrenci raporlarına dayalı nitel veri; gözlem protokolleri, sesli düşünme kayıtları veya göz izleme verileriyle zenginleştirilebilir. Gelecek araştırmalar, bu çalışmada

geliştirilen dört temalı İBE çerçevesini farklı ölçek ve disiplinlerde test ederek “işbirlikçi zekâ” modelinin genellenebilir pedagojik parametrelerini belirlemeyi hedefleyebilir.

Sonuç olarak bu çalışma, MSTAS 2026 kapsamında sayısal tasarımın kavramsal sınırlarını zorlayan, işbirlikçi zekâ temelli ve “kapsam dışı” üretimlere zemin hazırlayan yeni bir eğitim modelini tartışmaya açmaktadır. Mimarlık eğitiminin geleceği, insan ile ÜYZ arasındaki rolü sabit değil geçişken; ilişkiyi araçsal değil diyalogsal; sonucu ürün değil süreç olarak tanımlayan bir pedagojik anlayış üzerine inşa edildiğinde, hem daha üretken hem de daha eleştirel bir tasarımcı kimliği mümkün hale gelecektir.

KAYNAKLAR

- Agkathidis, A., Song, Y., & Symeonidou, I. (2024). AI-assisted design: Utilising artificial intelligence as a generative form-finding tool in architectural design studio teaching. *Proceedings of eCAADe 2024*.
- Akdağ, F., & Künyeli, F. B. (2025). Artificial intelligence supported design automation: Current approaches and applications in architecture [Yapay zekâ destekli tasarım otomasyonu: Mimarlıkta güncel yaklaşımlar ve uygulamalar]. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 41(2).
- Alshahrani, A., & Mostafa, A. M. (2025). Enhancing the use of artificial intelligence in architectural education case study Saudi Arabia. *Frontiers in Built Environment*, 11, Makale 1610709. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2025.1610709>
- Amershi, S., Weld, D., Vorvoreanu, M., Fournery, A., Nushi, B., Collisson, P., ... Horvitz, E. (2019). Guidelines for human–AI interaction. *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1–13.
- Carmo, M. (2017). *The second digital turn: Design beyond intelligence*. MIT Press.
- Carmo, M. (2023). *Artificial intelligence and the new digital design theory*. MIT Press.
- Coeckelbergh, M. (2020). *AI ethics*. MIT Press.
- Cross, N. (2006). *Designerly ways of knowing*. Springer.
- Dortheimer, J., Schubert, G., Dalach, A., Brenner, L., & Martelaro, N. (2023). Think AI-side the box! Exploring the usability of text-to-image generators for architecture students. *Proceedings of eCAADe 2023*.
- Gül, L. F., Delikanlı, B., Üneşi, O., ve Gül, E. Ö. (2025). Development and applications of generative AI in architectural design studios. ITU Press.
- Haase, J., ve Pokutta, S. (2024). Human-AI co-creativity: Exploring synergies across levels of creative collaboration. *arXiv:2411.12527*.
- Hollan, J., Hutchins, E., ve Kirsh, D. (2000). Distributed cognition: Toward a new foundation for human-computer interaction research. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 7(2), 174–196.
- Holter, S., & El-Assady, M. (2024). Deconstructing human-AI collaboration: Agency, interaction, and adaptation. *Computer Graphics Forum*, 43(3), Makale e15107. <https://doi.org/10.1111/cgf.15107>
- Ihde, D. (1990). *Technology and the lifeworld: From garden to earth*. Indiana University Press.
- Kezer, Z., & Bala, H. A. (2025). Yaratıcılık ve algoritma arasında: Mimarlık pratiğinde dijital simbiyozun rol dönüşümü. *MSTAS 2025: Mimarlıkta Sayısal Tasarım XIX. Ulusal Sempozyumu*, Çukurova Üniversitesi.
- Oxman, R. (2017). Thinking difference: Theories and models of parametric design thinking. *Design Studies*, 52, 4–39.
- Özorhon, G., Nitelik Gelirli, D., Lekesiz, G., ve Müezzinoğlu, C. (2025). AI-assisted architectural design studio (AI-a-ADS): How artificial intelligence join the architectural design studio? *International Journal of Technology and Design Education*.
- Peeters, M. M. M., van Diggelen, J., van den Bosch, K., Bronkhorst, A., Neerincx, M. A., Schraagen, J. M., & Raaijmakers, S. (2021). Hybrid collective intelligence in a human–AI society. *AI & Society*, 36(1), 217–238.
- Song, B., Zhu, Q., & Luo, J. (2024). Human-AI collaboration by design. *International Design Conference - DESIGN 2024*. <https://doi.org/10.1017/pds.2024.227>
- Schön, D. A. (1983). *The reflective practitioner: How professionals think in action*. Basic Books.
- Springer. (2026). Rethinking architectural design education and practice with AI: A cognitive–social–technical perspective. *International Journal of Technology and Design Education*.
- Suchman, L. (2007). *Human–machine reconfigurations: Plans and situated actions* (2nd ed.). Cambridge

University Press.

Weber, S., Klein, H. C., Siemon, D., Kordyaka, B., ve Niehaves, B. (2024). Designing successful human-AI collaboration for creative-problem solving in architectural design. ICIS 2024 Proceedings.

Zhong, X., Meng, X., Li, Y., Fricker, P., Liang, J., & Koh, I. (2025). An agentic vision-action framework for generative 3D architectural modeling from sketches. *International Journal of Architectural Computing*, 23(3), 679–700. <https://doi.org/10.1177/14780771251352950>

Mimari Tasarım Süreçlerinde Üretken Yapay Zeka Araçlarının Rolü ve İş Akışları Üzerine Bir Analiz

Şule Taşlı Pektaş¹ ; Ece Genç² 

^{1,2}Ostim Teknik Üniversitesi

¹sule.taslipektas@ostimteknik.edu.tr; ²240805011@ostimteknik.edu.tr

Özet

Mimarlık disiplini, elle çizimden CAD yazılımlarına, ardından Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) sistemlerine uzanan dijital dönüşüm sürecinde sürekli olarak yeni araç ve yöntemlerle yeniden şekillenmiştir. Günümüzde bu dönüşümün en güncel aşamalarından birini üretken yapay zeka araçları oluşturmaktadır. Bu çalışma, üretken yapay zeka araçlarının mimari tasarım süreçlerinde hangi aşamalarda, hangi amaçlarla ve ne tür katkılarla kullanıldığını incelemeyi amaçlamaktadır. Çalışmada RIBA Plan of Work modeli temel alınarak üretken yapay zeka araçlarının tasarım sürecindeki rolleri sistematik biçimde değerlendirilmiştir. Yöntem olarak literatür taraması, araç ve dokümantasyon incelemesi, araç sınıflandırması ve karşılaştırmalı matris oluşturma aşamalarından oluşan karma bir yaklaşım benimsenmiştir. İncelenen araçlar, aktif kullanımda olmaları, dokümantasyonlarının erişilebilirliği, RIBA aşamalarından en az biriyle ilişkilendirilebilmeleri ve üretken yapay zeka destekli çıktı üretmeleri ölçütleri doğrultusunda seçilmiştir. Çalışma kapsamında Midjourney, DALL·E 3, Stable Diffusion, LookX, Finch 3D, TestFit, Autodesk Forma, Cove.tool, Hypar, Maketopia, Veras, ArkoAI ve Swapp gibi araçlar değerlendirilmiştir. Bulgular, üretken yapay zeka araçlarının özellikle kavramsal tasarım ve erken tasarım aşamalarında yoğun olarak kullanıldığını göstermektedir. Difüzyon tabanlı görsel üretim araçları konsept geliştirme ve görselleştirme süreçlerini desteklerken, uzamsal planlama ve parametrik tasarım araçları kütle, plan ve mekansal organizasyon kararlarının geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Teknik proje geliştirme ve dokümantasyon aşamalarında ise yapay zeka araçlarının daha çok otomasyon, görselleştirme ve BIM tabanlı üretim süreçlerini desteklediği görülmektedir. Sonuç olarak çalışma, üretken yapay zeka araçlarını mimari tasarım süreci bağlamında sistematik biçimde sınıflandıran bir analiz çerçevesi önermekte ve bu araçların mimari tasarım süreçlerinde daha bilinçli, eleştirel ve sistematik biçimde kullanılmasına katkı sağlamayı hedeflemektedir.

Anahtar Kelimeler: üretken yapay zeka, mimari tasarım süreci, RIBA Plan of Work, tasarım iş akışları.

Generative Artificial Intelligence Tools in Architectural Design Processes: An Analysis of Roles and Workflows

Şule Taşlı Pektaş¹ ; Ece Genç² 

^{1,2}Ostim Technical University

¹sule.taslipektas@ostimteknik.edu.tr; ²240805011@ostimteknik.edu.tr

Abstract

Architecture has been continuously transformed through digital tools, from hand drawing to CAD systems and later to Building Information Modeling (BIM). Today, generative artificial intelligence tools represent one of the most recent stages of this transformation. This study aims to examine how generative AI tools are used in architectural design processes, at which stages they become effective, and what kinds of contributions and limitations they introduce. The study adopts the RIBA Plan of Work as a process framework in order to systematically position generative AI tools within architectural design workflows. Methodologically, the research follows a mixed approach consisting of literature review, tool and documentation review, tool classification, and the development of a comparative matrix. The tools were selected according to their active use in architectural design, accessibility of documentation, relevance to at least one RIBA stage, and ability to produce outputs supported by generative AI. Within this scope, tools such as Midjourney, DALL-E 3, Stable Diffusion, LookX, Finch 3D, TestFit, Autodesk Forma, Cove.tool, Hypar, Maketopia, Veras, ArkoAI, and Swapp were examined. The findings indicate that generative AI tools are used most intensively in conceptual and early design stages. Diffusion-based image generation tools support visual ideation, atmosphere studies, and concept development, while spatial planning and parametric tools contribute to massing, floor plan generation, and spatial organization. In later stages, particularly in technical design and documentation, AI tools are more commonly associated with automation, BIM-based visualization, and the production of technical outputs. The analysis also shows that these tools do not fully automate architectural design. Instead, they support and accelerate different stages of the process while still requiring the active judgment and direction of the architect. In this context, the architect's role increasingly shifts toward that of a curator who evaluates, selects, and guides design alternatives. As a result, this study proposes an analytical framework that systematically classifies generative AI tools in relation to architectural design stages and aims to contribute to their more conscious, critical, and systematic use in architectural design workflows.

Keywords: generative artificial intelligence, architectural design process, RIBA Plan of Work, design workflows.

1. Giriş

Mimarlık disiplini, tarihsel süreç boyunca elle çizimden CAD yazılımlarına, ardından Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) sistemlerine evrilmiştir. Günümüzde ise bu dijital dönüşümün en yeni ve etkili aşamasını yapay zeka (AI) destekli tasarım araçları oluşturmaktadır. Bu araçların kullanım alanları ve yetkinlikleri Çekişmeli Üretken Ağlar (GAN) (Goodfellow et al., 2014) ve CLIP-destekli Difüzyon Modellerinin (Ho et al., 2020; Crowson et al., 2022) geliştirilmesi ile birlikte daha önce görülmemiş bir şekilde zenginleşmiştir. Steinfeld'in (2023) ortaya koyduğu gibi "2022 yazından sonra üretken yapay zeka alanındaki gelişmeler mimarlık alanını aniden ve ciddi biçimde" etkilemiştir. Bu gelişmeler mimarlık eğitimi ve uygulamasını hazırlıksız yakalamıştır. Günümüzde mimarlık okullarında ve ofislerinde çeşitli üretken yapay zeka araçlarıyla denemeler yapılmakla birlikte bu araçların yetkinlikleri, tasarım süreçlerine ve iş akışlarına entegrasyonları, avantajları ve dezavantajları hakkında daha çok çalışma yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bahsedilen araştırma açığını kapamaya yardımcı olmak üzere gerçekleştirilmiş olan bu çalışmanın araştırma soruları şunlardır:

1. Mimari tasarım süreçlerinde kullanılan üretken yapay zeka araçları ve bunların tasarım süreçlerindeki rolleri nelerdir?
2. Bu araçların tasarım süreçlerindeki avantajları ve dezavantajları nelerdir?
3. Üretken yapay zeka araçları ile bütünleşik bir mimari tasarım iş akışı nasıl planlanabilir?

2. Yöntem

Yukarıda belirtilen araştırma sorularına yanıt aramak için karma bir metodoloji (mixed-method) benimsenmiştir. Çalışmanın yöntemi dört aşamadan oluşmaktadır: literatür taraması, araç ve dökümantasyon taraması, araç sınıflandırması ve karşılaştırmalı matris oluşturma. İlk aşamada mevcut literatürdeki AI ve mimarlık arakesitindeki araç geliştirme ile ilgili çalışmalar taranarak incelenmiştir. İkinci aşamada literatür taramasında incelenmiş olan araç geliştirme çalışmaları sonucunda ürüne dönüştüğü anlaşılan ve piyasada aktif olarak kullanılan araçların (Midjourney, Stable Diffusion, LookX, Finch 3D, Hypar ve Adobe Firefly gibi) özellikleri ve dökümantasyonları ile ilgili bir araştırma yapılmıştır. Araç seçiminde, mimari tasarım sürecinde aktif kullanımda olmaları, dökümantasyonlarının erişilebilir olması, RIBA aşamalarından en az biriyle ilişkilendirilebilmeleri ve üretken yapay zeka destekli çıktı üretmeleri temel ölçütler olarak alınmıştır. Bu aşamada araçların Web siteleri ve ilgili dökümantasyonları incelenmiş, ayrıca araçlar açık kaynaklı doğrudan, ücretli ise deneme sürümleri indirilerek yazarlar tarafından denenmiştir. Üçüncü aşamada araçlar işlevlerine ve tasarım süreçlerinin hangi aşamalarında kullanıldıklarına göre sınıflandırılmıştır. Son aşamada ise tüm aşamalarda elde edilen verilere göre karşılaştırmalı bir matris oluşturularak araçlar buna göre analiz edilmiştir.

Bu çalışmada mimari tasarım süreç modeli olarak RIBA Plan of Work kullanılmıştır (RIBA, 2026). RIBA Plan of Work, İngiliz Kraliyet Mimarlar Enstitüsü (Royal Institute of British Architects) tarafından geliştirilen ve mimari tasarım ile proje geliştirme süreçlerini aşamalara ayırarak tanımlayan kapsamlı bir süreç modelidir. Proje başlangıcından kullanım sonrası değerlendirmeye kadar olan tüm tasarım ve uygulama aşamalarını sistematik bir çerçevede ele alması nedeniyle mimarlık pratiğinde ve akademik çalışmalarda yaygın olarak kabul edilen bir referans model olarak kullanılmaktadır. Tasarım sürecini kavramsal tasarımdan teknik projelendirmeye kadar farklı aşamalara ayırması, üretken yapay zeka araçlarının hangi tasarım aşamalarında nasıl kullanılabildiğini analiz etmeye olanak sağlamaktadır. Bu nedenle RIBA Plan of Work modeli, üretken yapay zeka araçlarının mimari tasarım süreçlerindeki rollerini sistematik biçimde incelemek için bu çalışmada temel süreç çerçevesi olarak kabul edilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

Yöntem kısmındaki adımların gerçekleştirilmesi sonucu oluşturulan matris aşağıda sunulmuştur (Tablo 1). Tablo 1’de sunulan analiz, üretken yapay zeka araçlarının mimari tasarım sürecinin farklı aşamalarında farklı roller üstlendiğini göstermektedir. Araçların dağılımı incelendiğinde, özellikle kavramsal tasarım ve erken tasarım aşamalarında yoğunlaştıkları görülmektedir. Difüzyon tabanlı görüntü üretim modelleri (Midjourney, DALL-E 3 ve Stable Diffusion gibi) tasarımın erken evrelerinde hızlı görsel varyasyonlar üretmeye olanak tanımakta ve fikir geliştirme süreçlerini desteklemektedir. Bununla birlikte bu araçların ürettiği çıktılar çoğunlukla ölçeksiz ve teknik doğruluğu sınırlı olduğundan, doğrudan mimari üretim sürecine aktarılmaları sınırlıdır (Paananen et al., 2024).

Uzamsal planlama ve parametrik tasarım araçlarının ise daha analitik bir rol üstlendiği görülmektedir. Finch 3D, TestFit veya Maketopia gibi araçlar parsel verileri ve mekansal gereksinimleri kullanarak otomatik plan veya kütle alternatifleri üretebilmektedir. Bu durum özellikle tipolojiye dayalı projelerde tasarım sürecini hızlandırmaktadır (Franco, 2019). Ancak bu sistemlerin belirli algoritmik kurallara dayanması, tasarım çeşitliliğinin sınırlandırılması riskini de beraberinde getirebilmektedir (Landes, 2022).

Teknik tasarım aşamalarında kullanılan yapay zeka araçlarının rolü ise daha çok otomasyon ve üretim süreçleriyle ilişkilidir. Hypar ve Swapp gibi araçlar teknik detayların veya uygulama çizimlerinin algoritmik olarak üretilmesini mümkün kılarken, Veras ve ArkoAI gibi araçlar BIM modelleri üzerinden hızlı görselleştirme üretimine olanak tanımaktadır. Bu araçların önemli bir özelliği, Rhino, Revit veya IFC tabanlı BIM ortamlarıyla entegre çalışabilmeleridir (Ko et al., 2023). Bu durum yapay zekanın mimari tasarım sürecinde çoğunlukla mevcut yazılım ekosisteminin bir parçası olarak kullanıldığını göstermektedir. BIM ve üretken yapay zeka kesişimindeki çalışmalar yapı endüstrisi için önemli bir gelişim potansiyeli sunmaktadır (Alves et al., 2025).

Çevresel analiz ve performans değerlendirme araçları ise tasarım sürecinin erken aşamalarında veri temelli karar alma süreçlerini desteklemektedir. Cove.tool veya Autodesk Forma gibi araçlar enerji performansı, gün ışığı veya kentsel bağlam gibi verileri tasarımın başlangıç aşamalarında analiz etmeye imkân tanımaktadır. Bununla birlikte bu araçların kullanımı çoğu zaman kapsamlı veri girişi ve belirli bir öğrenme süreci gerektirmektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde, üretken yapay zeka araçlarının mimari tasarım sürecinde tek bir işlev üstlenen araçlar olmadığı, farklı aşamalarda farklı katkılar sağlayan bir araç ekosistemi oluşturduğu görülmektedir. Bu araçlar, izleyen alt bölümlerde RIBA aşamaları temel alınarak daha ayrıntılı biçimde ele alınmaktadır.

Tablo 1: Üretken Yapay Zeka Araçlarının RIBA Plan of Work Aşamalarına Göre Karşılaştırmalı Analizi

RIBA Aşaması	Araç Grubu	Öne Çıkan Araçlar	Temel Mimari Yetkinlik	Avantajlar	Dezavantajlar
0. Stratejik tanımlama	Çevresel & performans analizi	TestFit, Cove.tool	Arsa kapasitesi, enerji performansı ve sürdürülebilirlik hedeflerinin erken analiz edilmesi	Veri temelli karar alma, fizibilite hızlanır	Veri girişi ve model kurulumu karmaşık olabilir
1. Hazırlık ve Program geliştirme	Çevresel & kütle analizi	TestFit, Autodesk Forma	Arsa verileriyle kütle senaryoları ve kentsel bağlam analizi	Hızlı kapasite hesapları ve plan senaryoları	Parametrelerin yanlış tanımlanması hatalı sonuçlar doğurabilir
2. Kavramsal tasarım	Difüzyon modelleri (GenAI)	Midjourney, DALL·E 3, Stable Diffusion	Görsel konsept üretimi, stil ve atmosfer araştırması	Çok hızlı görsel varyasyon üretimi ve estetik keşif	Ölçeksiz üretim, teknik doğruluk düşük
2. Kavramsal tasarım	Uzamsal planlama araçları	Finch 3D	Kütle organizasyonu ve erken plan üretimi	Mekansal verimlilik ve hızlı iterasyon	Tipolojiye bağımlılık riski
2. Kavramsal tasarım	AI görselleştirme	LookX	Erken 3D modellerden fotogerçekçi görsel üretme	Konsept tasarım fikirlerinin hızlı görselleştirilmesi	Geometri doğruluğu ve uygulanabilirlik sınırlı
3. Mekansal koordinasyon	Uzamsal planlama & parametrik araçlar	Finch 3D, Maketopia, Hypar	Otomatik kat planı üretimi ve mekansal organizasyon	Sirkülasyon ve alan verimliliği optimizasyonu	Tasarım çeşitliliği sınırlanabilir
4. Teknik proje geliştirme	Parametrik & BIM üretimi	Hypar, Swapp	Bina sistemleri ve teknik detayların algoritmik üretimi	Teknik doğruluk ve otomasyon	Kara kutu algoritma yapısı
4. Teknik proje geliştirme	AI destekli render	Veras, ArkoAI	BIM modellerinden fotogerçekçi görseller üretme	Tasarım sürecinde hızlı render ve malzeme denemeleri	Mevcut geometriye bağımlılık
5. İnşaat ve dokümantasyon	Otomasyon ve dokümantasyon	Swapp	Uygulama projeleri ve teknik dokümantasyon üretimi	BIM verilerinin sahaya aktarımı	Yazılım bağımlılığı
6. Teslim ve proje kapanışı	—	—	AI araçlarının kullanımı sınırlıdır	—	—
7. Kullanım ve performans takibi	Performans analizi	Cove.tool	Operasyonel enerji performansı analizi	Kullanım sonrası veri analizi	Model doğruluğu veriye bağlıdır

3.1. Stratejik Tanımlama Sürecinde Kullanılan Yapay Zeka Araçları

Tablo 1’de yer alan araçlar incelendiğinde, üretken yapay zeka sistemlerinin tasarım sürecinin farklı aşamalarında farklı roller üstlendiği görülmektedir. Stratejik tanımlama sürecinde kullanılan yapay zeka araçları, özellikle arsa kapasitesinin değerlendirilmesi, proje verilerinin analiz edilmesi ve sürdürülebilirlik hedeflerinin erken aşamada ele alınması gibi konularda tasarım sürecine destek sağlamaktadır. Yapay zeka destekli sistemlerin arazi verileri, mekansal gereksinimler ve çevresel performans kriterlerini analiz ederek erken tasarım kararlarının geliştirilmesine katkı sunduğu belirtilmektedir. Özellikle enerji performansının erken aşamada değerlendirilebilmesi, veri temelli karar alma süreçlerini desteklemektedir (Jang et al., 2025).

3.1.1. Cove.tool

Cove.tool, erken tasarım aşamasında yapı performansına ilişkin temel göstergeleri hızlı bir biçimde değerlendirmeye imkân veren bir analiz aracıdır. Üç boyutlu model üzerinden enerji tüketimi, gün ışığı erişimi, karbon etkisi ve maliyet tahmini gibi parametreleri hesaplayarak tasarımcının çevresel performans hedeflerini süreç başında değerlendirmesine yardımcı olur. Model doğruluğunun sonuçlara doğrudan yansması nedeniyle veri girişinin dikkatli yapılması önemlidir (Szalai et al., 2023).

3.1.2. TestFit

TestFit, arsa ve imar verilerini temel alarak kısa sürede farklı yerleşim senaryoları üretebilen üretken bir tasarım aracıdır. Parsel boyutu, çekme mesafeleri, otopark gereksinimi ve kat alanı dağılımı gibi parametrik girdilerle çalışarak konut veya karma kullanım projelerinde hızlı fizibilite analizi yapılmasını sağlar. Araç, farklı kütle ve plan alternatiflerinin saniyeler içinde karşılaştırılmasına olanak tanıdığı için erken tasarım kararlarını hızlandıran pratik bir araç olarak değerlendirilmektedir (TestFit, 2026).

3.2. Hazırlık ve Program Geliştirme Sürecinde Kullanılan Yapay Zeka Araçları

Hazırlık ve program geliştirme sürecinde kullanılan yapay zeka araçları, arsa verilerinin değerlendirilmesi, kütle alternatiflerinin oluşturulması ve kentsel bağlam analizlerinin yapılması gibi süreçlerde tasarımcıya destek sağlamaktadır. Bu süreçte kullanılan tasarım araçlarının farklı tasarım alternatiflerinin kısa sürede oluşturulmasına olanak sağladığı belirtilmektedir. Bu durum, farklı plan ve kütle senaryolarının karşılaştırılmasını kolaylaştırarak erken tasarım kararlarının geliştirilmesine katkı sunmaktadır (Szalai et al., 2023). TestFit bu süreçte farklı plan ve kütle alternatiflerinin geliştirilmesine katkı sağlarken, Autodesk Forma gibi araçlar ise kentsel bağlam ve çevresel analiz süreçlerini desteklemektedir.

3.2.1. Autodesk Forma

Autodesk Forma, kentsel bağlamı ve çevresel performansı erken tasarım aşamasına entegre etmeyi amaçlayan bir araçtır. Güneşlenme, gün ışığı, rüzgâr davranışı ve çevresel etkiyi analiz ederek farklı kütle alternatiflerinin değerlendirilmesine yardımcı olmaktadır. Özellikle yoğun kentsel dokularda çevresel etkiyi gözetken kararların erken aşamada değerlendirilmesini mümkün kıldığı için hazırlık ve program geliştirme süreçlerinde önemli bir işlev üstlenmektedir (Szalai et al., 2023).

3.3. Kavramsal Tasarım Sürecinde Kullanılan Yapay Zeka Araçları

Kavramsal tasarım sürecinde kullanılan yapay zeka araçları, görsel konsept üretimi, atmosfer araştırmaları ve erken tasarım alternatiflerinin geliştirilmesi gibi süreçlerde tasarımcıya destek sağlamaktadır. Özellikle difüzyon tabanlı üretken yapay zeka araçları, metin tabanlı komutlar aracılığıyla kısa sürede farklı tasarım varyasyonlarının oluşturulmasına olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte bazı yapay zeka araçları, erken plan üretimi, kütle organizasyonu ve fotogerçekçi görselleştirme gibi süreçlerde de kullanılmaktadır. Literatürde, üretken yapay zeka araçlarının

özellikle şematik ve kavramsal tasarım aşamalarında yoğun olarak kullanıldığı belirtilmektedir (Jang et al., 2025).

3.3.1. Midjourney

Midjourney, metin girdilerini görsel ifadelerle dönüştüren difüzyon tabanlı bir üretken yapay zeka aracıdır. Kavramsal tasarım sürecinde atmosfer, biçim, mekansal duygu ve malzeme fikirlerinin hızlı biçimde görselleştirilmesini sağlayarak tasarımcıya geniş bir keşif alanı sunar. Üretilen görsellerin teknik doğruluğu sınırlı olsa da, araç erken fikir üretimi ve görsel araştırmalar için yoğun biçimde kullanılmaktadır (Jang et al., 2025).

3.3.2. DALL-E 3

DALL-E 3, metin komutlarını detaylı ve yüksek çözünürlüklü görsellere dönüştürebilen gelişmiş bir üretken modeldir. Farklı atmosfer, karakter ve mekan kurgularını kolayca oluşturabilmesi, kavramsal tasarım aşamasında alternatiflerin karşılaştırılmasını kolaylaştırır. Görselleri düzenleme, genişletme ve varyasyon üretme özellikleri sayesinde tasarımcıya aşamalı ve geri beslemeye dayalı bir tasarım süreci oluşturur (Jang et al., 2025).

3.3.3. Stable Diffusion

Stable Diffusion, açık kaynak yapısı nedeniyle kullanıcıların kendi veri setleriyle özelleştirme yapabildiği esnek bir görsel üretim aracıdır. Hem sıfırdan görseller oluşturabilmesi hem de mevcut görseller üzerinde düzenleme yapılmasına izin vermesi, atmosfer, malzeme ve biçim araştırmalarını hızlandırır. Bu açıdan kavramsal tasarım sürecinde farklı olasılıkların denenmesine katkı sunan bir araç olarak değerlendirilmektedir (Jang et al., 2025).

3.3.4. LookX

LookX, yapay zeka destekli mimari görselleştirme amacıyla kullanılan üretken bir tasarım aracıdır. Araç, metin tabanlı komutlar ve görsel girdiler aracılığıyla fotogerçekçi mimari görseller üretebilmektedir. Özellikle kavramsal tasarım sürecinde atmosfer çalışmaları, konsept araştırmaları ve tasarım fikirlerinin görselleştirilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Gerçekçi ışık, malzeme ve çevresel bağlam içeren görseller oluşturabilmesi, tasarım fikirlerinin daha etkili biçimde sunulmasına katkı sağlamaktadır (Alamasi et al., 2026).

3.3.5. Finch 3D

Finch 3D, parametrik ve veri odaklı çalışan yapay zeka destekli bir tasarım aracıdır. Araç, özellikle kavramsal tasarım ve mekansal koordinasyon süreçlerinde farklı plan ve kütle alternatiflerinin geliştirilmesine yardımcı olmaktadır. Tasarım girdilerinde yapılan değişikliklerin eş zamanlı olarak güncellenebilmesi, farklı yerleşim senaryolarının kısa sürede karşılaştırılmasına olanak sağlamaktadır. Ayrıca araç, gerçek zamanlı olarak brüt kat alanı ve mekansal organizasyon verilerini analiz ederek tasarım sürecinde hızlı karar geliştirilmesine katkı sunmaktadır. Literatürde, Finch 3D'nin mevcut CAD/BIM tabanlı çalışma ortamlarına entegre biçimde çalıştığı ve erken tasarım sürecinde alternatif tasarım çözümlerinin hızlı biçimde üretilebilmesini desteklediği belirtilmektedir (Pandey, 2025).

3.4. Mekansal Koordinasyon Sürecinde Kullanılan Yapay Zeka Araçları

Mekansal koordinasyon sürecinde kullanılan yapay zeka araçları, plan organizasyonu, mekansal ilişkiler ve tasarım verilerinin birlikte değerlendirilmesine katkı sağlamaktadır. Özellikle parametrik ve uzamsal planlama araçları sayesinde farklı plan alternatifleri kısa sürede oluşturulabilmekte ve tasarım süreçleri eş zamanlı olarak güncellenebilmektedir. Bu durum, sirkülasyon kararlarının, alan

kullanımının ve mekansal organizasyonun daha kontrollü biçimde geliştirilmesini desteklemektedir (Ko et al., 2023).

3.4.1. Maketopia

Maketopia, kullanıcı tarafından belirlenen alan gereksinimleri ve mekansal ilişkiler doğrultusunda otomatik kat planları üretebilen bir araçtır. Tekrarlayan konut tipolojilerinde farklı yerleşim alternatiflerini hızlıca karşılaştırabilmesi, sirkülasyon ve alan dağılımı gibi erken tasarım kararlarının geliştirilmesini kolaylaştırmaktadır. Bu yönüyle araç, özellikle mekansal koordinasyon aşamasında işlevsel bir destek sunar (Maket, 2026).

3.4.2. Hypar

Hypar, parametrik tasarım ile otomasyonu bir araya getiren bir platform olarak, kullanıcı tanımlı kurallar doğrultusunda plan düzeni, yapı sistemi yerleşimi ve mekansal ilişkileri geliştirebilmektedir. Farklı seçeneklerin eş zamanlı güncellenmesi, özellikle karmaşık programlara sahip projelerde tasarım geliştirme sürecini hızlandırmaktadır (Ko et al., 2023; Alaması et al., 2026).

3.5. Teknik Proje Geliştirme Sürecinde Kullanılan Yapay Zeka Araçları

Teknik proje geliştirme sürecinde kullanılan yapay zeka araçları, parametrik üretim, teknik detay geliştirme ve görselleştirme süreçlerinde tasarımcıya destek sağlamaktadır. Özellikle parametrik ve otomasyon tabanlı sistemler sayesinde bina sistemleri, teknik detaylar ve fotogerçekçi görseller daha hızlı biçimde üretilebilmektedir. Bu durum, teknik doğruluk, tasarım koordinasyonu ve malzeme denemelerinin daha verimli biçimde değerlendirilmesine katkı sağlamaktadır (Ko et al., 2023).

3.5.1. Swapp

Swapp, teknik çizim ve dokümantasyon süreçlerini otomatikleştirerek uygulama projesi aşamasındaki tekrar eden işleri azaltmayı amaçlayan bir araçtır. Plan, kesit ve detay gibi standart çıktıların otomatik olarak oluşturulması, tasarım ekibinin zamanını daha verimli kullanmasına olanak sağlamaktadır. Araç, özellikle büyük ölçekli projelerde teknik üretim sürecini hızlandıran bir otomasyon sistemi olarak öne çıkmaktadır (Swapp, 2026).

3.5.2. Veras

Veras, BIM modellerinden gerçek zamanlı fotogerçekçi görseller üreterek teknik proje sürecinde malzeme, ışık ve cephe kararlarının hızlı biçimde değerlendirilmesini sağlar. Alternatif görselleştirmelerin kısa sürede üretilmesi, teknik kararlar arasındaki karşılaştırmayı kolaylaştırmakta ve tasarım sürecinin hızını artırmaktadır (Ko et al., 2023).

3.5.3. ArkoAI

ArkoAI, dijital modeller üzerinden fotogerçekçi görseller oluşturan ve özellikle sunum odaklı tasarım süreçlerinde tercih edilen bir yapay zeka aracıdır. Malzeme, ışık ve atmosfer gibi öğelerin farklı kombinasyonlarının kısa sürede denenebilmesi, tasarımın erken ve orta aşamalarında temsil gücünü artırmaktadır (Alaması et al., 2026).

3.6. İnşaat ve Dokümantasyon Sürecinde Kullanılan Yapay Zeka Araçları

İnşaat ve dokümantasyon sürecinde kullanılan Swapp, uygulama projeleri ve teknik dokümantasyon süreçlerinin daha hızlı ve düzenli biçimde yürütülmesine katkı sağlamaktadır. Özellikle otomasyon tabanlı sistemler sayesinde proje verileri daha kolay yönetilebilmekte ve BIM verilerinin sahaya aktarımı desteklenebilmektedir. Bu durum, uygulama sürecindeki koordinasyonun ve teknik üretim süreçlerinin daha verimli ilerlemesine yardımcı olmaktadır.

3.7. Kullanım ve Performans Takibi Sürecinde Kullanılan Yapay Zeka Araçları

Kullanım ve performans takibi sürecinde kullanılan Cove.tool, yapı performansı, enerji tüketimi ve çevresel verilerin değerlendirilmesine bu süreçte de katkı sağlamaktadır. Kullanım sonrası veri odaklı

analiz araçları sayesinde yapı performansı ve kullanıcı konforuna ilişkin veriler daha hızlı analiz edilebilmektedir.

3.8. Karşılaştırmalı Değerlendirme

İncelenen yapay zeka araçlarının mimari tasarım süreçlerinde farklı işlevlere sahip olduğu görülmektedir. Özellikle Midjourney, DALL·E 3 ve Stable Diffusion gibi araçlar kavramsal tasarım ve görselleştirme süreçlerinde öne çıkarken; Finch 3D, Maketopia ve Hypr gibi parametrik araçlar mekansal organizasyon ve planlama süreçlerinde kullanılmaktadır. Teknik proje geliştirme sürecinde ise Veras, ArkoAI ve Swapp gibi araçların görselleştirme, otomasyon ve teknik üretim süreçlerine katkı sağladığı görülmektedir. Genel olarak yapay zeka araçlarının erken tasarım aşamalarında daha yoğun kullanıldığı, teknik uygulama ve dokümantasyon süreçlerinde ise daha sınırlı kaldığı anlaşılmaktadır.

4. Sonuç

Bu çalışma, üretken yapay zeka araçlarının mimari tasarım süreçlerindeki rolünü RIBA Plan of Work modeli çerçevesinde incelemiştir. Literatür ve araç incelemelerine dayalı olarak oluşturulan karşılaştırmalı matris, farklı yapay zeka araçlarının tasarım sürecinin hangi aşamalarında ve hangi işlevlerle kullanıldığını sistematik biçimde ortaya koymuştur. Analiz sonuçları, üretken yapay zeka araçlarının özellikle kavramsal tasarım ve erken tasarım aşamalarında yoğunlaştığını göstermektedir. Difüzyon tabanlı görüntü üretim araçları hızlı görsel alternatifler üretmeyi mümkün kılarken, uzamsal planlama ve parametrik araçlar kütle ve plan organizasyonu süreçlerini desteklemektedir. Teknik tasarım aşamalarında ise yapay zeka araçlarının daha çok otomasyon, görselleştirme ve dokümantasyon üretimi gibi süreçlerde kullanıldığı görülmektedir.

Bununla birlikte bu araçlar mimari tasarım sürecini tamamen otomatikleştiren sistemler olarak görülmemelidir. Tasarım kararlarının değerlendirilmesi ve yönlendirilmesi hâlâ mimarın aktif rolünü gerektirmektedir. Bu bağlamda mimarın rolünün giderek tasarım alternatiflerini seçen ve yönlendiren bir küratör konumuna doğru evrildiği söylenebilir (Leach, 2025). Bu bağlamda üretken yapay zeka araçlarının hangi tasarım aşamalarında nasıl kullanılabileceğini ve hangi sınırlılıklara sahip olduğunu anlamak tasarım sürecinin etkin yönetimi açısından önem kazanmaktadır. Bu çalışma, üretken yapay zeka araçlarını mimari tasarım süreci bağlamında sistematik biçimde sınıflandıran bir analiz çerçevesi önermektedir. Sunulan çerçevenin, mimari tasarım süreçlerinde yapay zeka araçlarının daha bilinçli, eleştirel ve sistematik biçimde kullanılmasına katkı sağlayabileceği düşünülmektedir. Gelecek çalışmalarda önerilen çerçevenin mimarlık eğitimi stüdyolarında veya mimari ofislerde uygulanarak sınanması, araçların tasarım süreçlerine etkisinin daha somut biçimde değerlendirilmesine olanak sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Alves, J. L., Palha, R. P., & de Almeida Filho, A. T. (2025). Towards an integrative framework for BIM and artificial intelligence capabilities in smart architecture, engineering, construction, and operations projects. *Automation in Construction*, 174, 106168.
- Alamasi, R., Asfour, O. S., & Ashmeel, R. (2026). The impact of generative AI on architectural design education: insights from hands-on experience with architecture students. *Ain Shams Engineering Journal*, 17(1), 103879.
- ArkoAI. (2026). ArkoAI: AI-rendering plugins for CAD software. ArkoAI Official. Retrieved February 20, 2026, from <https://arko.ai>
- Autodesk. (2026). Autodesk Forma: AI-powered outcome-based design and planning. Autodesk Products. Retrieved February 20, 2026, from www.autodesk.com
- Cove.tool. (2026). Cove.tool: Automated building performance and energy analysis. Cove.tool Platform. Retrieved February 20, 2026, from <https://www.covetool.com>

- Crowson, K., Biderman, S., Kornis, D., Stander, D., Hallahan, E., Castricato, L., & Raff, E. (2022). Vqgan-clip: Open domain image generation and editing with natural language guidance. In European conference on computer vision (pp. 88-105). Cham: Springer Nature Switzerland.
- EvolveLab. (2026). Veras: Real-time AI visualization for BIM. EvolveLab Veras Portal. Retrieved February 20, 2026, from www.evovelab.io
- Finch 3D. (2026). Finch: Parametric and generative floor plan optimization. Finch 3D Official. Retrieved February 16, 2026, from <https://www.finch3d.com>
- Franco, J. T. (2019). Can a Machine Perform the Work of an Architect?. A Chat with Jesper Wallgren, Founder of Finch 3D. <https://www.archdaily.com/929300/can-a-machine-perform-the-work-of-an-architect-a-chat-with-jesper-wallgren-founder-at-finch-3d>
- Goodfellow, I. J., Pouget-Abadie, J., Mirza, M., Xu, B., Warde-Farley, D., Ozair, S., & Bengio, Y. (2014). Generative adversarial nets. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 27, 2672-2680.
- Ho, J., Jain, A., & Abbeel, P. (2020). Denoising diffusion probabilistic models. *Advances in neural information processing systems*, 33, 6840-6851.
- Hypar. (2026). Hypar: The cloud platform for generative building design. Hypar.io. Retrieved February 20, 2026, from <https://hypar.io>
- Jang, S., Roh, H., & Lee, G. (2025). Generative AI in architectural design: Application, data, and evaluation methods. *Automation in Construction*, 174, 106174.
- Ko, J., Ajibefun, J., & Yan, W. (2023). Experiments on generative AI-powered parametric modeling and BIM for architectural design. *arXiv preprint arXiv:2308.00227*.
- Landes, J. (2022). Spacemaker AI: Using AI in developing urban block variations. In *Artificial intelligence in urban planning and design* (pp. 263-291). Elsevier.
- Leach, N. (2025). *Architecture in the age of artificial intelligence: an introduction to AI for architects* (Second edition). Bloomsbury.
- LookX. (2026). LookX: AI-driven architecture and interior design platform. LookX AI. Retrieved February 20, 2026, from <https://www.lookx.ai>
- Maket. (2026). Maketopia: AI-powered residential space planning. Maket AI. Retrieved February 16, 2026, from <https://maket.ai>
- Midjourney. (2026). Midjourney: Generative AI for architectural visualization. Midjourney Official Website. Retrieved February 16, 2026, from <https://www.midjourney.com>
- OpenAI. (2026). DALL-E 3: High-fidelity image generation for design concepts. OpenAI Research. Retrieved February 16, 2026, from openai.com
- Paananen, V., Oppenlaender, J., & Visuri, A. (2024). Using text-to-image generation for architectural design ideation. *International Journal of Architectural Computing*, 22(3), 458–474.
- Pandey, A. A. (2025). A study on the awareness of artificial intelligence in architectural design. *IJSAT-International Journal on Science and Technology*, 16(2).
- RIBA. (2026). The RIBA Plan of Work (2020 Edition). Retrieved March 04, 2026, from <https://www.riba.org/media/syneeto/2020ribaplanofworkoverviewpdf.pdf>
- Stability AI. (2026). Stable Diffusion: Open-source generative models for architecture. Stability AI Platform. Retrieved February 16, 2026, from <https://stability.ai>
- Steinfeld, K. (2023). Clever little tricks: a socio-technical history of text-to-image generative models. *International Journal of Architectural Computing*, 21(2), 211-241.
- Swapp. (2026). Swapp: AI-driven architectural documents and automation. Swapp AI. Retrieved February 20, 2026, from <https://swapp.ai>
- Szalai, D., Károlyfi, K. A., Hajdu, Á., Hegedus, D., Tóth, O., & Horváth, T. (2023). Application of parametric design and artificial intelligence in energy analysis of buildings—A review. *Chemical Engineering Transactions*, 107, 19-24.
- TestFit. (2026). TestFit: Real estate feasibility and automated site planning. TestFit App. Retrieved February 16, 2026, from <https://www.testfit.io>

Kapsam Dışı Pedagojiler: Yapay Zekâ ve Mimarlık Eğitimi

Şeyma Karataş¹ ; Şölen Köseoğlu² 

^{1,2}Atatürk Üniversitesi

¹seyma.karatas25@ogr.atauni.edu.tr; ²solen.koseoglu@gmail.com

Özet

Teknolojinin mimarlık mesleği ve eğitimi üzerindeki dönüştürücü etkisi günümüzde önemli ve güncel bir tartışma konusu olarak öne çıkmaktadır. Bilgisayar kullanımının mimarlık pratiğindeki tarihsel konumlanışına benzer şekilde, yapay zekâ teknolojilerinin kullanımı konusunda da hem olumlu hem de olumsuz görüşler bulunmaktadır. Yapılan çalışmalar, öğrencilerin yapay zekâyı özellikle tasarım projelerinin görselleştirilmesi aşamasında süreci hızlandıran ve verimliliği artıran bir araç olarak değerlendirdiklerini göstermektedir. Buna karşın akademisyenlerin, yapay zekâ kullanımının etik boyutları ve eğitimin uzun vadeli kalıcılığı üzerindeki etkileri konusunda çeşitli çekincelere sahip oldukları görülmektedir. Bu doğrultuda, söz konusu bakış açılarının değerlendirilmesi amacıyla gerçekleştirilen bu çalışma, yapay zekânın mimarlık eğitimindeki rolünü kullanıcı deneyimleri üzerinden incelemeyi amaçlamaktadır. Araştırma kapsamında Atatürk Üniversitesi Mimarlık ve Tasarım Fakültesi'nde görev yapan 9 öğretim üyesi ve 15 öğrenci ile yarı yapılandırılmış mülakatlar gerçekleştirilmiş, elde edilen veriler MAXQDA yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Araştırma bulguları, yapay zekânın mimarlık disiplininde akademisyenler tarafından %67, öğrenciler tarafından ise %73,3 oranında yüksek düzeyde benimsendiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca katılımcıların en sık kullandıkları yapay zekâ araçlarının ChatGPT ve Gemini olduğu belirlenmiştir. Katılımcıların büyük çoğunluğu, akademisyenlerde %78 ve öğrencilerde %79 oranında, yapay zekânın eğitim müfredatına entegrasyonunu kaçınılmaz bir teknolojik gereklilik olarak değerlendirmekte ve bu süreci geçmişte bilgisayar kullanımına geçiş sırasında yaşanan dönüşümle ilişkilendirmektedir. Katılımcılar yapay zekâyı, tasarım süreçlerinde üretkenliği artıran ve iş akışlarını hızlandıran bir "asistan" veya "mentör" olarak konumlandırmaktadır. Nitekim akademisyenlerin %89'u yapay zekânın süreçleri hızlandırdığı görüşünü paylaşmaktadır. Bununla birlikte akademisyenlerin %44'ü, yapay zekânın aşırı kullanımının zihinsel tembelleğe yol açabileceği ve eleştirel düşünme becerilerini zayıflatılabileceği yönünde temkinli bir yaklaşım sergilemektedir. Mülakatlardan elde edilen bulgular doğrultusunda, yapay zekânın mimarlık eğitiminde tasarımın "beyni" olarak değil, üretim süreçlerini destekleyen güçlü bir araç olarak değerlendirilmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu nedenle yapay zekânın özellikle stüdyo ve teknik dersler kapsamında eğitim süreçlerine entegre edilmesi önerilmektedir. Araştırma sonuçları, elde edilen verilerin literatürde yer alan önceki çalışmaların bulgularıyla büyük ölçüde paralellik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte akademisyenlerin yapay zekâyı ilişkin değerlendirmelerinde, onu bir tasarım veya stüdyo aracı olarak kullanmaktan ziyade günlük yaşamı kolaylaştıran ve araştırma süreçlerini destekleyen yönlerine daha fazla vurgu yaptıkları görülmüştür. Sonuç olarak, yüzlerce yıllık geçmişe sahip mimarlık eğitiminin son birkaç yılda yapay zekâ kaynaklı önemli bir dönüşüm sürecinden geçtiği anlaşılmaktadır. Bu dönüşümün etkilerinin daha kapsamlı biçimde anlaşılabilmesi için alanda daha fazla araştırmaya ve deneyim paylaşımına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda çalışmanın, yapay zekânın mimarlık eğitimi müfredatına entegrasyon potansiyelini ele alan gelecekteki araştırmalara katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Mimarlık Eğitimi, Yapay Zekâ, Nitel Araştırma, MAXQDA.

Rethinking Pedagogies: Artificial Intelligence and Architectural Education

Şeyma Karataş ¹ ; Şölen Köseoğlu ² 

^{1,2}Atatürk University

¹seyma.karatas25@ogr.atauni.edu.tr; ²solen.koseoglu@gmail.com

Abstract

The transformative impact of technology on the architectural profession and architectural education has become a significant and contemporary topic of discussion. Similar to the historical integration of computers into architectural practice, the adoption of artificial intelligence (AI) technologies has generated both positive and negative perspectives. Previous studies indicate that students perceive AI primarily as a tool that accelerates visualization processes and improves efficiency in design projects. In contrast, academics often express concerns regarding the ethical implications of AI use and its potential effects on the long-term sustainability of learning outcomes. Accordingly, this study aims to examine the role of AI in architectural education through the experiences of its users. Semi-structured interviews were conducted with 9 faculty members and 15 students from the Faculty of Architecture and Design at Atatürk University, and the collected data were analyzed using MAXQDA software. The findings reveal a high level of AI adoption within the architectural discipline, with adoption rates of 67% among academics and 73.3% among students. ChatGPT and Gemini were identified as the most frequently used AI tools. Furthermore, a large majority of participants (78% of academics and 79% of students) consider the integration of AI into the curriculum an inevitable technological necessity, drawing parallels with the transition to computer-aided practices in the past. Participants generally position AI as an “assistant” or “mentor” that enhances productivity and accelerates design workflows. Indeed, 89% of academics agreed that AI contributes to more efficient processes. However, 44% of academics also expressed concerns that excessive reliance on AI could lead to intellectual passivity and weaken critical thinking skills. The interview findings suggest that AI should not be regarded as the “brain” of architectural design but rather as a powerful tool that supports and facilitates production processes. Therefore, its integration into studio-based and technical courses is recommended. The results are largely consistent with previous studies in the literature. However, academics tend to emphasize AI’s role in facilitating everyday tasks and research activities rather than its use as a direct design or studio tool. In conclusion, architectural education, with its centuries-long tradition, is currently undergoing a significant AI-driven transformation. Further research and the sharing of practical experiences are needed to better understand the implications of this change. The study is expected to contribute to ongoing discussions regarding the integration of AI into architectural education curricula and its potential to reshape future educational practices.

Keywords: Architectural Education, Artificial Intelligence, Qualitative Research, MAXQDA.

1. Giriş

Yapay zekânın mimarlık eğitimine sağlayabileceği katkılar, pek çok meslek alanında olduğu gibi günümüzde yoğun biçimde tartışılan konular arasında yer almaktadır. Akademik literatür incelendiğinde, farklı dergilerde bu konuya ilişkin yeni tartışmalar ve araştırma odaklı yayınların giderek arttığı görülmektedir. Bu çalışmalarda yapay zekâ; eş-yaratıcı bir ortak, kullanıcıya zaman kazandıran bir araç ve stüdyo kültürünün yeniden düşünülmesini teşvik eden bir katalizör olarak ele alınmaktadır. Söz konusu çalışmaların temel amacı, yapay zekânın mimarlık eğitiminde üstlenebileceği role ilişkin kuramsal çerçeveler geliştirmek ve bu teknolojinin potansiyel etkilerini ortaya koymaktır.

Mevcut çalışmalar çoğunlukla teorik düzeyde olanaklar ve olasılıklar üzerinde yoğunlaşsa da, günlük pratikte mimarlık eğitiminde yapay zekâ kullanımının sıklığı, yaygınlığı ve hangi yapay zekâ araçlarının tercih edildiği önemli bir merak konusu olarak öne çıkmaktadır. Bu noktadan hareketle, bu çalışmanın amacı Atatürk Üniversitesi Mimarlık ve Tasarım Fakültesi'nde görev yapan akademisyenler ile öğrenim gören öğrencilerin yapay zekâya ilişkin deneyimlerini incelemektir.

2. Yapay Zekâ ve Mimarlık Eğitimi

Literatürdeki çalışmalar, yapay zekânın mimarlık eğitime entegrasyonu konusunda çeşitli araştırmalar içermektedir. Yapay zekâ, geleneksel mimarlık eğitiminin bir parçası olmadığından, bu yeni konunun pedagojik yaklaşımlar ve tasarım süreçlerinde yarattığı dönüşüm önemli bir tartışma başlığı haline gelmiştir. Mevcut çalışmalarda araştırmacılar, makine öğrenmesi ve üretken yapay zekâ araçlarının tasarım süreçlerinde oynayabileceği rolü incelerken, aynı zamanda bu değişimlerin öğrencilerin yaratıcılığı, verimliliği ve öğrenme kalıcılığı gibi alanlardaki etkileri üzerinde de durmaktadır. Bunun yanı sıra, yapay zekâyı sürdürülebilir tasarım yaklaşımları ve dijital okuryazarlık gibi kavramlarla ilişkilendirerek değerlendiren çalışmalar da bulunmaktadır. Ancak bu olumlu yönlerinin yanında, yapay zekâ kullanımının etik sorunlar doğurabileceği ve eleştirel düşünme süreçlerini zayıflatabileceği yönünde bazı çekinceler de literatürde dile getirilmektedir, (Chandrasekera et al., 2025; Darko et al., 2020; Iranmanesh & Lotfabadi, 2025; Komatina et al., 2024; Kose & Gumusburun Ayalp, 2025; López-Chila et al., 2024; Mai et al., 2024; Stanimirovic et al., 2026; Topuz & Çakici Alp, 2023; Xu & Huang, 2024).

Mimarlık eğitiminde yapay zekâ kullanımı hakkındaki çalışmalar, öğrenciler ve akademisyenlerin bu teknolojiye karşı genel olarak hem olumlu hem de temkinli bir yaklaşım sergilediğini göstermektedir. Özellikle 2022 sonrasında yapay zekâ araçlarının yaygınlaşmasıyla birlikte bu konuda yapılan araştırmalar artmıştır. Bulgular, yapay zekânın tasarım sürecini hızlandırma, fikir geliştirmeyi destekleme ve görsel üretimi kolaylaştırma gibi avantajları nedeniyle öğrenciler tarafından olumlu karşılandığını ortaya koymaktadır, (Alcaraz et al., 2024; Alshahrani & Mostafa, 2025; Labib et al., 2025; Cao et al., 2023). Mısır ve Çin'de yapılan çalışmalar, öğrencilerin ChatGPT, Midjourney ve Stable Diffusion gibi araçları yaratıcılığı destekleyen yardımcı araçlar olarak gördüklerini, ancak insan tasarımcının yerini alamayacağını düşündüklerini göstermektedir, (Labib et al., 2025; Cao et al., 2023). Bununla birlikte öğrencilerin intihal, özgünlük, tasarımın aslında kime ait olduğu ve yapay zekâ kullanımının sınırları konusunda önemli kaygıları bulunmaktadır, (Cheung & Dall'Asta, 2024).

Akademisyenlerin görüşleri ise öğrencilere göre daha temkinlidir. Akademisyenler yapay zekânın eğitimde kullanılmasını tamamen reddetmemekle birlikte, etik sorunlar ve temel mesleki becerilerin zayıflaması gibi konulara daha fazla önem vermektedirler (Alshahrani & Mostafa, 2025; Çağlayan, 2025). Öğrenciler daha çok hız, görsel kalite ve farklı fikirler üretmeye odaklanırken, akademisyenler uzun vadeli sonuçları önemsemektedir (Thula, 2024). Araştırmalar, yapay zekânın en çok tasarımın ilk aşamalarında, fikir üretimi ve beyin fırtınası süreçlerinde kabul gördüğünü ortaya koymaktadır. Buna karşılık, nihai proje üretimi veya tasarımın tamamen yapay zekâ tarafından oluşturulması ihtimalleri konusunda olumsuz bir bakış açısı hâkimdir, (Iranmanesh & Lotfabadi, 2024). Ayrıca yapay zekâya

bakışta öğrencilerin kaçınıcı sınıfta oldukları da önemlidir; başlangıç seviyesindeki öğrenciler yapay zekâya daha olumlu yaklaşırken, ileri seviyedeki öğrenciler ve akademisyenler daha seçici davranmaktadır (Kee et al., 2024).

3. Materyal ve Yöntem

Bu araştırmada, bireylerin yapay zekâya yönelik deneyimlerini ve bu teknolojiye yükledikleri anlamları derinlemesine incelemek amacıyla nitel araştırma yöntemlerinden fenomenolojik desen kullanılmıştır. Araştırmanın çalışma grubunu, Atatürk Üniversitesi Mimarlık ve Tasarım Fakültesi bünyesinde görev yapan 9 akademisyen ile eğitimine devam eden 15 öğrenci oluşturmaktadır. Katılımcıların belirlenmesinde, yapay zekâ araçlarını deneyimleyen veya bu konuda fikir sahibi olan bireylere ulaşılması hedeflenmiştir. Bu doğrultuda 3. sınıf, 4. sınıf ve yüksek lisans düzeyinde öğrenim gören bazı öğrenciler ile birlikte akademisyenlerle görüşmeler gerçekleştirilmiştir.

Veri toplama sürecinde katılımcılarla derinlemesine mülakatlar yapılmış olup, görüşmeler yüz yüze gerçekleştirilmiş ve temel olarak üç ana soru etrafında şekillendirilmiştir. Bu sorular şu şekildedir:

1. Yapay zekâ ile ilişkiniz nedir? Hangi araçları, ne amaçla ve hangi sıklıkla kullanıyorsunuz?
2. Mimarlık eğitiminde yapay zekânın yeri ne olmalıdır? Müfredata entegre edilmeli midir ve bu süreçte ortaya çıkabilecek riskler nelerdir?
3. Yapay zekâ öğrenme biçimimizi ve üretkenliğimizi nasıl etkilemektedir? Bu teknoloji kullanıcıyı tembelleştiriyor mu, yoksa süreçleri hızlandıran bir araç mı sunmaktadır?

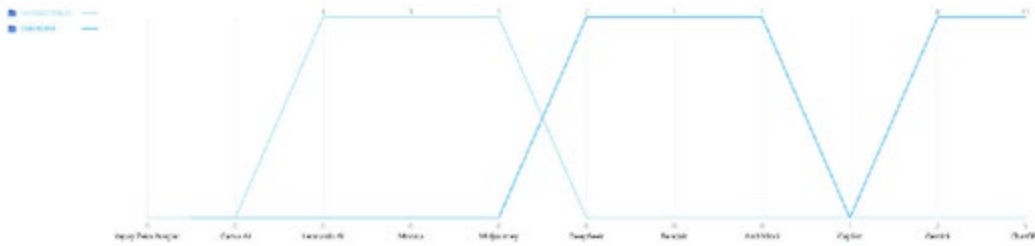
Mülakatlarda kaydedilen ses verileri öncelikle yapay zekâ destekli araçlar aracılığıyla metne dönüştürülmüş, ardından veri analiz yazılımı olan MAXQDA kullanılarak kodlanmıştır. Analiz sürecinde veriler öncelikle tematik olarak gruplandırılmış, ardından akademisyen ve öğrenci perspektiflerini karşılaştırmak amacıyla tematik haritalar ve çapraz tablolar oluşturulmuştur. Bu karşılaştırmalı analiz, yapay zekânın mimarlık eğitimindeki mevcut durumunu ve gelecekteki potansiyelini kullanıcı deneyimi odağında ortaya koymayı amaçlamaktadır.

4. Bulgular

Bu bölümde, Atatürk Üniversitesi Mimarlık ve Tasarım Fakültesi'nde görev yapan 9 öğretim üyesi ve eğitim gören 15 öğrenci ile yapılan görüşmelerden elde edilen veriler MAXQDA yazılımı ile analiz edilmiştir. Bulgular; yapay zekâ kullanım alışkanlıkları, eğitim müfredatına entegrasyonu ve üretkenlik üzerindeki etkileri üç ana alt başlıkta incelenmiştir. Araştırma etiği gereği ve katılımcı ifadelerinin anonimliğini sağlamak amacıyla, metin içerisinde yer alan doğrudan alıntılarda akademisyenler "A" (Örn: A1, A2), öğrenciler ise "Ö" (Örn: Ö1, Ö2) harfleri ile kodlanarak yazılmıştır.

4.1. Yapay Zekâ Kullanım Alışkanlıkları ve Araç Tercihleri

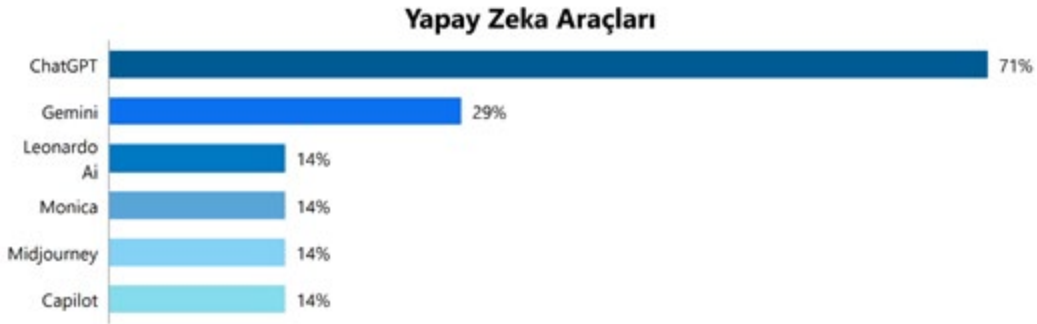
Yapılan analizlerde mimarlık disiplininde yapay zekâ kullanımının her iki grupta da oldukça yüksek olduğunu tespit edilmiştir. Katılımcıların yapay zekâ ile olan ilişkileri, araç tercihleri ve kullanım amaçları incelendiğinde iki grup arasında benzerlikler kadar belirgin farklılıklar da görülmektedir,(Şekil 1).



Şekil 1: Yapay Zeka Araçları Karşılaştırılma Profili

Elde edilen verilere göre, katılımcı akademisyenlerin %67'si yapay zekâ ile ilişkisinin yüksek olduğunu belirtmiştir. En çok tercih edilen araçlar ise %71 ile ChatGPT ve %29 ile Gemini olarak öne çıkmaktadır, (Şekil 2). Akademisyenler bu araçları daha çok metin düzeltme, akademik dilin iyileştirilmesi, yabancı dil çevirisi ve literatür taraması gibi süreçlerde bir "uzman asistan" olarak konumlandırmaktadır. Örneğin, A7 kodlu katılımcı, *"Daha çok uzun yazacağım metinleri toparlamak, akademik dile oturtmak, metin dilini iyileştirmek için kullanıyorum"* derken; A2 kodlu katılımcı çeviri ve gramer kontrolü süreçlerinde Copilot'u tercih ettiğini belirterek, *"Gramer hatalarını düzeltiyor ve çeviriyi daha kolay kontrol etmemizi sağlıyor"* ifadelerini kullanmıştır.

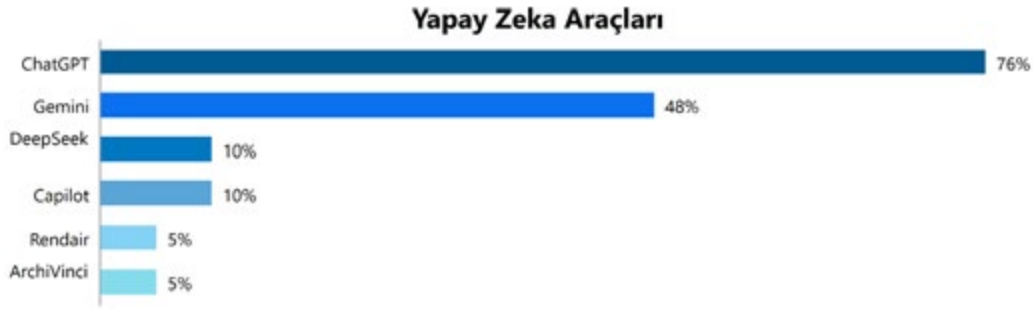
Metin tabanlı araçların yanı sıra, tasarım ve konsept üretimi için yapay zekâ kullanan akademisyenler de mevcuttur. A5 kodlu katılımcı, ChatGPT'nin yanı sıra Midjourney gibi görsel üretim araçlarını da kullandığını belirterek, *"Benim için bir ilham kaynağı oluyor diyebilirim... Eşimin mesleği de gereği aylık belki de 30 bin civarında yapay zekâ hizmetlerine ödeme yapıyoruz"* sözleriyle tasarımcıların bu araçlara ciddi bir kaynak ayırdığına dikkat çekmiştir. Akademik araştırmalar dışında, yapay zekâyı günlük profesyonel işleyişe dâhil eden A9 kodlu katılımcı ise durumu, *"Akademi tarafında ise, tercüme dâhil, sonuna kadar kullanıyoruz"* diyerek özetlemiştir.



Şekil 2: Akademisyenlerin Kullandıkları Yapay Zekâ Araçları

Öğrencilerde yapay zekâ kullanım oranı akademisyenlerden daha yüksek olup; %73,3'ü bu teknolojilerle yüksek bir ilişki içindedir. Tercih edilen araçlarda ChatGPT (%76) ve Gemini (%48) yine ön plandadır, (Şekil 3). Öğrenciler bu araçları genellikle karmaşık teknik bilgilere hızlı erişim sağlamak, literatür taramak ve tasarım süreçlerinde hız kazanmak için bir "pratik çözüm ortağı" olarak değerlendirmektedir. Ancak öğrenciler arasında bilginin doğruluğunu sorgulayan temkinli bir kitle de bulunmaktadır. Örneğin Ö1 kodlu katılımcı, ChatGPT'nin kaynak göstermemesini büyük bir dezavantaj olarak görerek güvenilirlik endişesiyle Copilot'a yöneldiğini şu sözlerle ifade etmiştir: *"ChatGPT'de araştırma yapmak istediğimde... Bana kaynak göstermediğini fark ettim. Ben de kaynağı olmayan bir şeyin doğruluğundan emin olamadığım için onu kullanmamaya karar verdim. Copilot bulamadığım, belki çok dipte köşede kalmış bir makaleyi bana bulup direkt linkini verebiliyor"*. Benzer şekilde, Ö11 kodlu öğrenci doğru 'prompt' (komut) yazımının önemini vurgulayarak, *"Sorduğumuz zaman %100 onu alıp projelerimizde veya çizimlerimizde uygulamamak lazım. Araştırıp tasdikleyip öyle kullanmak lazım... Soruyu düzelttiğiniz zaman doğru cevaplar vermeye başladı"* diyerek öğrenci grubundaki bilinçli kullanım çabasına işaret etmiştir.

Mimarlık öğrencileri metin tabanlı botlara ek olarak, özellikle tasarım ve görselleştirme (render) süreçlerinde zamandan tasarruf etmek için ArchiVinci ve Render AI gibi mesleğe özel araçları aktif olarak kullanmaktadır. Ö9 kodlu öğrenci bu durumu, *"ArchiVinci ve Render AI uygulamalarını render almak için kullanıyorum, daha çok hız kazanmak için... Süreden çok fazla tasarruf sağlıyorum"* sözleriyle ifade etmiştir. Aynı öğrenci yapay zekâyı sadece teknik bir araç olarak değil, duygusal süreçlerde bir "danışman" veya "terapist" gibi de kullandığını belirterek, öğrencilerin bu teknolojiyle kurduğu bağın çok boyutlu yapısını gözler önüne sermiştir.



Şekil 3: Öğrencilerin Kullandıkları Yapay Zekâ Araçları

4.2. Yapay Zekânın Mimarlık Eğitimine Entegrasyonu ve Olası Riskler

Mülakatlardan elde edilen veriler, yapay zekânın mimarlık eğitime entegrasyonu konusunda her iki grupta da güçlü bir kabul olduğunu ortaya koymaktadır. Akademisyenlerin %78'i yapay zekânın müfredata tam entegrasyonunu savunurken, %22'si ise sınırlı bir entegrasyonu desteklemektedir. Benzer şekilde, öğrencilerin %79'u tam entegrasyonu desteklerken, %21'i sınırlı entegrasyonu tercih etmekte ve yalnızca bir öğrenci (%7) entegrasyona karşı çıkmaktadır. Katılımcıların büyük bir kısmı, yapay zekâyı direnmeyi geçmişte bilgisayar destekli tasarıma geçişte yaşanan süreçle eşdeğer görmektedir, (Şekil 4).

Akademisyenler, yapay zekânın eğitime dâhil edilmesini kaçınılmaz bir gereklilik olarak değerlendirmektedir. Bu durumu geçmişteki teknolojik dönüşümlerle kıyaslayan A5 kodlu katılımcı, *"Zamanında bilgisayarlar eğitimimize girdiğinde, hocalarımız 'Niye bilgisayarda çiziyorsunuz?' diyorlardı. Oysa şu an bilgisayarı tamamen normalleştirdik. Şu an yapay zekâyı da benzer şekilde bakıyoruz"* diyerek entegrasyonun doğal bir süreç olduğuna dikkat çekmiştir. Benzer bir şekilde A1 kodlu katılımcı bu zorunluluğu, *"Bu teknolojiden uzak durmak, 'atla gidelim, arabayla gitmeyelim' demek gibi. Bundan kaçamazsınız"* sözleriyle ifade etmiştir. Akademisyenler, yapay zekânın form gelişimi, kütsel kararlar ve görselleştirme süreçlerinde stüdyo derslerinin bir parçası olması gerektiğini belirtmektedir. Ancak akademisyenler, bu entegrasyonun kontrolsüz yapılması durumunda oluşabilecek pedagojik risklere de dikkat çekmektedir. Mimari tasarımın çok boyutlu yapısına vurgu yapan A3 kodlu katılımcı, yapay zekânın fiziksel çevre, tarihsel bağlam, sosyal ve kültürel yapı gibi parametreleri göz ardı ederek sadece *"görsel bir şölen yaratma derdinde"* olduğunu ve bağlantısal düşünemediğini belirtmiştir. Temel tasarım becerilerinin körelmemesi gerektiğine inanan A7 kodlu katılımcı ise durumu bir "ehliyet" metaforuyla açıklayarak, *"Önce temel teorik ve uygulamalı bilgiyi mutlaka kendisi öğrenmeli. Bir tür ehliyet gibi düşünebilirsiniz: Temeli aldıktan sonra yapay zekâyı buna ekleyebilir. Birinci sınıftan itibaren yapay zekâyı sınırsız şekilde dâhil etmek riskli. Altı boş kalır; tasarım onun olmaz"* ifadeleriyle sınırlı ve bilinçli bir entegrasyonun önemini vurgulamıştır.

Öğrenci perspektifinden bakıldığında, entegrasyon fikri pratik çözümler ve sektördeki rekabet avantajı üzerinden şekillenmektedir. Öğrenciler, zaman tasarrufu sağlaması nedeniyle özellikle bilgisayar destekli tasarım ve stüdyo derslerinde yapay zekânın aktif olarak öğretilmesi gerektiğini düşünmektedir. Ö9 kodlu katılımcı bu ihtiyacı, *"Eskiden uzun uzun modelleme yapıyorduk... ArchiVinci gibi uygulamalar öğretilseydi daha hızlı render alabilirdik ve bilgisayarlarımız daha az yorulurdu"* diyerek açıklamıştır. Yapay zekâyı mesleki pratiğe dâhil eden Ö11 kodlu öğrenci ise, *"Özellikle Proje 5 dersinde sık sık kullanıyorum. Mobilya ölçüleri, kolon, giriş, duvar kalınlıkları gibi detayları araştırmak ve konuma göre optimize etmek için faydalı"* diyerek teknolojiyi bir tehdit değil, doğrudan bir araç olarak konumlandığını göstermiştir. Geleneksel yöntemlerin (örneğin maket yapımının) yapay zekâ ve 3D yazıcılar çağında zaman kaybı olabileceğini düşünen öğrenciler de mevcuttur (Ö13). Tüm bu olumlu yaklaşımlara rağmen öğrenciler arasında da mesleki kimlik ve özgünlük konusunda endişeler bulunmaktadır. Araştırmaya katılan ve entegrasyona karşı çıkan tek öğrenci olan Ö6, *"Artık hepsini"*

kendi yapay zekâ yapıyor zaten. Mimarlara gerek kalmadığı bir dönem” sözleriyle teknolojik işsizlik kaygısını dile getirmiştir. Stüdyo derslerindeki hazırcılık riskine değinen Ö7 kodlu katılımcı ise, “Düşünmüyoruz. Oraya yazıyorum, bir çıktıyı alıyorum oradan... Şimdi güzel oluyor mu oluyor ama ben hiç uğraşmıyorum gibiyim” diyerek akademisyenlerin bahsettiği "tasarımın altının boş kalması" riskini bizzat kendi deneyimi üzerinden doğrulamıştır.

Bu bulgular, yapay zekânın mimarlık eğitime entegrasyonunun bir tercih olmaktan çıkarak gerekliliğe dönüştüğünü; ancak bu sürecin öğrencilerin temel tasarım melekelerini, bağlamsal ve eleştirel düşünme yetilerini köreltmeyecek bir pedagojik çerçevede (örneğin doğru prompt yazımı ve yapay zekâ okuryazarlığı dersleriyle) tasarlanması gerektiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4: Yapay Zekânın Mimarlık Eğitime Entegre Edilmesi

4.3. Yapay Zekânın Öğrenme Biçimleri ve Üretkenlik Üzerindeki Etkisi

Araştırmamızın üçüncü aşamasında katılımcılara yapay zekânın öğrenme biçimleri ve üretkenlik üzerindeki etkileri sorulmuş; teknolojinin süreçleri hızlandıran bir araç mı yoksa zihinsel tembelleşmeye yol açan bir unsur mu olduğu tartışmaya açılmıştır. Elde edilen veriler incelendiğinde, akademisyenlerin %89'u gibi oldukça yüksek bir oranının yapay zekânın süreçleri hızlandırdığını savunduğu, %44'ünün kullanım biçimine göre değişkenlik gösterdiğini, diğer bir %44'ünün ise yapay zekânın öğrenme biçimini tembelleştirdiğini ifade ettiği görülmektedir. Öğrencilerde ise %67 oranında hızlandırma etkisi öne çıkarken, %47'si etkinin kullanıma bağlı olduğunu belirtmiş ve yalnızca %20'si yapay zekânın tembelleştirici bir etkisi olduğunu savunmuştur.

Çalışmaya katılan akademisyenlerin büyük bir çoğunluğu yapay zekânın bir "zaman kazandırıcı" olduğu konusunda hemfikir. Yapay zekâyı teknolojik bir evrimin doğal bir parçası olarak gören A1 kodlu katılımcı, tembelleşme eleştirilerine karşı çıkarak durumu şu çarpıcı metaforla özetlemiştir: *“Yapay zekâ tembelleştiriyor” ifadesi bence doğru değildir. Bu, hayatı kolaylaştıran bir çözümdür. Asansör varken neden 10 kat merdiven yürüyüp gidesiniz? Hele bir de yükünüz varsa düşünün. Bu tembelleştirmek değil, sadece mantıklı bir tercihtir.* Benzer şekilde A5 kodlu katılımcı, yapay zekânın fikir üretiminde bir katalizör olduğunu belirterek, *“Akademik çalışmada sıkıştığınızda yöntem öneriyor. Tıpkı zeki bir arkadaşınla sohbet edip, onun seni kurtardığını hissetmek gibi”* ifadelerini kullanmıştır.

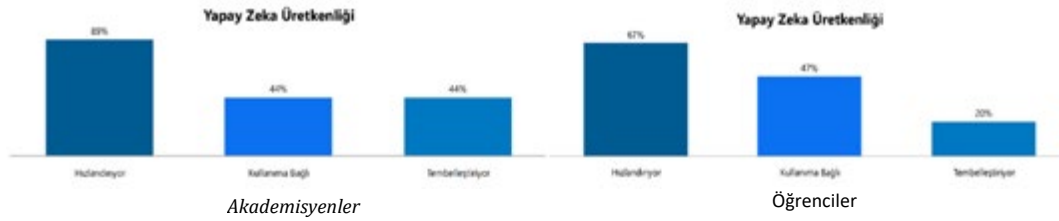
Buna karşın, yapay zekânın bilişsel süreçlere zarar verebileceği konusunda ciddi uyarılar da mevcuttur. Teknolojinin kontrolsüz kullanımının zihinsel çabayı ortadan kaldırdığına dikkat çeken A3 kodlu katılımcı, *“Açıkçası, ben yapay zekânın bizi tembelleştirme riskinin daha ağır bastığını düşünüyorum. ... Artık birçok şey, emek harcamadan, zihin yormadan yapay zekâyı yaptırılma eğiliminde. Bu durumun, zihnimizi yavaşlatacağını düşünüyorum”* sözleriyle endişesini dile getirmiştir. Bu noktada akademisyenleri ortak paydada buluşturan temel faktör "bilinçli kullanım" olmuştur. Nitekim A4 kodlu katılımcı bu durumu, *“Yapay zekâyı etkin kullanmak için sizin alt yapınızın sağlam olması gerekiyor... Yapay zekâyı bilinçli kullanan için bilgiyi derinleştiriyor; yüzeysel kullanan için ise tembelleştiriyor”* diyerek özetlemiştir.

Öğrenciler cephesinde yapay zekâ, "amelelik" olarak tanımlanan angarya işleri ortadan kaldırarak ve esas tasarıma odaklanmayı sağlayan bir kolaylaştırıcı olarak görülmektedir. Ö7 kodlu öğrenci bu

durumu, “Öğrenmek isteyen öğrenir. Ameleliği kaldırıyor ortadan. Açıp makalelerin üstünü okumuyoruz. Onun bütün interneti taradığı için bize çok iyi yardımcı dokunduğunu düşünüyorum” şeklinde ifade etmiştir. Ö12 kodlu katılımcı ise yapay zekânın kendisine sağladığı filtreleme yeteneğini vurgulayarak, “Normalde birçok kaynağa çok fazla bakmam gerekirken, şimdi yapay zekâdan aldığım bilgiyi alıp kendim düşünüyorum. ... Yapay zekâ bence mükemmel” demiştir.

Ancak öğrenciler arasında da bu teknolojinin iletişim ve yaratıcılık üzerindeki olumsuz etkilerini ifade edenler de bulunmaktadır. Stüdyo kültürünün zayıfladığını hisseden Ö3 kodlu katılımcı, “Tasarım konusunda bizim düşünce kabiliyetimizin azaldığını düşünüyorum. ... Arkadaşlarıma sormak yerine hemen Chat GPT'ye soruyorum. ... Kendi hayal gücümü kısıtlamış gibi hissediyorum” diyerek hazır bilgiye anında ulaşmanın getirdiği handikabı dile getirmiştir. Bu riskin aşılması için mimarlık öğrencilerinin insan zihnini daima "merkezde" tutması gerektiği vurgulanmıştır. Yüksek lisans öğrencisi olan Ö1, üretkenliği artıran doğru çalışma modelini şu sözlerle formüle etmiştir: “Her şeyi yapay zekâdan beklemek bence insanı tembelleştirebilir. ... Sonuçta ondan baştan bana bir vaziyet planı çiz demiyorum. Yine beyin benim ama o bana boyamada ya da görselleştirmede yardımcı olabilir ve bu beni hızlandırır”.

Bulgular genel olarak değerlendirildiğinde, yapay zekânın mimarlık eğitimindeki etkisinin teknolojinin kendisinden ziyade, kullanıcının niyetine, altyapısına ve etik yaklaşımına bağlı olduğu ortaya çıkmaktadır (Şekil 5).



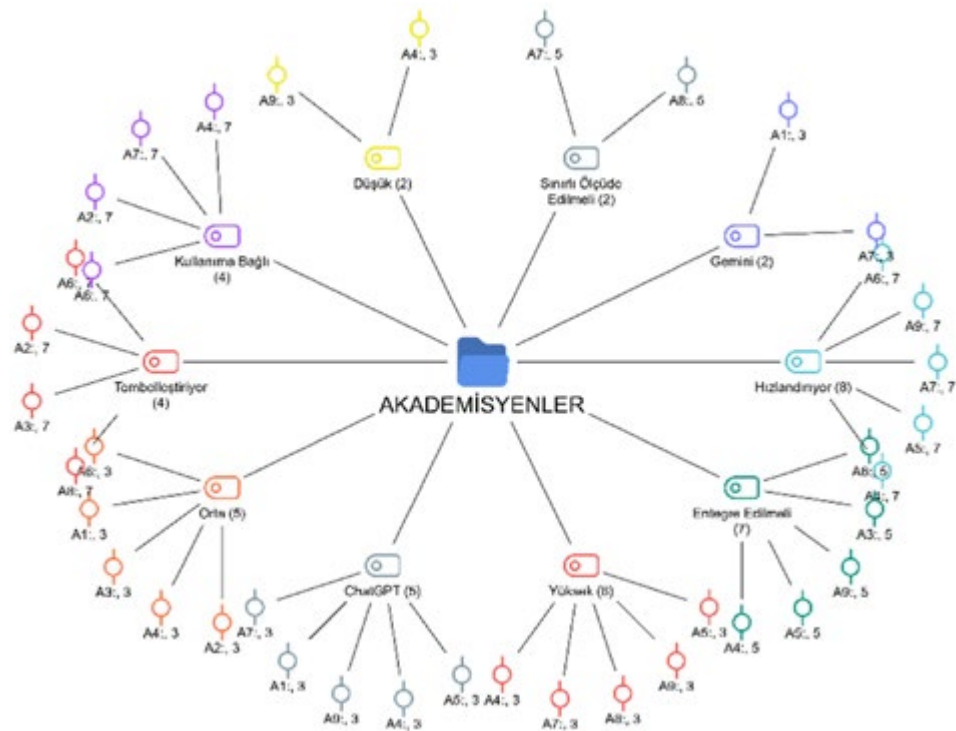
Şekil 5: Yapay Zekânın Öğrenme ve Üretkenliğe Etkisi

5. Sonuç ve Öneriler

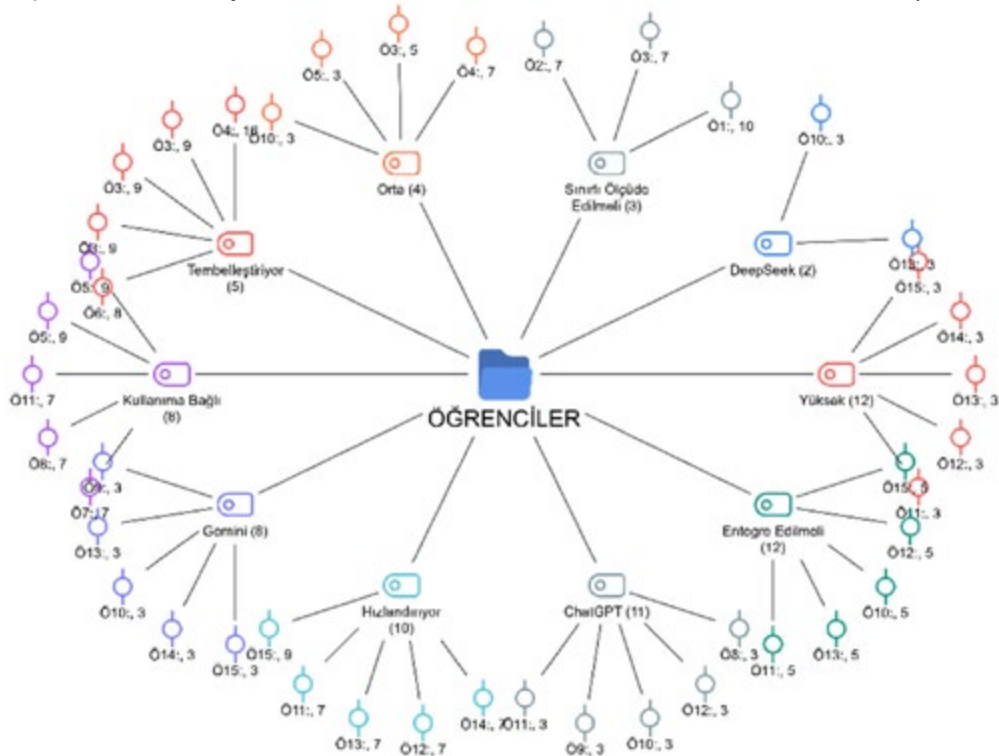
Araştırma sonuçları, Atatürk Üniversitesi Mimarlık ve Tasarım Fakültesi akademisyenleri ve öğrencileri arasında yapay zekâ kullanımının her iki grupta da oldukça yüksek olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, yapay zekânın tamamen güvenli ve faydalı olduğuna dair bazı şüphelerin de bulunduğu görülmektedir. Bulgular, öğrenciler ve akademisyenler arasında kullanım yoğunluğu, amaç ve algı farklılıkları olmakla birlikte her iki grubun da yapay zekâyı büyük ölçüde üretkenliği artıran ve süreçleri hızlandıran bir araç olarak kullandığı anlaşılmaktadır. Çalışmanın önemli bulgularından biri, literatürde mimarlık öğrencileri tarafından sıklıkla kullanıldığı belirtilen Midjourney gibi araçların öğrenciler tarafından hiç dile getirilmezken yalnızca bir akademisyen tarafından ifade edilmiş olmasıdır. Buna karşın akademisyenlerin yapay zekâyı ilişkin değerlendirmelerinde, onu bir tasarım veya stüdyo aracı olarak kullanmaktan ziyade günlük yaşamı kolaylaştıran ve araştırma süreçlerini destekleyen yönlerine daha fazla vurgu yaptıkları görülmüştür. Bu durum kayda değer bir eksikliğe işaret etmektedir. Bu durum dışında, genel olarak bakıldığında, araştırma sonuçları, elde edilen verilerin literatürde yer alan önceki çalışmaların bulgularıyla büyük ölçüde paralellik gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, yüzlerce yıllık geçmişe sahip mimarlık eğitiminin son birkaç yılda yapay zekâ kaynaklı önemli bir dönüşüm sürecinden geçtiği anlaşılmaktadır. Bu dönüşümün etkilerinin daha kapsamlı biçimde anlaşılabilmesi için alanda daha fazla araştırmaya ve deneyim paylaşımına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu doğrultuda, mimarlık eğitiminde yapay zekânın etkili ve sürdürülebilir bir şekilde kullanılabilmesi için müfredatlara “yapay zekâ okuryazarlığı”, “etik kullanım ilkeleri” ve “prompt tasarımı” gibi içeriklerin entegre edilmesi önerilmektedir. Özellikle stüdyo derslerinde yapay zekâ kullanımına yönelik kademeli ve kontrollü bir eğitim modeli geliştirilmelidir. Akademisyenlerin ise bu

süreçte rehberlik rolünü güçlendirerek teknolojiyi yasaklayan değil, yönlendiren bir pedagojik yaklaşım benimsemesi önerilmektedir.



Şekil 6: Analiz Sonuçları - Sık Kullanılan Kodlarla Hazırlanan Tek Vaka Modeli, Akademisyenler



Şekil 7: Analiz Sonuçları - Sık Kullanılan Kodlarla Hazırlanan Tek Vaka Modeli, Akademisyenler

KAYNAKLAR

- Alshahrani A., and Mostafa A. M. (2025) Enhancing the use of artificial intelligence in architectural education – case study Saudi Arabia. *Frontiers in Built Environment*. Volume 11 - 2025. doi: 10.3389/fbuil.2025.1610709
- Alcaraz, C. J. S., Diocena, L. Z., Dizon, J. M. L., Lascano, R. J. B., Mawac, T. I. M., Uy, M. D. C., Verendia, S. M. S., & Vallespin, M. R. D. (2024). *Envisioning the future: A quantitative analysis of architecture students' perspectives on artificial intelligence integration in architectural design across Region III, IV-A, and NCR, Philippines*. *International Journal of Current Science Research and Review*, 7(5), 2513–2525.
- Cao, Y., Aziz, A. A., & Arshard, W. N. R. M. (2023). University students' perspectives on Artificial Intelligence: A survey of attitudes and awareness among Interior Architecture students. *IJERI: International Journal of Educational Research and Innovation*, (20), 1–21. <https://doi.org/10.46661/ijeri.8429>
- Chandrasekera, T., Hosseini, Z., Perera, U., & Bazhaw Hyscher, A. (2025). Generative artificial intelligence tools for diverse learning styles in design education. *International Journal of Architectural Computing*, 23(2), 358–369. <https://doi.org/10.1177/14780771241287345>
- Cheung, L. H., & Dall'Asta, J. C. (2024). Human-computer interaction (HCI) approach to artificial intelligence in education (AIED) in architectural design. *ÉDOS Revista Científica de Arquitectura y Urbanismo*, 17(23), 109–131. <https://doi.org/10.29019/eidos.v17i23.1282>
- Çağlayan, M. (2025). *Artificial intelligence in architectural education: Rethinking creativity, ethics, and pedagogy in the digital age*. Mitteilungen Klosterneuburg. <https://doi.org/10.61586/mFCqf>
- Darko, A., Chan, A. P. C., Adabre, M. A., Edwards, D. J., Hosseini, M. R., & Ameyaw, E. E. (2020). Artificial intelligence in the AEC industry: Scientometric analysis and visualization of research activities. *Automation in Construction*, 112, 103081. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103081>
- Iranmanesh, A., & Lotfabadi, P. (2025). Critical questions on the emergence of text-to-image artificial intelligence in architectural design pedagogy. *AI & Society*, 40, 3557–3571. <https://doi.org/10.1007/s00146-024-02111-x>
- Kee, T., Kuys, B., & King, R. (2024). Generative artificial intelligence to enhance architecture education to develop digital literacy and holistic competency. *Journal of Artificial Intelligence in Architecture*, 3(1). <https://doi.org/10.24002/jarina.v3i1.8347>
- Komatina, D., Miletic, M., & Mosurović Ružičić, M. (2024). Embracing artificial intelligence (AI) in architectural education: A step towards sustainable practice? *Buildings*, 14(8), 2578. <https://doi.org/10.3390/buildings14082578>
- Kose, I., & Gumusburun Ayalp, G. (2025). Transformative impacts of technological developments on architectural education: A holistic scientometric analysis. *Engineering, Construction and Architectural Management*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1108/ECAM-07-2024-0879>
- Labib, W., Abdelsattar, A., Abowardah, E., Abdelalim, M., & Mahmoud, H. (2025). The Role of Generative AI in Architecture Education from Students' Perspectives—A Cross-Sectional Descriptive and Correlational Study. *Sustainability*, 17(22), 10029. <https://doi.org/10.3390/su172210029>
- López-Chila, R., Llerena-Izquierdo, J., Sumba-Nacipucha, N., & Cueva-Estrada, J. (2024). Artificial intelligence in higher education: An analysis of existing bibliometrics. *Education Sciences*, 14(1), 47. <https://doi.org/10.3390/educsci14010047>
- Mai, T. G., Nguyen, M., Ghobakhlou, A., Yan, W. Q., Chhun, B., & Nguyen, H. (2024). Decoding a decade: The evolution of artificial intelligence in security, communication, and maintenance within the construction industry. *Automation in Construction*, 165, 105522. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105522>
- Stanimirovic, M., Momcilovic Petronijevic, A., Stojkovic, B., Kondic, S., & Nikolic, B. (2026). AI sparring in conceptual architectural design: A systematic review of generative AI as a pedagogical partner (2015–2025). *Buildings*, 16(3), 488. <https://doi.org/10.3390/buildings16030488>
- Thula, M. (2024). *Pedagogical Strategies for Architecture against Artificial Intelligence (AI)*. Proceedings of the International Conference of Contemporary Affairs in Architecture and Urbanism-ICCAUA, 7(1), 248–260. <https://doi.org/10.38027/ICCAUA2024IN0301>
- Topuz, B., & Çakici Alp, N. (2023). Machine learning in architecture. *Automation in Construction*, 154, 105012. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105012>
- Xu, C., & Huang, Y. (2024). Technological innovation in architectural design education: Empirical analysis and future directions of Midjourney intelligent drawing software. *Buildings*, 14(10), 3288. <https://doi.org/10.3390/buildings14103288>

MSTAS 26 “KAPSAM DIŞI”

XX. MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM ULUSAL SEMPOZYUMU

OTURUM 5

HESAPLAMALI ve ÜRETKEN TASARIM YAKLAŞIMLARI

Hesaplamalı Materyallikte Haptik Biliş: Rasyonel Ve Stokastik Dokuların Nöro-Üretken Tasarım Bağlamında Analizi

İlker Erkan¹ ; Seda Şimşek² 

^{1,2}Süleyman Demirel Üniversitesi

¹ilkererkan@sdu.edu.tr ; ²sedatolaci@sdu.edu.tr

Özet

Hesaplamalı tasarım teknolojilerindeki gelişmeler, mimarlıkta karmaşık geometrilerin ve parametrik yüzeylerin üretilmesini mümkün kılmıştır. Ancak mevcut literatür, algoritmik olarak üretilen yüzeyleri büyük ölçüde görsel ve biçimsel özellikleri üzerinden değerlendirmekte; bu yüzeylerin kullanıcıların bilişsel ve fizyolojik süreçleri üzerindeki dokusal etkileri yeterince araştırılmamaktadır. Bu çalışma, hesaplamalı olarak üretilmiş rasyonel ve stokastik mimari dokuların haptik deneyim sırasında oluşturduğu nörofizyolojik tepkileri incelemeyi amaçlamaktadır. Araştırma, parametrik modelleme, dijital fabrikasyon ve nörofizyolojik ölçümlerin entegre edildiği deneysel bir tasarıma dayanmaktadır. Çalışma kapsamında Grasshopper ve Python tabanlı algoritmalar kullanılarak iki farklı yüzey tipi geliştirilmiştir: matematiksel olarak öngörülebilir ve düzenli örüntüler içeren rasyonel doku ile Voronoi ve gürültü algoritmaları kullanılarak oluşturulan stokastik doku. Yüzeyler yüksek çözünürlüklü üç boyutlu baskı teknolojileriyle fiziksel prototiplere dönüştürülmüştür. Deneylere katılan 30 gönüllü birey, gözleri kapalı şekilde her iki yüzeyi dokusal olarak keşfetmiş; bu süreçte elektroensefalografi (EEG) ve elektrodermal aktivite (EDA) verileri kaydedilmiştir. Bulgular, stokastik dokuların rasyonel dokulara kıyasla anlamlı düzeyde daha yüksek beta aktivitesi, daha yüksek deri iletkenliği ve daha fazla elektrodermal tepki oluşturduğunu göstermiştir. Buna karşılık rasyonel dokular daha yüksek alfa aktivitesi ile ilişkilendirilmiş; bu örüntü, rasyonel yüzeylerin stokastik yüzeylere kıyasla daha düşük nörofizyolojik uyarılma oluşturduğuna işaret etmiştir. Ayrıca katılımcıların stokastik yüzeyleri anlamlı düzeyde daha uzun süre inceledikleri belirlenmiştir. Çok değişkenli analizler ve korelasyon sonuçları, yüzey karmaşıklığı arttıkça bilişsel yük, fizyolojik uyarılma ve keşif davranışının da arttığını ortaya koymuştur. Geliştirilen Nöro-Haptik Tepki İndeksi (NHRI) ve mediyasyon analizi sonuçları, yüzey karmaşıklığının keşif davranışı üzerindeki etkisinin kısmen bilişsel yük aracılığıyla gerçekleştiğini göstermiştir. Sonuç olarak çalışma, algoritmik yüzeylerin yalnızca estetik veya biçimsel tasarım öğeleri olmadığını; kullanıcıların bilişsel süreçlerini ve fizyolojik tepkilerini etkileyebilen nöro-üretken çevresel arayüzler olarak değerlendirilebileceğini ortaya koymaktadır. Bulgular, gelecekteki parametrik tasarım yaklaşımlarında nörofizyolojik performans göstergelerinin yeni tasarım parametreleri olarak kullanılabileceğine işaret etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Nöromimari, Haptik Algı, Kognitif Yük, Stokastik Algoritmalar, Dijital Fabrikasyon.

Haptic Cognition in Computational Materiality: An Analysis of Rational and Stochastic Textures within the Context of Neuro-Generative Design

İlker Erkan¹ ; Seda Şimşek² 

^{1,2}Süleyman Demirel University

¹ilkererkan@sdu.edu.tr ; ²sedatolaci@sdu.edu.tr

Abstract

Recent advances in computational design technologies have enabled the generation of increasingly complex geometries and parametric surfaces in architecture. However, existing research has predominantly evaluated algorithmically generated surfaces through their visual and formal characteristics, while their tactile effects on human cognitive and physiological processes remain largely unexplored. This study investigates the neurophysiological responses elicited by haptic interactions with computationally generated rational and stochastic architectural textures. An experimental framework integrating parametric modeling, digital fabrication, and neurophysiological measurements was developed. Two distinct surface typologies were generated using Grasshopper and Python-based algorithms: a rational texture characterized by mathematically predictable and periodic geometries, and a stochastic texture produced through Voronoi-based cellular organizations, Gaussian deformations, and algorithmic noise functions. The surfaces were fabricated as high-resolution three-dimensional prototypes and evaluated through controlled haptic exploration tasks. Thirty adult participants explored both surfaces under blindfolded conditions while electroencephalography (EEG) and electrodermal activity (EDA) data were recorded. The results revealed significant differences between the two surface conditions. Stochastic textures produced significantly higher beta-band activity, increased skin conductance levels, and greater electrodermal responses compared with rational textures. In contrast, rational textures were associated with higher alpha-band activity, indicating lower cognitive load and reduced physiological arousal. Participants also spent significantly longer exploring stochastic surfaces, suggesting increased attentional engagement and exploratory behavior. Multivariate analyses demonstrated that surface geometry significantly influenced neurophysiological response patterns. Furthermore, a composite Neuro-Haptic Response Index (NHRI) was developed to integrate EEG and EDA indicators into a unified measure of cognitive and physiological activation. Mediation analyses indicated that the effect of surface complexity on exploration behavior was partially mediated by cognitive processing demands. The findings suggest that computational architectural surfaces should not be understood solely as aesthetic or formal design artifacts but also as neuro-generative environmental interfaces capable of influencing human cognition and physiological responses. The study contributes to the emerging intersection of computational design, neuroarchitecture, and environmental psychology by proposing a neuro-haptic perspective on architectural materiality. The results further indicate that neurophysiological performance indicators may serve as novel design parameters in future human-centered computational design processes.

Keywords: Neuroarchitecture, Haptic Perception, Computational Design, Cognitive Load, Stochastic Algorithms, Digital Fabrication.

1. Giriş

Son otuz yılda hesaplamalı tasarım araçlarının gelişmesi, mimarlık disiplininde karmaşık geometrilerin, parametrik sistemlerin ve geleneksel üretim yöntemleriyle gerçekleştirilmesi güç olan biçimsel organizasyonların tasarlanmasını mümkün kılmıştır. Özellikle parametrik modelleme, algoritmik tasarım ve dijital fabrikasyon teknolojileri, mimari form üretim süreçlerinde yeni tasarım paradigmalarının ortaya çıkmasına katkı sağlamıştır. Bununla birlikte, hesaplamalı tasarım literatüründe algoritmik karmaşıklık çoğunlukla görsel ve biçimsel performans üzerinden değerlendirilmekte (Caetano & Leitão, 2020; Yu vd., 2021); üretilen yüzeylerin kullanıcı deneyimi üzerindeki bilişsel ve duyuşsal etkileri görece sınırlı düzeyde araştırılmaktadır.

Mimari deneyim yalnızca görsel algıya dayalı bir süreç değildir. Mekânın ve materyalin insan bedeniyle kurduğu ilişki; dokunma, hareket, propriosepsiyon ve çoklu duyuşsal etkileşimler aracılığıyla şekillenmektedir. Bu nedenle son yıllarda mimarlık kuramı ve çevresel psikoloji literatüründe, görme merkezli yaklaşımların ötesine geçen bedenlenmiş deneyim (embodied experience) ve haptik algı kavramları giderek daha fazla önem kazanmaktadır (Peri Bader, 2015; Lee, 2022; Shields, 2023). Pallasmaa (2024), mimari deneyimin yalnızca göz aracılığıyla değil, tüm duyuşsal sistemlerin eş zamanlı katılımıyla oluştuğunu vurgulayarak, yüzeylerin dokunsal özelliklerinin mekânsal deneyimin temel bileşenlerinden biri olduğunu ileri sürmektedir.

Buna paralel olarak nöromimarlık alanlarında gerçekleştirilen çalışmalar, fiziksel çevrenin insan beynindeki bilişsel ve duyuşsal süreçlerle yakından ilişkili olduğunu göstermektedir (Ritchie, 2020; Wang vd., 2022;). Güncel yaklaşımlar, mekânları yalnızca fiziksel kabuklar olarak değil, bireyin dikkat düzeyini, bilişsel yükünü, duyuşsal durumunu ve fizyolojik tepkilerini etkileyebilen dinamik çevresel sistemler olarak ele almaktadır (De Matteis, 2020). Ancak mevcut çalışmaların büyük çoğunluğu mekânsal deneyimin görsel boyutuna odaklanmakta; hesaplamalı olarak üretilmiş yüzeylerin dokunsal özelliklerinin nörofizyolojik etkileri büyük ölçüde araştırılmamış bir alan olarak kalmaktadır.

Özellikle algoritmik tasarım süreçlerinde üretilen yüzeyler, geometrik düzenlilik ve öngörülebilirlik açısından önemli farklılıklar gösterebilmektedir. Matematiksel olarak tanımlanabilen periyodik ve düzenli yüzeyler belirli örüntüler içerirken, stokastik algoritmalara dayalı yüzeyler daha düzensiz, değişken ve öngörülmesi güç topolojiler üretmektedir. Bilişsel bilimlerde giderek önem kazanan öngörücü işleme (predictive processing) yaklaşımına göre insan beyni çevreden gelen duyuşsal bilgileri sürekli olarak tahmin etmekte ve bu tahminleri gelen verilerle karşılaştırmaktadır (Hohwy, 2020; Walsh vd., 2020). Bu perspektiften bakıldığında, düzenli ve öngörülebilir yüzeylerin daha düşük bilişsel işleme maliyeti oluşturması; buna karşılık düzensiz ve stokastik yüzeylerin daha yüksek dikkat ve örüntü çözümleme gereksinimi yaratması beklenebilir.

Hesaplamalı tasarım literatüründe üretilen parametrik ve algoritmik yüzeylerin değerlendirilmesi büyük ölçüde görsel performans, biçimsel karmaşıklık veya üretim teknikleri üzerinden gerçekleştirilmektedir. Algoritmik olarak üretilmiş yüzeylerin insan bilişi ve fizyolojisi üzerindeki dokunsal etkileri ise halen sınırlı düzeyde araştırılmıştır. Bu durum, hesaplamalı tasarım ile bilişsel bilimler arasındaki önemli araştırma boşluklarından birini oluşturmaktadır. Bu çalışmanın temel amacı, hesaplamalı olarak üretilmiş rasyonel ve stokastik mimari dokuların dokunsal deneyim sırasında oluşturduğu nörofizyolojik tepkileri incelemektir. Bu kapsamda algoritmik olarak üretilmiş iki farklı yüzey tipinin haptik etkileşim sırasında ortaya çıkardığı elektroensefalografi (EEG) ve elektrodermal aktivite (EDA) tepkileri karşılaştırılmıştır. Çalışma, hesaplamalı tasarım, nöromimarlık ve haptik biliş alanlarını bir araya getirerek, algoritmik yüzeylerin yalnızca estetik veya biçimsel özellikler taşıyan tasarım ürünleri olmadığını; aynı zamanda kullanıcıların bilişsel ve fizyolojik deneyimlerini etkileyebilen çevresel arayüzler olarak değerlendirilebileceğini ortaya koymayı amaçlamaktadır. Bu anlamda Figure 1 Çalışma kapsamında geliştirilen kavramsal model, hesaplamalı

olarak üretilmiş mimari yüzeylerin dokunsal deneyim sırasında oluşturduğu nörofizyolojik ve davranışsal süreçleri göstermektedir.

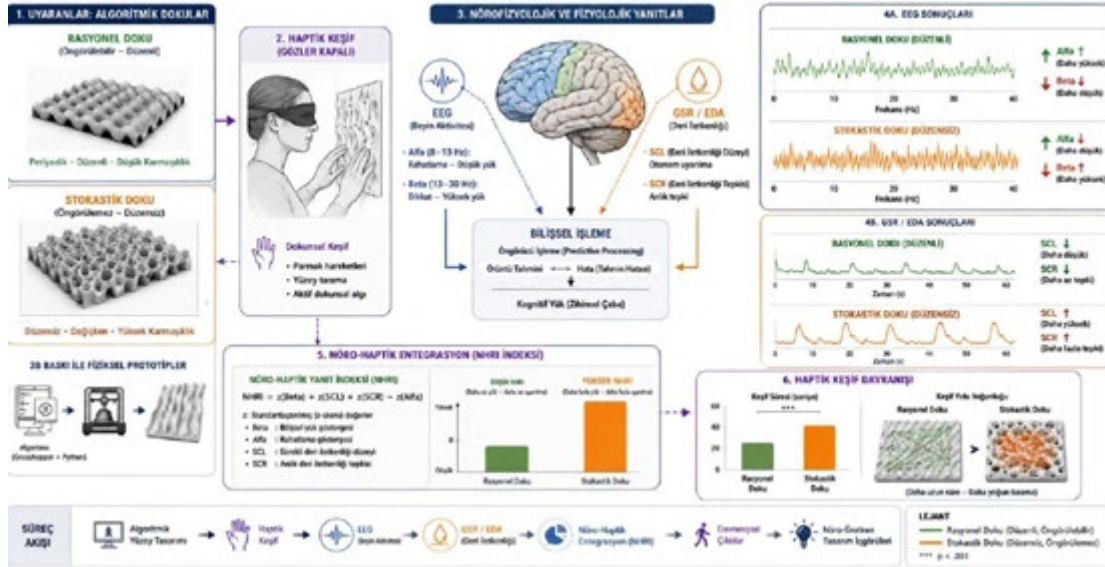


Figure 1. Önerilen Nöro-Haptik Tasarım Çerçevesi

Çalışmada, algoritmik olarak oluşturulan rasyonel ve stokastik yüzeyler kullanıcılar tarafından görsel uyarılardan izole edilmiş koşullarda haptik olarak denenmiştir. Dokunsal etkileşim sürecinde elde edilen elektroensefalografi (EEG) verileri bilişsel işleme ve zihinsel yükü, elektrodermal aktivite (GSR/EDA) verileri ise otonom sinir sistemi uyarılmasını temsil etmektedir. Elde edilen nörofizyolojik göstergeler, öngörücü işleme (predictive processing) yaklaşımı doğrultusunda değerlendirilerek Nöro-Haptik Yanıt İndeksi (NHRI) içerisinde bütünleştirilmektedir. Model, yüzey karmaşıklığının bilişsel yük, fizyolojik uyarılma ve dokunsal keşif davranışı üzerindeki etkilerini açıklayan bütüncül bir çerçeve sunmakta ve hesaplamalı tasarım ile nöromimarlık arasındaki ilişkiyi ortaya koymaktadır.

2. Kuramsal çerçeve ve materyal

2.1. Haptik Algı ve Mimari Deneyim

Mimari deneyimin uzun yıllar boyunca ağırlıklı olarak görsel algı ekseninde değerlendirilmesi, çevrenin insan tarafından deneyimlenmesinde rol oynayan diğer duyu sistemlerinin görece geri planda kalmasına neden olmuştur; mimarlık kuramında ise bu durum sıklıkla "okülermerkezcilik" (ocularcentrism) olarak tanımlanmaktadır (Bullock, 2018). Spence (2020) ve Pallasmaa (2024), mekânın yalnızca görsel imgeler aracılığıyla değil, beden tüm duyu sistemleriyle birlikte deneyimlendiğini savunarak dokunma duyusunun mekânsal algının temel bileşenlerinden biri olduğunu ileri sürmektedir.

Haptik algı, yalnızca yüzey özelliklerinin hissedilmesiyle sınırlı olmayan, bireyin çevresini aktif biçimde keşfetmesini sağlayan bilişsel bir süreçtir (Lederman ve Klatzky, 2009). Gibson'ın (1966) algısal sistemler yaklaşımı ve sonraki çalışmalar, dokunmanın pasif bir duyu alım süreci değil; çevresel bilgilerin aktif olarak toplandığı ve yorumlandığı bir algısal araştırma mekanizması olduğunu göstermektedir (Han vd., 2016; Howes, 2021). Bu bağlamda bireyler, yüzey geometrilerini, pürüzlülük düzeylerini, yönelim değişimlerini ve mekânsal örüntüleri dokunsal etkileşim yoluyla anlamlandırabilmektedir.

2.2. Hesaplamalı Karmaşıklık ve Bilişsel İşleme

Hesaplamalı tasarım süreçleri, farklı düzeylerde geometrik düzenlilik ve karmaşıklığa sahip yüzeylerin üretilmesine olanak tanımaktadır. Bazı yüzeyler matematiksel olarak tanımlanabilen düzenli örüntüler ve periyodik ilişkiler içerirken, bazıları stokastik süreçler, gürültü algoritmaları veya fraktal yapılar aracılığıyla daha düzensiz ve öngörülemez topolojiler oluşturmaktadır.

Çevresel psikoloji ve bilişsel bilim literatüründe geometrik düzenlilik ile bilişsel işleme arasındaki ilişki uzun süredir tartışılmaktadır. Joye (2007), düzenli geometrik organizasyonların çevresel bilgilerin daha hızlı işlenmesine katkı sağlayabileceğini ve bunun bilişsel akıcılığı artırabileceğini ileri sürmektedir. Benzer şekilde, insan beyninin çevresel örüntüleri tanımlama ve sınıflandırma konusunda yüksek bir uzmanlaşmaya sahip olduğu bilinmektedir. Shemesh vd. (2017) mimari mekan geometrisiyle ilişkili duygular arasındaki bağlantıyı haritalamak ile mimarinin mekansal karmaşıklığına insan tepkisini anlamanın önemine değinmiştir. Düzenli ve tekrar eden geometrik ilişkiler, çevresel bilginin daha hızlı organize edilmesine olanak tanırken; düzensiz ve öngörülmesi güç yapılar daha fazla dikkat ve bilişsel kaynak gerektirebilmektedir. Bu durum, son yıllarda bilişsel sinirbilim alanında önem kazanan öngörücü işleme (predictive processing) yaklaşımı ile de açıklanabilir (Keller & Msrice-Flogel, 2018). Bu yaklaşıma göre beyin, çevreden gelen duyuşsal bilgileri pasif olarak almak yerine sürekli tahminler üretmekte ve bu tahminleri gerçek duyuşsal girdilerle karşılaştırmaktadır.

2.3. Nöro-Üretken Arayüzler ve Materyalleşmiş Algoritmalar

Hesaplamalı tasarım ürünlerinin bilişsel etkilerini anlamak için yalnızca dijital modellerin incelenmesi yeterli değildir. Gramazio ve Kohler'in (2008) ortaya koyduğu dijital materyalite yaklaşımı, algoritmik verilerin fiziksel dünyada somutlaşmasının tasarım araştırmaları açısından kritik önem taşıdığını vurgulamaktadır. Dijital olarak üretilen geometriler, fiziksel prototipler aracılığıyla insan bedeniyle doğrudan etkileşime girmekte ve böylece algısal süreçlerin deneysel olarak incelenmesine olanak sağlamaktadır.

Bu perspektiften bakıldığında, üç boyutlu baskı teknolojileriyle üretilen algoritmik yüzeyler yalnızca tasarım temsilleri olarak değil; insan bilişi ile hesaplamalı geometri arasındaki etkileşimi incelemeye olanak sağlayan deneysel arayüzler olarak değerlendirilebilir. Başka bir ifadeyle, algoritmik olarak üretilmiş yüzeyler görsel nesneler olmanın ötesinde, kullanıcıların dikkat süreçlerini, bilişsel yüklerini ve nörofizyolojik tepkilerini etkileyebilen nöro-üretken arayüzler olarak düşünülebilir.

Bu çalışma, söz konusu kuramsal çerçeveden hareketle, matematiksel olarak öngörülebilir rasyonel dokular ile algoritmik gürültü temelli stokastik dokuların dokunsal etkileşim sırasında oluşturduğu nörofizyolojik farklılıkları incelemektedir. Bu doğrultuda, yüzey karmaşıklığının insan beynindeki bilişsel işleme süreçleriyle nasıl ilişkili olduğu EEG ve elektrodermal aktivite verileri üzerinden değerlendirilmiştir.

Bu çalışmanın temel varsayımı, hesaplamalı olarak üretilmiş mimari yüzeylerin yalnızca biçimsel veya estetik özellikler taşımadığı; aynı zamanda kullanıcıların bilişsel süreçlerini, fizyolojik tepkilerini ve çevreyle kurdukları etkileşimi etkileyebilen çevresel uyaranlar olarak değerlendirilebileceğidir. Özellikle yüzeylerin geometrik organizasyonu ve öngörülebilirlik düzeyi, dokunsal deneyim sırasında beynin örüntü tanıma mekanizmalarını farklı biçimlerde harekete geçirebilir. Düzenli ve matematiksel olarak tahmin edilebilir yüzeylerin daha düşük bilişsel işleme gereksinimi oluşturması beklenirken, stokastik ve düzensiz yüzeylerin daha fazla dikkat, bilişsel kaynak ve fizyolojik uyarılma gerektireceği öngörülmektedir.

3. Araştırma Tasarımı

Çalışmada, katılımcıların rasyonel ve stokastik algoritmik yüzeylerle etkileşimleri sırasında ortaya çıkan kortikal aktivasyon ve otonom sinir sistemi tepkileri karşılaştırılmıştır. Araştırma, tekrarlı

ölçümler (within-subject) deneysel tasarımına dayanmaktadır. Her katılımcı her iki yüzey koşulunu da deneyimlemiş ve böylece bireysel farklılıkların etkisi en aza indirilmeye çalışılmıştır. Araştırma süreci üç temel aşamadan oluşmuştur: (1) algoritmik yüzeylerin üretilmesi, (2) dijital fabrikasyon yoluyla fiziksel prototiplerin oluşturulması ve (3) haptik deneyler sırasında nörofizyolojik verilerin toplanması.

3.1. Algoritmik Yüzeylerin Oluşturulması

Deneysel uyaranların oluşturulması amacıyla parametrik modelleme ortamı Grasshopper ve Python tabanlı algoritmalar kullanılmıştır. Çalışmada geometrik organizasyon açısından farklı karakteristiklere sahip iki yüzey tipi geliştirilmiştir. Rasyonel yüzeyler, periyodik matematiksel ilişkiler içeren trigonometrik fonksiyonlar (sinüs ve kosinüs dalgaları) kullanılarak oluşturulmuştur. Bu yüzeyler düzenli tekrar eden örüntüler, düşük geometrik entropi ve yüksek öngörülebilirlik özellikleri göstermektedir. Stokastik yüzeyler ise Voronoi tabanlı hücresel organizasyonlar, Gaussian dağılımlı deformasyonlar ve algoritmik gürültü teknikleri kullanılarak üretilmiştir. Bu yüzeyler düzensiz topolojik organizasyon, yüksek geometrik çeşitlilik ve düşük öngörülebilirlik özellikleri göstermektedir. Her iki yüzey tipi benzer boyutlarda tasarlanmış ve yalnızca geometrik organizasyon açısından farklılaşacak şekilde parametrik olarak kontrol edilmiştir (Figure 2).

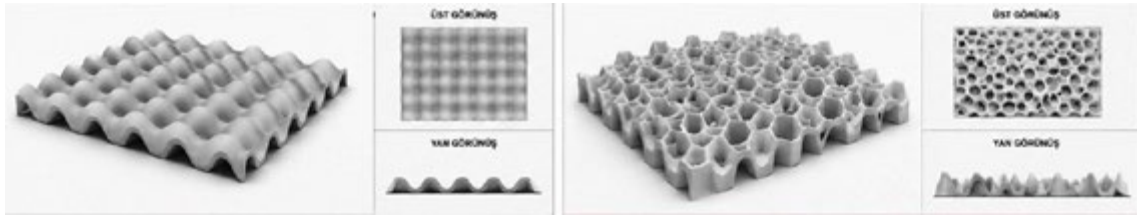


Figure 2. Çalışmada kullanılan rasyonel yüzey ve stokastik yüzey

3.2. Dijital Fabrikasyon Süreci

Oluşturulan parametrik modeller, yüksek çözünürlüklü üç boyutlu baskı teknolojileri kullanılarak fiziksel prototiplere dönüştürülmüştür. Mikro ölçekli yüzey farklılıklarının korunabilmesi amacıyla katman yüksekliği düşük olan yüksek hassasiyetli 3B yazıcılar tercih edilmiştir. Tüm yüzeyler 15 × 15 cm boyutlarında, aynı malzeme türü kullanılarak ve aynı baskı parametreleri altında üretilmiştir. Yüzeylerin renk, malzeme ve sıcaklık gibi değişkenlerden etkilenmemesi amacıyla tüm örnekler homojen beyaz renkte hazırlanmıştır.

3.3. Katılımcılar

Araştırmaya 30 gönüllü yetişkin katılımcı (N = 30) dahil edilmiştir. Katılımcıların yaş ortalaması 24.8 yıl (SD = 3.6) olup yaşları 20 ile 34 arasında değişmektedir. Örneklem 16 kadın (%53.3) ve 14 erkek (%46.7) katılımcıdan oluşmaktadır. Katılımcıların büyük çoğunluğu sağ el baskınlığına sahiptir (%90.0). Tüm katılımcılar herhangi bir nörolojik veya psikiyatrik rahatsızlık öyküsü bulunmayan sağlıklı yetişkin bireylerden seçilmiş ve deney öncesinde bilgilendirilmiş onam vermiştir. Katılımcılar herhangi bir nörolojik veya psikiyatrik rahatsızlık öyküsüne sahip olmayan bireylerden seçilmiştir. Tüm katılımcılar deney öncesinde bilgilendirilmiş onam formunu imzalamış ve çalışma ilgili etik kurul tarafından onaylanmıştır.

3.4. Deneysel Prosedür

Deneyler sessiz ve kontrollü SDU hesaplamalı tasarım laboratuvar koşullarında gerçekleştirilmiştir. Görsel bilginin olası etkilerini ortadan kaldırmak amacıyla katılımcıların gözleri deney boyunca kapatılmış ve ek olarak göz bandı kullanılmıştır. Katılımcılar rastgele sırayla rasyonel ve stokastik yüzeylerle etkileşime girmiştir. Her yüzey için katılımcılardan belirli bir süre boyunca yalnızca ellerini

kullanarak yüzeyi keşfetmeleri istenmiştir. Yüzeyler arasındaki olası taşıma etkilerini azaltmak amacıyla her oturum arasında kısa dinlenme aralıkları verilmiştir.

3.5. Nörofizyolojik Ölçümler

3.5.1. EEG

Kortikal aktivasyon verileri 14 kanallı EEG (Emotiv EPOC) sistemi kullanılarak kaydedilmiştir. Elektrot yerleşimi uluslararası 10–20 sistemine göre gerçekleştirilmiştir. EEG sinyalleri 1–40 Hz bant geçiren filtre uygulanarak ön işleme tabi tutulmuş, göz hareketleri ve kas artefaktları bağımsız bileşen analizi (ICA) kullanılarak temizlenmiştir. Analizlerde özellikle Alfa bandı (8–12 Hz) ve Beta bandı (13–30 Hz) güç değerleri değerlendirilmiştir. Alfa aktivitesi bilişsel rahatlama ve düşük zihinsel yük göstergesi olarak; beta aktivitesi ise dikkat ve bilişsel işleme yoğunluğunun göstergesi olarak yorumlanmıştır (Miller, 2007).

3.5.2. Elektrodermal Aktivite (EDA)

Otonom sinir sistemi aktivasyonu elektrodermal aktivite sensörü kullanılarak kaydedilmiştir. Ham sinyaller tonic skin conductance level (SCL) ve phasic skin conductance response (SCR) bileşenlerine ayrıştırılmıştır. Analizlerde; Ortalama deri iletkenliği, SCR tepe sayısı, SCR amplitüdü değerlendirilmiştir.

4. Veri Analizi

Rasyonel ve stokastik yüzey koşulları arasındaki farklılıklar tekrarlı ölçümler için uygun parametrik testler kullanılarak analiz edilmiştir. EEG ve EDA göstergelerindeki farklılıklar eşleştirilmiş örneklem t-testleri ve tekrarlı ölçümler varyans analizi (Repeated Measures ANOVA) ile değerlendirilmiştir. İstatistiksel anlamlılık düzeyi $p < .05$ olarak kabul edilmiştir. Etki büyüklükleri Cohen's d ve kısmi eta kare (η^2p) değerleri kullanılarak raporlanmıştır.

4.1. Mediation Analysis

Yüzey tipinin (rasyonel/stokastik) dokunsal keşif davranışı üzerindeki etkisinde bilişsel yükün aracılık rolünü incelemek amacıyla mediyasyon analizi gerçekleştirilmiştir. Analizlerde bağımsız değişken olarak yüzey tipi, aracı değişken olarak beta bandı aktivitesi ve bağımlı değişken olarak dokunsal keşif süresi kullanılmıştır. Mediyasyon modeli bootstrap yeniden örnekleme yöntemi kullanılarak test edilmiştir. Dolaylı etkilerin güvenilirliğini değerlendirmek amacıyla 5000 bootstrap örnekleme oluşturulmuş ve %95 güven aralıkları hesaplanmıştır. Güven aralığının sıfırı içermemesi durumunda dolaylı etkinin istatistiksel olarak anlamlı olduğu kabul edilmiştir. Analizler, yüzey karmaşıklığının keşif davranışı üzerindeki etkisinin doğrudan mı gerçekleştiğini yoksa bilişsel yük aracılığıyla mı ortaya çıktığını belirlemek amacıyla yürütülmüştür. Bu yaklaşım, algoritmik yüzey özellikleri ile davranışsal çıktılar arasındaki ilişkide nörofizyolojik süreçlerin oynadığı rolü daha ayrıntılı biçimde değerlendirmeye olanak sağlamaktadır. Yüzey tipinin keşif süresi üzerindeki etkisinde beta aktivitesinin aracılık rolü, iki koşullu tekrarlı ölçüm tasarımlarına uygun olarak MEMORE yaklaşımı kullanılarak değerlendirilmiştir (Montoya ve Hayes, 2007). Dolaylı etki, 5000 bootstrap yeniden örnekleme ve %95 güven aralığı üzerinden test edilmiştir.

5. Bulgular

Rasyonel ve stokastik dokuların haptik keşfi sırasında elde edilen EEG verileri, yüzey geometrisinin bilişsel işleme süreçleri üzerinde anlamlı etkiler oluşturduğunu göstermiştir. Alfa bandı (8–12 Hz) aktivitesi incelendiğinde, katılımcıların rasyonel dokularla etkileşim sırasında daha yüksek alfa gücü sergilediği görülmüştür ($M = 12.84 \mu V^2$, $SD = 2.31$). Buna karşın stokastik dokular için ortalama alfa gücü daha düşük bulunmuştur ($M = 9.71 \mu V^2$, $SD = 2.08$). Eşleştirilmiş örneklem t-testi sonuçları bu farkın istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermiştir, $t(29) = 5.27$, $p < .001$, Cohen's d = 0.96.

Beta bandı (13–30 Hz) analizleri ise ters yönde bir örüntü ortaya koymuştur. Stokastik dokuların keşfi sırasında beta aktivitesi anlamlı düzeyde yükselmiştir ($M = 15.92 \mu V^2$, $SD = 2.74$) ve rasyonel dokulara ($M = 11.23 \mu V^2$, $SD = 2.17$) kıyasla daha yüksek bilişsel işleme gerektirdiğini göstermiştir, $t(29) = 6.14$, $p < .001$, Cohen's $d = 1.12$. Topografik EEG haritaları, stokastik dokular sırasında frontal ve fronto-parietal bölgelerde belirgin beta yoğunlaşması olduğunu, buna karşılık rasyonel dokular sırasında posterior bölgelerde alfa dominasyonunun arttığını göstermektedir (Figure 3).

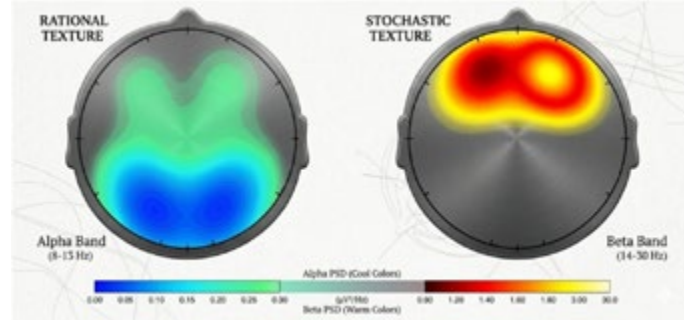


Figure 3. Farklı iki doku ile ilgili beyin topolojisi (tek katılımcı örneği)

EDA analizleri, yüzey tipinin otonom sinir sistemi aktivasyonu üzerinde anlamlı etkiler oluşturduğunu göstermiştir. Ortalama deri iletkenliği (SCL) değerleri stokastik dokularda daha yüksek bulunmuştur ($M = 2.74 \mu S$, $SD = 0.61$) ve rasyonel dokulara ($M = 1.08 \mu S$, $SD = 0.34$) kıyasla anlamlı farklılık göstermiştir, $t(29) = 8.42$, $p < .001$, Cohen's $d = 1.54$. Benzer şekilde SCR tepe sayısı da stokastik yüzeylerde anlamlı biçimde artmıştır. Katılımcılar rasyonel dokular üzerinde ortalama 2.8 ($SD = 1.3$) SCR tepkisi gösterirken, stokastik dokularda bu değer ortalama 11.4'e ($SD = 3.2$) yükselmiştir, $t(29) = 10.17$, $p < .001$, Cohen's $d = 1.86$. Bu sonuçlar, stokastik yüzeylerin daha yüksek düzeyde fizyolojik uyarılma ve dikkat gerektirdiğini göstermektedir. (Figure 4).

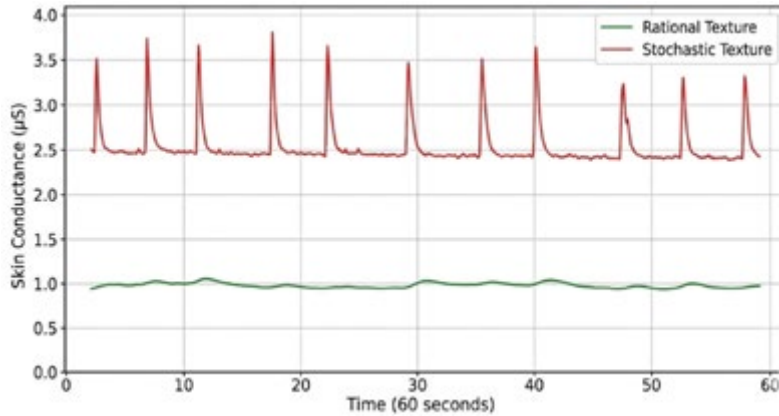


Figure 4. İki farklı dokunun elektrodermal aktivite verileri (tek katılımcı örneği)

Dokunsal Keşif incelendiğinde ise katılımcıların iki yüzeyi incelemek için harcadıkları süreler arasında da anlamlı farklılıklar bulunmuştur. Rasyonel dokular için ortalama keşif süresi 45.2 saniye ($SD = 12.4$) iken, stokastik dokular için bu süre 138.6 saniyeye ($SD = 31.8$) yükselmiştir. Eşleştirilmiş örneklem t-testi sonuçları farkın oldukça güçlü olduğunu göstermiştir, $t(29) = 13.28$, $p < .001$, Cohen's $d = 2.42$. Bu bulgu, stokastik dokuların katılımcıların dikkatini daha uzun süre koruduğunu ve daha yoğun bir keşif davranışı oluşturduğunu göstermektedir.

EEG ve EDA göstergelerinin birlikte değerlendirilmesi amacıyla gerçekleştirilen tekrarlı ölçümler MANOVA analizi, yüzey tipinin nörofizyolojik tepki örüntüleri üzerinde genel olarak anlamlı etkisi olduğunu göstermiştir, Wilks' $\Lambda = .38$, $F(4,26) = 10.54$, $p < .001$, $\eta^2 = .62$. Takip analizleri, bu etkinin

özellikle beta aktivitesi ve SCR göstergelerinden kaynaklandığını ortaya koymuştur. Sonuçlar, stokastik yüzeylerin daha yüksek bilişsel yük ve fizyolojik uyarılma oluşturduğunu; rasyonel yüzeylerin ise daha düşük bilişsellikte işlenebildiğini göstermektedir. Ek olarak, Tablo 1'de rasyonel ve stokastik yüzey koşullarına ilişkin tanımlayıcı istatistikler ve eşleştirilmiş örneklem t-testi sonuçları sunulmaktadır.

Tablo 1. Rasyonel ve Stokastik Dokulara İlişkin Tanımlayıcı İstatistikler ve Karşılaştırmalı Analiz Sonuçları

Değişken	Rasyonel Doku M±SD	Stokastik Doku M±SD	t	p
Alfa Gücü	12.84 ± 2.31	9.71 ± 2.08	5.27	<.001
Beta Gücü	11.23 ± 2.17	15.92 ± 2.74	6.14	<.001
SCL (μS)	1.08 ± 0.34	2.74 ± 0.61	8.42	<.001
SCR Sayısı	2.8 ± 1.3	11.4 ± 3.2	10.17	<.001
Keşif Süresi (sn)	45.2 ± 12.4	138.6 ± 31.8	13.28	<.001

Not: *p < .05, **p < .01.

Genel olarak değerlendirildiğinde, korelasyon sonuçları yüzey geometrisinin yalnızca biçimsel bir özellik olmadığını; bilişsel işleme, fizyolojik uyarılma ve davranışsal etkileşim üzerinde etkili olan önemli bir çevresel değişken olarak değerlendirilebileceğini ortaya koymaktadır. Tablo 2'de sunulan Pearson korelasyon analizi sonuçları, EEG, elektrodermal aktivite ve davranışsal göstergeler arasında anlamlı ilişkiler bulunduğunu göstermektedir.

Tablo 2. EEG, EDA ve Dokunsal Keşif Süresi Değişkenleri Arasındaki Pearson Korelasyonları

Değişken	1	2	3	4	5
1. Alfa Gücü	1				
2. Beta Gücü	-.58**	1			
3. SCL	-.49*	.67**	1		
4. SCR Sayısı	-.53**	.71**	.74**	1	
5. Keşif Süresi	-.44*	.63**	.59**	.69**	1

Not: SCL = Skin Conductance Level; SCR = Skin Conductance Response. *p < .05, **p < .01.

Alfa aktivitesi ile tüm fizyolojik ve davranışsal göstergeler arasında negatif ilişkiler gözlenirken, beta aktivitesi ile elektrodermal aktivite göstergeleri ve keşif süresi arasında pozitif ilişkiler belirlenmiştir. Özellikle beta gücü ile SCR sayısı (r = .71, p < .01) ve SCL (r = .67, p < .01) arasındaki güçlü pozitif ilişkiler, artan bilişsel işleme gereksiniminin daha yüksek otonom sinir sistemi aktivasyonu ile birlikte ortaya çıktığını göstermektedir. Benzer şekilde, keşif süresi ile SCR sayısı (r = .69, p < .01) ve beta aktivitesi (r = .63, p < .01) arasındaki ilişkiler, daha karmaşık olarak algılanan yüzeylerin katılımcılar tarafından daha uzun süre incelendiğini ve daha yoğun bilişsel katılım oluşturduğunu göstermektedir.

Yüzey karmaşıklığının bilişsel ve fizyolojik etkilerini bütüncül olarak değerlendirebilmek amacıyla bu çalışma kapsamında deneysel bir Nöro-Haptik Tepki İndeksi (Neuro-Haptic Response Index; NHRI) geliştirilmiştir. İndeks, dokunsal etkileşim sırasında elde edilen EEG ve elektrodermal aktivite göstergelerinin standartlaştırılmış değerleri kullanılarak hesaplanmıştır. NHRI, yüksek bilişsel yük ve fizyolojik uyarılmayı temsil eden beta aktivitesi, SCR ve SCL değerlerinin birleşiminden; bilişsel rahatlama göstergesi olarak kabul edilen alfa aktivitesinin çıkarılmasıyla oluşturulmuştur.

$$NHRI = z(\text{Beta}) + z(\text{SCR}) + z(\text{SCL}) - z(\text{Alpha}) \quad (1)$$

Elde edilen sonuçlar, stokastik dokuların rasyonel dokulara kıyasla anlamlı derecede daha yüksek NHRI değerleri ürettiğini göstermiştir. Rasyonel yüzeyler için ortalama NHRI değeri 0.43 (SD = 0.21) iken, stokastik yüzeylerde bu değer 1.76'ya (SD = 0.48) yükselmiştir. Eşleştirilmiş örneklem t-testi sonuçları iki yüzey tipi arasındaki farkın istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermiştir, $t(29) = 8.94$, $p < .001$, Cohen's $d = 1.63$.

Yüzey tipinin keşif davranışı üzerindeki etkisinde bilişsel yükün aracılık rolünü incelemek amacıyla bootstrap temelli mediyasyon analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları, yüzey tipinin beta aktivitesi üzerinde anlamlı bir etkisi olduğunu ($\beta = .62$, $p < .001$), beta aktivitesinin ise keşif süresini anlamlı biçimde yordadığını göstermiştir ($\beta = .54$, $p < .001$). Dolaylı etkinin %95 güven aralığı sıfırı içermemiştir [0.18, 0.46], bu da anlamlı bir aracılık etkisine işaret etmektedir. Rasyonel ve stokastik dokulara ait Nöro-Haptik Tepki İndeksi (NHRI) değerlerinin karşılaştırılması Figure 5'de gösterilmiştir.

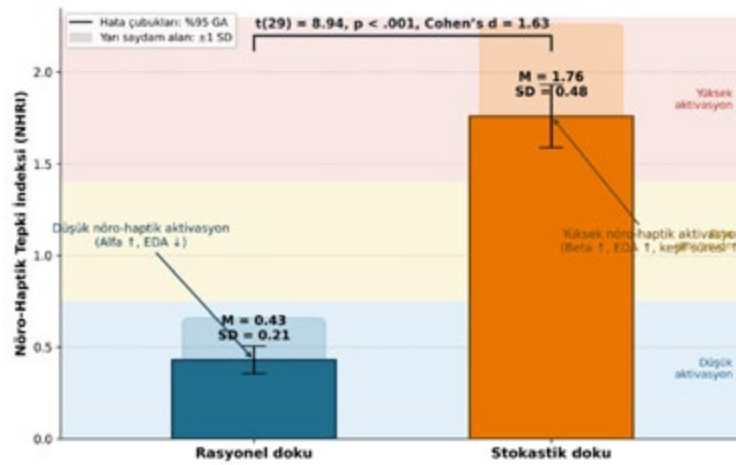


Figure 5. Rasyonel ve stokastik dokulara ait Nöro-Haptik Tepki İndeksi (NHRI) değerlerinin karşılaştırılması. Hata çubukları %95 güven aralığını, yarı saydam alanlar ± 1 standart sapmayı göstermektedir. Stokastik dokuların daha yüksek NHRI değeri üretmesi, bu yüzeylerin daha yüksek bilişsel yük, fizyolojik uyarılma ve dokunsal keşif davranışlarıyla ilişkili olduğunu göstermektedir

Yüzey karmaşıklığının bilişsel ve fizyolojik etkilerini bütüncül olarak değerlendirebilmek amacıyla geliştirilen Nöro-Haptik Tepki İndeksi (NHRI), EEG ve elektrodermal aktivite göstergelerinin birleşik etkisini temsil etmektedir. İndeks, yüksek bilişsel yük ve fizyolojik uyarılmayı temsil eden beta aktivitesi, SCL ve SCR değerlerinin standartlaştırılmış skorlarının toplamından, bilişsel rahatlama göstergesi olarak kabul edilen alfa aktivitesinin standartlaştırılmış skorunun çıkarılmasıyla hesaplanmıştır. Analiz sonuçları, stokastik yüzeylerin rasyonel yüzeylere kıyasla anlamlı düzeyde daha yüksek NHRI değerleri oluşturduğunu göstermiştir. Rasyonel yüzeylerde ortalama NHRI değeri 0.43 (SD = 0.21) iken, stokastik yüzeylerde bu değer 1.76'ya (SD = 0.48) yükselmiştir. Eşleştirilmiş örneklem t-testi sonuçları iki yüzey tipi arasındaki farkın oldukça yüksek etki büyüklüğüne sahip olduğunu göstermiştir, $t(29) = 8.94$, $p < .001$, Cohen's $d = 1.63$. Ek olarak gerçekleştirilen korelasyon analizleri, NHRI ile keşif süresi arasında güçlü pozitif bir ilişki olduğunu ortaya koymuştur ($r = .78$, $p < .001$). Benzer şekilde NHRI ile beta aktivitesi ($r = .84$, $p < .001$), SCL ($r = .81$, $p < .001$) ve SCR sayısı ($r = .86$, $p < .001$) arasında yüksek düzeyde pozitif ilişkiler belirlenmiştir. Buna karşılık NHRI ile alfa aktivitesi arasında güçlü negatif ilişki bulunmuştur ($r = -.73$, $p < .001$).

Bu bulgular, NHRI'nin yalnızca tek bir fizyolojik göstergenin değil, bilişsel yük ve otonom sinir sistemi aktivasyonunun birleşik etkisini temsil ettiğini göstermektedir. Sonuçlar, yüzey karmaşıklığının nörofizyolojik etkilerini değerlendirmede NHRI'nin potansiyel bir bütünleşik performans göstergesi olarak kullanılabileceğini ortaya koymaktadır. Ayrıca sonuçlar, stokastik yüzeylerin daha uzun keşif

süreleri oluşturmalarının yalnızca yüzey özelliklerinden kaynaklanmadığını, aynı zamanda bu yüzeylerin oluşturduğu yüksek bilişsel işleme gereksinimi aracılığıyla ortaya çıktığını göstermektedir. Başka bir ifadeyle, yüzey karmaşıklığı önce bilişsel yükü artırmakta, artan bilişsel yük ise bireylerin dokunsal keşif davranışlarını uzatmaktadır.

5. Sonuç

Bu çalışma, hesaplamalı olarak üretilmiş mimari dokuların yalnızca biçimsel veya estetik özellikler taşımadığını, aynı zamanda kullanıcıların bilişsel ve fizyolojik süreçleri üzerinde ölçülebilir etkiler oluşturduğunu göstermiştir. Elde edilen EEG ve elektrodermal aktivite bulguları, dokunsal deneyim sırasında yüzey geometrisinin insan beynindeki bilgi işleme süreçleriyle yakından ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle stokastik dokuların daha yüksek beta aktivitesi, daha yüksek elektrodermal uyarılma ve daha uzun keşif süreleri üretmesi; buna karşılık rasyonel dokuların daha yüksek alfa aktivitesi ile ilişkili olması, yüzey organizasyonunun bilişsel yük ve dikkat süreçleri üzerindeki etkisini desteklemektedir.

Bu bulgular, çevresel psikoloji ve nöromimari alanlarında giderek önem kazanan öngörücü işleme (predictive processing) yaklaşımı ile uyumludur. Bu yaklaşıma göre insan beyni çevresel bilgileri pasif olarak almak yerine sürekli tahminler üretmekte ve gelen duysal verileri bu tahminlerle karşılaştırmaktadır. Düzenli ve öngörülebilir geometriler daha düşük tahmin hataları üretirken, düzensiz ve stokastik yapılar daha fazla bilişsel işleme gerektirmektedir. Bu çalışmada elde edilen yüksek beta aktivitesi ve artmış elektrodermal tepkiler, stokastik yüzeylerin daha yüksek düzeyde bilişsel kaynak kullanımına neden olduğunu göstermektedir.

Sonuçlar aynı zamanda haptik algının mimari deneyimdeki önemini vurgulamaktadır. Mimarlık kuramında uzun yıllar baskın olan görme merkezli yaklaşımlar, mekânın beden tarafından nasıl deneyimlendiğini açıklamakta yetersiz kalabilmektedir. Bu araştırma, yüzeylerin yalnızca görülen değil, aynı zamanda dokunulan ve bilişsel olarak işlenen çevresel bileşenler olduğunu göstermektedir.

Parametrik ve algoritmik tasarım süreçlerinde karmaşıklık çoğu zaman estetik kalite veya biçimsel yenilik bağlamında değerlendirilmektedir. Ancak bu çalışma, geometrik karmaşıklığın aynı zamanda bilişsel bir maliyet oluşturabileceğini göstermektedir. Başka bir ifadeyle, algoritmik yüzeylerin başarısı yalnızca biçimsel performanslarıyla değil, kullanıcıların bu yüzeyleri nasıl algıladığı ve işlediğiyle de değerlendirilmelidir. Bu durum, gelecekteki hesaplamalı tasarım süreçlerinde nörofizyolojik performans göstergelerinin yeni bir tasarım parametresi olarak kullanılabileceğini düşündürmektedir.

Uygulama açısından değerlendirildiğinde, çalışma bulguları farklı yapı tipleri için önemli çıkarımlar sunmaktadır. Hastaneler, eğitim yapıları, ulaşım terminalleri ve büyük kamusal yapılar gibi kullanıcıların yoğun bilişsel işleme gerçekleştirdiği mekânlarda, aşırı karmaşık yüzey organizasyonlarının gereksiz bilişsel yük oluşturabileceği söylenebilir. Buna karşılık müzeler, sergi mekânları ve deneyim odaklı kamusal alanlarda belirli düzeyde stokastik karmaşıklık, kullanıcıların dikkatini artırarak daha uzun süreli etkileşim ve keşif davranışı oluşturabilir. Bu nedenle yüzey karmaşıklığının tasarım sürecinde işlevsel hedeflere göre optimize edilmesi önem taşımaktadır.

Bu çalışma doğrultusunda "Nöro-Haptik Tasarım Alanı (Neuro-Haptic Design Space)" kavramı önerilmektedir. Buna göre hesaplamalı yüzeyler yalnızca geometrik karmaşıklıkları üzerinden değil, oluşturdukları nörofizyolojik maliyet düzeylerine göre de sınıflandırılabilir. Gelecekteki parametrik tasarım sistemleri, estetik performans ile nörofizyolojik performans arasındaki dengeyi optimize eden insan-merkezli tasarım algoritmaları geliştirebilir.

Bununla birlikte çalışmanın sınırlılıkları bulunmaktadır. İlk olarak, araştırma sınırlı sayıda katılımcıyla gerçekleştirilmiştir. İkinci olarak, deneysel koşullar kontrollü laboratuvar ortamında yürütülmüş ve

yalnızca dokunsal etkileşim incelenmiştir. Gerçek mimari deneyim ise görsel, işitsel, termal ve sosyal bileşenlerin eş zamanlı etkisini içermektedir. Üçüncü olarak, araştırmada yalnızca iki yüzey tipi karşılaştırılmıştır. Gelecekte gerçekleştirilecek çalışmaların farklı karmaşıklık düzeylerine sahip yüzey tiplerini, çoklu duysal etkileşimleri ve daha geniş örneklemeleri içermesi önerilmektedir. Bu çalışma kapsamında önerilen NHRI, EEG ve EDA göstergelerini bütünleştiren keşifsel bir bileşik indeks olarak değerlendirilmiştir. İndeksin dış örneklemelerde doğrulanması ve alternatif ağırlıklandırma yöntemleriyle sınanması gelecekteki çalışmalar için önerilmektedir.

Sonuç olarak bu çalışma, hesaplamalı tasarım, nöromimarlık ve çevresel psikoloji disiplinlerini ortak bir araştırma çerçevesinde bir araya getirerek algoritmik yüzeylerin nörofizyolojik etkilerini ortaya koymuştur. Bulgular, gelecekte geliştirilecek parametrik tasarım sistemlerinin yalnızca geometrik veya estetik performansa değil, aynı zamanda insan bilişi ve fizyolojisi üzerindeki etkilerine göre de optimize edilebileceğini göstermektedir. Bu yönüyle çalışma, nöro-üretken tasarım yaklaşımına yönelik ampirik bir temel sunmakta ve insan merkezli hesaplamalı tasarım araştırmaları için yeni bir araştırma gündemi önermektedir.

KAYNAKLAR

- Bullock, N. (2018). Ocularcentrism in Singapore: a preliminary analysis of architecture. *eTropic: electronic journal of studies in the Tropics*, 17(1), 25-40.
- Caetano, I., & Leitão, A. (2020). Architecture meets computation: an overview of the evolution of computational design approaches in architecture. *Architectural Science Review*, 63(2), 165-174.
- De Matteis, F. (2020). *Affective spaces: Architecture and the living body*. Routledge.
- Gibson, J. J. (1966). *The senses considered as perceptual systems*.
- Gramazio, F., & Kohler, M. (2013). Gramazio & Kohler: Digital Materiality. In *Performatism* (pp. 161-170). Routledge.
- Joye, Y. (2007). Architectural lessons from environmental psychology: The case of biophilic architecture. *Review of general psychology*, 11(4), 305-328.
- Han, J., Waddington, G., Adams, R., Anson, J., & Liu, Y. (2016). Assessing proprioception: a critical review of methods. *Journal of sport and health science*, 5(1), 80-90.
- Hohwy, J. (2020). New directions in predictive processing. *Mind & Language*, 35(2), 209-223.
- Howes, D. (2021). Introduction: Empires of the senses. In *Empire of the Senses* (pp. 1-17). Routledge.
- Keller, G. B., & Mrsic-Flogel, T. D. (2018). Predictive processing: a canonical cortical computation. *Neuron*, 100(2), 424-435.
- Kensler, G. L. (1969). *The senses considered as perceptual systems*.
- Lederman, S. J., & Klatzky, R. L. (2009). Haptic perception: A tutorial. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 71(7), 1439-1459.
- Lee, S. (2022). Sustainable embodied experience in the built environment: reinterpreting architectural history through embodied cognition. *Archnet-IJAR: International Journal of Architectural Research*, 16(3), 620-636.
- Miller, R. (2007). Theory of the normal waking EEG: from single neurones to waveforms in the alpha, beta and gamma frequency ranges. *International journal of psychophysiology*, 64(1), 18-23.
- Montoya, A. K., & Hayes, A. F. (2017). Two-condition within-participant statistical mediation analysis: A path-analytic framework. *Psychological methods*, 22(1), 6.
- Pallasmaa, J. (2024). *The eyes of the skin: Architecture and the senses*. John Wiley & Sons.
- Peri Bader, A. (2015). A model for everyday experience of the built environment: The embodied perception of architecture. *The Journal of Architecture*, 20(2), 244-267.
- Ritchie, I. (Ed.). (2020). *Neuroarchitecture: Designing with the mind in mind*. John Wiley & Sons.
- Shemesh, A., Talmon, R., Karp, O., Amir, I., Bar, M., & Grobman, Y. J. (2017). Affective response to architecture—investigating human reaction to spaces with different geometry. *Architectural Science Review*, 60(2), 116-125.
- Shields, J. A. (2023). Phenomenology and architecture: Examining embodied experience and graphic representations of the built environment. In *Horizons of phenomenology: Essays on the state of the field and its applications* (pp. 285-304). Cham: Springer International Publishing.

- Spence, C. (2020). Senses of place: architectural design for the multisensory mind. *Cognitive research: principles and implications*, 5(1), 46.
- 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.
- Walsh, K. S., McGovern, D. P., Clark, A., & O'Connell, R. G. (2020). Evaluating the neurophysiological evidence for predictive processing as a model of perception. *Annals of the new York Academy of Sciences*, 1464(1), 242-268.
- Yu, R., Gu, N., & Ostwald, M. J. (2021). *Computational design: technology, cognition and environments*. CRC Press.

Parametrik Tasarım Süreçlerinin Değerlendirilmesine Yönelik Veri Tabanlı Protokol Analizi Yöntemi

Kamile Öztürk Köşencig¹ ID; Yağmur Burcu Güneş² ID

¹İstanbul Okan Üniversitesi; ²İzmir Demokrasi Üniversitesi

¹kamile.ozturk@okan.edu.tr; ²yagmurburcu.gunes@idu.edu.tr

Özet

Protokol analizi, tasarım araştırmalarında tasarımcıların bilişsel süreçlerini, fikir üretim biçimlerini ve karar alma stratejilerini incelemek amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Özellikle sesli düşünme protokollerine dayalı çalışmalar, tasarım sürecinin anlaşılması açısından değerli veriler sunmaktadır. Ancak bu yöntemler; uzun kayıt süreçleri, manuel transkripsiyon, zaman yoğun kodlama aşamaları nedeniyle oldukça zahmetli bir süreçtir. Üstelik sınırlı katılımcı sayısına imkân vermekte bu nedenle istatistiksel çıkarımlar genellikle yapılamamaktadır. Öte yandan, günümüzde tasarım süreçlerinde parametrik tasarım araçlarının yaygınlaşmasıyla birlikte süreç büyük ölçüde dijital ortama taşınmıştır. Dijital ortamda gerçekleştirilen her işlemin izlenebilir ve kaydedilebilir olmasıysa, tasarım sürecinin otomatik olarak analiz edilmesine yönelik bir potansiyel barındırmaktadır. Dolayısıyla bu çalışma kapsamında, Grasshopper ortamında Python tabanlı eklenti oluşturulmuş ve parametrik tasarım süreçlerinin otomatik olarak analiz edilmesini amaçlayan bir yöntem önerilmiştir. Geliştirilen eklenti; bileşen ekleme ve silme işlemleri, bileşen bağlantıları, parametre değişiklikleri ve düğüm isimlendirmeleri gibi dijital tasarım aktivitelerini gerçek zamanlı olarak kaydetmektedir. Tüm işlemler zaman damgalı veriler hâlinde metin (txt formatında) olarak depolanmakta ve böylece tasarım süreci kronolojik olarak yeniden okunabilmektedir. Elde edilen kayıt verilerinin yorumlanabilmesi amacıyla ise toplanan veriler için iki katmandan oluşan bir analiz yöntemi önerilmiştir. Önerilen yöntem, iki katılımcılı bir pilot çalışma üzerinden test edilmiştir. Çalışmada katılımcıdan, yalnızca nokta ve çizgi tabanlı işlemler kullanarak parametrik bir oyun alanı sistemi geliştirmesi istenmiştir. Tasarım problemi kapsamında katılımcılar hiperbolik paraboloid benzeri kurallı yüzey geometrileri oluşturmuş ve bu yüzeyler çocuk oyun alanı senaryosuna dönüştürülmüştür. Katılımcının; sürünme, eğilme, tırmanma ve dinlenme gibi farklı kullanıcı aktivitelerine göre yüzey yüksekliği, eleman sıklığı, geçirgenlik ve boşluk oranı gibi parametreleri değiştirmesi beklenmiştir. Süreç boyunca katılımcılardan, oluşturduğu Grasshopper düğüm noktalarını anlamsal olarak isimlendirmeleri istenmiştir. Bu yaklaşım ile sesli düşünme yöntemi uygulanmadan dijital tasarım aktiviteleri aracılığıyla tasarım niyetlerinin daha kapsamlı olarak okunabilmesi amaçlanmıştır. Pilot çalışma sonuçları, önerilen sistemin parametrik tasarım sürecini manuel gözleme ihtiyaç duymadan ayrıntılı biçimde kaydedebildiğini göstermektedir. Kronolojik aktivite kayıtları sayesinde öğrencilerin tasarım davranışları analiz edilebilmiştir. PCS tabanlı analiz yöntemi ise fonksiyonel ve çevresel kararların parametrik modelleme mantığına nasıl dönüştürüldüğünü analiz etmeye yaramıştır. Bununla birlikte önerilen yöntem, sesli düşünme protokollerinin yakalayabildiği içsel düşünme süreçlerini, kavramsal niyetleri veya tasarımcının zihinsel alternatiflerini bütünüyle ortaya koyamamaktadır. Bu nedenle çalışma, otomatik protokol yaklaşımının geleneksel protokol analizinin yerine geçen değil, onu tamamlayan bir yöntem olarak değerlendirilmesi gerektiğini savunmaktadır. Sonuç olarak bu araştırma; parametrik tasarım eğitimi, insan-bilgisayar etkileşimi ve hesaplamalı tasarım araştırmaları kapsamında ölçeklenebilir, zaman açısından verimli ve tekrar edilebilir bir analiz yöntemi önermektedir. Araştırmada geliştirilen bu sistem, tasarım eylemlerini analiz etmenin yanı sıra, mimarlık eğitimi bağlamında öğrencilerin tasarım süreçlerinin daha iyi anlaşılması ve değerlendirilmesi açısından da önem taşımaktadır.

Anahtar Kelimeler: Mimari tasarım süreci, protokol analizi, parametrik tasarım, hesaplamalı tasarım, mimarlık eğitimi.

A Data-Driven Protocol Analysis Method for the Evaluation of Parametric Design Processes

Kamile Öztürk Köseñiç¹ ; Yağmur Burcu Güneş² 

¹Istanbul Okan University; ²Izmir Demokrasi University

¹kamile.ozturk@okan.edu.tr; ²yagmurburcu.gunes@idu.edu.tr

Abstract

Protocol analysis is a research method employed in studies of design to investigate designers' cognitive processes, idea-generation patterns, and decision-making strategies. Studies grounded in think-aloud protocols offer significant insights into the understanding of the design process. Nevertheless, these strategies are characterised by a significant labour intensity, owing to the necessity of extensive recording sessions, manual transcription, and time-consuming coding procedures. Moreover, they generally permit only a limited number of participants, which makes it difficult to make statistical generalisations. Furthermore, the extensive utilisation of parametric design software has led to a marked transition of traditional design methodologies towards digital platforms. Given that every action performed in a digital environment is capable of being monitored and recorded, this transformation creates significant potential for the automatic analysis of design processes. This study proposes a method for the automated analysis of parametric design processes through a Python-based plugin developed for the Grasshopper environment. The developed plugin has the capacity to record digital design activities in real time, including the addition and deletion of components, connections between components, modifications to parameters, and the naming of nodes. All actions are stored as timestamped log data in TXT format, enabling the chronological reconstruction and examination of the design process. The proposed two-layer analysis framework is intended to facilitate the interpretation of the collected log data. The proposed method was evaluated through a pilot study involving two participants. In this pilot study, participants were tasked with the design of a parametric playground system utilising exclusively point- and line-based operations. The design task involved the generation of ruled-surface geometries resembling hyperbolic paraboloids by the participants, who then transformed these geometries into playground scenarios for children. Participants were expected to modify parameters such as surface height, element density, mobility, and void ratio according to different user activities, including crawling, bending, climbing, and resting. In addition, participants were instructed to assign meaningful semantic names to their Grasshopper nodes throughout the process. The objective of this approach was to facilitate a more comprehensive interpretation of design intentions through digital design activities, independent of the think-aloud method. The findings of the pilot study demonstrated the capacity of the proposed system to record parametric design processes in detail without necessitating manual observation. The chronological activity logs facilitated the analysis of students' design behaviours. Moreover, the employment of the PCS-based analysis method enabled the examination of the translation of functional and environmental design decisions into parametric modelling logic. Nevertheless, the proposed method is unable to fully capture the internal thought processes, conceptual intentions, or alternative ideas that traditional think-aloud protocols are capable of revealing. This study proposes that the automated protocol approach should not be regarded as a replacement for traditional protocol analysis, but rather as a complementary method. In conclusion, this research proposes a scalable, time-efficient, and replicable method for analysing design processes within the fields of parametric design education, human-computer interaction, and computational design research. Beyond analysing design actions, the developed system also contributes to a better understanding and evaluation of students' design processes in architectural education.

Keywords: Architectural design process, protocol analysis, parametric design, computational design, architectural education.

1. Giriş

Protokol analizi tasarım süreçlerini ve tasarımcının düşünme biçimini anlamak amacıyla bir analiz yöntemi olarak sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yöntem, tasarım süreci sırasında tasarımcıların düşüncelerinin ve eylemlerinin sistematik biçimde kayıt altına alınmasına ve analiz edilmesine imkân vermektedir. Özellikle tasarım bilşi araştırmalarında önemli bir araç olarak kabul edilen protokol analizi (Ericsson & Simon, 1993), tasarım sürecinin sonunda ortaya çıkan üründen ziyade bu tasarım sürecinde ortaya çıkan problemler ve tasarımcının buna karşılık geliştirdiği stratejileri anlamaya odaklanmaktadır. Bu kapsamda yapılan ilk protokol çalışmaları, tasarımcıların fikirlerini temsil etme ve eskiz yapma gereksinimlerinin nedenlerini bilişsel açıdan incelemiştir (Suwa & Tversky, 1997; Verstijnen & Hennessey, 1998). Goldschmidt (1991) ise tasarım adımlarını küçük parçalara ayıran ve bu adımlar arasındaki bağlantıları gösteren “Linkograf” yöntemini önermiştir. Tasarım sürecini anlamaya yönelik olarak geliştirilen bu yöntem literatürde birçok çalışma tarafından kullanılmıştır (Goldschmidt, 1990).

Literatürde ayrıca parametrik tasarım ve dijital modelleme ortamlarının bilişsel etkilerine yönelik çalışmalar da gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar, farklı tasarım ortamlarının yaratıcılık ve problem çözme süreçlerine etkisini karşılaştırmalı olarak değerlendirmiştir (J. H. Lee vd., 2015; Lee & Ostwald, 2019; Yu vd., 2013). Yürütülen bu çalışmalarda yöntem olarak süreç ya da içerik odaklı kodlar kullanılmakta, protokol yöntemiyle toplanan veri tasarım adımlarına ayrıştırıldıktan sonra süreç veya içerik odaklı kodlama şemaları ile analiz edilmektedir. Bunlardan en çok bilinen ve kullanılan yöntem FBS (fonksiyonel, davranışsal, strüktürel) ontolojisi (Gero & Kannengiesser, 2004) ve bilgi kategorileridir (Suwa vd., 1999; Suwa & Tversky, 1997). Lee vd. (2014) ise parametrik tasarım süreçlerine yönelik yaptıkları araştırmada analiz, sentez ve değerlendirme kodlama şeması kullanarak tasarımcı stratejilerini tespit etmişlerdir. Literatürde ayrıca parametrik tasarım süreçlerine yönelik olarak Jabi (2013) tarafından ortaya konulan, parametrelerin sınıflandırıldığı çalışma referans olarak alınarak PCS kodlama şeması önerilmektedir (Kösençiğ, 2024).

Bunun yanında, mevcut protokol analizlerinin genellikle sınırlı örneklem büyüklüklerine dayandığı görülmektedir. Hay vd. (2017) bu alandaki iki önemli zorluk olan; katılımcı büyüklüklerine ve bütünleşik, bilimsel ve ortak ontolojinin eksikliğine dikkat çekmektedir. Ayrıca bu yöntemin uygulanması oldukça zaman alıcı ve emek yoğun bir süreçtir. Genellikle araştırmacılar tasarım sürecini ekran kayıtları veya sesli düşünme protokolleri üzerinden inceleyerek manuel kodlama yapmak zorunda kalmaktadır. Bu durum hem analiz süresini uzatmakta hem de çalışmaya dahil edilebilecek katılımcı sayısını sınırlandırmaktadır. Katılımcı sayısının sınırlı olması ise çoğu zaman istatistiksel değerlendirme yapılmasını zorlaştırmakta ve dolayısıyla sonuçların genelleştirilmesinin önünde bir engel oluşturmaktadır.

Diğer taraftan, mimari tasarım süreçleri giderek daha fazla dijital ortamlarda gerçekleşmektedir. Özellikle parametrik tasarım araçları ve görsel programlama ortamları, tasarımcıların geometrik ve mekânsal ilişkileri algoritmik olarak tanımlamasına olanak sağlamaktadır. Bu ortamlar aynı zamanda tasarım sürecinde gerçekleştirilen eylemlerin dijital izler olarak kaydedilmesine de imkân tanımaktadır. Bu durum tasarım sürecinin otomatik olarak kayıt altına alınması ve analiz edilmesi için önemli bir potansiyel sunmaktadır.

Bu araştırmada tasarım süreçlerinin manuel protokol analizine ihtiyaç duymadan otomatik olarak izlenebileceği ve analiz edilebileceği bir yöntemin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Dolayısıyla çalışmada parametrik tasarım ortamlarında gerçekleşen tasarım süreçlerinin analiz edilmesine yönelik otomatik bir protokol yöntemi önerilmektedir. Bu amaçla Grasshopper ortamına entegre edilmiş Python dili kullanılarak tasarımcının eylemlerini yakalayan ve protokol şeklinde kaydeden bir veri toplama sistemi geliştirilmiştir. Grasshopper tasarım alanında yaygın olarak kullanılan bir görsel programlama ortamıdır ve tasarımcıların düğüm tabanlı bir yapı içerisinde parametrik ilişkiler kurmasına olanak sağlamaktadır. Bu sayede algoritmik düşünme sürecinin doğası gereği tasarımcı fikirler, parametreler

ve kurallar arasında bağlantıları kurar ve bu dijital izler de rahatlıkla okunur ve otomatik olarak kaydedilir. Araştırma kapsamında Python dili kullanılarak geliştirilmiş bir analiz yöntemi ile kaydedilen bu süreçler otomatik olarak analiz edilebilmekte ve yorumlanabilir görsellere dönüştürülmektedir. Önerilen yöntemin uygulanabilirliğini göstermek amacıyla araştırma kapsamında iki öğrencinin katılımıyla bir pilot çalışma gerçekleştirilmiştir.

2. Yöntem

Bu çalışmada parametrik tasarım süreçlerinin otomatik olarak analiz edilebilmesi amacıyla bilgisayar destekli ortamda gerçekleştirilen tasarım adımlarını protokol olarak metin dosyası formatında (txt) kaydedip otomatik olarak analiz eden bir araç geliştirilmiştir (**Şekil 1**). Analiz için iki katmanlı analiz yöntemi önerilmiş ve test edilmiştir. Birinci adım olarak parametrik modelleme eylemlerini sınıflandıran parametrik kodlama şeması (PCS) kullanılmış (Kösencig, 2024), ikinci katmanda ise tasarım adımları süreç odaklı olarak geliştirilmiş bir kodlama şemasıyla analiz edilmiştir. Sistem, bileşen ekleme, bileşen silme, bileşenler arasında bağlantı kurma, parametre değerlerinin değiştirilmesi gibi işlemleri gerçek zamanlı olarak kaydeder ve her bir eylemi zaman damgası ile birlikte protokol dosyasına ekler. Böylece tasarım süreci, zamansal olarak sıralanmış bir etkileşim dizisi olarak yeniden yapılandırılabilir hâle gelmektedir.



Şekil 1: Protokol analiz sürecine ilişkin aşamalar

Önerilen yöntemin uygulanabilirliğini göstermek amacıyla bu araştırma kapsamında iki öğrencinin katılımıyla bir pilot çalışma gerçekleştirilmiştir. Katılımcılar parametrik tasarım süreci hakkında temel teorik ve uygulamalı bilgiye sahip ve Grasshopper programını kullanmayı temel düzeyde bilen İç Mimarlık Bölümü lisans üçüncü sınıf öğrencilerinden oluşmaktadır.

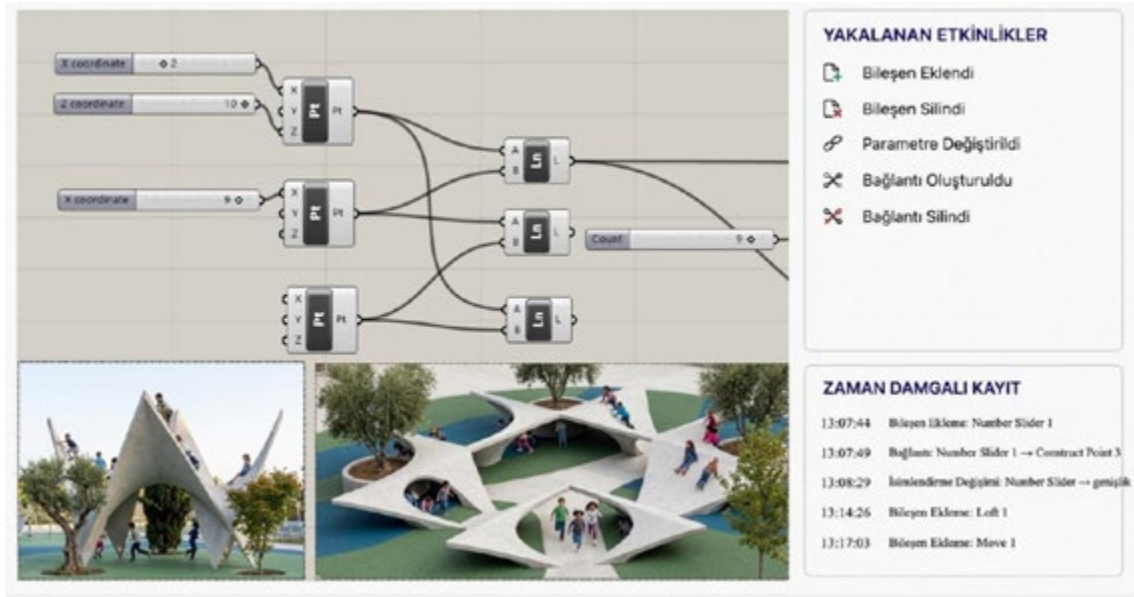
Pilot çalışmada katılımcılardan Grasshopper ortamında hiperbolik paraboloid yüzeyler kullanarak parametrik bir oyun alanı strüktürü tasarımları istenmiştir. Tasarım görevi kapsamında katılımcılar, doğrusal elemanlar kullanarak kurallı yüzey prensibine dayanan hiperbolik paraboloid geometrileri üretmiş ve bu yüzeyleri çoğaltarak modüler bir oyun alanı sistemi oluşturmuşlardır. Atölye yaklaşık 35 ve 55 dakikalık iki ayrı oturum olarak gerçekleştirilmiştir. Tasarım süreci boyunca geliştirilen protokol analiz yöntemi ile katılımcının gerçekleştirdiği tüm modelleme eylemleri otomatik olarak kaydedilmiştir. Sürecin tamamen otomatik olarak kaydedilip analiz edilmesi hedeflendiği için katılımcılardan sesli düşünme protokolü uygulaması istenmemiş, fakat protokol verilerinin yorumlanmasını kolaylaştırmak amacıyla Grasshopper bileşenlerinin anlamsal olarak isimlendirilmesi istenmiştir. Örneğin, katılımcılar tarafından tasarım sürecine uygun olarak parametre kontrolü için kullanılan kaydırıcı bileşenler “kullanıcının boyu” veya “elemanlar arası boşluk” gibi anlamlı isimlerle etiketlenmiştir.

Katılımcılar atölye sırasında ilk aşamada temel geometrik elemanları tanımlamış, noktalar ve doğrular kullanarak yüzey üretimi için gerekli geometrik altyapıyı oluşturmuşlardır. İkinci aşamada doğrusal elemanlardan oluşan kurallı yüzey yapısı oluşturulmuş ve hiperbolik paraboloid geometrileri elde edilmiştir. Katılımcılar son aşamada oluşturdukları yüzey modülünü çoğaltarak bir mekânsal sistem elde etmişlerdir. Katılımcılardan biri sürecin başında yüzey yüksekliği ile kullanıcı boyu gibi parametreleri belirleyip bu parametrelerin formla olan ilişkisini kurgularken, diğeri bu parametreleri daha sonra isimlendirme değişikliği yaparak tasarım ile ilişkilendirmiş ve tasarım varyasyonları

üretmek için bu değişkenlerde değişiklikler yapmıştır. Bu aşamada özellikle kaydırıcı değerlerinin sık sık değiştirilmesi, tasarımcının parametrik keşif süreci ile ilişkilendirilmiştir.

2.1. Otomatik Veri Toplama Sistemi

Araştırma kapsamında geliştirilen sistem, Grasshopper ortamında gerçekleşen tasarımcı hareketlerini gerçek zamanlı ve yazılı olarak kayıt altına almaktadır (**Şekil 2**). Grasshopper ortamında Python dili kullanılarak geliştirilen sistem aracılığıyla hesaplamalı tasarım ortamında gerçekleştirilen bileşen ekleme/silme, bağlantı oluşturma/silme, sayısal değişim ve isimlendirme değişimi gibi işlemler yazılı ve zaman damgalı olarak kayıt altına alınabilmektedir. Bu yöntemle elde edilen protokol verisi doğrudan yorumlanabilir değildir. Bu nedenle iki farklı kodlama şeması kullanılarak tasarım sürecini analiz eden bir sistem geliştirilmiştir.



Şekil 2: Otomatik veri toplama aşaması

2.2. Otomatik Veri Kodlama Sistemi

İlk katmanda, kaydedilen protokol verilerinin anlamlı biçimde yorumlanabilmesi için kullanılan PCS kodlama şeması, parametrik tasarım süreçlerinde sıkça karşılaşılan eylemleri kategorize etmeyi amaçlar. PCS kapsamında modelleme eylemleri; geometrik parametreler (GP), topolojik parametreler (TP), insan odaklı parametreler (HP), çevresel parametreler (EP) ve parametrik sistem eylemleri (PS) gibi kategoriler altında sınıflandırılmaktadır (Kösenc, 2024). Bu yaklaşım sayesinde Grasshopper gibi düğüm tabanlı parametrik tasarım ortamlarında gerçekleştirilen modelleme eylemleri sistematik bir biçimde yorumlanabilmektedir. PCS kodlama sistemi aşağıdaki yedi ana kategoriyi içermektedir (**Tablo 1**).

Tablo 1: Kodlama sistemi

Kod	Açılım	Açıklama	Örnek Veri
AE	SOYUT EYLEMLER	Sayı değeri, gibi matematiksel parametreleri ve sayı kaydırıcı, birim x gibi teknik ifadeleri kapsar	Bileşen eklendi: Component added: Unit x Parametre değiştirildi: Parameter changed: Number Slider
FO	FONKSİYONEL İŞLEMLER	Ölçekleme, öteleme gibi fonksiyonel işlemleri kapsar, buna cam programındakiler de dahildir	Bileşen eklendi: Component added: Scale

HP	İNSAN ODAKLI PARAMETRELER	Ergonomi, ölçek, psikoloji gibi parametreleri kapsar	Bileşen yeniden adlandırıldı: Rename component: Human Height Rename component: Shoulder Length
TP	TOPOLOJİK PARAMETRELER	Yanı, üstü, altı gibi ilişkileri kapsar	Bileşen eklendi: Component added: XY Plane Component added: Move
EP	ÇEVRESEL PARAMETRELER	Rüzgar, erozyon, sıcaklık yerçekimi gibi çevresel parametreleri kapsar	Bileşen eklendi: Component added: Sun Path
GP	GEOMETRİK PARAMETRELER	Çizgi nokta yüzey gibi geometrik parametreleri kapsar	Bileşen eklendi: Component added: Construct Point Component added: Line
PS	PARAMETRİK SİSTEM	Her türlü düğüm, ya da parametrenin, sistemin kopyalanması ya da düzenlenmesini kapsar	Grup oluşturuldu: Group created Bağlantı kuruldu: Connection: Number Slider 1 -- Pt 3

Araştırmanın ikinci katmanında dijital eylemlerin bilişsel karşılıkları süreç odaklı olarak kodlanmış ve yorumlanmıştır. Bu yaklaşım parametrik tasarım sürecindeki Fikir Üretimi, İlişki Kurma, Keşfetme, Sentezleme gibi kavramlara dayanmaktadır. Kodlama sistemi aşağıdaki şekilde oluşturulmuştur (**Tablo 2**):

Tablo 2: Dijital eylemler ve bilişsel karşılıkları

KOD	Açıklama	Örnek Veri
FİKİR ÜRETİMİ	Tasarım sürecinde yeni bir geometrik, parametrik veya kavramsal fikrin oluşturulmasına yönelik işlemleri kapsar.	Bileşen eklendi: Component added: Point
İLİŞKİ/BAĞLANTI KURMA	Bileşenler, parametreler ve geometriler arasında ilişkisel bağlantı kurulmasına yönelik işlemleri kapsar.	Bağlantı yaratıldı/silindi Connection created/deleted
KEŞİF	Parametrelerin değiştirilmesi ve alternatif tasarım olasılıklarının araştırılmasına yönelik işlemleri kapsar.	Kaydırıcı değeri değiştirildi Slider value changed
SENTEZ	Birden fazla geometrik ya da parametrik yapının bir araya getirilerek bütüncül bir sistem oluşturulmasına yönelik işlemleri kapsar.	Birleştirildi/yüzey oluşturuldu Merge / Loft

Araştırmada geliştirilen Python tabanlı analiz ve görselleştirme sistemi: otomatik kaydedilen log verisinin çıkarılması, etkinliklerin ayrıştırılması, PCS kodlama, süreç odaklı kodlama ve görselleştirme aşamalarından oluşmaktadır.

3. Arayüz Tasarımı

Araştırma kapsamında geliştirilen analiz sistemi henüz tam anlamıyla son kullanıcıya yönelik bir yazılıma dönüştürülmemiştir. Kavramsal olarak tasarlanan arayüzde sol sütunda Fikir Üretme, Keşif, İlişki/Bağlantı Kurma, Sentez gibi farklı bilişsel eylemlere dayanan kodlama şeması ve PCS kodlama şemasının içerdiği kodlar gösterilmektedir. Sol sütun verilerin analiz için hazırlanma aşamalarını

içermektedir. Bu sütunda protokol verisinin sisteme yüklenip segmentlere ayrıldığı, süreç ya da içerik odaklı kodlama şemasının seçildiği, hangi katılımcıların verilerinin analiz edileceğinin belirlendiği bölümleri içerir. Arayüzün ortasında kalan alanda ise analizlerin yapıldığı ve görselleştirildiği aşağıdaki bölümler yer almaktadır (**Şekil 3**):

- **Bilişsel Aktivite Dağılım Analizi:** Bu analizde ise katılımcılar farklı renklerle temsil edilmiştir. Tasarım süreci boyunca üretilen eylemler sınıflandırılmıştır.
- **Parametrik Aktivite Analizi:** Bu analiz ise katılımcıların tasarım sürecinde hangi tür parametreleri kullandığı (sayısal, geometrik, topolojik, çevresel vb.) ve bu parametrelerden hangisini ya da hangilerini odağa alan bir tasarım anlayışı benimsediği ortaya koyar.
- **Zamansal Bilişsel Aktivite Analizi:** Bu analizde yukarıda belirtilen eylemlerin zaman içindeki dağılımı ölçülmüştür. Her eylem türü ayrı bir renk ile temsil edilmiştir.
- **Linkograf:** Linkograf ise katılımcıların tasarım süreci boyunca gerçekleştirdiği eylemler ve kararlar arasındaki bağlantıları göstermektedir.
- **Tasarım Adımlarının Zamana Bağlı Analizi:** Bu analiz ise bu eylemlerin sayısının ve yoğunluğunun zamana bağlı değişimi ölçmüştür.

Arayüzün sağ alt bölümünde ise analiz sonuçlarını dışa aktarmayı sağlayan bir dışa aktarma butonu yer almaktadır.



Şekil 3: Analiz arayüz tasarımı

4. Bulgular

Analizler sonucunda oluşturulan **Şekil 4.1**, bilişsel davranış gruplarından keşif, fikir oluşturma gibi adımların hangi katılımcı için ne kadar yoğun olduğunun karşılaştırılmasına yardımcı olmaktadır. Katılımcı 1 tasarım süreci boyunca daha çok keşif odaklı çalışırken, katılımcı 2 daha çok fikir oluşturma

odaklı bir tasarım anlayışı benimsemiştir. Katılımcı 1 ise daha fazla sentez yaparak ve parametrelerle geometri arasında ilişki kuran bir tasarım sürecinden geçmiştir.

Şekil 4.2 ise PCS kodlama şeması ile tanımlanan kodların katılımcılar tarafından nasıl kullanıldığını analiz etmektedir. Bu analize göre katılımcı 1 daha çok soyut eylemlere ilişkin parametreleri ağırlıklı olarak kullanmış, daha sayısal bir tasarım anlayışı benimsemiştir. Katılımcı 2 ise geometrik parametrelerin kullanımının öne çıktığı neredeyse soyut ifadeler kadar yoğun olduğu görülmektedir. Bu noktada, katılımcı 2'nin form odaklı bir yaklaşım benimsediği görülmektedir. Bu analiz ayrıca her iki katılımcının da çevresel, fonksiyonel ve insan odaklı parametreleri tasarım sürecine neredeyse hiç dahil etmediklerini göstermektedir. Katılımcı 2'nin insan odaklı parametreler kullandığı görülmektedir. Bu sonuç yöntemin insan odaklı parametreleri yakalayabileceğini göstermektedir. Diğer taraftan veri toplama sürecinin bu anlamda bazı kısıtlar içerdiğini ve sayısal olarak katılımcının isimlendirme konusunda gösterdiği hassasiyete bağlı olduğunu da unutmamak gerekir.



Şekil 4: Protokol Analizi Sonuçları

Şekil 4.3 ve 4.4'te yer alan analizler ise her iki katılımcı için ayrı ayrı bilişsel davranış gruplarını kronolojik ve sayısal olarak görselleştirmektedir. Bu grafikler karşılaştırıldığında, belirgin bir şekilde keşif adımlarının oturumun sonuna doğru her iki katılımcıda da arttığı görülmektedir. Katılımcı 1 için

tasarımın tüm aşamalarında da keşif yaptığı, katılımcı 2'nin ise sonlara doğru keşifsel adımlara ağırlık verdiği görülmektedir. Bu durum katılımcı 2'nin katılımcı 1'e göre tasarlamadan önce yoğun bir düşünme sürecinden geçtiğini de ortaya koymaktadır. Bu analiz aynı zamanda fikir oluşturma bağlamında her iki katılımcının da sürece dağılmış bir profil yerine, aniden yükselen fikir oluşturma anları ile karakterize edilen bir örüntü oluşturduğunu göstermektedir.

Şekil 4.5 ve 4.6 ise tasarım adımlarının ve bağlantılarının otomatik olarak analiz edilip csv olarak kaydedilmesi ve daha sonra bu verilerin otomatik olarak linkograflara dönüştürülmesiyle oluşturulmuştur. Bu grafikler Katılımcı 1'in hem tasarımın erken aşamalarında hem de tasarım süreci boyunca katılımcı 2'ye göre daha ilişkisel düşündüğünü ortaya koymaktadır. Tasarım sürecinin sonlarında ise katılımcı daha çok tasarım alternatiflerini oluşturup incelemeyi tercih etmiş, dolayısıyla yeni bir fikir ve bağlantı oluşturmamıştır.

Şekil 4.7 ise tasarım adımlarının sayısal olarak atölye sürecine nasıl yayıldığını, varsa bekleme anlarının yakalanabileceğini göstermektedir. Ayrıca her bir katılımcının atölye süreleri bu grafikten okunabilmektedir. Bu analize göre katılımcı 1 yaklaşık 50 dakikalık, katılımcı 2 ise yaklaşık 30 dakikalık bir tasarım sürecinden geçmiştir. Ayrıca katılımcı 1 bekleme anlarının homojen olduğu daha dengeli bir tasarım sürecine sahipken, katılımcı 2 daha yoğun ve bekleme anlarının daha az yer aldığı bir tasarım sürecine sahiptir.

5. Sonuçlar ve Tartışma

Bu araştırma parametrik tasarım süreçlerinin analiz edilmesine yönelik otomatik bir yöntem geliştirmeyi ve Grasshopper ortamında geliştirilen bir protokol analiz yöntemi aracılığıyla tasarım sürecinin dijital izlerini yakalamayı amaçlamıştır. Bu amaç doğrultusunda yürütülen pilot çalışmada elde edilen bulgular önerilen protokol analiz yönteminin tasarım sürecini otomatik olarak kayıt altına alabileceğini ve parametrik tasarım davranışlarını analiz etmek için kullanılabileceğini göstermiştir.

Araştırma kapsamında geliştirilen bu yöntem sayesinde tasarım süreci sırasında oluşturulan parametreler, geliştirilen kurallar ve bu süreci domine eden kararlar kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. Her bir aşamaya ait ayrılan süreler incelenmiş ve görselleştirilmiştir. Geliştirilen sistem, manuel protokol analizine kıyasla veri toplama ve kodlama sürecini önemli ölçüde hızlandırma potansiyeline sahiptir. Bu çalışma aynı zamanda parametrik tasarım süreçlerini veritabanlı olarak incelemesi ve tasarım eylemlerine bilişsel yorum katmanı eklemesi bakımından literatüre katkı sunmaktadır.

Ayrıca bu araştırma parametrik tasarım sürecine yönelik eğitim alan öğrencilerin tasarım stratejilerinin ve öğrenme süreçlerinin daha ayrıntılı biçimde incelenmesine katkı sağlayabilir ve mimarlık eğitiminde sonuç ürününün yanı sıra ürünü ortaya çıkaran tasarım sürecinin de analiz edilmesine olanak sağlayarak ürün-süreç ilişkisini daha görünür hâle getirebilir. Geliştirilen sistem; parametrik tasarım eğitiminde öğrenci stratejilerinin, problem çözme davranışlarının ve parametrik düşünme biçimlerinin incelenmesine yönelik yapılandırılmış ve tekrar edilebilir bir araştırma yöntemi sunmaktadır. Bu yöntemin en önemli katkısı ise literatürde sıklıkla üzerinde durulan yöntemsel kısıtların aşılmasına, protokol analizinin çok katılımcılı yapısı sebebiyle ortaya çıkan istatistiksel analizlere izin verecek şekilde gerçekleştirilmesine ve ölçeklenebilir bir yaklaşım elde edilmesine imkân tanıyacaktır.

Diğer taraftan, geliştirilen sistem parametrik modelleme ortamlarında gerçekleştirilen eylemleri ayrıntılı biçimde kaydetse de, tasarımcının içsel düşünme süreçlerini tam olarak yakalayamamaktadır. Sesli düşünme protokollerinden farklı olarak, bu sistem çoğunlukla gözlemlenebilir etkileşimleri kaydeder; tasarım kararlarının arkasındaki motivasyonları, kavramsal niyetleri veya tasarımcı değerlendirmelerini tam olarak ortaya çıkaramaz. Modelde doğrudan temsil edilmeyen malzeme

veya deneyimsel tasarım kararları gibi unsurlar bu yöntemle doğrudan tespit edilemez. Ayrıca araştırma kapsamında gerçekleştirilen pilot çalışmanın yalnızca iki öğrenci ile gerçekleştirilmiş olması, elde edilen bulguların genellenebilirliğini sınırlamaktadır.

Gelecekte yapılacak çalışmalar, metodolojik olarak bu sistemin kısıtlarını azaltabilir ve daha fazla katılımcının dahil edildiği deneysel çalışmalar ile yöntemin tasarım bilişi araştırmalarındaki potansiyelini daha kapsamlı biçimde değerlendirebilir. Ayrıca bu sistem tasarım kararlarının arkasındaki motivasyonu ortaya çıkaracak birtakım çalışmalar ile geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

- Ericsson, K. A., & Simon, H. A. (1993). *Protocol Analysis : Verbal Reports As Data* (A Revised). MIT Press.
- Gero, J. S., & Kannengiesser, U. (2004). The situated function-behaviour-structure framework. *Design Studies*, 25(4), 373-391. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2003.10.010>
- Goldschmidt, G. (1990). Linkography: Assessing Design Productivity. İçinde R. Trappl (Ed.), *Cybernetics And Systems '90 - Proceedings Of The Tenth European Meeting* (ss. 291-299).
- Goldschmidt, G. (1991). The Dialectics of Sketching. *Creativity Research Journal*, 4(2), 123-143. <https://doi.org/10.1080/10400419109534381>
- Hay, L., Duffy, A. H. B., McTeague, C., Pidgeon, L. M., Vuletic, T., & Greal, M. (2017). A systematic review of protocol studies on conceptual design cognition: Design as search and exploration. *Design Science*, 3. <https://doi.org/10.1017/dsj.2017.11>
- Jabi, W. (2013). *Parametric Design for Architecture*. Laurence King Publishing.
- Köseici, K. Ö. (2024). *Sayısal Tasarım Ve Üretim Süreçlerinin Birlikteliğinin Bilişsel Aktiviteler Üzerindeki Etkisini Ölçmeye Dair Bir Yaklaşım Önerisi* [Doktora, Kocaeli Üniversitesi]. <https://doi.org/10.01.2024>
- Lee, J., Gu, N., & Williams, A. (2014). Parametric design strategies for the generation of creative designs. *International Journal of Architectural Computing*, 12(3), 263-282. <https://doi.org/10.1260/1478-0771.12.3.263>
- Lee, J. H., Gu, N., & Ostwald, M. J. (2015). Creativity and parametric design? Comparing designer's cognitive approaches with assessed levels of creativity. *International Journal of Design Creativity and Innovation*, 3(2), 78-94. <https://doi.org/10.1080/21650349.2014.931826>
- Lee, J. H., & Ostwald, M. J. (2019). Measuring cognitive complexity in parametric design. *International Journal of Design Creativity and Innovation*, 7(3), 158-178. <https://doi.org/10.1080/21650349.2018.1555492>
- Suwa, M., Gero, J. S., & Purcell, T. (1999). The Roles of Sketches in Early Conceptual Design Processes. İçinde *Proceedings of the Twentieth Annual Meeting of the Cognitive Science Society*. Routledge.
- Suwa, M., & Tversky, B. (1997). What architects see in their design sketches: A protocol analysis. *Design Studies*, 18, 385-403.
- Verstijnen, M., & Hennessey, J. (1998). Sketching and creative discovery. *Design Studies*, 519-546.
- 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>

Konut Birimindeki Koridorların Algısal Bir Değerlendirme Modeli

Cansu Taş¹ ; Ethem Gürer² 

^{1,2} İstanbul Teknik Üniversitesi

¹tas23@itu.edu.tr; ²egurer@itu.edu.tr

Özet

Çalışma, konut birimlerindeki koridorların yalnızca bir sirkülasyon hattı olarak değil, kullanıcı deneyimini etkileyen bir ara mekân olarak ele alınabileceğini tartışmaya açmak amacıyla algısal bir değerlendirme modeli önermektedir. Tasarım sürecinde çoğunlukla zorunlu boşluk olarak görülen ve oda tipolojileri kadar derinlemesine tartışılmayan koridorların, kullanıcının ölçek algısı ve mekânsal konforu üzerindeki belirleyici etkisi bu çalışmanın çıkış noktasını oluşturmaktadır. Model iki bileşenden oluşmaktadır. İlk bileşende koridor, genişlik, yükseklik, uzunluk, doğal ışık erişimi ve bağlandığı mekânların işlevsel çeşitliliği gibi nesnel fiziksel parametreler aracılığıyla sayısal olarak tanımlanmakta; bu parametrelerden bir "Nesnel Kapasite Skoru" elde edilmektedir. Bu skor, koridorun fiziksel gerçekliğini temsil eden ve öznel değerlendirme sonuçlarıyla karşılaştırmalı olarak okunabilen bir referans değeri işlevi görmektedir. İkinci bileşende katılımcılara farklı yöntemlerle temsil edilmiş konut koridorunu ve kısmi olarak konutun diğer alanlarını içeren görseller sunulmaktadır. Görsel ile birlikte sunulan anketlerde katılımcılar her görsel için ferahlık, kapalılık, mahremiyet, kullanışlılık ile ışık niteliği olmak üzere beş algısal parametre 0-100 arasında puanlamaktadır. Bu parametreler, çevre psikolojisi literatüründe iç mekânların deneyimlenmesini belirleyen temel boyutlar olarak tanımlanmıştır. Ardından elde edilen puanlar, literatürden türetilen bir kural tabanına dayanan bulanık çıkarım yöntemiyle işlenerek tek bir "Ara Mekân Potansiyeli" değerine dönüştürülmektedir. Konut koridorlarının algısını temsil düzleminde ölçmek için tasarlanmış model, farklı temsil biçimlerinin bu algı üzerindeki olası etkilerini de ölçmeyi hedefler. Bu doğrultuda değerlendirme iki ayrı temsil modu üzerinden yürütülmektedir. Birinci modda katılımcılara ortografik çizimler gösterilmektedir. İkinci modda ise aynı koridor kesit perspektif çizimi aracılığıyla sunulmaktadır. Kesit perspektifin bu çalışmada ikinci temsil modu olarak seçilmesi, hem incelenen nesnenin ara mekân olması hem de bu aracın plan ile tam mekânsal deneyim arasında konumlanması nedeniyle. Her iki moddan elde edilen "Ara Mekân Potansiyeli" değerleri karşılaştırılarak temsil kaynaklı algısal kayma sayısal olarak ölçülmekte; bu fark "Algısal Kayma İndeksi" ile ifade edilmektedir.

Çalışma kapsamında önerilen modelin uygulanabilirliğini göstermek amacıyla varsayımsal bir konut koridoru üzerinde örnek bir hesaplama gerçekleştirilmektedir. Ampirik uygulama ilerideki çalışmalara bırakılmış olup bu aşamada nesnel ve öznel bileşenlerin birlikte nasıl işlediği ve temsil modları arasındaki kaymayı hangi kural kombinasyonlarının ürettiği tartışılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Fuzzy Logic, Spatial Perception, Representation, Typology.

A Perceptual Evaluation Model for Corridors in Residential Units

Cansu Taş¹ ; Ethem Gürer² 

^{1,2} Istanbul Technical University

¹tas23@itu.edu.tr; ²egurer@itu.edu.tr

Abstract

This study proposes a perceptual evaluation model to argue that residential corridors should be considered not just as circulation paths, but as in-between spaces that affect user experience. During the design process, corridors are often treated as mandatory void and lack the in-depth discussion dedicated to room typologies. Their determining effect on the user's perception of scale and spatial comfort forms the starting point of this research. The model consists of two components. In the first component, the corridor is numerically defined through objective physical parameters such as width, height, length, access to natural light, and the functional diversity of connected spaces. An "Objective Capacity Score" is derived from these parameters. This score acts as a reference value representing the physical reality of the corridor, which can be evaluated comparatively against subjective results. In the second component, participants are presented with visuals of the residential corridor and partial views of other living areas, generated through different representation methods. In the accompanying questionnaires, participants rate five perceptual parameters for each visual on a scale of 0-100; spaciousness, enclosure, privacy, utility, and light quality. These parameters are defined in the environmental psychology literature as the core dimensions that shape the experience of interior spaces. The obtained scores are then processed using a fuzzy inference method based on a literature-derived rule base, transforming them into a single "In-between Space Potential" value. Designed to measure the perception of residential corridors at level of representational, the model also aims to assess the potential effects of different representation formats on this perception. Therefore, the evaluation is conducted using two separate representational modes. In the first mode, participants are shown orthographic drawings. In the second mode, the same corridor is presented through a section perspective drawing. The section perspective is chosen as the second mode because the examined object is an in-between space, and this representational tool acts as a bridge between the plan and the actual spatial experience. By comparing the "In-between Space Potential values" obtained from both modes, the perceptual shift caused by the representation is measured numerically; this difference is expressed as the "Perceptual Shift Index." To demonstrate the applicability of the method, the study conducts a sample calculation on a hypothetical residential corridor. Empirical implementation is left for future studies; at this stage, the discussion focuses on how the objective and subjective components interact and which rule combinations generate the shift between representational modes.

Keywords: Fuzzy Logic, Spatial Perception, Representation, Typology.

1. Giriş

Konut içi koridorlar tasarım sürecinde çoğunlukla zorunlu bir sirkülasyon boşluğu olarak ele alınmakta, oda tipolojileri kadar tartışılmamaktadır. Oysa bu mekânlar kullanıcının ölçek algısı, mekânsal konforu ve psikolojik iyi oluşu üzerinde belirleyici bir role sahiptir (Alhmoud vd., 2025). Modern apartmanlarda koridorların daraldığı, penceresizleştiği ve tek işlevli bir geçiş alanına dönüştüğü gözlenmektedir. Konut kalitesi araştırmaları da iç mekân konfigürasyonu ve dolaşım kurgusunun kullanıcı tatminini doğrudan etkilediğini göstermektedir (Yıldız ve Türkmen, 2023). Çalışma konut koridoru yalnızca geçilen bir hat değil, potansiyel taşıyan bir mekânsal birim olarak değerlendirilebilmek adına nesnel fiziksel nitelikler ile öznel kullanıcı algısını ayrı ayrı ölçen, ardından bu iki boyutu karşılaştıran bir çerçeve önermektedir. Hillier (1996), dağıtıcı mekânların salt geçiş niteliğinin ötesine geçerek hareketi kendi üzerine çektiğini göstermiştir bu kavram, koridorun topolojik potansiyelinin nicelleştirilmesine kuramsal zemin sağlar.

Önerilen model koridor algısını, temsil edilen koridor üzerinden ölçmektedir. Evans (1997) mimari çizimin mekânı nötr biçimde aktarmak yerine kuran bir dil olduğunu, Hermund vd. (2018) ise aynı mekânın farklı temsil araçlarıyla algısal değerlendirmeleri anlamlı ölçüde farklılaştırdığını ortaya koymaktadır. Bu çalışma iki soruyu bir arada ele almaktadır: koridorun nesnel fiziksel nitelikleri ile kullanıcının deneyimlediği ara mekân potansiyeli ne ölçüde örtüşmektedir ve ortografik çizim ile kesit perspektif, aynı koridorun algısını nasıl farklılaştırmaktadır?

1.1. Bulanık Mantık Temelleri

Mimarlıkta değerlendirme süreçleri çoğu zaman belirsiz bilgiye dayanır; “biraz dar ama aydınlık” ya da “dar ama kullanışlı” gibi ifadeler keskin ikili mantıkla modellendiğinde arada kalan durumlar ve nüanslı bilgiler indirgenir. Mamdani ve Assilian (1975) tarafından geliştirilen bulanık çıkarım yöntemi, dilsel değişkenleri üyelik fonksiyonları aracılığıyla nicel biçimde işleyerek bu soruna bir çözüm üretmiştir. Ciftcioglu ve Durmisevic (2001), mimari tasarım girdilerinin büyük ölçüde niteliksel olduğunu ve bulanık mantığın bu tür verileri modellemek, tasarım değişkenlerinin görece önemini duyarlılık analiziyle belirlemek için etkili bir araç olduğunu göstermiştir. Bunlardan yola çıkarak modelin değerlendirme sistemi olarak bulanık çıkarım sistemi tercih edilmiştir. Mamdani tipi Bulanık Çıkarım Sistemi (FIS), beş algısal parametre üzerinden toplanan öznel puan verilerini iki latent boyut çerçevesinde bütünleştirerek tek bir Ara Mekân Potansiyeli (AMP) değerine dönüştürmektedir. Mekânsal Konfor (SC) boyutu mekânın “yaşanabilir” hissettirdiği ölçüyü, İşlevsel Davet (FI) boyutu ise mekânın aktif kullanımı davet ettiği ölçüyü temsil eder. Bu yapı, Kaplan ve Kaplan’ın (1989) çevre tercihi modelindeki tutarlılık ile karmaşıklık sinerjisini koridor ölçeğine taşıyan bir çerçeve olarak okunabilir.

2. Model

Önerilen model nitel ve nicel unsurları bir arada barındıran karma bir yapıdır. Nesnel bileşen olan Nesnel Kapasite Skoru (Sobj), koridorun fiziksel ve topolojik niteliklerini sayısal olarak kodlarken öznel bileşen olan Ara Mekân Potansiyeli (AMP), katılımcı algı verilerinin Mamdani Bulanık Çıkarım Sistemi (FIS) aracılığıyla işlenmesinden elde edilmektedir.

2.1. Nesnel Parametreler

Koridor tipolojilerini sayısal olarak tanımlamak amacıyla beş parametre seçilmiştir. Bu seçimde belirleyici olan iki ölçüt her parametrenin koridor deneyimini doğrudan şekillendirdiğine ilişkin literatürde dayanağın bulunması ve her birinin bağımsız bir veri kaynağına dayandırılabilmesidir. Boyutsal nitelikler yani genişlik (W), yükseklik (H) ve uzunluk (L); mekânsal konfor algısının üç temel fiziksel belirleyicisini oluşturmakta; bunlara doğal ışık erişimini temsil eden Pencere Varlığı (PV) ile koridorun bağlandığı mekânların işlevsel çeşitliliğini kodlayan Topolojik Potansiyel (TP) eklenmektedir. Genişlik ve yükseklik için normalizasyon sınırları TS 9111’den alınmıştır (Turkish Standards Institution, 2011) standart, erişilebilirlik açısından minimum ve konfor açısından üst eşiği

birlikte tanımlamaktadır. Uzunluk ters ölçeklenmiştir: kısa koridorlar durma ve kalma eylemlerine elverişli bir ara mekân niteliği taşıırken uzun koridorlar Hillier'in terminolojisiyle 'a-space', yani bir eylem barındırmayan yalnızca bir yerden bir yere varılmak için kullanılan, işlevine kilitlenmektedir (Kılıç Ataselim, 2024). Pencere Varlığı (PV) ikili değişken olarak kodlanmıştır. Doğal ışığa erişimin iç mekân işlev algısı üzerindeki belirleyici etkisi Knez'in (1995) mekândaki ışığın insan ruh hali ve bilişine etkisini araştıran çalışmalarıyla desteklenmektedir. İlk dört parametrenin normalize formülleri, Topolojik Potansiyel (TP) ile birlikte **Tablo 1'**de sunulmaktadır.

Tablo 1: Nesnel Parametreler ve Sayısal Aralıklar

Parametre	Sembol	Formül / Kodlama
Genişlik	W	$(W - 0,8) / 0,7$
Yükseklik	H	$(H - 2,2) / 1,3$
Uzunluk	L	$1 - (L - 2) / 6$
Pencere Varlığı	PV	0 = yok · 1 = var
Topolojik Potansiyel	TP	$(\text{degree} \times H' - \min) / (\max - \min)$

Topolojik Potansiyel (TP) koridora bağlı mekân sayısı (degree) ile Shannon Çeşitlilik İndeksi'nin (H') (Shannon, 1948) çarpımının normalize edilmesiyle elde edilmektedir:

$$H' = -\sum p_i \cdot \ln(p_i); TP_{pa}^W = \text{degree} \times H'; TP = (TP_{pa}^W - \min) / (\max - \min) \quad (1)$$

Bu hesaplama, tek bir işlev tipine bağlanan bir koridoru, birden çok türde mekâna hizmet eden bir koridordan topolojik düzeyde ayırt edebilmeyi sağlamaktadır. Beş normalize parametrenin eşit ağırlıklı aritmetik ortalaması Nesnel Kapasite Skoru'nu (Sobj) vermektedir:

$$Sobj = (W_{\text{norm}} + H_{\text{norm}} + L_{\text{norm}} + PV + TP) / 5 \quad (2)$$

2.2. Temsil Modları

Mekân okuması iki farklı temsil modu üzerinden kurgulanmaktadır. Rasyonel, ölçekli ve soyut mimari okumanın temelini oluşturan ortografik temsilde katılımcı mekânı iki boyutlu çizimler üzerinden analiz edip üç boyutlu haliyle zihninde canlandırmak durumunda kalırken, derinlik ve oransal baskı hissi bu süreçte büyük ölçüde soyutlanır. Buna karşılık, plan ve kesitin soyut geometrisini perspektifin bedensel deneyime yakın sürekliliğiyle harmanlayan kesit perspektif, Rohan'ın (2017) da işaret ettiği gibi mekânı analitik ve deneyimsel boyutlarıyla eşzamanlı olarak sunar. Özellikle koridor gibi dar ve doğrusal bir mekânın algılanmasında kesit perspektif, yalnızca boyutsal veriyi iletmekle kalmayıp, oransal baskıyı ve mekân sekansını doğrudan aktaran bir 'ara temsil' işlevi görür. Dolayısıyla, ara mekânın bir ara temsille sunulması, yani temsil edilen nesne ile aracın aynı epistemolojik zemini paylaşması için ikinci temsil türü olarak kesit perspektif tercih edilmiştir.

2.3. Algısal Parametreler

Katılımcı verileri beş parametre üzerinden 0-100 aralığında doğrudan sayısal puanlama ile toplanmaktadır. FIS giriş değişkenleri sürekli bir evren üzerinde tanımlı olduğundan kategorik ölçümün iki katman arasına gereksiz bir dönüşüm adımı oluşturmaması adına sürekli sayısal ölçüm tercih edilmiştir. Ferahlık, kapalılık, mahremiyet, kullanışlılık ve ışık niteliği olarak ifade edilen parametreler, iki latent boyutun kavramsal içeriğinden hareketle belirlenmiştir (**Tablo 2**).

Mekânsal Konfor (SC) boyutu, bir mekânda yaşanabilme hissini belirleyen üç parametreyi bir araya getirmektedir. Ferahlık, Stamps'ın (2009) iç mekânlarda ferahlık algısını belirleyen fiziksel değişkenleri deneysel olarak sıraladığı çalışmadan türetilmiş olup SC'nin pozitif kutbunu oluşturmaktadır. Kapalılık ise ferahlığın yalnız tersi değil, Stamps ve Smith'in (2002) "görünür yüzeylerle çevrelenme derecesi"

olarak kavramsallaştırdığı, onunla çakışmayan bağımsız bir boyuttur. Evans ve McCoy (1998) yüksek kapalılığın duraklama davranışını bastırdığını göstermiştir. Mahremiyet bu iki kutup arasında dengeleyici bir işlev taşır: Altman'ın (1975) optimum mahremiyet modelinde ifadesini bulan bu gerilim, parametrenin kural tabanında neden her zaman ferahlıkla birlikte kodlandığını açıklamaktadır.

İşlevsel Davet (FI) boyutu, mekânın aktif kullanımı ne ölçüde davet ettiğini iki parametre üzerinden ölçer. Kullanışlılık, Gibson'ın (1979) 'affordance' yani kullanım olanağı kuramı ve Gehl'in (2011) isteğe bağlı etkinlikler çerçevesiyle bağlantılıdır. Bir mekân fiziksel olarak oturmayı, durmayı ya da beklemeyi önerdiği ölçüde kullanışlı bulunur. Işık niteliği bu davet işlevinin görsel boyutunu oluşturur.

Tablo 2: Algısal Parametreler ve Latent Boyutlar

Parametre	Sembol	Latent Boyut	Rol
Ferahlık	P_FER	SC	+ katkı
Kapalılık	P_KAP	SC	- katkı
Mahremiyet	P_MAH	SC	Moderatör
Kullanışlılık	P_KUL	FI	+ katkı
Işık Niteliği	P_ISI	FI	+ katkı

2.4. Ölçme Aracı ve Katılımcı Profili

Önerilen modelde veri toplama aracı olarak anket kullanılmaktadır. Katılımcılara her iki temsil moduna ait koridor görseli sunulmakta ve her görsel için beş algısal parametre 0-100 aralığında bir tam sayı ile puanlanmaktadır. Değerlendirmenin başında parametreler ve uç noktaları tanımlanmakta, böylece katılımcıların aynı ölçek üzerinden değerlendirme yapmaları sağlanmaktadır (Tablo 3).

Tablo 3: Anket Yapısı ve Ölçek Uç Noktaları

Kod	Boyut / Soru	0 ucu	100 ucu
P_FER	Bu koridorun mekânsal genişlik düzeyini iki uç arasında konumlandırın.	Dar / sıkışık	Geniş / ferah
P_KAP	Koridor duvarlarının yarattığı çevreleme hissini iki uç arasında konumlandırın.	Açık, çevrili değil	Kapalı, tamamen çevrili
P_MAH	Koridoru kullananların görsel mahremiyetini iki uç arasında konumlandırın.	Tamamen görünür, korumasız	Korunaklı, ayrışık
P_KUL	Bu koridor durmak ya da beklemek için ne ölçüde elverişli bir zemin sunuyor?	Yalnızca geçişe uygun	Durmak ve kalmak için elverişli
P_ISI	Bu koridordaki aydınlatma niteliğini değerlendirin.	Yetersiz, loş	Yeterli, rahat görüş sağlıyor

Temsil modlarının sunuş sırası, sıra etkisini kontrol altına almak amacıyla katılımcılar arasında dengelenmektedir: katılımcıların yarısına önce ortografik çizim, yarısına önce kesit perspektif gösterilmektedir. Her iki görselin değerlendirme sırasında eş zamanlı görülebilmesi yani karşılaştırmalı okuma yapılamaması modun bağımsız bir algısal veri üretmesi için elzemdir. İlk etapta hedef katılımcı grubu mimarlık öğrencileridir. Bu tercih, modelin iki temsil aracını da okuyabilecek temsil okuryazarlığına sahip bir grubun değerlendirmesine dayanması gerektiği varsayımından

kaynaklanmaktadır. Modelin farklı uzmanlık gruplarına uygulanabilirliği ilerideki çalışmalarda sınanması planlanmaktadır.

2.5. Mamdani Bulanık Çıkarım Sistemi

Beş algısal parametrenin katılımcı puanlarını tek bir Ara Mekân Potansiyeli (AMP) değerine dönüştürmek, keskin eşiklerin yol açacağı kaba sıçramaları önleyen bir çıkarım mimarisi gerektirir. Bu çalışmada Mamdani ve Assilian'ın (1975) önerdiği bulanık çıkarım yöntemi benimsenmiştir. Temel gerekçe, yöntemin girişleri sayısal olarak işlerken sonucu dilsel terimler üzerinden üretmesi ve bu dilsel çıktının mimari değerlendirme mantığıyla örtüşmesidir. Sistem iki latent boyutu yani Mekânsal Konfor (SC) ve İşlevsel Davet (FI)'i aynı çerçevede işler. Çıkış, centroid yöntemiyle $AMP \in [0, 100]$ aralığına durulaştırılır:

$$\frac{\int \mu_C(z) \cdot z \, dz}{\int \mu_C(z) \, dz} \quad (3)$$

2.5.1. Üyelik fonksiyonları

Her değişken için üçgensel formda üç dilsel terim tanımlanmıştır: Düşük, Orta ve Yüksek (**Tablo 4**).

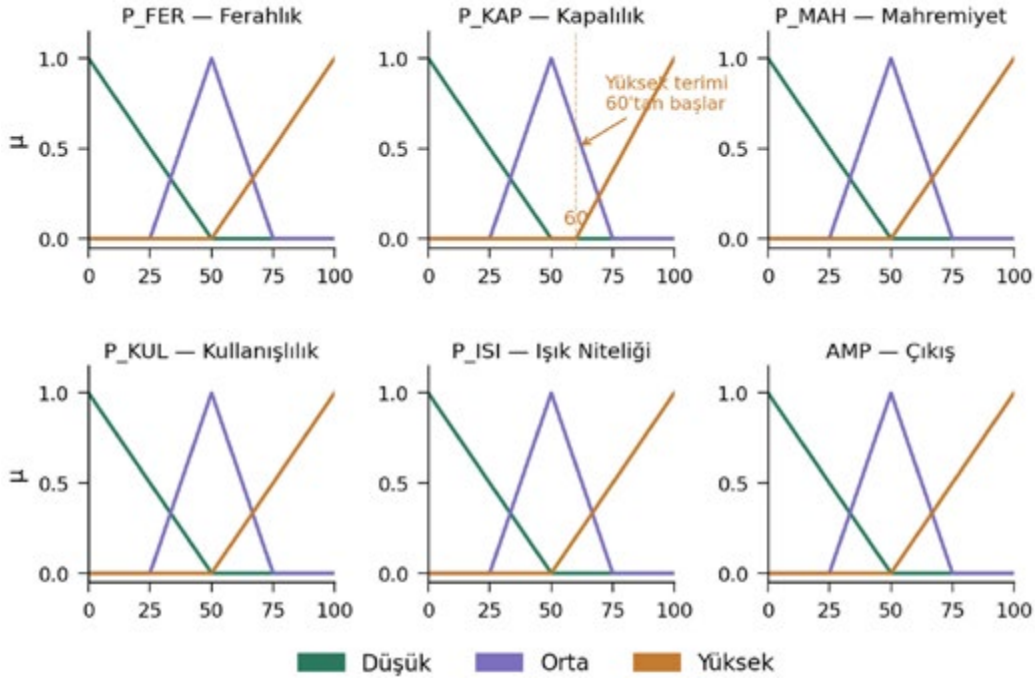
Tablo 4: Üyelik Fonksiyonları

Değişken	Terim	a	b	c
P_FER / P_MAH / P_KUL / P_ISI	Düşük	0	0	50
P_FER / P_MAH / P_KUL / P_ISI	Orta	25	50	75
P_FER / P_MAH / P_KUL / P_ISI	Yüksek	50	100	100
P_KAP	Düşük	0	0	50
P_KAP	Orta	25	50	75
P_KAP	Yüksek (kaydırılmış)	60	100	100
AMP (çıkış)	Düşük	0	0	50
AMP (çıkış)	Orta	25	50	75
AMP (çıkış)	Yüksek	50	100	100

(a = sol sınır, b = tepe, c = sağ sınır)

Üçgensel form, sürekli derecelenme ile yorumlanabilirliği bir arada sunar. Üç terimle sınırlı kalınması, algısal ayırım eşiklerinin bu ayrıntı düzeyinde karşılanmasındandır; daha ince bir ayırım, anlamlı bilgi artışı sağlamadan kural tabanını büyütecektir. Tüm giriş değişkenlerinin evreni $U = [0, 100]$ 'dür ve katılımcıların tam sayı puan girdiği ölçme aracıyla birebir örtüşür.

Tasarımda yalnızca bir parametreye özgü düzeltme bulunmaktadır. P_KAP'ın Yüksek terimi, diğer parametrelerdeki 50 yerine 60'tan başlar (**Şekil 1**). Bu tercihin gerekçesi 50-60 arası bir kapalılık puanının algısal olarak orta düzeyde baskı hissine karşılık gelmesidir. Bu aralıkta Yüksek teriminin devreye girmesi, eliminatör kuralların gereğinden erken ateşlenmesine ve modelin AMP'yi haksız biçimde düşürmesine yol açar. Kaydırmanın işlevselliği bu çalışmanın devamındaki T1 uygulamasında doğrulanmaktadır, Mod 1'de P_KAP = 55 olan katılımcı bu sınırın altında kaldığından eliminatör kural ateşlenmemiştir.



Şekil 1: Üyelik fonksiyonları. (Python/matplotlib ile oluşturulmuştur.)

2.5.2. Meta kurallar

Kural tabanından bağımsız olarak, tüm kural kombinasyonları boyunca geçerli üç kısıt tanımlanmıştır. Bunlar kural tabanının çalıştığı uzayı sınırlayan tavanlardır. İşlevleri ise mimari olarak imkânsız ya da kuramsal temelden yoksun çıktıları baştan elemektir. “M1-P_FER= Düşük” koşulunda AMP, Orta düzeyin üzerine çıkamaz. 0,8 m’nin altındaki koridor genişliği tek kişilik geçiş için bile konforlu değildir bu nedenle yüksek AMP fiziksel olarak savunulamaz. Aynı tavan durumu, “M2-P_KAP = Yüksek” durumu için uygulanır. Hillier’in (1996) geçiş alanı tanımı ile Evans ve McCoy’un (1998) yüksek kapalılığın duraklama davranışını bastırdığına ilişkin bulgusu bu kısıtın zeminini oluşturur. Belirlenen diğer kısıta göre “M3-Mahremiyet” tek başına AMP yönünü belirleyemez. Altman’ın (1975) optimum mahremiyet modelinde ifadesini bulan bu ilke gereği, kural tabanındaki her P_MAH koşulu ferahlıkla birlikte yazılmak zorundadır yani bu modelde mahremiyet değişkeni ancak başka bir değişkenle birlikte yorumlandığında anlamlı çıktı üretir.

2.5.3. Kural tabanı

Kural tabanı, epistemik kesinlik azaldıkça ağırlığı düşen dört katman olarak kurgulanmıştır. Bu yapı, ilgili kuramlardan üretilebilen ilişkilerin yüksek ağırlıkla, paradoks ya da çelişkili senaryoların ise daha düşük güvenle temsil edilmesini sağlar.

İlk katman (E1, E2, D1, D2), belirli kombinasyonların koridoru yapısal olarak potansiyelden dışladığı durumları kapsar. Ferahlık düşük ve kapalılık yüksekse (E1) ya da ferahlık düşük olduğu halde kullanışlılık ve ışık niteliği de yoksa (E2), koridorun ara mekân işlevi görme koşulları fiziksel olarak ortadan kalkmaktadır. Çünkü geçilmesi zor, baskı hissi uyandıran ve yalnızca geçiş sağlayan bir mekân yüksek potansiyel taşıyamaz. Bu durum M1 ve M2 meta-kurallarıyla da desteklenmektedir. D1 ve D2 aynı mantığı kapalılık-ışık ve kapalılık-kullanışlılık üzerinden genişletir. Eliminatör kurallar 1,0 ağırlıkla çalışır çünkü koşul karşılandığında Düşük AMP çıktısı kaçınılmazdır.

İkinci katman (Y1-Y4), kuramsal açıdan doğrudan türetilen olumlu konfigürasyonları temsil eder. Ferahlık yüksek, kullanışlılık yüksek ve kapalılık baskısı yoksa (Y1) ya da ferahlık yüksek ışık niteliği ve

kullanışlılıkla birleşiyorsa (Y2), koridor Mekânsal Konfor ve İşlevsel Davet boyutlarını aynı anda karşılamaktadır. Kaplan ve Kaplan'ın (1989) çevre tercih modelinde iyi değerlendirilen mekânlar hem tutarlıdır yani bir diğer deyişle içinde ne olduğu anlaşılır, rahat dolaşılır; hem de karmaşıktır yani içinde durulacak, merak edilecek bir şey vardır. Bu ikili koşul, Y katmanındaki her kuralın P_FER yüksek iken bir FI değişkenini de kapsama almasının gerekçesidir. S1 özel durum kuralı ferahlık, mahremiyet ve kullanışlılığın aynı anda yüksek olduğu senaryoyu kodlar; sıklığı nedeniyle 0,9 ağırlık almıştır.

Dördüncü katman (O1-O4), bir boyutun güçlü olduğu ama ötekinin zayıf kaldığı çelişkili senaryoları kapsar. Ferahlık yüksek ama kapalılık da yüksekse (O1) bu ikircikli deneyim orta düzey potansiyele karşılık gelmektedir. Aynı biçimde dört parametrenin de orta düzeyde kaldığı bir durumda (O2) net bir çıktı üretmek mümkün değildir. Bu kurallar 0,7 ağırlıkla çalışır senaryolar gerçek olmakla birlikte çıktı belirsizdir. Kural tabanının tamamına **Tablo 5'te** yer verilmiştir.

Tablo 5: FIS Kural Tabanı

Kural	Koşul	Çıktı	Ağ.	Katman
E1	P_FER Düşük VE P_KAP Yüksek	AMP Düşük	1,0	I
E2	P_FER Düşük VE P_KUL Düşük VE P_ISI Düşük	AMP Düşük	1,0	I
D1	P_FER Düşük VE P_KAP Yüksek VE P_ISI Düşük	AMP Düşük	1,0	I
D2	P_KAP Yüksek VE P_MAH Yüksek VE P_KUL Düşük	AMP Düşük	1,0	I
Y1	P_FER Yüksek VE P_KUL Yüksek VE P_KAP Düşük	AMP Yüksek	1,0	II
Y2	P_FER Yüksek VE P_ISI Yüksek VE P_KUL Yüksek	AMP Yüksek	1,0	II
Y3	P_FER Yüksek VE P_MAH Orta VE P_KUL Orta	AMP Yüksek	1,0	II
Y4	P_FER Orta VE P_KUL Yüksek VE P_ISI Yüksek VE P_KAP Düşük	AMP Yüksek	1,0	II
S1	P_FER Yüksek VE P_MAH Yüksek VE P_KUL Yüksek	AMP Yüksek	0,9	III
O1	P_FER Yüksek VE P_KAP Yüksek	AMP Orta	0,7	IV
O2	P_FER Orta VE P_KUL Orta VE P_ISI Orta VE P_KAP Orta	AMP Orta	0,7	IV
O3	P_FER Düşük VE P_MAH Yüksek VE P_KUL Orta	AMP Orta	0,7	IV
O4	P_ISI Yüksek VE P_FER Orta VE P_KAP Orta	AMP Orta	0,7	IV

“VE” operatörü için minimum seçilmiştir, bir kuralda birden çok koşul varsa zincirin en zayıf halkası kuralın ateşleme gücünü belirler. Böylece “hem ferah hem kullanışlı” koşulunu içeren bir kural, ferahlık güçlü ama kullanışlılık zayıfsa yalnızca zayıf olan kadar ateşlenebilir. Bu sayede kısmi kanıt kuralı şişiremez. Agregasyon için “maksimum” operatörü kullanılmaktadır dolayısıyla aynı çıktı terimini destekleyen birden fazla kural varsa en güçlü olan belirleyici olur.

2.6. Modelin Uygulama Adımları

Modelin uygulanması altı adımda gerçekleşmektedir: (i) Nesnel parametreler hesaplanarak Sobj elde edilir. (ii) Her tipoloji için Mod 1 ve Mod 2 gösterim senaryoları hazırlanır. (iii) Anket aracılığıyla her iki

mod için algısal puanlar elde edilir. (iv) Girilen değerler FIS'e aktararak her tipolojixtemsil modu kombinasyonu için AMP hesaplanır. (v) Algısal Kayma İndeksi hesaplanır:

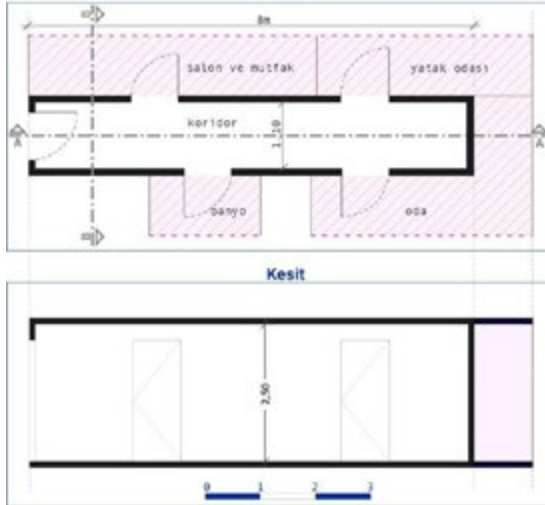
$$\Delta AG = |AMP_{mo}^{d1} - AMP_{mo}^{d2}| \quad (4)$$

(vi) Sobj ile AMP değerleri karşılaştırılarak nesnel nitelikler ve öznel deneyim arasındaki örtüşme ve ayrılmalar tipoloji özelinde yorumlanır.

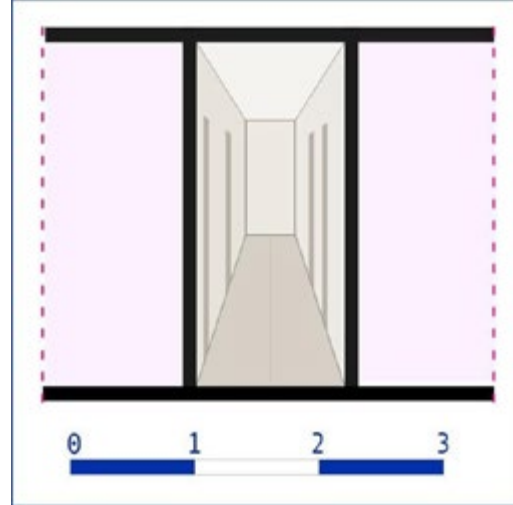
3. Uygulama

Modelin işleyişini somutlaştırmak amacıyla, varsayımsal iki odalı bir daireye ait konut koridoru tipolojisi (T1) üzerinde örnek bir hesaplama yürütülmüştür. Katılımcı puanları ampirik veri niteliği taşımayan varsayımsal değerlerdir. Bu aşamada nesnel ve öznel bileşenlerin birlikte nasıl çalıştığı ile temsil modları arasındaki algısal kaymayı hangi kural kombinasyonlarının ürettiği tartışılmaktadır.

T1'in temsili için plan ve kesiti kapsayan ortografik çizim (**Şekil 2**) ve kesit perspektifi (**Şekil 3**) üretilmiştir. Her iki çizim de yalnızca koridor alanı ve ona açılan kapıların konumu hakkında tam bilgi verecek biçimde kurgulanmıştır. Kapıların hangi odalara ait olduğu, koridorun topolojik ilişkisini anlamak için gerekli olduğundan temsile eklenmiştir. Buna karşın odaların tam boyutlarına ve iç düzenlemelerine yer verilmemiştir. Bu tercihin iki temel gerekçesi vardır. Birincisi, değerlendirmenin odağının koridor olması ve odaların büyüklük ya da donanım bilgisinin katılımcıda konut birimi hakkında genel bir yargı oluşturarak koridor algısını dolaylı yoldan etkileyebilecek olmasıdır. İkincisi, her iki temsil biçiminin de aynı mekânsal veriyi aktarması ve karşılaştırmanın yalnızca temsil biçiminden kaynaklanan farkları ölçmesi gerekliliğidir.



Şekil 2: T1'in Plan ve A-A Kesit Çizimleri



Şekil 3: T1'in B-B Kesit Perspektif Çizimi

3.1. Nesnel Profil

T1 koridoru düz biçimli olup $W = 1,10$ m, $H = 2,50$ m ve $L = 8,0$ m olarak tanımlanmıştır, koridora doğal ışık girişi bulunmamaktadır ($PV = 0$). Koridor dört kapıyla bağlanmaktadır: salon ($p = 1/4$), iki yatak odası ($p = 2/4$) ve banyo ($p = 1/4$). Shannon Çeşitlilik İndeksi Denklem (1)'den:

$$H'_{t1} = -(0,25 \ln 0,25 + 0,50 \ln 0,50 + 0,25 \ln 0,25) = 1,040 \quad (5)$$

Bu dağılım üç farklı işlev kategorisini çeşitli biçimde temsil etmekte ve topolojik ham değeri olarak vermektedir.

$$TP_{pa}^W = 4 \times 1,040 = 4,159 \quad (6)$$

Tipoloji seti içinde normalize edildiğinde $TP_{norm} = 0,757$ elde edilmektedir. Parametrelerin tamamı ve normalize değerleri **Tablo 6**'da işlenmiştir.

Tablo 6: T1 Nesnel Parametre Hesabı

Parametre	Ham Değer	Hesaplama	Normalize
W	1,10 m	$(1,10 - 0,8) / 0,7$	0,429
H	2,50 m	$(2,50 - 2,2) / 1,3$	0,231
L	8,0 m	$1 - (8,0 - 2) / 6$	0,000
PV	Yok	—	0,000
H'	—	$-\sum p_i \cdot \ln p_i$	1,040
TP_raw	—	$4 \times 1,040$	4,1
TP_norm	—	Tipoloji seti içinde	0,757

L = 8,0 m normalize değerinin tabanına oturduğundan ve PV = 0 ek bir baskı oluşturduğundan Sobj düşük kalmaktadır. W = 1,10 m ile dört farklı işleve bağlantının Shannon çeşitliliği bu baskıyı yalnızca kısmen dengeleyebilmektedir. Denklem (2)'den:

$$Sobj_{t1} = (0,429 + 0,231 + 0,000 + 0,000 + 0,757)/5 = 0,283 \quad (7)$$

3.2. FIS Hesaplaması

Tablo 7, her iki temsil moduna ait varsayımsal katılımcı puanlarını vermektedir. Bu puanlar gerçek bir ölçüm değil, temsil modunun beklenen algısal etkisini göstermek amacıyla teorik çerçeveden türetilmiş illüstratif değerlerdir.

Tablo 7: T1 Varsayımsal Katılımcı Puanları

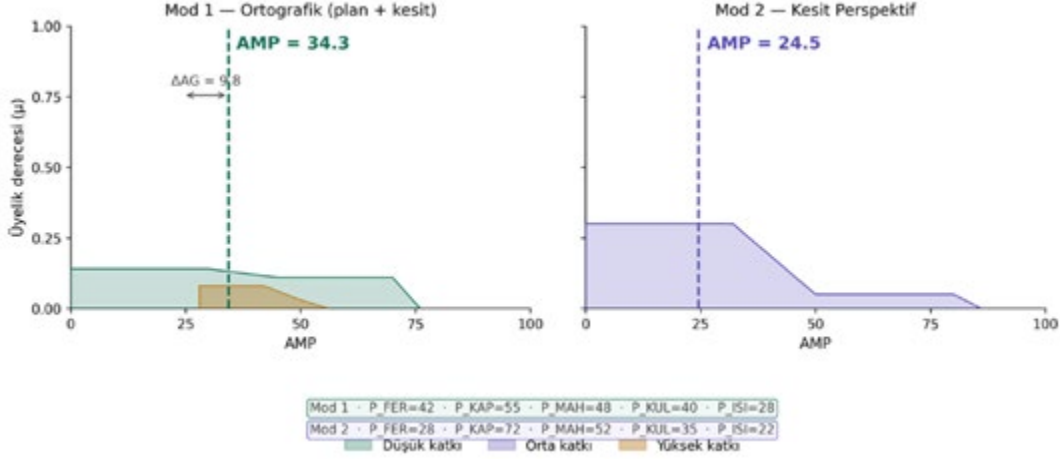
Parametre	Mod 1	Mod 2:
	Ortografik	Kesit Perspektif
P_FER	42	30
P_KAP	55	72
P_MAH	48	52
P_KUL	40	35
P_ISI	28	22

Mod 1'de P_KAP = 55, Yüksek teriminin sol sınırının (60) altında kalmaktadır. Bu durumda yalnızca E2 (s = 0,16) ve O2 (s = 0,12) ateşlenmekte; Düşük terimi zayıf bir güçle, Orta terimi daha da zayıf bir güçle çıkışa katkı yapmaktadır. Mod 2'de ise 8 m derinliğin perspektif çizimde doğrudan iletilmesi P_KAP'ı 72'ye çıkarmaktadır. Bu değer eşiği aştığında E1, E2 ve D1 kuralları eş anlı ateşlenmekte;

Düşük terimi 0,30 gibi belirgin bir güçle baskın hale gelmektedir. Çıkış dağılımları ve her iki modun centroid değerleri **Şekil 4**'te görülmektedir.

Centroid durulaştırması Denklem (3) sonucunda $AMP_{mo^{d1}} \approx 34,2$ ve $AMP_{mo^{d2}} \approx 24,4$ değerleri elde edilmektedir. Denklem (4)'ten Algısal Kayma İndeksi:

$$\Delta AG = |34,2 - 24,4| = 9,8 \quad (8)$$



Şekil 4: T1 Tipolojisi için Mod 1 ve Mod 2 Çıkarım Karşılaştırması (Python/matplotlib ile oluşturulmuştur.)

Sobj = 0,283 ile $AMP_{Mod2} = 0,244$ arasındaki yakın ilişki, kesit perspektif temsiliinin nesnel konfigürasyonla tutarlı bir algısal ortam kurduğuna işaret etmektedir. $AMP_{Mod1} = 0,342$ ise Sobj'ye göre yaklaşık yüzde yirmi bir yukarıda kalmaktadır. Bu farkın kaynağı plan çiziminin doğasında yatmaktadır: $L = 8$ m uzunluk çizimde sayısal bir veri olarak mevcuttur, ancak bu uzunluğun derinlik baskısına dönüştüğü deneyim yalnız plana bakarak anlaşılmamaktadır. Kesit perspektifte ise aynı sekiz metre, kaçış noktasına uzanan bir mekânsal gerçekliğe dönüşmekte, P_{KAP} skoru belirleyici eşiği aştığında E1, D1 ve E2 kuralları birlikte ateşlenmektedir. Bu örüntü Evans'ın (1997) mimari çizimin mekânı nötr biçimde aktarmak yerine onu kurduğu önermesini sayısal bir bağlamda somutlaştırmaktadır.

4. Tartışma

T1 tipolojisi üzerinde yürütülen illüstratif uygulama, temsil aracının algısal çıktıyı anlamlı ölçüde farklılaştırabildiğini ve bu farkın kural tabanındaki belirli kombinasyonlarla ilişkilendirilebildiğini ortaya koydu. Ancak bu hesaplama gerçek katılımcı verilerine değil, kuramsal çerçeveden türetilmiş varsayımsal değerlere dayanıyor. T1 bulgularının gerçek bir ölçüm değil, modelin işleyişini gösteren bir iz düşün olduğu göz önünde tutulmalıdır. Ampirik uygulamada farklı katılımcı gruplarından elde edilecek verilerin kural ağırlıklarını anlamlı biçimde değiştirebileceği öngörülebilir. Katılımcı grubunun mimarlık öğrencileriyle sınırlı tutulması, modelin farklı temsil okuryazarlığına sahip profillere uygulanabilirliğini şimdilik daraltıyor. Yüksek daldırmalı ortamlar gibi alternatif temsil biçimlerinin eklenmesi Algısal Kayma İndeksi'ni daha geniş bir eksenle sınama imkanı vereceğinden gelecek çalışmalarda model bu gibi temsil yöntemlerinin artırılmasıyla güçlendirilebilir. Yine modeli geliştirme potansiyelleri kapsamında, birden fazla tipoloji üzerinde üretilecek Sobj-AMP örüntülerinin hangi fiziksel konfigürasyonların temsil aracından bağımsız tutarlı bir potansiyel taşıdığını ve hangilerinin temsil seçimine duyarlı olduğunu ayırt etmede işe yarayabileceği ileri sürülebilir. Bu tablo netleşirse ΔAG , yalnızca bir ölçüm çıktısı olmaktan çıkıp koridorun hangi niteliğinin hangi temsil aracıyla görünür kılındığını izleyen bir tasarım okumasına dönüşebilir. Bu

soruyu yanıtlamak, çok tipolojili, farklı daldırma düzeylerinde seçilmiş çeşitli temsil yöntemlerini kapsayan ve gerçek katılımcılarla yürütülecek bir ampirik çalışmayı beklemektedir.

Yapay Zeka Araçlarının Kullanımı

Bu çalışmada bulanık çıkarım sisteminin sayısal uygulamasına yönelik Python kodu ve üyelik fonksiyonu görsellerinin üretilmesinde büyük dil modeli tabanlı bir yapay zeka aracından (Anthropic Claude) yararlanılmıştır. Tüm model tasarım kararları, parametre seçimleri ve yorum yazılarları tarafından yapılmış, araç yalnızca hesaplama ve görselleştirme süreçlerinde teknik destek sağlamıştır.

KAYNAKLAR

- Alhmoud, S. H., Alhmoud, H. H., & Bataineh, A. M. (2025). An investigation on university perception of spatial element functionality of Irbid, Jordan. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 20(3), 961-969. <https://doi.org/10.18280/ijstdp.200304>
- Altman, I. (1975). *The environment and social behavior*. Brooks/Cole.
- Ciftcioglu, Ö., & Durmisevic, S. (2001). Fuzzy logic in architectural design. In *Proceedings of the EUSFLAT Conference*.
- Evans, G. W., & McCoy, J. M. (1998). When buildings don't work. *Journal of Environmental Psychology*, 18(1), 85-94. <https://doi.org/10.1006/jevp.1998.0089>
- Evans, R. (1997). *Translations from drawing to building and other essays*. Architectural Association.
- Gehl, J. (2011). *Life between buildings: Using public space* (6th ed.). Island Press.
- Gibson, J. J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Houghton Mifflin.
- Hermund, A., Klint, L. S., Bundgaard, T. S., & Bjørnson-Langen, R. N. M. M. (2018). The perception of architectural space in reality, in virtual reality, and through plan and section drawings: A case study of the perception of architectural atmosphere. In A. Kępczyńska-Walczak & S. Białkowski (Eds.), *Computing for a better tomorrow: Proceedings of the 36th eCAADe Conference* (Vol. 2). eCAADe; Faculty of Civil Engineering, Architecture and Environmental Engineering, Lodz University of Technology. <https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2018.2.735>
- Hillier, B. (1996). *Space is the machine: A configurational theory of architecture*. Cambridge University Press.
- Kaplan, R., & Kaplan, S. (1989). *The experience of nature: A psychological perspective*. Cambridge University Press.
- Kılıç Ataselim, P. (2024). *Horizontal circulation possibilities in unit housing planning against corridor typology* [Master's thesis, Istanbul Technical University].
- Knez, I. (1995). Effects of indoor lighting on mood and cognition. *Journal of Environmental Psychology*, 15(1), 39-51. [https://doi.org/10.1016/0272-4944\(95\)90013-6](https://doi.org/10.1016/0272-4944(95)90013-6)
- Mamdani, E. H., & Assilian, S. (1975). An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies*, 7(1), 1-13. [https://doi.org/10.1016/S0020-7373\(75\)80002-2](https://doi.org/10.1016/S0020-7373(75)80002-2)
- Rohan, T. M. (2017). Drawing as signature: Paul Rudolph and the perspective section. In T. M. Rohan (Ed.), *Reassessing Rudolph* (pp. 120-135). Yale School of Architecture; Yale University Press.
- Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, 27(3), 379-423. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>
- Stamps, A. E. (2009). On shape and spaciousness. *Environment and Behavior*, 41(4), 526-548. <https://doi.org/10.1177/0013916508317931>
- Stamps, A. E., & Smith, S. (2002). Environmental enclosure in urban settings. *Environment and Behavior*, 34(6), 781-794. <https://doi.org/10.1177/001391602237246>
- Turkish Standards Institution. (2011). *TS 9111: Accessibility requirements in buildings for persons with disabilities and persons with restricted mobility*. Turkish Standards Institution.
- Yıldız, N., & Türkmen, A. (2023). A study on the user satisfaction with the configuration of housing interior spaces. *Gazi University Journal of Science Part B: Art Humanities Design and Planning*, 11(1), 121-137.

Co-living (Birlikte Yaşam) Konutlarının Hesaplamalı Okumaları: Uyarlanabilir Konut Dönüşümünde Mekânsal Kararların Değerlendirilmesi

Nisa Nur Göksel¹ ; Burçin Cem Arabacıoğlu² 

^{1,2}Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi

¹nisa.nur.goksel@msgsu.edu.tr ; ²burcin.arabacioglu@msgsu.edu.tr

Özet

Bu çalışma, İstanbul'daki 2000 sonrası apartman üretiminde yaygın olarak görülen simetrik konut planlarının co-living (birlikte yaşam) modeline uyarlanması sürecini, hesaplamalı tasarım araçları ve kuramsal konut yaklaşımları üzerinden karşılaştırmalı olarak incelemektedir. Araştırma, mevcut bir konut planının fiziksel olarak yeniden üretilmesinden ziyade, sabit yapısal kısıtlar altında farklı kullanım senaryolarının nasıl oluştuğunu ve bu senaryoların metrik ve yorumlayıcı çerçeveler içinde nasıl farklı biçimlerde okunabildiğini analiz etmeyi amaçlamaktadır. Çalışmanın kuramsal zemini, Alexander Klein'in konutu ölçülebilir verimlilik ve işlevsellik üzerinden değerlendiren metrik temelli yaklaşımı ile Cedric Price'in mekânı zamansallık, esneklik ve kullanıcı özneliği üzerinden ele alan senaryo temelli yaklaşımı arasında konumlanmaktadır. Yöntem olarak, seçilen konut kat planı Rhino ve Grasshopper ortamında modellenmiş, özel, ortak ve dolaşım alanları parametrik olarak tanımlanarak nicel göstergelere dönüştürülmüştür. Bu göstergeler betimleyici analiz araçları olarak kullanılmıştır. Ardından farklı kullanıcı yoğunlukları ve kullanım senaryoları üzerinden üç zaman dilimine dayalı mekânsal aktiflik haritaları oluşturulmuştur. Ayrıca yapay zekâ destekli kural tabanlı bir üretim süreci aracılığıyla alternatif bir co-living yerleşimi üretilmiş ve aynı metrik seti üzerinden karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Bulgular, metrik temelli analizlerin daha kompakt, yoğun ve alan verimliliğine odaklanan mekânsal örgütlenmeler ürettiğini; buna karşılık senaryo temelli insan yorumunun daha esnek ve kullanıcı çeşitliliğine uyum sağlayan düzenlemeler ortaya koyduğunu göstermektedir. Yapay zekâ tarafından üretilen düzenlemelerin ise Klein'in rasyonel ve ölçülebilir verimlilik yaklaşımına daha yakın sonuçlar ürettiği, ancak dolaşım ve ortak alan esnekliği açısından sınırlılıklar içerdiği tespit edilmiştir. Yapay zekâ önerisinde birim yoğunluğu ve özel alan oranı artarken, dolaşım alanı oranı ve tipolojik çeşitlilik azalmıştır. Bu durum, yapay zekâ tarafından üretilen yerleşimlerin alan verimliliğini önceliklendirirken mekânsal esneklik açısından sınırlılıklar taşıdığını göstermektedir. Sonuç olarak çalışma, hesaplamalı araçların mimari karar alma süreçlerinde farklı kuramsal çerçeveler altında aynı mekânsal verinin yeniden yorumlanmasına olanak sağlayan destekleyici araçlar olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir. Böylece nicel analiz ile nitel kullanıcı deneyimi arasındaki gerilim görünür kılınmakta ve co-living gibi sosyal ve zamansal boyutları güçlü konut modellerinde insan yorumunun belirleyici rolü vurgulanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Co-living, Hesaplamalı tasarım, Parametrik analiz, Alexander Klein, Cedric Price.

Computational Readings of Co-living Housing: Evaluating Spatial Decisions in Adaptive Housing Transformation

Nisa Nur Göksel¹ ; Burçin Cem Arabacıoğlu² 

^{1,2}Mimar Sinan Fine Arts University

¹nisa.nur.goksel@msgsu.edu.tr ; ²burcin.arabacioglu@msgsu.edu.tr

Abstract

This study examines the adaptation of symmetrical apartment plans, commonly found in post 2000 housing developments in Istanbul, into a co-living model through a comparative analysis using computational design tools and theoretical housing approaches. Rather than reproducing an existing housing plan, the research explores how different living scenarios can emerge within fixed structural constraints and how these scenarios can be interpreted through both metric-based and qualitative frameworks. The theoretical framework is based on two different approaches to housing: Alexander Klein's metric-based perspective, which evaluates housing through measurable efficiency and functionality, and Cedric Price's scenario-based perspective, which emphasizes temporality, flexibility, and user agency. As a methodology, the selected floor plan was modelled in Rhino and Grasshopper. Private, shared, and circulation spaces were parametrically defined and converted into quantitative indicators. These indicators were used as descriptive analytical tools. In addition, spatial activity maps were created for three different time periods based on varying user densities and usage scenarios. An alternative co-living layout was also generated through an AI-assisted rule-based design process and evaluated using the same metric set.

The findings show that metric-based analyses tend to produce more compact, dense, and space efficient spatial organizations, while scenario-based human interpretations generate more flexible layouts that better accommodate user diversity. The AI generated layouts produced results closer to Klein's rational and measurable efficiency approach but showed limitations in terms of circulation and shared-space flexibility. The AI proposal increased unit density and private space ratios, while reducing circulation space and typological diversity. These results suggest that AI-generated layouts prioritize spatial efficiency but may limit spatial flexibility. Overall, the study demonstrates that computational tools can support the reinterpretation of the same spatial data through different theoretical perspectives. By revealing the tension between quantitative analysis and qualitative user experience, the research highlights the continuing importance of human interpretation in housing models such as co-living, where social and temporal dimensions play a significant role.

Keywords: Co-living, Computational design, Parametric analysis, Alexander Klein, Cedric Price.

1. Giriş

Birçok metropol kentte konut stoğu, yıkım ya da yapısal müdahalelere gerek duyulmadan inovatif ve kolektif yaşam biçimlerine uyarlanarak kullanılmaktadır. İstanbul bağlamında konut erişilebilirliği sorunları, değişen hane yapıları ve yeni konut alanlarının sınırlı olması, co-living'i pragmatik ancak tartışmalı bir konut modeli olarak öne çıkarmaktadır. Co-living çoğunlukla sosyal ve ekonomik boyutları üzerinden tartışılrsa da mevcut konutların bu modele uyarlanmasının mekânsal etkileri çalışmalarda sınırlı biçimde ele alınmaktadır. Bu dönüşüm sürecindeki temel mesele, sabit yapısal kısıtlar altında alınan mekânsal kararların mahremiyet, ortak kullanım ve dolaşım üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesidir. Bu bağlamda mimari karar verme süreci, yeni biçimler üretmekten çok, mevcut mekânların yorumlanması ve mekânsal ödünleşimlerin gerekçelendirilmesiyle ilişkili olarak dönüşmektedir (Arabacıoğlu, 2010). Hesaplamalı araçlar, özellikle parametrik modelleme ve veriye dayalı analizler aracılığıyla, mekânsal özelliklerin nicel olarak ifade edilmesini ve alternatiflerin karşılaştırılmasını mümkün kılarak bu süreci desteklemektedir. Hesaplama bu çalışmada yalnızca biçim üretmeye yönelik bir araç olmamakla birlikte farklı tasarım verilerini bütünleştiren ve karar süreçlerini görünür kılan bir bilgi üretim ortamı olarak ele alınmaktadır (Menges, 2012). Konutun ölçülebilir nitelikler üzerinden değerlendirilmesi, Alexander Klein'in metrik temelli konut analizlerine dayanmaktadır (Klein, 1928), bu yaklaşım konut kalitesini verimlilik ve işlevsel açıklık üzerinden statik bir çerçevede ele almaktadır. Buna karşılık Cedric Price, mekânı esneklik, kullanıcı özneliği ve zamansallık kavramlarıyla yeniden tanımlamıştır (Price, 1969).

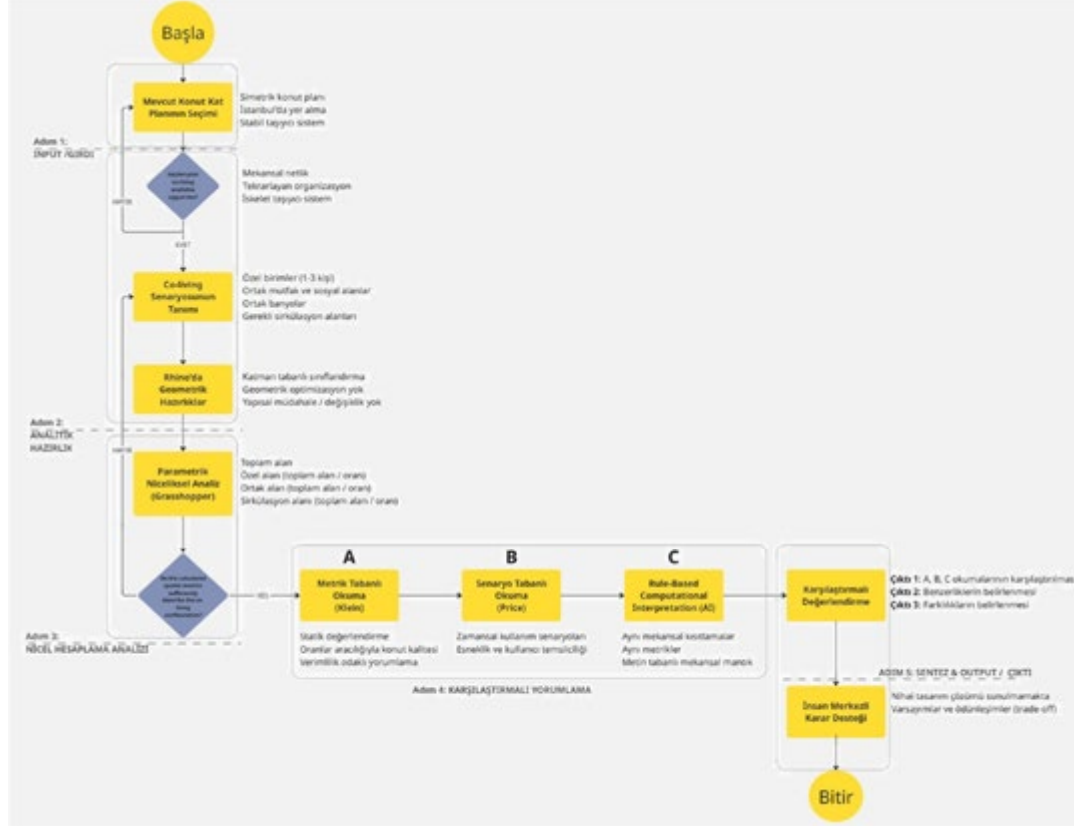
Bu çalışma, bu iki yaklaşım arasında konumlanarak, mevcut konutların co-living düzenine uyarlanması sürecinde hesaplamalı araçların metrik temelli değerlendirme ile senaryo temelli yorum arasında nasıl bir aracı rol üstlenebileceğini incelemektedir. Çalışma, İstanbul'da 2000 sonrası apartman üretiminde yaygın olarak görülen simetrik konut planlarını temsil eden tek bir örnek üzerinden yürütülmüştür. Price yaklaşımı kapsamında üç zaman diliminde aktif kullanım haritaları oluşturulmuş; mekânsal değerlendirme, alan büyüklüklerinden çok kullanım sürekliliği, çoklu kullanım olasılıkları ve kullanıcı müzakeresine açık mekânların varlığı üzerinden yorumlanmıştır. Çalışmanın araştırma sorusu "Aynı konut planı, Klein ve Price'in farklı konut kalite anlayışları altında nasıl farklı biçimlerde değerlendirilebilir ve yapay zekâ tarafından üretilen mekânsal kararlar bu iki yaklaşımın hangisine daha yakın sonuçlar üretmektedir?" şeklindedir. Çalışmanın özgün katkısı, hesaplamayı yeni mekânsal çözümler üreten bir tasarım aracı olmasının yanı sıra aynı mekânsal verinin farklı kuramsal çerçeveler altında yorumlanmasını mümkün kılan bir karar destek ve değerlendirme arayüzü olarak ele almasıdır.

Bununla birlikte çalışma bazı sınırlılıklar içermektedir. Öncelikle araştırma yalnızca İstanbul'da 2000 sonrası apartman üretiminde görülen simetrik bir konut planı üzerinden yürütüldüğünden, elde edilen bulguların farklı konut tipolojilerine ve kentsel bağlamlara doğrudan genellenebilirliği sınırlıdır. Ayrıca co-living senaryoları kurgusal kullanım varsayımları üzerinden tanımlandığı için mekânsal değerlendirmelerin deneyimsel doğrulamasını kısıtlanmaktadır. Zamansal analiz üç temel zaman dilimi ile sınırlandırılmış olup, uzun dönemli kullanım değişimleri ve mevsimsel ya da yaşam döngüsüne bağlı dönüşümler kapsam dışında bırakılmıştır. Kullanılan metrikler ağırlıklı olarak alan oranları, yoğunluk ve dolaşım gibi nicel göstergelere odaklanmakta; mahremiyet, konfor ve sosyal etkileşim gibi nitel mekânsal deneyimler doğrudan ölçülmemiştir. Bununla birlikte yapay zekâ tabanlı üretim süreci kural temelli bir çerçeve ile sınırlandırılmıştır. Son olarak, yapının taşıyıcı sistemi ve fiziksel kabuğunun sabit kabul edilmesi, yapısal ölçekli dönüşüm olasılıklarını analiz dışı bırakmakta ve çalışmayı iç mekân organizasyonu ile sınırlamaktadır.

1.1. Çalışmanın Metodolojisi

Çalışmanın metodolojisi, mevcut bir konut planının co-living kullanımına dönüşümünü tasarım üretimi yerine analitik değerlendirme yoluyla ele alan karma yöntemli bir araştırma olarak kurgulanmıştır. Araştırmanın amacı, aynı mekânsal verinin farklı hesaplamalı ve kavramsal çerçeveler altında nasıl farklı biçimlerde yorumlanabildiğini ve nicel analizlerin insan odaklı mimari karar alma süreçlerini nasıl destekleyebileceğini incelemektir. İstanbul'da 2000 sonrası apartman tipolojilerinde sıkça görülen simetrik yerleşim şemasına sahip bir konut kat planı test alanı olarak seçilmiştir. Plan, yapının

taşıyıcı sistemine müdahale edilmeden co-living senaryosuna göre yeniden yorumlanmış; böylece mekânsal kararlar sabit fiziksel kısıtlar altında değerlendirilmiştir. Metodoloji, optimize edilmiş sonuçlar üretmekten çok, karar alma süreçlerini görünür kılmayı amaçlamaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Çalışmanın Akış Diyagramı / Flow Chart (Yazarlar Tarafından Oluşturuldu)

İlk aşamada kat planı Rhino ortamına aktarılmış ve özel, ortak ve dolaşım alanları ayrı katmanlar olarak tanımlanarak okunabilirlik için sadeleştirilmiştir. İkinci aşamada plan, co-living senaryosu doğrultusunda yeniden okunmuş; farklı kullanıcı sayıları için yaşam birimleri ile ortak kullanım ve dolaşım alanları mevcut sınırlar içinde yeniden dağıtılmıştır. Üçüncü aşamada Grasshopper kullanılarak parametrik bir analiz modeli oluşturulmuş ve alanların toplam ve oransal dağılımları hesaplanmıştır. Bu metrikler betimleyici göstergeler olarak ele alınmıştır. Son aşamada elde edilen nicel veriler, Alexander Klein'in metrik temelli yaklaşımı ile Cedric Price'in esneklik ve kullanıcı özneliğini vurgulayan senaryo temelli yaklaşımı çerçevesinde değerlendirilmiştir. Ayrıca kural tabanlı bir yapay zekâ sistemi (LLM) tarafından üretilen mekânsal düzenlemede de aynı betimleyici göstergeler test edilerek; karşılaştırmalı bir hesaplamalı yorum elde edilmiştir.

2. Kuramsal Çerçeve

Çalışmanın kuramsal çerçevesi, konutun değerlendirilmesine yönelik iki farklı yaklaşımı referans almaktadır. Erken dönem konut çalışmalarında Alexander Klein'in geliştirdiği metrik temelli değerlendirme sistemi, konut kalitesini ölçülebilir mekânsal göstergeler ve karşılaştırmalı düzenlemeler üzerinden ele almakta; verimlilik ve işlevsel açıklığı önceleyen statik bir değerlendirme çerçevesi sunmaktadır. Klein'in minimum konut (Existenzminimum) yaklaşımı, dar alanlarda işlevsellik ve psikolojik refahın artırılmasını hedeflerken, aile mahremiyeti ve ev içi sirkülasyon gibi mekânsal ilişkileri bilimsel yöntemlerle tanımlamıştır (Koch, 2016; Bevilacqua, 2011). Buna karşılık Cedric Price, mekânı farklı kullanım senaryolarına ve zamansal dönüşümlere açık bir süreç olarak ele almıştır (Price, 1969). Parametrik ve algoritmik düşüncenin öncülerinden biri olarak Price, konut üretimini biçimsel bir problemten ziyade, kullanım, zaman ve kullanıcı eylemliliği üzerinden değerlendirilen bir yaşam kalitesi meselesi olarak ele almıştır. Parametrik modelleme, tasarım alternatiflerini üretmekten çok,

mekânsal ilişkilerin açık biçimde tanımlanmasını ve karşılaştırılmasını mümkün kılan bir düşünme aracı olarak değerlendirilmektedir (Woodbury, 2010). Zaman parametresini tasarım sürecine dahil ederek mekânların gün içindeki kullanımlarını ve konutun ömrü boyunca geçirdiği dönüşümleri araştırmıştır (Hernandez Falagan & Ziaiebigdeli, 2022). Bu çalışma, Klein ve Price'ın yaklaşımlarını kapsamlı biçimde yeniden üretmeyi amaçlamamakta; hesaplamalı analizlerle elde edilen aynı nicel verinin bu iki farklı kuramsal bakış altında nasıl farklı biçimlerde yorumlanabildiğini göstermek üzere bu çerçeveleri analitik referanslar olarak kullanmaktadır. Bu bağlamda Hernandez Falagan ve Ziaiebigdeli'nin (2022) Klein ve Price üzerinden önerdikleri parametrik konut üretimi araştırması, çalışmanın kuramsal zeminini desteklemektedir. Hernandez Falagan ve Ziaiebigdeli (2022), Klein ve Price'ın konut kalitesine ilişkin yaklaşımlarını parametrik tasarım bağlamında yeniden okuyarak, hesaplamanın biçim üretimi ile birlikte yaşam kalitesine ilişkin kararların değerlendirilmesinde de kullanılabileceğini ileri sürmektedir. Bu çalışma söz konusu yaklaşımı referans almakla birlikte, yeni konut tipolojileri üretmeye odaklanmamakta; bunun yerine mevcut bir konut planının co-living kullanımına uyarlanması sürecinde aynı mekânsal verinin farklı kuramsal çerçeveler altında nasıl yorumlanabildiğini incelemektedir. Bu yönüyle çalışma, parametrik üretimden çok hesaplamalı değerlendirme ve karar destek süreçlerine odaklanmaktadır.

2.1. Alexander Klein'ın ve Cedric Price'ın Konut Organizasyonu Yaklaşımları

Alexander Klein'ın konut tasarımıındaki matematiksel puanlama yöntemi, konut planlarını objektif ve bilimsel bir yaklaşımla değerlendirmek amacıyla 1928 yılında geliştirilmiş, çok aşamalı bir süreç olarak tanımlanmaktadır (Şekil 2). Konut tasarımıındaki bilimsel yaklaşımı, konut sorununu matematiksel bir titizlikle ele alan, rasyonel ve nesnel bir planlama metodolojisi. Bu yaklaşım düşük maliyetle yüksek yaşam kalitesi sunan minimum konut (Existenzminimum) standartlarını belirlemeyi amaçlamıştır (Bevilacqua, 2011). Üç aşamadan oluşan bu süreç konut kalitesini ölçülebilir parametreler üzerinden analiz etmeyi hedeflemektedir.



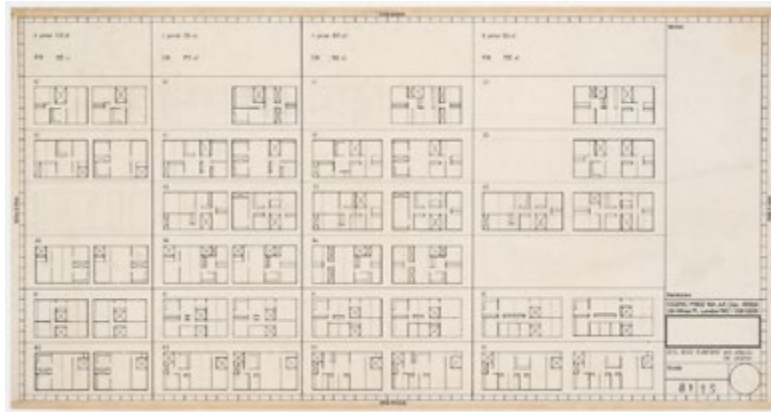
Şekil 2. Alexander Klein'ın Konut Analiz Yöntemleri (Gepp, 2022)

Birinci aşamada boyutlara dayalı sayısal ve mekânın işlevselliğini ölçmek için hijyen, yaşanabilirlik ve konforla ilgili sorulardan oluşan bir anket uygulanarak Betteffekt (toplam inşaat alanı ile yatak sayısı arasındaki oran), Nutzeffekt (işlevsel alanın toplam inşaat alanına oranı), Wohneffekt (yaşam alanları ve yatak odalarının toplam inşaat alanına oranı) olmak üzere üç farklı kümülatif bir puan hesaplanmaktadır. İkinci aşamada ise farklı konut projeleri, bina derinliği ve cephe genişliği parametreleri dikkate alınarak tek bir ölçeğe indirgenmektedir. Ardışık artışlar yöntemi olarak da

adlandırılan bu süreçte, planlar bir ızgara (grid) üzerinde düzenlenerek derinlik ve genişlikteki değişimlerin verimlilik (özellikle Betteffekt) üzerindeki etkileri analiz edilmektedir. Bu karşılaştırma, belirli bir yatak sayısı için en verimli boyutların belirlenmesini sağlamaktadır. Üçüncü aşamada ise önceki aşamalardan elde edilen sonuçlar grafiksel olarak doğrulanarak koridorların düzeni, sirkülasyon rotaları, serbest yüzeylerin konsantrasyonu ve yüzeylerin bölümlenmesi gibi nesnel nitelikler kontrol edilmektedir. Klein'in bu metodolojisi, ekonomik kriz döneminde minimum konut (Existenzminimum) standartlarını belirlemek ve kısıtlı kaynaklarla en yüksek yaşam kalitesini sunan, verimli formlara ulaşmak için tasarlanmıştır. Bu yaklaşım, günümüzde parametrik düşüncenin öncü örneklerinden biri olarak kabul edilmektedir çünkü tasarımın sonucunu belirleyen değişkenler arasındaki ilişkileri (alan, yatak sayısı, boyutlar vb.) matematiksel bir sistemle kurgulanmaktadır.

Betteffekt, Alexander Klein'in konut planlarını değerlendirmek için geliştirdiği temel katsayılardan biridir ve toplam inşaat alanı ile yatak sayısı arasındaki ilişkiyi ifade etmektedir. Bu katsayı sayesinde yapılan boyutsal optimizasyon konut verimliliğini artırmaktadır. Bu katsayı kullanılarak belirli bir yatak sayısı için en verimli bina derinliği ve cephe genişliği oranlarını belirlenmiştir. Yapılan karşılaştırmalı analizler (diagramlar), Betteffekt değerinin en uygun olduğu planların genellikle hijyen, konfor ve ekonomi arasında ideal bir denge kuran diyagonal hat üzerindeki planlar olduğunu göstermiştir.

Cedric Price, konutun tarihsel olarak özel ve özerk bir kategori olarak görülmesinin, konut krizini besleyen verimsiz bir arz sistemine yol açtığını savunmaktadır. Ona göre konut, duygu ve geleneklerden arındırılarak tıpkı bir çikolata gibi kolayca elde edilebilir ve harcanabilir bir ürün olmalıdır. Konutun sonsuza kadar süreceği varsayımıyla inşa edilmesini reddeder; çünkü toplum ve bireylerin ihtiyaçları hızla değişmektedir. Price'a göre statik ve kalıcı binalar zamanla işlevsiz birer anıt haline gelerek toplumsal gelişimi engellemektedir (Şekil 3). Konutun artık aile hayatı için önceden belirlenmiş bir düzenleme mekanizması olarak kabul edilemeyeceğini savunarak, evin bireyin arzularına göre şekillenen bir yaşam oyuncağı (living-toy) olmasını istemektedir (Anderson, 2016). Price'ın 24 saatlik ekonomik yaşam oyuncağı çalışması, mimariye zaman parametresini dahil ederek kullanım kalıplarını tanımlama, âtıl mekânların tespiti, adaptasyon ve esneklik vb. gibi kavramlar üzerinde durmaktadır. Farklı kullanıcı tiplerinin (yaş, uğraş vb.) aynı mekânı günün farklı saatlerinde nasıl kullandığını analiz etmektedir. Konut içerisindeki hareket yoğunluğunu haritalandırarak, gün boyunca yetersiz kullanılan alanları ve yüksek yoğunluklu bölgeleri görünür kılmaktadır.



Şekil 3. Cedric Price'ın Konut Çalışmaları (Canadian Centre for Architecture, n.d.)

Bu analizden elde edilen veriler, mimarın mekânları kullanıcı davranışlarına göre optimize etmesini ve konutun statik bir yapıdan ziyade kullanıcı ihtiyaçlarına yanıt veren dinamik bir sisteme dönüşmesini sağlamayı hedeflemektedir. Price konutu sibernetik, oyun teorisi ve belirsizlik kavramları üzerinden ele almaktadır (Gül, 2020). Bu nedenle Klein'in statik ve rasyonel yaklaşımına kıyasla Price'ın yaklaşımının daha kullanıcı odaklı, dinamik ve sibernetik bir yaklaşım olduğu söylenebilir. Sibernetik yaklaşım mekânların yeniden düzenlenmesini programlamak için kullanıcı davranış verilerini bir araç olarak kullanmaktadır. Bu yaklaşım esnekliği sayesinde davranışsal veri modelleme yapılarak zaman parametresi de dahil edilmekte ve dinamik bir sistem kurgulanmaktadır. Tasarıma zamanı dahil

ederek, aynı mekânın günün farklı saatlerinde farklı kişiler tarafından nasıl kullanıldığını analiz eder ve âtil alanları tespit ederek optimizasyon sağlamakta, mimariye veri toplama, makine öğrenimi ve teknik hareketlilik kapasitesi kazandırarak, yapının zaman içindeki kullanım ihtiyaçlarına göre biçimsel evrim geçirmesi olanağını tanımaktadır. Price'ın yaklaşımında konut, önceden belirlenmiş bir aile yaşamı mekanizması olmaktan çıkmakta ve kullanıcıların sürekli değişen ihtiyaçlarına yanıt veren duyarlı, tepki veren bir sisteme dönüşmektedir. Cedric Price'ın Short Life House projesi, konutu bitmiş ve dondurulmuş bir ürün yerine bir ihtimaller sistemi olarak kurgulamaktadır. Kullanıcılar, mekânların ne amaçla kullanılacağını kendi kararlarına göre tanımlayabilmekte, sakinlerin kendi kişisel konforlarını artırmak için mekânsal kararlar almalarına imkân tanımakta ve zaman içerisinde aile yapısında veya kullanıcı grubunun bileşiminde meydana gelebilecek değişikliklere (formal evrim) adapte olma özgürlüğü sunmaktadır. Cedric Price ve Alexander Klein'ın yaklaşımları, konutu ve mimarlığı toplumsal bir iyileştirme aracı olarak görmelerine rağmen, metodolojik ve ideolojik açıdan zıt kutupları temsil etmektedir. Klein, konutu bilimsel bir titizlikle optimize edilmesi gereken rasyonel bir mekanizma olarak kurgularken, Price, bireysel özgürlüğü maksimize eden, geçici ve tüketilebilir bir hizmet kiti olarak yeniden tanımlamıştır (Korbi ve Migotti, 2019; Anderson, 2016).

2.2. Co-living (Birlikte Yaşam) Yaklaşımı

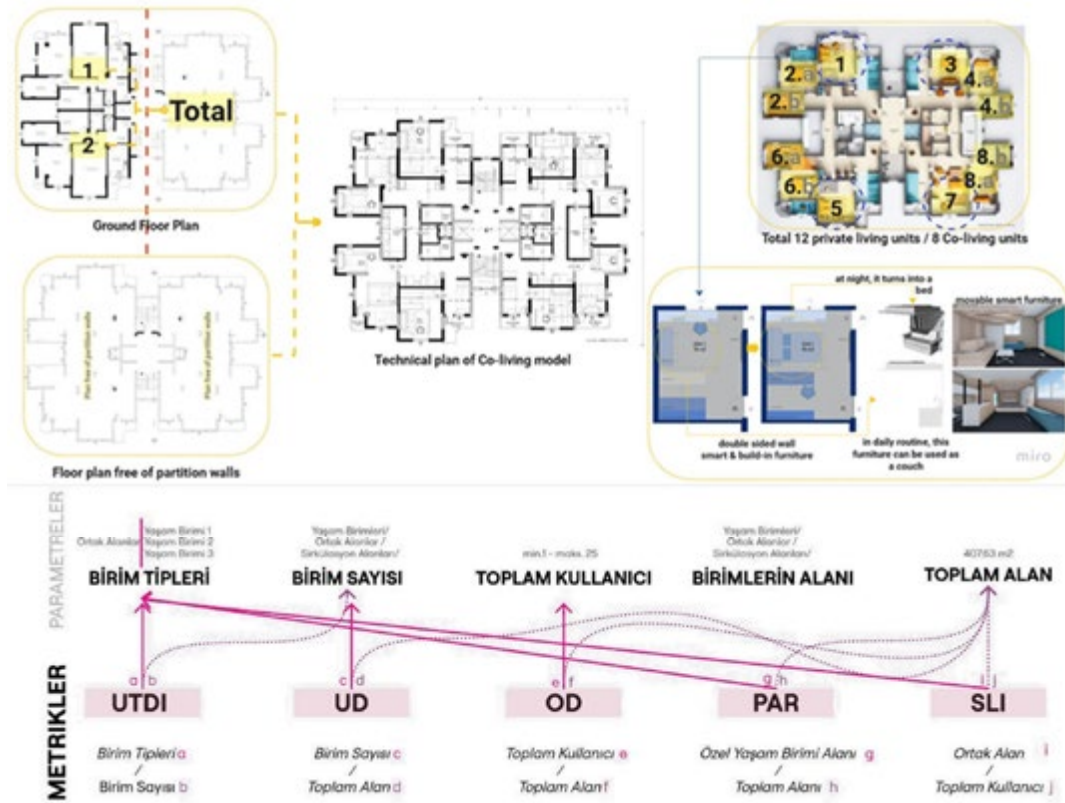
Co-living (birlikte yaşam) ve mikro konut yaklaşımları, günümüz kentlerinde artan konut maliyetleri, hane gelirlerindeki baskı ve yoğun kentleşme süreçleriyle birlikte ortaya çıkan yeni konut örgütlenme biçimleri olarak değerlendirilmektedir. Bu modeller, Existenzminimum geleneğinin çağdaş bir uzantısı olarak okunmakta, aynı zamanda mekânsal paylaşım ve hizmetlerin merkezileştirilmesi üzerinden yeniden tanımlanmaktadır (Brysch, 2019). Co-living literatürü, bu modeli tekil bir çözüm olarak saymamakla birlikte farklı sosyo-ekonomik bağlamlarda çeşitlenen bir konut rejimi olarak ele almaktadır. Bir yandan gayrimenkul sektöründe lüks ve topluluk odaklı yaşam söylemiyle pazarlanan kurumsal co-living projeleri, diğer yandan öğrenciler ve düşük gelirli grupların zorunlu olarak paylaşımlı konutlara yöneldiği ekonomik modeller bu alanın ikili yapısını oluşturmaktadır (Corfe, 2019). Bu durum, co-living'in hem erişilebilirlik söylemi hem de piyasa temelli bir değer üretim aracı olarak işlev gördüğünü göstermektedir. Modelin mekânsal organizasyonu, bireysel birimlerin küçültülmesi karşılığında ortak kullanım alanlarının genişletilmesi prensibine dayanır. Ortak mutfaklar, çalışma alanları ve sosyal mekânlar, özel alanın sınırlandırılmasıyla ortaya çıkan mekânsal kaybı telafi eden yapılar olarak kurgulanır. Bu bağlamda co-living, konut için yeni bir organizasyon biçimi olarak da okunabilir (Coricelli, 2022).

Tarihsel olarak bu yaklaşım, Karel Teige'nin 1930'larda geliştirdiği kolektif konut vizyonuna ve özellikle ev içi emeğin merkezileştirilmesi fikrine kadar geri götürülebilir. Teige'nin önerisi, özel alanın minimuma indirildiği ve günlük yaşam pratiklerinin ortaklaştırıldığı bir konut modeli üzerinden modernist üretim mantığını yeniden düşünmeyi amaçlamıştır (Korbi ve Migotto, 2019). Benzer şekilde, feminist temelli İskandinav konut modelleri de bakım emeğinin kolektifleşmesi ve sosyal altyapıların paylaşımı üzerinden co-living'in erken örnekleri olarak değerlendirilebilir. Güncel co-living modelleri ise bu tarihsel hattı dijital platformlar ve paylaşım ekonomisi üzerinden yeniden üretmektedir. Ev içi işlerin bireysel yük olmaktan çıkarılarak profesyonel hizmet sistemlerine entegre edilmesi, konutun hem fiziksel hem de operasyonel bir altyapı olarak yeniden tanımlanmasına yol açmaktadır (Corfe, 2019). Bu bağlamda co-living, mekânsal bir paylaşım modeli olmakla birlikte konutun hizmetleştirilmesi ve zaman-temelli kullanım rejimlerinin yeniden örgütlenmesi olarak da okunabilir (Tan ve Toh, 2025). 1980'li yıllarda Amerikalı mimarlar McCamant ve Durrett, Danimarka'da gelişen birlikte yaşam modellerini inceleyerek bu yaklaşımın Amerika Birleşik Devletleri'nde tanınmasına ve yaygınlaşmasına öncülük etmişlerdir (Arslan, 2020). Daha sonraki yıllarda İspanya, İtalya, Almanya ve Hollanda gibi Avrupa ülkelerinde de yerel sosyal ve mekânsal koşullara göre şekillenen farklı co-living uygulamaları ortaya çıkmıştır. Bu süreç, birlikte yaşam modellerinin zaman içerisinde tek tip bir konut yaklaşımından uzaklaşarak farklı kullanıcı gruplarının ihtiyaçlarına yanıt veren çeşitli biçimlerde geliştiğini göstermektedir (Göksel ve Arabacıoğlu, 2025). Günümüzde co-living uygulamaları; Amerika Birleşik Devletleri'nde âtil ofis yapılarının yeniden işlevlendirilmesi, Avrupa'da yaşlı nüfusa yönelik ortak yaşam çözümlerinin geliştirilmesi ve öğrenciler

ile dijital göçebeler için tasarlanan yeni konut modelleri gibi farklı örnekler üzerinden çeşitlenmeye devam etmektedir.

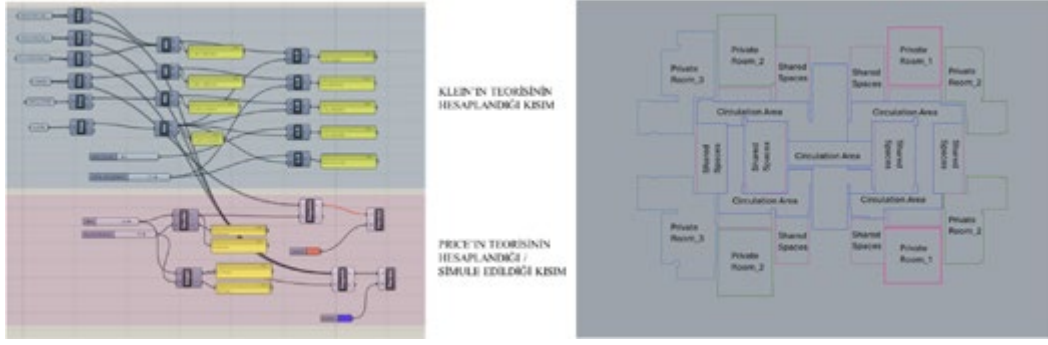
3. Yapılan Çalışmalar

Dört daireden oluşan simetrik bir konut kat planı, yapısal hiçbir müdahale yapılmadan, 1, 2 ve 3 kişilik bireysel yaşam birimleri ile ortak mutfak ve banyo/ıslak hacimleri içerecek şekilde co-living senaryosuna uyarlanmıştır (Şekil 4). Bu dönüşüm, metrik temelli (Klein) bir çerçevede ele alındığında öncelikle mekânsal verimlilik, alan dağılımı ve kullanıcı yoğunluğu üzerinden değerlendirilen analitik bir problem olarak ortaya çıkmaktadır. Buna karşılık senaryo temelli (Price) bir okuma, aynı nicel değerlerin çoklu kullanım biçimleri, müzakere pratikleri ve zamansal değişimlere açık farklı mekânsal senaryolar üretebildiğini göstermektedir. Metrik temelli değerlendirmede, birim sayısı ve çeşitliliği, özel alan oranı, paylaşımlı alan yükü ve kullanıcı yoğunluğu gibi göstergeler kullanılmıştır. Bu metrikler, konutun mekânsal dağılımını ve kullanıcı yoğunluğunu betimlemeye yönelik temel oranlarla sınırlandırılmış, karşılaştırmalı analiz ve yorumlama araçları olarak ele alınmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. Co-living Dönüşümü ve Metrikler (Yazarlar Tarafından Oluşturuldu)

Önerilen co-living senaryolarının mekânsal verimlilik ve doluluk performansını değerlendirmek amacıyla Grasshopper ortamında parametrik bir analiz modeli geliştirilmiştir. Senaryo temelli değerlendirme, mekânların gün içindeki aktif kullanım süreleri, farklı kullanıcı grupları tarafından paylaşılma biçimleri ve ortak alanların zamansal yoğunlaşma potansiyeli üzerinden okunmuştur. Bu değerlendirme performans optimizasyonu amacı taşımamakta, mekânsal esneklik ve kullanım çeşitliliğini görünür kılmayı amaçlamaktadır. Bu nedenle yapısal düzen ve kat alanı sabit tutulurken, birim dağılımı ve kullanıcı yoğunluğu değişken parametreler olarak tanımlanmıştır. Modelde toplam kullanıcı sayısı 21 olacak şekilde, 1, 2 ve 3 kişilik üç farklı özel yaşam birimi kodlanarak hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Senaryo temelli analiz kapsamında, mekânların gün içindeki kullanım değişimlerini temsil etmek üzere üç farklı zaman dilimi (09:00–18:00, 12:00 ve 18:00 sonrası) için aktif alan kurguları oluşturulmuş; ıslak hacimler gün boyu aktif alanlar olarak tanımlanmıştır (Şekil 5).



Şekil 5. Grasshopper’da Metriklerin Hesaplanmasında Oluşturulan Arayüz (Yazarlar Tarafından Oluşturuldu)

Metrik ve senaryo temelli analizlerin ardından, kat planının özgün hâli, aynı mekânsal kurallar ve tasarım ihtiyaçları yapay zekâ ortamında tanımlanarak alternatif bir co-living düzenlemesi üretilmiştir. Bu aşamada yapay zekâ insan tarafından belirlenen kuralların mekânsal sonuçlarını görünür kılan deneysel bir hesaplamalı temsil olarak ele alınmıştır. Yapay zekâ tarafından üretilen şematik ve metin temelli öneri için de aynı mekânsal metrikler hesaplanmış; her iki modele ait sonuçlar karşılaştırmalı olarak Tablo 1’de sunulmuştur (Tablo 1). Önceden tanımlı kurallar ve kısıtlar altında alternatif mekânsal kombinasyonlar üreten hesaplamalı bir üretim aracı olarak konumlandırılmıştır. Böylece insan tarafından tanımlanan parametrik sistem ile yapay zekâ tarafından türetilen alternatif düzenlemeler aynı metrik seti üzerinden karşılaştırılabilir hale getirilmiştir.

Alternatif co-living yerleşiminin oluşturulması amacıyla OpenAI tarafından geliştirilen ChatGPT büyük dil modeli kullanılmıştır. Yapay zekâya mevcut kat planına ilişkin mekânsal bilgiler, kullanıcı kapasitesi, ortak kullanım gereksinimleri ve yapısal kısıtlar metinsel olarak tanımlanmıştır. Modelden, taşıyıcı sisteme müdahale edilmeden co-living kullanımına uygun alternatif bir yerleşim senaryosu geliştirmesi istenmiştir. Elde edilen öneri, insan tarafından geliştirilen senaryo ile aynı metrik seti üzerinden karşılaştırılmıştır. Yapay zekâ bu çalışmada önceden tanımlanmış kurallar altında alternatif mekânsal organizasyonlar üreten deneysel bir karar destek aracı olarak ele alınmıştır.

Karşılaştırmalı analiz sonuçları, yapay zekâ tarafından üretilen yerleşimin daha yüksek mekânsal yoğunluk ve alan verimliliği hedeflediğini göstermektedir. Birim yoğunluğu (Unit Density, UD) insan tarafından geliştirilen öneride 0.019626 iken yapay zekâ önerisinde 0.029 olarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde kullanıcı yoğunluğu (Occupancy Density, OD) insan önerisinde 0.051518, yapay zekâ önerisinde ise 0.059 olarak bulunmuştur. Bu durum, yapay zekânın aynı kat alanı içerisinde daha fazla birim ve kullanıcı yerleştirme eğiliminde olduğunu göstermektedir. Toplam özel alanın kat alanına oranı insan önerisinde 0.39901 iken yapay zekâ önerisinde 0.52’ye yükselmektedir. Buna karşılık sirkülasyon alanının kat alanına oranı insan tarafından geliştirilen senaryoda 0.245666 iken yapay zekâ önerisinde 0.10’a düşmektedir. Bu sonuçlar, yapay zekânın kullanılabilir özel alan miktarını artırmak amacıyla dolaşım alanlarını minimum düzeye indirdiğini göstermektedir. Ortak alanın kullanıcı sayısına oranı insan önerisinde 4.873734, yapay zekâ önerisinde ise 6.65 olarak hesaplanmıştır. İlk bakışta bu durum ortak alan performansının arttığını düşündürse de, yapay zekâ tarafından önerilen yerleşimde şaft gibi sabit kabul edilen teknik alanlarda değişiklik yapılması ve dolaşım alanlarının önemli ölçüde azaltılması, elde edilen verimliliğin mekânsal uygulanabilirlik açısından sorgulanmasına neden olmaktadır. Birim tip çeşitliliğini gösteren oran incelendiğinde insan önerisinde 0.3809, yapay zekâ önerisinde ise 0.25 değeri elde edilmiştir. Bu sonuç, insan tarafından geliştirilen senaryonun farklı kullanıcı profillerine cevap verebilecek daha çeşitli bir mekânsal organizasyon sunduğunu göstermektedir. Yapay zekâ önerisi ise tipolojik çeşitlilikten ziyade kapasite ve alan verimliliğine öncelik vermektedir.

Tablo 1: İnsan ve Yapay Zekâ Önerisi Co-living Konutunun Metrik Değerleri

Co-living (Birlikte Yaşam) Konutlarının Hesaplamalı Okumaları: Uyarlanabilir Konut Dönüşümünde Mekânsal Kararların Değerlendirilmesi | Göksel, Nisa Nur; Arabacıoğlu, Burçin Cem

Parametreler	K i s a l ı m a	Formül	M e t r i k l e r (İn s a n)	M e t r i k l e r (Y e n i)
Unit Density	U D	Birim Sayısı / Kat Alanı	0. 01 96 26	0. 02 9
Occupancy Density	O D	Toplam Kişi / Kat Alanı	0. 05 15 18	0. 05 9
Private Area Ratio	P A R	Toplam Özel Alan / Kat Alanı	0. 39 90 1	0. 52
Shared Load Index	S L I	Ortak Alan / Toplam Kişi	4. 87 37 34	6. 65
Unit Type Diversity Index	U T D I	Tip Sayısı / Toplam Birim	0. 38 09	0. 25
Circulation Area Ratio	C A R	Sirkülasyon Alanı / Kat Alanı	0. 24 56 66	0. 1

Genel olarak değerlendirildiğinde, yapay zekâ tarafından geliştirilen düzenleme Alexander Klein’in ölçülebilir verimlilik ve yoğunluk odaklı yaklaşımına daha yakın sonuçlar üretirken; insan tarafından geliştirilen senaryo Cedric Price’in kullanıcı çeşitliliği, esneklik ve zamansal uyarlanabilirlik vurgusuyla daha güçlü biçimde ilişkilendirilebilmektedir. Bununla birlikte yapay zekânın, başlangıçta tanımlanan yapısal ve teknik kısıtları (özellikle şaft alanlarını) tam olarak koruyamaması, mevcut durumda bağımsız bir tasarım karar vericisi olmaktan çok araştırmacı denetimi gerektiren bir karar destek aracı olarak değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Tablo sonuçları, yapay zekâ temelli önerinin birim ve kullanıcı yoğunluğu gibi alan temelli metriklerde insan tarafından geliştirilen düzenlemeye kıyasla daha yüksek sayısal değerler ürettiğini göstermektedir. Yapay zekâ önerisinde özel alan oranı artarken, dolaşım alanlarının belirgin biçimde azaldığı ve ortak alanların daha yüksek kullanıcı yükü altında tanımlandığı görülmektedir. Buna karşılık insan tarafından geliştirilen düzenleme, birim tip çeşitliliği ve dolaşım alanı oranı açısından daha dengeli bir mekânsal organizasyon sunmakta ve kullanım senaryoları açısından daha esnek bir yapı önermektedir.

Bu farklar, yapay zekâ temelli düzenlemenin mekânı öncelikle ölçülebilir performans göstergeleri üzerinden ele alarak Klein’in metrik temelli konut değerlendirme anlayışına yakın bir sonuç ürettiğini; insan temelli düzenlemenin ise Cedric Price’in senaryo ve zamansallık vurgusuyla daha güçlü bir ilişki kurduğunu göstermektedir. Ancak hesaplamalı analiz, mekânsal koşulları tanımlamada etkili olmakla birlikte, mekân deneyimi ve uyarlanabilirlik gibi nitel boyutları tek başına açıklamakta sınırlı kalmaktadır. Yapay zekâ tarafından sunulan mekânsal düzenleme, metin ve şemaya dayalı, kural temelli bir temsil olarak, hesaplamalı akıl yürütmenin belirsizlik ve durumsal esneklik pahasına netlik

ve tekdüzeliğe öncelik verme eğilimini görünür kılmaktadır. Bu bağlamda bulgular, co-living gibi sosyal ve zamansal boyutların belirleyici olduğu konut dönüşümlerinde, veri odaklı tasarım süreçlerine insanın yorumlayıcı failliğini dâhil etmenin kritik önemini vurgulamaktadır.

Elde edilen bulgular, yapay zekâ temelli üretimin daha yoğun ve kompakt mekânsal örgütlenmeler ürettiğini, buna karşılık dolaşım alanlarının azalması ve ortak alan yükünün artmasıyla birlikte mekânsal esnekliğin sınırlandığını göstermektedir. İnsan tarafından geliştirilen senaryolar ise birim çeşitliliği ve dolaşım organizasyonu açısından daha dengeli bir dağılım üretmektedir.

4. Sonuçlar

Bu çalışma, aynı mekânsal ölçütlerin farklı kuramsal ve analitik çerçeveler altında ele alındığında birbirinden farklı mimari yorumlara yol açabildiğini göstermektedir. Çalışma genellenebilir sonuçlar üretmekten ziyade, hesaplamalı okuma biçimlerinin mimari karar alma süreçlerini nasıl yönlendirdiğini irdeleyen keşifsel bir vaka çalışması olarak konumlanmaktadır.

Karşılaştırmalı analiz sonuçları, yapay zekâ tarafından üretilen yerleşimin daha yüksek mekânsal yoğunluk ve alan verimliliği hedeflediğini göstermektedir. Birim yoğunluğu (UD) ve kullanıcı yoğunluğu (OD) değerleri yapay zekâ önerisinde daha yüksek bulunurken, özel alan oranı da insan tarafından geliştirilen senaryoya kıyasla artmıştır. Buna karşılık sirkülasyon alanı oranı önemli ölçüde azalmış ve birim tip çeşitliliği düşmüştür. Bu durum, yapay zekâ tarafından geliştirilen önerinin kapasite ve alan verimliliğini önceleyen bir yaklaşım sergilediğini, insan tarafından geliştirilen senaryonun ise kullanıcı çeşitliliği ve mekânsal esneklik açısından daha dengeli bir dağılım sunduğunu göstermektedir. Ayrıca yapay zekâ tarafından üretilen öneride, başlangıçta değiştirilemez kısıtlar olarak tanımlanan shaft alanlarında müdahale önerdiği görülmüştür. Bu durum, yapay zekânın tanımlanan mekânsal kısıtları her durumda tam olarak koruyamadığını ve teknik uygulanabilirlik açısından insan denetimine ihtiyaç duyduğunu göstermektedir. Dolayısıyla yapay zekâ bu çalışmada araştırmacı tarafından yönlendirilen ve doğrulanan bir karar destek aracı olarak değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak bulgular, Klein'in metrik temelli nesnelliği ile Price'ın senaryo ve zamansallık vurgusu arasındaki kuramsal ilişkinin, hesaplamalı analizler aracılığıyla güncel co-living dönüşüm pratiklerinde yeniden üretilebildiğini ve veri odaklı tasarım süreçlerinde insanın yorumlayıcı varlığının korunmasının önemini ortaya koymaktadır. Metrik temelli ve senaryo temelli çerçevelerin karşılaştırılması, mekânsal kalitenin yalnızca sayısal değerlendirmeyele çözümlenemeyeceğini, mekânın yaşanmışlığı, deneyim, kullanıcı eylemliliği ve zamansal uyarlanabilirlik gibi nitel boyutların da kapsanmasında sınırlı kaldığını göstermektedir. Hesaplamalı analiz, kuramsal konut okuması ve yapay zekâ destekli mekânsal yorumlamayı aynı değerlendirme çerçevesinde bir araya getirerek, hesaplamalı tasarım araçlarının mimari karar alma süreçlerindeki rolüne ilişkin alternatif bir okuma önerilmektedir.

Gelecek çalışmalarda, bu araştırmada ele alınan yaklaşımın farklı konut tipolojileri ve kentsel bağlamlar üzerinde test edilmesi, elde edilen bulguların karşılaştırmalı olarak genişletilmesine olanak sağlayacaktır. Özellikle koridorlu, modüler veya mikro konut tipleri gibi farklı plan organizasyonlarının analize dâhil edilmesi, hesaplamalı değerlendirme yöntemlerinin genellenebilirliğini artırabilir. Ayrıca kurgusal senaryolar yerine gerçek kullanıcı davranış verilerine dayalı çalışmalara geçilmesi, mekânsal kararların deneyimsel doğruluğunu güçlendirecektir. Uzun dönemli ve mevsimsel kullanım değişimlerini içeren zaman-temelli analizlerin eklenmesi, co-living gibi dinamik konut modellerinde zamansallık boyutunun daha kapsamlı ele alınmasını sağlayabilir. Bunun yanı sıra yalnızca nicel metriklere dayalı değerlendirme yerine, mahremiyet, konfor ve sosyal etkileşim gibi nitel parametreleri de içeren hibrit değerlendirme modellerinin geliştirilmesi önemli bir açılım sunacaktır.

Yapay zekâ sistemlerinin kural tabanlı üretimden öğrenen ve bağlamsal karar verebilen modellere evrilmesi ise, hesaplamalı tasarımın mimari karar süreçlerindeki temsil kapasitesini artırabilir.

Son olarak, taşıyıcı sistem ve fiziksel kabuk gibi yapısal kısıtların da değişken olarak modele dahil edilmesi, yalnızca iç mekân organizasyonuna odaklanan mevcut yaklaşımın ölçeğini genişleterek daha bütüncül bir dönüşüm çerçevesi sunabilir.

Teşekkür

Bu araştırma Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi İç Mimarlık Doktora Programında “İstanbul'daki Mevcut Apartman Yapılarının Dönüşümüne Yönelik Hibrit Co-Living Modelinin Geliştirilmesi ve Değerlendirilmesi” başlıklı doktora tezinin bir parçası olarak gerçekleştirilmiştir.

KAYNAKLAR

- Anderson, C. (2019). Good life now: Leisure and labour in Cedric Price's housing research, 1966–1973. *Footprint*, 13(1). <https://doi.org/10.7480/footprint.13.1.2139>
- Arabacıoğlu, B. C. (2010). Using fuzzy inference system for architectural space analysis. *Applied Soft Computing*, 10(3), 926-937. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2009.10.011>
- Arslan, A. (2023). Collective houses: An expanding architecture. In *Proceedings of the 18th Paris International Conference on Design, Architecture, Materials & Nanotechnology (PDAMN-23)*, (s. 66–72).
- Bevilacqua, M. G. (2011). Alexander Klein and the Existenzminimum: A 'Scientific' Approach to Design Techniques. *Nexus Network Journal*. 13. 297-313. 10.1007/s00004-011-0080-6
- Brysch, S. (2019). Reinterpreting Existenzminimum in Contemporary Affordable Housing Solutions. *Urban Planning*, 4(3), 326-345. <https://doi.org/10.17645/up.v4i3.2121>
- Canadian Centre for Architecture. (n.d.). Housing research: Plans for steel houses with inflatable link variations [Drawing]. Cedric Price fonds, 1903–2006. Retrieved May 1, 2026, from <https://www.cca.qc.ca/en/search/details/collection/object/440216>
- Corfe, S. (2019). Co-Living: A Solution to the Housing Crisis? The Social Market Foundation.
- Coricelli, F. (2022). The Co-'s of Co-Living: How the Advertisement of Living Is Taking Over Housing Realities. *Urban Planning*, 7(1), 296-304. <https://doi.org/10.17645/up.v7i1.4805>
- Gepp, M. (2022). Systematic analyses: Development of Alexander Klein's methods from 1927 to 1929. Focus Work. ETH Zürich, Professorship for Theory of Architecture. Retrieved May 6, 2026, from <https://stalder.arch.ethz.ch/en/research/focus-works/alexander-kleins-verfahren.html>
- Göksel, N.N. & Arabacıoğlu, B. C. (2025). Flexible Interior Design in Symmetrical Housing Block Typologies: Co-Living Approach. *11th International Conference on New Trends in Architecture and Interior Design 2025, ICNTAD 25*, (s. 237-245).
- Gül, L. F. (2020). Sanal mecralarda mimari tasarımın dünü ve bugünü. Dosya: Gelecek, Teknoloji ve Mimarlık, 45, 28–38
- Price, C. (1969). Fun Palace. *Architectural Design*, 39(3), 127–133.
- Hernández Falagán, D., & Ziaiebigdeli, M. (2022). Parametric Architecture beyond Form—Klein and Price: Pioneers in Computing the Quality of Life in Housing. *Architecture*, 2(1), 1-17. <https://doi.org/10.3390/architecture2010001>
- Koch, D. (2016). On Avoidance: Reflections on Processes of Socio-spatial Structuring. *Civil Engineering and Architecture*. 4. 67-78. 10.13189/cea.2016.040204.
- Korbi, M. & Migotto, A. (2019). Between Rationalization and Political Project: The Existenzminimum from Klein and Teige to Today. *Urban Planning*. 4. 299-314. 10.17645/up.v4i3.2157.
- Menges, A. (2012). Material computation: Higher integration in morphogenetic design. *Architectural Design*, 82(2), 14–21. <https://doi.org/10.1002/ad.1374>
- Tan T.H. & Toh E.B.H. (2025). Millennials' perspectives: motivations for co-living in a developing nation. *Open House International*, Vol. 50 No. 4 pp. 776–792, <https://doi.org/10.1108/OHI-12-2023-0296>
- Woodbury, R. (2010). *Elements of Parametric Design*. Routledge.

MSTAS 26 “KAPSAM DIŞI”

XX. MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM ULUSAL SEMPOZYUMU

OTURUM 6

SAYISAL YÖNTEMLER, GÖRSELLEŞTİRME
ve KÜLTÜREL MİRAS

Parametrik Tasarımın Tarihi Evriminin Dört Önemli Yapı Üzerinden Analizi

Şule Taşlı Pektaş¹ ; Umay Karakaş² 

¹Ostim Teknik Üniversitesi; ²Hacettepe Üniversitesi

¹sule.taslipektas@ostimteknik.edu.tr; ²umaykarakas@hacettepe.edu.tr

Özet

Mimarlıkta sayısal tasarım alanı, oluşturduğu kuramsal bilgi birikimi, gelişen hesaplama yöntemleri ve uygulama pratikleri sayesinde yıllar içerisinde özgün bir araştırma alanı haline gelmiştir. Özellikle parametrik tasarım yaklaşımının mimarlık pratiğine dahil olmasıyla birlikte tasarım süreçleri yalnızca biçim üretimine odaklanan geleneksel anlayıştan uzaklaşmış; veri, performans, çevresel etkenler ve üretim süreçleriyle bütünleşen çok katmanlı bir yapıya dönüşmüştür. Bu nedenle alanın tarihsel gelişimini, dönüşüm dinamiklerini ve teknolojik ilerleyişini inceleyen akademik çalışmalara olan ihtiyaç giderek artmaktadır. Ancak mevcut literatür incelendiğinde parametrik tasarımın gelişim sürecinin çoğu zaman parçalı örnekler ya da dönemsel değerlendirmeler üzerinden ele alındığı, kronolojik ve karşılaştırmalı analizlerin ise sınırlı sayıda kaldığı görülmektedir.

Bu çalışma, söz konusu araştırma açığını kapatmaya katkı sağlamak amacıyla mimaride parametrik tasarımın kronolojik ve teknolojik evrimini milenyum başından itibaren yaklaşık sekiz yıllık aralıklarla inşa edilmiş dört uluslararası simge yapı üzerinden analiz etmektedir. Araştırma kapsamında Walt Disney Konser Salonu (2003), Soumaya Müzesi (2011), Katar Ulusal Müzesi (2019) ve Kral Abdullah Finans Bölgesi (KAFD) Metro İstasyonu (2024) incelenmiş; bu yapılar aracılığıyla parametrik tasarımın farklı gelişim aşamaları ortaya konmuştur. Seçilen yapılar yalnızca mimari ölçekte dikkat çekici örnekler olmaları nedeniyle değil, aynı zamanda parametrik tasarımın farklı dönemlerde üstlendiği teknik ve kavramsal rolleri temsil etmeleri bakımından tercih edilmiştir. Bu bağlamda yapılar; dijital form üretimi, üretim organizasyonu, performans optimizasyonu ve veri tabanlı üretken tasarım sistemi gibi dört temel gelişim aşamasını temsil etmektedir.

Çalışmada yapılan analizler, parametrik tasarımın mimarlık içindeki rolünde önemli bir dönüşüm yaşandığını göstermektedir. İlk dönem örneklerinde parametrik tasarım daha çok karmaşık dijital estetik üretimi ve imalat süreçlerinin yönetilmesine yönelik bir araç olarak kullanılırken, ilerleyen süreçte çevresel veri, yapısal performans ve insan faktörü gibi çok boyutlu girdileri değerlendiren sofistike bir optimizasyon sistemi haline gelmiştir. Walt Disney Konser Salonu'nda dijital modelleme ve karmaşık form üretimi ön plana çıkarken, Soumaya Müzesi'nde üretim sürecinin organizasyonu belirleyici olmuştur. Katar Ulusal Müzesi'nde çevresel performans kriterleri tasarım kararlarına doğrudan entegre edilmiş, KAFD Metro İstasyonu'nda ise veri temelli ve insan odaklı performans optimizasyonu ön plana çıkmıştır. Ayrıca çalışma, mimarlıkta sayısal tasarım tarihi araştırmaları için sistematik ve matris tabanlı bir yöntem önerisi sunarak benzer tarihsel analizler için uygulanabilir bir çerçeve geliştirmeyi amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Mimarlıkta sayısal tasarım, parametrik tasarım, mimari analiz.

An Analysis of the Historical Evolution of Parametric Design Through Four Key Buildings

Şule Taşlı Pektaş¹ ; Umay Karakaş² 

¹Ostim Technical University; ²Hacettepe University

¹sule.taslipektas@ostimteknik.edu.tr; ²umaykarakas@hacettepe.edu.tr

Abstract

The field of digital design in architecture has evolved into a distinctive area of research over the years through the accumulation of theoretical knowledge, advancing computational methods, and expanding practical applications. With the integration of parametric design into architectural practice, design processes have gradually moved beyond the traditional understanding focused solely on form generation and transformed into a multilayered system integrating data, performance, environmental factors, and production processes. Consequently, the need for academic studies examining the historical development, transformation dynamics, and technological progression of this field has increasingly grown. However, the existing literature often addresses the evolution of parametric design through fragmented examples or period-specific evaluations, while chronological and comparative analyses remain relatively limited.

This study aims to contribute to filling this research gap by analyzing the chronological and technological evolution of parametric design in architecture through four internationally recognized landmark structures constructed at approximately eight-year intervals since the beginning of the millennium. Within the scope of the research, the Walt Disney Concert Hall (2003), Museo Soumaya (2011), National Museum of Qatar (2019), and KAFD Metro Station (2024) are examined, and through these structures four distinct stages in the development of parametric design are identified. These buildings were selected not only because they are remarkable architectural examples on an international scale, but also because they represent the different technical and conceptual roles undertaken by parametric design in different periods. In this context, the selected structures correspond to four major developmental stages: digital form generation, production organization, performance optimization, and data-driven generative design systems.

The analyses conducted in this study demonstrate a significant transformation in the role of parametric design within architecture. In early examples, parametric design was primarily employed as a tool for complex digital aesthetic production and the management of advanced fabrication processes. Over time, however, it evolved into a sophisticated optimization system capable of integrating multidimensional inputs such as environmental data, structural performance, and human factors. While the Walt Disney Concert Hall emphasized digital modeling and complex form generation, the Museo Soumaya highlighted the organization of production processes. In the National Museum of Qatar, environmental performance criteria were directly integrated into design decisions, whereas the KAFD Metro Station foregrounded data-driven and human-centered performance optimization. Furthermore, the study proposes a systematic and matrix-based methodology for historical research on digital design in architecture, aiming to provide an applicable framework for future comparative historical analyses.

Keywords: Computational design in architecture, parametric design, architectural analysis.

1. Giriş

Mimarlık disiplini, 1990'lı yıllardan itibaren hesaplamalı araçların ve parametrik tasarımın gelişmesiyle temelden dönüşmüştür. Geometrik ilişkileri tanımlamak için parametrelerin ve algoritmaların sistematik kullanımını esas alan parametrik tasarım, mimarların karmaşıklığı yönetmelerine, geniş tasarım alanlarını keşfetmelerine ve yapı performansını optimize etmelerine olanak tanımıştır (Fankhänel ve Lepik, 2020). Başlangıçta estetik açıdan karmaşık ve serbest biçimli geometrileri gerçekleştirmek için kullanılan parametrik tasarımın işlevi, yapısal verimlilik, çevresel duyarlılık ve kullanıcı deneyimi gibi kritik konuları ele almak üzere giderek genişlemiştir (Fox ve Bell, 2024; Rocha, 2021).

Önce mühendislik alanlarında kullanılan yazılımlarla birlikte mimarlık alanına giren parametrik tasarım, 2000'li yıllarda büyük ölçekli ikonik bina tasarımlarıyla küresel bir mimarlık trendine dönüşmüştür (Frazer, 2016). Zaha Hadid'in ortağı Patrick Schumacher, 2009 yılında Architectural Design dergisinin özel sayısında yayımladığı makalesinde Parametrisizm'i modern mimarlıktan sonraki en önemli mimari stil olarak tanımlamış; karmaşık serbest biçimli geometrilerin dijital araçlarla üretimini bu stilin temel ilkesi olarak belirlemiştir (Schumacher, 2009). 2000 yılından sonraki on yıl içinde dünyanın çeşitli şehirlerinde pek çok karmaşık formlu ve sayısal üretim teknolojileri kullanan yapı inşa edilmiştir (Claypool, 2019).

Bu üretim dalgasının ardından mimarlık camiasında parametrik tasarımın form odaklı, pahalı ve bağlamdan kopuk olduğuna dair eleştirel yorumlar görülmeye başlanmıştır (Rybczynski, 2013; Coyne, 2014). Bu yoğun eleştiriler karşısında Parametrisist Manifesto'sunu güncelleme ihtiyacı duyan Schumacher Architectural Design dergisinin 2016 yılındaki özel sayısında yayımladığı makalesinde bu tür eleştirilere değinmiş ve parametrik tasarımın "marjinalleştiğini" söylemiştir. Bu marjinalleşmeye karşı daha "sürdürülebilir" ve "insan faktörünü önceleyen" bir parametrik tasarım anlayışını önermiştir (Schumacher, 2016, 2020). Schumacher'in bu iki manifestosunu tek bir mimarlık ofisinin iddiası olarak değil, dönemin sayısal tasarım gelişmeleriyle birlikte okuduğumuzda, bu dönüşümün parametrik tasarımın genel yönelimini tariflediği söylenebilir.

Parametrik tasarımın dönüşümü ilgili literatürde anekdotal olarak tartışılmakla birlikte konuyu sistematik ve karşılaştırmalı biçimde ele alan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bahsedilen araştırma açığını kapamaya yardımcı olmak üzere kurgulanmış olan bu çalışmanın temel araştırma sorusu şudur: Parametrik tasarımın mimarlık pratiğindeki rolü milenyum başından günümüze kadar nasıl dönüşmüştür ve bu dönüşüm sistematik olarak nasıl incelenebilir?

Bu soruya yanıt bulmak üzere öncelikle bir literatür araştırması yapılmış ve parametrik tasarımın tarihi gelişimine ışık tutan çalışmalar incelenmiştir. Çalışma, bu dönüşümü dört teknik ve kavramsal eşik üzerinden yorumlamaktadır: (1) form üretimi, (2) üretim organizasyonu, (3) performans optimizasyonu ve (4) üretken tasarım sistemi. Analiz için kronolojik olarak yaklaşık sekiz yıllık aralıklarla inşa edilmiş dört ikonik yapı seçilmiştir: Walt Disney Konser Salonu (2003), Soumaya Müzesi (2011), Katar Ulusal Müzesi (2019) ve Kral Abdullah Finans Bölgesi (KAFD) Metro İstasyonu (2024). Bu çalışma devam eden daha büyük bir araştırmanın ön çalışması niteliğindedir.

2. Literatür Araştırması

Parametrik tasarımın tarihsel köklerine ilişkin akademik çalışmalar, bu kavramın 1960'lı yıllardan itibaren mimarlık ve mühendislik alanlarında şekillenmeye başladığını ortaya koymaktadır. Ivan Sutherland'ın 1963 yılında geliştirdiği Sketchpad programı, geometrik nesnelerin birbirleriyle kısıt ilişkileri (constraints) aracılığıyla tanımlanabileceğini göstererek bilgisayar destekli tasarımın temellerini atmıştır (Sutherland, 1963). Luigi Moretti ise aynı dönemde "parametric architecture" kavramını ilk kez kullanarak, mimari formun sayısal parametreler üzerinden tanımlanabileceğini

deneyisel çalışmalarıyla savunmuştur (Lucente ve Canestrino, 2023). Bu öncü girişimler, parametrik düşüncenin mimarlıkta önce kuramsal, ardından pratik bir zemin kazanmasının habercisi olmuştur.

1980'lerde William Mitchell'ın biçim grameri (shape grammar) çalışmaları ve ardından gelen nesne yönelimli modelleme yaklaşımları, mimarların geometrik ilişkileri algoritmik biçimde tanımlama kapasitesini artırmıştır (Woodbury, 2010). 1990'lı yılların sonunda havacılık endüstrisinden uyarlanan CATIA yazılımının Gehry Technologies aracılığıyla mimarlığa aktarılması, parametrik tasarımın büyük ölçekli karmaşık yapılarda uygulanmasını ilk kez mümkün kılmıştır (Shelden, 2002). Bu dönemde Greg Lynn'in 'blob' mimarisi ve Zaha Hadid'in akışkan formları, parametrik araçların estetik bir söyleme dönüştürülmesinin öncü örneklerini oluşturmuştur.

2000'li yılların başında Kolarevic (2003), sayısal tasarım ve üretim arasındaki ilişkiyi inceleyen kapsamlı çalışmasında parametrik araçların geometrik betimlemeden doğrudan imalat bilgisi üretimine geçişi nasıl kolaylaştırdığını ortaya koymuştur. Bu çalışma, dijital tasarım ve yapım süreçlerini bütünlük bir perspektiften ele alan ilk sistematik akademik referanslardan biri olarak kabul görmektedir. Oxman (2006) ise dijital tasarım düşüncesini kuramsal bir çerçevede ele alarak performans temelli tasarım süreçlerinin ortaya çıkışını ve bu süreçlerin geleneksel tasarım anlayışından farklılaşmasını tartışmıştır. Oxman, yeni dijital tasarım paradigmasının temel özelliğini, formun önceden belirlenip sonra üretilmesi yerine çeşitli performans parametrelerinin girdi olarak kullanıldığı bir süreç içinde ortaya çıkması olarak tanımlamıştır.

2007 yılında Robert McNeel & Associates tarafından piyasaya sürülen Grasshopper eklentisi, parametrik ve algoritmik tasarım araçlarını daha geniş bir mimar kitlesine erişilebilir kılmış; bu gelişme parametrik tasarımın pratikte yaygınlaşmasını önemli ölçüde hızlandırmıştır (Burry, 2011). Aynı dönemde Schumacher'in Parametrisist Manifesto'su (2009), parametrik tasarımı salt bir üretim tekniği olarak değil, kapsamlı bir mimari üslup ve sosyokültürel bir proje olarak konumlandırmıştır. Parametrisizme yönelik eleştiriler de bu dönemde belirginleşmiştir. Rybczynski (2013), parametrik tasarımın algoritmik süreçlerin gölgesinde insani ve işlevsel kaygıları göz ardı ettiğini; Coyne (2014) ise bu yaklaşımın bağlam, yer ve kullanıcı deneyiminden kopuk bir form üretimine yol açtığını ileri sürmüştür. Bu eleştiriler alanın özeleştirisi kapasitesini ve yeniden yapılanma ihtiyacını gözler önüne sermiştir. Schumacher (2016) ikinci manifestosunda bu eleştirileri kısmen kabul ederek "Parametrisizm 2.0" adını verdiği daha kapsayıcı ve performans odaklı bir yaklaşımı savunmuştur.

2010'lu yıllarda ve sonrasında parametrik tasarım, mimarlık ve mühendisliğin ötesinde kentsel tasarım, malzeme araştırması ve sürdürülebilirlik alanlarına da yayılmaya başlamıştır. Frazer (2016), parametrik hesaplamanın tarihini ve geleceğini ele aldığı makalesinde, alanın form üretiminden bütünlük sistem tasarımına doğru evrildiğini kapsamlı biçimde belgelemiştir. Fox ve Bell (2024), mimarlıkta hesaplamanın genel evrimini inceleyen çalışmalarında yapay zekâ ve makine öğrenmesinin parametrik tasarımla bütünlüşmesini en güncel gelişim olarak konumlandırmış; bu entegrasyonun parametrik sistemlerin öngörme ve uyarlanma kapasitesini köklü biçimde dönüştürdüğünü ortaya koymuştur.

3. Yöntem

Bu araştırmada benimsenen yöntem iki temel bileşenden oluşmaktadır: örnek yapıların seçimi ve analiz matrisinin geliştirilmesi. Yöntemin her iki bileşeni de kapsamlı bir literatür araştırmasına dayandırılmıştır.

3.1. Yapı Seçimi

Analiz kapsamına alınacak yapıların belirlenmesinde üç temel ölçüt benimsenmiştir. Birinci ölçüt ikoniklik ve öncülük niteliğidir: seçilen yapının, parametrik tasarım araçlarının uygulanması açısından kendi döneminde uluslararası arenada öne çıkan, akademik ve mesleki literatürde geniş biçimde

tartışılmış bir örnek olması aranmıştır. İkinci ölçüt kronolojik dağılımdır: yapıların birbirinden yaklaşık sekiz yıllık aralıklarla tamamlanmış olması ve böylece parametrik tasarımın farklı evrimsel aşamalarını temsil etmesi hedeflenmiştir. Üçüncü ölçüt belgelenebilirliktir: her yapının parametrik tasarım sürecine ilişkin güvenilir birincil ya da ikincil kaynak belgesine ulaşılabilmesi ön koşul olarak kabul edilmiştir. Bu ölçütler doğrultusunda Walt Disney Concert Hall (2003), Museo Soumaya (2011), National Museum of Qatar (2019) ve KAFD Metro Station (2024) analize dahil edilmiştir. Her yapı, parametrik tasarımın kronolojik evrimi içinde birbirini izleyen ve birbirinden niteliksel olarak ayrıışan bir aşamayı temsil etmektedir. Bu yapılar, dijital tasarım araçlarının gelişimiyle birlikte form üretim süreçlerinde ortaya çıkan dönüşümü görünür kılmakta ve farklı dönemlerin tasarım anlayışlarını yansıtarak parametrik tasarımın gelişim sürecine ışık tutmaktadır.

3.2. Analiz Matrisinin Geliştirilmesi

Seçilen yapıların sistematik biçimde karşılaştırılabilmesi amacıyla sekiz kriterden oluşan bir analiz matrisi geliştirilmiştir. Bu kriterler literatür araştırması sonucunda belirlenmiş olup parametrik tasarımın teknik, performatif ve kavramsal boyutlarını kapsamlı biçimde temsil etmektedir: (1) Form üretimi odaklılık: Yapının tasarım sürecinde parametrik araçların öncelikli olarak biçimsel karmaşıklığı üretmek amacıyla kullanılıp kullanılmadığını değerlendirir. (2) Üretim karmaşıklığı yönetimi: Parametrik modellemenin imalat ve montaj süreçlerinin organizasyonuna katkısını ölçer. (3) Çevresel performans entegrasyonu: Güneş kırma, ısıl konfor ve doğal havalandırma gibi iklim duyarlı performans kriterlerinin parametrik sürecin ne ölçüde girdisini oluşturduğunu sorgular. (4) Yapısal optimizasyon düzeyi: Form-bulma sürecinde yapısal verimlilik analizlerinin ne ölçüde rol oynadığını ortaya koyar. (5) Veri tabanlı karar mekanizması: Tasarım kararlarının sezgisel yorumdan ziyade sayısal veriye dayandırılma derecesini ölçer. (6) İnsan faktörü optimizasyonu: Yaya akışı, erişilebilirlik ve kullanıcı deneyimi gibi insan merkezli değişkenlerin parametrik sisteme entegrasyon düzeyini değerlendirir. (7) Hesaplamalı analiz derinliği: Simülasyon ve parametrik analizlerin tasarım sürecindeki kapsamını ve derinliğini ölçer. (8) Parametrik tasarımın genel rolü: Yukarıdaki kriterlerin bütünü değerlendirilerek parametrik tasarımın söz konusu projede üstlendiği işlevin kavramsal olarak tanımlanmasını amaçlar. Her kriter, dört seviyeli Likert ölçeği (Çok Zayıf – Zayıf – Güçlü – Çok Güçlü) ile değerlendirilmiştir. Dörtlü ölçeğin seçilmesinin temel gerekçesi, nötr bir orta seçenek sunmamasıdır; bu özellik değerlendiricileri net bir tutum almaya yönlendirerek değerlendirme sürecini ve okuyucu için yorumlanabilirliği artırmaktadır (Hopper, 2024).

3.3. Değerlendirme Süreci

Matris değerlendirmeleri, konsensüse dayalı niteliksel araştırma yönteminin temel ilkelerine uygun olarak yürütülmüştür (Hill ve Knox, 2021). Bu yöntemle göre araştırmacılar, her yapı için her kriteri önce bağımsız biçimde değerlendirmiş; ardından ortak bir görüşme sürecinde farklılıklar tartışılarak uzlaşıya varılmıştır. Değerlendirmelerin geçerliğini artırmak amacıyla sonuçlar, ilgili yapıların parametrik tasarım süreçlerine hâkim bir dış uzman tarafından da incelenmiş ve gerekli düzeltmeler yapılmıştır. Bu çok aşamalı değerlendirme süreci, olası yorumlama yanlışlıklarını en aza indirmeyi hedeflemektedir.

4. Analiz

Bu bölümde seçilen dört yapı, 3. bölümde tanımlanan sekiz analiz kriteri üzerinden ayrıntılı biçimde incelenmektedir. Her yapının analizi; yapının genel bağlamı ve programı, parametrik tasarım sürecinin özgün nitelikleri ve analiz matrisindeki konumu olmak üzere üç boyutu kapsamaktadır. Analizde ele alınan yapılar sırasıyla şunlardır: (1) Walt Disney Konser Salonu (Los Angeles, 2003), parametrik araçların dijital modelleme ve karmaşık imalat aracı olarak kullanıldığı birinci eşiği; (2) Soumaya Müzesi (Meksiko City, 2011), parametrik tasarımın üretim organizasyonu sistemine dönüştüğü ikinci eşiği; (3) Katar Ulusal Müzesi (Doha, 2019), çevresel performans kriterlerinin form kararlarının girdisi hâline geldiği üçüncü eşiği; ve (4) KAFD Metro İstasyonu (Riyad, 2024), parametrik tasarımın veri temelli üretken bir performans sistemine evrildiği dördüncü eşiği temsil etmektedir (Tablo 1).

Tablo 1: Parametrik tasarımın teknik ve performatif eşikler üzerinden karşılaştırmalı analizi

Kriter	Walt Disney Concert Hall (2003)	Museo Soumaya (2011)	National Museum of Qatar (2019)	KAFD Metro Station (2024)
Form Odaklılık	Çok Güçlü	Çok Güçlü	Güçlü	Zayıf
Üretim Karmaşıklığı Yönetimi	Güçlü	Çok Güçlü	Güçlü	Güçlü
Çevresel Performans Entegrasyonu	Zayıf	Zayıf	Güçlü	Çok Güçlü
Yapısal Optimizasyon	Güçlü	Zayıf	Güçlü	Çok Güçlü
Veri Tabanlı Karar Mekanizması	Zayıf	Zayıf	Zayıf	Çok Güçlü
İnsan Faktörü Optimizasyonu	Çok Zayıf	Çok Zayıf	Zayıf	Çok Güçlü
Hesaplamalı Analiz Derinliği	Zayıf	Zayıf	Güçlü	Çok Güçlü
Parametrik Tasarımın Rolü	Modelleme Aracı	Üretim Organizasyonu	Performans Optimizasyonu	Üretken Performans Sistemi

4.1. Walt Disney Konser Salonu (2003)

Frank Gehry tarafından tasarlanan ve 2003 yılında Los Angeles'ta tamamlanan Walt Disney Konser Salonu, Los Angeles Filarmoni Orkestrası'nın 2.265 kişilik yeni konser mekânıdır. Lillian Disney'in 1987 yılında başlattığı 50 milyon dolarlık başlangıç fonuyla hayata geçirilen proje, finansman güçlükleri ve idari engellerle geçen on beş yıllık bir sürecin ardından tamamlanmıştır (Shelden, 2002). Yapı, dışarıda devingen paslanmaz çelik yüzeyler ve akışkan formlarıyla, içeride ise sıcak Douglas çamı kaplı salonuyla dikkat çekmektedir.

Projenin parametrik tasarım sürecinin merkezinde CATIA yazılımı yer almaktadır. Başlangıçta Fransız savaş uçakları için geliştirilen bu yazılım, Gehry'nin Computing Director'ı Dennis Shelden tarafından mimarlığa uyarlanmıştır. Shelden'in MIT doktora tezinde ayrıntılı biçimde aktarıldığı üzere, mimarın elle oluşturduğu fiziksel maket lazer tarama teknolojisiyle koordinat verilerine dönüştürülmüş; bu veriler CATIA ortamında parametrik yüzeyler olarak yeniden tanımlanmış ve CNC tezgâhlarında üretilebilir biçime getirilmiştir (Shelden, 2002). Dış kabuğun her biri geometrik olarak özgün olan 6.000'i aşkın paslanmaz çelik panelden oluştuğu bildirilmektedir. Kolarevic (2003), bu projeyi sayısal tasarım ile üretim süreçlerinin bütünleştiği "dijital süreklilik" anlayışının mimarlıktaki öncü örneklerinden biri olarak nitelendirmektedir.

Yapıda akustik tasarım boyutu, Nagata Acoustics'ten Yasuhisa Toyota ile yürütülen kapsamlı bir iş birliği süreciyle şekillenmiştir. Gehry ve Toyota, salonun 1:10 ölçekli bir fiziksel modelini yaparak ses dalgalarının frekansını orantılı biçimde artırmak suretiyle reverberasyon koşullarını test etmiştir. Bu süreç, mimari formun akustik parametreler tarafından doğrudan biçimlendirildiği bütünlük bir

tasarım anlayışına işaret etmektedir. Salonda “bağ bozumu” (vineyard) oturma düzeni benimsenmiş; bu düzlemde izleyiciler sahneyi üç yandan kuşatmakta ve akustik kaliteyle mekânsal samimiyet arasında denge kurulmaktadır. Ulaşılan reverberasyon süresi boş salonda yaklaşık 2,2 saniyedir. İç mekân kaplama malzemesi olan Douglas çamı hem ses yayıcı hem de estetik işlev görmektedir (Toyota vd., 2020).

Analiz matrisi açısından değerlendirildiğinde Walt Disney Konser Salonu, form üretimi odaklılık ve üretim karmaşıklığı yönetimi kriterlerinde güçlü bir konuma sahipken, çevresel performans entegrasyonu, veri tabanlı karar mekanizması ve insan faktörü optimizasyonu büyük ölçüde geleneksel mühendislik ve mimar-danışman diyaloguyla ele alınmıştır; bu boyutlar parametrik sürecin doğrudan girdisi olmamıştır. Proje, parametrik tasarımın “dijital modelleme ve karmaşık imalat aracı” olarak konumlandığı birinci eşiği temsil etmektedir.

Projenin mimarlık söylemindeki önemi salt teknik başarısıyla sınırlı değildir. Rybczynski (2013) ve Coyne (2014) gibi eleştirmenler, 2000’li yıllarda yaygınlaşan parametrik ikonik yapıları işlevden kopuk bularak eleştirirken, Walt Disney Konser Salonu bu eleştirilerin tam anlamıyla hedefine oturmayan bir örnek olarak öne çıkar: parametrik araçlar burada mevcut bir programı -yani akustik açıdan üstün bir konser salonu inşa etmeyi-gerçekleştirmek için kullanılmıştır. Bununla birlikte yapı, 275 milyon dolar olarak gerçekleşen maliyetiyle (başlangıç bütçesinin çok üzerinde) parametrik üretimin ekonomik boyutuyla ilgili tartışmaları da alevlendirmiştir.

4.2. Soumaya Müzesi (2011)

Carlos Slim Vakfı için Fernando Romero EnterprisE (FR-EE) tarafından tasarlanan ve 2011 yılında Meksiko City’nin Polanco semtinde tamamlanan Soumaya Müzesi, 17.000 m² inşaat alanına yayılan altı katlı bir kültür yapısıdır. Müze; Rodin heykellerinin Fransa dışındaki en büyük koleksiyonu dahil 66.000’i aşkın eseri barındırmaktadır ve halka ücretsiz açıktır. Yapı, rotasyona uğramış bir eşkenar dörtgen (rhomboid) biçiminde kurgulanmış; her birinin çapı, geometrisi ve formu birbirinden farklı olan 28 eğrisel çelik kolonla taşınmaktadır. Her katta bir adet olmak üzere yedi yatay halka kirişi strüktürü pekiştirmekte ve katlarda konsol açıklıklarının sağlanmasına olanak tanımaktadır (Romero ve Ramos, 2013).

Projenin cephe mühendisliği süreci, parametrik tasarımın üretim organizasyonuna katkısını somut biçimde örneklemektedir. Fernando Romero, yapının üç boyutlu mühendisliğinin koordinasyonu için Gehry Technologies’i görevlendirmiş; ekip, Digital Project yazılımını merkezi üç boyutlu modelleme ortamı olarak kullanmıştır (Romero ve Ramos, 2013). Cephedeki 16.000 altıgen alüminyum panelin her biri geometrik olarak özgündür. Panellerin gerçek birincil strüktüre uyarlanması için Houston merkezli Geometrica Inc., lazer topografya yöntemiyle yapının gerçek formunu ölçerek Digital Project modelini gerekli noktalarda güncellemiş ve üretim talimatlarını yazılımdan doğrudan çıkarmıştır; “bilgisayar ekranında öngörülen her eleman yerli yerine oturmuştu” (Geometrica, 2011). Yapının tasarım ve mühendislik ekibine Gehry Technologies’in yanı sıra ARUP da dahildi.

Analiz matrisi açısından Soumaya Müzesi, form üretimi odaklılığı güçlü biçimde korurken parametrik tasarımın projeye özgü belirleyici katkısı, binlerce özgün bileşenin üretim ve montaj lojistiğinin bütünleşik bir dijital model üzerinden koordinasyonudur. Çevresel performans entegrasyonu ve insan faktörü optimizasyonu sınırlı kalmış; parametrik sürecin odağı fabrikasyon organizasyonunda yoğunlaşmıştır. Proje, “üretim organizasyonu sistemi” olarak tanımlanan ikinci eşiği temsil etmektedir.

Museo Soumaya, mimarlık eleştirileri bağlamında hem övgü hem de tartışma konusu olan ikili bir değerlendirmeye karşılanmıştır. Yapının biçimsel cesareti ve kamuya ücretsiz açık olması övülürken, çevresel duyarlılık, kentsel bağlam ve iç mekân işlevselliği açısından eleştiriler de yöneltilmiştir (Villegas, 2011). Bu eleştiriler, parametrik tasarımın üretim organizasyonundaki güce rağmen performans odaklı bütünleşik bir tasarım anlayışına henüz ulaşamadığını doğrular niteliktedir ve bu

durum, analiz matrisindeki sınırlı çevresel performans ve insan faktörü değerlendirmeleriyle örtüşmektedir.

4.3. Katar Ulusal Müzesi (2019)

Jean Nouvel tarafından tasarlanan ve 2019 yılında Doha'nın sahil şeridinde açılan Katar Ulusal Müzesi, Sheikh Abdullah bin Jassim Al Thani'nin tarihi sarayını çevresinde konumlanan 40.000 m² kapalı alanlı bir kültür kompleksidir. Yapının biçimsel ilham kaynağı, Körfez bölgesinin tuz göllerinde alçı ve kuvars minerallerinin kristalleşmesiyle oluşan “çöl gülü” (barid) adlı doğal mineraldir. Bu ilhamdan hareketle yapı, 30 farklı çapta ve birbirini kesen açılarda konumlandırılmış 539 disk biçimli elemandan oluşturulmuştur (Broome, 2019).

Projenin yapısal ve sayısal tasarım sürecinde Gehry Technologies tarafından geliştirilen Digital Project yazılımı kullanılmış; proje, o dönemde kapsam ve ayrıntı derinliği bakımından dünyanın en büyük BIM projelerinden biri olarak tanımlanmıştır. Disklerin birbirini kestiği yüzlerce düğüm noktasındaki karmaşık geometrilerin tutarlı biçimde çözülmesi, eş zamanlı parametrik modellemeyle mümkün olmuştur. Proje direktörü David Gilpin süreci şöyle özetlemektedir: “Bizim için en büyük meydan okuma, mimari formun ve yapısal formun birbiriyle özdeş olmasıydı.” Ekibin başlangıçta beton yapı düşündüğü, ancak heykelsi formlara daha uygun olan çeliğe yöneldiği de belgelenmiştir (Broome, 2019).

Katar Ulusal Müzesi'nde parametrik tasarımın önceki yapılardan niteliksel olarak ayrıştığı temel boyut, çevresel performans kriterlerinin form kararlarının girdisine dönüşmesidir. Birbirine kenetlenen disklerin üst katmanları, cephenin önemli bir bölümüne doğrudan güneş ışığının girmesini önleyen pasif gölge elemanları işlevi görmektedir; derin saçak açısı ise Doha'ya ait güneş verilerinin analizi sonucunda 30 derece kesme açısı hedefi doğrultusunda belirlenmiştir (Designing Buildings, 2019). Yapı, dünyanın birden fazla uluslararası sürdürülebilirlik sertifikası almış ilk ulusal müzesi olma özelliğini taşımakta; LEED Gold sertifikasının yanı sıra Körfez bölgesine özgü GSAS sisteminden 4 yıldız derecelendirmesi almıştır (Qatar Museums, 2019). Analiz matrisi açısından bu yapı, çevresel performans entegrasyonunun parametrik sürecin ayrılmaz bir parçası olduğu “performans optimizasyonu aracı” olarak tanımlanan üçüncü eşiği temsil etmektedir.

Katar Ulusal Müzesi, mimarlık tarihi açısından da önemli bir eşiği temsil etmektedir: parametrik geometrinin kentsel ve kültürel kimlik inşasında bilinçli bir araç olarak kullanılmasıdır. Jean Nouvel, yapının teknolojik kapasiteyle kültürel söylemi birleştirme iddiasını açıkça ortaya koymuştur; Architectural Record'un aktardığı üzere proje direktörü David Gilpin de sürecin zor boyutunun mimari form ile yapısal formun özdeş olduğu bu tasarımda her ikisini eş zamanlı optimize etmek olduğunu vurgulamıştır (Broome, 2019). Bu durum, çevresel ve yapısal performansın ayrı bir mühendislik katmanı olmaktan çıkıp formun kurucu mantığına dönüştüğünü göstermektedir.

4.4. KAFD Metro İstasyonu (2024)

Zaha Hadid Mimarlık (ZHA) tarafından tasarlanan Kral Abdullah Finans Bölgesi (KAFD) Metro İstasyonu, 2024 yılı sonunda Riyad'da hizmete açılmıştır. Yapı; 176 km uzunluğundaki, altı hat ve 85 istasyondan oluşan Riyad Metro ağının merkezi aktarma noktası olarak işlev görmektedir; dünyanın en uzun sürücüsüz toplu taşıma sistemini oluşturan bu ağın kilit düğümünü oluşturmaktadır. 20.434 m² alana yayılan yapı, dört kamu katında altı metro platformunu barındırmakta ve havalimanı hattı, şehir içi hat ile yerel monoray bağlantısını tek çatı altında birleştirmektedir (Zaha Hadid Architects, 2024).

Projenin parametrik tasarım mantığının önceki üç yapıdan en temel ayrışma noktası, formun doğrudan işlevsel ve performans verisinden türetilmesidir. ZHA'nın resmi proje belgelerine göre yapının biçimsel omurgasını oluşturan üç boyutlu kafes, günlük yolcu akışlarının modellenmesinden ve bu akışların frekans değişimlerinden üretilen karşıt sinüs eğrileri dizisine dayanmaktadır: dolaşım yoğunluğu formu belirlemekte, form ise dolaşım performansını optimize etmektedir (Zaha Hadid

Architects, 2024). Bu ilişki, parametrik tasarımın önceki örneklerdeki araçsal konumundan köklü biçimde ayrılan üretken bir mantığa işaret etmektedir.

Cephe mühendisliği boyutunda, ZHA'nın tasarımını uygulayan Newtecnic'in yayımladığı teknik incelemeye göre yapının dış kabuğu salt bir biçimsel örtü değil, geometrik denetim, iklimsel dayanım ve dijital fabrikasyon stratejilerini bütünleşik biçimde ele alan çok katmanlı bir performans sistemi olarak tasarlanmıştır; süreçte parametrik modelleme, sonlu elemanlar analizi ve çevresel kıyaslama yöntemleri bir arada uygulanmıştır (Newtecnic, 2024). Cephedeki geometrik perforasyonlar, Riyad'ın aşırı sıcak iklimine karşı güneş kazanımını azaltan pasif bir çevre koruma stratejisi işlevi görmektedir; tasarım, geleneksel Arap mashrabiya örüntülerine hesaplamalı bir yeniden yorum getirmektedir. ZHA ayrıca yapının enerji talebini minimize edecek pasif tasarım özellikleri ile yenilenebilir enerjiyle beslenen ve yolcu yoğunluğuna göre otomatik ayarlanan aktif soğutma sistemini bütünleştirdiğini belgelemektedir (Zaha Hadid Architects, 2024).

Analiz matrisi açısından KAFD Metro İstasyonu, sekiz kriterin tamamında önceki yapılara kıyasla en yüksek değerlendirme düzeyine sahiptir. Yapısal optimizasyon, çevresel performans entegrasyonu, veri tabanlı karar mekanizması ve insan faktörü optimizasyonu, birbiriyle zorunlu biçimde bütünleşik tek bir parametrik sistemin çıktısıdır. Bu bütünleşme, parametrik tasarımı “çok ölçütlü üretken performans sistemi” olarak tanımlanan dördüncü eşikte konumlandırmaktadır.

Tablo 1’de sunulan karşılaştırmalı matris, dört yapı arasındaki dönüşümü bir bütün olarak görünür kılmaktadır. Kronolojik sırada okunduğunda matris, birkaç belirgin eğilimi gözler önüne sermektedir. Form üretimi odaklılığı ilk iki yapıda en yüksek değerdeyken zamanla azalmakta; buna karşın çevresel performans entegrasyonu, veri tabanlı karar mekanizması, insan faktörü optimizasyonu ve hesaplamalı analiz derinliği son yapıya doğru sistematik biçimde artmaktadır. Bu örüntü, parametrik tasarımın biçimsel kaygıdan performans kaygısına doğru geçirdiği dönüşümün somut göstergesidir. Matrisin son satırında yer alan “Parametrik Tasarımın Rolü” kriteri ise bu dönüşümü kavramsal düzeyde özetlemektedir: modelleme aracından üretken performans sistemine uzanan bu yolculuk, mimarlıkta sayısal tasarımın yalnızca teknik değil, epistemolojik bir olgunlaşma süreci geçirdiğini de ortaya koymaktadır.

5. Tartışma ve Sonuç

Dört yapı üzerinden yürütülen analiz, parametrik tasarımın rolünde dört teknik ve performatif eşik üzerinden belirgin bir dönüşüm olduğunu ortaya koymaktadır. Bu dönüşüm; Walt Disney Konser Salonu'nda “dijital modelleme ve karmaşık imalat aracı”, Soumaya Müzesi'nde “üretim organizasyonu sistemi”, Katar Ulusal Müzesi'nde “performans optimizasyonu aracı” ve KAFD Metro İstasyonu'nda “üretken performans sistemi” olarak tanımlanabilmektedir. Bu sıralama, kronolojik bir ilerlemeyi yansıtmakla birlikte salt teknolojik bir gelişimi değil; aynı zamanda parametrik tasarımın hangi soruları cevaplamaya çalıştığına dair köklü bir paradigma kaymasını da işaret etmektedir.

Birinci ve ikinci eşikte parametrik tasarım, mimarın zihninde oluşmuş bir formu gerçekleştirmenin ve üretilebilir kılmanın teknik aracı olarak işlev görmüştür; temel katkısı geometrik karmaşıklığı yönetmek ve tasarım ile yapım arasındaki bilgi aktarımını otomatize etmektir. Üçüncü ve özellikle dördüncü eşikte ise dönüşüm nitelikselidir: form artık çeşitli performans kriterlerinin optimizasyon sürecinden doğmaktadır. Bu değişim, Oxman'ın (2006) yeni dijital tasarım kuramında öngördüğü ve Fox ile Bell'in (2024) hesaplamalı evrimine ilişkin çalışmalarında belgelediği ilerlemeyle örtüşmektedir. Çevresel veri, yaya davranışı, yapısal verimlilik ve malzeme ekonomisi, mimari formun biçimlendiricisi haline gelmektedir. Bu bağlamda KAFD Metro İstasyonu, parametrik tasarımın klasik işlevsel/estetik ikilemini aşarak her ikisini de bütünleşik bir sistem içinde optimize ettiği olgun bir örnek olarak öne çıkmaktadır.

Schumacher'in (2016) "Parametrisizm 2.0" adını verdiği öneri, bu kronolojik tablo içinde önemlidir. Schumacher ikinci manifestosunda form odaklılığın ötesine geçerek kullanıcı deneyimi, kentsel bağlam ve sosyal konfigürasyon gibi faktörlerin parametrik sürecin girdisi olması gerektiğini savunmuştur. Analiz edilen yapılardaki kronolojik dönüşüm, bu önerinin büyük ölçüde gerçekleştiğini ve KAFD Metro İstasyonu gibi projelerde somutlaştığını göstermektedir. Bununla birlikte Frazer'in (2016) ve Fox ve Bell'in (2024) işaret ettiği yapay zekâ ile makine öğrenmesi entegrasyonunun ileride beşinci bir eşiği tanımlayabileceği de göz ardı edilmemelidir.

Bu çalışmada önerilen matris tabanlı analiz yöntemi farklı yapıların parametrik tasarım süreçlerini hem bağımsız hem de karşılaştırmalı olarak değerlendirmeye olanak tanımaktadır. Konsensüse dayalı niteliksel araştırma yöntemi (Hill ve Knox, 2021) aracılığıyla uygulanan değerlendirme süreci, tekil araştırmacı yanlılığını azaltmakta ve bulguların güvenilirliğini artırmaktadır. Yöntem, mimarlık tarihçileri ve dijital tasarım araştırmacıları için tekrarlanabilir, ölçeklenebilir ve şeffaf bir analiz çerçevesi sunmaktadır.

Bununla birlikte, çalışmanın bazı sınırlılıkları da mevcuttur. Dört yapıdan oluşan örneklem, istatistiksel genelleme için yeterli değildir. Seçilen yapılar uluslararası ölçekteki ikonik örneklerdir; bu durum bulguların daha küçük ölçekli veya bölgesel projelere aktarılabilirliğini sınırlamaktadır. Öte yandan değerlendirme süreci, uzman denetimiyle desteklenmesine karşın niteliksel bir yargıyı içermekte ve dolayısıyla belirli bir yoruma açıklık taşımaktadır.

Bu çalışma, parametrik tasarımın mimarlık pratiğindeki rolünün milenyum başından günümüze nasıl dönüştüğünü, Walt Disney Konser Salonu (2003), Soumaya Müzesi (2011), Katar Ulusal Müzesi (2019) ve KAFD Metro İstasyonu (2024) olmak üzere kronolojik olarak seçilmiş dört uluslararası ikonik yapı üzerinden sistematik biçimde incelemiştir. Analiz, parametrik tasarımın salt biçim üretim aracı olmaktan çıkarak performans üretim mantığına dayalı kapsamlı bir tasarım metodolojisine dönüştüğünü açıkça ortaya koymaktadır. Bu dönüşüm; (1) dijital modelleme ve karmaşık imalat aracı, (2) üretim organizasyonu sistemi, (3) performans optimizasyonu aracı ve (4) çok ölçütlü üretken performans sistemi olmak üzere dört aşamalı bir eşik üzerinden izlenebilmektedir.

Çalışmanın özgün katkıları birkaç düzlemde değerlendirilebilir. Birinci katkı, parametrik tasarımın tarihsel dönüşümünü somut yapılar üzerinden dört teknik ve kavramsal eşikle tanımlamış olmasıdır. Mevcut literatür bu dönüşümü çoğunlukla anekdotal biçimde ya da tek yapı odaklı olarak ele almaktadır; oysa bu çalışmada geliştirilen sekiz kriterlik analiz matrisi, farklı yapıların parametrik tasarım süreçlerini ortak bir çerçeve içinde karşılaştırmalı olarak değerlendirmeye olanak tanımaktadır. İkinci katkı, mimarlıkta sayısal tasarım tarihi araştırmaları için tekrarlanabilir, şeffaf ve ölçeklenebilir bir analiz yöntemi önermesidir. Bu yöntem hem mimarlık tarihçileri hem de dijital tasarım araştırmacıları için sistematik belgeleme amacıyla kullanılacak bir araç sunmaktadır.

Gelecek perspektifinden bakıldığında, yapay zekâ ve makine öğrenmesinin parametrik sistemlerle bütünleşmesi beşinci bir eşiğin habercisi olabilir (Fox ve Bell, 2024). Üretken yapay zekâ modellerinin tasarım süreçlerine entegrasyonu, parametrik sistemlerin yalnızca çok ölçütü optimize etmekle kalmayıp geçmiş projelerden öğrenerek tasarım kararlarını özerk biçimde üretmesinin önünü açmakta; parametrik tasarımı mimarın bir aracından tasarım sürecinde bir ortak aktöre dönüştürebilecek bir eşiğe taşımaktadır.

Sonuç olarak bu çalışma, parametrik tasarımın yalnızca teknik bir araç değil, mimarlığın hangi soruları sorduğunu ve neyi optimize etmeye çalıştığını yeniden tanımlayan dinamik bir düşünce biçimi olduğunu göstermektedir. Walt Disney Konser Salonu'nda bir geometrik karmaşıklık aracı olarak başlayan bu yolculuk, KAFD Metro İstasyonu'nda insan deneyimi, çevresel duyarlılık ve yapısal verimlilik üçgeninde bütünleşik çözümler üreten bir metodolojiye ulaşmıştır. Parametrik tasarımın

önümüzdeki on yılda hangi soruları sormaya başlayacağı ise hem araştırmacılar hem de uygulayıcılar için en heyecan verici açık soruların başında gelmektedir.

KAYNAKLAR

- Broome, B. (2019, May). National Museum of Qatar by Ateliers Jean Nouvel. *Architectural Record*.
<https://www.architecturalrecord.com/articles/14043-national-museum-of-qatar-by-ateliers-jean-nouvel>
- Burry, M. (2011). *Scripting cultures: Architectural design and programming*. Wiley.
- Claypool, M. (2019). The digital in architecture: Then, now, and in the future. *Space* 10.
- Coyne, R. (2014). What's wrong with parametricism. *Reflections on Technology, Media and Culture*.
<https://richardcoyne.com/2014/01/18/whats-wrong-with-parametricism>
- Designing Buildings. (2019). National Museum of Qatar.
https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/National_Museum_of_Qatar
- Fankhänel, T., & Lepik, A. (Eds.). (2020). *The architecture machine: The role of computers in architecture*. Birkhäuser.
- Fox, M., & Bell, B. (2024). *The evolution of computation in architecture*. Taylor & Francis.
- Frazer, J. (2016). Parametric computation: History and future. *Architectural Design*, 86(2), 18–23.
<https://doi.org/10.1002/ad.2019>
- Geometrica. (2011). Museo Soumaya has a secret. Geometrica Inc.
<https://www.geometrica.com/en/latestnews/soumaya>
- Hill, C. E., & Knox, S. (2021). *Essentials of consensual qualitative research*. American Psychological Association.
- Hopper, J. (2024). Why you need 4-point scales. Versta Research. <https://verstaresearch.com/blog/why-you-need-4-point-scales/>
- Kolarevic, B. (Ed.). (2003). *Architecture in the digital age: Design and manufacturing*. Taylor & Francis.
- Lucente, R., & Canestrino, G. (2023). Distance between theory and practice in a project by Luigi Moretti, parametric architecture's first theorist. *The Journal of Architecture*, 28(5), 749–777.
- Newtecnic. (2024). KAFD Metro Station, Riyadh, Saudi Arabia: Facade engineering case study. Newtecnic Architects and Engineering Designers. <https://newtecnic.com/kafd-metro-station-riyadh-saudi-arabia>
- 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>
- Qatar Museums. (2019). Sustainable from the start: NMOQ's award-winning design.
<https://qm.org.qa/en/stories/all-stories/sustainable-nmoq/>
- Rocha, R. (2021). *Switching the parametric design approach* [Master's thesis, TU Delft]. TU Delft Repository.
<http://resolver.tudelft.nl/uuid:b76a48d5-2150-4f3b-af77-45fed329cf9b>
- Romero, F., & Ramos, A. (2013). Bridging a culture: The design of Museo Soumaya. *Architectural Design*, 83(2), 66–69. <https://doi.org/10.1002/ad.1556>
- Rybczynski, W. (2013). Parametric design: What's gotten lost amid the algorithms. *Architect: The Journal of the American Institute of Architects*. https://www.architectmagazine.com/design/parametric-design-whats-gotten-lost-amid-the-algorithms_o
- Schumacher, P. (2009). Parametricism: A new global style for architecture and urban design. *Architectural Design*, 79(4), 14–23. <https://doi.org/10.1002/ad.912>
- Schumacher, P. (2016). Parametricism 2.0: Gearing up to impact the global built environment. *Architectural Design*, 86(2), 8–17. <https://doi.org/10.1002/ad.2016>
- Schumacher, P. (2020). Parametricism: The next decade. *A+U Architecture and Urbanism*, 595, 40–47.
- Shelden, D. R. (2002). *Digital surface representation and the constructibility of Gehry's architecture* [Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology]. MIT DSpace.
<https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/16899>
- Sutherland, I. E. (1963). *Sketchpad: A man-machine graphical communication system* [Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology]. MIT DSpace. <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/14979>
- Toyota, Y., Komoda, M., Beckmann, D., Quiquerez, M., & Bergal, E. (2020). *Concert halls by Nagata Acoustics: Thirty years of acoustical design for music venues and vineyard-style auditoria*. Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-42450-3>
- Villegas, L. O. (2011). Museo Soumaya, Mexico City. *The Architect's Newspaper*.
<https://www.archpaper.com/2011/06/museo-soumaya-mexico-city/>
- Woodbury, R. (2010). *Elements of parametric design*. Routledge.

Zaha Hadid Architects. (2024). King Abdullah Financial District Metro Station. <https://www.zaha-hadid.com/architecture/king-abdullah-financial-district-metro-station/>

Behind the Museum: Collection Understanding through Data Visualization

Derya Gündoğmuş¹ ; Dila Kangel² ; Başak Uçar³ 
^{1,2,3} TED University

¹derya.gundogmus@tedu.edu.tr; ²dila.kangel@tedu.edu.tr; ³basak.ucar@tedu.edu.tr

Abstract

Museums are typically experienced through curatorial narratives that organize artifacts according to chronological, geographical, or thematic frameworks. While these narratives provide important interpretive structures, they often leave broader relationships embedded within the exhibition environment difficult to perceive. Material distributions, size hierarchies, display densities, and spatial groupings contribute significantly to how collections are encountered, yet these relationships frequently remain implicit within conventional museum experiences.

Positioned within the fields of digital humanities and museum informatics, this study investigates the potential of data visualization to support collection understanding by revealing such relationships. Rather than approaching museum collections as static repositories of artifacts, the research considers exhibitions as information-rich environments in which objects, display groups, and spatial arrangements collectively shape the experience of the collection. The Museum of Anatolian Civilizations in Ankara serves as the case study. Through the documentation of more than 3,000 artifacts, the study translates exhibition structures into a visual system that combines circle-packing techniques with spatial mapping of the museum layout. The resulting visualizations reveal organizational patterns that coexist with the museum's chronological narrative, exposing relationships related to materiality, color, scale, density, and spatial distribution. In doing so, they make visible dimensions of the collection that are difficult to recognize through sequential observation alone.

The research argues that the value of visualization lies not only in identifying patterns within museum collections but also in providing alternative frameworks through which those patterns can be explored. By transforming exhibition structures into navigable visual systems, visualization functions as an analytical interface between collections and their audiences. The study therefore contributes to ongoing discussions concerning visualization as a mode of inquiry within digital humanities and highlights its potential for generating alternative readings of cultural heritage collections and museum experience.

Keywords: Data Visualization, Collection Understanding, Digital Humanities, Visitor Experience.

Müzenin Ardında: Veri Görselleştirme ile Koleksiyonun Okunması

Derya Gündoğmuş¹ ; Dila Kangel² ; Başak Uçar³ 
^{1,2,3} TED Üniversitesi

¹derya.gundogmus@tedu.edu.tr; ²dila.kangel@tedu.edu.tr; ³basak.ucar@tedu.edu.tr

Özet

Müzeler genellikle eserleri kronolojik, coğrafi ya da tematik çerçeveler doğrultusunda düzenleyen küratöryel anlatılar aracılığıyla deneyimlenir. Bu anlatılar önemli yorumlama çerçeveleri sunmakla birlikte, sergi ortamına gömülü daha geniş ilişkilerin algılanmasını çoğu zaman zorlaştırır. Malzeme dağılımları, ölçek hiyerarşileri, sergileme yoğunlukları ve mekânsal gruplanmalar, koleksiyonların nasıl deneyimlendiği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Ancak bu ilişkiler çoğunlukla geleneksel müze deneyimi içerisinde örtük kalır.

Dijital beşeri bilimler ve müze bilişimi (museum informatics) alanlarında konumlanan bu çalışma, veri görselleştirmenin bu tür ilişkileri görünür kılarak koleksiyonun okunmasına nasıl katkı sağlayabileceğini araştırmaktadır. Bu çalışma, müzeyi yalnızca eserlerin sergilendiği bir mekân olarak değil, nesneler, sergileme grupları ve mekânsal düzenlemeler arasındaki ilişkilerin koleksiyonun deneyimlenme biçimini şekillendirdiği bir bilgi ortamı olarak ele almaktadır. Bu bağlamda araştırmanın örneklemini Ankara'daki Anadolu Medeniyetleri Müzesi oluşturmaktadır.

Çalışma kapsamında 3.000'den fazla eser belgelenmiş ve sergi yapıları, müze planı üzerine yerleştirilmiş "circle-packing" tekniklerini kullanan bir görsel sisteme dönüştürülmüştür. Elde edilen görselleştirmeler, müzenin kronolojik anlatısıyla birlikte var olan örgütlenme örüntülerini ortaya koymakta, malzeme, renk, ölçek, yoğunluk ve mekânsal dağılıma ilişkin ilişkileri görünür hâle getirmektedir. Böylece koleksiyonun, ardışık bir müze gezisi sırasında fark edilmesi güç olan boyutları görünür kılınmaktadır.

Sunulan çalışma, veri görselleştirmenin yalnızca müze koleksiyonlarındaki örüntüleri ortaya çıkarmakla kalmayıp, bu örüntülerin keşfedilebileceği alternatif çerçeveler de sunabileceğini tartışmaktadır. Sergi yapılarının gezilebilir görsel sistemlere dönüştürülmesiyle veri görselleştirmenin, koleksiyonlar ile onları deneyimleyenler arasında analitik bir arayüz işlevi görebileceği savunulmaktadır. Bu yönüyle çalışma, veri görselleştirmenin dijital beşeri bilimlerde bir araştırma, yorumlama ve bilgi üretme aracı olarak kullanımına ilişkin tartışmalara katkıda bulunmayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: veri görselleştirme, koleksiyon okuma, dijital beşeri bilimler, ziyaretçi deneyimi.

1. Introduction

Digital technologies have significantly transformed the production, interpretation, and communication of knowledge across disciplines. In architecture and related fields, computational tools and data-driven approaches increasingly influence how spatial environments are analyzed, represented, and understood. Among these developments, data analytics and visualization offer new ways of exploring and interpreting complex datasets, enabling patterns, relationships, and structures that may otherwise remain difficult to perceive to become visible (Bertin, 2010; Manovich, 2011; Kirk, 2019). Rather than functioning solely as representational tools, visualizations increasingly operate as analytical frameworks through which patterns, hierarchies, and organizational structures can be explored.

These developments have also reshaped the ways cultural artifacts, collections, and exhibition environments are studied within the field of digital humanities. By combining traditional humanities research with computational methods, digital media, data analysis, and visualization techniques, digital humanities introduce new modes of inquiry capable of revealing relationships that often remain inaccessible through conventional descriptive approaches. As Burdick et al. (2016) argue, digital humanities extend beyond the digitization of cultural content and involves the development of new interpretive frameworks through computational methods. Within this context, visualization functions not only as a means of communication but also as a method of knowledge production, enabling researchers to explore and interpret complex cultural datasets (Manovich, 2011; Hinrichs & Forlini, 2017).

Museums provide a particularly relevant context for such investigations. As institutions dedicated to the preservation, organization, and communication of cultural heritage, museums generate extensive bodies of information through collections, cataloguing systems, exhibition layouts, and curatorial frameworks. Consequently, museums can be understood not only as repositories of artifacts but also as complex information environments whose collections can be examined through digital methods and visualization techniques. However, museum collections are rarely encountered as abstract datasets. Visitors experience collections through carefully constructed exhibition environments that organize objects according to chronological, geographical, typological, or thematic narratives, thereby shaping how relationships between artifacts are perceived and understood (Bennett, 1995; Hooper-Greenhill, 2000). The museum experience therefore emerges not only from individual objects on display but also from the relationships established through exhibition design, display groupings, object proximities, spatial sequences, and curatorial arrangements.

Many of these relationships remain difficult to perceive through conventional observation. While visitors encounter collections through exhibition narratives, broader organizational structures embedded within the exhibition environment often remain implicit. Factors such as object size, material, color, density, and spatial positioning contribute significantly to how collections are experienced, yet their cumulative effects are rarely visible at the scale of the collection as a whole. This creates an opportunity for visualization-based approaches that can reveal patterns and relationships extending beyond individual artifacts or display cases.

The Museum of Anatolian Civilizations in Ankara provides a particularly suitable context for exploring this potential. Housed within the restored Mahmud Paşa Bedesteni and Kurşunlu Han, two Ottoman commercial structures adapted for museum use, the institution presents a large archaeological collection through a predominantly chronological exhibition sequence. The complexity of both the collection and the spatial environment create a rich field for examining how exhibition structures contribute to the visitor's understanding of cultural heritage. Rather than approaching the museum solely as a repository of artifacts, this research considers it as a data-rich exhibition environment in

which spatial, material, and organizational relationships contribute to the experience of the collection.

Within this framework, the paper investigates how data visualization can contribute to the understanding of museum collections by transforming exhibition structures into analyzable visual systems. Through the documentation of more than 3,000 artifacts distributed across 105 display groups, a dataset was constructed incorporating information on material, size, historical period, and spatial location. The resulting visualizations do not seek to provide a statistical inventory of the museum collection. Instead, they aim to map the organizational structures through which visitors encounter the collection and to explore how alternative readings of the museum experience can emerge through visualization.

The paper argues that data visualization can function as an analytical interface between museum collections and their audiences. By translating exhibition relationships into navigable visual structures, visualization offers complementary perspectives to curatorial narratives and reveals patterns that are difficult to perceive during a conventional museum visit. In doing so, the research contributes to broader discussions concerning digital humanities, museum informatics, and the role of visualization in cultural interpretation.

2. Visualization, Museum Informatics, and Collection Understanding

The growing adoption of digital technologies within museums has led to the emergence of museum informatics as a field concerned with the documentation, management, accessibility, interpretation, and communication of cultural heritage information (Marty, 2007; Marty & Jones, 2008). Initially focused on collection databases, cataloguing systems, and digital archives, museum informatics has gradually expanded toward questions concerning how digital technologies can support new forms of interaction, exploration, and understanding. As museums increasingly operate as information-rich environments, visualization has become an important mechanism for navigating and interpreting complex cultural datasets.

Within visualization research, visual representations are understood not merely as outputs but as analytical interfaces capable of supporting inquiry. Bertin's (2010) foundational work demonstrated how visual variables such as position, size, color, and grouping can reveal relationships embedded within data. More recent studies have similarly emphasized that visualization enables users to perceive structures, hierarchies, and patterns that may remain difficult to identify through textual descriptions or tabular representations alone (Manovich, 2011; Kirk, 2019). Consequently, visualization can be understood as a process through which data becomes available for interpretation rather than simply displayed.

These developments have been particularly influential within digital humanities and cultural heritage research. Museums, archives, and collections contain large numbers of interconnected objects accompanied by multiple layers of information relating to chronology, geography, materiality, and context. While digital catalogues provide access to individual records, they often provide limited support for understanding relationships across collections as a whole. Visualization addresses this limitation by creating synoptic representations that allow users to move between individual objects and broader organizational structures. This perspective is captured by the concept of collection understanding, which describes the ability to comprehend collections as interconnected systems rather than isolated artifacts. Windhager et al. (2019) argue that visualization supports collection understanding by generating overviews through which users can identify clusters, distributions, hierarchies, and relationships across large cultural datasets. In this sense, visualization complements conventional museum documentation by providing alternative modes of access to collections and enabling new forms of exploration and interpretation.

For museum exhibitions, however, collection understanding extends beyond object metadata. Visitors rarely encounter collections through databases; they encounter them through exhibition environments. Display groups, object proximities, circulation paths, and spatial sequences establish relationships among artifacts and contribute to how collections are interpreted. Consequently, the organizational structures of exhibitions themselves can be understood as datasets that shape visitor experience.

The present study builds upon this perspective by treating the exhibition environment as a source of information rather than merely a container for artifacts. Instead of visualizing the museum collection independently of its display conditions, the research focuses on the relationships established through exhibition groupings, material distributions, object dimensions, and spatial arrangements. Through this approach, visualization becomes a means of examining how collections are experienced, organized, and understood within the museum environment. Accordingly, the objective of the study is not to produce a statistical description of the Museum of Anatolian Civilizations, but to explore how visualization can reveal the structures through which visitors encounter and interpret the collection. By transforming exhibition relationships into visual systems, the research investigates how alternative readings of the museum experience can emerge alongside existing curatorial narratives.

3. The Museum of Anatolian Civilizations as an Exhibition Environment

The Museum of Anatolian Civilizations, located in Ankara, is one of Türkiye's most significant archaeological museums. Situated within the historic Atpazarı district, the museum occupies two restored Ottoman structures (Mahmud Paşa Bedesteni and Kurşunlu Han) which were adapted for museum use during the early Republican period. The museum houses an extensive collection representing numerous civilizations that inhabited Anatolia from the Paleolithic Age to the Classical Period, bringing together artifacts from different historical periods, materials, and cultural contexts. The collection is presented through a predominantly chronological exhibition sequence. Visitors move through successive historical periods while encountering artifacts organized within display groups and exhibition sections. This curatorial structure establishes explicit relationships among objects through temporal narratives, while the spatial configuration of the museum further contributes to how these relationships are perceived. Consequently, the visitor experience emerges through the interaction of multiple factors, including artifact characteristics, display arrangements, circulation paths, and exhibition sequences.



Figure 1: Anatolian Civilization Museum.

<https://www.kulturportali.gov.tr/turkiye/ankara/gezilecekyer/anadolu-medeniyetler-muzes>

While the chronological narrative provides the primary framework through which the collection is interpreted, the exhibition environment also contains additional layers of organization that are not immediately apparent during a museum visit. Objects vary considerably in terms of material, size, density, and spatial distribution. Display groups differ in composition and concentration, and similar

materials or object types frequently appear across different exhibition sections. These relationships coexist with the chronological narrative but are often difficult to perceive because visitors encounter the collection sequentially rather than simultaneously.

From a visualization perspective, the museum therefore presents more than a collection of artifacts. It constitutes a complex network of relationships established through exhibition design, object grouping, and spatial organization. The coexistence of chronological narratives and material-spatial relationships makes the Museum of Anatolian Civilizations particularly suitable for investigating how visualization can support collection understanding and generate alternative readings of the museum experience. Rather than attempting to replace the museum's existing curatorial narrative, the research seeks to construct an alternative interpretive layer through visualization. In doing so, the museum is approached not simply as a repository of artifacts but as an exhibition environment whose organizational structures can be translated into analyzable visual systems.

4. From Collection to Visualization: Constructing the Dataset

The visualization developed in this research emerged through a sequence of phases that translated the museum exhibition into a structured visual system. The dataset was constructed directly from the exhibition environment through observation, documentation, measurement, categorization, and visualization. The resulting visual representation should therefore be understood not as a direct depiction of the museum collection, but as an analytical model developed to explore relationships embedded within the exhibition structure.

Fieldwork was conducted through direct observation within the Museum of Anatolian Civilizations. The museum's existing display-group organization served as the primary framework for documentation, as display groups represent the curatorial units through which visitors encounter artifacts. A total of 105 display groups were documented across the main exhibition sequence, resulting in a dataset containing information on more than 3,000 artifacts. For each artifact, information regarding historical period, material, display group, and exhibition location was recorded using museum labels and exhibition texts. The spatial locations of display groups were simultaneously mapped onto the museum plan, establishing a connection between the collection data and the exhibition environment.



Figure 2: Artifacts are photographed, and a source library has been created, labeled by size, material, region, section, and color.

Determining artifact dimensions required a separate methodology. Since direct physical access to the objects was not possible, measurements were obtained using augmented reality-based mobile measurement tools. Although these measurements should be understood as approximate values, they provided a consistent basis for comparing relative object dimensions across the collection. Following data collection, the information was organized within a spreadsheet environment and prepared for visualization. This stage involved a series of interpretive decisions that transformed the exhibition into a coherent analytical model. Several categories of objects were excluded from the dataset, including digital displays, wax figures, unnumbered exhibits, temporary installations, and artifacts whose dimensions could not be reliably documented. Similarly, exhibition sections such as the Ankara Hall and the Stone Artifacts Hall were omitted due to differences in display conditions and organizational logic. Composite artifacts containing multiple materials presented another challenge. Since the visualization required a single material category for each object, artifacts were assigned a dominant material according to their most visually prominent component. While such decisions inevitably simplify the complexity of the collection, they enabled consistent categorization across the dataset.

The resulting database organized each artifact according to display group, historical period, material, dimensions, and exhibition location. Beyond recording individual object attributes, the dataset maintained the display-group organization of the exhibition. Preserving this relationship was essential because the research focuses not only on the collection itself but also on the exhibition structures through which the collection is encountered. Display groups were represented as primary containers, while individual artifacts were visualized as nested circles. Artifact dimensions determined circle size, enabling relative size relationships to become immediately visible. Material categories were represented through color, allowing material distributions to be traced throughout the collection.

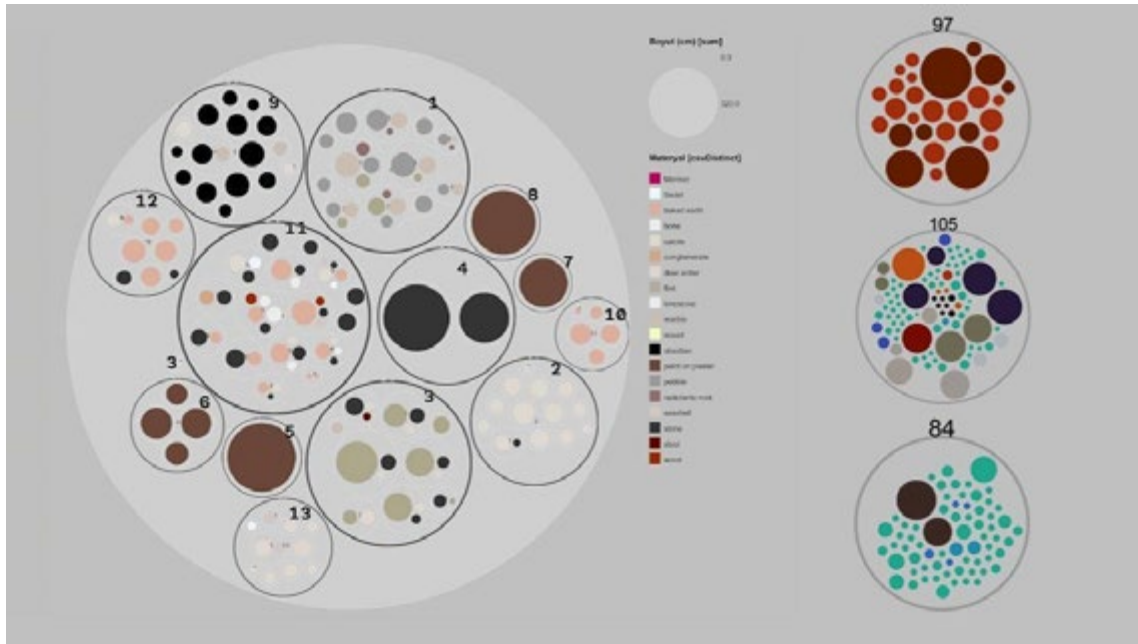


Figure 3: Artifacts are nested within circles representing display groups, preserving the organizational structure through which visitors encounter the collection.

Circle packing was selected as the visualization method because it allowed hierarchical organization, object scale, and material differentiation to be represented within a single visual framework. Rather than presenting the visualization as an abstract diagram detached from the museum environment,

the generated display-group structures were positioned according to their corresponding locations within the museum plan. This visualization functioned as a map of the museum and a representation of the collection, enabling relationships among artifacts, display groups, materials, and spatial locations to be examined within a single visual framework.

5. Collection Understanding Through Visualization

The visualizations developed in this study reveal organizational patterns that remain difficult to perceive through conventional museum visits. While the Museum of Anatolian Civilizations is primarily experienced through a chronological exhibition sequence, the visualization makes visible a series of relationships that cut across historical periods, display groups, and spatial locations. In doing so, it provides an alternative perspective on the collection that complements the museum's existing curatorial narrative.

One of the most evident patterns concerns material distribution. Although artifacts are arranged chronologically within the exhibition, objects composed of similar materials frequently appear across multiple historical periods and exhibition sections. When visualized according to material categories, the collection reveals a set of alternative organizational structures that coexist alongside the chronological narrative. Rather than emphasizing temporal succession, the visualization highlights continuities-discontinuities in material use across different locations. Materiality therefore emerges as an alternative lens through which the collection can be explored and understood.

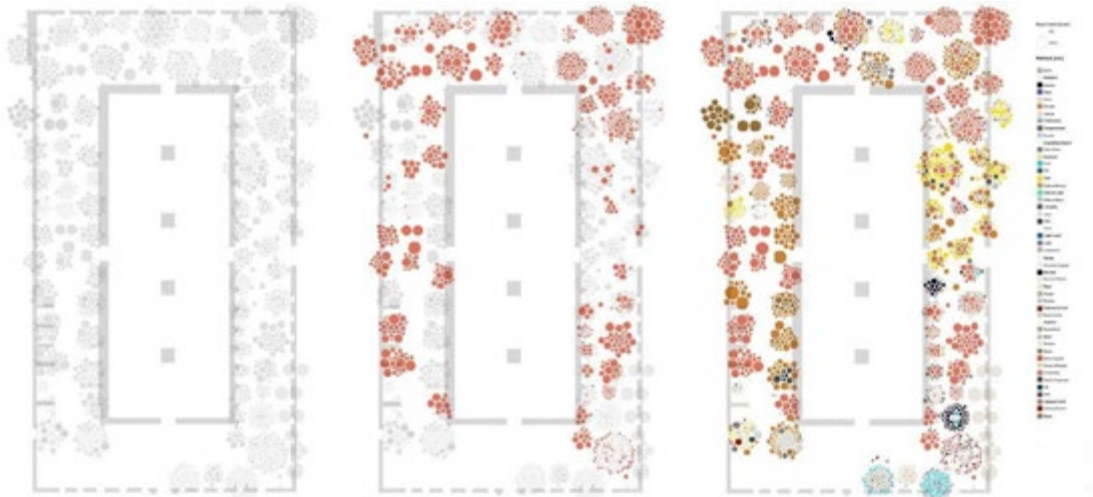


Figure 4: The size and material data were represented on the museum layout using circle packing.

The predominance of certain materials becomes particularly visible at the scale of the collection as a whole. Stone, clay, and terracotta artifacts constitute a substantial portion of the museum's holdings, resulting in extensive material clusters distributed throughout the exhibition. This observation corresponds with broader historical knowledge concerning the materials most frequently used by Anatolian civilizations. However, the visualization enables these relationships to be perceived spatially and collectively rather than through isolated encounters with individual artifacts.

A similar pattern emerges through color distributions. Since the majority of the analyzed artifacts are produced from stone, clay, and terracotta, the overall color palette of the collection is dominated by orange, yellow-brown, and gray tones. More than eighty percent of the documented artifacts fall within this range, creating a remarkably consistent visual environment throughout much of the museum. Although certain sections, particularly the Hittite and Neolithic periods, introduce greater chromatic variation, the overall visitor experience remains strongly shaped by a relatively limited palette. While such tendencies may be sensed during a museum visit, the visualization makes their

extent visible at the scale of the collection as a whole. Color therefore emerges not merely as an aesthetic property of individual artifacts but as a spatial and perceptual characteristic that contributes to how the exhibition is experienced.



Figure 5: Visualization of color distributions across the museum collection. Artifacts are arranged according to display-group organization and material classification, revealing broader chromatic patterns within the exhibition environment.

Artifact dimensions generate another layer of understanding. By representing object size through circle diameter, the visualization makes visible the relative prominence of artifacts within display groups. Certain exhibition sections are organized around a limited number of large objects that function as visual anchors, while others contain dense concentrations of smaller artifacts. These relationships contribute significantly to how visitors perceive exhibition spaces, yet they often remain implicit during conventional museum visits. The visualization therefore exposes spatial hierarchies that influence attention and perception throughout the exhibition.

The analysis also reveals differences in display-group density across the museum. Some display groups contain a relatively small number of large artifacts, whereas others accommodate numerous smaller objects within a confined exhibition area. Such variations become particularly apparent when viewed simultaneously across the museum plan. The resulting overview allows comparisons between exhibition sections that would be difficult to establish during a sequential museum visit. Moreover, certain periods appear considerably more prominent than others due to both the number and concentration of displayed artifacts. The Neolithic section, for example, occupies a particularly visible position within the visualizations, reflecting its significance within the museum's exhibition narrative and collection structure.

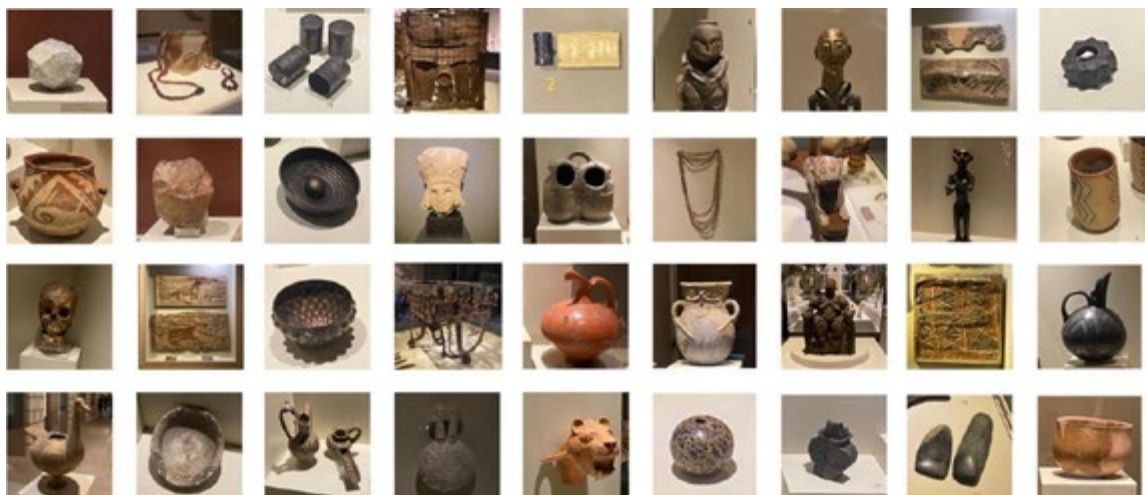


Figure 6: Selection of artifacts from the Anatolian Civilizations Museum used in the dataset.

Most importantly, the visualization supports alternative forms of navigation through the collection. During a conventional museum visit, movement is largely structured by the chronological exhibition sequence. The visualization introduces additional pathways through which relationships can be explored. Visitors may follow the distribution of a specific material across different periods, compare object scales across exhibition sections, or examine concentrations of artifacts within particular display groups. Rather than replacing the museum's curatorial organization, the visualization provides supplementary routes through which the collection can be understood.

These observations illustrate the broader potential of visualization as a tool for collection understanding. The visualization aims to make organizational patterns within the collection visible while simultaneously providing an alternative interface through which the exhibition can be explored beyond its chronological narrative. By making relationships among materials, dimensions, densities, and spatial arrangements simultaneously visible, the visualization enables visitors and researchers to move beyond individual artifacts and engage with the collection as an interconnected system. In this sense, the project demonstrates how museum datasets can generate alternative forms of knowledge about cultural collections and contribute to broader discussions concerning visualization, museum informatics, and digital humanities.

6. Conclusion

This research positions data visualization as a means of engaging with museum collections beyond conventional exhibition narratives. By translating exhibition structures into visual systems, the study demonstrates how collections can be approached not only as assemblages of artifacts but also as networks of relationships shaped by materiality, scale, density, and spatial organization. Within this framework, visualization functions as an analytical interface that supports collection understanding by making exhibition structures visible and navigable. Rather than replacing curatorial interpretations, it introduces additional modes of access through which visitors and researchers can explore relationships that remain difficult to perceive during conventional museum visits.

At the same time, the study should not be understood as a direct analysis of visitor experience. The visualizations are derived from object attributes, display groups, and exhibition arrangements rather than from observations of visitor behavior, movement patterns, or perceptual responses. Consequently, the research investigates the organizational structures that contribute to museum experience rather than the experience itself. Future studies may strengthen this relationship by integrating visitor tracking, behavioral observations, surveys, or eye-tracking methods in order to compare the patterns revealed through visualization with actual visitor interactions.

The study also highlights the potential of visualization within digital humanities and museum informatics to operate beyond documentation and representation. By treating the exhibition environment itself as a source of information, visualization becomes a method for constructing alternative readings of cultural collections and for examining how knowledge is organized, communicated, and experienced within museum spaces. While the present research focuses on a single visualization strategy, future work may explore and compare different visualization approaches and interaction models, evaluating their respective capacities to support collection understanding and exhibition analysis.

Finally, the visualizations developed in this study should be understood as analytical rather than prescriptive tools. Although they reveal organizational patterns that may inform future exhibition design decisions, the research does not directly evaluate how such findings might be translated into alternative display arrangements or spatial interventions. Further investigations could explore how visualization-based analyses might contribute to exhibition design processes, curatorial decision-making, and the development of new forms of visitor engagement. As museums continue to expand

their digital infrastructures and collection datasets, such approaches offer opportunities not only for analyzing cultural heritage collections but also for rethinking how they are organized, interpreted, and experienced.

Acknowledgments

The research originates from a broader pedagogical framework developed within the undergraduate course ARCH 432 Mediascapes: Communication Models in Digital Design at TED University Department of Architecture. During the course, the Museum of Anatolian Civilizations was explored through a series of data-driven visualization exercises focusing on different aspects of the collection and exhibition environment. The study presented in this paper builds upon one of these exploratory projects and develops it further as an independent research investigation.

REFERENCES

- Bennett, T. (1995). *The birth of the museum: History, theory, politics*. Routledge.
- Bertin, J. (2010). *Semiology of graphics: Diagrams, networks, maps* (W. J. Berg, Trans.). Esri Press.
- Burdick, A., Drucker, J., Lunenfeld, P., Presner, T., & Schnapp, J. (2016). *Digital humanities*. MIT Press.
- Dobson, J. E. (2019). *Critical digital humanities: The search for a methodology*. University of Illinois Press.
- Hinrichs, U., & Forlini, S. (2017). In defense of sandcastles: Research thinking through visualization in digital humanities. In *Proceedings of the Digital Humanities 2017 Conference*.
- Hooper-Greenhill, E. (2000). *Museums and the interpretation of visual culture*. Routledge.
- Kirk, A. (2019). *Data visualization: A handbook for data-driven design* (2nd ed.). Sage.
- Manovich, L. (2011). What is visualisation? *Visual Studies*, 26(1), 36–49. <https://doi.org/10.1080/1472586X.2011.548488>
- Marty, P. F. (2007). Museum informatics. *Annual Review of Information Science and Technology*, 42(1), 337–367. <https://doi.org/10.1002/aris.2007.1440420114>
- Marty, P. F., & Jones, K. B. (Eds.). (2008). *Museum informatics: People, information, and technology in museums*. Routledge.
- Windhager, F., Federico, P., Schreder, G., Glinka, K., Dörk, M., Miksch, S., & Mayr, E. (2019). Visualization of cultural heritage collection data: State of the art and future challenges. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 25(6), 2311–2330. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2018.2830759>

Tracing Chios: A Digital Cartographic Database of Historical Maps

Deniz Yeni¹ 

¹TED University

¹deniz.yeni@tedu.edu.tr

Abstract

Historical maps are not only representations of geographical space; they also constitute cultural heritage records containing architectural, environmental, maritime, political, and socio-cultural information. This study develops a digital method for organizing, visualizing, and interpreting the historical cartographic heritage of the island of Chios, Greece (Χίος, Ελλάς).

The research examines fifty cartographic documents produced between the 14th and 20th centuries, including portolan charts, island maps, city and harbor maps, regional maps, nautical charts, military maps, historical atlases, and maps published in travel accounts. Related visual materials, such as city views, costume engravings, botanical illustrations, architectural representations, and antiquities, are studied for the collection while remaining distinct document types.

Each record is structured through metadata describing its source publication, creator roles, date, production technique, representation type, archive, geographical coverage, and visible content. Cartographic and visual features are classified within architectural, environmental, maritime-economic, political-military, and socio-cultural layers. Tagging, filtering, and layered visualization enable records from different periods, publication contexts, and collections to be reorganized into comparable groups.

The analysis demonstrates that representations of Chios changed according to scale, cartographic purpose, publication context, and intended audience. The database reveals relationships among settlements, fortifications, ports, maritime routes, inhabitants, vegetation, and cultural objects, while also documenting the reuse and circulation of images across publications.

The study proposes a methodological framework for transforming heterogeneous historical maps and related visual materials into a structured and searchable digital cultural heritage database. Its contribution lies in supporting access, comparison, and interpretation while preserving the historical and material differences among the original sources.

Keywords: Chios, digital cultural heritage, historical cartography, spatial database, classification, tagging and sorting.

Sakız Adası'nın İzini Sürmek: Tarihi Haritalar ile Dijital Kartografik Veritabanı Oluşturma

Deniz Yeni¹ 

¹TED Üniversitesi

¹deniz.yeni@tedu.edu.tr

Özet

Tarihsel haritalar yalnızca coğrafi mekânın temsilleri değildir; aynı zamanda mimari, çevresel, denizcilik, politik ve sosyo-kültürel bilgiler içeren kültürel miras kayıtlarıdır. Bu çalışma, Yunanistan'daki Sakız Adası'nın (Xíos, Ελλάς) tarihsel kartografik mirasının düzenlenmesi, görselleştirilmesi ve yorumlanması için dijital bir yöntem geliştirmektedir.

Araştırma, 14. ve 20. yüzyıllar arasında üretilmiş elli kartografik belgeyi incelemektedir. Koleksiyon; portolan haritalarını, ada haritalarını, kent ve liman haritalarını, bölgesel haritaları, denizcilik haritalarını, askerî haritaları, tarihsel atlasları ve seyahatnamelerde yayımlanan haritaları kapsamaktadır. Kent görünümüleri, kıyafet gravürleri, botanik çizimleri, mimari temsiller ve antik eser görselleri gibi ilişkili görsel malzemeler ise ayrı belge türleri olarak korunarak koleksiyon kapsamında incelenmektedir.

Her kayıt; kaynak yayın, üretici rolleri, tarih, üretim tekniği, temsil türü, arşiv, coğrafi kapsam ve görünür içerik bilgilerini tanımlayan üst veriler aracılığıyla yapılandırılmıştır. Kartografik ve görsel özellikler mimari, çevresel, denizcilik-ekonomi, politik-askerî ve sosyo-kültürel katmanlar altında sınıflandırılmıştır. Etiketleme, filtreleme ve katmanlı görselleştirme işlemleri, farklı dönemlere, yayın bağlamlarına ve koleksiyonlara ait kayıtların karşılaştırılabilir gruplar hâlinde yeniden düzenlenmesini mümkün kılmaktadır.

Analiz, Sakız Adası temsillerinin ölçek, kartografik amaç, yayın bağlamı ve hedef kitleye bağlı olarak değiştiğini ortaya koymaktadır. Veri tabanı; yerleşimler, tahkimatlar, limanlar, deniz yolları, ada sakinleri, bitki örtüsü ve kültürel nesneler arasındaki ilişkileri görünür kılarken görsellerin farklı yayınlar arasındaki yeniden kullanımını ve dolaşımını da belgelemektedir.

Çalışma, heterojen tarihsel haritaların ve ilişkili görsel malzemelerin yapılandırılmış ve aranabilir bir dijital kültürel miras veri tabanına dönüştürülmesi için metodolojik bir çerçeve önermektedir. Araştırmanın katkısı, özgün kaynaklar arasındaki tarihsel ve maddi farklılıkları korurken bu kaynaklara erişimi, kaynakların karşılaştırılmasını ve yorumlanmasını desteklemesidir.

Anahtar Kelimeler: Sakız Adası, dijital kültürel miras, tarihsel kartografya, mekânsal veri tabanı, sınıflandırma, etiketleme ve tasnifleme.

1. Introduction

This study traces the maps including the island of Chios through the 14th to 20th century while aiming to develop an architecture and digital media research by gathering a digital database, by sorting and tagging. It has been developed in the Digital Culture and Architecture Course (ARCH531) given by Assoc. Prof. Dr. Başak Uçar in the 2024 Spring Semester. The study questions the pattern of communication and knowledge sharing, architectural mapping techniques and technologies of the pre- and post-digital era by analyzing precedents.

The island of Chios is situated opposite the Gulf of İzmir in Asia Minor, and on the maritime route from the Dardanelles to Rhodes and Alexandria. It was under Genoese rule until 1566 and then came under Ottoman rule until 1912. Over the centuries, the island has been ruled by a number of non-Greek powers and was also known as Scio by the Genoese, Chio by the Italians, and Sakız by the Ottoman Turks. From the 16th to the 20th century several travelers stopped over or stayed on the island and handed down important texts and illustrations.

Being one of these mediums, cartography has long served to document geographical knowledge and political power, reflecting the cultural and technological contexts of its time. Recent digital technologies allow maps to be analyzed as layered datasets, revealing relationships between political, environmental, social, and architectural features. This research situates itself within these approaches, proposing a method to transform historical maps into a layered spatial database to examine changing boundaries of Chios.

This study develops a digital method for organizing, visualizing, and interpreting the cartographic heritage of Chios. Historical maps and related visual records are transformed into a structured database through metadata classification, feature tagging, and layered visualization. Rather than treating the maps only as historical illustrations, the method invites their architectural, environmental, maritime, political, and socio-cultural contents to be searched, filtered, and compared.

Accordingly, the study aims to address the following research questions:

1. How can historical maps and related visual materials be transformed into a structured and searchable digital cultural heritage database?
2. How can classification, tagging, filtering, and layered visualization reveal relationships between the architectural, environmental, maritime, political, and socio-cultural elements represented in historical maps?
3. How can a digital cartographic interface support the interpretation, comparison, and accessibility of the historical cartographic heritage of Chios?

2. Literature Review

The literature review is organized around two categories of scholarship: studies of historical cartography and hybrid cartographic-literary genres, particularly island books and travel publications; and research on the transformation of historical maps into digital data, visualizations, and interactive interfaces.

2.1. Historical Maps, Island Books and Cartographic Representation

Historical maps are not neutral containers of geographical information. Their scale, symbols, place-names, visual hierarchies, and omissions organize territory through particular cultural and political frameworks. Harley (1989) approaches map as culturally produced texts whose apparent technical objectivity may conceal the social relations and forms of authority involved in their production. Similarly, Pickles (2004) argues that maps participate in spatial organization and interpretation.

Within the early modern Mediterranean, cartographic representations were also connected to maritime mobility, political sovereignty, commerce, and imperial identity (Brummett, 2015).

From this perspective, a map does not objectively record an existing territory. It selects the elements through which that territory becomes legible and assigns different degrees of visibility to settlements, ports, fortifications, roads, natural features, populations, and political authorities. Historical representations of Chios therefore register changes in the purposes for which the island was represented, the sources available to mapmakers, the technologies of image production, and the audiences addressed by each publication.

The early representations of Chios examined in this study belong partly to the cartographic and literary genre conventionally described as the *isolario*, which can be defined as an island navigation map. The term does not originate with a single author. Tolia (2007) explains that the Latin word *insularium* was in use by the end of the fifteenth century, while its Italian form, *isolario*, appeared by approximately 1534. Earlier authors described their works through expressions corresponding to “books of islands,” “island choreographies,” or “island navigations.” Such works often combined maps with historical narratives, mythology, sailing information, descriptions of settlements, observations of local communities, and discussions of natural resources. The genre therefore occupied a position between atlas, geographical treatise, travel narrative, historical compilation, and navigational manual rather than constituting a homogeneous series of maps produced according to a single cartographic method (Tolia, 2007).

2.2. Historical Maps as data and interfaces

On the other hand, digitization allows historical maps to be reorganized as spatial and visual datasets rather than consulted only as isolated illustrations. Historical GIS research has established methods for cataloguing, georeferencing, overlaying, and comparing maps across time (Gregory & Ell, 2007; Rumsey & Williams, 2002). More recent research demonstrates that historical-map interfaces can combine annotation, visual comparison, and exploratory navigation while retaining uncertainty and differences between original documents (Reckziegel et al., 2021).

Digital methods also permit larger map collections to be studied through recurring visual fragments, symbols, and representational patterns. Petitpierre et al. (2024), for example, demonstrate how computational comparison can be used to examine the long-term visual evolution of heterogeneous historical maps. A WebGIS project developed for the nineteenth-century Kaupert maps of Attica similarly shows how classification, raster–vector overlays, and filtering can connect historical cartography with explanatory spatial information (Lampropoulos et al., 2023).

These methods are also relevant to digital cultural heritage. Ducatteeuw et al. (2025) show how spatial metadata, historical maps, and heritage records from different institutions can be aggregated within a shared WebGIS environment. Their study emphasizes that a digital heritage interface depends on the organization of metadata, geographical entities, and relationships between records rather than on the simple online display of digitized objects. The interface is therefore not a neutral display surface. Cartographic interaction includes operations such as selecting, filtering, querying, navigating, and comparing information (Roth, 2013). These operations influence which relationships become visible. Drucker (2013) describes interfaces as performative structures that participate in meaning production, while Whitelaw (2015) argues that collection interfaces should support exploration, discovery, and unexpected connections between records.

In this study, the analytical value of the interface lies in connecting visible cartographic features with classification, tagging, and filtering, that consequently transform the digitized collection into a comparative research environment rather than merely an online archive.

3. Data Collection

The study examines fifty historical cartographic documents produced between 1313 and 1967. The collection includes portolan charts, island maps, regional maps of the Aegean Sea, nautical charts, military maps, historical atlases, and maps published in illustrated travel accounts. The documents differ in scale, purpose, production technique, and geographical coverage, but each represents Chios as an identifiable element within the Aegean Sea, the Ottoman Empire, Greece, or wider Mediterranean networks.

The selection was not limited to maps devoted exclusively to Chios. Regional maps were included when the island formed part of a wider maritime, political, or geographical system. This selection enables comparison of changes in the visibility, scale, outline, and contextual position of Chios across different cartographic documents.

The images were collected from digital archives and museum collections, including the Gennadius Library of the American School of Classical Studies at Athens, the Bibliothèque Nationale de France, the Biblioteca Apostolica Vaticana, the British Library, the Walters Art Museum, Royal Museums Greenwich, the Rijksmuseum, the David Rumsey Map Collection, and the United Kingdom Hydrographic Office. Additional records were identified through Wikimedia Commons, Project Gutenberg, OldMapsOnline, and the digital collections of the Aikaterini Laskaridis Foundation.

3.1. Visual Material and Sources

The visual data of the study can be expanded chronologically in centurial categories. The following selection is made to deliver trends, influences, and pioneering works from each period.

In the 15th century (**Figure 1**), Cristoforo Buondelmonti (1420), a Florentine monk and geographer, published a pioneering work called “*Liber Insularum Archipelagi*” or “*Book of Islands*”. His book included seventy-nine maps of islands and important continental locations of the Greek Seas. Alongside the maps, he added oral testimonies, commentaries, reflections on Ottoman expansion, and judgements on the decline of the Greeks. This work was widely celebrated and circulated in several variations until the 17th century (Vingopoulou, Ioli; Buondelmonti, ca. 1420/1897; Aikaterini Laskaridis Foundation, n.d.-a; Tolia, 2007). It was followed by two Italian cartographers, Bartolommeo dalli Sonetti (1485) and Benedetto Bordone. While Sonetti was a Venetian sailor who accompanied his isolarios with sonnets, Bordone on the other hand never traveled himself and was inspired by Buondelmonti and Sonetti. In his only cartographic work, published in the 16th century, the “*Book of Islands of the World*” (1528), he noted down myths and history of the islands on his idiosyncratic maps. Regarding Greek islands, he drew sixty-two maps out of 111 total and these maps were schematic rather than navigational. He depicted a simplified outline of settlements and a schematic delineation of the coast. His work was addressed to the general public rather than to geographers, cartographers or court officials of the period. (Dalli Sonetti, ca. 1485/1972; Bordone, 1547; Aikaterini Laskaridis Foundation, n.d.-a; Tolia, 2007).



Figure 1: Early Island-Book Representations of Chios

Note. (1) Cristoforo Buondelmonti, map of Chios from *Liber Insularum Archipelagi*, original work composed ca. 1420; (2) Bartolommeo dalli Sonetti, map of Chios from *Isolario*, original work published ca. 1485; and (3) Benedetto Bordone, *Scio*, from *Isolario*, 1547. Sources: The Gennadius Library, American School of Classical Studies at Athens; Aikaterini Laskaridis Foundation.

In the 16th century (**Figure 2**), Tommaso Porcacchi, Venetian writer, translator, and geographer published a very successful isolario (1572). In this work, he translated previous works from Greek to Latin and got support from Giralomo Porro who used the technique of copper engraving which permitted the creation of accurate images in great detail. His technique became the popular choice for all illustrated works until the early 19th century then replaced with lithography. The maps are accompanied by explanatory texts, which, as he notes in the introduction, contain historical, mythological, geographic and ethnographic particulars on each island. Piri Reis's portolan maps in *Kitab-ı Bahriye* (1521), represent a parallel Ottoman nautical tradition in which islands, ports, currents, coastal hazards, and sailing conditions were connected to written navigational descriptions.

Furthermore, Chios appears in cartographer Giovanni Francesco Camocio's isolario (1574) both as an island and a city map. The island map includes settlements, mountainous areas, maritime routes, ports, ships, and the nearby coast of Asia Minor. The city image narrows the scale to the fortified harbor, walls, citadel, gates, roads, gardens, windmills, surrounding channel, and naval elements (Camocio, ca. 1574; Aikaterini Laskaridis Foundation, n.d.-a). He was influenced by Porcacchi and influenced Giuseppe Rosaccio (1598), who combined the tradition of isolaria and pilgrims' chronicles to the Holy Land, depicting his itinerary with maps called "Viaggio da Venetia a Costantinopoli / Voyage from Venice to Constantinople" (Rosaccio, 1598; Aikaterini Laskaridis Foundation, n.d.-a).



Figure 2: Representations of Chios in Sixteenth-Century Island Books and Nautical Publications

Note. (1) Tommaso Porcacchi, *Scio*, 1620 edition; (2) Piri Reis, map of the Aegean islands including Chios, from a late seventeenth- to early eighteenth-century manuscript copy of *Kitab-ı Bahriye*; (3) Giovanni Francesco Camocio, *Città di Scio*, ca. 1574; (4) Camocio, *Scio*, ca. 1574; and (5) Giuseppe Rosaccio, *Scio*, 1598. Sources: The Gennadius Library; The Walters Art Museum; Aikaterini Laskaridis Foundation; private collection.

Similarly, in the 17th century (**Figure 3**), Henri de Beauvau (1581: 1615), a diplomat, escorted the French Ambassador on a voyage to biblical sites, where he also visited Chios and included maps and city views in the precedented style of Camocio's. Moreover, Ogier Ghiselin de Busbecq (1664) was a

Flemish diplomat who stayed in İstanbul and met Süleyman the Magnificent. He introduced tulip to the West, wrote travel chronicles and produced what is considered one of the most complete texts on administration and everyday life under Süleyman the Magnificent, where he included the detailed map of the City of Chios. Italian chess player and secretary to the Catholic Embassy in Germany, Francesco Piacenza's work was published posthumously and included all the Aegean islands with engravings in excellent quality.



Figure 3: *Chios in Seventeenth-Century Diplomatic, Travel, and Geographical Publications*

Note. (1) Henri de Beauvau, *Scio*, 1615; (2) Ogier Ghiselin de Busbecq, *Die Insel Chio. Die Stadt Chio*, 1664; (3) Francesco Piacenza, *Scio*, 1688; and (4) Piacenza, *Città di Scio*, 1694. Sources: Hellenic Library–Alexander S. Onassis Public Benefit Foundation; The Gennadius Library, American School of Classical Studies at Athens.

During the Late 17th century, use of planimetric view in maps has been transcended (**Figure 4**). Travelers increasingly started to produce miscellaneous visuals including views of Chios (Sandrart, 1686; 1687), view of the town of Chios (Peeters, 1690), and settlements such as the Monastery on Chios island with the Ottoman Sultan (Monconys, 1665). John Seller (1771) was a similar name, however he was also the hydrographer to Charles II of England and played a major role in the history of English cartography by establishing the English language in maritime charts. In *The English Pilot* Part III (p.77), he outlines the island as seen from the sea and guides the reader to safer navigation.



Figure 4: *Maps, Views, and Coastal Representations of Chios From the Late Seventeenth and Eighteenth Centuries*

Note. (1) Jacob von Sandrart, *Insula Scio*, 1686 & Sandrart, *Chios*, 1687; (2) Jacob Peeters, *Scio*, ca. 1690 & Peeters, *View of the Town of Chios*, ca. 1690; (3) Balthasar de Monconys, *Monastery on Chios Island*, 1665; and (4) John Seller, *Xio als Sio*, 1771. Sources: Aikaterini Laskaridis Foundation; The Gennadius Library, American School of Classical Studies at Athens.

Seventeenth-century publications expanded the range of document types associated with Chios (**Figure 5**). Other elements that were depicted alongside maps were in Olfert Dapper's (1688) work, with ancient coins of the Aegean, illustration of a branch of a mastic tree, view of Chios from the port, and women of Chios. Others who illustrated the women of Chios were George de la Chappelle (1648) and Nicolas de Nicolay (1580). Although Dapper's work was a useful guide for subsequent travelers, he never travelled himself and gathered all his material from ancient Greek and Latin sources, preceded by isolaria, portolans, and testimonies from Dutch merchants. Similarly, in the

following century, Society of Dilettanti (1769) included a relief from the bazaar of Chios while other antiquities such as reliefs and plan of Temple of Cybele were documented by Richard Pococke (1745).



Figure 5: Cartographic, Ethnographic, Botanical, and Antiquarian Representations Associated With Chios
 Note. (1) Olfert Dapper, *Eylant Scio uyt Peccatio*, 1688 & Dapper, *Sio*, 1688 & Dapper, *Ancient Coins of the Aegean Islands*, 1688 & Dapper, *Tak van den Mastik-boom*, 1688 & Dapper, *Chios*, 1688; (2) Dapper, *Women of Chios*, 1688; (3) George de La Chappelle, *Villageoise de l'isle de Scio*, ca. 1648; (4) Nicolas de Nicolay, *Donna dell'Isola di Scio*, 1580; (5) Society of Dilettanti, *Relief From the Bazaar of Chios*, 1769; and (6) Richard Pococke, *Homer's School in Scio*, 1745. Sources: Hellenic Library–Alexander S. Onassis Public Benefit Foundation; The Gennadius Library; Aikaterini Laskaridis Foundation.

Nineteenth-century records reflect the growth of administrative, national, military, commercial, and hydrographic mapping (**Figure 6**). Mahmud Raif Efendi's *Cedid Atlas Tercümesi* of 1803 transferred European atlas models into an Ottoman printed context. Other documents locate Chios within maps of Greece, the Ottoman Empire, the Aegean Archipelago, and the eastern Mediterranean. Maps by Malden (1817), Vaudoncourt et. al. (1821), Lameau (1833), Keller (1854), Petermann (1855), Fullarton, and Colton (1856) employed increasingly systematic scales, coordinating grids, political divisions, depth information, and standardized symbols. In these, Chios is consequently represented less frequently as an isolated pictorial island and more frequently as part of administrative territories, international maritime routes, naval survey systems, and geopolitical regions.



Figure 6: Administrative, Regional, and Nautical Representations of Chios in the Nineteenth Century
Note. (1) Mahmud Raif Efendi, map of western Anatolia, Rumelia, and the Aegean islands, 1803; (2) C. R. Malden, *A Chart of the Archipelago*, 1817; (3) Frédéric Guillaume de Vaudoncourt et al., map of European Turkey, 1821; (4) P. J. Lameau, *Carte du royaume de la Grèce*, 1833; (5) F.-A.-E. Keller, *Carte de la partie septentrionale de l'Archipel*, 1854; (6) A. H. Petermann, *The Grecian Archipelago*, 1855; and (7) Archibald Fullarton & Co., map of the Aegean Sea and Istanbul, 1855. Sources: Library of Congress; Royal Museums Greenwich; Leibniz Institute; Bibliothèque nationale de France; Dépôt général de la Marine; OldMapsOnline; Wikimedia Commons.

Lastly, the twentieth-century material includes educational atlases, geopolitical maps, military maps, travel publications, and standardized hydrographic charts. Reclus (1905) and Butler (1907) included Chios within geographical and classical atlases intended for education and historical interpretation. Maps published during the Balkan Wars and the First and Second World Wars reorganized the Aegean through strategic territories, transport routes, borders, and military interests. Francesco Perilla's 1928 volume, devoted specifically to Chios, combined a map with drawings, engravings, watercolors, and photographs of settlements, monuments, landscapes, and architectural features. The United Kingdom Hydrographic Office charts of 1955 and the Admiralty catalogue of 1967 represent the final stage of the collection, in which Chios is integrated into standardized systems of navigation, chart numbering, depth measurement, coastal surveying, and institutional hydrographic publication (Burgy, 1915; Van Loon, 1921; General Staff of the German Army, 1940; United Kingdom Hydrographic Office, 1955; Ritchie, 1967).



Figure 7: Educational, Geopolitical, Military, and Hydrographic Representations of the Aegean in the Twentieth Century

Note. (1) Élisée Reclus, *Mer de Grèce*, 1905; (2) Samuel Butler, *The Atlas of Ancient and Classical Geography*, 1907; (3) Louis Burgy, *La Grèce et les Balkans*, 1915; (4) Hendrik Willem van Loon, *The Island-Bridges Between Asia and Europe*, 1921; (5) General Staff of the German Army, *Übersichtskarte Bulgarien-Griechenland*, 1940; (6) United Kingdom Hydrographic Office, *Admiralty Chart No. 1086: Strimonikos Kolpos to Edremit Körfezi*, 1955; and (7) G. S. Ritchie, *Catalogue of Admiralty Charts and Hydrographic Publications: Aegean Index*, 1967. Sources: Project Gutenberg; United Kingdom Hydrographic Office; Wikimedia Commons.

4. Methodology: Layered Classification and Digital Interface

The research methodology is based on the creation of a digital cartographic archive and the development of a layered analytical framework. The process began with the collection of historical maps representing the island of Chios from different historical periods. These maps were gathered from digital archives and historical collections. The database allows records to be filtered by date, creator, representation type, production technique, and visible features. Tags such as port, fortification, settlement, ship, vegetation, and human figure can be selected individually or combined to form comparable groups. Filtering is therefore used not only to retrieve records, but to examine how particular features gain or lose visibility across different periods and publication contexts.

4.1. Database Structure and Classification

Each cartographic image is recorded as an individual database entry. When several images originate from the same atlas, travel account, or geographical publication, the publication is treated as a shared source, while the maps contained within it remain separate visual records. This distinction is necessary because a single publication may include an island map, a city map, a harbor plan, a coastal profile, and non-cartographic engravings.

The database contains fifty principal cartographic records (**Figure 8**). These include portolan charts, island maps, regional maps, nautical charts, city and harbor plans, military maps, historical atlases, and maps published in travel accounts. Related visual materials, including panoramas, architectural drawings, costume engravings, botanical illustrations, antiquities, and human figures, are connected to the cartographic collection but are not counted as maps.

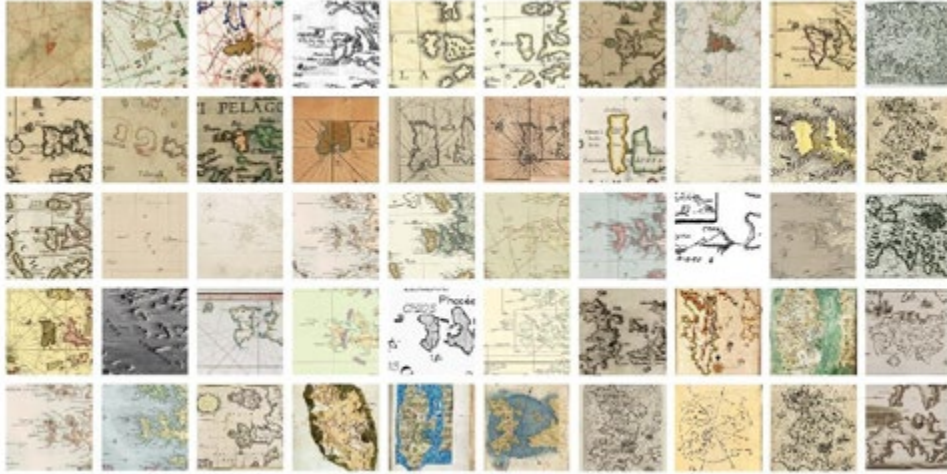


Figure 8: Zoomed-in instances of Chios from each map in the meta data

Each record includes document-level metadata such as the creator or responsible institution, date of the original work, date of the specific edition or manuscript, title of the map or image, title of the source publication, production technique, representation type, source archive or collection, digital source link, geographical coverage, and relevant political or historical period. Where several individuals participated in the production of an image, their roles are recorded separately. These roles may include author, cartographer, draughtsman, engraver, publisher, editor, or hydrographic institution. This prevents the production of a map from being reduced to a single author when the image was created through several forms of labor. The distinction between work date and edition date is also maintained. Piri Reis's *Kitab-ı Bahriye*, for instance, originated in the sixteenth century, while the manuscript image used in this study belongs to a later copy. Similarly, printed maps may reappear in later editions or facsimiles. Recording these dates separately makes it possible to distinguish the initial production of cartographic knowledge from its later circulation and reproduction.

4.2. Tagging and Layered Categories

After the document-level information was recorded, each map was examined according to the visual features visible within the image (**Figure 9**). These features were tagged individually so that maps containing similar elements could be retrieved and compared across different periods.

#	T. Name	CC	T. Name	T. L.	T. A.	T. D.	T. A.
1	Vasconia, Petrus		Vasconia, Petrus	16th Century	navigation		river
2	Vasconia, Petrus		Vasconia, Petrus	16th Century	navigation	maritime	ships
3	Boondevants, Christiaan		Boondevants, Christiaan	16th Century	navigation	maritime	ships
4	Anonymous		Anonymous	16th Century	navigation	maritime	ships
5	de Jolly, Cornelis		de Jolly, Cornelis	16th Century	navigation	maritime	ships
6	Gemucci, S.T.		Gemucci, S.T.	16th Century	navigation	maritime	ships
7	Comotto, Giovanni		Comotto, Giovanni	16th Century	navigation	maritime	ships
8	Agnew, Barthol		Agnew, Barthol	16th Century	navigation	maritime	ships
9	Laurentberg, Johannes		Laurentberg, Johannes	17th Century	navigation	maritime	ships
10	Pinxten, Nicola		Pinxten, Nicola	17th Century	navigation	maritime	ships
11	Oliva, François		Oliva, François	17th Century	navigation	maritime	ships
12	Peeters, Jacob		Peeters, Jacob	17th Century	navigation	maritime	ships
13	Boecklin, Maria		Boecklin, Maria	17th Century	navigation	maritime	ships
14	Wester, the last of		Wester, the last of	17th Century	navigation	maritime	ships
15	Van Keulen, Gerard		Van Keulen, Gerard	18th Century	navigation	maritime	ships
16	Van Keulen, Johannes		Van Keulen, Johannes	18th Century	navigation	maritime	ships
17	Van Keulen, Johannes		Van Keulen, Johannes	18th Century	navigation	maritime	ships
18	Perkins, J.		Perkins, J.	18th Century	navigation	maritime	ships
19	Perkins, Antonio		Perkins, Antonio	18th Century	navigation	maritime	ships
20	Debusche, Jean-Claude		Debusche, Jean-Claude	18th Century	navigation	maritime	ships
21	Wells, Edward		Wells, Edward	18th Century	navigation	maritime	ships
22	Wells, Edward		Wells, Edward	18th Century	navigation	maritime	ships
23	Wells, Edward		Wells, Edward	18th Century	navigation	maritime	ships
24	Wells, Edward		Wells, Edward	18th Century	navigation	maritime	ships
25	Wells, Edward		Wells, Edward	18th Century	navigation	maritime	ships
26	Wells, Edward		Wells, Edward	18th Century	navigation	maritime	ships
27	Wells, Edward		Wells, Edward	18th Century	navigation	maritime	ships
28	Wells, Edward		Wells, Edward	18th Century	navigation	maritime	ships
29	Wells, Edward		Wells, Edward	18th Century	navigation	maritime	ships
30	Wells, Edward		Wells, Edward	18th Century	navigation	maritime	ships
31	Wells, Edward		Wells, Edward	18th Century	navigation	maritime	ships
32	Wells, Edward		Wells, Edward	18th Century	navigation	maritime	ships
33	Wells, Edward		Wells, Edward	18th Century	navigation	maritime	ships
34	Wells, Edward		Wells, Edward	18th Century	navigation	maritime	ships
35	Wells, Edward		Wells, Edward	18th Century	navigation	maritime	ships
36	Wells, Edward		Wells, Edward	18th Century	navigation	maritime	ships
37	Wells, Edward		Wells, Edward	18th Century	navigation	maritime	ships
38	Wells, Edward		Wells, Edward	18th Century	navigation	maritime	ships
39	Wells, Edward		Wells, Edward	18th Century	navigation	maritime	ships
40	Wells, Edward		Wells, Edward	18th Century	navigation	maritime	ships
41	Wells, Edward		Wells, Edward	18th Century	navigation	maritime	ships
42	Wells, Edward		Wells, Edward	18th Century	navigation	maritime	ships
43	Wells, Edward		Wells, Edward	18th Century	navigation	maritime	ships
44	Wells, Edward		Wells, Edward	18th Century	navigation	maritime	ships
45	Wells, Edward		Wells, Edward	18th Century	navigation	maritime	ships
46	Wells, Edward		Wells, Edward	18th Century	navigation	maritime	ships
47	Wells, Edward		Wells, Edward	18th Century	navigation	maritime	ships
48	Wells, Edward		Wells, Edward	18th Century	navigation	maritime	ships
49	Wells, Edward		Wells, Edward	18th Century	navigation	maritime	ships
50	Wells, Edward		Wells, Edward	18th Century	navigation	maritime	ships

Figure 9: List of maps and tags in 5 categories of centuries, socio-cultural, environmental, political, and architectural layers.

The principal feature tags included the coastline and island outline, settlements, city walls and fortifications, ports and anchorages, ships and maritime routes, roads, mountains and topographical elements, vegetation and cultivated areas, windmills, religious structures, administrative or political boundaries, written annotations and place-names, scale bars, compass roses, and coordinate systems, cartouches and allegorical figures, costumes and human figures, and architectural structures of the built environment.

These specific tags are organized within broader analytical categories:

- Environmental layer: coastlines, mountains, vegetation, cultivated areas, and natural landmarks.
- Architectural layer: settlements, houses, religious structures, fortifications, windmills, roads, and port infrastructure.
- Political-military layer: territorial classifications, fortified cities, military routes, naval activity, political borders, and symbols of sovereignty.

- Maritime-economic layer: ports, anchorages, ships, sailing routes, coastal profiles, and connections with surrounding islands and the coast of Asia Minor.
- Socio-cultural layer: costumes, human figures, religious references, antiquities, myths, historical inscriptions, and representations of local communities.

The term “layer” therefore refers to a category of searchable information rather than only to a transparent graphic surface placed over a map. A single visual element may belong to more than one analytical layer. A harbor, for instance, may be recorded as architectural infrastructure, a maritime facility, an economic connection, and a military position. **Figure 10** is shown as an example of the tagging system.



Figure 10: Application of the Feature-Tagging System to a Historical Map

Note. The figure demonstrates the classification of cartographic, architectural, environmental, maritime, political, and socio-cultural features. Annotation and visualization by the author. Base map from *The Turkish Empire*, by J. Speed, 1676.

The tagging process also distinguishes between cartographic content and decorative or paracartographic elements. Cartouches, columns, ships, allegorical figures, putti, coats of arms, and ornamental borders are not automatically classified as irrelevant decoration. Following Harley’s argument that maps communicate through both technical and rhetorical devices, these elements are recorded when they contribute to the political, cultural, or visual framing of the represented territory (Harley, 1989).

5. Comparative Data Analysis

The comparison indicates that the representation of Chios changed according to geographical scale, cartographic purpose, and publication context rather than through a linear progression toward accuracy. The traced outlines derived from Buondelmonti, Dalli Sonetti, and a modern geographical reference differ considerably in orientation, proportion, and coastline articulation (**Figure 11**). These differences should not be interpreted as evidence of physical coastline transformation. They demonstrate how the recognizable form of the island was reconstructed through different sources, techniques, and representational conventions.



Figure 11. *Comparative Tracings of the Cartographic Outline of Chios in 1422, 1486, and 1928*

Note. (1) tracing based on Cristoforo Buondelmonti, *Liber Insularum Cycladum*, 1422, British Library, Arundel MS 93, fol. 150r; (2) tracing based on Bartolommeo Zamberti, also known as Bartolommeo dalli Sonetti, *Isolario*, ca. 1486; and (3) tracing based on Francesco Perilla, map of Chios from *The Island of Chio*, 1928, Hellenic Library–Alexander S. Onassis Public Benefit Foundation. Tracings by the author. The comparison demonstrates variations in cartographic representation and does not indicate physical coastline transformation.

Differences in scale also produce different spatial interpretations of Chios. Island maps represent it as a bounded territorial unit, while city and harbor maps foreground fortifications, roads, windmills, urban structures, and port infrastructure. Regional and nautical maps reduce internal detail but position the island within wider maritime routes, neighboring islands, political territories, and connections with the coast of Asia Minor (**Figure 12**). Chios is therefore represented alternately as an island, a fortified settlement, a harbor, and a node within broader Mediterranean networks.

The database enables these differences to be compared through shared tags. Filtering records by ports, fortifications, ships, settlements, and maritime routes brings together documents from different periods and publication types. Another combination of tags, including vegetation, costumes, antiquities, and human figures, reveals how travel publications and geographical compilations represented Chios as a cultural and productive landscape as well as a mapped territory.

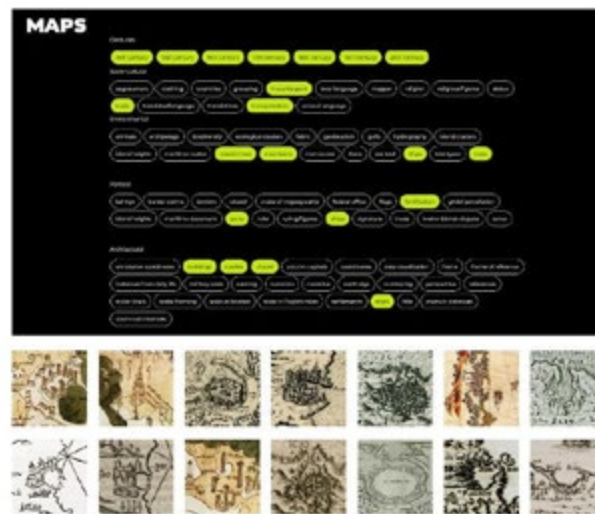


Figure 12: Comparison of Island, City-Harbor, and Regional Representations of Chios Through Selected Database Tags

The comparison also shows that a later publication does not necessarily contain new geographical knowledge. Many maps and illustrations were copied, adapted, re-engraved, and reused across island books, travel accounts, route guides, and geographical compilations. For this reason, repeated images are not considered duplicate records in the database. Instead, they provide evidence of how cartographic knowledge circulated, was reproduced, and acquired new meanings in different publication contexts.

Overall, the analysis suggests that the historical identity of Chios emerged through multiple and overlapping forms of representation rather than through a single cartographic image. By combining classification, tagging, and visualization, the database makes these connections easier to identify and compare while preserving the diversity of the original sources.

6. Discussion

The findings demonstrate that digitally organizing historical maps involves more than reproduction and display. The transformation of the heritage of Chios collection into a digital cultural heritage database required the separation of publication source, visual records, dates, people that took place in the production, documentation types and features. By connecting the materials distributed across different archives while preserving distinctions between maps, city views, costume engravings, botanical illustrations, and other visual records the database organizes a network of related cultural heritage objects rather than as a sequence of isolated images. This recording type corresponds with Ducatteuw et al. (2025), who emphasize the importance of integrating spatial metadata and heritage records, and with Whitelaw's (2015) argument that digital collection interfaces should facilitate exploration and connections among objects.

Classification and filtering are also interpretive operations. The architectural, environmental, maritime, political, and socio-cultural layers determine which relationships can be examined together. A port, for example, may simultaneously relate to settlement, commerce, defense, and navigation. The interface therefore goes beyond retrieving existing information. Creating comparative arrangements through selection and combination supports Roth's (2013) account of

cartographic interaction as a process of selecting, filtering, querying, and comparing cartographic information and Drucker's (2013) argument that interfaces participate in meaning production.

The results also reinforce the view that maps construct spatial knowledge rather than simply record territory (Harley, 1989; Pickles, 2004). Chios appears differently according to scale, purpose, and publication context: as an island, fortified settlement, port, navigational landmark, political territory, or cultural landscape. The combination of maps with narratives, city views, costumes, vegetation, and antiquities in island books and travel publications further defends the hybrid character of Mediterranean geographical knowledge discussed by Tolia (2007) and Brummett (2015) in the reviewed literature. Therefore, the contribution of the layered database is not to produce a single definitive representation of Chios, but to preserve and compare the multiple ways in which its cartographic and cultural identity was constructed.

7. Conclusion

This study examined how historical maps and related visual materials concerning Chios can be reorganized as digital cultural heritage data. The research combined metadata classification, visual tagging, layered categories, filtering, and comparative visualization.

Regarding the first research question, the study showed that historical maps and related visual materials can be transformed into a structured and searchable database by recording each image as an individual entry while linking it to its source publication, creator roles, dates, document type, production technique, archive, and geographical coverage. Regarding the second research question, classification, tagging, filtering, and layered visualization reveal relationships that are not easily visible through chronological observation alone. Architectural, environmental, maritime, political, and socio-cultural elements frequently overlap. To address the third research question, the digital cartographic interface supports interpretation and comparison by allowing records to be reorganized according to date, creator, document type, technique, and visible content. It also improves accessibility by bringing together materials distributed across different archives and publications. The interface therefore functions as an analytical environment for identifying relationships with digitized objects.

The main contribution of the research was therefore a digital method for preserving, organizing, comparing, and interpreting the multiple cartographic and cultural representations of Chios. Future development may include further archival records, systematic georeferencing, automated image comparison, and linked cultural heritage data.

REFERENCES

- Aikaterini Laskaridis Foundation. (n.d.-a). *Chios* [Digital collection essay].
<https://eng.travelogues.gr/page.php?view=85>
- Aikaterini Laskaridis Foundation. (n.d.-b). *Olfert Dapper: Chios* [Digital collection].
<https://eng.travelogues.gr/travelogue.php?view=55&creator=1131264&tag=13246>
- Aikaterini Laskaridis Foundation. (n.d.-c). *Jacob Peeters: Chios* [Digital collection].
<https://eng.travelogues.gr/travelogue.php?view=380&creator=1171212&tag=13246>
- Archibald Fullarton & Co. (1855). *Map of the Aegean Sea and Istanbul / Central Mediterranean region* [Map].
Wikimedia Commons.
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:1855_map_the_Aegean_Sea_and_Istanbul.jpg
- Argenti, P. P. (1958). *The occupation of Chios by the Genoese and their administration of the island, 1346–1566* (3 vols.). Cambridge University Press.
- Beauvau, H. de. (1615). *Relation journalière du voyage du Levant fait et décrit ... Reveu, augmenté et enrichy par l'auteur*. Jacob Garnich.
- Bordone, B. (1547). *Isolario di Benedetto Bordone nel qual si ragiona di tutte l'isole del mondo, con li lor nomi antichi et moderni, historie, favole, et modi del loro vivere*. Paolo Manuzio for Federico Torresano.

- Brummett, P. (2015). *Mapping the Ottomans: Sovereignty, territory, and identity in the early modern Mediterranean*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781316117316>
- Buondelmonti, C. (1897). *Description des îles de l'Archipel* (É. Legrand, Ed. & Trans.). Ernest Leroux. (Original work composed ca. 1420)
- Busbecq, O. G. de. (1664). *Vier Sendschreiben der Türkischen Botschaft*. Michael and Friedrich Endter.
- Butler, S. (1907). *The atlas of ancient and classical geography* [Map]. Project Gutenberg. <https://www.gutenberg.org/ebooks/17124>
- Burgy, L. (1915). *La Grèce et les Balkans* [Bird's-eye view map]. Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:1915_bird%27s_eye_view_map_-_La_Gr%C3%A8ce_et_les_Balkans.jpg
- Camocio, G. F. (ca. 1574). *Isole famose, porti, fortezze, e terre maritime sottoposte alla Serenissima Signoria di Venetia, ad altri Principi Christiani, et al Signor Turco*. Alla libreria del segno di San Marco.
- Colton, G. W. (1856). *Turkey in Asia and the Caucasian provinces of Russia* [Map]. Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Colton,_G.W._Turkey_In_Asia_And_The_Caucasian_Provinces_Of_Russia._1856.jpg
- Dalli Sonetti, B. (1972). *Isolario: Venice 1485* (F. R. Goff, Intro.). Theatrum Orbis Terrarum. (Original work published ca. 1485)
- Dapper, O. (1688). *Naukeurige beschryving der eilanden in de Archipel der Middelantsche Zee, en ontrent dezelve gelegen*. Wolfgangh, Waesbergen, Boom, Someren, & Goethals.
- De Bruyn, C. (1714). *Voyage au Levant*. Guillaume Cavelier.
- Drucker, J. (2013). Performative materiality and theoretical approaches to interface. *Digital Humanities Quarterly*, 7(1). <https://www.digitalhumanities.org/dhq/vol/7/1/000143/000143.html>
- General Staff of the German Army. (1940). *Übersichtskarte Bulgarien-Griechenland* [Map]. Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:1940_German_military_map_-_%C3%9Cbersichtskarte_Bulgarien-Griechenland.jpg
- Google. (2015). *Chios, Greece* [Satellite imagery]. Google Earth Pro.
- Gregory, I. N., & Ell, P. S. (2007). *Historical GIS: Technologies, methodologies, and scholarship*. Cambridge University Press.
- Guillaume de Vaudoncourt, F. (1821). *Carte générale de la Turquie d'Europe à la droite du Danube ou des beglerbegliks de Roum-Jli, Bosna et Morée* [Map]. Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Carte_Generale_Dela_Turquie_D%27Europe_A_La_Droite_Du_Danube_Ou_Des_Beglerbegliks_De_Roum-Jli,_Bosna_Et_Moree_03.jpg
- Harley, J. B. (1989). Deconstructing the map. *Cartographica*, 26(2), 1–20. <https://doi.org/10.3138/E635-7827-1757-9T53>
- Keller, F.-A.-E. (1854). *Carte de la partie septentrionale de l'Archipel* [Map]. Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:1854_nautical_chart_-_Carte_de_la_partie_septentrionale_de_l%27Archipel.jpg
- La Chappelle, G. de. (ca. 1648). *Collection of various portraits of the principal ladies of the Grand Turk's Gate*. Chez Blond.
- La Motraye, A. de. (1727). *Voyages du Sr. A. de La Motraye, en Europe, Asie & Afrique*. T. Johnson & J. van Duren.
- Lameau, P. J. (1833). *Carte du royaume de la Grèce divisée en 10 départemens* [Map]. Wikimedia Commons/Bibliothèque nationale de France. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Carte_du_royaume_de_la_Gr%C3%A8ce_-_divis%C3%A9e_en_10_d%C3%A9partemens_%28sic%29_-_par_P._Lameau%2C_chef_d%27escadron_au_corps_royal_d%27%C3%A9tat-major_-_btv1b53035344f_%282_of_2%29.jpg
- Lampropoulos, G., Panagiotopoulos, G., Giannakoula, C., & Kokkalas, A. (2023). Geovisualization of historical geospatial data: A web mapping application for the 19th-century Kaupert's maps of Attica. *Geographies*, 3(2), 398–415. <https://doi.org/10.3390/geographies3020021>
- Mahmud Raif Efendi. (1803). *Cedid Atlas Tercümesi: Western Anatolia, Rumelia, and Aegean islands plate* [Map]. Library of Congress. <https://www.loc.gov/item/2004626120/>
- Malden, C. R. (1817). *A chart of the Archipelago* [Map]. Royal Museums Greenwich. <https://www.rmg.co.uk/collections/objects/rmgc-object-540118>
- Monconys, B. de. (1665). *Journal des voyages de Monsieur de Monconys*. Horace Boissat & Georges Remeus.
- Nicolay, N. de. (1580). *Le navigationi et viaggi fatti nella Turchia* (F. Flori, Trans.). Francesco Ziletti.

- Peeters, J. (ca. 1690). *Description des principales villes, havres et isles du golfe de Venise du coté oriental*. J. Peeters.
- Perilla, F. (1928). *Map of Chios* [Map]. In *Chios*. Aikaterini Laskaridis Foundation. <https://eng.travelogues.gr/item.php?view=33212>
- Petermann, A. H. (1855). *The Grecian Archipelago* [Map]. OldMapsOnline. <https://www.oldmapsonline.org/pt/maps/f5517475-2591-5029-9581-81f43f64f67b>
- Piacenza, F. (1688). *L'Egeo redivivo, o sia chorographia dell'arcipelago*. Soliani.
- Piacenza, F. (1694). *Distintissima descrizione della città, porto & isola di Scio*. Girolamo Albrizzi.
- Piri Reis. (late 17th–early 18th century). *Map of the islands of the Aegean Sea including Chios, Cos, Rhodes and Crete* [Map]. In *Book on navigation* (Walters Manuscript W.658, fol. 101a). The Walters Art Museum. <https://art.thewalters.org/detail/78328/map-of-the-islands-of-the-aegean-sea-including-chios-cos-rhodes-and-crete/>
- Pococke, R. (1745). *A description of the East, and some other countries* (Vol. 2). W. Bowyer.
- Porcacchi, T. (1572). *L'isole più famose del mondo*. Simon Galignani & Girolamo Porro.
- Reckziegel, M., Wrisley, D. J., Hixson, T. W., & Jänicke, S. (2021). Visual exploration of historical maps. *Digital Scholarship in the Humanities*, 36(Suppl. 2), ii251–ii272. <https://doi.org/10.1093/llc/fqaa059>
- Reclus, E. (1905). *Mer de Grèce* [Map]. Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:D267-Mer_de_Gr%C3%A8ce.-L2-Ch8.png
- Ritchie, G. S. (1967). *Catalogue of Admiralty charts and hydrographic publications: Aegean index page* [Map]. United Kingdom Hydrographic Office/Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Admiralty_Chart_Catalogue_1967_Page_043.jpg_Index_F2.jpg
- Rosaccio, G. (1598). *Viaggio da Venetia a Costantinopoli, per mare, e per terra, et insieme quello di Terra Santa*. Giacomo Franco.
- Roth, R. E. (2013). Interactive maps: What we know and what we need to know. *Journal of Spatial Information Science*, 6, 59–115. <https://doi.org/10.5311/JOSIS.2013.6.105>
- Rumsey, D., & Williams, M. (2002). Historical maps in GIS. In A. K. Knowles (Ed.), *Past time, past place: GIS for history* (pp. 1–18). ESRI Press.
- Sandrart, J. von. (1687). *Map of Chios [Insula Scio]* [Map]. In *Kurtze und vermehrte Beschreibung von dem Ursprung, Aufnehmen, Gebiete und Regierung der weltberühmten Republik Venedig*. Aikaterini Laskaridis Foundation. <https://eng.travelogues.gr/item.php?view=57015>
- Seller, J. (1771). *Nautical chart of the port of Chios; outline of the coasts of Lesbos island and Foca in Asia Minor* [Nautical chart]. In *The English pilot, Part III*. Aikaterini Laskaridis Foundation. <https://eng.travelogues.gr/item.php?view=55982>
- Society of Dilettanti. (1769). *Ionian antiquities*. T. Spilsbury & W. Haskell.
- Speed, J. (1676). *The Turkish Empire* [Map]. In *A prospect of the most famous parts of the world*. Thomas Bassett & Richard Chiswell.
- Tolias, G. (2007). Isolarii, fifteenth to seventeenth century. In D. Woodward (Ed.), *The history of cartography: Vol. 3, Part 1. Cartography in the European Renaissance* (pp. 263–284). University of Chicago Press.
- United Kingdom Hydrographic Office. (1955). *Admiralty chart no. 1086: Strimonikos Kolpos to Edremit Korfezi* [Map]. Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Admiralty_Chart_No_1086_Strimonikos_Kolpos_to_Edremit_Korfezi_Published_1955.jpg
- Van Loon, H. W. (1921). *The island-bridges between Asia and Europe* [Map]. Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:The_Story_of_Mankind_-_The_Island-Bridges_Between_Asia_and_Europe.png
- Whitelaw, M. (2015). Generous interfaces for digital cultural collections. *Digital Humanities Quarterly*, 9(1), 1–16. <https://www.digitalhumanities.org/dhq/vol/9/1/000205/000205.html>
- Yeni, D. (2024). My Site. Retrieved March 16, 2026, from <https://denizyeni06.wixsite.com/my-site-1/recipes>

Veri Seti Oluşturma Ve Görselleştirme Projesi: “Massive Body Loss”

Belkis Sena Top¹ ; Zeynep Kozoğlu² 

^{1,2}TED Üniversitesi

¹bsena.top@tedu.edu.tr; ²zeynep.kozoglu@tedu.edu.tr

Özet

“Massive Body Loss” bir veri seti oluşturma, araştırma ve görselleştirme projesidir. Farklı sebeplerle meydana gelen toplu ölüm vakalarında ölümler yeterince umursanmamakta ve zihinlerde yalnızca soyut şekilde kalan sayılarla ifade edilmektedir. Bu sorundan yola çıkan proje, Türkiye ve çevresinde, 1900-2023 seneler arasında farklı sebeplerle gerçekleşmiş toplu ölüm verilerini bir araya getirip görsel olarak temsil ederek görünür kılmayı ve her bir kaybın kolektif hafızada unutulmamasını amaçlar. Proje, TED Üniversitesi’nde “Architecture’s of Care” temalı araştırma stüdyosu kapsamında geliştirilmiştir. Çalışmanın bir diğer hedefi savaşlar, katliamlar, terör saldırıları, depremler ve pandemiler gibi çeşitli toplu ölüme yol açan olayların bir veri setinde bir araya getirilmesi, birlikte okunabilir olmasını sağlamak ve olayların arkasındaki hikayelerin açık erişim sayesinde insanlar tarafından deneyimlenebilir hale gelmesini sağlamaktır. Proje yazarlar tarafından tüm verilerin açık kaynaklardan manuel olarak bir araya getirilerek yeni bir veri seti oluşturulması, bu verinin görsel 3 boyutlu haritada temsil edilmesi ve interaktif içerikli, açık erişimli massivebodyloss.com isimli web sitesinde sunulmasını kapsamaktadır. Projenin kavramsal çerçevesini Giorgia Lupi’nin “Veri Hümanizması” (Data Humanism) yaklaşımı oluşturmakta olup, veriler yalnızca nicel birer sayı olarak analiz edilmekten çıkıp, insan deneyimlerini, hikayelerini, toplumsal bağlantıları ifade eden birer anlatı olarak ele alınmıştır. Bu bakış açısıyla veri setinde sadece ölüm sayıları değerlendirilmemiş olup, yaşanan olayların toplumsal hafızadaki konumları, tekrarları ve bıraktıkları izler değerlendirilmiştir. Toplanan veriler birden fazla kaynaktan kontrol edilmiş, olay türü, gerçekleştiği lokasyon, gerçekleştiği yıl, ölüm sayısı parametreler doğrultusunda analiz edilmiş ve kategorize edilmiştir. Bu veriler 3 boyutlu bir haritaya dönüştürülmüş, böylece kümülatif bir 123 yıl animasyonu oluşturulmuştur. Animasyonun kümülatif ilerleyişi sayesinde, yıllar içinde yaşanan olayların birbirleriyle ilişkileri okunabilir hale gelmiş ve toplu ölümlerin mekânsal örüntüsü kullanıcı tarafından deneyimlenebilir hale getirilmiştir. Geliştirilen web sitesinde, interaktif kesit ve aksonometrik görüntüler de kullanılmış olup, verilerin arkasındaki hikayeler farklı temsil yöntemleri ile kullanıcının deneyimine sunulmuştur. Web sitesinde bütün veri setleri, görselleştirmeler ve kullanılan kaynaklar herkesin kullanımına açık olup ulaşılabilir hale getirilmiştir. “Massive Body Loss” projesi veriyi sabit, nicel varlıklar olarak ele almak yerine, verinin ardındaki hikayeleri açığa çıkartan, kolektif hafızayı destekleyen ve kullanıcılara veri deneyimini sağlayan çok katmanlı bir araştırma ve veri görselleştirme projesi olarak konumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Toplu Ölüm, Hafıza ve Hatırlama, Kolektif Hafıza, Dijital Haritalama, Veri Tabanlı Anlatı.

Dataset Creation And Visualization Project: “Massive Body Loss”

Belkis Sena Top¹ ; Zeynep Kozoęlu² 

^{1,2}TED University

¹bsena.top@tedu.edu.tr; ²zeynep.kozoglu@tedu.edu.tr

Abstract

“Massive Body Loss” is a dataset creation, research, and visualization project. Mass deaths, occurring for various reasons, are often not given enough importance and are only expressed in abstract numbers in people’s minds. Starting from this problem, the project aims to bring together and visually represent data on mass deaths that occurred in Türkiye and its surroundings between 1900 and 2023 due to various reasons, making them visible and ensuring that each loss is not forgotten in the collective memory. The project was developed within the scope of the “Architecture’s of Care” themed research studio at TED University. Another goal of the study is to bring together datasets from various events leading to mass death tolls, such as wars, massacres, terrorist attacks, earthquakes, and pandemics, to make them readable together, and to make the stories behind these events experiential for people through open access. The project involves the authors manually assembling all data from open sources to create a new dataset, representing this data in a visual 3D map, and presenting it on an interactive, open-access website called massivebodyloss.com. The conceptual framework of the project is based on Giorgia Lupi’s “Data Humanism” approach, where data is not analyzed merely as quantitative numbers, but rather as narratives expressing human experiences, stories, and social connections. From this perspective, the created dataset does not only evaluate death tolls, but also assesses the position, repetition, and traces of events in collective memory. The collected data was researched on multiple sources, analyzed and categorized according to parameters such as event type, location, year of occurrence, and death toll. This data was transformed into a 3D map, creating a cumulative animation of 123 years. With the help of the cumulative progression of the animation, the relationships between events over the years become legible, and the spatial pattern of mass deaths becomes experiential for the user. The developed website also utilizes interactive cross-sections and axonometric images, presenting the stories behind the data to the user through various representation methods. All datasets, visualizations, and sources used are publicly accessible on the website. The “Massive Body Loss” project is positioned not as a static, quantitative entity, but as a multi-layered research and data visualization project that uncovers the stories behind the data, supports collective memory, and provides users with a data experience.

Keywords: Mass Death, Memory and Remembrance, Collective Memory, Digital Mapping, Database-driven Narrative.

1. Giriş

“Massive Body Loss” projesi Türkiye ve çevre ülkelerde son 123 yıl içerisinde (1900 – 2023) farklı nedenlerle gerçekleşen toplu ölümleri veri görselleştirme yöntemiyle görünür hale getirmeyi amaçlayan bir araştırma ve tasarım projesidir. Proje, TED Üniversitesi Mimari Tasarım Yüksek Lisans Programı Araştırma ve Tasarım Stüdyosu kapsamında “Architectures of Care” teması altında yürütülmüştür. “Massive Body Loss” Türkiye ve çevresinde yaşanan toplu ölümlere yol açmış uzun süreli (stres) ve kısa süreli (şok) olayları ele alan ve bu verileri web platformunda insanların kullanımına açan bir veri görselleştirme çalışmasıdır. Toplu ölümlerin verileri üç boyutlu bir harita şeklinde görselleştirilmiş olup, insanların veri setlerini daha detaylı inceleyebileceği interaktif iki boyutlu bir arayüz ile tıklanabilir hale getirilmiştir. Massivebodyloss.com web sitesinde veri kaynakları, harita görselleri, animasyonlar ve seçili arşiv görüntüleri yer almakta ve böylece proje yalnızca bir veri görselleştirmeden öte, toplu kayıpların mekânsal temsilini sunan bir dijital platform olarak işlemektedir.

“Massive Body Loss” projesi, olaya bu bakış açısıyla yaklaşarak toplu kayıpların insan hayatlarıyla ilişkili yönlerini ortaya çıkartarak verinin gerçek kayıplar olarak algılanmasını sağlamaktadır. Geçmiş ve günümüzde toplu ölüm olayları çoğu zaman yalnızca sayılarla ifade edilmekte ve bu durum, çok sayıda insan kaybına yol açan olayların ölçeğini ve toplumsal etkisinin algılanmasını zorlaştırmaktadır. Burada amaç, veri hümanizmasından faydalanarak Araştırma ve Tasarım Stüdyosu'nun teması olan “Architectures of Care” kapsamında, ölümlerin sayılardan ibaret olmadığına, her bir kaybın bir kişi olduğuna ve önemsenmesi gerektiğine dikkat çekmektir. “Massive Body Loss” projesi, kayıpların görünür kılınmasını, hatırlanmasını ve tartışılmasını amaçlayan bir araştırma ve tasarım projesidir. Bu proje, her bir olayı tek başına görünür kılarak kayıpların kolektif hafızada kaybolmamasına fayda sağlamanın yanında farklı lokasyon ve zamanlarda Türkiye ve çevresinde gerçekleşmiş toplu kayıpları bir arada aynı veri seti içerisinde görselleştirir. Proje, her bir olayı yalnızca ayrı istatistikler olarak değil, tarihsel ve coğrafi bağlamı içinde değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Burada amaç, olayların hem bağlamlarıyla ilişkilerinin görülmesi hem de kendi aralarında ilişkiler kurulmasını sağlamaktır. Bu yöntem sayesinde farklı zamanlardaki farklı olayların sebep olduğu ölümler, ölüm sayıları ve lokasyonları bir arada okunabilmek toplu ölümlerin ve etkilerinin karşılaştırmalı olarak anlaşılmasına sebep olmaktadır.

2. Kavramsal Çerçeve

Dijital Hümanizm, Gold ve Klein (2019, s. ix) tarafından üç temel amaç doğrultusunda özetlenmiştir. Dijital beşerî bilimler bu doğrultuda, klasik veri analitiğinden farklı olarak, sesinin duyulmasına ihtiyaç duyulan toplumların veya bireylerin sesini duyurabilmek, toplumsal iyileşme ve direnişe öncülük edebilmek, veri gözetimi ve kontrolüne araştırmacılar olarak müdahale edebilmeyi hedefler. Aynı zamanda, dijital veri bilimlerinin tarih, kültür, toplum ve politika ile doğrudan ilişkili olarak etik ve entelektüel bir dijital üretim olması gerektiğini savunur (Gold ve Klein, 2019, s. xi - xii). Dijital beşerî bilimlerin insan odaklı veri üretimi ve etik temsil arayışına paralel gelişen Georgia Lupi tarafından öne sürülen Veri Hümanizması yaklaşımı, Massive Body Loss çalışmasının teorik çerçevesini oluşturan önemli yaklaşımlardan biridir.

Veri hümanizması Georgia Lupi tarafından öne sürülen, insan odaklı ve verinin kişisel, kusurlu ve bağlamsal özelliklerini vurgulayan bir tasarım yaklaşımıdır (Al-Hazwani ve ark., 2025). Veri hümanizması, büyük dijital veri setlerinin ve görselleştirmelerinin soyutlaşmış yapısı aksine, etik temsil ve bireysel anlatıları da veri setinin bir parçası haline getirerek veri üretim ve görselleştirme için yeni bir anlayış sunmaktadır (Lupi, 2017).

Lupi, veriye yalnızca teknik bir şekilde yaklaşılmasını eleştirerek, veri hümanizmasını sayıları, gerçekten temsil ettikleri veriler (bilgi, davranış ve insan) ile ilişkilendirerek yeni bir tasarım ve temsil

yöntemi olarak ortaya koyar. Sayılar, her zaman gerçek hayatta karşılığı olan verilerdir. Her bir veri, hayattaki küçük bir anın yakalanıp kayıp olmaması için tutulmasıyla oluşur (Lupi, 2017). Gerçek hayattaki küçük anlardan oluşan “küçük veriler” (small data), Lupi’nin 13 prensibinin ilkinin oluşturur. Veri hümanizması, büyük veri setlerini değil, insan ölçeğinde, insan deneyimlerine ve hikâyelerine odaklanan küçük veri setlerini kapsar. Böylelikle, insan karmaşıklığını temsil eden “verinin niteliği” (data quality) sayısal niceliğinden daha önemli hale gelir. Bir otorite tarafından yönetilmeyen, insanı ve deneyimin niteliğini önceleyen bu yaklaşım, verinin “kusurlu ve öznel” (imperfect and subjective data) olduğunu savunur (Lupi, 2017).

Veri hümanizmasını destekleyecek şekilde, Mann (2017) büyük veri setlerinin ve dijital teknolojilerin belirli bir otorite tarafından kontrol ediliyor olmasından dolayı adaletsiz bir güç dengesi kurmasını eleştirir. Bu bağlamda, insanların kendi küçük verilerini üretmelerinin önemini vurgular. Lupi’nin bir diğer prensibi ise “verinin ilham verici” (inspiring data) oluşudur. Veri hümanizmasına göre, küçük veriler yalnızca bir başlangıç noktasıdır. Verinin kendisi yeni analizlere, yorumlara ve keşiflere açıktır ve bu gözlemciye bağlıdır (Al-Hazwani ve ark., 2025). Benzer şekilde, “veri ile zaman geçirme” (spend time with data) bu yaklaşımın bir parçasıdır. Veri teknik sayılardan ibaret değildir. Gözleme, keşfetmeye ve yeni yorumlamalara açıktır. İnsan karmaşıklığını içeren veri, farklı bakış açılarıyla, farklı katmanlarla incelenip farklı şekilde yorumlanmaya, düşünmeye ve “kazara keşiflere” (serendipitous data) açıktır. “Karmaşıklığı tasvir eden” (data to depict complexity) veri prensibi ise çok katmanlı bilginin farklı muhataplar tarafından farklı şekillerde iletişim kuracağını ve keşfedileceğini belirtir (Al-Hazwani ve ark., 2025). Lupi’ye göre yalnızca verinin içeriği değil, farklı araştırma ve temsil yöntemleri de ilham verici olabilir ve yeni “veri ihtimallerine” (data possibilities) sebep olabilir. Lupi, temsil yöntemi olarak ise “verinin elle çizimini” (data sketch drawing) öngörür. “Tasarım odaklı veri” (design-driven data), yalnızca insan için değil, insanlar ile üretmeyi ve tasarlamayı önerir (Al-Hazwani ve ark., 2025).

“Massive Body Loss” çalışması için en çok öne çıkan ve Lupi’nin son iki prensibini oluşturan önermeler ise “verinin insanı temsil ettiği” (data is people) ve “verinin bizleri daha insan yapacağıdır” (data will make us more human) (Al-Hazwani ve ark., 2025). Veri hümanizmasına göre, temel odak insandır. Veri her zaman insanı, deneyimlerini, gerçek hayatı temsil eder ve bunu etik gerekliliklere uyararak yapar. En önemli noktalardan biri ise veri temsili, daha verimli olmak için değil, insani değerlerimizi artırmak içindir. Bu bağlamda veri daha derin insani anlayışa, empatiye ve ilişki kurabilmeye yol açar. Veri temsili sadece mevcut bilgiyi görünür kılan değil, verilerin arkasında hikâyeler, deneyimler barındıran ve bunu sayısal veri ile bir araya getirerek verilerin ilişkilerini açığa çıkaran bir temsil biçimidir.

3. Veri Setinin Oluşturulması ve Görselleştirilmesi

3.1. Veri Setinin Kapsamı

Toplu ölümleri konu alan veri setinin oluşturulmasında ilk adım, veri setinin dahil edeceği ölüm sebeplerinin, bağlamın, zamanın ve ölüm sayılarının belirlenmesi olmuştur. Proje, araştırma ve tasarım stüdyosunun teması kapsamında yazarlar tarafından ölüm sebepleri iki ana başlık altında, toplamda beş grup olmak üzere veri setine dahil edilmiştir. İki ana başlık, çatışma sebepli ölümler ve ölümün bir sonuç olduğu olaylar şeklinde oluşturulmaktadır. Çatışma sebepli ölümler kendi kategorisinde savaşları, katliamları ve terör saldırılarını içerirken, ölümün bir sonuç olduğu başlığa depremler ve pandemiler dahil edilmiştir.

Veri setinin dahil ettiği bağlam, Türkiye’nin jeopolitik konumu gereği çevre ülkelerde gerçekleşen olaylardan etkilenme potansiyeli göz önünde bulundurularak Türkiye sınırları ile sınırlandırılmamıştır. Türkiye çevresinden izole bir şekilde çalışılmak yerine, bulunduğu geniş konumda çevre ülkeleri ile çalışılmıştır. Bu durumda, oluşturulan üç boyutlu harita Türkiye, KKTC, Suriye, Irak, İran, Ermenistan, Rusya, Yunanistan, Bulgaristan, Sırbistan ve Bosna-Hersek’i içermekte olup, Türkiye dışındaki ülkelerde yalnızca ölüm oranı en yüksek, toplum hafızasında yer etmiş olan olaylar seçilmiştir.

Yazarlar tarafından oluşturulan veri setine 1900 – 2023 yılları arasındaki 123 senelik bir süreç ve bu süreçte Türkiye ve çevresinde gerçekleşen toplu ölümlere sebep olmuş olaylar dahil edilmiştir. Veri hümanizmasının da belirttiği gibi, her bir veri, veri setinde sayısal bir nicelik olmasından önce öznel bir hikâyedir (Lupi, 2017). “Massive Body Loss”, bu önermeyi benimseyerek toplum hafızasında yer edinmiş hikayelerin verisini veri setine dahil etmiştir. Veri seti oluşturulurken dahil edilen olaylar için belirlenen minimum ölüm sayıları istatistiksel bir eşik olarak değil, olayların kendi kategorileri içerisinde toplumsal hafızada görünür hale geldikleri ölçekler olarak değerlendirilmiştir. Bu nedenle her gruba dahil olan olaylar birçok farklı kaynak ve ortamda yapılan araştırmalar neticesinde belirlenmiş, olayların farklı kaynaklarda tekrar eden varlığı dikkate alınmıştır. Bu açıdan veri setine eklenen veriler daha az ölüm sayısına sahip olsa bile, toplumsal hafızada yer etmiş, arşivlerde, akademik yayınlarda veya açık erişimli web sitelerinde birden fazla kez konu edildiyse, veri setine dahil edilmiştir. Belirlenen nicel eşikler istatistiksel bir sınıflandırma amacıyla değil, olay türlerinin kolektif hafızada görünür hale geldiği ölçekleri temsil etmek için kullanılmıştır. “Massive Body Loss” projesi için ölüm sayısı bir nicelik olarak değil, her biri kendi hikayesini barındıran veriler olarak görülmüş ve araştırılmıştır. Bu bakış açısı sayesinde veri setinde farklı ölçekte ve kategorilerde toplu ölümler ve kolektif hafızada yer almış olaylar yer almaktadır.

3.2. Veri Setinin Kullandığı Kaynaklar

Veri setinin oluşturulmasında çeşitli devlet ve özel kaynaklardan faydalanılmıştır. (Şekil 1) Devlet arşivleri, akademik yayınlar, haber kanalları, belirli grupların hafızalarını korumak için oluşturdukları web siteleri ve bazı açık erişimli web siteleri bu süreçte taranılan kaynaklar arasındadır.

T.C. Başbakanlık Devlet Arşivleri Genel Müdürlüğü, Osmanlı Arşivi Daire Başkanlığı’nın arşiv belgelerinin ve olayların açıklamalarının içerdiği kitap olarak yayınlanmış eserlerin taranmış ve dijital erişime açık hale getirilmiş versiyonları kullanılan kaynaklar arasındadır. Bir diğer kaynak, Devlet Arşivleri Başkanlığı’nın e-Devlet bilgileri üzerinden erişimine izin verilen devlet arşivleri kataloğudur. Bu sistem üzerinden konu ile ilgili anahtar kelimeleri aratarak, orijinal el yazması veya çıktısı alınmış belgelerin taranarak dijital ortamda erişimine izin verilen belgelere ulaşılmıştır. Sistem aynı zamanda belge özeti, kurum, belge tarihi ve orijinal belgenin bulunduğu yer bilgisini de içermektedir. Bir diğer kaynak ise T.C. Millî Savunma Bakanlığı’nın web sitesinde açık erişime izin verdiği basılı kitapların dijital versiyonlarıdır.

1900-1923	Late Ottoman genocides: the dissolution of the Ottoman Empire and Young Turkish population and extermination policies – introduction	Donerik J. Schaller & Jürgen Zimmerer Pages 7-14 Published online: 19 Jun 2008 https://doi.org/10.1080/14725800801950820 Routledge	https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/14725800801950820
1915 Sürmen Soykırımı (Siydi) 100 yıldönümü	1915 Sürmen Soykırımı (Siydi) 100 yıldönümü	Suphi Aksoy-Yakup Nuhom	https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/14725800801950820
Diğer	Diğer	Hajim Erdoğan Türk Tarih Kurumu	https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/14725800801950820
Genocide in the Ottoman Empire: Armenians, Assyrians, and Greeks, 1913-1923	Genocide in the Ottoman Empire: Armenians, Assyrians, and Greeks, 1913-1923	Edited by George N. Shirinian copyright Date: 2017 Edition: 1 Published by: Berghahn Books https://doi.org/10.1017/9781107195082	https://www.berghahn.com/doi/abs/10.1017/9781107195082
The Complexity of the Assyrian Genocide	The Complexity of the Assyrian Genocide	David Gaunt, Genocide Studies International Vol. 9, No. 1, The Ottoman Genocides of Armenians, Assyrians, and Greeks (Spring 2015), pp. 82-103 (22 pages) Published by: University of Toronto Press	https://www.jstor.org/stable/2699010
Let Them Not Return: Sayfo – The Genocide Against the Assyrians, Syriacs, and Chaldean Christians in the Ottoman Empire	Let Them Not Return: Sayfo – The Genocide Against the Assyrians, Syriacs, and Chaldean Christians in the Ottoman Empire	David Gaunt, Nations and Nations, Series: War and Genocide Volume 25 Copyright Date: 2016 Edition: 1 Published by: Berghahn Books https://doi.org/10.1017/9781107195082	https://www.berghahn.com/doi/abs/10.1017/9781107195082
1900-1923	1900-1923	Assoc. Prof. Dr. Murat Apacı	https://www.academia.edu/45584654/1900-1923_Ulus_ve_Jerusalem_Turkmenlikleri_ve_Fransiz_Mucadelesi_1900-1923_Fransiz_Mucadelesi_1900-1923_Fransiz_Mucadelesi_1900-1923
1900-1923	1900-1923	Nicok Cavid - Erdi Karo Soyal (İkinci Arşivler Dergisi)	https://www.berghahn.com/doi/abs/10.1017/9781107195082
1900-1923	1900-1923	Hakan DEMİRCİ, Atatürk Arşivi Arşivi Başkanlığı	https://www.berghahn.com/doi/abs/10.1017/9781107195082
1900-1923	1900-1923	Çinar Akay* Prof. Dr. Düzce Eysel Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Şehir ve Bölge Planlama Bölümü Elm. Öğr. Üyesi. (www.TURKYE, mceyl1/çinarakay) DOI: 10.31815/turkceyl.75000.2024.411	https://www.berghahn.com/doi/abs/10.1017/9781107195082
1900-1923	1900-1923	Mehmet Karayaman, Cilt: 6 Sayı: 15 1 Aralık 2007	https://www.berghahn.com/doi/abs/10.1017/9781107195082
1900-1923	1900-1923	MINUL ÇELERİ	https://www.berghahn.com/doi/abs/10.1017/9781107195082
1900-1923	1900-1923	Yrd. Doç. Dr. MUSTAFA TURAN Altın (Kocaeli Üniversitesi), Fen Edebiyat Fakültesi, Alan dergisi	https://www.berghahn.com/doi/abs/10.1017/9781107195082
1900-1923	1900-1923	Muhammed GÜÇLÜ Yrd. Doç. Dr. Akdeniz Üniversitesi Edebiyat Fakültesi Tarih Bölümü (CTAD, X/22, (2015) (Eser)	https://www.berghahn.com/doi/abs/10.1017/9781107195082
1900-1923	1900-1923	Nihat ERDEM Doç. Dr. İstanbul Üniversitesi Atatürk İktisat ve İktisat Tarih Enstitüsü, İstanbul CTAD, Yıl 18, Sayı 37 (Bahar 2023), pp. 327-350	https://www.berghahn.com/doi/abs/10.1017/9781107195082

Şekil 1: Kullanılan kaynaklardan bir kesit

Akademik yayınlar da ölüm sayılarına ilişkin bilgilerin edinildiği önemli kaynaklar arasında yer almaktadır; makaleler ve doktora tezleri, konferans bildirileri veya kitaplardan faydalanılmıştır. Her bir olay ayrıca aratılmış ve aynı veri ile ilgili birden fazla kaynak taranmış olup veri setine eklenecek nicel sayıların kontrolleri sağlanmıştır. Yine çevrimiçi ana akım medya hesaplarından ve Türkiye’nin dijital gazete arşivi olan, 150+ senelik bir arşive sahip, açık erişime sahip ve anahtar kelime ile arama yapmaya müsait Gaste Arşivi’nden yararlanılmıştır. Bu arşiv haricinde gazetelerin kendi sitelerinde yer alan arşivler ve çevrimiçi sisteme yüklenmiş haberler de kullanılmıştır. Bunların dışında, belirli kuruluşlar tarafından spesifik olaylar hakkında hazırlanmış raporlar kullanılmıştır. Türkiye İnsan Hakları Vakfı’nın hazırladığı 1995 Türkiye İnsan Hakları Raporu, AFAD’ın hazırladığı Depremlere İlişkin Ön Değerlendirme Raporu, UN Economic and Social Commission for Asia and the Pacific’in pandemi özelinde raporları veri setinin oluşturulmasında faydalanılmış kaynaklar olarak gösterilebilir. Ek olarak, belirli bir gruba ait kişilerin kendi grup hafızalarını korumak için kurdukları web sitelerinden ve açık erişimli web sitelerinden de faydalanılmıştır. Bu web sitelerinde ilgili toplulukların kültürel mirasına ait yazılar, geleneksel kıyafetler, ninniler, diller ve çeşitli kültürel öğelere ilişkin veriler ve olaylara tanıklık etmiş bireylerin birinci şahıs anlatıları mevcut olup, çift taraflı kaynak taramasında bu web siteleri önemli bir veri tabanı oluşturmıştır.

123 sene içerisinde bu araştırma kapsamına dahil edilen 313 olay için pek çok kaynak taranmış olup, bazı olaylar hakkında farklı kaynaklarda muhtelif verilere rastlanıldığı durumlar olmuştur. D'Ignazio ve ark. (2020) büyük veri setlerinin veya arşivlerin birer otorite tarafından kontrol edildiğinden bahseder. Veriler her ne kadar nesnel ve tartışılmaz olarak algılsa da nelerin veri setine dahil edilip edilmeyeceği, hangi verilere hangi düzeyde kimlerin erişim erişemeyeceği gibi konuların kararları her zaman veri setlerinin veya arşivlerin arkasındaki güç unsuruna dayanmaktadır. Veri seti oluşturulurken karşılaşılan muhtelif farklar, D'Ignazio ve ark.’ın (2020) bahsettiği verilerin arkasında bulunan otorite ve temsil ettiği taraf ile ilgili olduğu anlaşılmaktadır. Bu durumda, “Massive Body Loss” projesinin veri seti oluşturulurken farklı otoritelerin etkisi göz önünde bulundurulmuş ve aynı konu birden fazla kaynaktan araştırılmıştır. Farklı kaynaklar seçilirken özellikle kaynakların iki tarafa da ait olmasına özen gösterilmiş, böylece otoritenin etkisinin en aza indirgenmesi hedeflenmiştir. Karşılaşılan farklı sonuçlar veri hümanizmasının da öngördüğü, verinin kusurluluğunu ve her zaman kesin bir doğruyu belirtmediğini destekler. Bu projenin veri seti oluşturulurken de verilerin kesin doğruluğu değil, verinin insanı temsili, temsiline getirdiği analizler ve kolektif hafızada edindiği yer ön planda tutulmuştur.

Örnek olarak, özellikle çatışma temelli toplu ölüm vakalarının en az iki grubu ilgilendirmesi ve her bir gruba ait kaynaklarda taraflı verilerin olabileceği göz önünde bulundurularak her iki tarafın kayıpları toplanarak bir sonuca ulaşılmıştır. Çatışma temelli kayıp örneklerinde herhangi bir grubun verdiği kayıplar değil, her zaman toplam insan kaybı göz önünde bulundurulmuştur. Çünkü, “Massive Body Loss” projesi için ölümün tarafı değil, ölümün kendisi ve temsil ettiği hikayesi önemsenmiştir.

3.3. Veri Setinin Organizasyonu

Farklı kaynaklardan toplanan veriler, bir tabloda bir araya getirilerek veri seti oluşturulmuş ve bu tablo massivebodyloss.com web sitesinde paylaşılmıştır. Daha önce de belirtildiği gibi, veriler ölüme sebep olan olaylar üzerinden toplanmış ve sınıflandırılmıştır. Savaş, katliam, terör olayları, pandemi ve depremler içeren beş grup, veri görselleştirme aşamasında beş farklı renk ile temsil edilmiştir. Temsil ettiği renklere göre gruplanan ve toplumsal hafızada yer edinen olayların her birisi, 1900 senesinden 2023 senesine kadar kronolojik olarak 10’ar senelik periyotlara bölünerek ve olayların gerçekleştiği yıllar belirtilerek sıralanmıştır. (**Şekil 2**) Her bir olayın ismi ve gerçekleştiği yıla ek olarak, olayın gerçekleştiği lokasyon ve sebep olduğu ölüm sayıları da tabloya işlenmiştir. Özetle, veri seti, beş parametre altında organize olmuştur ve olay türü, ismi, gerçekleştiği zamanı, lokasyonu ve ölüm sayısını içermektedir.

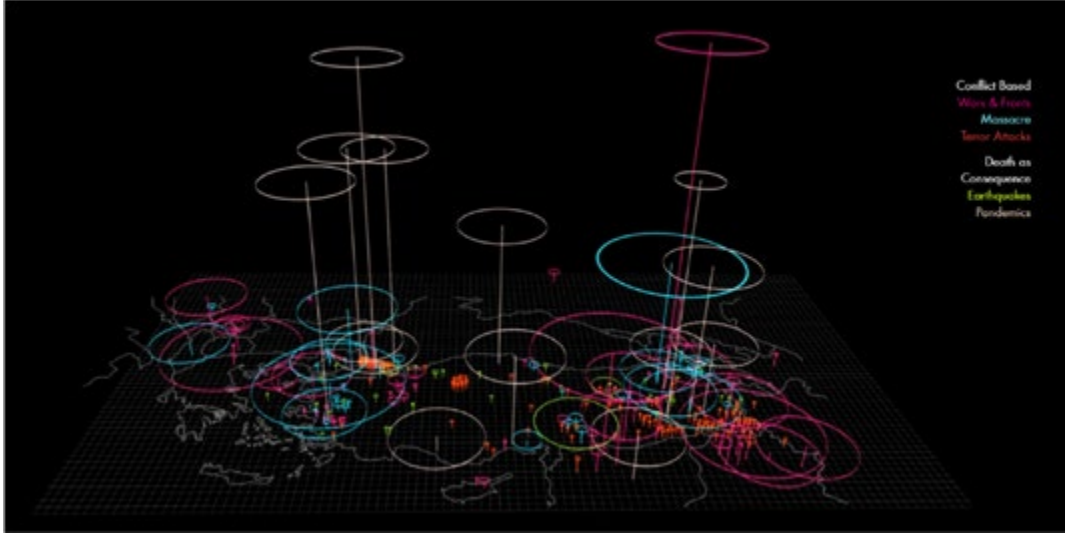
1900-1910	YEAR	INCIDENT	LOCATION	DEATH TOLL
MASSACRE	1905-1922	between Kurdish, Turkish & Armenians	Doğu Anadolu İstanbul, Bitlis, Diyarbakır, Erzurum, Harput, Sivas, Trabzon ve Van	1.000.000
	April 1909	between Armenians & İttihak Terakki	Adana	30.000
PANDEMICS	1900-1920	syphilis (frengi)	Kastamonu / Sinop	80.000
	1902-1920	hansen disease (cüzam)	Bitlis	75.000
	1907-1913	cholera	Erzurum	50.000
	1903	cholera	Halep / Suriye	60.000
TERRORISM	21 July 1905	Yıldız Assassination	İstanbul	26
EARTHQUAKE	29.4.1903	Malazgirt (MUŞ) earthquake	Muş	600, 450 damaged building
1911-1920				
MASSACRE	October 1912	between Bulgarians & Turkish	Edirne	5000
	November 1912	Edeköy / Greek & Turkish	Edirne	2000
	1913 Summer	between Bulgarians & Turkish	Trakya	8.4.2064
	07 July 1913	Bulgarköy / Bulgarians & Turkish	Edirne	4.1.1903
	1913-1922	between Greek & Turkish	Pontus, Kapadokya, İyonya ve Doğu Trakya	27.2.3674
	1914-1918	Assyrian & Turkish	Diyarbakır, Mardin, Hakkari	15.5.2721
	21 February 1914	between Armenians & Turkish	Kars ve Ardahan	18.2.1982
	1915-1916	Russian & Turkish, Kurdish	Diyarbakır, Bitlis, Erzurum, Van, Trabzon	28.9.3542
	April-May 1915	Revolt in Van / Armenian & Turkish, Kurdish	Van	4.6.1916
	30.3.1905	Russian & Turkish, Kurdish	Çoruh Havzası Erzurum	15.3.2023
	26-27 February 1918	Russian & Turkish, Kurdish	Erzincan, Erzurum (ALACA)	18.5.1927
	03 January 1917	Arap Camii Attack / Armenian & Turkish	Ardahan	7.1.1901
	May 1919 – October 1922	between Greek & Turkish	İzmir, Manisa, Balıkesir, Aydın, Uşak, Bilecik, Kocaeli	28.11.4637
	16-17 June 1919	Menemen / between Greek & Turkish	İzmir	28.9.1902
	27 June– 4 July 1919	between Greek & Turkish	Aydın	31.7.1909
	1920-1921	between Greek & Turkish	Yalova ve Gemlik	21.8.1924
	3.4.1905	Armenian - Turkish	Maras	28.4.1912
	1920-1921	Antep Kuşatması	Antep	1.3.1919
	01 February 1920	between Armenians & Turkish	Maras	7.11.1932
	March 1920- June 1921	between Greek & Turkish	İznik, İzmit	7.11.1932

Şekil 2: Kategorilere göre oluşturulan veri setinden bir kesit

3.4. Veri Setinin Temsili

Proje, yapılan araştırmaların sonucunda elde edilen veri setini üç boyutlu bir harita oluşturarak görselleştirmeyi hedeflemiştir. Bu durumda, veri setinin içerdiği coğrafya, Türkiye ve çevre ülkeler temel alınmış olup, veri setindeki olayların gerçekleştiği lokasyonlar, kategorilerin renklerine göre kronolojik olarak işaretlenerek harita tamamlanmıştır.

Veri seti, belirlenen temsil yöntemlerine göre modelleme programında manuel olarak modellenerek görselleştirilmiştir. Setteki her bir olay, bir çizgi ve üzerinde bir daire olan birer birim olarak temsil edilmiştir. Birimlerdeki çizginin uzunluğu olayın sürdüğü süreyi, üzerindeki dairenin yarıçapı ise ölüm sayısını temsil etmektedir. Her birim temsil ettiği olay grubunun renginde modellenmiş olup, temel aldığı basitleştirilmiş haritada olayın gerçekleştiği lokasyona yerleştirilmiştir. Her birim kronolojik olarak, 1900 senesinden 2023 senesine kadarki sürece göre yerleştirilmiş ve bu zaman dilim akışı, kümülatif olarak ilerleyen bir animasyon olarak kurgulanmıştır. (Şekil 3) Veri setinin kümülatif olarak ilerleyen animasyonu, aynı lokasyonda farklı zamanlarda gerçekleşen olayların yoğunluğunu göstermekte olup, haritanın tarihsel olarak tekrar eden olaylardan en çok etkilenen kritik lokasyonlarını ortaya koymaktadır. 123 senelik oluşan kümülatif haritanın bu kritik bölgelerinden yakınlaştırılmış görüntüler alınmış ve web sitesine ayrıca eklenmiştir.



Şekil 3: Kümülatif 3 boyutlu harita

3.5. Veri Setinin Deneyimi

“Massive Body Loss” projesi, herkesin erişimine açık olarak tasarlanan web sitesinde deneyimlenebilir hale getirilmiştir. Web sitesi deneyimi, Lupi’nin veri hümanizması yaklaşımında vurguladığı veri temsiliinin keşiflere, deneyimlere açık olması, sayısal değerlerin insan deneyimlerini ve hikayelerini temsil etmesi prensipleri doğrultusunda tasarlanmıştır.

Proje kapsamında iki farklı veri seti oluşturulmuştur. Tasarım ve araştırma stüdyosunun teması gereği toplu ölüme sebep olan olaylar “şok”lar olarak adlandırılırken, bu anlık ölümlerin uzun süreçte gözlemlenen sonuçları “stres”ler olarak adlandırılmıştır. Şok ve stresler ayrı iki veri seti olarak araştırılmış ve web sitesinde deneyimlenebilir hale getirilmiştir.

“Şok” olaylarından oluşan veri setinin temsiliyeti olan üç boyutlu haritanın, kümülatif şekilde bütün veriyi kapsayan versiyonu, aynı haritanın yıllara göre kategorize edilmiş animasyonu ve yoğunluk açısından kritik bölgelere odaklanmış aksonometrik görüntüleri web sitesinde incelemeye açıktır. Hazırlanan veri haritalarına ek olarak, şok verileri kesit ortamında incelenmiştir. “Şok” olaylarının yarattığı “stres”ler, arşiv belgeleri, sözlü tarih, anılar, fotoğraflar, edebi eserler ve raporlar kaynak olarak kullanılarak, ölümlerin insanlar üzerindeki uzun süreli etkisinin izleri sürülerek detaylı bir şekilde incelenmiş ve kullanıcıların deneyimine açık hale getirilmiştir. “Stres” olayları plan, aksonometrik ve kesit yöntemleri kullanılarak, “şok” olayları ile üst üste konarak ilişkilendirilmiş ve böylece olaylar ile ilgili çok katmanlı ve ilişkili bir okuma elde edilmiştir. Nicel değerlerin arkasındaki deneyimleri görünür kılmayı taşıyan proje, temsil edilen verilere bu sayede farklı katmanlarda araştırmalar eklemiştir.

Veri haritasının hazırlanan iki boyutlu kesit temsiliinde, spesifik olaylar tıklanabilir birimler şeklinde tasarlanmıştır. Bu sayede kullanıcılar, ölüm oranı, lokasyon ve olay grubu hakkında temel bilgisi olan olaylar hakkında daha detaylı bilgiye interaktif olarak ulaşabilmektedir. Açılan detay sayfalarında, olaylar hakkında arşiv belgeleri, döneme ait fotoğraflar, görsel temsiller, gazete haberleri ve yazılar bulunmaktadır. (Şekil 4) Böylelikle, veri seti yalnızca nicel bilgi sunan bir setten ziyade çok katmanlı, farklı medya ve ortamları bir araya getiren, birbiriyle ilişkilendiren, sergilenen ve deneyimlenebilen bir alana dönüşmüştür.



Şekil 4: İnteraktif ulaşılan detay sayfasından bir kesit

“Architecture’s of Care” stüdyosunun temel odağında yer alan insan yaşamının umursanması ve Lupi’nin verilerin yalnızca sayıları değil, içinde hikayelerini de barındırması fikirleri bir araya gelince, projenin ikinci aşamasının temel sorusu ‘Nasıl Unutmayalım?’ (How not to forget?) ortaya çıkmış ve projenin ikinci aşamasını şekillendirmiştir. Bu bağlamda, farklı kategorilerden seçilen iki olay, çatışma temelli toplu ölümler grubundan Bosna Savaşı (1992-1995), ölümün sonuç olarak geldiği gruptan Kahramanmaraş Depremi (2023) söz konusu soru üzerinden detaylandırılarak çalışılmış ve fiziksel anlamda da insanların deneyimleyebilecekleri şekilde temsil edilmiştir. Web sitesinde yaşanan bu olayları deneyimleyen ve bu olaylar neticesinde hayatını kaybeden insanların hikayelerini paylaşan, interaktif ve çok katmanlı sayfalar oluşturulmuştur. Bu iki çalışmanın sonucu stüdyo dönem sergisi kapsamında fiziksel olarak sergilenmiş olup, yaşanan hikayeler fiziksel anlamda da kullanıcıların deneyime ortak olabileceği şekilde tasarlanmıştır. Sergi sonrasında sergiden görseller web sitesinde paylaşılmış ve detaylı projeler interaktif bir şekilde erişime açılmıştır.

4. Sonuç

Sonuç olarak, “Massive Body Loss” projesi toplu ölümleri kategorilere ayırarak inceleyen, sadece nicel değil, verilerin temsil ettiği insan hikayelerini de veri setine dahil eden ve bunu deneyimlenebilen interaktif bir web sitesinde erişime açık hale getiren bir araştırma ve görselleştirme projesidir. Bu proje ile kolektif hafızanın görünür olması ve veri hümanizmasının sunduğu kuramsal çerçeve ile verilere indirgenen hikayelerin unutulmaması hedeflenmiştir. Veri setine dahil edilen olaylar yalnızca ölüm sayısı üzerinden değerlendirilmemiş, aynı zamanda toplumsal hafızada bıraktıkları iz, arşivlerde bulunan tekrar sayıları ve görünürlükleri de göz önünde bulundurulmuştur. Böylece çalışma, Lupi’nin veri hümanizması yaklaşımında benimsediği verinin kusurlu, öznel, farklı deneyimlere açık, farklı çalışmalara ilham verici ve çok katmanlı yapısını ortaya koymuştur. Web sitesinde, veri seti, kullanılan kaynaklar, veri setinden görselleştirilen animasyon, plan, kesit ve aksonometrik görüntüler ile detaylandırılmış araştırmalar kullanıcıların erişimine açık olup, eklenen interaktif arayüzler ile kullanıcıların hikayeleri deneyimleyebilmeleri sağlanmıştır. Farklı kategorideki verilerin bir arada görselleştirilmesi verileri tekil okumaya olanak sağlarken, kategorilerin ve verilerin birbirleriyle ilişkilerini de okunabilir kılmıştır. Aynı şekilde “şok” ve “stres” olaylarını üst üste bindirilmiş haritalarda okuyabilmek, verinin çok katmanlı yapısını göstermekte olup, yeni okumalara yol açmıştır. Böylece “Massive Body Loss” veri görselleştirme çalışması yalnızca mevcut bilgiyi aktaran değil, bilgiyi kuran, ilişkilerle yeni bilgiler ortaya çıkaran, veri seti arkasındaki hikayeleri görünür kılan ve bunları kullanıcıların interaktif şekilde deneyimleyebileceği bir ortam yaratan çalışma olmuştur. Projenin

içeriği, araştırma ve temsil yöntemi sayesinde projenin genişletilmesine ve yeni verilerin eklenmesine olanak sağlamaktadır.

“Architectures of Care” teması altında toplu ölümleri ve hikayelerini, toplum hafızasındaki yerini mekânsal ilişkiler kurarak görünür kılan “Massive Body Loss” projesi, aynı zamanda toplumsal olayların farklı disiplinler tarafından nasıl ele alınıp umursanabileceğine bir örnek oluşturmaktadır. Proje, veri hümanizmasının önerdiği gibi sayısal verilerin ardındaki, deneyimlenebilir hikayeleri önemsemiş ve bunları birbirleriyle ilişkilendirerek yeni okumalar sunmuştur. Bunun yanı sıra, genişletilebilir yapısı sayesinde Türkiye ve çevresinde 123 yılda yaşanan olayları içeren kapsamlı bir veri tabanı oluşturmuştur.

Teşekkür

Bu proje TED Üniversitesi Mimari Tasarım Yüksek Lisans Programı dahilinde Araştırma ve Tasarım Stüdyosu kapsamında hazırlanmıştır. Projenin her aşamasında desteklerini esirgemeyen stüdyo yürütücüsü Prof. Dr. Berin F. Gür ve stüdyo asistanı Alper Al’a teşekkür ederiz. Ayrıca, TED Üniversitesi Mimarlık Bölümü akademik kadrosuna teşekkürlerimizi iletiriz.

KAYNAKLAR

- Al-Hazwani, I., Zhang, K. E., Garrison, L., & Bernard, J. (2025). Data humanism decoded: A characterization of its principles to bridge data visualization researchers and practitioners. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 31(1), 1–11. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2024.3456789>
- D'Ignazio, C., Thylstrup, N. B., Agostinho, D., Ring, A., & Veel, K. (2020). Uncertain archives: Approaching the unknowns, errors, and vulnerabilities of big data through cultural theories of the archive. *Surveillance & Society*, 18(1), 114–121. <https://doi.org/10.24908/ss.v18i1.13341>
- Gold, M. K., & Klein, L. F. (2019). Introduction: A DH that matters. In M. K. Gold & L. F. Klein (Eds.), *Debates in the Digital Humanities 2019* (pp. ix–xxiii). University of Minnesota Press.
- Kozoğlu, Z. & Top, B. S., (2023). *Massive Body Loss* [Review of Massive Body Loss]. <https://www.massivebodyloss.com/>
- Lupi, G., Posavec, S. (2016). *Dear Data*. Princeton Architectural Press.
- Lupi, G. (2017, January 30). Data Humanism: The Revolutionary Future of Data Visualization. *PRINT Magazine*. <https://www.printmag.com/article/data-humanism-future-of-data-visualization/>
- Mann, S. (2017). Big Data is a big lie without little data: Humanistic intelligence as a human right. *Big Data & Society*, 4(1), 1–10. <https://doi.org/10.1177/2053951717691550>

MSTAS 26 “KAPSAM DIŞI”

XX. MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM ULUSAL SEMPOZYUMU

OTURUM 7

SAYISAL ÜRETİM, FABRİKASYON
ve DİJİTAL ZANAATKÂRLIK

Performatif Tasarım ile Kil-Tabanlı 3B Baskının Bütünleştirilmesine Yönelik Bir Metodoloji: Hesaplamalı Kabuk Tasarımı

Çağdaş Elibol ¹ ; Sevil Yazıcı ² 

^{1,2}İstanbul Teknik Üniversitesi

¹elibol23@itu.edu.tr; ²sevilyazici@itu.edu.tr

Özet

Performatif tasarım yaklaşımları ve sayısal üretim teknolojileri, mimari tasarım süreçlerinde çevresel veriler ile geometrik üretim arasındaki ilişkinin yeniden ele alınmasını sağlamaktadır. Özellikle kil-tabanlı 3B baskı sistemleri, malzeme davranışı ile geometrik kararlar arasında doğrudan ilişkiler kurulmasına olanak tanımaktadır. Ancak mevcut çalışmalar incelendiğinde, kil-tabanlı malzeme özelliklerinin çoğunlukla üretim sürecini bilgilendiren teknik veriler olarak ele alındığı, hesaplamalı modelleme ve çevresel performans analizleri ile bütünlük bir tasarım girdisi olarak değerlendirilmediği görülmektedir. Bu durum, malzeme davranışının geometrik kararların sınır koşullarını belirleyen aktif bir tasarım girdisi olarak ele alınmasını sınırlamaktadır. Bu bağlamda çalışmanın temel amacı, kil-tabanlı 3B baskı ile performatif çevresel tasarım süreçlerini bütünleştiren, malzeme, geometri ve performans ilişkisini birlikte ele alan bir metodolojik çerçeve geliştirmektir.

Çalışma, sayısal bir araştırma yaklaşımı üzerine kurulmuştur. Literatürde yer alan kil-tabanlı malzeme çalışmaları incelenmiş ve çalışma kapsamında kullanılacak referans malzeme yaklaşımı belirlenmiştir. Bu kapsamda malzeme yoğunluğu, gözeneklilik, büzülme davranışı ve üretilebilirlik özellikleri dikkate alınarak seçilen referans yaklaşımın hesaplamalı modele aktarılma biçimi tanımlanmıştır. Seçilen reçeteye ait üretim davranışları analiz edilerek minimum kesit kalınlığı, açıklık boyutu ve maksimum eğim gibi üretim kısıtları tanımlanmıştır. Bu kısıtlar, Rhinoceros / Grasshopper (GH) algoritmik tasarım ortamında geliştirilen hesaplamalı kabuk modelinin temel girdileri olarak kullanılmıştır. Modelde açıklık yoğunluğu, yüzey eğimi, kalınlık ve yönlenme gibi geometrik parametreler birbirleriyle ilişkili biçimde çalışacak şekilde kurgulanmıştır.

Vaka çalışması Avanos, Nevşehir bağlamında yürütülmüş ve 21 Haziran yaz dönemi güneş konumları üzerinden çevresel performans analizleri gerçekleştirilmiştir. Çevresel performans analiz araçları olan GH Ladybug ve Honeybee araçları kullanılarak radyasyon, gün ışığı ve gün ışığına bağlı konfor değerlendirmeleri yapılmıştır. Evrimsel optimizasyon sürecinde farklı geometrik varyasyonlar karşılaştırılmış ve güneş radyasyonu değerlerinin azaltılması ile gün ışığına bağlı konfor aralığında kalan analiz alanı oranının artırılması birlikte değerlendirilmiştir. Çalışmanın son aşamasında ise önerilen geometrik sistemin üretilebilirliğini değerlendirmek amacıyla sınırlı ölçekli fiziksel prototipler üretilmiştir.

Çalışma sonucunda, malzeme davranışının yalnızca üretim sürecini sınırlandıran teknik bir veri olmadığı, aynı zamanda hesaplamalı modelin geometrik sınırlarını tanımlayan bir tasarım girdisi olarak değerlendirilebileceği ortaya konmuştur. Ayrıca açıklık yoğunluğu, kalınlık ve yüzey eğimi gibi geometrik kararların çevresel performans ve üretilebilirlik koşullarıyla birlikte ele alınmasının, kil-tabanlı 3B baskıya yönelik hesaplamalı tasarım süreçlerinde daha bütüncül bir değerlendirme olanağı sunduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Performatif Çevresel Tasarım, Bütünlük Hesaplamalı Tasarım, Kabuk Tasarımı, Kil-tabanlı 3B Baskı.

A Methodology for Integrating Performative Design with Clay-Based 3D Printing: Computational Shell Design

Cagdas Elibol ¹ ; Sevil Yazıcı ² 

^{1,2}Istanbul Technical University

¹elibol23@itu.edu.tr; ²sevilyazici@itu.edu.tr

Abstract

Performative design approaches and digital fabrication technologies have enabled the reconsideration of the relationship between environmental data and geometric generation in architectural design processes. In particular, clay-based 3D printing systems establish direct relationships between material behavior and geometric decision-making. However, existing studies generally evaluate material properties as technical data that validate the production process, rather than integrating them with computational modeling and environmental performance analyses as active design inputs. This condition limits the consideration of material behavior as a parameter that defines the geometric constraints of form generation. In this context, the main objective of this study is to develop a methodological framework that integrates clay-based 3D printing with performative environmental design processes by addressing the relationship between material, geometry, and performance within a unified workflow.

The study is based on a computational research approach. Clay-based material studies in the literature are reviewed, and a reference material approach is defined for the scope of the study. The recipes included in the dataset are comparatively evaluated according to density, porosity, shrinkage behavior, and producibility criteria, after which a recipe is selected for the study. The production behavior of the selected recipe is analyzed to define fabrication constraints such as minimum thickness, opening size, and maximum slope. These constraints are used as the primary inputs of a computational shell model developed in the Rhinoceros/Grasshopper (GH) algorithmic design environment. Geometric parameters including opening density, surface slope, thickness, and orientation are structured to operate relationally within the model.

The case study is conducted in the context of Avanos, Nevşehir, and environmental performance analyses are carried out based on June 21 summer solar conditions. Radiation, daylight, and daylight-based comfort evaluations are performed using Ladybug and Honeybee tools. During the evolutionary optimization process, multiple geometric variations are compared, and design alternatives that reduce radiation values while increasing the proportion of the analysis area within the daylight-based comfort range are evaluated. In the final stage of the study, limited-scale physical prototypes are produced in order to assess the producibility of the proposed geometric system.

The findings demonstrate that material behavior should not only be considered as technical data limiting the production process, but also as a design input defining the geometric boundaries of the computational model. In addition, the integrated evaluation of opening density, thickness, and surface slope with environmental performance and producibility conditions provides a more comprehensive assessment framework for computational design processes in clay-based 3D printing.

Keywords: Performative Environmental Design, Integrated Computational Design, Shell Design, Clay-based 3D Printing.

1. Giriş

Kil-tabanlı üç boyutlu (3B) baskı, yerel hammaddelerin mimari üretim süreçlerine dâhil edilmesi, düşük etkili üretim senaryolarının araştırılması ve karmaşık geometrilerin doğrudan üretilebilmesi nedeniyle son yıllarda öne çıkan sayısal üretim yaklaşımlarından biridir. Bu yaklaşım, geleneksel kil kullanımını sayısal üretim olanaklarıyla birleştirerek malzeme, üretim ve biçim arasındaki ilişkinin yeniden ele alınmasına imkân tanımaktadır. 3B baskı ile üretilen kil-tabanlı karışımlar üzerine yapılan araştırmalar, bu üretim biçiminin malzeme içeriği ve üretim davranışıyla birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir (Sochůrková vd., 2024). Kil-tabanlı 3B baskı süreçlerinde malzeme özellikleri ile üretim teknikleri arasındaki karşılıklı ilişki, tasarım kararlarının üretilebilirlik bağlamında değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır (Şen Bayram & Cantürk Akyıldız, 2024). Bu nedenle kil-tabanlı 3B baskı, yalnızca alternatif bir üretim tekniği değil, mimari tasarım sürecinde malzeme özellikleri ile geometrik kararların birlikte düşünülmesini gerektiren bir üretim alanı olarak değerlendirilebilir.

Bu üretim alanında reçete bilgisi, geometrik kararların uygulanabilirliğini etkileyen temel girdilerden biridir. Karışımın yoğunluğu, büzülme davranışı, gözenekliliği, su oranı, işlenebilirliği ve katman stabilitesi, katmanların sürekliliği, yüzeyin üretilebilirliği ve formun geometrik sınırları üzerinde doğrudan etkilidir. Kil-tabanlı 3B baskı karışımlarını inceleyen çalışmalar, karışım oranları ile üretim davranışı arasındaki ilişkinin baskılanabilirlik açısından belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır (Faleschini vd., 2023). Bu bağlamda reçete bilgisinden türetilen minimum kesit kalınlığı, açıklık boyutu ve maksimum eğim gibi üretim kısıtları, hesaplamalı modelde geometrik kararların sınırlarını tanımlayan parametreler olarak ele alınabilir. Böylece malzeme bilgisi, üretim sonrasında kontrol edilen teknik bir veri olmaktan çıkarak, form üretim sürecinde dikkate alınan tasarım girdilerinden biri haline gelmektedir.

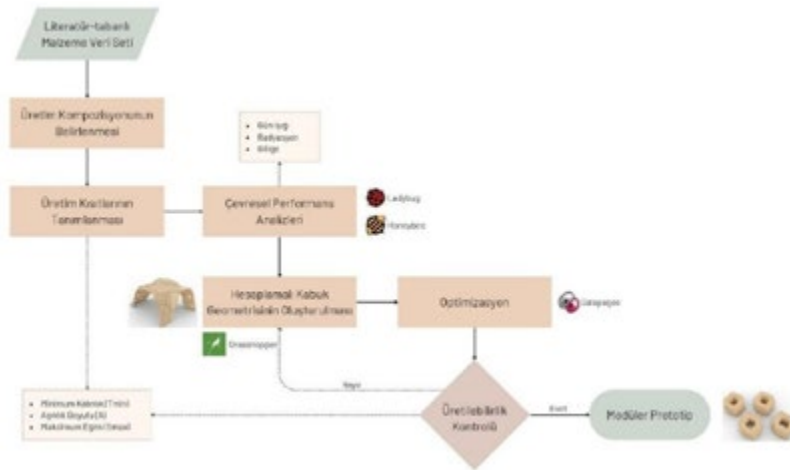
Konu kapsamındaki mevcut literatür incelendiğinde, araştırmaların üç farklı odak etrafında geliştiği görülmektedir. İlk odak, kil-tabanlı 3B baskının malzeme bileşimi, işlenebilirliği, büzülme davranışı ve üretim kısıtları üzerinden incelenmesine dayanmaktadır. Bu çalışmalar, farklı kil-tabanlı karışımların baskılanabilirlik koşullarını ve üretim sürecindeki sınırlarını tanımlaması bakımından önemlidir (Sochůrková vd., 2024; Faleschini vd., 2023; Dong vd., 2022). İkinci odak, performatif tasarım kapsamında form üretimi ve çevresel performans ilişkisi üzerinden tanımlanmakta; gün ışığı, güneş radyasyonu, gölge dağılımı ve gün ışığına bağlı konfor gibi ölçütleri geometrik tanım ve optimizasyon süreçleriyle bütünleşik olarak ele almaktadır (Ekici vd., 2019). Üçüncü odak ise malzeme, geometri ve performans ölçütlerini birlikte değerlendiren çoklu performans yaklaşımlarından oluşmaktadır. Bu tür çalışmalar, üretim parametreleri ile farklı performans ölçütlerinin aynı tasarım süreci içinde ilişkilendirilebileceğini göstermesi bakımından önem taşımaktadır (Cheibas vd., 2024). Ancak bu yaklaşımlarda malzeme bilgisi çoğunlukla üretim performansını tanımlayan veya doğrulayan bir veri alanı olarak kalmakta; malzeme reçetesinden türetilen kısıtların hesaplamalı geometri üretimini doğrudan sınırlandıran tasarım parametrelerine dönüştürülmesi sınırlı biçimde ele alınmaktadır. Bu nedenle kil-tabanlı 3B baskı bağlamında, malzeme kaynaklı üretim kısıtlarının hesaplamalı kabuk geometrisi, çevresel performans analizi ve evrimsel optimizasyon süreciyle aynı yöntemsel akış içinde ilişkilendirildiği çalışmalara ihtiyaç bulunmaktadır.

Bu çalışma, kil-tabanlı 3B baskı için tanımlanan üretim gerekliliklerini performatif çevresel tasarım süreciyle bütünleştiren bir metodolojik çerçeve önermektedir. Çalışma kapsamında, literatürden derlenen kil-tabanlı reçete verileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş ve seçilen reçeteden minimum kesit kalınlığı, açıklık boyutu ve maksimum eğim sınırı gibi üretim kısıtları türetilmiştir. Bu kısıtlar, altıgen açıklıklardan oluşan hesaplamalı bir kabuk modelinin geometrik parametrelerine aktarılmıştır. Önerilen metodoloji, Avanos, Nevşehir bağlamında yaz koşulları altında gün ışığı, güneş radyasyonu ve gün ışığına bağlı konfor göstergeleri üzerinden değerlendirilmiş; farklı geometrik varyasyonlar tek hedefli evrimsel optimizasyon süreci aracılığıyla karşılaştırılmıştır. Çalışmanın katkısı malzeme reçetesinden gelen üretim bilgisini, hesaplamalı geometri üretimi ve çevresel performans değerlendirmesini aynı süreç içinde ilişkilendiren aktarılabilir bir iş akışı önermesidir.

2. Metodoloji

Önerilen metodoloji, kil-tabanlı 3B baskı bağlamında malzeme, geometri ve çevresel performans arasındaki ilişkinin hesaplamalı tasarım süreci içinde kurulmasına odaklanmaktadır. Bu doğrultuda çalışma, reçete verilerinden hareketle tanımlanan üretim kısıtlarının hesaplamalı kabuk modeline aktarılması ve bu modelin çevresel performans analizleriyle birlikte değerlendirilmesi üzerine yapılandırılmıştır.

Çalışma akışı, birbirini izleyen ve belirli noktalarda geri besleme ilişkisi kuran dört temel aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, literatürde yer alan kil-tabanlı 3B baskı reçeteleri taranmış, üretim davranışına ilişkin veri içeren çalışmalar değerlendirilmiş ve çalışma kapsamında kullanılacak reçete belirlenmiştir. İkinci aşamada, seçilen reçeteden hareketle minimum kesit kalınlığı, açıklık boyutu ve maksimum eğim gibi üretim kısıtları hesaplanmış ya da sınır koşulu olarak tanımlanmış ve bu kısıtlar hesaplamalı kabuk geometrisinin parametre aralıklarına aktarılmıştır. Üçüncü aşamada, Rhino/Grasshopper ortamında altıgen açıklıklardan oluşan sürekli bir kabuk geometrisi oluşturulmuş ve model Avanos bağlamında gün ışığı, güneş radyasyonu ve konfor alanı ölçütleri üzerinden analiz edilmiştir. Son aşamada, analiz sonuçları doğrultusunda evrimsel optimizasyon süreci yürütülmüş, elde edilen kabuk formu üretilebilirlik kontrollerinden geçirilmiş ve sınırlı ölçekli fiziksel prototipler aracılığıyla değerlendirilmiştir. Önerilen iş akışı Şekil 1’de gösterilmektedir.



Şekil 1. Önerilen hesaplamalı tasarım metodolojisinin iş akışı diyagramı

2.1. Reçete Veri Seti ve Üretim Kısıtlarının Tanımlanması

Bu bölümde, çalışmada kullanılacak kil-tabanlı reçete verilerinin nasıl seçildiği ve bu verilerin hesaplamalı kabuk modelinde kullanılacak üretim kısıtlarına nasıl dönüştürüldüğü açıklanmaktadır. Bu doğrultuda önce literatür tabanlı bir reçete veri seti oluşturulmuş, ardından seçilen reçete ve yerel malzeme verileri üzerinden minimum kesit kalınlığı, açıklık boyutu ve maksimum eğim sınırı gibi üretim kısıtları tanımlanmıştır. Böylece reçete verisi, yalnızca malzeme içeriğini tanımlayan bir bilgi olarak değil, hesaplamalı kabuk modelinin geometrik sınırlarını belirleyen bir tasarım girdisi olarak ele alınmıştır.

2.1.1. Literatür Taraması ve Reçete Veri Setinin Oluşturulması

Çalışmada kullanılacak malzeme yaklaşımının belirlenmesi amacıyla, kil-tabanlı 3B baskı malzemelerini mimari üretim, ışık geçirgenliği ve üretim davranışı bağlamında ele alan çalışmalar incelenmiştir. Bu incelemede, yalnızca malzeme karışımı bilgisi sunan çalışmalar değil, malzeme özellikleri ile geometrik kararlar arasında ilişki kuran araştırmalar önceliklendirilmiştir. Bu değerlendirme sonucunda Dong vd. (2022) çalışması, kil/seramik tabanlı malzeme gövdelerinde kalınlık, açıklık geometrisi, ışık geçirgenliği ve yüzey yansıtıcılığı arasındaki ilişkiyi ele alması nedeniyle

hesaplamalı kabuk modeli için referans olarak belirlenmiştir. Söz konusu çalışmada feldspatın ışık geçirgenliği ve yüzeyin ışıkla kurduğu ilişki açısından önemli bir bileşen olarak değerlendirilmesi, bu çalışmadaki malzeme yaklaşımını yönlendirmiştir. Fiziksel prototip aşamasında Avanos kili temel alınmış; feldspat, ışık geçirgenliğiyle ilişkisi nedeniyle, sınırlı oranda eklenen alüminyum oksit (Al_2O_3) ise kil karışımının yüzey karakteri, karışım bütünlüğü ve şekil koruma davranışını destekleyen bir bileşen olarak değerlendirilmiştir.

Böylece DON-01, birebir aktarılan kapalı bir reçete olarak değil, Avanos kiliyle ilişkilendirilen ve üretim kısıtlarının hesaplamalı modele aktarılmasını destekleyen referans bir malzeme yaklaşımı olarak ele alınmıştır.

2.1.2. Üretim Kısıtlarının Belirlenmesi

Bu bölümde, seçilen malzeme yaklaşımının hesaplamalı kabuk modeline nasıl üretim kısıtı olarak aktarıldığı açıklanmaktadır. Üretim kısıtları, minimum kesit kalınlığı, maksimum eğim sınırı ve açıklık boyutu olmak üzere üç temel parametre üzerinden tanımlanmıştır. Bu parametrelerin belirlenmesinde, Avanos kilinin malzeme özellikleri ile literatürden alınan üretilebilirlik kabulleri birlikte değerlendirilmiştir. Avanos kiline ait kimyasal içerik Tablo 1’de verilmiştir (Abdulli, 2023). Tabloda verilen oksit yüzdeleri, kil numunesinin kimyasal bileşimini; kızdırma kaybı, ısıtma sırasında uzaklaşan uçucu bileşenleri; doğal nem ise numunenin mevcut su içeriğini ifade etmektedir.

Tablo 1: Kullanılan Avanos Kili Malzeme İçeriği (Abdulli, 2023).

Oksit %	Fe_2O_3	CaO	SiO_2	K_2O	Cl	CuO	TiO_2	SO_3	Mn O	Al_2O_3
	13,83	24,50	31,31	2,01	0,00	0,07	0,98	0,65	0,17	8,35
Kızdırma kaybı	%18,13									
Doğal Nem	%3,67									

Minimum kesit kalınlığı, nozul çapı, güvenli kesit katsayısı ve doğrusal büzülme kabulü birlikte değerlendirilerek hesaplanmıştır. Malzeme ekstrüzyonunda kesit genişliğinin nozul çapıyla ilişkili olduğu ve tipik olarak nozul çapının 2–3 katı aralığında ele alındığı belirtilmektedir (Skills4AM, 2021). Kil-tabanlı ekstrüzyon üretiminde ise nozul çapı, katman yüksekliği, şekil koruma ve kuruma davranışının üretilebilirlik üzerinde birlikte etkili olduğu vurgulanmaktadır (Hu vd., 2021). Bu doğrultuda çalışmada modelde korunması gereken minimum kesit kalınlığı Denklem (1) ile hesaplanmıştır.

$$T_{min} = (k \cdot d_n) / (1 - \beta) \quad (1)$$

Denklemde k, nozul çapına bağlı güvenli kesit katsayısını; d_n , kabul edilen nozul çapını; β ise doğrusal büzülme oranını ifade etmektedir. k, basılan kesitin nozul çapının kaç katı genişlikte korunacağını belirleyen üretilebilirlik katsayısıdır. Avanos kiline ait kimyasal içerikte Fe_2O_3 oranının yüksek olması, malzemenin kırmızı/toprak karakterli kil gövdelerine yakın değerlendirilmesini desteklemektedir. Kırmızı kil üzerine yapılan karakterizasyon çalışmalarında toplam doğrusal büzülmenin yaklaşık %12 seviyesine ulaşabildiği belirtildiğinden, bu çalışmada $\beta = 0.12$ kabul edilmiştir (Gu & Ling, 2024). Maksimum eğim sınırı, kabuk yüzeyinin katmanlı üretim açısından alt katman tarafından yeterince taşınmayan eğimli bölgelere dönüşmesini engellemek amacıyla tanımlanmıştır. Malzeme ekstrüzyonlu eklemeli üretimde ardışık katmanların birbirine tutunmasının yaklaşık 45° maksimum eğime kadar sağlanabildiği belirtilmektedir (Vicente, 2022). Bu doğrultuda çalışmada $S_{max} = 45^\circ$, Avanos kili için deneysel olarak doğrulanmış kesin bir sınır olarak değil, literatürdeki destek gereksinimi eşiğine dayalı hesaplamalı üretilebilirlik kabulü olarak ele alınmıştır. Yerel yüzey eğimi, yüzey normali ile düşey baskı yönü arasındaki ilişki üzerinden tanımlanmış ve Denklem (2)’de verilen koşul üretilebilirlik sınırı olarak kullanılmıştır.

$$\alpha(x) \leq S_{\max} \quad (2)$$

Denklemden $\alpha(x)$, kabuk yüzeyindeki yerel eğim açısını; $S_{\max}$ ise kabul edilen maksimum eğim sınırını ifade etmektedir.

Açıklık boyutu, minimum kesit kalınlığı ile doğrudan ilişkilendirilmiştir. Altıgen açıklık sistemi için açıklık oranı, boşluk alanının hücre alanına oranı olarak tanımlanmıştır. Düzenli altıgen alan ilişkisi kullanılarak açıklık kenar uzunluğu ile hücre kenar uzunluğu arasındaki oran hesaplanmış, ardından açıklık çevresinde kalan malzeme genişliğinin $T_{\min}$ değerinin altına düşmemesi koşulu uygulanmıştır. Bu amaçla kalan malzeme genişliği Denklem (3)'te gösterildiği şekilde değerlendirilmiş ve $b \geq T_{\min}$ koşulu açıklık boyutunu sınırlayan temel üretilebilirlik kontrolü olarak kullanılmıştır.

$$b = (\sqrt{3} / 2) \cdot (L_c - L_a) \geq T_{\min} \quad (3)$$

Burada b , açıklık çevresinde kalan malzeme genişliğini; L_c , dış altıgen hücre kenar uzunluğunu; L_a ise açıklık altıgeninin kenar uzunluğunu ifade etmektedir. Böylece açıklık boyutu yalnızca çevresel performans hedeflerine göre değil, aynı zamanda üretim sırasında korunması gereken minimum malzeme genişliğine göre de sınırlandırılmıştır. Üretim kısıtlarının hesaplamalı modele aktarımı Tablo 2'de özetlenmektedir.

Tablo 2: Üretim kısıtları ve hesaplamalı modeldeki karşılıkları.

Kısıt	Hesaplama / kontrol	Dayanak	Modeldeki karşılığı
Minimum kesit kalınlığı ($T_{\min}$)	$T_{\min} = (k \cdot d_n) / (1 - \beta)$	Nozul çapı-kesit kalınlığı ilişkisi ve doğrusal büzülme kabulü	Kabuk kalınlığı alt sınırı
Maksimum eğim ($S_{\max}$)	$\alpha(x) \leq S_{\max}$	Desteksiz çıkıntı/eğim üretilebilirliği	Yüzey eğimi üst sınırı
Açıklık boyutu (A)	$b = (\sqrt{3} / 2) \cdot (L_c - L_a) \geq T_{\min}$	Açık alan oranı, altıgen geometri ve minimum kesit kalınlığı koşulu	Altıgen açıklık boyutu sınırı

2.2. Hesaplamalı Kabuk Geometrisinin Oluşturulması

Hesaplamalı kabuk geometrisi, Rhinoceros/Grasshopper ortamında üretim kısıtları ve çevresel performans ölçütleriyle ilişkilendirilebilecek algoritmik bir model olarak geliştirilmiştir. Model, sürekli bir kabuk yüzeyi ve bu yüzey üzerinde tanımlanan altıgen açıklık sisteminden oluşmaktadır. Kabuk yüzeyi, formun genel yüksekliği, yayılımı, eğrilik dağılımı ve yönlenmesi gibi geometrik kararların farklı değerler üzerinden kontrol edilebilmesine olanak verecek şekilde kurgulanmıştır.

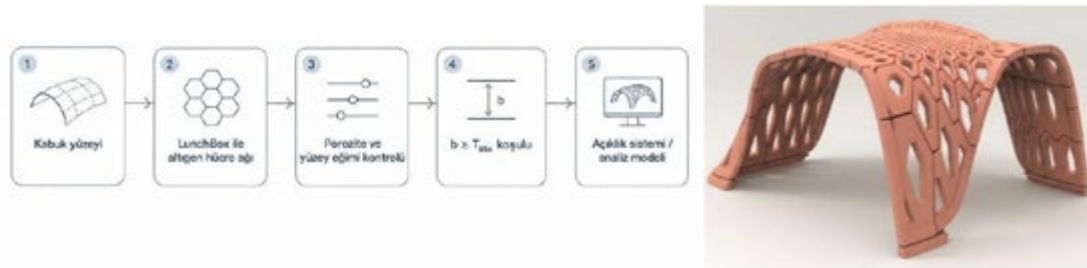
Kabuk geometrisinin oluşturulmasında iki temel ilişki dikkate alınmıştır. İlk ilişki, kabuğun genel formunu belirleyen yüzey parametreleriyle ilgilidir. Bu kapsamda kabuk yüksekliği, formun yatay yayılımı, eğrilik davranışı ve yönlenme açısı modelin ana geometrik değişkenleri olarak tanımlanmıştır. İkinci ilişki ise yüzey üzerindeki açıklık sistemine aittir. Altıgen açıklık sistemi, Grasshopper ortamında LunchBox eklentisi kullanılarak kabuk yüzeyine atanan hücre örüntüsü üzerinden oluşturulmuştur. Bu süreçte yüzey, tekrar eden altıgen hücrelere bölünmüş; her hücredeki açıklık boyutu, porozite parametresi, bulunduğu yüzeyin eğimi ve $b \geq T_{\min}$ koşulu dikkate alınarak değişken biçimde tanımlanmıştır. Böylece açıklık boyutu ve açıklık yoğunluğu, yalnızca biçimsel bir örüntü olarak değil, kabuğun ışık geçirgenliği, gölge üretimi ve radyasyon kontrolü üzerinde etkili olan geometrik parametreler olarak değerlendirilmiştir.

2.1.2 bölümünde tanımlanan üretim kısıtları, hesaplamalı modelin parametre aralıklarına doğrudan aktarılmıştır. Minimum kesit kalınlığı (T_{min}), kabuk kalınlığının alt sınırını; maksimum eğim sınırı (S_{max}), kabuk yüzeyinin üretilebilir kabul edilen eğim aralığını; açıklık boyutu ise altıgen açıklıkların çevresinde kalan malzeme genişliğinin T_{min} değerinin altına düşmemesi koşulunu tanımlamıştır. Bu yapı sayesinde üretim kısıtları, modelin sonunda kontrol edilen bağımsız teknik veriler olarak değil, geometrinin oluşum sürecine dâhil edilen sınır koşulları olarak çalışmıştır. Hesaplamalı modelde kullanılan temel parametreler ve bu parametrelere ait değer/aralıklar Tablo 3'te özetlenmektedir.

Tablo 3: Hesaplamalı kabuk modelinde kullanılan temel parametreler.

Parametre	Tanım	Değer / aralık	Modeldeki rolü
Çalışma alanı	Kabuk geometrisinin oturduğu taban alanı	5.00 × 4.00 m	Kabuk yayılımı ve form sınırı
Kabuk yüksekliği	Kabuk formunun düşey gelişimi	2.40–3.00 m	Genel form yüksekliği
Yönlenme açısı	Kabuğun güneşe göre dönme açısı	–90° / +90°	Güneş radyasyonu ve gölge dağılımı
Eğrilik aralığı	Kabuk yüzeyinin form eğriliği	5°–45°	Yüzey formunun değişkenliği
Geometrik porozite	Açıklık alanının hücre alanına oranı	%15–45; seçilen: %20	Açıklık yoğunluğu ve ışık geçirgenliği
Altıgen hücre ve açıklık boyutu	Dış hücre ve iç açıklık boyutu	L_c ve L_a değişken	Açıklık sistemi ve boşluk oranı
Kesit kalınlığı	Üretilebilirlik için minimum sınır ve seçilen değer	$T_{min} = 9.1$ mm; $T = 13.2$ mm	Malzeme sürekliliği ve kabuk kalınlığı
Yüzey eğimi	Üretilebilir kabul edilen üst sınır ve seçilen formdaki değer	$S_{max} = 45^\circ$; $\alpha_{max} = 31.6^\circ$	Katmanlı üretim ve yüzey eğimi kontrolü

Altıgen açıklık sistemi, kabuk yüzeyi üzerinde düzenli fakat değiştirilebilir bir geçirgenlik örüntüsü oluşturmak amacıyla kullanılmıştır. Açıklıkların boyutu ve yoğunluğu, çevresel performans analizlerinde güneş radyasyonu, gün ışığı ve konfor alanı üzerinde etkili olan temel geometrik kararlar olarak ele alınmıştır. Kabuk geometrisi ve açıklık sisteminin genel kurgusu Şekil 2'de gösterilmektedir.



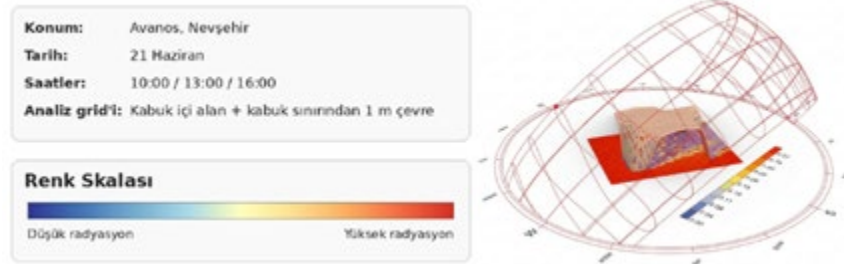
Şekil 2: Kabuk geometrisi diyagramı ve yüzeye atanan açıklıklar.

Bu nedenle hesaplamalı kabuk modeli, yalnızca çevresel performans hedeflerine göre biçimlenen bir yüzey olarak değil, kil-tabanlı üretim sürecinden türetilen geometrik sınırlar doğrultusunda tanımlanan bir tasarım sistemi olarak değerlendirilmiştir.

2.3. Çevresel Performans Analizleri ve Optimizasyon Süreci

Çevresel performans analizleri ve optimizasyon süreci üç aşamada yürütülmüştür. İlk aşamada, kabuk geometrisinin güneş radyasyonu, gölge dağılımı ve gün ışığına bağlı konfor alanı üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. İkinci aşamada, optimizasyonda kullanılacak açıklık yoğunluğu aralığını belirlemek amacıyla porozite ön kalibrasyonu yapılmıştır. Son aşamada ise güneş radyasyonu değerlerini azaltmayı ve gün ışığına bağlı konfor aralığında kalan analiz alanı oranını artırmayı birlikte değerlendiren tek hedefli bir optimizasyon süreci yürütülmüştür.

Analizler Avanos (Nevşehir) bağlamında, 21 Haziran yaz dönemi güneş koşullarını temsil eden 10:00, 13:00 ve 16:00 saatleri için gerçekleştirilmiştir. Bu saatler, gün içinde güneş konumunun değişimine bağlı olarak kabuk formunun farklı yönlerden gelen ışınlam ve gölgelenme etkilerine verdiği yanıtı değerlendirmek amacıyla seçilmiştir. Analiz grid'i, kabuk içi alanı ve kabuk sınırlarından dışa doğru 1 m çevresini kapsayacak şekilde tanımlanmıştır. Analiz sürecinde Ladybug araçları güneş radyasyonu ve gölge dağılımının hızlı değerlendirilmesi için kullanılmış, Honeybee araçları ise gün ışığına bağlı konfor alanı değerlendirmelerinde kullanılmıştır. Şekil 3'te, Avanos bağlamında 21 Haziran için kurulan solar radyasyon analizi, güneş yolu, analiz grid'i ve düşük-yüksek radyasyon değerlerini gösteren renk skalası ile birlikte gösterilmektedir.



Şekil 3: Solar radyasyon analizi kurulumu.

Gün ışığına bağlı konfor değerlendirmesinde, Yararlı Gün Işığı Aydınlığı (Useful Daylight Illuminance: UDI) yaklaşımı esas alınmıştır. UDI, belirlenen aydınlık eşiklerine göre gün ışığı koşullarının yetersiz, kullanılabilir ve aşırı aydınlık düzeyleri içinde değerlendirilmesini sağlayan bir metriktir. Gün ışığı çalışmalarında 300–3000 lux aralığı, kullanıcılar tarafından çoğunlukla istenen ya da tolere edilebilir aydınlık düzeyi olarak değerlendirilmektedir (Mardaljevic, 2011). Bu doğrultuda analiz gridindeki hücreler 300–3000 lux aralığına göre sınıflandırılmıştır. Bu aralığın altında kalan hücreler “yetersiz aydınlık alanı” (under), aralık içinde kalan hücreler “konfor aralığı alanı” (konfor), aralığın üstünde kalan hücreler ise “aşırı aydınlık alanı” (over) olarak tanımlanmıştır.

Gün ışığına bağlı konfor analizlerinde yalnızca kabuk geometrisi ve açıklık oranı değil, seçilen reçeteye bağlı yüzey özellikleri de dikkate alınmıştır. Bu kapsamda malzeme yüzeyi için albedo, geçirgenlik, aynasal yansıtıcılık ve yüzey pürüzlülüğü değerleri tanımlanmış, bu değerler GH Honeybee ortamında analiz modeline aktarılmıştır. Böylece belirli tarih ve saatlere ait gün ışığı analizleri, analiz gridindeki aydınlık düzeylerini hesaplayan ve geometrik açıklık düzeni ile malzeme yüzeyinin ışığı yansıtma ve geçirme davranışını birlikte değerlendiren bir analiz adımı olarak kullanılmıştır.

Optimizasyon öncesinde, açıklık oranının performans üzerindeki etkisini görmek ve optimizasyonda kullanılacak porozite aralığını belirlemek amacıyla porozite ön kalibrasyonu yapılmıştır. Bu aşamada kabuk formu, yönlenme ve malzeme yüzey özellikleri sabit tutulmuş; yalnızca altıgen açıklık boyutu parametresi değiştirilmiştir. Geometrik porozite, açıklık alanının hücre alanına oranı olarak tanımlanmış ve %15–45 aralığında %5'lik artışlarla taranmıştır. Her porozite adımında açıklık boyutu yeniden ayarlanmış, ardından 10:00, 13:00 ve 16:00 saatleri için gün ışığı analizi yürütülmüştür. Bu analizlerde her grid hücresi yetersiz aydınlık, konfor aralığı veya aşırı aydınlık sınıflarından birine atanmış; ardından bu sınıfların toplam analiz alanı içindeki oranları hesaplanmıştır. Her porozite

değeri için üç farklı saate ait analizler yürütülmüş ve bu saatlerden elde edilen ortalama değerler Tablo 4'te özetlenmiştir. Elde edilen ortalama değerler, optimizasyon sürecinde kullanılacak açıklık yoğunluğu yoğunluğu aralığının belirlenmesine temel oluşturmuştur.

Tablo 4: Porozite ön kalibrasyonu ortalama değerleri.

Porozite (%)	Açıklık boyutu (L_a)	Konfor aralığı (%)	Yetersiz aydınlık (%)	Aşırı aydınlık (%)
15	0.39	53.80	0.94	45.26
20	0.45	53.46	0.88	45.66
25	0.50	51.90	0.88	47.22
30	0.55	51.16	0.88	47.96
35	0.59	50.19	0.88	48.93
40	0.64	48.98	0.83	50.19
45	0.68	47.94	0.78	51.28

Optimizasyon süreci, Rhino/Grasshopper ortamında Galapagos aracı kullanılarak yürütülmüştür. Bu aşamada kabuk geometrisine ait yükseklik, yönelme, eğrilik dağılımı, açıklık yoğunluğu ve açıklık boyutu gibi parametreler belirlenen sınırlar içinde değerlendirilmiştir. Hedef fonksiyonu, ortalama güneş radyasyonu değerinin azaltılması ve 300–3000 lux aralığında kalan analiz hücre oranının artırılması bileşenlerinden oluşturulmuştur. 2.1.2 bölümünde tanımlanan T_{min} , S_{max} ve açıklık çevresi malzeme genişliği koşulları ise optimizasyon sürecinde üretilebilirlik sınırlarını belirleyen kısıtlar olarak kullanılmıştır. Böylece optimizasyon, yalnızca çevresel performans hedeflerine göre değil, kil-tabanlı üretimden türetilen geometrik sınırlar içinde yürütülmüştür.

2.4. Fiziksel Prototip ve Üretilebilirlik Değerlendirmesi

Hesaplamalı modelden elde edilen kabuk geometrisinin fiziksel üretime aktarılabilirliğini değerlendirmek amacıyla sınırlı ölçekli prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada amaç, kabuk sisteminin tam ölçekli yapısal ya da çevresel performans doğrulamasını yapmak değil, hesaplamalı modelde tanımlanan modül geometrisinin, açıklık sisteminin ve malzeme sürekliliğinin kil-tabanlı 3B baskı sürecinde nasıl karşılık bulduğunu gözlemlemektir. Bu nedenle prototip üretimi, önerilen metodolojinin fiziksel üretimle ilişkisini sınavan bir ön değerlendirme olarak ele alınmıştır.

Yazıcı olanakları ve üretim süresi dikkate alınarak prototipler 1/2 ölçekte ve sınırlı sayıda modül olacak şekilde üretilmiştir. Malzeme karışımında yerel malzeme bağlamını korumak amacıyla Avanos kili esas alınmıştır. Feldspat, ışık geçirgenliğiyle ilişkisi nedeniyle; sınırlı oranda eklenen alüminyum oksit (Al_2O_3) ise kil karışımının yüzey karakteri, karışım bütünlüğü ve şekil koruma davranışını destekleyen bir bileşen olarak değerlendirilmiştir. Üretim sürecinde özel G-code oluşturulmuş, baskı yolu optimize edilmiş ve kilin yaklaşık %10 doğrusal çekme davranışı dikkate alınarak model 1.11 oranında ölçeklendirilmiştir. Sayısal modelden G-code üretime, baskı parametrelerine ve üretilen prototip modüllere ilişkin süreç Şekil 4'te gösterilmektedir.



Şekil 4: 3B baskı süreci ve üretilen prototip modüller.

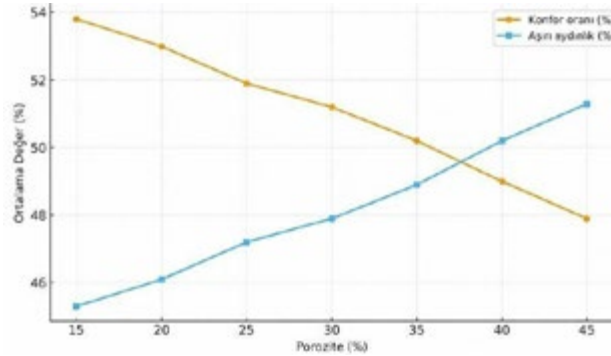
Üretilen prototipler, kil-tabanlı 3B baskının tüm ölçek ve performans koşullarını doğrulayan nihai çıktılar olarak değil, hesaplamalı kabuk geometrisinin malzeme ve üretim süreciyle ilişkisini görünür kılan sınırlı ölçekli üretim denemeleri olarak değerlendirilmiştir. Bu aşama, önerilen iş akışının sayısal modelden fiziksel üretime aktarılabilirliğini göstermesi bakımından metodolojinin tamamlayıcı adımı olarak ele alınmıştır.

3. Bulgular ve Değerlendirme

Bu bölümde, hesaplamalı kabuk modeline ilişkin porozite ön kalibrasyonu, çevresel performans sonuçları ve üretilebilirlik değerlendirmesinden elde edilen bulgular ele alınmaktadır. Bulgular, yalnızca gün ışığına bağlı konfor oranları üzerinden değil, aynı zamanda açıklık yoğunluğu, malzeme yüzey özellikleri ve üretim kısıtlarıyla birlikte değerlendirilmiştir. Bu çerçevede seçilen kabuk geometrisinin performans davranışı, analiz gridindeki yetersiz aydınlık alanı, konfor aralığı alanı ve aşırı aydınlık alanı oranları üzerinden incelenmiştir.

3.1. Porozite Ön Kalibrasyonu ve Performans Eğilimleri

2.3 bölümünde açıklanan porozite ön kalibrasyonu sonuçları, açıklık oranının gün ışığına bağlı konfor üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu göstermektedir. Bu değerlendirmede yetersiz aydınlık, konfor aralığı ve aşırı aydınlık oranları, tekil bir modül üzerinden değil, kabuk içi alanı ve kabuk sınırından 1 m çevresini kapsayan analiz gridindeki hücrelerin toplam oranı üzerinden hesaplanmıştır. Şekil 5'te görüldüğü üzere, porozite oranındaki artış konfor aralığı ve aşırı aydınlık değerleri üzerinde ters yönlü bir etki oluşturmuştur.



Şekil 5: Porozite–gün ışığı konfor eğrisi.

%15 porozite değerinde üç saatlik ortalama konfor aralığı oranı %53.80 olarak hesaplanırken, aşırı aydınlık oranı %45.26 olarak elde edilmiştir. Porozite %25'e yükseldiğinde konfor aralığı oranı %51.90'a düşmüş, aşırı aydınlık oranı ise %47.22'ye yükselmiştir. %35 porozite değerinde konfor aralığı oranı %50.19, aşırı aydınlık oranı %48.93 olarak hesaplanmıştır. En yüksek porozite değeri olan %45'te ise konfor aralığı oranı %47.94'e düşerken, aşırı aydınlık oranı %51.28'e yükselmiştir. Bu eğilim, porozite artışının altıgen açıklıkların toplam yüzey içindeki boşluk oranını artırmasıyla ilişkilidir. Açıklık oranı yükseldikçe kabuk yüzeyinden geçen ışık miktarı artmakta, buna bağlı olarak analiz gridinde 3000 lux üzerindeki aşırı aydınlık hücrelerinin oranı yükselmektedir.

Bu bulgu, açıklık yoğunluğunun yalnızca geçirgenliği artıran biçimsel bir değişken olarak ele alınamayacağını göstermektedir. Bu nedenle porozite, konfor aralığı ile aşırı aydınlık riski arasında denge kurulmasını gerektiren performans odaklı bir geometrik parametre olarak değerlendirilmiştir. Optimizasyon sürecinde açıklık yoğunluğu, gün ışığına bağlı konfor koşullarını koruyacak aralıklar içinde ele alınmıştır.

3.2. Final Kabuk Formunun Performans Sonuçları

Seçilen kabuk formunun çevresel performansı, 10:00, 13:00 ve 16:00 saatlerine ait güneş radyasyonu ve gün ışığına bağlı konfor oranları üzerinden değerlendirilmiştir. Bu saatler, gün içinde değişen güneş konumlarına karşı kabuk geometrisinin verdiği performans tepkilerini karşılaştırmak amacıyla kullanılmıştır. Elde edilen saatlik performans değerleri Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5: Final kabuk formunun saatlik performans değerleri

Saat	Ortalama yüzey radyasyonu (kWh/m ²)	Konfor aralığı oranı (%)
10:00	0.48	35.16
13:00	0.45	38.00
16:00	0.21	46.91

Tablo 5'te görüldüğü üzere, ortalama yüzey radyasyonu 10:00 için 0.48 kWh/m², 13:00 için 0.45 kWh/m² ve 16:00 için 0.21 kWh/m² olarak hesaplanmıştır. Aynı saatlerde konfor oranları sırasıyla %35.16, %38.00 ve %46.91 olarak elde edilmiştir. Bu değerler, kabuk geometrisinin performansının gün içindeki güneş konumuna bağlı olarak değiştiğini göstermektedir. 10:00 ve 13:00 saatlerinde radyasyon değerleri birbirine yakın seyrederken, 16:00'da radyasyon değeri belirgin biçimde düşmüş ve konfor oranı en yüksek seviyeye ulaşmıştır.

Konfor oranları, 2.3 bölümünde tanımlanan 300–3000 lux yararlı gün ışığı aralığında kalan grid hücrelerini temsil etmektedir. Bu nedenle konfor oranının artması, gün ışığı performansı açısından olumlu bir gösterge olarak değerlendirilmiştir. Buna karşılık ortalama yüzey radyasyonu değerleri, evrensel bir “optimal” eşik üzerinden değil, yaz koşullarında güneş etkisini azaltma hedefi ve seçilen kabuk formunun saatlik performans davranışı üzerinden yorumlanmıştır. Saatlik sonuçlar, kabuk formunun yalnızca sabit bir gölgeleme elemanı olarak değil, güneş konumuna bağlı olarak farklı performans tepkileri üreten bir yüzey sistemi olarak değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Özellikle 16:00'da ortalama yüzey radyasyonunun 0.21 kWh/m²'ye düşmesi ve konfor oranının %46.91'e yükselmesi, düşük güneş açısı koşullarında kabuk geometrisi ve açıklık sisteminin kullanıcı alanındaki gün ışığı dağılımını farklılaştırdığını göstermektedir.

Performans sonuçları yalnızca geometrik biçimlenme ve açıklık oranı üzerinden değerlendirilmemelidir. Honeybee modeline aktarılan albedo, geçirgenlik, aynasal yansıtıcılık ve yüzey pürüzlülüğü değerleri, kabuk yüzeyinin ışığı yansıtma ve geçirme davranışını etkileyen malzeme özellikleri olarak analiz sürecine dâhil edilmiştir. Bu nedenle elde edilen radyasyon ve konfor değerleri, kabuk formu, açıklık düzeni ve malzeme yüzey özelliklerinin birlikte oluşturduğu performans davranışını temsil etmektedir.

Bu bulgu, çalışmanın temel yaklaşımı olan malzeme, geometri ve performans ilişkisinin birlikte ele alınması gerektiğini desteklemektedir. Seçilen kabuk formu, yalnızca çevresel performans değerleri üzerinden değil, 2.1.2 bölümünde tanımlanan T_{min} , S_{max} ve açıklık çevresi malzeme genişliği koşullarıyla birlikte değerlendirilmiştir. Böylece sonuçlar, üretim kısıtlarından bağımsız bir form optimizasyonu olarak değil, kil-tabanlı üretimden türetilen geometrik sınırlar içinde elde edilen performans çıktıları olarak yorumlanmıştır.

3.3. Üretilebilirlik ve Prototip Değerlendirmesi

Seçilen kabuk formu, çevresel performans sonuçlarının yanı sıra üretilebilirlik sınırları açısından da değerlendirilmiştir. Bu kapsamda kabuk kalınlığı, maksimum yerel eğim, geometrik porozite ve açıklık çevresi malzeme sürekliliği değerleri, 2.1.2 bölümünde tanımlanan üretim kısıtlarıyla karşılaştırılmıştır. Seçilen forma ait temel üretilebilirlik değerleri Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6: Üretilirlik değerlendirilmesine ilişkin seçilen form değeri

Değerlendirilen ölçüt	Elde edilen değeri	Kabul / sınır	Değerlendirme
Kabuk kalınlığı (T)	13,2 mm	$T \geq T_{min}$	Uygun aralıkta
Maksimum yerel eğim (α_{max})	31.6°	$S_{max} = 45^\circ$	Sınır altında
Geometrik porozite (P)	%20	Ön kalibrasyon aralığı	Dengeli aralıkta
Açıklık çevresi malzeme sürekliliği	$b \geq T_{min}$	Minimum kesit kalınlığı koşulu	Sağlanmışır

Tablo 6’da görüldüğü üzere, seçilen formda kabuk kalınlığı 13.2 mm olarak belirlenmiş ve bu değeri minimum kesit kalınlığı sınırının üzerinde kalmışır. Maksimum yerel eğim 31.6° olarak hesaplanmış ve $S_{max} = 45^\circ$ sınırını aşmamışır. Geometrik porozite ise %20 olarak belirlenmişır. Bu değeri, 3.1 bölümünde sunulan porozite ön kalibrasyonu sonuçlarıyla birlikte değerlendirildiğinde, gün ışığı konforu ve aşırı aydınlık riski arasında kontrollü bir aralıkta yer almaktadır.

Bu bulgular, seçilen kabuk geometrisinin yalnızca çevresel performans sonuçlarına göre değil, üretim kısıtlarıyla birlikte değerlendirildiğinde de tutarlı bir sonuç verdiğini göstermektedir. Kabuk kalınlığı ve eğim değeriinin tanımlanan sınırlar içinde kalması, formun kil-tabanlı üretim mantığıyla uyumlu bir geometrik aralıkta geliştiğini ortaya koymaktadır. Açıklık sisteminin %20 porozite üzerinden kurgulanması ise açıklık oranının performans hedefleriyle ilişkili olarak seçildiğini, ancak malzeme sürekliliğini zayıflatacak yüksek açıklık oranlarına taşınmadığını göstermektedir.

Fiziksel prototip aşaması, bu ilişkinin sınırlı ölçekte üretime aktarılabilirliğini destekleyen ön üretim çıktısı olarak değerlendirilmiştir. Bu nedenle üretilebilirlik değerlendirmesi, tam ölçekli yapısal ya da çevresel doğrulama iddiası taşımamakta, ancak önerilen metodolojinin sayısal modelden fiziksel üretime geçiş potansiyelini göstermektedir.

4. Sonuçlar

Bu çalışma, kil-tabanlı 3B baskı bağlamında malzeme bilgisi, hesaplamalı kabuk geometrisi ve çevresel performans analizlerini birlikte ele alan bir metodolojik çerçeve önermektedir. Çalışmanın temel katkısı, malzeme verilerinden türetilen üretim kısıtlarının tasarım sürecinin sonunda kontrol edilen teknik veriler olarak değil, kabuk geometrisinin oluşumunu tasarım sürecinin başından itibaren yönlendiren sınır koşulları olarak ele almasıdır.

Elde edilen sonuçlar, açıklık oranı, yüzey eğimi, minimum kesit kalınlığı ve malzeme yüzey özelliklerinin kabuk performansını birlikte etkilediğini göstermektedir. Bu nedenle önerilen yaklaşım, kil-tabanlı üretimde reçete, üretim kısıtı, açıklık geometrisi ve çevresel performans arasındaki ilişkinin hesaplamalı tasarım süreci içinde birlikte değerlendirilebileceğini ortaya koymaktadır.

Çalışma, tam ölçekli yapısal doğrulama ya da kapsamlı fiziksel malzeme testi sunmamaktadır. Prototip üretimi sınırlı ölçekte ele alınmış ve yöntemin fiziksel üretime aktarılabilirliğini gözlemlemeye yönelik bir ön değerlendirme olarak konumlandırılmışır. Gelecek çalışmalarda farklı kil reçetelerinin fiziksel testlerle karşılaştırılması, üretim parametrelerinin deneysel olarak doğrulanması ve yöntemin tam ölçekli kabuk sistemleri üzerinde sınanması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Abdulli, İ. (2023). *Report on the submitted sample* (Report No. 46232573). Çukurova University, Faculty of Engineering, Department of Mining Engineering. Unpublished report.
- Cheibas, I., Perez Gamote, R., Lloret-Fritschi, E., Arnold, K., Luible, A., Gramazio, F., & Kohler, M. (2024). 3D printing of a multi-performative building envelope: Assessment of air permeability, water tightness, wind loads, and impact resistance. *Journal of Building Engineering*, 98, Article 111251. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.111251>

- Dong, S., Yan, J., Yang, S., & Cui, X. (2022). Light transmittance ceramic design-computation with robotics. In *SIGraDi 2022: Critical Appropriations* (pp. 515–526). Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. https://www.researchgate.net/publication/365668639_Light_Transmittance_Ceramic_Design-Computation_with_Robotics
- Ekici, B., Cubukcuoglu, C., Turrin, M., & Sariyildiz, I. S. (2019). Performative computational architecture using swarm and evolutionary optimisation: A review. *Building and Environment*, 147, 356–371. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.10.023>
- Faleschini, F., Trento, D., Masoomi, M., Pellegrino, C., & Zanini, M. A. (2023). Sustainable mixes for 3D printing of earth-based constructions. *Construction and Building Materials*, 398, Article 132496. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132496>
- Gu, X., & Ling, Y. (2024). Characterization and properties of Chinese red clay for use as ceramic and construction materials. *Science Progress*, 107(1). <https://doi.org/10.1177/00368504241232534>
- Hu, F., Mikolajczyk, T., Pimenov, D. Y., & Gupta, M. K. (2021). Extrusion-based 3D printing of ceramic pastes: Mathematical modeling and in situ shaping retention approach. *Materials*, 14(5), Article 1137. <https://doi.org/10.3390/ma14051137>
- Mardaljevic, J. (2011). *Daylight, indoor illumination, and human behavior*. International Energy Agency Solar Heating and Cooling Programme, Task 50. <https://infoscience.epfl.ch/entities/publication/4557cabd-ac0f-42e0-87d2-cc3406fde1a1>
- Skills4AM. (2021). *Design for material extrusion*. <https://www.skills4am.eu/documents/CU/68/Design%20for%20Material%20Extrusion.pdf>
- Sochůrková, P., Devyatkina, S., Kordová, S., Vaško, I., & Tsikoliya, S. (2024). Bioreceptive parameters for additive manufacturing of clay based composites. In *Proceedings of the 42nd eCAADe Conference, Volume 1: Data-Driven Intelligence* (pp. 45–54).
- Şen Bayram, A. K., & Cantürk Akyıldız, E. (2024). Clay 3D printing: Exploring the interrelations of materials and techniques. *Journal of Design for Resilience in Architecture and Planning*, 5(3), 134–154. <https://doi.org/10.47818/DRArch.2024.v5i3134>
- Vicente, J. (2022). *Analysis to support design for additive manufacturing*. Universitat Politècnica de València. <https://riunet.upv.es/server/api/core/bitstreams/fd6d29e0-7684-40aa-b21a-95523c341561/content>

3B Beton Baskı ile Afet Sonrası Barınma: Algoritmik Yerleşim Önerisi

Sena Nur İMİR¹ ; Togan TONG² 

¹Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi; ²Yıldız Teknik Üniversitesi

¹sena.nur.imir@msgsu.edu.tr; ²togantong@yahoo.com

Özet

Afet sonrası acil barınma ihtiyacının hızlı ve nitelikli karşılanması kriz yönetiminin temel önceliklerinden biridir. Mevcut uygulamalardaki geleneksel konteyner sistemleri; lojistik maliyetleri, uzun kurulum süreleri ve mekânsal verimsizlikleri nedeniyle büyük afetlerde yetersiz kalmaktadır. Bu bağlamda, üç boyutlu beton baskı teknolojisi, hızlı üretim kapasitesi ve esnekliğiyle yenilikçi bir alternatif oluşturmaktadır. Bu çalışmanın amacı, 3B yazıcı teknolojilerinin afet sonrası geçici barınma alanlarındaki mekânsal performansını ve üretim verimliliğini maksimize edecek hesaplamalı bir karar destek modeli geliştirmektir. Araştırma kapsamında Rhinoceros ve Grasshopper yazılımlarıyla 10956 m²'lik teorik bir arazi üzerinde parametrik yerleşim ve üretim optimizasyonu modeli kurgulanmıştır. Üç aşamalı kurgunun ilk etabında AFAD standartlarına uygun 21 m²'lik geleneksel konteyner birimlerin yerleşimi simüle edilmiştir. İkinci etapta aynı alana 3B baskı 21 m²'lik birimler algoritmik olarak yerleştirilmiştir. Bu aşamada iki farklı yazıcı tipinde olan COBOD BOD2 ve KUKA KR QUANTEC yazıcıları kullanılmıştır. Son aşamada yapı üretiminde yaygın iki yazıcı tipi olan portal ve robotik kol sistemlerinin kinematik özellikleri, erişim sınırları ile kurulum süreleri algoritmaya entegre edilmiştir. Böylece minimum makine yer değiştirmesi ile maksimum üretimi sağlayacak optimum istasyon noktaları ve birim üretim süreleri karşılaştırmalı hesaplanmıştır. Bulgulara göre, geleneksel planda araziye 128 birim sığarken, 3B baskı odaklı algoritmik yerleşimle bu sayı 216'ya ulaşmış ve mekânsal kapasite %69 artırılmıştır. Üretim verimliliği analizinde, portal sistemin doğrusal baskı yeteneğiyle yalnızca 3 istasyon gerektirdiği ve birim başına 3 saat 44 dakikalık net üretim süresi sunduğu görülmüştür. Ancak portal sistemin saatler süren ilk kurulum ve söküm dezavantajı operasyonel hızını ciddi şekilde düşürmüştür. Öte yandan, robotik kol sistemi toplam 451 relokasyon gerektirmesine karşın, 1 saatin altındaki hızlı kurulum avantajıyla öne çıkmıştır. Altı makinenin eş zamanlı kullanıldığı senaryoda, robotik kol tüm arazinin üretimini 7 günde tamamlarken, portal sistem 8 günde tamamlayabilmiştir. Sonuç olarak, yüksek relokasyon dezavantajına rağmen robotik kol sistemlerinin aciliyet gerektiren afet senaryolarında kurulum hızı ve esnekliği sayesinde daha verimli olduğu kanıtlanmıştır. Geliştirilen algoritmik model, kriz anlarında karar vericilere zaman, kapasite ve makine seçimi odağında analitik bir dijital rehber sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: 3B Beton Baskı, Afet Sonrası Barınma, Hesaplamalı Tasarım.

Post-Disaster Housing with 3D Concrete Printing: An Algorithmic Settlement Proposal

Sena Nur İMİR¹ ; Togan TONG² 

¹Mimar Sinan Fine Arts University; ²Yıldız Technical University

¹sena.nur.imir@msgsu.edu.tr; ²togantong@yahoo.com

Abstract

One of the main priorities of crisis management is the rapid and high-quality provision of emergency shelter after a disaster. The traditional container systems in current practices are inadequate in major disasters due to logistical costs, long installation times, and spatial inefficiencies. In this context, three-dimensional concrete printing technology, with its rapid production capacity and flexibility, constitutes an innovative alternative. The aim of this study is to develop a computational decision support model that maximises the spatial performance and production efficiency of 3D printing technologies in post-disaster temporary housing areas. Within the scope of the research, a parametric layout and production optimization model has been developed on a theoretical area of 10,956 m² using Rhinoceros and Grasshopper software. In the first stage of the three-phase setup, the placement of 21 m² traditional container units in accordance with AFAD standards was simulated. In the second phase, 3D-printed 21 m² units were algorithmically placed in the same area. At this stage, two different types of printers, the COBOD BOD2 and the KUKA KR QUANTEC, were used. In the final stage, the kinematic properties, access limits, and setup times of the two commonly used printer types in construction, the gantry and robotic arm systems, were integrated into the algorithm. Thus, the optimal station points and unit production times that would provide maximum production with minimum machine relocation have been comparatively calculated. According to the findings, while the traditional layout accommodated 128 units, the 3D printing-focused algorithmic layout increased this number to 216, resulting in a 69% increase in spatial capacity. In the analysis of production efficiency, it was observed that the gantry system, with its linear printing capability, required only 3 stations and provided a net production time of 3 hours and 44 minutes per unit. Nevertheless, the gantry system's operational speed has been substantially diminished by the lengthy initial setup and takedown processes. On the other hand, despite the robotic arm system requiring a total of 451 relocations, it stood out with the advantage of quick setup in under 1 hour. In a scenario where six machines were used simultaneously, the robotic arm completed the production of the entire area in 7 days, while the gantry system was able to complete it in 8 days. In conclusion, despite the high relocation disadvantage, it has been proven that robotic arm systems are more efficient in disaster scenarios requiring urgency due to their installation speed and flexibility. The developed algorithmic model provides decision-makers with an analytical digital guide focused on time, capacity, and machine selection during crisis moments.

Keywords: 3D Concrete Printing, Post-disaster Housing, Computational Design.

1. Giriş

Afet sonrası barınma, doğal veya insan kaynaklı felaketler nedeniyle yerinden edilmiş kişilerin barınma gereksinimlerini karşılamak amacıyla inşa edilen geçici veya kalıcı konutları ifade etmektedir (Mehdizade, 2024). Afet sonrası barınma türleri; acil, geçici, geçiş, aşamalı, çekirdek ve kalıcı barınma olmak üzere altı kategoriye ayrılabilir (IFRC, 2013). Yıkıcı afetlerin ardından hızla ortaya çıkan acil barınma ihtiyacı; geleneksel konteyner sistemleri ile karşılanmak istendiğinde, sağladığı performansa göre yüksek maliyet ve uzun kurulum süreleri nedeniyle kriz yönetiminde yeterli gelmemektedir. Isınma gibi alanlardaki eksikliklerin yanı sıra, mevcut geçici barınma tasarımları genellikle geniş aile yapıları veya mahremiyet beklentileri gibi yerel kültürel pratikleri ve kullanıcı taleplerini karşılamada sıklıkla yetersiz kalmaktadır (Tarakçı, 2025). Bu kısıtlamaların üstesinden gelmek ve afet sonrası yerleşimlerin hızını ve kalitesini artırmak amacıyla yenilikçi yapım yöntemleri araştırılmaktadır. Hızlı üretim avantajıyla 3B yazıcılar bu duruma güçlü bir çözüm sunabilmektedir. Kolay erişilebilir temel hammaddelerin minimum atıkla kullanılması, 3B baskının maliyet düşürücü avantajlarından biridir (Subramanya & Kermanshachi, 2022). 3B beton baskı (3DCP); yapım süreçlerini basitleştirerek, atığı azaltarak ve barınma çözümlerinin daha hızlı özelleştirilmesini kolaylaştırarak afet öncesi ve sonrası uygulamalar için önemli olanaklar sağlamaktadır (Iyoha vd., 2025). 3B baskı ile üretilen konutların dayanıklılığı ve maliyeti, bu teknolojinin konut açığını azaltmak ve afet bölgelerinde acil barınak sağlamak için uygun fiyatlı bir araç olma potansiyelini öne çıkarmaktadır (Kantaros vd., 2024). Nitekim Deksi (2016)'ye göre Yingchuang yazıcısı gibi 3B yazıcılar; bir barınma birimi örneği olarak incelenen evin inşa süresini ortalama 2 saat 30 dakikaya kadar düşürebilmektedir. Büyük çaplı doğal afetlerin ardından geçici barınmaya yönelik acil ve devasa bir ihtiyaç ortaya çıkmaktadır. Prefabrik konteynerler gibi geleneksel yaklaşımlar genellikle kaliteden ziyade niceliğe öncelik vermekte, bu da yetersiz yaşam koşullarına ve lojistik sıkıntılara yol açmaktadır. Bu bağlamda, sunulan bu çalışmada afet sonrası barınmaya bir alternatif olarak robotik 3DCP teknolojisinin potansiyeli incelenmektedir. 'Yenilikçi bir üretim metodu olan 3 boyutlu yazıcılar ile afet sonrası barınmada hızlı üretim mümkün mü?' sorusu araştırmanın temel çıkış noktalarından biri olmuştur. Çalışmanın amacı, 3B yazıcı teknolojilerinin afet sonrası geçici barınma alanlarındaki mekânsal performansını ve üretim verimliliğini maksimize edecek algoritmik bir karar destek modeli geliştirmektir. Bu kapsamda, seçilen 3B yazıcı tiplerinin kinematik verileri üzerinden teorik ortalama süreler hesaplanarak, sistemlerin zamansal performansı karşılaştırmalı olarak analize dahil edilmiştir. Çalışmada tasarlanan arazide eğim %0 olarak kabul edilmiştir ve herhangi bir iklim koşulu göz önüne alınmamıştır.

2. Yöntem

Çalışmada öncelikle modelin kurgusu için proje alanı olarak, 166 m eninde 66 m boyunda 10956 m² alana sahip bir dikdörtgen arazi tasarlanmıştır. Geçici barınma birimi ise 7 metre eninde 3 metre boyunda 21 m² alana sahiptir. Kurgulanan bu model; Rhinoceros-Grasshopper ortamında gerçekleştirilen parametrik veri girişi, algoritmik yerleşim optimizasyonu ve sonuç görselleştirmeden oluşmaktadır. Modelin ilk bölümünde; girilen arazi sınırları ve yönetmelikteki gereklilikler doğrultusunda geleneksel bir konteyner yerleşimi kurgulanarak, arazinin geleneksel olarak yerleştirilen barınma birimi kapasitesi belirlenmektedir. İkinci bölümde ise, 3B beton baskı sistemlerine ait makine kinematikleri algoritmaya değişken olarak tanımlanmış ve barınma birimlerinin mekânsal dizilimi oluşturulmuştur. Modelin asıl odak noktasını oluşturan üçüncü bölümde; kurgulanan bu yerleşim üzerinden en az sayıda makine yer değiştirmesi ile en yüksek üretim kapasitesini sağlayacak optimum makine konumları her iki robot türü için de hesaplanmaktadır. Sonuç kısmında ise algoritmik işlemlerin dökümü yapılarak; farklı makine tiplerine göre elde edilen birim kapasiteleri, istasyon sayıları ve yerleşke dizilimi sayısal ve görsel veri olarak raporlanmaktadır. Model içerisinde hız kapsamında elde edilecek sonuç değerlendirilmesinde kullanılan ortalama üretim süresi, basit matematiksel hesaplama yapılarak elde edilmiştir.

2.1. Kullanılacak Yazıcıların Belirlenmesi

Özellikle büyük projeler için kullanılan 3 veya 4 serbestlik derecesine sahip portal (gantry) robotlar ve 6 veya daha fazla serbestlik derecesine sahip robotik kollar 3B baskıda en yaygın kullanılan robot türleridir (Bos et al., 2016). Bu çalışmada da 3B beton baskı için yaygın olarak kullanılan portal ve robotik kol sistemlerinden yararlanmıştır. Bu robot sistemleri şunlardır:

- I. Sistem A (Gantry): Raylı bir sistem ile X, Y ve Z olmak üzere üç hareket eksenine sahiptir.
- II. Sistem B (Robotik Kol): Toplam 6 eksene sahiptir. X, Y ve Z eksenlerine ek olarak 3 ek eksenle dönebilen robotik kol, daha esnek bir üretim modeli sunar. Robotik kol, şantiyede hareket etmeyi sağlamak için taşınabilir bir platforma monte edilebilir ve portal sistemine göre daha az yer kaplar (Delgado Camacho et al., 2018). Sabit bir merkeze entegre edilmiş robotik kol, dairesel bir yörünge izleyerek baskıyı yerine getirir (Bici & Yunitsyna, 2023).

COBOD BOD2 ve KUKA robot sistemleri özelliklerine göre farklılıklar göstermektedirler (**Tablo 1**).

Tablo 1: İki farklı robot için modelin değişkenleri (COBOD, n.d.; KUKA Deutschland GmbH, 2021)

	COBOD BOD2	KUKA KR QUANTEC
Katman Genişliği	30-300 mm	Net veri bulunamadı
Katman Yüksekliği	5-40 mm	5-50 mm
Yazıcı Kurulum Süresi	4-6 saat	<1 saat
Maksimum Baskı Yüksekliği	8,1 m	3,7 m
Çalışma Genişliği / Ulaşım Mesafesi	14,6 m (Genişlik)	3,9 m çapına kadar
Maksimum Baskı hızı	1000 mm/s	
Sistem	Gantry	Robotik Kol
Hareketlilik	Sabit	Mobil

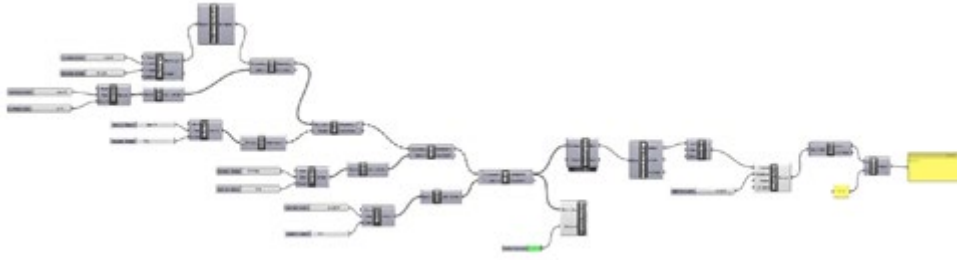
KUKA verilerinde kurulum süresi için bilgi mevcut olmadığından, benzer bir sisteme sahip başka bir robotun verileri kullanıldı. CyBe RC sisteminin kurulum süresi bir saatten azdır (CyBe Construction, 2019). Bu değerler maksimum sınırlar olduğundan, daha optimal ve gerçekçi bir çalışma yürütmek için modelde maksimum değerler yerine optimal değerler seçilmiştir (**Tablo 2**).

Tablo 2: Modelde kullanılmak üzere seçilen optimum robot değerleri

	COBOD BOD2	KUKA KR QUANTEC
Katman Genişliği	50 mm	50 mm
Katman Yüksekliği	30 mm	30 mm
Çalışma Genişliği / Ulaşım Mesafesi	14,6 genişlik + sınırsız uzunluk	3,6 m çapına kadar
Baskı hızı	250 mm/s	250 mm/s

2.2. Konteyner Yerleşiminin Belirlenmesi

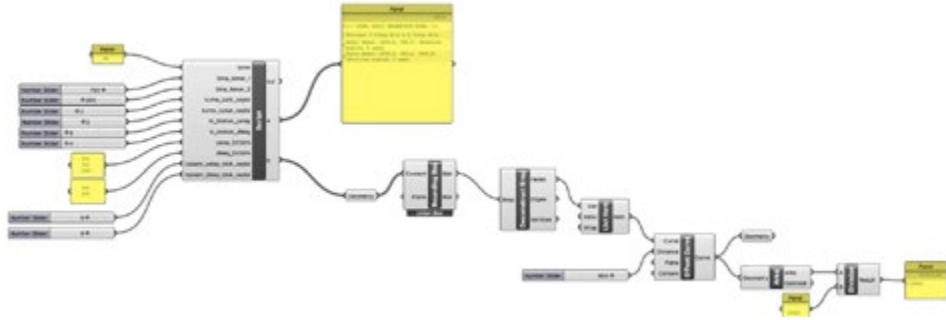
Türkiye bağlamında acil barınma alanlarının kurgulanması ve yönetimine yönelik tüm kriterlerin belirlenmesindeki yetkili merci Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) olarak belirlenmiştir (Bakan, 2025). Grasshopper yardımıyla, geleneksel olarak oluşturulan konteyner ile yerleşim planı için de bu kriterler göz önünde bulundurulmuştur (**Şekil 1**). TMMOB Şehir Plancıları Odası'nın afet sonrası geçici barınma alanı rehberine göre; her birim arası en az 2 metre olmalı, her küme 16 birimden oluşmalı, kümeler arası yol genişliği en az 6 metre olmalı, ara yollar en az 10 metre olmalı, ana yollar en az 15 metre olmalı ve alan sınırı ile en yakın birim mesafesi arası en az 8 metre olmalıdır (TMMOB Şehir Plancıları Odası, 2023).



Şekil 1: Geleneksel konteyner yerleşim senaryosunun Grasshopper yardımıyla oluşturulması

2.3. Üç Boyutlu Yazıcılarla Üretilecek Birimlerin Yerleşimi

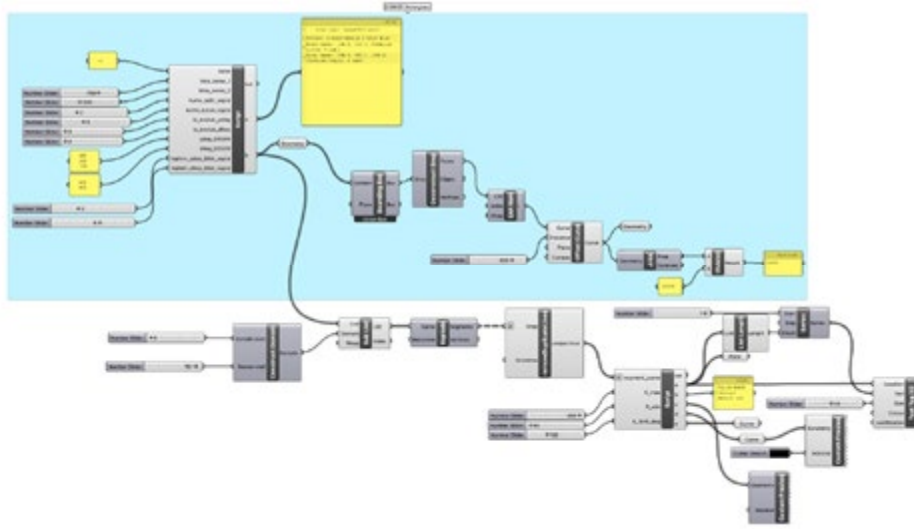
Beton baskı birimler araziye yerleştirilirken henüz mevcut bir yönetmelik olmadığından sirkülasyon sekteye uğramayacak biçimde en uygun seviyede konumlandırılmıştır. Aynı arazi üzerinde seçilen yazıcı tiplerinin teknik özellikleri de göz önünde bulundurularak, seçilen konteyner birimi ölçüsü ile eş büyüklükte birimler Grasshopper yardımıyla yerleştirilmiştir (Şekil 2).



Şekil 2: Üç boyutlu yazıcılarla üretilcek birimlerin yerleşim senaryosunun Grasshopper ile oluşturulması

2.4. Robot Lokasyonlarının Belirlenmesi

İstasyon sayısının artışı doğru orantılı olarak relokasyon süresini artırdığından dolayı üretim sürecini de yavaşlatmaktadır. Ayrıca daha uzun bir üretim, daha maliyetli bir süreci doğurmaktadır. Dolayısıyla afet sonrası barınma için mümkün olabildiğince az robot kullanarak üretimin gerçekleştirilmesi elzemdir. Bir önceki bölümde üretilen yerleşim algoritması ve Python kullanılarak birimlerin en az sayıda robot kullanılarak üretilebileceği şekilde robot noktaları belirlenmiştir (Şekil 3). Robot noktaları belirlenirken robotların erişim kısıtları ve üretim sonrası bir sonraki istasyona geçiş alanının kalması parametreleri de göz önüne alınmıştır. Mevcut algoritma kurgusunda, sistemin farklı robot türlerine göre değişkenlik göstermesi 0 ve 1 değerlerine dayanan ikili değişkenler üzerinden sağlanmıştır.



Şekil 3: Robot baskı lokasyonlarının Grasshopper yardımıyla belirlenmesi

2.5. Birim Üretim Süresini Hesaplanması

Bu çalışmada üretim süreleri, kesin bir inşa süresi sunmak amacıyla değil; seçilen makine tiplerinin kapasitelerini ortalama değerler üzerinden karşılaştırmalı olarak değerlendirebilmek amacıyla hesaplanmıştır. Birim üretim süresi, makine hızı ve baskı yolu uzunluğu arasındaki hesaplama temel kinematik ilişki olan $x = v \cdot t$ matematiksel formülasyonla hesaplanmıştır. Forcael ve ark. (2023) tarafından oluşturulan simülasyon mantığı temel alınarak; üretim süresi, baskı yolu uzunluğu ile robot hızı arasındaki ilişkiden elde edilmektedir. Simülasyon modelleri farklılık gösterebilse de bu çalışmada kullanılan temel fiziksel prensipler şu şekilde tanımlanmaktadır:

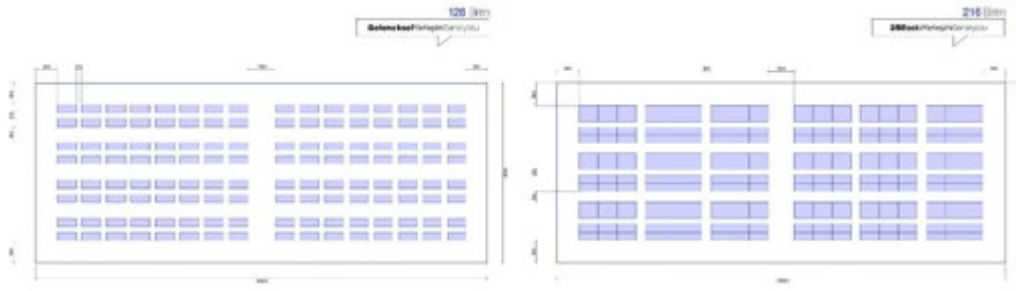
$$n_{katman} = \frac{h_{duvar}}{h_{katman}} ; T = \frac{L_{total}}{v_{baski}} ; T_{total} = T + t_{relokasyon} \quad (1) \quad (2) \quad (3)$$

Toplam baskı süresinin bulunabilmesi için öncelikle katman sayısı ve toplam baskı uzunluğu tespit edilmiştir. Tasarlanan 2500 mm toplam duvar yüksekliğinin, 30 mm katman yüksekliğine bölünmesiyle birim başına yaklaşık 84 katman elde edilmiştir. Çift kabuklu tek katman baskı yolu, duvarın tam baskı uzunluğu hesaplanarak 40.000 mm olduğu hesaplanmıştır. Bu kapsamda toplam baskı mesafesi 3.360.000 mm olarak hesaplanmıştır. Son aşamada, elde edilen bu toplam mesafe, makinenin aktif ortalama baskı hızı olan 250 mm/s'ye bölünerek tek bir birimin üretim süresi 13.440 saniye, yani yaklaşık 3 saat 44 dakika olarak bulunmuştur. Robotik kol ile üretimde oluşacak relokasyon süre kayıplarını hesaba katmak amacıyla; tek birim için ortalama 2 istasyon değişimi gerekeceği ve her relokasyonun yaklaşık 20 dakika süreceği varsayılmıştır. Bu 40 dakikalık kayıp baz süreye eklendiğinde, robotik kol için birim üretim süresi 4 saat 24 dakika olarak bulunmuştur.

3. Bulgular

3.1. Arazinin Kullanımının Karşılaştırılması

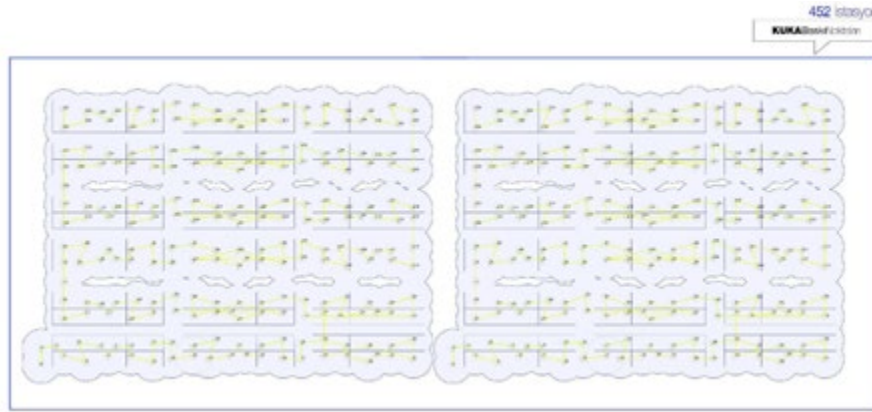
AFAD'ın belirlediği yönetmelik kapsamında tasarlanan geleneksel yerleşimdeki konteyner birimlerinden tasarlanan araziye 128 adet sığarken; 3B yazıcılar ile üretilecek olan birimler ile oluşturulan araziye 216 adet sığmıştır (Şekil 4). Bu da 3B yazıcılarla üretimde yerleşim düzeninde yaklaşık %69 daha fazla birime sahip olarak, aynı arazi üstünde daha çok insanın barınma ve sosyal alan ihtiyacının karşılanabilmesi demektir.



Şekil 4: Geleneksel yerleşim ve 3B yazıcılar ile yerleşim düzeni

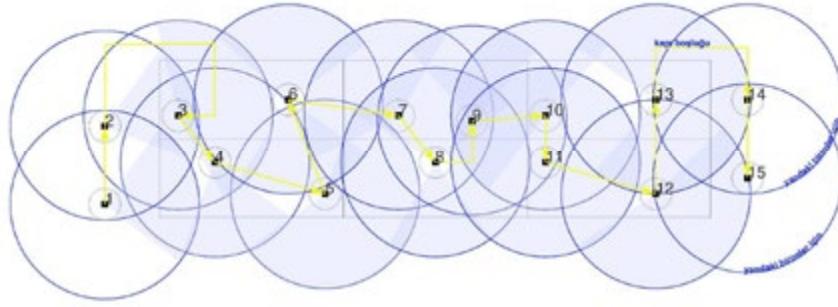
3.2. Robot Lokasyonlarının Belirlenmesi

Portal tiplere oranla daha sınırlı erişimleri nedeniyle, robotik kollar baskıya devam etmek için hareket etmek zorundadır. Yöntem bölümünde açıklanan algoritma tasarımı, söz konusu erişim kısıtlaması doğrultusunda tüm üniteleri basabilecek robot yerleşimleri tasarlanmıştır. Ayrıca, algoritma robot noktalarını otomatik olarak numaralandırılmış; böylece toplam robot noktası sayısından bir çıkarılarak toplam yer değiştirme sayısının hesaplanması mümkün kılınmıştır.



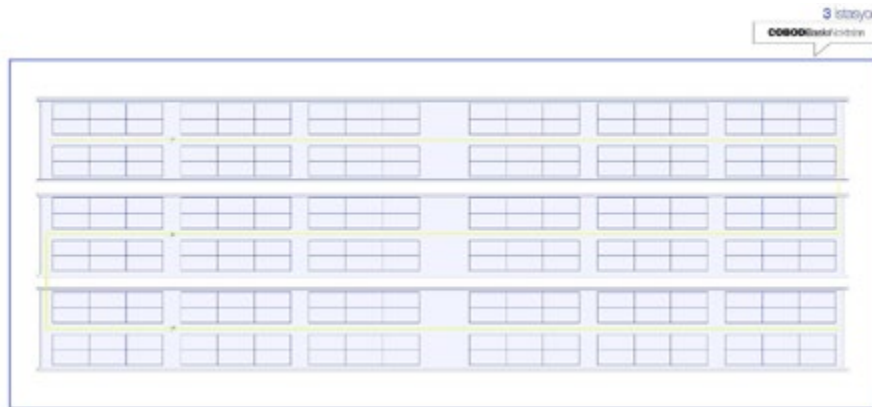
Şekil 5: KUKA KR için gerekli baskı noktaları ve toplam baskı alanı

KUKA'nın belirlenen arazideki tüm üniteleri basabilmesi için 452 ayrı istasyon gerekmektedir (Şekil 5). Bu da tek bir robot kullanımı için 451 tane relokasyona denk gelmektedir. KUKA'nın basım biçimi dairesel olduğundan dolayı oluşturulan modelde basılmayan boş duvar kalmamasına dikkat edilmiştir. Bu kurgu için arazide bulunan her altılı birim bloku düşünülmüştür. Robotların bastıkları duvarlar her istasyon için belirlenmiştir (Şekil 6). Bu istasyonların belirlenmesinde robotun bastığı duvarları düşünmesi, kendine hareket edebilecek alanı da bırakması en önemli parametre olmuştur. Böylece robot kendini birimlerin içine hapsetmeden boşluklardan geçebilmek hareket edebilir halde kalabilmiştir. Robot, kendisine en yakında olan kapı açıklığı veya henüz basılmayan noktaları belirleyerek buralardan hareket ederek daha hızlı bir baskı süreci gerçekleştirmektedir. Altılı blokların baskısı tamamlandıktan sonra yandaki birimlerin baskısı için aynı süreç tekrardan başlamaktadır.



Şekil 6: KUKA ile basılan duvarların ve robot noktalarının gösterimi

Öte yandan COBOD BOD2 için ise teorikte vadettiği sınırsal uzunlukta doğrusal basım özelliği sayesinde tek sınırlama genişlikler olmuş ve 3 istasyon tüm üniteleri basmak için yeterlidir (**Şekil 7**). Bu da COBOD'un robotunu 2 tane relokasyon ile KUKA'ya oranla çok daha az rakamla öne çıkarmaktadır. Bu yer değiştirme sayıları tek bir robot kullanıldığı senaryo için geçerlidir. Dolayısıyla daha fazla robot eş zamanlı çalışırsa, robot başına daha az birim üretimi ve istasyon sayısı düşeceği için daha az yer değiştirme gerekecektir. Yer değiştirme sayılarının değişimi de her iki robotun da belirlenen arazi üzerinde birimleri basma süresini değiştirecektir.



Şekil 7: COBOD için gerekli baskı noktaları ve toplam baskı alanı

3.3. Robot Türlerinin Karşılaştırılması

İlk kurulum süresi çok daha uzun olan COBOD BOD2, KUKA KR ile üretime oranla daha az istasyon gerektirmektedir. Birden fazla robot kullanıldığı takdirde COBOD BOD2'nun tekrardan söküm ve kurulum süresinin uzun oluşu onu KUKA KR karşısında, daha dezavantajlı hale getirmektedir. Aynı anda, eş sayıda, eş modelde ve farklı adetlerde kullanılan makinelere göre olan yaklaşık üretim süresi senaryosu da bu kısımda incelenmiştir. Sonuç olarak, robotların sayısı ne kadar çok olursa robotik kolun fazla relokasyon gerektirmesi dezavantajının ortadan yavaşça kalktığı gözlemlenmiştir. Bu senaryolar sonucunda belirlenen arazi üzerinde, 6 adet eş gantry ve 6 adet eş robotik kolun aynı anda çalıştığı varsayıldığında; gantry tipi yazıcı olan COBOD BOD2 ortalama 8 gün ile robotik kolun 7 gün üretim süresininin gerisinde kalmıştır (**Tablo 3**). Bu sürelerde daha önce yöntem kısmında da belirtilen robotların kurulum süreleri büyük etki göstermektedir. Özellikle portal yazıcıların ilk kurulumu ve sonrasında tekrardan kurulması için sökülerek yeniden kurulumunun sağlanması büyük bir süre kaybına sebebiyet vermiştir.

Tablo 3: İki farklı robot için istasyon/robot sayısına göre potansiyel ortalama üretim süreleri

	COBOD BOD2	KUKA KR QUANTEC
1 Robot	35 gün	40 gün
3 Robot	16 gün	9 gün
6 Robot	8 gün	7 gün

4. Sonuç

Bu çalışmada, afet sonrası barınma tasarımların 3B beton baskı ile uygulanabilme potansiyeli açıklanmaktadır. Aynı zamanda, mimarlık alanında gelişmekte olan 3DCP teknolojisinin potansiyel kullanım alanlarını anlamak ve üretimin en verimli şekilde gerçekleşmesini sağlamak açısından da önem taşımaktadır. Afet sonrası barınmada kullanılan çadır ve konteyner birimlerine alternatif olarak 3 boyutlu yazıcılarla üretilmiş eş büyüklükte beton birimler değerlendirilmiştir. İki farklı türde yazıcı olan KUKA ve COBOD BOD2; geleneksel konteyner düzeni ile karşılaştırıldığında ortaya çıkan hız açısından avantaj durumunda relokasyon gerektirmesine rağmen robotik kol ön plana çıkmıştır. Bunun en büyük sebebi, KUKA robotun kurulum süresinin portal tipi sistemlere oranla çok daha hızlı olması ve baskıya daha kısa sürede başlayabilme imkânıdır.

Tablo 4: Tüm senaryoların geleneksel üretimle karşılaştırılması

	Senaryo	Birim	Robot Sayısı	Ortalama Toplam Süre	Birim Baskı Süresi
COBOD BOD2	S1	216	6	8 gün	3 saat 44 dk
KUKA KR QUANTEC	S2	216	6	7 gün	4 saat 24 dk
Geleneksel Konteyner	S3	128	-	45-60 gün	-

Geleneksel yöntemler ile yerleşimde mevcut yönetmelikler gereği arazi kullanımı daha azken; 3b baskı ile üretilen beton birimler ile arazi kullanımı %69 ortalama artış göstermektedir. Portal sistem tarafından üretilen tek bir standart ünitenin ortalama baskı süresi 3 saat 44 dakikadır. Diğer taraftan, robotik kol ile gerçekleştirilen üretim ortalama 4 saat 24 dk olarak hesaplanmıştır (**Tablo 4**). Bu süre farklılığında rol oynayan en temel değişken, robotun yer değiştirme durumu olmuştur. Yapılan karşılaştırmada, portal sistemin robotik kola kıyasla daha yavaş kaldığı tespit edilmiştir. Üretim süresince yalnızca bir robot kullanılmasına karşın, altı robotun eş zamanlı olarak devreye sokulmasıyla 3B baskı sürecinin şüphesiz çok daha hızlı ilerleyeceği dikkate alınmalıdır. Sonuç olarak bu çalışma; baskı yolunun toplam uzunluğu, robotun türü ve robotun maksimum erişim alanı gibi parametreleri gözeterek, 3DCP'nin robot konumlandırma ve üretim süresi belirleme süreçlerini simüle etmek adına bir yaklaşım ortaya koymuştur. Bu araştırmada sabit tutulan baskı hızı, katman yüksekliği ve birim taban alanı gibi değişkenler, gelecekteki çalışmalarda farklı analizler gerçekleştirmek üzere değiştirilebilir.

4.1. Çalışmanın Sınırlılıkları

Kullanılan cihazın teknik özelliklerinden kaynaklı hesaplama sınırlamaları nedeniyle, gerçek zamanlı hesaplama doğruluğunu korumak için alan düzeni optimizasyonu 10956 m²'lik temsili bir örnek parsel üzerinde gerçekleştirildi. Arazideki 216 birimlik hesaplama kapasitesinin yarısı, 108 nokta, robotun konum noktalarını hesaplamak için kullanıldı; kalan noktalar hesaplanamadı, bu nedenle simetrik bir düzen olduğu için yan yana birleştirildi. Bu çalışmada topoğrafya, iklim ve arazi durumu dikkate

alınmamıştır. Tüm hesaplamalar teorik bir çerçevede yapıldığından, bu çalışmada optimal değerler kullanılsa bile sonuçlar pratikte farklılık gösterebilir.

Etik Beyan: Grasshopper algoritmalarında kullanılan tüm Python komutlarının tasarımında Google Gemini Pro yapay zekâ motorundan destek alınmıştır.

KAYNAKLAR

- Bakan, K. (2025). Afet Sonrası Geçici Yaşam Alanları Tasarımı: Mekânsal Verimliliği Artırmaya Yönelik Hesaplamalı Tasarım Temelli Bir Analiz Çalışması [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Bici, A., & Yunitsyna, A. (2023). Analysis of 3D printing techniques for building construction: A review. *Construction Robotics*, 7(2), 107–123. <https://doi.org/10.1007/s41693-023-00108-4>
- Bos, F., Wolfs, R., Ahmed, Z., & Salet, T. (2016). Additive manufacturing of concrete in construction: Potentials and challenges of 3D concrete printing. *Virtual and Physical Prototyping*, 11(3), 209–225. <https://doi.org/10.1080/17452759.2016.1209867>
- COBOD. (n.d.). BOD2 specifications. <https://cobod.com/solution/bod2/specifications/>
- CyBe Construction. (2019). CyBe printer specifications [Technical datasheet].
- Deksi, A. (2016). Olağanüstü Durumlarda Barınma İçin Yenilikçi Bir Yaklaşım Önerisi: 3D Yazıcı ile Uygulama [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Aydın Üniversitesi.
- Delgado Camacho, D., Clayton, P., O'Brien, W. J., Seepersad, C., Juenger, M., Ferron, R., & Salamone, S. (2018). Applications of additive manufacturing in the construction industry – A forward-looking review. *Automation in Construction*, 89, 110–119. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.12.031>
- Forcael, E., Martínez-Chabur, P., Ramírez-Cifuentes, I., García-Alvarado, R., Ramis, F., & Opazo-Vega, A. (2023). Performance Analysis of 3D Concrete Printing Processes through Discrete-Event Simulation. *Buildings*, 13(6), 1390. <https://doi.org/10.3390/buildings13061390>
- IFRC. (2013). International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies, Geneva [Dataset]. https://doi.org/10.1163/2210-7975_HRD-9813-2015012
- Iyoha, P., Nejat, A., & Mostafavi, S. (2025). A Systematic Review of Literature on the Utilization of 3D Printing Technologies for Disaster-Resilient Housing. SSRN. <https://doi.org/10.2139/ssrn.5139855>
- Kantaros, A., Petrescu, F. I. T., Brachos, K., Ganetsos, T., & Petrescu, N. (2024). Leveraging 3D Printing for Resilient Disaster Management in Smart Cities. *Smart Cities*, 7(6), 3705–3726. <https://doi.org/10.3390/smartcities7060143>
- KUKA Deutschland GmbH. (2021). Specification: KR QUANTEC-2 K and KR QUANTEC-2 P (Version V4). Augsburg, Germany.
- Mehdizade, A. (2024). Afet Sonrası Kalıcı Konutlar İçin İleri Teknolojilerle Entegreli Esnek, Uyarlanabilir ve Sürdürülebilir Model Önerisi [Doktora Tezi]. Eskişehir Teknik Üniversitesi.
- Subramanya, K., & Kermanshachi, S. (2022). Exploring Utilization of the 3D Printed Housing as Post-Disaster Temporary Shelter for Displaced People. *Construction Research Congress 2022*, 594–605. <https://doi.org/10.1061/9780784483978.061>
- Tarakçı, B. İ. (2025). From Local Disasters to Global Design Discourse: Interior Architecture Theses in Türkiye. *Trends in Higher Education*, 4(4), 72. <https://doi.org/10.3390/higheredu4040072>
- TMMOB Şehir Plancıları Odası. (2023, 11 Şubat). *Geçici barınma alanları yer seçimi ve yerleşimi nasıl olmalıdır?*

Hidrojel Esaslı Biyokompozitlere İlişkin Bir Sayısal Tasarım ve Çevresel Performans Değerlendirme Yaklaşımı

Nergiz Han¹ ; Sevil Yazıcı² 

^{1,2}İstanbul Teknik Üniversitesi

¹hann17@itu.edu.tr; ²sevilyazici@itu.edu.tr

Özet

İklim değişikliği, artan soğutma yükleri ve yapı kabuğunun enerji performansındaki belirleyici rolü, cephe sistemlerinin yalnızca sabit fiziksel bariyerler olarak değil, çevresel koşullarla etkileşime girebilen performans odaklı arayüzler olarak ele alınmasını gerekli kılmaktadır. Bu bağlamda hidrojel esaslı biyokompozitler; yüksek su tutma kapasiteleri, nemle ilişkili şişme-kuruma davranışları, değişken optik karakterleri ve buharlaşmaya dayalı pasif soğutma potansiyelleri nedeniyle mimari cephe bileşenleri için araştırılmaya değer bir malzeme grubudur. Bu çalışma, sodyum poliakrilat, sodyum aljinat, jelatin ve CaCl_2 çapraz bağlama sistemiyle geliştirilen hidrojel esaslı biyokompozitlerin ölçülebilir çevresel davranışını erken tasarım aşamasında kullanılabilecek bir veri girdisi olarak ele almaktadır. Yazarların önceki çalışmasında karşılaştırılan hidrojel formülasyonları arasında, su tutma kapasitesi ile boyutsal bütünlük arasında daha dengeli bir davranış gösteren formülasyon referans panel olarak seçilmiştir. Bu formülasyona ilişkin kuruma davranışı ve biyomimetik stabilite bulguları önceki çalışma verilerine dayanmaktadır. Bu bildiride ise $20 \times 15 \times 10$ cm ölçülerinde, değiştirilebilir ön cephe yüzeyine sahip bir deney kutusu hazırlanmış; boş açıklık, buzlu asetat, mukavva, balsa ve hidrojel panel yüzeyleri aynı sensör yerleşimi altında karşılaştırılmıştır. Işık bağımlı direnç sensörüyle (Light Dependent Resistor, LDR) görelî ışık geçişi; kutu içerisine ve oda ortamına yerleştirilen iki ayrı sıcaklık-nem sensörüyle (DHT22) ise eş zamanlı sıcaklık ve bağıl nem değerleri kaydedilmiştir. Deney kutusundan elde edilen görelî ışık geçişi, sıcaklık farkı (ΔT) ve bağıl nem farkı (ΔRH) değerleri, Rhinoceros/Grasshopper (GH) ortamında geliştirilen grid tabanlı parametrik cephe modeliyle ilişkilendirilmiştir. Ladybug tabanlı gelen radyasyon analizi, sabit cephe geometrisi üzerindeki güneşlenme dağılımını okumak ve hidrojel panel entegrasyonu açısından öncelikli bölgeleri belirlemek amacıyla kullanılmıştır. Buna ek olarak, kaplamasız beton, orta kahverengi yüzeyle temsil edilen ahşap panel ve koyu mavi-gri kaplamalı metal panel senaryoları için kaynaklandırılmış güneş ışıınımı soğurma katsayıları kullanılarak tahmini soğurulan radyasyon değerleri hesaplanmıştır. Hidrojel panel ise nemlenme, su tutma, buharlaşma ve kuruma evrelerine bağılı değişken davranışı nedeniyle sabit bir soğurma katsayısıyla temsil edilmemiş; deneysel mikro-çevresel göstergeler üzerinden değerlendirilmiştir. Çalışma, hidrojel esaslı biyokompozitlerin yalnızca deneysel bir malzeme çıktısı olarak değil, ölçülebilir çevresel davranışı cephe tasarım kararlarıyla ilişkilendiren veri temelli bir tasarım girdisi olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Hidrojel, Biyokompozit, Pasif Soğutma, Görelî Işık Geçişi, Sayısal Tasarım.

A Computational Design and Environmental Performance Evaluation Approach for Hydrogel-Based Biocomposites

Nergiz Han ¹ ; Sevil Yazıcı ² 

¹Istanbul Technical University; ² Istanbul Technical University

¹hann17@itu.edu.tr; ²sevilyazici@itu.edu.tr

Abstract

Climate change, increasing cooling loads, and the critical role of the building envelope in energy performance require facade systems to be reconsidered not only as fixed physical barriers, but also as performance-oriented interfaces capable of interacting with environmental conditions. In this context, hydrogel-based biocomposites constitute a material group worth investigating for architectural facade components due to their high water-retention capacity, humidity-related swelling and drying behaviour, variable optical character, and evaporative passive cooling potential. This study examines the measurable environmental behaviour of hydrogel-based biocomposites developed through a sodium polyacrylate, sodium alginate, gelatin, and CaCl₂ cross-linking system as a design input that can support early-stage facade decisions. Among the hydrogel formulations compared in the authors' previous study, the formulation that demonstrated a more balanced relationship between water-retention capacity and dimensional integrity was selected as the reference panel. The drying behaviour and morphological stability findings associated with this formulation are based on the previous study. In the present research, a 20 × 15 × 10 cm experimental box with a replaceable front facade surface was prepared, and an empty opening, frosted acetate, cardboard, balsa, and hydrogel panel surfaces were compared under the same sensor configuration. Relative light transmission was recorded using a Light Dependent Resistor (LDR) sensor, while temperature and relative humidity values were simultaneously recorded using two separate DHT22 temperature-humidity sensors positioned inside the experimental box and in the room environment. The resulting relative light transmission, temperature difference (ΔT), and relative humidity difference (ΔRH) values were associated with a grid-based parametric facade model developed in Rhinoceros/Grasshopper (GH). Ladybug-based incident radiation analysis was used to read solar exposure patterns on a fixed facade geometry and to identify priority zones for hydrogel panel integration. In addition, estimated absorbed radiation values were calculated for uncoated concrete, timber represented by a medium-brown exterior surface, and coated metal represented by a dark blue-grey exterior surface using referenced solar absorptance coefficients. The hydrogel panel was not represented through a fixed absorptance coefficient due to its variable behaviour depending on moisture content, water retention, evaporation, and drying stages. Instead, it was evaluated through experimentally measured micro-environmental indicators. The study shows that hydrogel-based biocomposites can be considered not only as experimental material outputs, but also as data-driven design inputs that relate measurable environmental behaviour to facade design decisions.

Keywords: Hydrogel, Biocomposite, Passive Cooling, Relative Light Transmission, Computational Design.

1. Giriş

Cephe sistemleri, yapı ile çevre arasındaki ısı, ışık, nem ve hava değişiminin gerçekleştiği temel mimari arayüzlerdir. Geleneksel cephe yaklaşımlarında bu arayüz çoğunlukla sabit opaklık, geçirgenlik ve yalıtım değerleri üzerinden tanımlanırken, iklim krizi ve artan soğutma gereksinimleri yapı kabuğunun çevresel koşullara yanıt verebilen bir sistem olarak yeniden düşünülmesini gerekli kılmaktadır. Akıllı malzemeler ve adaptif yapı kabukları üzerine yapılan çalışmalar, bina kabuğunun enerji tüketimini azaltma ve iç mekân çevresel kalitesini iyileştirme potansiyeline işaret etmektedir (Addington ve Schodek, 2012; Loonen vd., 2013).

Uyaran duyarlı polimer sistemler içinde yer alan hidrojeller; su teması, nem ve sıcaklık gibi çevresel girdilere bağlı olarak hacimsel, optik ve termal davranışlarını değiştirebilmektedir. Yüksek su tutma kapasiteleri, şişme-kuruma davranışları ve buharlaşma yoluyla yerel sıcaklık farkı oluşturma potansiyelleri nedeniyle bu malzemeler, yapı kabuğunda pasif çevresel yanıt üretebilecek bileşenler olarak değerlendirilebilir (Stuart vd., 2010; Xie vd., 2023). Hidrojel tabanlı termo-duyarlı pencere sistemlerinin güneş ışımasını dinamik biçimde düzenleme ve bina enerji tüketimini azaltma potansiyeli farklı ölçeklerde incelenmiştir (Jiang vd., 2021). Benzer şekilde, atmosferik nemden yararlanan poliakrilat hidrojel filmlerin ışımsal ve evaporatif soğutmayı birlikte destekleyebildiği gösterilmiştir (Galib vd., 2023).

Mevcut literatürün önemli bir bölümü hidrojel malzemelerin kimyasal yapısı veya laboratuvar ölçeğindeki performansı üzerine odaklanmaktadır. Buna karşılık su tutma, kuruma, sıcaklık farkı oluşturma, bağıl nem değişimi ve göreceli ışık geçişi gibi göstergelerin mimari panel tasarımı ve erken tasarım kararlarıyla ilişkilendirilmesi daha sınırlı biçimde ele alınmıştır.

Yazarların önceki çalışmasında, hidrojel esaslı bir pasif soğutma bileşeninin malzeme geliştirme, prototipleme ve çevresel davranışı farklı ölçeklerde incelenmiştir (Han ve Yazıcı, 2026). Çalışmada üç farklı formülasyon değerlendirilmiş; su tutma kapasitesi ile boyutsal bütünlük arasında daha dengeli bir davranış gösteren formülasyon mimari uygulama için seçilmiştir. Bu bildiri, söz konusu araştırma hattını cephe paneli ölçeğine taşıyarak hidrojel esaslı biyokompozit davranışının erken tasarım kararlarıyla nasıl ilişkilendirilebileceğine odaklanmaktadır.

Cephe yüzeylerinin güneş ışımasına karşı davranışı yalnızca geometrik konumlanmayla değil, dış yüzeyin radyatif özellikleriyle de ilişkilidir. Güneş ışıması soğurma katsayısı, yüzeye gelen güneş enerjisinin malzeme tarafından soğurulan oranını ifade etmektedir. Opak yüzeylerde renk, kaplama ve yüzey karakteri bu değeri etkileyebilmektedir (Passive Solar Industries Council vd., 1991). Bu nedenle çalışmada yalnızca gelen radyasyon dağılımı değil, geleneksel opak yüzeylerin tahmini soğurma davranışı da değerlendirilmiştir.

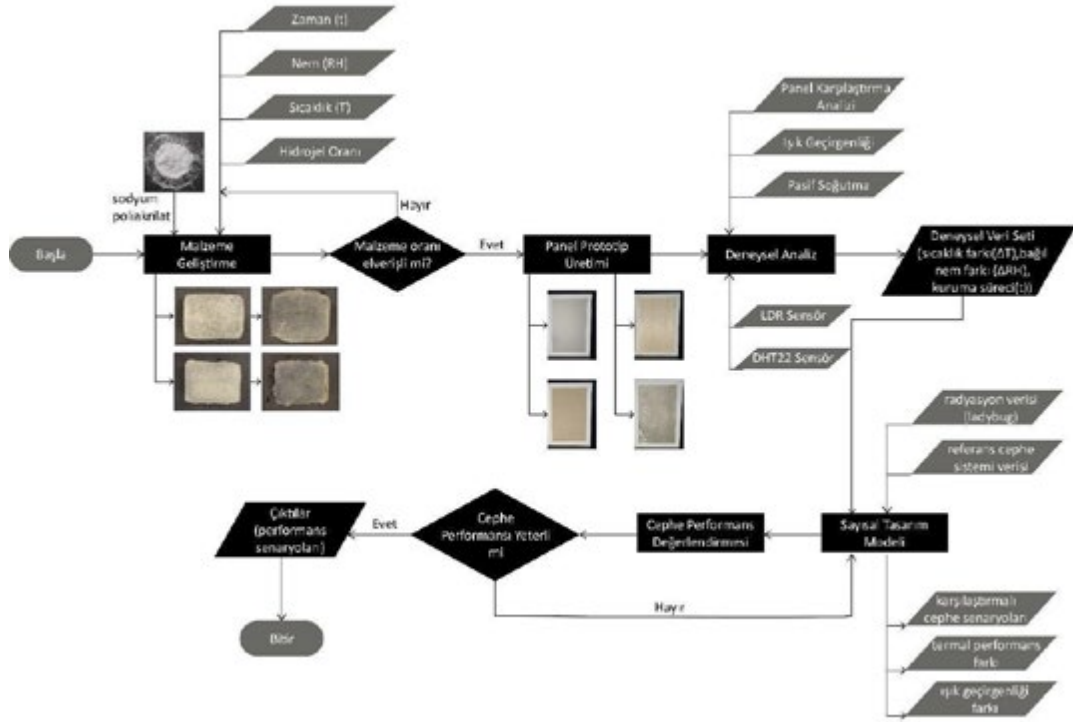
Hidrojel esaslı biyokompozit panel nemlenme, su tutma, buharlaşma ve kuruma süreçlerine bağlı değişken davranışı nedeniyle sabit bir soğurma katsayısıyla temsil edilmemiş; deney kutusunda ölçülen mikro-çevresel göstergeler üzerinden değerlendirilmiştir.

Bu çalışma, hidrojel esaslı biyokompozit panel sisteminin deney kutusu ölçeğindeki çevresel davranışını ölçmeyi ve elde edilen göstergeleri Rhinoceros/Grasshopper (GH) ortamında geliştirilen parametrik cephe modeliyle ilişkilendirmeyi amaçlamaktadır. Ana cephe geometrisi ve ızgara düzeni sabit tutulmuş; deneysel veriler, gelen radyasyon dağılımı ve geleneksel opak yüzeylerin tahmini soğurma davranışıyla birlikte değerlendirilmiştir.

2. Metodoloji

Araştırma iki ana aşamada yürütülmüştür. İlk aşamada, yazarların önceki çalışmasında geliştirilen hidrojel esaslı biyokompozit malzeme sistemi cephe paneli ölçeğinde yeniden ele alınmış ve seçilen formülasyonla sensör tabanlı bir deney kutusu hazırlanmıştır. İkinci aşamada ise deney kutusundan

elde edilen göreceli ışık geçişi, sıcaklık farkı (ΔT) ve bağıl nem farkı (ΔRH) değerleri, Rhinoceros/GH ortamında oluşturulan ızgara tabanlı cephe modeli ve Ladybug tabanlı gelen radyasyon analiziyle ilişkilendirilmiştir. Sayısal değerlendirme, gelen radyasyon dağılımı ile geleneksel opak yüzeyler için kaynaklandırılmış soğurma katsayılarını birlikte ele almaktadır. Şekil 1, önceki malzeme geliştirme sürecinden deneysel ölçümlere ve radyasyon temelli erken tasarım değerlendirmesine uzanan araştırma akışını göstermektedir.



Şekil 1: Araştırmanın malzeme geliştirme, deneysel ölçüm ve sayısal tasarım senaryolarına aktarım sürecini gösteren metodoloji akış şeması.

2.1. Malzeme Geliştirme ve Deney Prototipi

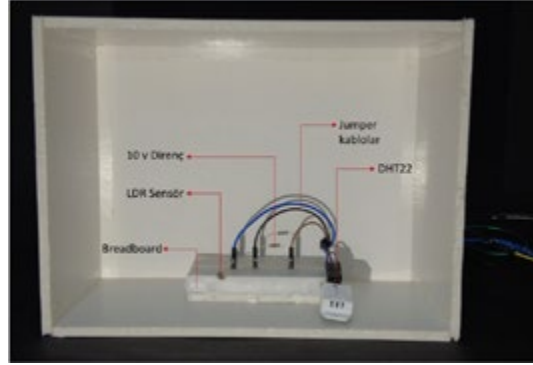
Bu çalışmada kullanılan hidrojel esaslı biyokompozit panel, yazarların önceki malzeme geliştirme ve prototipleme çalışmasında seçilen M2 formülasyonuna dayanmaktadır (Han ve Yazıcı, 2026). Sodyum poliakrilat temel su tutucu bileşen; sodyum aljinat ve jelatin ise yüzey bütünlüğünü destekleyen bağlayıcı ve matris bileşenleri olarak kullanılmış, stabilizasyon için CaCl_2 ile çapraz bağlama uygulanmıştır.

Başlangıç referansı olan M1'in ardından M2 ve M3 formülasyonları arasında M2, daha fazla yumuşama ve boyutsal bozulma gösteren M3'e kıyasla daha dengeli davranması nedeniyle mimari uygulama için seçilmiştir. Referans panel; 0,5 g sodyum poliakrilat, 2 g sodyum aljinat, 5 g jelatin, 100 ml su ve CaCl_2 çapraz bağlama sisteminden oluşmaktadır. Önceki çalışmada sunulan yaklaşık 36 saatlik ıslanma-kuruma çevrimi ve 30 günlük biçimsel stabilite gözlemleri, referans panel seçimini destekleyen bulgular olarak ele alınmıştır.

Hidrojel panelin cephe bileşeni olarak kullanım potansiyelini değerlendirmek amacıyla $20 \times 15 \times 10$ cm ölçülerinde, değiştirilebilir ön yüzeye sahip bir deney kutusu hazırlanmıştır. Boş açıklık, buzlu asetat, mukavva, balsa ve hidrojel panel yüzeyleri sırayla ön cepheye yerleştirilmiş; göreceli ışık geçişi, kutu içi sıcaklık ve bağıl nem üzerindeki etkileri aynı sensör yerleşimi altında karşılaştırılmıştır.

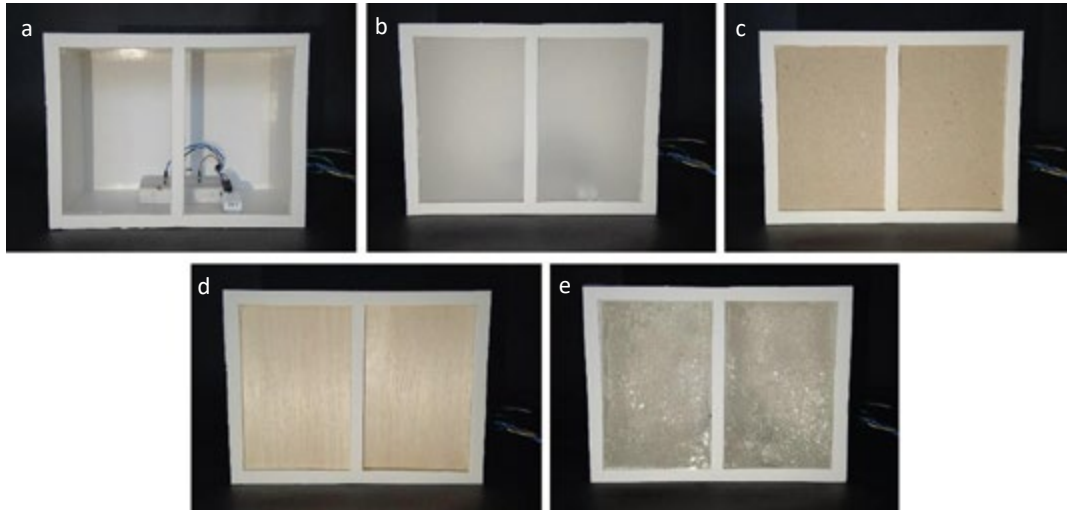
2.2. Deneysel Kurgu: Performans Ölçümü

Deney düzeneğinde bir LDR (Light Dependent Resistor) sensörü ve iki ayrı DHT22 sıcaklık-nem sensörü kullanılmıştır (Şekil 2). Kutu içerisine yerleştirilen LDR sensörü görelî ışık geçişini ölçmek amacıyla kullanılmıştır. DHT22 sensörlerinden biri kutu içindeki mikro-çevresel koşulları, diğeri ise oda ortamındaki referans koşulları kaydetmiştir. Her panel durumu için sıcaklık ve bağıl nem değerleri eş zamanlı olarak kaydedilmiş; sensör konumları deney boyunca değiştirilmemiştir.



Şekil 2: Önceki deneysel süreçten hareketle cephe paneli karşılaştırması için geliştirilen deney kutusu ve sensör yerleşimi.

Görelî ışık geçişi testi için kutunun ön yüzüne sırasıyla boş açıklık, buzlu asetat, mukavva, balsa ve hidrojel panel yerleştirilmiştir (Şekil 3). Buzlu asetat yarı geçirgen; mukavva ve balsa opak referans yüzeyler olarak değerlendirilmiştir. Hidrojel panel ise nem durumu, kalınlık, kabarcıklanma ve kuruma davranışına bağılı değişken optik karakter gösteren deneysel yüzey olarak ele alınmıştır.



Şekil 3: Deneyde kullanılan değiştirilebilir cephe yüzeyleri: a: boş açıklık, b: buzlu asetat, c: mukavva, d: balsa ve e: hidrojel panel.

Her panel değişiminden sonra LDR sensörüyle ışık değeri, DHT22 sensörleriyle ise kutu içi ve oda ortamına ilişkin sıcaklık ve bağıl nem değerleri eş zamanlı olarak kaydedilmiştir. Boş açıklık maksimum ışık geçişi için referans kabul edilmiştir. Ölçümler Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1: Deney kutusunda farklı panel yüzeyleri için ölçülen görelî ışık geçişi, sıcaklık ve bağıl nem değerleri.

Panel durumu	LDR değeri	Görelî ışık geçişi (%)	Kutu Sıcaklığı (°C)	Oda Sıcaklığı (°C)	ΔT (°C)	Kutu bağıl nemi (%)	Oda bağıl nemi (%)	ΔRH
<i>Boş açıklık</i>	3	100.0	24.6	24.5	+0.1	68.4	66.1	+2.3
<i>Buzlu asetat</i>	2	66.7	24.6	24.5	+0.1	68.4	65.5	+2.9
<i>Mukavva</i>	0	0.0	24.6	24.5	+0.1	68.4	65.4	+3.0
<i>Balsa</i>	0	0.0	24.6	24.5	+0.1	68.4	65.4	+3.0
<i>Hidrojel</i>	1	33.3	23.9	24.5	-0.6	83.1	65.9	+17.2

Görelî ışık geçirgenliği, mutlak optik geçirgenlik ölçümü olarak değil, LDR sensörüyle elde edilen görelî ışık değeri üzerinden değerlendirilmiştir. Bu nedenle her panel için ölçülen LDR değeri, boş açıklık durumunda elde edilen LDR değerine oranlanarak hesaplanmıştır:

$$\text{Görelî ışık geçişi (\%)} = (\text{Panel ile ölçülen LDR değeri} / \text{Boş açıklık LDR değeri}) \times 100 \quad (1)$$

Sıcaklık farkı (ΔT) ve bağıl nem farkı (ΔRH), her panel ölçümü sırasında eş zamanlı olarak kaydedilen oda koşulları referans alınarak hesaplanmıştır:

$$\Delta T = T_{\text{kutu}} - T_{\text{oda}} \quad (2)$$

$$\Delta RH = RH_{\text{kutu}} - RH_{\text{oda}} \quad (3)$$

Deney boyunca oda sıcaklığı 24,5 °C olarak ölçülmüş; oda bağıl nemi ise panel değişimleri sırasında %65,4 ile %66,1 arasında sınırlı bir değişim göstermiştir. Bu nedenle ΔT ve ΔRH değerleri, farklı panel yüzeylerinin kutu içindeki yerel mikro-çevresel koşullara etkisini karşılaştırmalı olarak değerlendiren göstergeler olarak ele alınmıştır.

2.3. Deneysel Verilerin Sayısal Ortamla İlişkilendirilmesi

Deneysel çalışmalardan elde edilen LDR tabanlı görelî ışık geçişi, sıcaklık farkı (ΔT) ve bağıl nem farkı (ΔRH), hidrojel panelin çevresel davranışını tanımlayan ölçülebilir göstergeler olarak değerlendirilmiştir. Önceki çalışmada incelenen kuruma davranışı ve biçimsel stabilite ise panel kullanımının zamana bağıl sınırlarını yorumlamak amacıyla kullanılan nitel değerlendirme kriterleri olarak ele alınmıştır. Bu veri ve gözlemlerin tasarım sürecindeki karşılıkları Tablo 2’de özetlenmiştir.

Tablo 2: Deney kutusunda ölçülen göstergelerin erken tasarım değerlendirmesindeki karşılıkları.

Deneysel veri/gözlem	Sayısal tasarım parametresi	Modelde kullanım biçimi
LDR sensör değeri	Görelî ışık geçişi	Panel yüzeylerinin optik karakterlerinin karşılaştırılması
Kutu içi sıcaklık değeri	ΔT: görelî soğutma göstergesi	Hidrojel panelin deney kutusu ölçeğindeki yerel etkisinin yorumlanması
Kutu içi bağıl nem değeri	ΔRH: nem etkisi	Nemlenme ve buharlaşma davranışının değerlendirilmesi
Kuruma davranışı	Zamana bağıl performans değişimi	Yeniden nemlendirme ve bakım gereksiniminin yorumlanması
Biçimsel stabilite	Panel kullanım sınırı	Malzeme seçimi ve panelizasyon kararlarının değerlendirilmesi

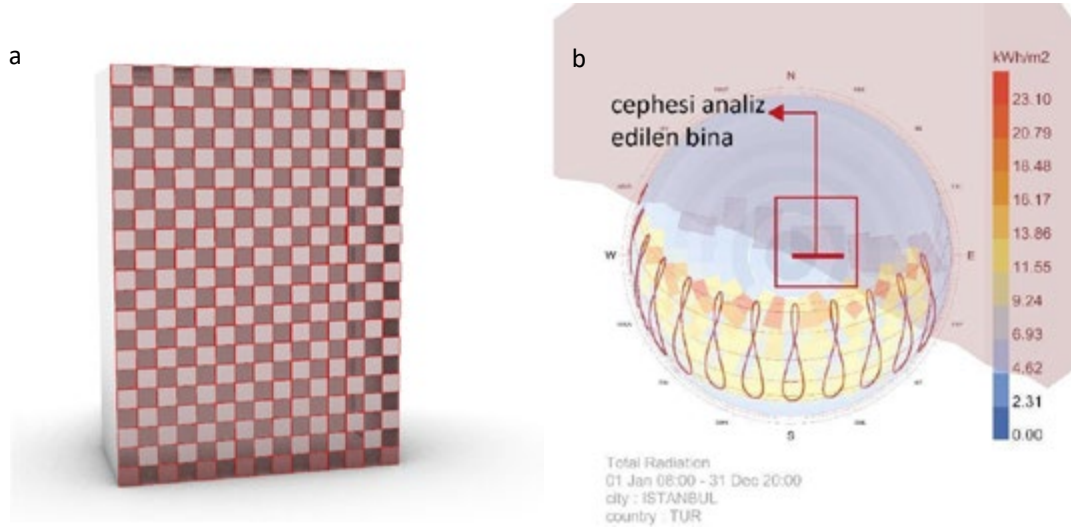
Deney kutusunda kullanılan yüzeyler ile sayısal cephe modelindeki senaryolar birebir fiziksel veya termal eşdeğerler olarak değil, temel yüzey karakterleri üzerinden ilişkilendirilen temsil grupları olarak ele alınmıştır (Tablo 3).

Tablo 3: Deney kutusunda kullanılan yüzeyler ile sayısal cephe modelindeki malzeme senaryoları arasındaki temsil ilişkisi.

Deney kutusunda kullanılan yüzey	Sayısal modeldeki temsil karşılığı	Temsil edilen temel özellik
Boş açıklık	Deneysel referans durum	Maksimum ışık geçişi
Buzlu asetat	Yarı geçirgen panel	Yayıllı ışık geçişi
Mukavva	Beton panel / metal panel	Opak referans yüzey
Balsa	Ahşap panel	Doğal malzeme yüzeyi
Hidrojel panel	Hidrojel entegre çevresel panel	Değişken optik karakter ve mikro-çevresel etki

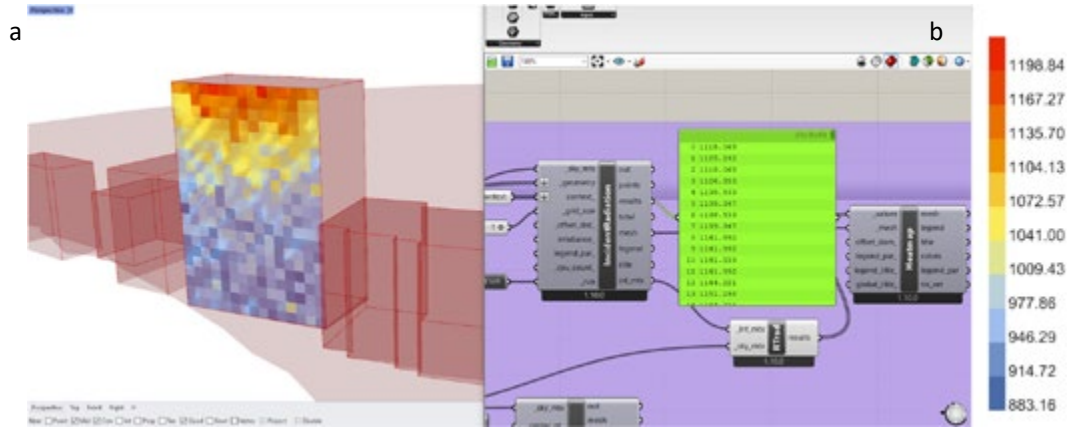
2.4. Sayısal Cephe Modeli ve Radyasyon Temelli Değerlendirme

GH ortamında çevresel bağlam kütleleriyle birlikte ızgara tabanlı bir cephe modeli oluşturulmuştur (Şekil 4a). Ana cephe geometrisi ve ızgara düzeni sabit tutulmuş; yakın çevredeki kütleler gölgeleme koşullarını temsil etmek amacıyla modele dahil edilmiştir. İstanbul iklim verisine dayalı toplam radyasyon diyagramı, cephenin yönsel güneşlenme etkisini okumak amacıyla kullanılmıştır (Şekil 4b).



Şekil 4: a) GH ortamında geliştirilen grid tabanlı cephe modeli ve hücresel panel dağılımı, b) İstanbul iklim verisiyle Ladybug ortamında oluşturulan toplam radyasyon diyagramı ve analiz edilen cephenin yönsel konumu.

GH Ladybug tabanlı gelen radyasyon analizi (incident radiation analysis, IR), ana cephe yüzeyindeki radyasyon dağılımını değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır (Roudsari vd., 2013). İstanbul iklim verisi modele aktarıldıktan sonra analiz, yıl boyunca her gün 08.00–20.00 saatleri arasında gerçekleştirilmiş; her ızgara hücresi için gelen radyasyon değeri hesaplanmıştır. Hücresel değerler ısı haritası biçiminde görselleştirilmiştir (Şekil 5).



Şekil 5: GH Ladybug tabanlı gelen radyasyon analizinin sayısal ve görsel çıktıları: a) ana cephe yüzeyindeki ızgara hücreleri için hesaplanan gelen radyasyon değerleri ve ısı haritası, b) hücresel radyasyon değerlerinin GH ortamındaki veri listesi ve renk skalası.

Ladybug tabanlı IR analizi sonucunda ana cepheyi oluşturan 632 ızgara hücresi için ayrı değerler elde edilmiştir. Bu analize ek olarak, geleneksel opak panel senaryolarının güneş ışıınımını soğurma eğilimlerini karşılaştırmak amacıyla yüzey bazlı güneş ışıınımı soğurma katsayıları kullanılmıştır. Güneş ışıınımı soğurma katsayısı (α_{solar}), yüzeye gelen güneş enerjisinin ısı olarak soğurulan bölümünü tanımlamaktadır (Passive Solar Industries Council vd., 1991). Her bir cephe hücresi için tahmini soğurulan radyasyon değeri aşağıdaki formülle hesaplanmıştır:

$$Q_{abs_i} = \alpha_{solar} \times Q_{incident_i} \quad (4)$$

Burada:

Q_{abs_i} : i numaralı cephe hücresinin tahmini olarak soğurduğu güneş radyasyonu (kWh/m^2),

α_{solar} : yüzeyin güneş ışıınımı soğurma katsayısı,

$Q_{incident_i}$: Ladybug analizinden elde edilen hücresel gelen radyasyon değeri (kWh/m^2).

Beton, ahşap ve metal panel senaryoları için kullanılan temsili katsayılar, Passive Solar Design Strategies: Guidelines for Home Builders dokümanındaki Table K verilerine dayanmaktadır (Passive Solar Industries Council vd., 1991). Ahşap ve metal paneller için değerler, malzemenin tek başına sabit bir katsayısı bulunmadığından dış yüzey rengi ve kaplama karakteri üzerinden tanımlanmıştır. Kullanılan değerler Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4: Geleneksel opak cephe paneli senaryoları için kullanılan temsili güneş ışıınımı soğurma katsayıları.

Cephe paneli senaryosu	Temsil edilen dış yüzey karakteri	Güneş ışıınımı soğurma katsayısı, α_{solar}	Açıklama
Beton panel	Kaplamasız beton yüzey	0,65	Beton yüzey için kaynakta doğrudan verilen değer
Ahşap panel	Orta kahverengi dış yüzey	0,84	Ahşap türüne özgü ölçüm değil; doğal kahverengi dış yüzeyi temsil eden erken tasarım girdisi
Metal panel	Koyu mavi-gri kaplamalı dış yüzey	0,88	Metal türüne özgü ölçüm değil; koyu renk kaplamalı metal cepheyi temsil eden erken tasarım girdisi
Hidrojel esaslı biyokompozit panel	Nem durumuna bağlı değişken yüzey	Sabit katsayı tanımlanmamıştır	Su tutma, buharlaşma ve kuruma süreçlerine bağlı değişken davranış

Tablo 4'te verilen katsayılar, malzemelerin değişmez fiziksel özellikleri olarak değil, karşılaştırmalı yüzey senaryolarını tanımlayan temsili girdiler olarak ele alınmıştır. Ahşap ve metal yüzeylerin davranışı malzeme türü, yüzey işlemi, renk ve kaplama özelliklerine bağlı olarak değişebilmektedir. Hidrojel panel ise nemlenme, su tutma, buharlaşma ve kuruma evrelerine bağlı değişken davranışı nedeniyle sabit bir katsayıyla temsil edilmemiştir; deneysel mikro-çevresel göstergeler üzerinden yorumlanmıştır.

3. Bulgular ve Değerlendirme

Bulgular, deneysel mikro-çevresel göstergeler, gelen radyasyon dağılımı ve geleneksel opak yüzeyler için hesaplanan tahmini soğurulan radyasyon değerleri üzerinden değerlendirilmiştir. Sonuçlar, kesin yüzey sıcaklığı veya bina enerji performansı olarak değil, erken tasarım aşamasında kullanılabilecek karşılaştırmalı göstergeler olarak ele alınmıştır.

3.1. Göreli Işık Geçişi ve Optik Karakter

LDR sensörüyle yapılan ölçümler, farklı panel yüzeylerinin kutu içine geçen ışık miktarını belirgin biçimde değiştirdiğini göstermiştir. Boş açıklık, en yüksek ışık geçişi için referans durum olarak kabul edilmiş ve %100 olarak değerlendirilmiştir. Buzlu asetat, %66,7 göreli ışık geçişiyle yarı geçirgen referans davranışı göstermiştir. Mukavva ve balsa yüzeylerde LDR değeri sıfır olarak okunmuş ve bu yüzeyler opak referanslar olarak ele alınmıştır. Hidrojel panelde ise göreli ışık geçişi %33,3 olarak hesaplanmıştır. Hidrojel yüzeyde nem durumu, malzeme kalınlığı, kabarcıklanma ve kuruma davranışına bağlı olarak homojen olmayan ve ışığı dağıtan bir optik karakter gözlemlenmiştir (Tablo 1; Şekil 3). LDR tabanlı ölçüm mutlak optik geçirgenlik değeri üretmediğinden bulgular göreli ışık geçişi göstergesi olarak yorumlanmıştır.

3.2. Sıcaklık ve Nem Değişimi

Sıcaklık ve bağıl nem ölçümleri, hidrojel panelin referans yüzeylerden farklı bir mikro-çevresel davranış oluşturabildiğini göstermiştir. Boş açıklık, buzlu asetat, mukavva ve balsa yüzeylerinde kutu içi sıcaklık 24,6 °C olarak ölçülmüş ve eş zamanlı oda referansına göre +0,1 °C sıcaklık farkı kaydedilmiştir. Bu yüzeylerde bağıl nem farkı ise +2,3 ile +3,0 yüzde puan arasında değişmiştir. Hidrojel panelin yerleştirildiği durumda kutu içi sıcaklık 23,9 °C'ye düşmüş ve eş zamanlı oda referansına göre -0,6 °C sıcaklık farkı ölçülmüştür. Aynı ölçümde kutu içi bağıl nem %83,1'e yükselmiş; oda referansına göre +17,2'lik bağıl nem farkı elde edilmiştir. Bu bulgular, hidrojel panelin su tutma ve buharlaşma davranışına bağlı olarak deney kutusu ölçeğinde farklı mikro-çevresel koşullar oluşturabildiğini göstermektedir.

3.3. Sayısal Cephe Modeli ve Panel Yerleşimi Kararları

GH ortamında geliştirilen model, deneysel hidrojel verilerinin sabit bir cephe geometrisi üzerinde farklı yüzey karakterleriyle nasıl ilişkilendirilebileceğini göstermektedir. Ladybug tabanlı gelen radyasyon analizi sonucunda ana cephe yüzeyini oluşturan 632 ızgara hücresinin aynı düzeyde güneşlenme etkisine maruz kalmadığı belirlenmiştir. Hücresel gelen radyasyon değerleri 883,16 ile 1198,84 kWh/m² arasında değişmekte; ortalama değer ise 1144,06 kWh/m² olarak hesaplanmaktadır (Şekil 5).

Ladybug analizi, belirli bir malzemenin kesin yüzey sıcaklığını hesaplamak için kullanılmamıştır. Bunun yerine, geleneksel opak panel senaryolarının güneş ışınlamını soğurma eğilimlerini karşılaştırmak amacıyla ortalama gelen radyasyon değeri, Tablo 4'te verilen yüzey katsayılarıyla ilişkilendirilmiştir. Ortalama tahmini soğurulan radyasyon değerleri Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5: Geleneksel opak cephe paneli senaryoları için ortalama tahmini soğurulan radyasyon değerleri.

Cephe paneli senaryosu	Güneş ışıınımı soğurma katsayısı, α_{solar}	Ortalama gelen radyasyon (kWh/m ²)	Ortalama tahmini soğurulan radyasyon (kWh/m ²)
Kaplamasız beton panel	0,65	1144,06	743,64
Orta kahverengi yüzeyle temsil edilen ahşap panel	0,84	1144,06	961,01
Koyu mavi-gri kaplamalı metal panel	0,88	1144,06	1006,77
Hidrojel esaslı biyokompozit panel	Sabit katsayı tanımlanmamıştır.	1144,06	Sabit katsayıyla hesaplanmamıştır.

Hesaplanan değerler yüzey sıcaklıklarını veya bina enerji performansını doğrudan göstermemektedir. Gerçek yüzey sıcaklığı; malzeme katmanları, renk, kaplama, pürüzlülük, ısı özellikler ve dış ortam koşullarına bağlıdır. Ahşap ve metal panel senaryoları, belirli ürünlerin kesin performansını değil, erken tasarım aşamasında kullanılan temsili yüzey karakterlerini ifade etmektedir.

3.4. Hidrojel Panel Entegrasyonu ve Panel Yerleşimi Kararları

Tablo 5'te sunulan tahmini soğurulan radyasyon değerleri, geçirgenliğin ihmal edilebildiği geleneksel opak yüzey senaryoları için hesaplanmıştır. Opak yüzeylerden farklı olarak yarı geçirgen yüzeylerde gelen radyasyonun bir bölümü yüzeyden geçmekte, bir bölümü yansıtılmakta ve bir bölümü soğurulabilmektedir. Hidrojel panel, LDR tabanlı ölçümlerde %33,3 görelî ışık geçişi göstermiştir. Bu nedenle panelin tamamen opak bir yüzey olarak değerlendirilmesi ve beton, ahşap veya metal panellerden biriyle doğrudan eşleştirilmesi uygun değildir.

Bu çalışmada hidrojel panelin görelî ışık geçişi ile deney kutusu ölçeğindeki sıcaklık ve bağıl nem değişimleri ölçülmüş; güneş ışıınımı soğurma, yansıtma ve geçirgenlik katsayıları ise ayrı ayrı belirlenmemiştir. Hidrojel panelin güneş ışıınımı karşısındaki davranışının nicel olarak değerlendirilmesi için bu bileşenlerin farklı nemlenme-kuruma evrelerinde ölçülmesi gerekmektedir.

Deney kutusunda ölçülen -0,6 °C sıcaklık farkı ve +17,2'lik bağıl nem farkı, panelin nemli durumda farklı bir mikro-çevresel davranış ve yerel soğutma potansiyeli gösterebildiğini düşündürmektedir. Ladybug analizi cephede güneş etkisinin yoğunlaştığı bölgeleri, hidrojel ölçümleri ise deney kutusu ölçeğindeki yerel etkiyi tanımlamaktadır. Bu iki veri birlikte değerlendirildiğinde hidrojel panellerin yüksek radyasyon alan bölgelerde öncelikli olarak ele alınabileceği söylenebilir. Ancak bu bölgelerde kuruma hızının artabileceği dikkate alınmalı; panel yerleşimi yeniden nemlendirme gereksinimi, bakım sıklığı ve biçimsel stabiliteyle birlikte değerlendirilmelidir.

3.5. Tasarım Parametreleri ve Sınırlılıklar

LDR tabanlı ışık geçişi testi, mutlak optik geçirgenlik veya lux ölçümü yerine görelî ışık geçişi karşılaştırması sunmaktadır. Sıcaklık ve bağıl nem ölçümleri ise deney kutusu ölçeğinde elde edilmiş mikro-çevresel göstergelerdir. Ladybug tabanlı gelen radyasyon analizi, cephe yüzeyindeki güneşlenme dağılımını okumak amacıyla kullanılmıştır.

Beton, ahşap ve metal panel senaryoları için hesaplanan tahmini soğurulan radyasyon değerleri, kaynaklandırılmış ancak temsili yüzey katsayılarına dayanmaktadır. Bu değerler belirli ürünlerin doğrudan performans verileri veya yüzey sıcaklıkları olarak yorumlanmamalıdır. Ahşap ve metal yüzeylerin davranışı; yüzey işlemi, renk, kaplama ve dış ortam koşullarına göre değişebilmektedir. Hidrojel panel için sabit bir güneş ışıınımı soğurma katsayısı tanımlanmamıştır. Panelin zamana bağıl optik ve termal davranışının ayrıntılı biçimde değerlendirilmesi için farklı nemlenme-kuruma

evrelerinde solar reflektometre, spektrofotometre ve termal kamera ölçümleri ile tekrarlı döngü testlerine ihtiyaç bulunmaktadır.

4. Sonuçlar

Bu çalışma, hidrojel esaslı biyokompozit panellerin ölçülebilir çevresel davranışını radyasyon temelli bir erken tasarım yaklaşımıyla ilişkilendirmiştir. Deney kutusunda boş açıklık, buzlu asetat, mukavva, balsa ve hidrojel panel yüzeyleri karşılaştırılmıştır.

LDR tabanlı ölçümlerde hidrojel panel için %33,3 göreceli ışık geçişi kaydedilmiştir. Sıcaklık ve bağıl nem ölçümlerinde ise eş zamanlı oda referansına göre $-0,6^{\circ}\text{C}$ sıcaklık farkı ve $+17,2'$ lik bağıl nem farkı elde edilmiştir. Bu bulgular, hidrojel panelin nem durumuna bağlı olarak değişken optik karakter ve yerel mikro-çevresel etki oluşturabildiğini göstermektedir.

Ladybug tabanlı analizde 632 cephe hücresi için $883,16-1198,84 \text{ kWh/m}^2$ aralığında gelen radyasyon değeri elde edilmiş; ortalama değer $1144,06 \text{ kWh/m}^2$ olarak hesaplanmıştır. Temsili katsayılar kullanılarak kaplamasız beton panel için $743,64 \text{ kWh/m}^2$, orta kahverengi yüzeyle temsil edilen ahşap panel için $961,01 \text{ kWh/m}^2$ ve koyu mavi-gri kaplamalı metal panel için $1006,77 \text{ kWh/m}^2$ ortalama tahmini soğurulan radyasyon değeri elde edilmiştir. Bu değerler kesin yüzey sıcaklıklarını değil, farklı yüzey karakterlerinin güneş radyasyonunu soğurma eğilimlerini göstermektedir.

Hidrojel panel, değişken nemlenme-kuruma davranışı nedeniyle sabit bir soğurma katsayısıyla temsil edilmemiştir. Deneysel göstergeler, panelin yüksek radyasyon alan cephe bölgelerinde yerel soğutma potansiyeli taşıyan bir alternatif olarak değerlendirilebileceğini düşündürmektedir. Panel yerleşiminde kuruma hızı, yeniden nemlendirme gereksinimi, bakım sıklığı ve biçimsel stabilite dikkate alınmalıdır.

Çalışmanın sonuçları, hidrojel esaslı biyokompozitlerin yalnızca deneysel bir malzeme çıktısı olarak değil, ölçülebilir çevresel davranışı panel kullanımı ve yerleşim kararlarıyla ilişkilendiren veri temelli bir tasarım girdisi olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir.

İlerleyen çalışmalarda daha kontrollü çevresel kabin deneyleri, tekrarlı nemlendirme-kuruma döngüleri, bakım ve yeniden nemlendirme gereksinimlerinin değerlendirilmesi, aydınlık düzeyini nicel olarak ölçen lux metre, ışık geçirgenliğini dalga boyu bazında değerlendiren spektrofotometre, yüzey sıcaklığı dağılımını görselleştiren termal kamera ve tam ölçekli cephe prototipleri üzerinden uzun süreli izleme önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Addington, M., & Schodek, D. (2012). *Smart materials and technologies in architecture*. Routledge.
- Galib, R.H., Tian, Y., Lei, Y. *et al.* Atmospheric-moisture-induced polyacrylate hydrogels for hybrid passive cooling. *Nat Commun* 14, 6707 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41467-023-42548-0>.
- Han, N., & Yazıcı, S. (2026). Environmentally responsive building components: Hydrogel-based material system. *Energy and Buildings*, 364, 117655.
- Jiang, T., Zhao, X., Yin, X., Yang, R., & Tan, G. (2021). Dynamically adaptive window design with thermo-responsive hydrogel for energy efficiency. *Applied Energy*, 287, 116573.
- Loonen, R. C., Trčka, M., Cóstola, D., & Hensen, J. L. (2013). Climate adaptive building shells: State-of-the-art and future challenges. *Renewable and sustainable energy reviews*, 25, 483-493.
- Passive Solar Industries Council, Solar Energy Research Institute ve Charles Eley Associates. (1991). *Passive solar design strategies: Guidelines for home builders*: Patuxent River, Maryland. U.S. Department of Energy.
- Roudsari, M. S., & Pak, M. (2013). Ladybug: a parametric environmental plugin for grasshopper to help designers create an environmentally-conscious design.
- Stuart, M. A. C., Huck, W. T., Genzer, J., Müller, M., Ober, C., Stamm, M., ... & Minko, S. (2010). Emerging applications of stimuli-responsive polymer materials. *Nature materials*, 9(2), 101-113.

Xie, L., Wang, X., Zou, X., Bai, Z., Liang, S., Wei, C., ... & Liu, X. (2023). Engineering self-adaptive multi-response thermochromic hydrogel for energy-saving smart windows and wearable temperature-sensing. *Small*, 19(52), 2304321.

MSTAS 26 “KAPSAM DIŞI”

XX. MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM ULUSAL SEMPOZYUMU

OTURUM 8

YAPAY ZEKÂ ve MİMARİ TASARIM

Halüsinatif Mekanlarda Gerçeklik: Yapay Zekâ ve Otorite Krizi

Büşra Pehlivan¹ ; Selin Çoban² ; Selin Oktan³ ; Serbülent Vural⁴ 
^{1, 2, 3, 4} Karadeniz Teknik Üniversitesi

¹pehlivanbusra53@gmail.com; ²selincoban90@gmail.com; ³oktanselin@gmail.com; ⁴svural@ktu.edu.tr

Özet

Bu çalışma, üretken yapay zekâ araçlarının mimari tasarım süreçlerine entegrasyonu ile ortaya çıkan yeni mekânsal temsil biçimlerini ve mimarlık disiplini içerisindeki otorite krizini incelemektedir. Mimari tasarım bilgisine sahip olmayan kullanıcıların doğal dil işleme (NLP) tabanlı metinsel istemler (prompt) aracılığıyla tasarım yapabiliyor olması, süreci geleneksel tasarım sürecinin sağladığı teknik gerçeklik ve inşa edilebilirlik özelliklerinden uzaklaştırarak yalnızca görsel bir imge üretimine indirgemektedir. Yapay zekanın mimari mekân tasarımında, 3 boyutlu fiziksel uzayı algılayamaması ve bunun sonucunda ürettiği ölçeksiz, statik kurallarına aykırı ve malzemeden kopuk halüsinatif mekânlar; Baudrillard'ın simülakr kavramı ve tektonik teorileri bağlamında ele alınmıştır. Bu çalışmada, referans görselleri tanımlayarak mekân görselleri üretme üzerine yarı deneysel bir yöntem kullanılmıştır. Yazarlar tarafından belirlenen mekân görselleri uzman ve uzman olmayanlar olarak iki temel gruba ayrılmış katılımcılara gösterilmiştir. Katılımcılardan her bir referans görsel için metinsel tanımlama istenmiştir. Bu tanımlamaları kullanarak katılımcılar, metinden görüntüye yapay zekâ araçlarından biri olan Gemini aracını kullanarak referans görselleri oluşturmaya çalışmıştır. Oluşturulan yeni görseller, referans görseller ile "benzerlik", "mimari tutarlılık" ve "uygulanabilirlik" bağlamında yazarlar tarafından karşılaştırılmıştır. Bununla birlikte her iki grup için metin girdileri üzerinden kavram analizi yapılarak karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular, bu teknolojik devrimin mimari tasarım sürecinde uzman ve uzman olmayan kullanıcı arasındaki otoriteyi bozduğunu fakat bu süreç içerisinde mimarın rolünün tamamen yok olmadığını göstermektedir. Mimari eğitim almış katılımcıların teknik, aydınlatma ve mekân organizasyonu konularında uygun terminolojiden faydalandıkları ve bu nedenle üretilen görsellerin referans görsellerle yüksek benzerlik taşıdıklarını göstermiştir. Mimari eğitim almamış katılımcıların ise mekânı tanımlarken daha çok atmosferik özelliklere odaklanmış ve bu nedenle elde edilen çıktılar yapısal olarak bütün görünen ancak referansa daha uzak çıktılar elde ettiklerini göstermiştir. Sonuç olarak mimarın sıfırdan fikir üreten ve tasarım oluşturan kişi konumundan sıyrılarak yapay zekanın sunmuş olduğu sonsuz ancak teknik gerçeklikten ve inşa edilebilirlikten uzak veriler arasından filtreleme yapan ve bunları yapısal bir mantığa oturtarak fiziksel dünyaya uyarlanmasını sağlayan bilinçli bir seçici, tasarımcı rolüne evrilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Üretken Yapay Zekâ, Halüsinatif Mekân, Mimari Tektonik, Otorite Krizi.

Reality in Hallucinatory Spaces: Artificial Intelligence and the Crisis of Authority

Büşra Pehlivan¹ ; Selin Çoban² ; Selin Oktan³ ; Serbülent Vural⁴ 
1, 2, 3, 4 Karadeniz Technical University

¹pehlivanbusra53@gmail.com; ²selincoban90@gmail.com; ³oktanselin@gmail.com; ⁴svural@ktu.edu.tr

Abstract

This study examines the new forms of spatial representation and the crisis of authority within the discipline of architecture that arise from the integration of generative artificial intelligence tools into architectural design processes. The ability of users without architectural design knowledge to design through textual prompts based on natural language processing (NLP) reduces the process to merely the production of a visual image, distancing it from the technical reality and constructability features provided by traditional design processes. The inability of artificial intelligence to perceive 3D physical space in architectural spatial design, and the resulting scale-less, static, and material-detached hallucinatory spaces, are discussed within the context of Baudrillard's concept of simulacra and tectonic theories. This study employs a semi-experimental method for generating spatial images by identifying reference images. The spatial images determined by the authors were shown to participants divided into two main groups: experts and non-experts. Participants were asked to provide a textual description of each reference image. Using these descriptions, participants attempted to create reference images using Gemini, an artificial intelligence tool that converts text to image. The newly generated visuals were compared by the authors with reference visuals in terms of "similarity," "architectural consistency," and "applicability." Furthermore, a conceptual analysis was conducted on the textual inputs for both groups. The findings indicate that this technological revolution has disrupted the authority between expert and non-expert users in the architectural design process, but that the architect's role has not been completely eliminated. Participants with architectural training utilized appropriate terminology regarding technical aspects, lighting, and spatial organization, resulting in visuals with a high degree of similarity to the reference visuals. Participants without architectural training, however, focused more on atmospheric characteristics when defining the space, resulting in outputs that appeared structurally cohesive but were further removed from the reference. In conclusion, the architect is evolving from a person who generates ideas and creates designs from scratch to a conscious selector and designer who filters the infinite data offered by artificial intelligence—data that is far from technical reality and buildability—and adapts this data to the physical world by placing it within a structural logic.

Keywords: Generative Artificial Intelligence, Hallucinatory Spaces, Architectural Tectonics, Crisis of Authority.

1. Giriş

Mimarlık disiplini geleneksel tasarım sürecinde fiziksel ya da bilgisayarlı çizim/tasarım araçlarıyla eskiz, plan, kesit ve görünüş gibi teknik temsillerle yürütülmüştür. Kolarevic (2003), 21. yüzyıl itibarıyla sayısal araçların ortaya çıkmasıyla birlikte sayısal ortamda hesaplanabilen herhangi bir formun üretilmesinin mümkün olduğunu bildirmiştir (Çırpı & Öner, 2021). Bu durum, dijitalleşme sürecinde mimari tasarımın soyutlaşmasına neden olmuştur. Mario Carpo (2017) ise mimarlığın 21. yüzyıldaki gelişimini veriye dayalı “İkinci Dijital Dönüşüm (The Second Digital Turn)” olarak tanımlamıştır. Nicholas Negroponte'nin 1970 yılında “Mimarlık Makinesi” kavramı olarak ortaya attığı, mimarlık alanında da denemeleri yapılan insan-makine ortaklığı çalışmaları (Negroponte, 1970; Frazer, 1995) kullanıcının makine yardımıyla kendi mekanını tasarlaması tartışmalarını gündeme getirmiştir. Bu fikir, üretken yapay zekâ araçları (Midjourney, DALL-E, Stable Diffusion vb.) ile günümüzde mümkün hale gelmiştir. Bu yapay zekâ araçlarının kullanımının yaygınlaşması mimari tasarımı ifade ederken kullanılan dilde teknik terimler yerine betimsel ifadeler tercih edilmesine sebep olmuştur.

Mimarlık pratiğinde kurallar ve nedenselliğin yanı sıra verilerin işlenmesi de bir tasarım süreci parametresi olarak yer almaya başlamıştır (Carpo, 2017; Leach, 2022). Bu dönemde üretken yapay zekâ modelleri mimari tasarımda önemli yer edinmiştir. Antoine Picon (2010), mimari tasarım sürecini etkileyen hızlı teknolojik ilerlemeler ve sağladığı yeni olanakları mimarlık pratiğinde bir devrim olarak nitelendirmektedir. Bu devrim, tasarım sürecinde önemli faydalar sağlamasına karşın mimari tasarımın bazı temellerini tehlikeye sokmaktadır (Picon, 2010). Yapay zekanın insan gibi düşünerek tasarlayamadığını vurgulanmaktadır (Leach, 2022; El Moussaoui, 2026). Yapay zekâ araçları, eğitildikleri büyük veri setlerinde yer alan kavramsal ve estetik görsel verilerini bir örüntü tanıma sürecinden geçirerek işler. Bu işlem sırasında kavramları istatistiksel olarak birbirleriyle ilişkilendirerek sonuç üretir. İstatistiksel olarak doğru olan bu sonuçlar göze güzel ve inandırıcı görünse de gerçekte hatalı sonuçlar olabilmektedir. Verilerde yer alan boşluklar da hatalı sonuçların üretilmesine neden olabilmektedir. Bu gerçek olmayan sonuçlara halüsinasyon denilmektedir (Ji vd., 2023). Bilgisayar bilimlerinde bir hata olarak görülen ve makinenin çözmesi beklenen bu halüsinasyonlar (Ji vd., 2023), mimaride yerçekiminden, malzemeden ve inşai gerçeklikten uzak, gerçeküstü dijital imgeler doğurur (del Campo vd., 2023). Bunun nedeni ise yapay zekanın üç boyutlu mekânı algılayamaması, eğitilirken gördükleri iki boyutlu görsellere dayanarak üç boyutlu nesneleri halüsinatif şekilde üretmesidir (del Campo vd., 2022). Baudrillard (2003), bu durumu simülasyon olarak tanımlamıştır. Simülasyon, bir kökeni olmayan gerçeğin modeller aracılığıyla türetilmesidir; bir başka deyişle simülakr, kendi başına bir gerçeklik halinde olan asıl modelin kopyasıdır. Veri yığınlarının oluşturduğu bu yeni düzende fiziksel gerçeklikten kopukluklar olabilmektedir. Fakat mimarlık teorisi için inşa edilebilirlik önemli bir parametredir (Hartoonian, 1994; Allen, 2009). Mimarlık teorisinde inşai gerçekliğin temelini oluşturan tektonik kavramı, Frampton'ın (1995) ifadesiyle salt bir taşıyıcı sistem kurmanın ötesinde; mimari formun, yerçekimi, malzeme ve yapım mantığıyla kurduğu kopmaz bağıdır. Dolayısıyla, teknik bilgisi olmayan kullanıcı ile fizik kurallarını tanımayan yapay zekâ bir araya geldiğinde mimari ve mimarlığın yapısal ve maddesel gerçekliğini devre dışı bırakabilecek yanılgılı ya da mimarlığın yapısına aykırı halüsinatif sonuçlar ortaya çıkabilmektedir. Yapay zekanın ürettiği bu halüsinasyonun rasyonel bir mimari gerçekliğe nasıl evrileceği konuları mimarlık paradigması açısından önemlidir.

Geleneksel mimari süreçlerde proje oluşturma estetik, teknik ve fiziksel problemlerin eşzamanlı çözüldüğü; yıllar süren teknik eğitim ve bilgi gerektirir (Lawson, 2005). Bu eğitim geçmişi ve deneyimlere sahip kişiler; mekânsal ilkeleri kavrayabilen ve uygulayabilen (Cross, 2004) uzman kişiler olarak tanımlanır. Fakat gelişen teknoloji sayesinde mimari eğitimi olmayan kişiler, yalnızca istem metinleri kullanarak estetik ve yüksek çözünürlüklü mekân görselleri üretebilmektedir (An, 2025; Jiang, Xiao, Hurley, & Liu, 2024). Bu kişiler literatürde otomasyon yanılgısı olarak adlandırılan bir durumun içine girerek yapay zekanın üretimlerini doğrulamaya gerek duymadan içgüdüsel olarak kabul etme eğilimindedirler (Parasuraman & Manzey, 2010). Bu noktada mimar ve mimari eğitimi,

bilgisi olmayan kişilerin yapay zekâ modeline tarif etme ve modelin bu tarife vereceği sonuç arasındaki fark, uzmanlık kavramının tanımını etkilemektedir. Ayrıca üretken yapay zekâ araçlarının kullanılması, yapay zekanın tasarımcının niyetini yansıtan bir araç mı yoksa tasarımcıyı etkileyen bir ortak mı olduğu sorusunu gündeme getirmektedir (Günaydın Donduran, 2024; Azhar, 2026). Mimarın proje üretim ve sunum süreçlerindeki teknik denetiminin yerini yapay zekanın kara kutusuna ve mimari bilgisi olmayan kullanıcının inisiyatifine bırakması, eserin asıl yaratıcısının kim olduğuna dair bir müelliflik tartışmasını tetiklemektedir (Capro, 2017; Leach, 2022). Bu durum mimarın otoritesini sarsmaktadır. Dolayısıyla alan uzmanlığının yüksek kaliteli, teknik olarak doğru görselleştirmeler üretmede kritik bir faktör olmaya devam edip etmediği ve buna bağlı olarak mimarın bu yeni düzendeki yeri ve görevleri tartışılmaktadır.

2. Amaç ve Kapsam

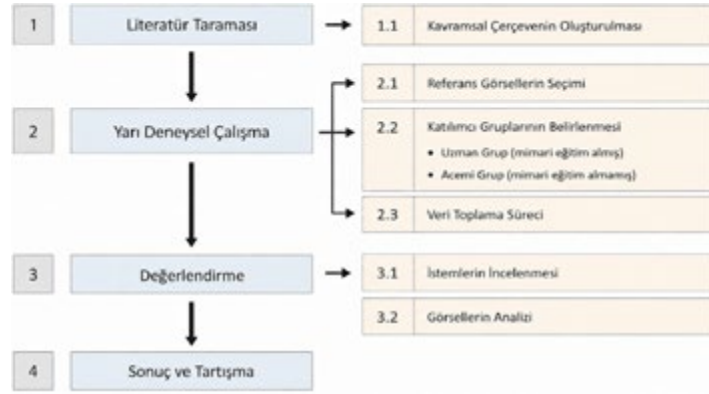
Bu çalışmanın amacı, mimari bilgi birikiminin yapay zekâ ile üretilen görsellerde niyete uygunluk, mimari tutarlılık ve tektonik uygulanabilirlik üzerindeki etkilerini ortaya koymaktır. Bununla birlikte mimarlık alanında uzman olan kişiler ile olmayan kişilerin üretken yapay zekâ araçları kullanılarak ürettikleri halüsinatif zekâ imgelerinin ortaya çıkardığı otorite krizinin incelenmesi amaçlanmıştır. Yapay zekanın öngörülemez üretimlerinden elde edilen çıktıların niyet tutarlılığının ve mekânsal gerçekliğinin incelenmesi hedeflenmiştir. Çalışma, halüsinatif mekân üretiminin sonuçlarını ve bu sonuçların mimarın rolünü yeniden şekillendiren işbirlikçi yöntem olması durumunu sorgulamakta, mimarın tasarımcı kimliğinden çıkıp bir yazar ve düzenleyici kimliğine sahip olduğu bu çağda mesleğin geçerliliğini tartışmaya açmaktadır.

Çalışma, mimarlığın geleneksel kurallarının doğal dil işleme (NLP) tabanlı istem (prompt) ile görsel üretimi kapsamında sınırlandırılmıştır. Bu kapsamda, kişilerin hedef görsele ulaşmak için istem oluşturma stratejilerini karşılaştırmak ve bu farklılıkların çıktılar üzerindeki etkilerini ölçmek hedeflenmiştir. Hedef doğrultusunda belirli referans görsellerle çalışacak kontrollü bir deney grubu kurulmuştur. Çalışmada "uzman" ifadesi; mimarlık eğitimi almış, mekân ve tektonik hakkında kuramsal ve teknik bilgi sahibi kişileri tanımlamaktadır. "Uzman olmayan" ifadesi ise mimarlık eğitimi almamış ancak üretken yapay zekâ modelleriyle istem tabanlı mekân görselleri üretebilen kişileri tanımlamaktadır.

3. Yöntem

Çalışmanın ilk aşamasında otorite, yapay zekâ halüsinasyonlarının mekânsal karşılığı, doğal dil işleme ve istem kavramları literatür üzerinden incelenmektedir. İkinci aşamada, geleneksel otoritenin yerini dijital otoriteye bırakıyor olması bağlamında uzman ve uzman olmayan kişilerin mekân tanımlamalarında ve metinden görüntü (text-to-image) üretme potansiyellerinde alan uzmanlık bilgisinin etkinliğini saptamak amacıyla yarı deneysel, gruplar arası araştırma yöntemi (Campbell & Stanley 1963, s. 34; Shadish vd., 2002, s. 13-14) benimsenmiştir.

İş akış şemasında belirtildiği üzere (Şekil 1) katılımcıların referans bir görsel üzerinden ürettikleri çıktılar; yazarlar tarafından nicel olarak analiz edilmiştir (Groat & Wang, 2013). Değerlendirme; referans görsele benzerlik (niyete uygunluk), mimari tutarlılık ve tektonik/işlevsel uygulanabilirlik metrikleri üzerinden yapılmıştır.



Şekil 1. İş akış şeması

3.1. Örneklem Grubu

Çalışma toplam 16 kişi ile yürütülmüştür. Katılımcılar iki ana gruba ayrılmıştır:

- Grup 1 (uzmanlar): Mimarlık eğitimi almış veya almaya devam eden, mimari mekân tektoniğine hâkim 8 kişi.
- Grup 2 (uzman olmayanlar): Mimarlık veya tasarım eğitimi almamış, farklı meslek gruplarına mensup 8 kişi.

Katılımcıların dijital okur-yazarlığının ve temel bilgisayar becerilerinin çalışma sonucunu olumsuz etkilememesi adına her iki gruptaki katılımcıların da metinden görüntüye yapay zekâ araçları hakkında asgari düzeyde deneyime sahip olması ön koşul olarak belirlenmiştir.

3.2. Referans Görseller

Çalışma kapsamında katılımcılara üç farklı referans görsel (Şekil 2) sunulmuştur. Bu görseller seçilirken halihazırda inşa edilmiş olması, karmaşık ve kalabalık olmayan sade bir mimari dile sahip proje fotoğrafları olmasına dikkat edilmiştir. Çalışmanın tanımlama açısından farklı özelliklere sahip örnekler ile yürütülmesi hedeflenmiştir.



Şekil 2. Seçilen görseller (1) Emre Arolat Mimarlık/Üç Villa (Jodidio, 2020) konut iç mekânı; (2) Cavill Architects/ofis binası tasarımı, konut dışı iç mekân atrium görseli (Cavill Architects, 2017); (3) Cavill Architects/ofis binası tasarımı bina cephesi görseli (Cavill Architects, 2017).

3.3. Veri Toplama Süreci

Çalışmanın bu bölümünde katılımcılardan veri toplama süreci gerçekleştirilmiştir. Bu sürecin üç temel aşamada gerçekleşmesi kurgulanmıştır:

- Aşama 1: Metin istemi oluşturma

Bu aşamada katılımcılardan kendilerine iletilen referans görsellerini betimleyen metinsel verileri oluşturmaları beklenmektedir. Katılımcıların doğal betimleme yeteneklerini gözlemleyebilmek adına bu süreçte onlara herhangi bir kısıtlama uygulanmamıştır.

- Aşama 2: Görsel üretimi

Katılımcıların oluşturdıkları metinler ile Gemini yapay zekâ dil modelini ve onunla entegre çalışan Nano-banana 2 aracını kullanarak görsel üretimi yapmaları istenmiştir.

Standardizasyon sağlamak amacıyla bu süreçte katılımcılara şu kısıtlamalar uygulanmıştır:

- Referans görseli doğrudan sohbette kullanmak (görselden görsele üretim) yasaktır.
- Referans görsele ulaşmak için modeli yönlendirecek düzenleme istemi sayısı en fazla 5 olacak şekilde sınırlandırılmıştır.
- Üretilen ara görseller sonraki adımda yapılacak revize için referans olarak kullanılabilir.

- Aşama 3: Değerlendirme

Katılımcıların sohbetlerinden elde edilen bilgiler iki farklı boyutta incelenmiştir:

- İstem analizi: Katılımcıların kullanmış olduğu metinsel ifadeler uzmanlık durumlarına göre karşılaştırılmış ve mimari terim kullanım yoğunluğu incelenmiştir.
- Görsel çıktı analizi: Katılımcıların ürettiği görseller yazarlar tarafından referans görsele benzerlik, mimari tutarlılık ve tektonik/işlevsel uygulanabilirlik olarak üç ölçüt bağlamında değerlendirilmiştir. Oluşturulan görsel ve referans görsel arasındaki farklılıklar ısı haritası yöntemiyle görselleştirilmiştir.

4. Bulgular ve Değerlendirme

Yapılan deneyde elde edilen sonuçlar yazarlar tarafından incelendiğinde; katılımcıların referans görselleri betimlemek için ürettikleri metinsel istemler; dil yapısı, terminoloji yoğunluğu ve mekânsal kurgu biçimleri açısından farklılaştığı ve halüsinatif üretimler ortaya çıktığı her iki grupta da gözlemlenmiştir. Uzman katılımcıların, ölçek ve teknik hataları, malzeme yanlışları, mimari uyumsuzlukları fark ederek revize istemlerle görsellere müdahale edebildikleri; uzman olmayanların ise genellikle hataları fark edemeyerek, görselleri başarılı buldukları ya da daha çok renk, atmosfer, mobilya gibi detaylara takılarak kısır döngüye girdikleri tespit edilmiştir. Uzman ve uzman olmayan gruplara ait istem örnekleri üzerinden bu farklılıklar ayırt edilebilmektedir.

*"... Merdiven **tek kollu** ve uzunlamasına gitmektedir. **Galeri boşluğunun** üstünde korkuluk yok cam direkt galeri boşluğuyla bitişik. Tv kısmı farklı bir odada değil mutfak duvarının devamında (kompozisyonda sağ tarafta) ... konumsal olarak değişecek yani **evye** ve **bant pencere** duvara yaslanan tezgâhta olurken arka kısımda **tezgâh üstü dolapları** olacak... kolon direkt o iki mekânı ayırıyor. **Mutfak 6/4 alanı kaplarken merdiven ve hol 6/2 kısmı doldurmaktadır.** Merdivenin arkasındaki cam, koridorun sonu gözükmemektedir (**perspektif yüzünden**). Bu dediklerimi baz alarak bu görseli revize et."*

*"Merdiven şekli hemen hemen doğru onu sadece sağ kısımda göster üst tarafın **perde görünümü daha az ve daha koyu renk olsun** alt tarafta merdiven yanındaki camı sil ... o çizdiğin merdiven yanına bir kolon çiz yanında dediğim şekilde. Karşı da alt üst dolap; sol tarafta alta dolap, üste pencere, hemen ön kısımda kalan **L kısmı dön** ama bunlar birleşik olsun. Sonra **sandalye koy diğer sağ duvar yanlış o şekilde istemiyorum.** Sana dört duvar betimleme verdim kalan sağ kısım da sol kısım gibi baktığımda bütün duracak şekilde **aynı şekilde çiz**"*

Örneklerde de görüldüğü üzere uzman grup, eğitim süreçlerinde içselleştirdikleri teknik kavramları istem diline doğrudan yansıtmaktadır. Bu katılımcılar mekânı plan, kesit ve cephe mantığıyla okuyarak daha net mekânsal betimlemeler yapmışlardır. Örneğin mekânsal ve yapısal açıdan uzman katılımcılar istemlerinde 'galeri boşluğu', 'tonozlu tavan', 'double-height volume', 'taşıyıcı kolon', 'döşeme', 'rıht', 'polished concrete floor', 'ahşap küpeşte' gibi tanımlara yer verirken; uzman olmayan

katılımcılar ‘üst kısmı ters u şeklinde’, ‘içe dönük bir şey’, ‘kanatlara benzeyen nesneler’, ‘gri bir şey’, ‘güzel yapılar’ gibi tanımlar kullanmışlardır. Uzman grup kullandıkları ifadeler ile yapay zekanın hacimsel kurguyu daha doğru üretmesini sağlarken uzman olmayan grubun parçalı biçimde istemlerde bulunması ve dekoratif detaylara odaklanması yapay zekanın referans görselden daha uzak ve halüsinatif sonuçlar üretmesine neden olmuştur. Ayrıca revizyon aşamasında mimarlar genelde belirli daha az unsuru ele alarak kademeli teknik düzeltmeler yaparken diğer grup tüm sahneyi yeniden tarif etme veya ‘şunu değiştir’, ‘böyle istemedim’, ‘bunu beğenmedim’ gibi bir tutum takınmıştır.



Şekil 3. Uzman gruba ait (katılımcı 16) 1 numaralı referans görseli en yakın sonuç ve ısı haritası.

Görsel kompozisyon ve stil olarak referans görseli büyük oranda benzemektedir. Isı haritasına göre ama mekân sınırları sabit tutulmuş ancak malzeme ve mobilya konusunda belirgin farklılıklar oluşmuştur. Tektonik uygulanabilirlik açısından asma kat döşemesini desteklemek üzere kullanılmış brüt beton kolonun eklenmesi olumlu bir yapısal güçlendirme olmuştur. Ancak bu brüt beton uygulaması mimari tutarlılık açısından negatif bir etki yaratmıştır.



Şekil 4. Uzman gruba ait (katılımcı 8) 1 numaralı referans görseli en uzak sonuç ve ısı haritası.

Görsel kompozisyon ve perspektif açısından ciddi farklılıklar göstermektedir. Dış cephede artırılarak mekân genişletilmiştir. Özellikle zemin katta mekân baştan kurgulanmıştır. Aynı zamanda referans görselde yer almayan pencereler, üretilen görselde yapıyı dışa dönük hale getirmiştir. Tektonik açıdan kütleli beton merdiven yerine hafifletilmiş merdiven sistemi kullanılması mekânın işlevselliğine zarar vermemiştir. Asma katı taşıyan çelik kolon detayı bu alanın yapısal olarak dayanıklı hale getirilmesi için uygulanmıştır. Bu uygulama ile mekânsal zenginlik de sağlanmıştır.



Şekil 5. Uzman olmayan gruba ait (katılımcı 4) 1 numaralı referans görseli en yakın sonuç ve ısı haritası.

Görsel diğerlerinde olduğu gibi kompozisyon konusunda referans görseli yakalamıştır. Tipoloji ve galeri kurgusu korunmuş ancak ölçekte sorunlar ortaya çıkmıştır. Mimari tutarlılığı yapısal açıdan

genel olarak sağlanmıştır. Mobilya ve merdiven konumlandırmasında bazı değişiklikler yer almıştır. İşlevsel açıdan asma katta yoğunlaşan perdeler ve eklenen doğramalarla daha mahrem bir hale getirilerek yatak odası olduğu vurgulanmıştır.



Şekil 6. Uzman olmayan gruba ait (katılımcı 5) 1 numaralı referans görsele en uzak sonuç ve ısı haritası.

Görselde yapı dış sınırları korunmuştur. Bununla birlikte asma kat planlaması da uygulanmıştır. Ancak referans görsele göre malzeme, detaylandırma ve mekân atmosferi açısından zayıf kalmıştır. Minimalist dil sayesinde mimari tutarlılık elde edilmiş olsa da referans geometrisine katı bir bağlılık sağlanmamıştır. Merdivenlerin ahşap ve yüzer merdiven tasarımı olarak kullanılması mekânsal farklılık oluşturmuştur. Aynı şekilde tamamı siyah mermerden oluşturulmuş tezgâh da bu tutumu devam ettirmiştir. Birbirini kesen merdiven ve anlamsız duvar boşlukları ile mimari tektonik açısından zayıf bir mekân görseli elde edilmiştir.



Şekil 7. 2 numaralı referans görsele en yakın (katılımcı 16, uzman) ve en uzak (katılımcı 5, uzman olmayan) sonuçlar.

Solda yer alan görsel sağdaki görsele kıyasla mimari dil açısından referansa oldukça benzerlik göstermektedir. Soldaki görsel tonozlu tavan, tepe ışıkları, merdiven biçimi ve merdivenlerin ahşap korkulukları sayesinde referans görselle yüksek benzerlik gösterirken sağdaki görsel yalnızca tonozlu tavanı ile benzerlik sağlamıştır. Mimari tutarlılık açısından soldaki görselde beyaz duvarlar, doğal ışık dağılımı, apliklerin kullanımı referans görseli takip etmiştir. Aksine sağdaki görselde insan figürü ön planda tutulmuştur. Tektonik açıdan soldaki görselde merdivenler duvara asılı ve ince plakalarla hafif bir strüktüre sahip ve ahşap korkuluklar kapalılık oluşturmadan güvenlik sağlar. Sağdaki görselde ise referanstan tamamen farklı çift kollu merdiven oluşturulmuştur. Bu durum her ne kadar kendi içinde tutarlı gösterse de referansa tamamen zıttır.



Şekil 8. 3 numaralı referans görselle en yakın (katılımcı 13, uzman) ve en uzak (katılımcı 7, uzman) sonuçlar.

Soldaki üretim üç katlı güneş kırıcılara sahip cephe, pilotiler üzerinde duran zemin kat; kemerli ve geri çekilmiş cam bölüm ile birlikte referans görselle tutarlı görünmektedir. Mimari açıdan tutarlı görünmektedir. İşlevsel açıdan kusur görünmemektedir. İsteminde ‘Clean geometric forms’ tanımı tutarlı olmasını etkilemiştir. Sağdaki üretim uzman bir katılımcı tarafından oluşturulmasına rağmen referansla hiçbir benzerliği yoktur. Mimari açıdan tutarlı değil ve tam olarak yapay zekanın eğitildiği verilerden istatistiksel olarak oluşturduğu bir halüsinasyon olarak adlandırılabilir. Ofis yapısı için işlevsel görünmemektedir. Tektonik açıdan uygulanabilirliği sorgulanabilecek bir ürün ortaya çıkmıştır. Bunu istemde kullanılan ‘frank gehry tasarımları gibi’ ifadesi büyük oranda etkilemiştir.

5. Sonuç ve Tartışma

Sanat, mimari, mühendislik gibi alanlardaki son araştırmalar, üretken yapay zekâ araçlarının tasarım sürecine erişimi kolaylaştırdığını, verimliliği arttırdığını, mimar/tasarımcı olmayan kişilerin estetik olarak tatmin edici görseller üretmesine olanak tanıdığını göstermektedir (Jiang vd., 2026). Bu durum geleneksel tasarım süreçlerindeki mimarın yeni düzendeki yerini sorgulatmaktadır. Buna karşın araştırmalar ve yapılan çalışma sonucunda uzman grubun referans görselle benzerlik, mimari tutarlılık ve işlevsel uygulanabilirlik bütününde uzman olmayan gruba kıyasla daha iyi performans sergilediğini ve kullanıcının uzmanlık düzeyinin sonuçları şekillendirmede hala önemli bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Uzmanlar, referansa daha uygun, tasarım anlamında bütüncül ve daha yüksek kaliteli görselleştirmeler üretmek için alan bilgilerini kullanma eğilimindeyken, alan bilgisine sahip olmayan kişiler yapay zekâ yardımıyla faydalanabilir fakat çıktıları eleştirel olarak değerlendirme becerisine sahip değildirler (Zhang vd., 2023; Yun, 2025; Haddad vd., 2025).

Yapay zekâ verileri istatistiksel olarak bir araya getirirken, beslendiği verideki boşluklar nedeniyle veya istemi doğru algılamayarak halüsinatif sonuçlar üretebilmektedir. Antoine Picon’un (2010) bahsettiği teknolojik devrimle birlikte gelen başka bir risk, mimarlık üretimlerinin tektonik köklerden kopması söz konusudur. Uzman olmayan kişilerin istem yoluyla üretimlerinde birtakım sorunlar ortaya çıkmaktadır (Picon, 2010). Örneğin yapay zekâ modellerinin fizik kuralları konusunda bilgisizliği statik açıdan imkânsız yapılar oluşturmaktadır. Bir başka sorun ise yapay zekâ üretimlerinin ölçeksiz oluşudur. Bu durum yapay zekanın bir insan figürünü veya bir gökdelen görselini aynı piksel mantığıyla oluşturmasından kaynaklanmaktadır. Bu da mekânın aslında insan ölçeğinden uzaklaşmasına veya ergonomiden yoksun hale gelmesine sebep olmaktadır. Sonuç ürünlerdeki farklılık tek bir değişkenden ibaret değildir; bilişsel çerçeve, eğitim birikimi ve deneyimle şekillenen derin bir dil pratiğine işaret etmektedir. Bu hataları düzeltmek grup fark etmeksizin yapay zekâyla nasıl iletişim kurması gerektiğini bilmeyen kullanıcı için zorlayıcı olmaktadır. Fakat mimar yapay zekanın halüsinatif çıktısını mimar olmayan kullanıcıya kıyasla teknik bilgisi dahilinde bilinçli bir şekilde eleştirip düzeltmeler yapabilmektedir. Yaptığı düzenlemeler yapay zekâ tarafından daha düzgün algılanıp uygulanabilmektedir. Hala hatalı olan kısımları mimar eğitimi, araç ve program bilgisiyle düzenleyebilir. Böylece niyete uygun, mimari açıdan tutarlı ve tektonik açıdan uygulanabilir sonuçlar ortaya çıkartabilir. Benzer istemler kullanılsa bile hangi kısmın ne ölçüde değiştirilip düzeltileceğinin kararını yine teknik bilgisi olan biri verebilir.

Çalışmanın en önemli katkısı; mimarının sorumluluk ve rolündeki değişimlerin bulgularla desteklenmesidir. Mimarın rolünün önemsizleşmediği aksine bir evrimleşme gösterdiği yönündedir. Bu mimarın bilinçli olarak ürettiği sonuçların müellifi olduğunu kanıtlar niteliktedir. Yapay zekanın üretebildiği sonsuz veri çeşitliliği ve halüsinasyon kümesi karşısında mimar artık bir tasarım üreticisi olarak değil bilinçli bir seçici, düzenleyici olarak görev almaktadır.

İlerideki çalışmalarda örneklem grup büyütülerek farklı deneyim düzeylerine ve disiplinlere yayılması, bulguların genellenebilirliğini artıracaktır. Bunun yanı sıra farklı metinden görüntüye modellerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi ve değerlendirme sürecine ısı haritası analizinin sistematik biçimde

entegre edilmesi, sonuçların uzman bir jüri tarafından değerlendirilmesi halüsinatif mekân olgusunun hem niceliksel hem niteliksel boyutlarını daha kapsamlı biçimde ortaya koyacaktır.

KAYNAKLAR

- Allen, S. (2012). *Practice: architecture, technique and representation*. (2. bs.). Routledge.
- Azhar, J. (2025). Algorithmic Intimacy: AI Co-authorship and Student Designer identity in Architectural Education. *International Journal Mardin Stuides*, 6(2), 51–79. <https://doi.org/10.63046/ijms.1822048>
- Baudrillard, J. (2003). *Simülakrlar Ve Simülasyon* (O. Adanır, Çev.). Doğu Batı Yayınları. (Orijinal Eserin Basım Tarihi 1981).
- Carmo, M. (2017). *The Second Digital Turn: Design Beyond Intelligence*. The MIT Press.
- Cavill Architects. (2017, September 25). Byres Street Commercial Architecture. Cavill Architects. Retrieved May, 12, 2026 from <https://www.cavillarchitects.com/projects/byres-st/>
- Del Campo, M., Manninger, S., & Carlson, A. (2022). Artificial Intelligence and Architecture. *Architectural Science Review*.
- Del Campo, M., Manninger, S., & Carlson, A. (2023). Hallucinations, Errors, And Unexpected Implications of AI In Architecture. *International Journal of Architectural Computing*, 21(2), 250-265. <https://doi.org/10.1177/14780771231169004>
- El Moussaoui, M. (2026). *Architecture and AI: Controlling the Hallucination* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003637691>
- Ezel Çırpı, M., & Öner, D. (2021). Mimarlıkta Bilgisayar Destekli Fabrikasyon Teknolojileri ve Kullanım Yaklaşımları. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 9(2), 943-956. <https://doi.org/10.29130/dubited.799283>
- Frampton, K. (1995). *Studies In Tectonic Culture: The Poetics of Construction in Nineteenth and Twentieth Century Architecture*. The MIT Press.
- Frazer, J. (1995). *An Evolutionary Architecture*. Architectural Association.
- Groat, L. N., & Wang, D. (2013). *Architectural Research Methods* (2. Bs.). John Wiley & Sons.
- Gunaydin Donduran, C., Kasali, A., Dogan, F., (2024). Artificial Intelligence as a Pedagogical Tool for Architectural Design Education, *Journal of Design Studio*, V.6, N.2, pp 219- 229
- Haddad, F. G., Jang, K. M., & Duarte, F. (2025). User-centered evaluation of visual generative AI for city design: An exploratory technology acceptance model analysis. *Cognition, Technology & Work*. <https://doi.org/10.1007/s10111-025-00816-7>
- Hartoonian, G. (1994). *Ontology of construction: On nihilism of technology in theories of modern architecture*. Cambridge University Press.
- Högemann, M., Betke, J., & Thomas, O. (2025). What you see is not what you get anymore: A mixed-methods approach on human perception of AI-generated images. *Frontiers in Artificial Intelligence*, 8, Makale 1707336. <https://doi.org/10.3389/frai.2025.1707336>
- Ji, Z., Lee, N., Frieske, R., Yu, T., Su, D., Xu, Y. & Fung, P. (2023). Survey Of Hallucination in Natural Language Generation. *ACM Computing Surveys*, 55(12), 1-38. <https://doi.org/10.1145/3571730>
- Jiang, H., Xiao, Y., Hurley, R., & Liu, S. (2026). The impact of generative AI on architectural conceptual design: Performance, creative self-efficacy and cognitive load. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2601.10696>
- Jodidio, P. (2020,). Üç Villa. EEA-EMRE AROLAT ARCHITECTURE. Retrieved May 13, 2026, from <https://emrearolat.com/project/uc-villa/>
- Khan, A., Chang, S., & Chang, H. (2025). Generative AI approaches for architectural design automation. *Automation in Construction*, 180, Makale 106506. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106506>
- Kolarevic, *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*. London: Spon Press, 2003.
- Leach, N. (2022). *Architecture In the Age of Artificial Intelligence: An Introduction to AI For Architects*. Bloomsbury Publishing.
- Negroponte, N. (1970). *The Architecture Machine*. The MIT Press.
- Ozkan, O., & Dogan, F. (2013). Cognitive strategies of analogical reasoning in design: Differences between expert and novice designers. *Design Studies*, 34(2), 171–192.
- Parasuraman R, Manzey DH. Complacency and bias in human use of automation: an attentional integration. *Hum Factors*. 2010 Jun;52(3):381-410. doi: 10.1177/0018720810376055.
- Picon, A. (2010). Digital Culture and Architecture. In *ACADIA 10: LIFE In:formation, On Responsive Information and Variations in Architecture* (Pp. 24–25). Acadia.

- Shadish, W. R., Cook, T. D., & Campbell, D. T. (2002). *Experimental and quasi-experimental designs for generalized causal inference*. Houghton Mifflin Company.
- Yun, B. (2025). Comparative analysis of user experience (UX) in generative AI-based design tools: Focusing on Adobe Firefly, Canva Magic Design, and Figma AI. *Korea Institute of Design Research Society*. <https://doi.org/10.46248/kidrs.2025.3.532>
- Zhang, C., Wang, W., Pangaro, P., et al. (2023). Generative image AI using design sketches as input: Opportunities and challenges. *Creativity & Cognition*. <https://doi.org/10.1145/3591196.3596820>

Yapay Zekâ Tabanlı Metinden 3B Model Üretim Araçlarının Karşılaştırmalı Değerlendirilmesi

Önder Aras¹ ; Faruk Can Ünal² 
^{1,2}Yeditepe Üniversitesi

¹onder.aras@yeditepe.edu.tr; ²farukcan.unal@yeditepe.edu.tr

Özet

Metin tabanlı 3B model üretim araçları mimari tasarım süreçlerine entegre olarak iç mekân veya dış mekâna ilişkin nesne kategorilerinde kullanıma hazır modeller üretebilmektedir. Bu araçların mimari ölçütler açısından karşılaştırmalı değerlendirilmesine yönelik yerleşik bir metodoloji bulunmamaktadır. Mevcut yaklaşımlar genel nesne kategorileri üzerine kurulu olup ergonomik oran doğruluğu, tipolojik geçerlilik ve işlevsel bütünlük gibi mimarlık pratiğine özgü ölçütleri kapsamamaktadır. Bu çalışma söz konusu boşluğu kapatmak amacıyla iki özgün katkı sunmaktadır. Birincisi, metin tabanlı 3B model üretimini görsel, teknik ve anlamsal boyutlarda ölçen ve bu boyutlar arasındaki farklılaşmaları sistematik biçimde ortaya koyan çok boyutlu bir değerlendirme çerçevesidir. Bu çerçeve, üretilen modelin isteme ne ölçüde karşılık geldiğini, doğru nesne tipini temsil edip etmediğini, malzeme uyumunu, boyutsal oranlarını, bileşenler arası uzamsal düzeni ve özellik kapsamını büyük dil modeli değerlendirmesi altında ölçmektedir. İkincisi, bu değerlendirme çerçevesi temel alınarak çalışma kapsamında geliştirilmiş masaüstü bir değerlendirme aracıdır. Araç, GLB dosyasını geometrik olarak analiz etmekte, altı standart açıdan görsel çıktı almakta, anlamsal değerlendirmeyi büyük dil modeli üzerinden yürütmekte ve uzman onayıyla birleştirilerek yapılandırılmış bir rapor üretmektedir. Değerlendirme çerçevesi Meshy, Tripo3D, Hunyuan3D ve Rodin olmak üzere seçilen dört farklı metinden 3B model üretim aracında uygulanmış; iç mekân (sandalye, yemek masası grubu) ve dış mekân (oturma bankı, dış mekân oturma grubu) bağlamlarında iki istem yoğunluğu düzeyi için 32 model ile değerlendirilmiştir. Değerlendirme sonucunda görsel, teknik ve anlamsal uyumun araç mimarisine göre birbirinden bağımsız biçimde farklılaştığı, istem yoğunluğunun artırılmasının anlamsal uyumu yükseltmek yerine düşürdüğü, yetersiz tanımlamanın belirsizliğe yol açtığı ve araç mimarisinin tipolojik çıktıyı sabitlemesi gibi etkilerin oluştuğu görülmüştür. Çalışma, bu araçların mimari bağlamda değerlendirilmesi için tekrarlanabilir bir metodoloji ortaya koymakta ve araçların tasarım süreçlerinde daha etkin biçimde kullanılmasını konu edinecek gelecek araştırmalara kuramsal ve yöntemsel bir zemin sağlamaktadır. Uzman onayıyla üretilen yapılandırılmış değerlendirme çıktıları, aynı zamanda mimari bağlama özgü büyük dil modeli eğitim verisi oluşturulması için de bir kaynak niteliği taşımaktadır.

Anahtar Kelimeler: Yapay Zekâ, İçerik Üretimi, Metinden 3D, Dijital Tasarım Araçları, 3D Modelleme.

Comparative Evaluation of AI-Based Text-to-3D Model Generation Tools

Önder Aras¹ ; Faruk Can Ünal² 

^{1,2}Yeditepe University

¹onder.aras@yeditepe.edu.tr; ²farukcan.unal@yeditepe.edu.tr

Abstract

Text-based 3D model generation tools can be integrated into architectural design processes to produce ready-to-use models for object categories related to interior or exterior spaces. However, there is no established methodology for the comparative evaluation of these tools in terms of architectural criteria. Existing approaches are based on general object categories and do not cover criteria specific to architectural practice, such as ergonomic proportional accuracy, typological validity, and functional integrity. To address this gap, this study offers two original contributions. The first is a multidimensional evaluation framework that measures text-based 3D model generation across visual, technical, and semantic dimensions and systematically reveals the differences between these dimensions. Under large language model-based evaluation, this framework measures the extent to which the generated model corresponds to the prompt, whether it represents the correct object type, its material compatibility, dimensional proportions, spatial arrangement between components, and feature coverage. The second contribution is a desktop evaluation tool developed within the scope of this study based on the proposed evaluation framework. The tool geometrically analyzes the GLB file, captures visual outputs from six standard angles, conducts semantic evaluation through a large language model, and combines the results with expert validation to produce a structured report. The evaluation framework was applied to four selected text-to-3D model generation tools, namely Meshy, Tripo3D, Hunyuan3D, and Rodin. The evaluation included 32 models produced for two levels of prompt intensity in interior space contexts, consisting of a chair and a dining table set, and exterior space contexts, consisting of a seating bench and an outdoor seating group. The results indicate that visual, technical, and semantic alignment vary independently depending on tool architecture; that increasing prompt intensity decreases semantic alignment rather than improving it; that insufficient description leads to ambiguity; and that tool architecture may fix typological output. This study presents a repeatable methodology for evaluating these tools in architectural contexts and provides a theoretical and methodological basis for future research addressing their more effective use in design processes. The structured evaluation outputs produced through expert validation also constitute a source for generating architecture-specific large language model training data.

Keywords: Artificial Intelligence, Content Generation, Text-to-3D, Digital Design Tools, 3D Modeling.

1. Giriş

Mimarlıkta tasarım aşaması, yoğun bilgi üretimi ve sık karar revizyonu içeren evrelerden biridir. Bu aşamada tasarımcı, alternatiflerini hızla üretme, ölçek ilişkilerini sınama ve kavramsal niyeti müşteriye veya ekibe görünür kılma gereksinimi duyar. Bu gereksinim geçmişte geleneksel olarak el çizimi ve fiziksel maketle karşılanmış; dijital araçların yaygınlaşmasıyla 3B modelleme yazılımları söz konusu işlevi büyük ölçüde üstlenmiştir. Ancak bu yazılımlar belirli bir teknik yetkinlik gerektirdiğinden, erken aşamadaki hızlı üretim akışını sınırlayabilmektedir. Metin tabanlı 3B model üretim araçları bu noktada alternatif bir yol sunar. Bir nesneyi tanımlayan kısa bir doğal dil isteminden görece kısa sürede, üzerinde düzenleme yapılabilen bir 3B model elde edilebilmektedir. Bu araçların mobilya, kentsel donatı ve yapı elemanı gibi kategorilerde ürettiği GLB ve glTF biçimindeki çıktılar 3B modelleme yazılımlarıyla uyumludur.

Bu araçların mimari bağlamda kullanılabilir çıktılar üretip üretmediği sistematik biçimde incelenmemiştir. Mimari kullanımda bir 3B nesnenin yeterliliği, görsel çekicilikten öte ölçütlere bağlıdır. Nesnenin doğru tipolojik sınıfı temsil etmesi, insan ölçeğiyle uyumlu oranlara sahip olması, malzeme kurgusunun yapısal mantıkla tutarlı olması ve negatif tasarım kısıtlarına (örneğin arkalıksız tasarlanması istenen bir bankın arkalık içermemesi) uyması beklenir. Mevcut metin-3B değerlendirme yaklaşımları büyük ölçüde genel nesne kategorileri üzerinden tanımlandığından, bu mimariye özgü ölçütleri kapsam dışında bırakmaktadır.

Bu çalışma, söz konusu boşluğa yönelik mimari tasarım bağlamına özgü iki katkı önermektedir. İlki, 3B üretim kalitesini görsel, teknik (geometrik) ve anlamsal boyutlarda bağımsız olarak ölçen ve bu boyutlar arasındaki farklılaşmaları raporlayan bir değerlendirme çerçevesidir. Bu çerçeve, üretilen modelin isteme ne ölçüde karşılık geldiğini, doğru nesne tipini temsil edip etmediğini, malzeme uyumunu, boyutsal oranlarını, bileşenler arası uzamsal düzeni ve özellik kapsamını büyük dil modeli değerlendirmesi altında ölçmektedir. İkincisi, bu çerçeveyi uygulayan ve geometri üzerindeki programatik analizi büyük dil modeli çıkarımı ile uzman değerlendirmesine bağlayan bir masaüstü yazılımdır. Çerçeve, dört farklı üretim mimarisine sahip metin-3B sisteminde üretilen 32 modele uygulanmış; istem yoğunluğunun anlamsal uyum üzerindeki etkisi ve araç-nesne kombinasyonuna özgü başarısızlık örüntüleri incelenmiştir.

2. Kavramsal Arka Plan

Bu bölüm, çalışmanın değerlendirme çerçevesini konumlandırmak üzere metin tabanlı 3B üretim sistemlerinin teknik gelişimini ve bu sistemler için kullanılan değerlendirme yaklaşımlarını ele almaktadır. Optimizasyon tabanlı yöntemlerden doğrudan tahmin ve hibrit üretim mimarilerine uzanan dönüşüm açıklanmakta, ardından görsel, geometrik ve anlamsal kaliteyi ölçen mevcut kıyaslama yöntemleri incelenmektedir. Bu çalışma, mimari tasarım pratiğine özgü ölçütlerin mevcut literatürdeki karşılığını sorgulayarak çalışmanın hedeflediği yöntemsel boşluğu incelemektedir.

2.1. Metin-3B Üretim Sistemleri

Metin tabanlı 3B üretiminin temelini iki bileşen kurar: görüntü ile metni ortak bir anlam uzayında eşleyerek görsel çıktı-istem uyumunun referanssız ölçülmesini sağlayan CLIP (Radford vd., 2021) ve sahneyi yalnızca görüntülerden optimize edilebilen sürekli ve türevlenebilir bir hacimsel fonksiyon olarak temsil eden NeRF (Mildenhall vd., 2020). Bu ikisini ilk kez sistematik biçimde birleştiren DreamFusion (Poole vd., 2022), önceden eğitilmiş bir 2B difüzyon modelini Score Distillation Sampling ile 3B önsel olarak kullanır; 3B veri gerektirmez, ancak sahne başına saatlerce optimizasyon ve düşük çözünürlükle sınırlıdır. Magic3D (Lin vd., 2023) kaba-ince iki aşamalı optimizasyonla bu kısıtı hafifleterek DreamFusion'a göre belirgin hız ve çözünürlük kazancı sağlar.

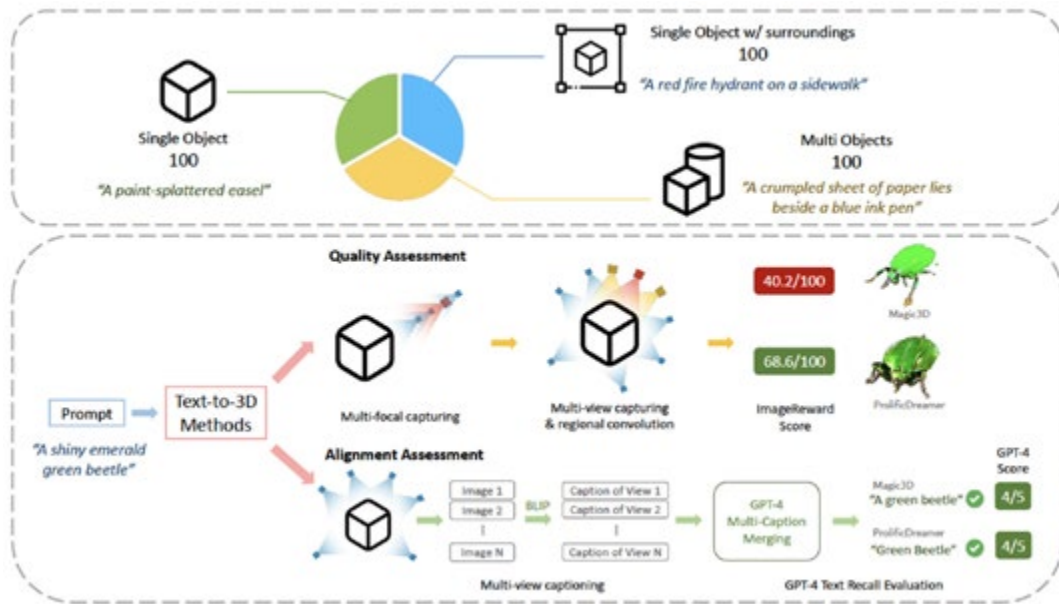
Sonraki kuşak üretimi optimizasyondan tahmine taşır. LRM (Hong vd., 2024), büyük ölçekli veriyle eğitilmiş bir dönüştürücü mimari aracılığıyla tek görüntüden 3B yapıyı doğrudan tahmin eder. TripoSR (Tochilkin vd., 2024) bunu doğrudan mesh üretecek biçimde uyarlayıp süreyi 0,5 saniyenin altına indirir ve bu çalışmadaki Tripo3D'nin teknik temelini oluşturur. 3B Gaussiyon Saçılması (Kerbl vd.,

2023), NeRF'in maliyetli sinir ağı sorgusunu açık Gaussiyen elemanlarının rasterizasyonu ile değiştirerek gerçek zamanlı görsel çıktı sağlar ve yaygın bir temsil biçimine dönüşür. Bu çizginin güncel temsili Hunyuan3D' dir (Zhao vd., 2026). Bu sistem, görüntüyle hizalı geometri üreten difüzyon dönüştürücü mimarisi (DiT) ile herhangi bir mesh üzerinde bağımsız biçimde PBR doku sentezi yapabilen Paint bileşeninden oluşur. Geometri doğruluğu, görüntüyle hizalanma ve doku kalitesi bakımından hem açık kaynaklı hem de ticari alternatiflerin önüne geçer.

2.2. Mevcut Değerlendirme Yaklaşımları ve Sınırlılıklar

Metin-3B kalitesinin ölçümü, aynı isteme karşılık geometrik olarak farklı ama eşit ölçüde geçerli çok sayıda çıktının üretilmesinden doğan bir referans belirsizliği taşır; bu belirsizlik her yöntemin neyi ölçtüğünü biçimlendirir. Referans gerektiren otomatik metriklerin bazı sınırlılıkları vardır: FID/FPD, üretilen ve gerçek model kümelerini istatistiksel olarak karşılaştırır (Shu vd., 2019) ancak tek bir modelin neden başarılı veya başarısız olduğunu açıklayamaz. Chamfer Distance (Bastico vd., 2025), şekiller arasındaki benzerliği ölçer; fakat küçük gürültü ve konum değişikliklerinden kolayca etkilenebilir. CLIP-Score (Hessel vd., 2022) ise referans gerektirmez; ancak yalnızca 2B görselleri değerlendirdiği için geometrik tutarlılığı ve uzamsal doğruluğu ölçemez.

Bütünleşik kıyaslamalar tek metriğin tanınal yetersizliğini aşar. T3Bench (He vd., 2024) üç istem karmaşıklığı düzeyinde görsel kaliteyi (CLIP, ImageReward) ve metin-şekil uyumunu (GPT-4) ölçerek yöntemleri sıralar (Şekil 1): Eval3D (Duggal vd., 2025) ise değerlendirmeyi genel bir yargıdan dört somut hata türünün (yapısal, metin-3B, anlamsal, geometrik) piksel düzeyinde tespitine taşır. İnsan ve model yargısına dayalı yaklaşımlar bunu tamamlar: GPTEval3D (Wu vd., 2024) GPT-4V ile ikili karşılaştırma ve ELO sıralaması üretir, fakat dış modele bağımlılığı yeniden üretilirliği zayıflatır; MATE-3D (Zhang vd., 2025) insan puanlarından öğrenen bir değerlendirici eğitir; 3D Arena (Ebert, 2025) kalabalık kaynaklı tercihleri sürekli güncellenen bir sıralamaya çevirir.



Şekil 1: T³Bench değerlendirme işlem hattı: istem kategorileri, metrik hesaplama ve kıyaslama aşamaları (He vd., 2024).

2.3. Tespit Edilen Boşluklar

İncelenen tüm yaklaşımlar ortak bir yapısal sınırı paylaşır: değerlendirme ölçütleri genel nesneler ve günlük sahneler üzerinden tanımlanmış olup ergonomik oran doğruluğu, tektonik okunaklılık ve tipolojik geçerlilik gibi mimari ölçütleri içermez; insan yargısı sistemleri de alan bilgisini kriterlere yansıtmaz. Buna ek olarak, yüksek görsel kalitenin düşük anlamsal uyumla bir arada görüldüğü boyutlar arası çelişki örüntüleri hiçbir sistemde raporlanmaz ve birden çok araç, istem yoğunluğu

değişkeni merkeze alınarak mimari bağlamda aynı protokolle karşılaştırılmamıştır. Bu çalışma, bu boşlukları hedefleyen, mimari tasarıma özgü ve istem yoğunluğunu merkeze alan çok boyutlu bir değerlendirme çerçevesi önermektedir.

3. Yöntem

3.1. Değerlendirme Çerçevesi

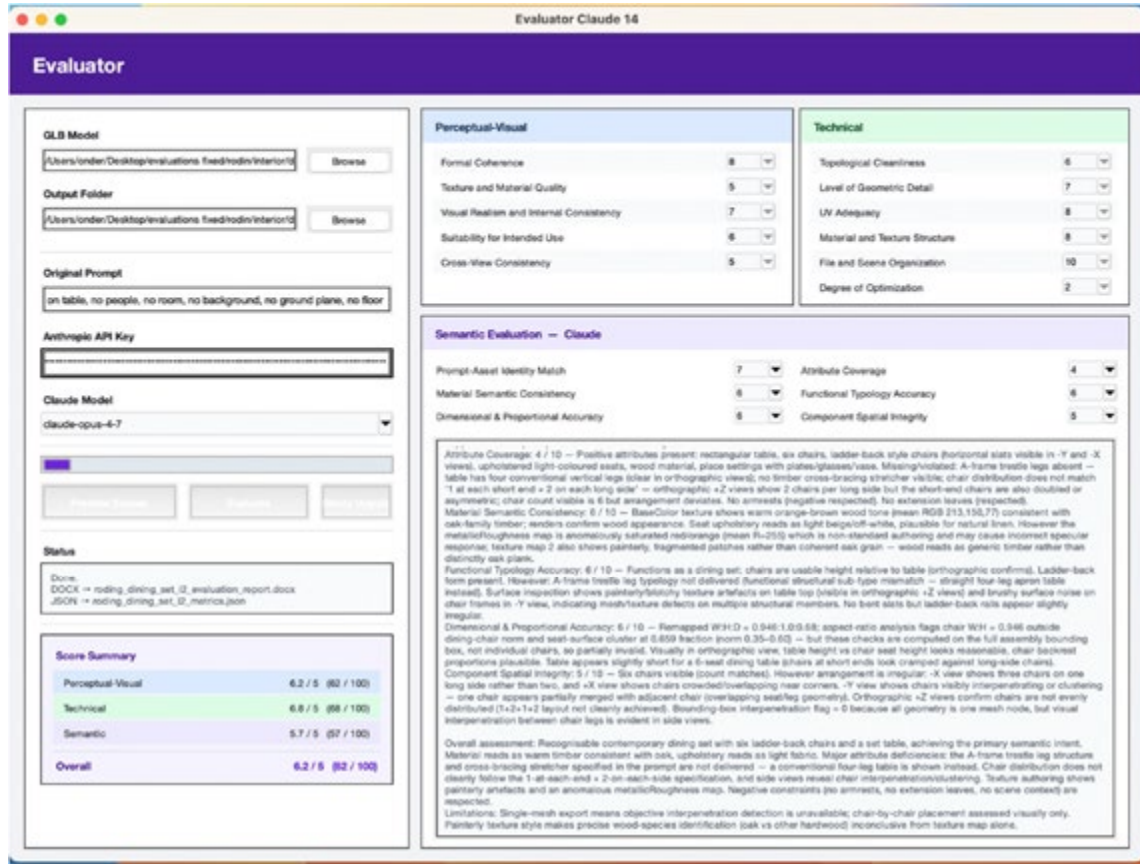
Önerilen çerçeve, 3B üretim kalitesini tek bir bileşik skora indirgemek yerine görsel, teknik ve anlamsal olmak üzere bağımsız üç boyutta ayrı ölçer; bu ayrıştırma, yüksek görsel kalitenin düşük anlamsal uyumla veya teknik üstünlüğün tipolojik başarısızlıkla bir arada bulunduğu profilleri tanısal olarak görünür kılan bilinçli bir yöntemsel tercihtir. Görsel boyut algısal kaliteyi (form bütünlüğü, doku-malzeme inandırıcılığı, açılar arası tutarlılık, görselleştirmede kullanılabilirlik); teknik boyut ise üretim hattındaki kullanılabilirliği (topolojik temizlik, geometrik ayrıntı, UV kalitesi, PBR kanallarının eksiksizliği) ölçer ve büyük ölçüde nesnel olarak GLB'den programatik çıkarılan göstergelerle puanlanır.

Çalışmanın özgün katkısı olan anlamsal boyut, modelin isteme uyumunu mimari pratikten türetilen altı ölçütle değerlendirir: (1) nesne sınıfı ve alt-tipoloji doğruluğu, (2) pozitif özelliklerin varlığı ve negatif kısıtların uygulanması, (3) malzeme-yüzey tutarlılığı, (4) bileşenlerin işlevsel düzeni, (5) ergonomik oran uygunluğu ve (6) parçalar arası uzamsal bütünlük. Büyük dil modeli, altı açıdan alınan render görüntülerini ve GLB geometrisini birlikte işleyerek her ölçüte puan verir; uzman bu puanları gözden geçirip gerektiğinde revize eder.

Her boyut 10 puanlık bir ölçekte raporlanmakta; üç boyut puanının eşit ağırlıklı ortalaması genel puanı vermektedir. Programatik geometri ölçümlerini, büyük dil modeli çıkarımını ve uzman denetimini birleştiren insan-döngüde (human-in-the-loop) tasarım, tümüyle otomatik değerlendirmenin sonuç tutarlılığı ve yansızlık bakımından taşıdığı sınırlılıkları azaltmayı amaçlamaktadır. Tüm modellerin aynı istem, render ve ölçüt protokolüyle puanlanması ise modeller arası karşılaştırılabilirliği güvence altına almaktadır. Değerlendirme iş akışı **Şekil 2**'de, bu akışı uygulayan masaüstü aracın arayüzü ise **Şekil 3**'te gösterilmektedir.



Şekil 2: Üç aşamalı değerlendirme iş akışı: GLB geometrik analizi ve görsel çıktı üretimi, büyük dil modeli anlamsal değerlendirmesi, uzman incelemesi ve rapor çıktısı.

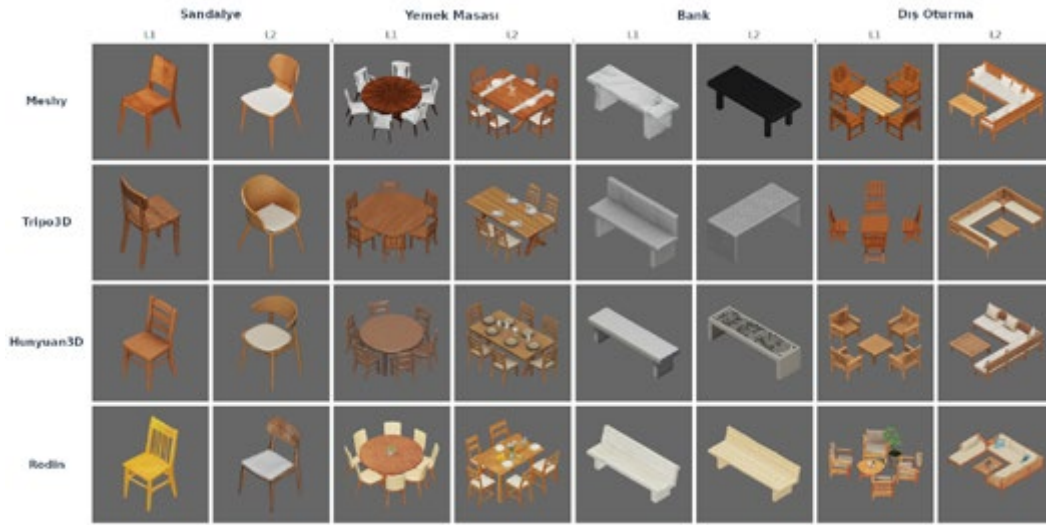


Şekil 3: Geliştirilen masaüstü değerlendirme aracının kullanıcı arayüzü

3.2. Araç ve Nesne Seçimi

Araçlar, bulguların tek bir üretim mimarisine bağlı kalmaması (dış geçerlik) amacıyla üç eksenle ayrışacak biçimde heterojen seçilmiştir. Üretim mimarisi açısından Meshy ve Rodin difüzyon tabanlı; Tripo3D metinden doğrudan geometri tahmin eden, saniyenin altında üreten bir mimari (TripoSR; Tochiikin vd., 2024); Hunyuan3D şekil ve doku üretimini ayıran hibrit bir yapıdır (Hunyuan3D Team, 2025). Geliştirme paradigması açısından Meshy, Tripo3D ve Rodin ticari kapalı kaynak; Hunyuan3D tek akademik açık kaynak sistemdir. Tüm araçlar tarayıcı arayüzünden, programlama bilgisi gerektirmeksizin kullanılabilir ve böylece tasarım profesyonelleri için erişilebilirlik koşulunu karşılar.

Test nesne seti bağlam (iç/dış mekân) ve tipolojik karmaşıklık eksenlerinde dağılır: sandalye ve bank tek bileşenli, ergonomik referansı yerleşik nesneler olarak tipolojik yorumlama ile negatif kısıt uyumunu; yemek masası grubu ve dış oturma grubu ise çok elemanlı düzenlemeler olarak bileşen sayısı ve uzamsal konfigürasyonu sınar. Her nesne için iki istem düzeyi tasarlanmıştır: L1, düşük ayrıntı düzeyindeki istemleri L2 ise yüksek ayrıntı düzeyindeki istemleri temsil eder. L1 nesne sınıfını, baskın malzemeyi ve kritik negatif kısıtları (örneğin, bank için “arkalıksız ve kolsuz”) içerir. L2 ise bu özellikleri koruyarak forma, bileşenlere ve malzemeye ilişkin daha ayrıntılı tanımlayıcılar ekler. Nesne kimliği sabit tutulurken yalnızca spesifikasyon yoğunluğunun değiştirilmesi, istem derinliğini denetimli bir değişken olarak yalıtır. 4 araç × 4 nesne × 2 düzey ile 32 modellik bir matris elde edilmiş; istemler ve üretilen modellerden örnekler Şekil 4’te, detaylı istem listesi Tablo 1’de sunulmaktadır. Metinden üç boyutlu model üretim araçlarında İngilizce istemlerin daha doğru ve ayrıntılı sonuçlar sağlaması nedeniyle üretim sürecinde İngilizce istemler kullanılmıştır.



Şekil 4: Değerlendirme matrisini oluşturan test seti: dört nesne kategorisi (sandalye, yemek masası grubu, bank, dış oturma grubu) için kullanılan L1 ve L2 istemleri ve bunlara karşılık dört araçta (Meshy, Tripo3D, Hunyuan3D, Rodin) üretilen 3B modellerden örnek

Tablo 1: Dört nesne kategorisi için tanımlanan yalın (L1) ve ayrıntılı (L2) test istemleri ile bunlara ait negatif kısıtlar.

Nesne	Düzye	İstem	Negatif Kısıtlar
Sandalye	L1	a wooden chair, four legs	no armrests, no people, no room, no background, no ground plane, no floor
Sandalye	L2	a contemporary dining chair, solid oak bent-plywood shell forming a continuous seat and backrest as one piece, four tapered solid oak legs, visible lamination layers on the shell perimeter edge, loose seat cushion in natural linen fabric	no armrests, no wheels, no height adjustment mechanism, no people, no room, no background, no ground plane, no floor
Yemek Masası Grubu	L1	a round wooden dining table for six with six chairs	no people, no room, no background, no ground plane, no floor
Yemek Masası Grubu	L2	a contemporary rectangular dining set for six, solid oak plank-top table with two A-frame trestle legs and a timber cross-bracing stretcher, six matching solid oak ladder-back chairs with upholstered seats in natural linen fabric, one chair at each short end and two on each long side, table set with ceramic plates and drinking glasses at each place	no armrests on chairs, no extension leaves on table, no people, no room, no background, no ground plane, no floor
Bank	L1	a concrete outdoor bench	no backrest, no armrests, no people, no room, no background, no ground plane, no floor
Bank	L2	a contemporary outdoor bench, precast concrete seat slab with a regular pattern of circular perforations across the full seating surface, two solid concrete vertical blade supports at each end, visible shadow gap between seat slab and blade supports	no backrest, no armrests, no seat cushion, no people, no room, no background, no ground plane, no floor
Dış Oturma Grubu	L1	a wooden garden seating set for four with a coffee table	no people, no room, no background, no ground plane, no floor
Dış Oturma Grubu	L2	a contemporary wooden garden seating group for four, solid teak L-shaped bench seating four with wide horizontal slats on seat and backrest, matching low rectangular coffee table with slatted top on four legs at the center of the L, four loose seat cushions in natural outdoor canvas fabric	no canopy or overhead structure, no storage below the bench, no people, no room, no background, no ground plane, no floor

4. Bulgular

Bulgular, 32 modellik matris üzerinden araçlar arası boyutsal profiller, istem yoğunluğunun etkisi ve nesne kategorisi örüntüleri olmak üzere üç düzeyde incelenmektedir. Örneklem, istatistiksel genellemeden ziyade sistematik örüntüleri saptamaya yöneliktir.

4.1. Araçların Görsel, Teknik ve Anlamsal Puan Profilleri

Araçların boyut puanları **Tablo 2'**de verilmiştir. Genel sıralama (Meshy 7,02; Hunyuan3D 6,35; Rodin 6,18; Tripo3D 5,86) yanıltıcı biçimde düzdür: Meshy'nin liderliği büyük ölçüde teknik boyuttan (7,71) gelir, görsel (6,47) ve anlamsal (6,88) puanlar gerisindedir; Tripo3D üç boyutta da düşük ve dengelidir (5,60 / 6,00 / 5,98).

Temel bulgu Rodin ile Hunyuan3D karşıtlığıdır. Rodin görsel (6,20) ve teknikte (6,85) ikinci olmasına karşın anlamsalda sonuncudur (5,48): “arkalıksız” istenen bankı her iki istem düzeyinde de arkalıkla, “beton” yüzeyi boyalı ahşap olarak üretmiştir (anlamsal kimlik 3/10). Hunyuan3D ise aynı istemi doğru karşılayıp (9/10), görsel (5,60) ve teknik (6,27) puanları düşük olsa da anlamsalda birinci olmuştur (7,17). Geometrik açıdan en yetkin çıktığı üreten aracın isteme uygunluk açısından başarısız olması, metinsel gereksinimlere uyumun görsel ve teknik kalite üzerinden belirlenemeyeceğini göstermektedir.

Tablo 2: Araç/Boyut puan matrisi (10 üzerinden, L1+L2 ortalaması).

Araç	Görsel	Teknik	Semantik	Genel
Meshy	6,47	7,71	6,88	7,02
Tripo3D	5,60	6,00	5,98	5,86
Hunyuan3D	5,60	6,27	7,17	6,35
Rodin	6,20	6,85	5,48	6,18

4.2. İstem Yoğunluğunun Semantik Uyuma Etkisi

İstem yoğunluğunun artırılması dört araçta da anlamsal uyumu düşürür (**Tablo 3**): L1 ortalaması 7,07'den L2'de 5,69'a iner ($\Delta=-1,38$). Düşüş Meshy'de en büyük ($-2,09$), Rodin'de en küçüktür ($-0,80$); ancak Rodin'in küçük deltası zaten düşük bir başlangıçtan ($5,88 \rightarrow 5,08$) kaynaklandığından olumlu değildir.

Tablo 3: L1 ve L2 istem düzeylerinde araç bazında semantik puan karşılaştırması (10 üzerinden).

Araç	Semantik L1	Semantik L2	Δ Semantik
Meshy	7,92	5,83	-2,09
Tripo3D	6,58	5,38	-1,20
Hunyuan3D	7,88	6,46	-1,42
Rodin	5,88	5,08	-0,80

Araç-nesne düzeyi (**Tablo 4**), bu gerilemenin üç mekanizmayla işlediğini gösterir. Aşırı tanımlama: yalın istemde doğru üretilen tipoloji, ayrıntılı istemin ek kısıtlarıyla bozulur (Tripo3D sandalye $8,8 \rightarrow 4,2$; kabuk yanlara sarılıp kolçağa dönüşerek “kolsuz” kısıtını ihlal eder). Yetersiz tanımlama: Yalın istemin belirleyemediği tipoloji, ek ayrıntılarla netleştirilir (Tripo3D bank $4,2 \rightarrow 7,0$). Tipolojik sabitleme: araç bir prototipe kilitlenir ve istem yoğunluğu etkisiz kalır (Rodin bank $3,83 \rightarrow 3,50$). Böylece istem ayrıntı düzeyi ile çıktının isteme uyumu arasındaki ilişki araca ve nesneye göre değişir.

Tablo 4: Araç/Nesne semantik puan matrisi (her hücrede L1 / L2; 10 üzerinden).

Araç	Sandalye L1/L2	Yemek Masası L1/L2	Bank L1/L2	Dış Oturma L1/L2
Meshy	8,67 / 5,83	7,17 / 5,83	8,67 / 5,33	7,17 / 6,33
Tripo3D	8,83 / 4,17	7,50 / 4,00	4,17 / 7,00	5,83 / 6,33
Hunyuan3D	8,17 / 7,33	7,17 / 7,17	9,00 / 5,50	7,17 / 5,83
Rodin	6,67 / 5,67	6,17 / 5,67	3,83 / 3,50	6,83 / 5,50

4.3. Nesne Kategorisi Bazında Semantik Uyum

Nesne kategorisi analizi (**Tablo 5**), araç başarımını etkileyen kategorinin tipolojik belirginliği ve negatif kısıtlara uyum olmak üzere iki etkeni ortaya koymaktadır. Tipolojik açıdan belirgin olan sandalyede tüm araçlar L1 isteminde dört ayaklı ahşap sandalye biçimine yaklaşmış ve kategori en yüksek ortalamaya ulaşmıştır (8,09). Ancak L2'deki "sürekli bükme-kontrplak kabuk" koşulunu üç aracın karşılayamaması, ortalamanın 5,75'e düşmesine yol açmıştır ($\Delta=-2,34$). Bu sonuç, L1 düzeyindeki başarının daha ayrıntılı istemlerde sürdürülemeyeceğini göstermektedir.

Tipolojik açıdan daha belirsiz olan bankta araçlar arasındaki fark, bileşen karmaşıklığından değil, "arkalıksız" koşuluna uyumdan kaynaklanmıştır. Hunyuan3D ve Meshy bu koşulu karşılayarak 9,00 ve 8,67 puan alırken Rodin ve Tripo3D arkalı banklar üreterek 3,83 ve 4,17 puanda kalmıştır. Tek bileşenli bankta görülen bu ayrışma, anlamsal uyumun yapısal karmaşıklıkla çok tasarım kısıtlarına bağlı olduğunu göstermektedir. Görsel açıdan makul görünen bu ihlaller, yalnızca çıktının istemle karşılaştırılmasıyla belirlenebilmektedir.

Tablo 5: Nesne kategorisi bazında semantik puan profili (10 üzerinden, dört araç ortalaması).

Nesne	L1 Semantik	L2 Semantik	Δ
Sandalye	8,09	5,75	-2,34
Yemek Masası Grubu	7,00	5,67	-1,33
Bank	6,42	5,33	-1,09
Dış Oturma Grubu	6,75	6,00	-0,75

Çok bileşenli kategorilerde istem yoğunluğunun etkisi daha sınırlıdır. Yemek masası grubunun puanı 7,00'den 5,67'ye ($\Delta=-1,33$), dış oturma grubunun puanı ise 6,75'ten 6,00'a ($\Delta=-0,75$) düşmüştür. Bu durum, "altı kişilik" ve "L biçiminde" gibi uzamsal koşulların L1 düzeyinde dahi yeterince belirleyici olmasıyla açıklanabilir. Dolayısıyla anlamsal uyum, bileşen sayısından çok tipolojik belirginliğe ve istemdeki kısıtların niteliğine bağlıdır.

5. Sonuçlar

Bu çalışma, metinden 3B model üretim araçlarının mimari tasarım bağlamında değerlendirilmesi amacıyla görsel, teknik ve anlamsal boyutları birlikte ele alan çok boyutlu bir çerçeve önermiştir. Çalışma kapsamında geliştirilen masaüstü araç; geometrik analiz, çok açılı görsel inceleme, büyük dil modeli değerlendirmesi ve uzman denetimini bütünleşik bir iş akışında bir araya getirmiştir. Elde edilen sonuçlar, görsel, teknik ve anlamsal başarının birbirinden bağımsız biçimde değişebildiğini ve tek bir genel puanın araçların güçlü ve sınırlı yönlerini açıklamakta yetersiz kaldığını göstermiştir. Bu nedenle metinden 3B model üretim araçlarının değerlendirilmesinde her boyutun ayrı ayrı incelenmesi önem taşımaktadır.

İncelenen araçların, doğrudan kullanıma hazır modeller üreten sistemlerden çok, tasarımcı denetimi gerektiren erken aşama üretim araçları olarak ele alınması gerekmektedir. Biçimsel açıdan ikna edici görünen modeller; tipolojik doğruluk, ergonomik uygunluk, işlevsel bütünlük ve tasarım kısıtlarına uyum bakımından her zaman yeterli sonuçlar vermemektedir. Özellikle görsel açıdan kabul edilebilir görünen bir çıktı, istemde belirtilen malzeme, bileşen, oran veya negatif kısıtları

karşılamayabilmektedir. Dolayısıyla bir modelin mimari kullanım açısından yeterliliği yalnızca görsel niteliğine göre belirlenemez. Çıktıların tasarım sürecine aktarılmadan önce insan ölçeği, kullanım senaryosu, bileşen ilişkileri ve istemde tanımlanan koşullar bakımından uzman denetiminden geçirilmesi gerekmektedir.

Önerilen çerçeve, metinden 3B model çıktılarının mimarlığa özgü ölçütler doğrultusunda karşılaştırılmasına ve araçlara özgü başarısızlık örüntülerinin belirlenmesine yönelik tekrarlanabilir bir yöntem sunmaktadır. Bununla birlikte çalışma, dört üretim aracı, dört nesne kategorisi ve iki istem ayrıntı düzeyiyle sınırlıdır. Gelecek çalışmalar, daha geniş nesne ve istem kümeleri üzerinden bu araçların mimari tasarım süreçlerine nasıl daha etkin biçimde entegre edilebileceğine odaklanabilir. Ayrıca uzman onayıyla elde edilen yapılandırılmış değerlendirme çıktıları, mimari bağlama özgü büyük dil modellerinin geliştirilmesinde eğitim verisi olarak kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- Bastico, M., Ryckelynck, D., Corté, L., Tillier, Y., & Decenciére, E. (2025). *Rethinking Metrics and Diffusion Architecture for 3D Point Cloud Generation*. <http://arxiv.org/abs/2511.05308>
- Duggal, S., Hu, Y., Michel, O., Kembhavi, A., Freeman, W. T., Smith, N. A., Krishna, R., Torralba, A., Farhadi, A., & Ma, W.-C. (2025). *Eval3D: Interpretable and Fine-grained Evaluation for 3D Generation*. <http://arxiv.org/abs/2504.18509>
- Ebert, D. (2025). *3D Arena: An Open Platform for Generative 3D Evaluation*. <http://arxiv.org/abs/2506.18787>
- He, Y., Bai, Y., Lin, M., Zhao, W., Hu, Y., Sheng, J., Yi, R., Li, J., & Liu, Y.-J. (2024). *T³Bench: Benchmarking Current Progress in Text-to-3D Generation*.
- Hessel, J., Holtzman, A., Forbes, M., Bras, R. Le, & Choi, Y. (2022). *CLIPScore: A Reference-free Evaluation Metric for Image Captioning*. <http://arxiv.org/abs/2104.08718>
- Hong, Y., Zhang, K., Gu, J., Bi, S., Zhou, Y., Liu, D., Liu, F., Sunkavalli, K., Bui, T., & Tan, H. (2024). *LRM: Large Reconstruction Model for Single Image to 3D*. <http://arxiv.org/abs/2311.04400>
- Kerbl, B., Kopanas, G., Leimkuehler, T., & Drettakis, G. (2023). 3D Gaussian Splatting for Real-Time Radiance Field Rendering. *ACM Transactions on Graphics*, 42(4). <https://doi.org/10.1145/3592433>
- Lin, C.-H., Gao, J., Tang, L., Takikawa, T., Zeng, X., Huang, X., Kreis, K., Fidler, S., Liu, M.-Y., & Lin, T.-Y. (2023). *Magic3D: High-Resolution Text-to-3D Content Creation*.
- Mildenhall, B., Srinivasan, P. P., Tancik, M., Barron, J. T., Ramamoorthi, R., & Ng, R. (2020). *NeRF: Representing Scenes as Neural Radiance Fields for View Synthesis*. <http://arxiv.org/abs/2003.08934>
- Poole, B., Jain, A., Barron, J. T., & Mildenhall, B. (2022). *DreamFusion: Text-to-3D using 2D Diffusion*.
- 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). *Learning Transferable Visual Models From Natural Language Supervision*. <http://arxiv.org/abs/2103.00020>
- Shu, D. W., Park, S. W., & Kwon, J. (2019). *3D Point Cloud Generative Adversarial Network Based on Tree Structured Graph Convolutions*. <http://arxiv.org/abs/1905.06292>
- Tochilkin, D., Pankratz, D., Liu, Z., Huang, Z., Letts, A., Li, Y., Liang, D., Laforte, C., Jampani, V., & Cao, Y.-P. (2024). *TripoSR: Fast 3D Object Reconstruction from a Single Image*. <http://arxiv.org/abs/2403.02151>
- Wu, T., Yang, G., Li, Z., Zhang, K., Liu, Z., Guibas, L., Lin, D., & Wetzstein, G. (2024). *GPT-4V(ision) is a Human-Aligned Evaluator for Text-to-3D Generation*. <http://arxiv.org/abs/2401.04092>
- Zhao, Z., Lai, Z., Lin, Q., Zhao, Y., Liu, H., Yang, S., Feng, Y., Yang, M., Zhang, S., Yang, X., Shi, H., Liu, S., Wu, J., Lian, Y., Yang, F., Tang, R., He, Z., Wang, X., Liu, J., ... Guo, C. (2026). *Hunyuan3D 2.0: Scaling Diffusion Models for High Resolution Textured 3D Assets Generation*. <http://arxiv.org/abs/2501.12202>

Expanding BIM Framework with Transformative Elements and Spatial Affordance

F. Berke Çilesizoğlu ¹ ; Togan Tong ² 

^{1,2} Yıldız Technical University

¹berke.cilesizoglu@std.yildiz.edu.tr; ²tong@yildiz.edu.tr

Abstract

Building Information Modeling (BIM) is a well-established geometrical representation method for parametric modeling, geometric precision, and embedded information management with a focus on interdisciplinary information exchange and collaboration. However, conventional BIM frameworks remain predominantly object-oriented, prioritizing static, physical components over the volumetric features of the surrounding architectural space. This object-centric bias inherently compromises spatial organization and the experiential dimension of architecture, as current design methodologies fail to treat space as an active, computational entity. Furthermore, despite its information-rich capabilities, BIM geometry frequently stagnates when encountering non-manifold topologies, restricting architectural synthesis to discrete or continuous solid objects. To address these limitations, this study shifts the design locus directly to the spatial void, aiming to maximize environmental adaptability and functional performance.

Integrating adaptive systems that incorporate kinetic elements represents a critical contemporary challenge within standard BIM ontologies. As responsive components alter their physical configurations, architectural boundaries become fluid, yielding a diverse matrix of multi-scaled spatial geometries. In this context, spatial affordance emerges as a foundational concept for space-oriented design. Consequently, this research bridges kinetic principles with expanded BIM ontologies, enabling both the parametric modification of responsive components and the real-time simulation of spatial reorientation within transforming environments.

The proposed methodology leverages space syntax—specifically computational isovist analysis—to interpret, navigate, and manipulate non-manifold topologies. Within this framework, a BIM algorithm that combines non-topological elements and isovist methods is devised to both design and analyze simultaneously. Non-manifold isovist calculations operate not merely as passive post-design diagnostics, but as interactive, generative space-defining instruments. Utilizing an exhibition gallery layout as a diagnostic case study for spatial flexibility, isovist vectors are projected at regular intervals along a defined circulation route to dynamically generate architectural sub-spaces based on visual permeability. The resulting configurations are evaluated via an affordance-based graphic matrix to quantify the structural variety of the generated environments. Ultimately, the analytical graphics demonstrate that transformative elements successfully generate unique, highly differentiated sub-spaces, significantly expanding the overall functional affordance and spatial capacity of a single physical volume. Furthermore, via this framework, space becomes the primary source, process and end-product of the BIM design workflow, proposing a contribution to a significant research gap and future studies.

Keywords: Building Information Modeling (BIM), Spatial Affordance, Transformative Elements, Isovist Analysis, Non-Manifold Topologies.

Dönüştürücü Öğeler ve Uzamsal Sağlarlık ile BIM Çerçevesinin Genişletilmesi

F. Berke Çilesizoğlu ¹ ; Togan Tong ² 

^{1,2} Yıldız Technical University

¹berke.cilesizoglu@std.yildiz.edu.tr; ²tong@yildiz.edu.tr

Özet

Yapı Bilgi Modellemesi (BIM); disiplinler arası bilgi alışverişi ve iş birliğine odaklanan; parametrik modelleme, geometrik hassasiyet ve gömülü bilgi yönetimi için kabul görmüş bir geometrik temsil yöntemidir. Ancak geleneksel BIM çerçeveleri, çevreleyen mimari uzamın hacimsel özelliklerini dikkate almak yerine durağan, fiziksel bileşenlere öncelik vererek ağırlıklı olarak nesne yönelimli kalmayı sürdürmektedir. Mevcut tasarım yöntemleri, uzamı aktif, bilişimsel bir varlık olarak ele almadığından, bu nesne merkezli yaklaşım doğası gereği uzamsal organizasyondan ve mimarinin deneyimsel boyutundan ödün vermektedir. Dahası, bilgi açısından zengin yeteneklerine rağmen BIM geometrisi, manifold olmayan topolojilerle karşılaştığında sıklıkla tıkanmakta ve mimari sentezi ayırık veya sürekli katı nesnelerle sınırlandırmaktadır. Bu sınırlılıkları çözmek adına bu çalışma, çevresel adaptasyonu ve fonksiyonel performansı en üst düzeye çıkarmayı amaçlayarak tasarımın odak noktasını doğrudan uzama kaydırmaktadır.

Kinetik elemanları barındıran adaptif sistemlerin entegrasyonu, standart BIM ontolojileri içinde kritik ve güncel bir zorluğu temsil etmektedir. Duyarlı bileşenler fiziksel kurulumlarını değiştirdikçe mimari sınırlar akışkan hale gelmekte ve çok ölçekli uzamsal geometrilerden oluşan çeşitli bir matris üretmektedir. Bu bağlamda, uzam odaklı tasarım için uzamsal sağlarlık temel bir kavram olarak ortaya çıkmaktadır. Sonuç olarak bu araştırma, kinetik ilkeler ile genişletilmiş BIM ontolojileri arasında bir köprü kurarak, hem duyarlı bileşenlerin parametrik olarak değiştirilmesine hem de dönüşen ortamlar içindeki uzamsal yeniden yönelimin gerçek zamanlı simülasyonuna olanak tanımaktadır.

Önerilen yöntem, manifold olmayan topolojileri tanımlamak, yorumlamak ve dönüştürmek için uzam dizimi yöntemlerinden, özellikle hesaplamalı izovist analizinden, yararlanmaktadır. Bu çerçevede izovist hesaplamaları, yalnızca tasarım sonrası pasif birer kontrol aracı olarak değil; etkileşimli, üretken ve uzam tanımlayıcı araçlar olarak işlev görmektedir. Uzamsal esneklik için deneysel bir vaka çalışması olarak bir sergi düzeni kullanılmış; görsel geçirgenliğe dayalı mimari alt uzamları dinamik olarak üretmek amacıyla, belirlenen bir sirkülasyon rotası boyunca düzenli aralıklarla izovist vektörleri yansıtılmıştır. Elde edilen kurulumlar, üretilen ortamların yapısal çeşitliliğini nicelleştirmek adına sağlarlık tabanlı bir grafik matris aracılığıyla değerlendirilmiştir. Nihayetinde analitik grafikler, dönüştürülebilir elemanların benzersiz, yüksek derecede farklılaşmış alt uzamları başarıyla ürettiğini ve tek bir fiziksel hacmin genel fonksiyonel sağlarlığını ve uzamsal kapasitesini önemli ölçüde genişlettiğini kanıtlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Yapı Bilgi Modellemesi (BIM), Uzamsal Sağlarlık, Dönüştürülebilir Öğeler, İzovist Analizi, Manifold Olmayan Topolojiler.

1. Introduction

By the 1980s, Computer-Aided Design (CAD) introduced digital representations and automation to drafting processes, replacing manual paper-based workflows with efficient, computer-based computational tools. Algorithmic modeling subsequently transformed these static vectors into intelligent entities, utilizing rule-based logic to extend the boundaries of geometric complexity (Carpo, 2011). Modern architectural representation operates largely through informed geometry, where Building Information Modeling (BIM) acts as a multi-dimensional central repository containing comprehensive data for design, construction, facility management, and lifecycle performance (Caetano et al., 2020). However, despite these technological leaps and promising advancements, significant structural limitations persist within contemporary BIM workflows. Most conventional BIM frameworks remain heavily object-oriented and are optimized strictly for static components, only efficient in construction documentation. They fundamentally prioritize physical building assemblies over the volumetric spaces those assemblies enclose. This object-centric bias inherently compromises spatial features as secondary, rendering it difficult or convoluted to simulate, analyze, and design space-oriented features.

This research addresses the manifold topology limitations of standard BIM, which relies on rigid, watertight solid geometries and frequently fails to capture the complex connectivity and spatial reasoning required for intelligent, adaptive systems. While standard BIM focuses primarily on these discrete solid boundaries, emerging paradigms like Topological BIM prioritize spatial voids and the fluid, non-deterministic relationships between them (Jabi et al., 2018; Massafra et al., 2024).

This paper builds on these concepts by proposing a methodological extension of BIM through Non-Manifold Topology (NMT). Unlike traditional solid boundary representations, NMT allows for the consistent internal partitioning of volumes into cellular spatial zones via zero-thickness surfaces. This approach is essential for accurately modeling the dynamic topological changes triggered by kinetic components—such as rotating panels—and the complex, emergent sub-spaces created in-between them.

By situating this work within the transition from product-oriented models to space-centered systems, this research integrates Space Syntax methodologies—specifically Visibility Graph Analysis (VGA) and isovist metrics—directly into the parametric BIM environment. This integration provides an advanced framework where spatial affordances (the relational action possibilities of a space) can be quantified and optimized alongside a building's physical form, enabling real-time performance feedback and a deeper understanding of kinetic spatial reconfigurations.

2. Background

2.1. Computational Design and Geometrical Representation

Historically, architectural representation was defined by representational geometry, where the drawing served as a static surrogate for the physical building. For centuries, this remained a manual process; it was only during the Renaissance that representational drawings became essential for exploring and communicating designs apart from the construction site (Barrow, 2006; Hill, 2005). This period established the plan, section, and elevation as the mandatory 2D documentation of the industry (Eisenman, 2013). The transition from paper-based to digital representation occurred in the 1980s with the rise of CAD platforms (Carpo, 2011). In this stage, building elements were represented by simple geometric entities—lines, arcs, and layers—whose meaning relied on established professional drafting standards rather than inherent semantic data. While CAD allowed for the automated representation of geometrically complex designs that were previously unthinkable, these drawings remained static, requiring manual updates and synchronization across independent views due to their nature as singular instances of drafted representation.

The shift toward parametric geometry redefined the building element from a mere collection of vectors to an intelligent, multi-dimensional object. This paradigm is most visible in BIM workflows, replacing independent CAD lines with smart elements defined by their physical attributes and topological relationships (Kensek & Noble, 2014). This approach utilizes parametric families, where variations in size, material, or shape are dictated by pre-defined constructive rules and logic (Ghaffarianhoseini et al., 2017). While this facilitates early interdisciplinary integration, its rigid adherence to physically constructible objects often restrict the modeling of unconventional or highly complex adaptive solutions.

To move beyond the rigid constraints of standard BIM, Algorithmic Design (AD) emerged as a crucial representational method (Woodbury, 2010). Rather than modeling a fixed solution directly, architects use algorithms—finite sequences of computational steps—to describe the rules governing a design space. This allows for the preservation of rule-based logic, such as mathematical equations, random geometric constraints, or subtractive processes, which are often lost in traditional static documentation. While BIM focuses on the efficiency of object-based data modeling, AD provides the flexibility to explore unconventional forms by manipulating the underlying parameters that generate the geometry, effectively expanding the designer's exploration capacity (Caetano et al., 2020; Zboinska, 2015).

The most recent evolution in this trajectory is the emergence of informed geometry, where the digital model acts as a multi-dimensional repository of embedded data. In this stage, geometry is not merely a shape, but a container for information regarding the entire project lifecycle, including function, material, and cost (Ehrbar, 2016). Modern platforms integrate external performance factors via parametric definitions, allowing the geometry to be "informed" by element-specific data like life-cycle performance, structural loads, and environmental factors (Alwan et al., 2015). Informed geometry enables designers to conduct real-time analysis and simulations, replacing time-consuming manual assessments with database-driven calculations (Nguyen et al., 2016). By assigning external performance parameters directly to the model, designers gain an integrated, visualized view of how a building will function before it is ever built, achieving a holistic digital twin capable of continuous performance simulation and intelligent adaptation (Nederveen et al., 2022).

2.2. Transformative Spaces and Affordance

Affordance Theory, originally formulated by psychologist James J. Gibson in the late 1970s within ecological psychology, revolutionized the understanding of human-environment interactions. Gibson (1977) proposed that organisms do not perceive environments merely as abstract physical or geometric properties; rather, they perceive them as action possibilities or affordances. These affordances are inherently relational, emerging dynamically from the fit between the physical features of an environment and the physical or cognitive capabilities of the user (Mohammadi & Koutamanis, 2025). In traditional static environments, affordances are predominantly constitutive, meaning they rely on fixed inherent properties like shape, size, and load-bearing capacity. However, contemporary architecture is increasingly embracing transformative affordances, which address dynamic, contextual, and time-dependent spatial shifts (Young & Cleveland, 2022). This aligns closely with the principles of kinetic architecture. Pioneered conceptually by William Zuk and Roger Clark (1970), kinetic architecture rejects the traditional notion of buildings as static, monumental enclosures. Instead, it advocates for structures that physically reconfigure themselves to adapt to environmental volatility and changing functional pressures, mirroring the adaptive behaviors of living organisms. To achieve these transformations, kinetic structures utilize mechanized strategies such as sliding, folding, pivoting, and pneumatic expansion, allowing for geometric transformations in scale, volume, and form (Matheou et al., 2023). While historical and avant-garde precedents—such as the sliding partitions of the Rietveld Schröder House or Cedric Price's modular, unbuilt Fun Palace—relied heavily on user-operated or heavy mechanical actuators, the field is evolving toward cyber-physical integration (Tsoumpri, 2023).

As these architectural spaces continuously morph, the affordances they offer constantly fluctuate, demanding robust analytical frameworks to understand or evaluate their performance.

To quantify spatial possibilities, architectural research leverages Space Syntax methodologies, specifically Visibility Graph Analysis (VGA) and isovist metrics. By mapping fields of vision and spatial permeability, these computational tools translate the spatial geometries into visual graphs and metrics based on the enclosing polygons, convex hulls and ray lengths. This research translates VGA of complex topological shifts of kinetic environments into measurable networks. This integration of affordance theory and topological analysis allows designers to shift their focus from static forms to relational action possibilities, ensuring that transformable spaces intelligently invite and support diverse behaviors over time.

2.3. Literature Review

Early contributions underscore the significant limitations of manifold topologies in conventional BIM and CAD systems. These platforms fundamentally prioritize physical building components—such as walls, roofs, and columns—over the actual spatial voids those components create. This object-centric bias means that traditional manifold representations fail to capture the complex, non-manifold connectedness of architectural spaces (Bakonyi & Dobszay, 2025; Chatzivasileiadi et al., 2018; Jabi, 2016). Consequently, standard BIM struggles with the topological relationships essential for early-stage design tasks, seamless building performance simulation, and the intricate connectivity required to model intelligent, transformable systems.

To overcome these rigid solid-void dichotomies, subsequent developments advocate for Non-Manifold Topology (NMT) as a superior representational technique (Jabi, 2016; Jabi et al., 2017). Unlike traditional solid boundary representations that struggle to combine volumes, faces, and edges in a single representation, NMT utilizes a hierarchical data structure where vertices, edges, loops, faces, shells, and volumes are interconnected (Jabi, 2016). This allows for an unambiguous spatial segmentation, where a single zero-thickness surface can consistently act as an internal partition between multiple cellular spaces. This representational shift facilitates the semi-automated generation of BIM models based on topological and functional space properties, bridging early-stage kinetic design with performance management by linking design models directly without the need for manual, error-prone model simplification (Jabi, 2016; Massafra et al., 2024).

The integration of these methodologies on a holistic scale empowers the parametric exploration of kinetic mechanisms, such as rotating panels, sliding elements, and responsive shading systems. By embedding topological parameters and kinematic behaviors directly into BIM platforms, researchers propose unified ontological workflows—often termed Kinetic BIM (KBIM)—that shift the modeling focus from rigid forms to dynamic spatial relationships (Kavuncuoğlu et al., 2022). This topological augmentation of BIM frameworks establishes a unified workflow for integrating transformative spatial affordances with real-time performance feedback, enabling the synchronized simulation and optimization of structures that intelligently adapt to both environmental pressures and evolving user needs (Maierhofer & Menges, 2019).

These topological advancements can be analytically understood with Space Syntax methodologies, most notably Visibility Graph Analysis (VGA) and Isovist Analysis, which are utilized to quantify spatial relations and usage in architectural spaces (Turner et al., 2001). By mapping fields of vision and spatial permeability, isovist metrics and VGA translate these complex topological shifts into measurable networks of integration, connectivity, and visual coherence.

In kinetic environments, spatial boundaries are fluid, causing the affordances to fluctuate continuously. Embedding these techniques within non-manifold BIM frameworks provides an analytical lens to evaluate how kinetic movements reshape spatial potential and behavior.

2.4. Research Gap

Despite substantial advancements in BIM technology and the progression toward informed geometries as multi-dimensional repositories of performance data, conventional workflows continue to lack robust support for spatial and topological modeling, as well as the seamless integration of transformative elements critical for kinetic architecture (Akgün & Özener, 2022; Jabi, 2016). The primary limitation stems from the representational logic of standard software: conventional BIM platforms favor component-based, manifold topology representations. These systems excel at modeling physical domain assemblies but fundamentally struggle to capture space—the architectural space that exists in-between, are surrounded by, or are enclosed by these solids where the movement and actions take place. Because manifold topologies rely on watertight boundaries that cannot unambiguously share surfaces among multiple cellular spaces, they inadequately capture hierarchical spatial relationships. This object-centric bias creates a severe bottleneck for early-stage design or precise performance analysis, often forcing designers to manually simplify complex BIM models into abstract zones, a process that is time-consuming (Jabi, 2016).

Heavily coupled mechanical engineering approaches further exacerbate this issue; kinetic design validation is forced into peripheral, external analysis software before being asynchronously linked back to architectural BIM platforms (Akgün & Özener, 2022). This fragmented workflow arises from domain-specific distinctions between dynamic mechanical systems—which require data on angular motion, time, and relative coordinates—and static architectural components. Ultimately, this disjunction necessitates the development of holistic ontological frameworks, such as Kinetic BIM (KBIM), integrated with Non-Manifold Topology (NMT). Without an extended object-oriented ontology that embeds both kinematic behaviors and hierarchical spatial voids directly into the BIM platform, the discipline remains unable to smoothly design, simulate, and analyze the fluctuating spatial affordances generated by transformable environments.

3. Research Design

The proposed methodology adopts a computational approach that integrates space syntax techniques with non-manifold topology to quantify the performance of transformable architectural spaces, moving beyond the static limitations of traditional BIM area management (Turner et al., 2001; Yamu et al., 2021). The research design is executed within an informed geometry workflow using Non-Uniform Rational B-Splines (NURBS) coupled with algorithmic modeling. Open spaces are conceptualized as adaptable systems where architectural objects are modeled as algorithmic members with embedded transformation and kinematic sequence data. Exhibition layouts were selected as the primary case study due to their functional demand for pathway optimization, high spatial openness and flexibility. Previous works on the exhibition spaces have pointed out importance of layout and connections through VGA (Wang et al., 2025).

The analytical workflow executes according to the following sequence. Isovist data is captured at short intervals using a 360-degree field of view along a defined pathway tracing the inner wall contours. Interpolate polygon of isovist points define a sub-space with isovist metrics supply analytical data for each sub-space, namely area/shape area and perimeter. Convex hull of these isovist points supply the required shell area for equations. Isovist metrics are gathered for an open-plan configuration without any geometric barriers to establish baseline control (**Figure 1.a**). In baseline, sub-spaces are inherently generated solely by the convexity of perimeter walls, which create visual occlusions and restrict spatial perception from various path indices. Transformative elements are introduced into the model with their physical positions and angular movement ranges algorithmically embedded. Spatial affordances are continuously recalculated through dynamic simulations of kinetic transformations. This relies on generating visibility networks via Visibility Graph Analysis (VGA) and projecting isovist fields to capture real-time spatial properties (Dai et al., 2025; Turner et al., 2001).

Ultimately, these data points are synthesized into composite affordance maps that correlate shifting isovist metrics with transformation-induced changes in spatial mobility and centrality-periphery dynamics (**Figure 1.b-d**).

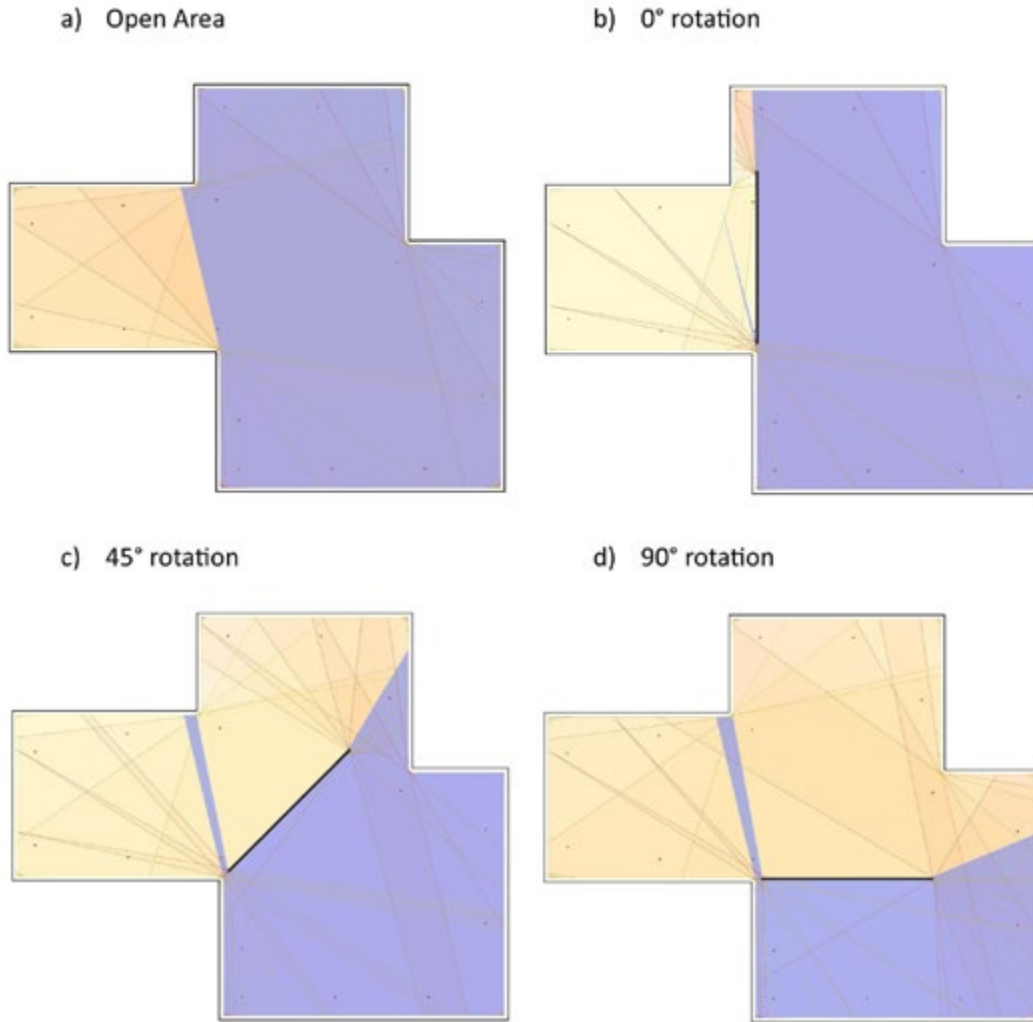


Figure 1: Transformation of space through transformative elements in four stages.

To mathematically interpret the structural variety and visual permeability of the reconfigured fields under kinetic intervention, three key isovist metrics are calculated at each point along the pathway (Ostwald & Dawes, 2020).

Compactness measures how closely the shape of an isovist polygon resembles a perfect circle. High compactness indicates a highly regular, balanced, or centralized vantage point where visual boundaries are equidistantly distributed around the observer. Low compactness indicates elongated, linear, or heavily distorted fields of view, which typically happen when a space is fractured by partition walls.

$$Compactness = \frac{\sqrt{\pi \times Area}}{Perimeter} \quad (1)$$

Convexity measures the structural integrity and self-containment of the isovist polygon by evaluating the difference between its actual polygon area (shape area) and its convex hull (shell area). A high convexity value implies that the field of view has significant concavities or hidden pockets. When a kinetic element rotates, it cuts off direct lines of sight, creating a mismatch between the absolute bounding shell and what is visible, mathematically flagging the birth of a semi-private architectural sub-space.

$$Convexity = \frac{(Shell\ area - shape\ area)}{shell\ area} \quad (2)$$

Jaggedness measures the geometric complexity, roughness, or irregularity of the isovist boundary. Smooth, unobstructed rectangular or circular spaces yield low jaggedness values. Conversely, sharp spikes in jaggedness indicate that the observer's field of view is cutting across multiple narrow gaps, complex structural configurations, or intersecting the edge boundaries of multiple skewed, rotating panel elements at once.

$$Jaggedness = \frac{Perimeter^2}{Area} \quad (3)$$

4. Findings

The application of non-manifold topological representations within an extended BIM framework successfully facilitated flexible volumetric partitioning, enabling dynamic space analysis without model or data discontinuities. The case study reveals that the integration of transformative kinetic elements significantly alters spatial metrics, leading to the clear emergence of distinct sub-spaces.

A critical finding extracted from the data graphics is that these sub-spaces, while triggered by the rotational movement of kinetic elements, often exhibit complete independence from physical boundaries, existing as purely perceptual zones defined by visual connectivity and changing enclosure boundaries. While the baseline open area exhibited consistent, flat lines across all pathway index points, the introduction of the kinetic partition wall generated pronounced fluctuations in spatial perception. The marked value divergence between the baseline and each rotational state (0°, 45°, and 90° rotations) indicates the successful generation of unique sub-spaces possessing entirely different geometries and volumetric qualities (**Figure 2**).

Furthermore, the self-contained fluctuations within an individual kinetic state's line graph mathematically prove that the structural element successfully bisects a single hall into separate, highly localized sub-spaces. The metrics successfully quantify these transformations, demonstrating how dynamic layouts can generate exhibition areas of varying sizes and shapes to maximize the functional versatility of the physical room envelope.

The research highlights a critical gap in present applications and softwares: while established Space Syntax tools like DepthmapX or Isovists 4.2 are highly versatile, they lack native support for generative algorithmic modeling and cannot accommodate real-time transforming elements. The algorithm developed in this research overcomes these hurdles by establishing a unified workflow that treats kinetic components as active, generative space-defining instruments rather than passive post-design checks, allowing for immediate comparative benchmarking and real-time design evaluation.

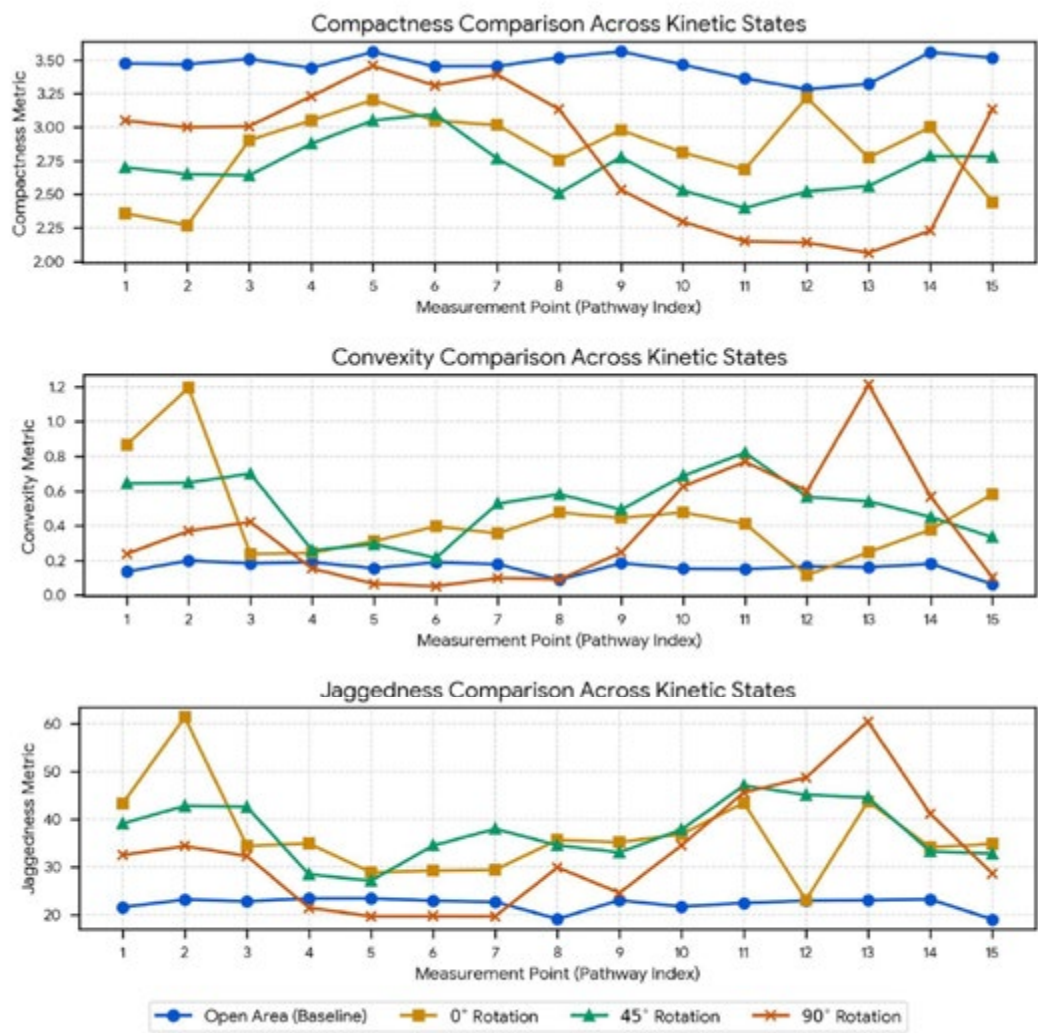


Figure 2: Isovist Metrics for different positions of rotating elements

5. Conclusions

The case study demonstrates that transformative kinetic elements substantially alter spatial metrics, resulting in the emergence of new sub-spaces that exhibit independence from physical boundaries. The isovist metrics successfully capture these volumetric transformations, establishing that a kinetic partition wall creates substantial fluctuations in space perception compared to the static baseline. Value differences across various states indicate the creation of distinct sub-spaces with unique environmental qualities, effectively expanding the overall functional capacity and accommodating fluctuations in visitor flow through real-time kinetic reconfiguration. Shifting from static element modeling to a Topological BIM paradigm removes dependencies on watertight manifold geometries and allows architecture to actively and directly manage spatial integration and visual permeability.

This unified approach enhances the capabilities of informed geometries by transcending component-based modeling, showing that spatial layout configurations profoundly shape transformative affordances. The research concludes that embedding kinetic behaviors directly into expanded BIM ontologies facilitates the synchronized simulation of fluid architectural boundaries. Including both spatial design and analysis in the same algorithm greatly reduces the gap between design intention and result, making space the primary design object.

This paper does not include any environmental performance analysis, but it is intended for future studies to be directly integrated into workflow without any conversion or simplification of the BIM data. These findings also pave the way for future research focusing on 3D Space Syntax extensions that incorporate volumetric isovists and multi-layered visibility graphs to advance simulations of vertical or multi-axis kinetic transformations. Future investigations could leverage further computational analysis models to compare and evaluate complex reconfigurable volumes, potentially integrating AI-driven dynamic modeling for real-time exhibition layout adjustments to optimize visitor accessibility and functional efficiency in transformable exhibition environments.

REFERENCES

- Akgün, Y., & Özener, O.Ö. (2022). Kinetic Architecture and BIM: The State of Art and Future Visions. In: Özener, O.Ö., Ofluoglu, S., Isikdag, U. (eds) *Advances in Building Information Modeling. EBF 2021. Communications in Computer and Information Science*, vol 1627. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16895-6_9
- Alwan, Z., Greenwood, D., & Gledson, B. (2015). Rapid LEED evaluation performed with BIM-based sustainability analysis on a virtual construction project. *Construction Innovation*, 15(2), 134–150. <https://doi.org/10.1108/CI-01-2014-0002>
- Bakonyi, D., & Dobszay, G. (2025). An Ontology-based Approach to Solving the Digital Representation Problem in Architectural Engineering. *Periodica Polytechnica Architecture*. <https://doi.org/10.3311/ppar.40408>
- Barrow, M. (2006). *Cybernetic architecture: Process and form*. Rodopi.
- 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*. MIT Press.
- Chatzivasileiadi, A., Lannon, S., Jabi, W., Wardhana, N. M., & Aish, R. (2018). Addressing Pathways to Energy Modelling Through Non-Manifold Topology. *Proceedings of Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design (SimAUD)*. <https://doi.org/10.22360/simaud.2018.simaud.005>
- Dai, Y., Ren, Y., Li, H., & Wang, M. (2025). Evaluating Art Exhibition Spaces Through Space Syntax and Multimodal Physiological Data. *Buildings*, 15(11), 1776. <https://doi.org/10.3390/buildings15111776>
- Ehrbar, H. (2016). Building information modeling – a new tool for the successful implementation of major projects of German railways. *Geomechanics and Tunneling*, 9(6), 659–673. <https://doi.org/10.1002/geot.201600061>
- Eisenman, P. (2013). *The formal basis of modern architecture*. Lars Müller Publishers.
- Ghaffarianhoseini, A., Tookey, J., Ghaffarianhoseini, A., Naismith, N., Azhar, S., Efimova, O., & Harriss, K. (2017). Building information modeling (BIM) uptake: Clear benefits, understanding its implementation, risks and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 1046–1053. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.083>
- Gibson, J. J. (1977). The theory of affordances. In R. Shaw & J. Bransford (Eds.), *Perceiving, acting, and knowing: Toward an ecological psychology* (pp. 67–82). Lawrence Erlbaum Associates.
- Hill, J. (2005). *Immaterial architecture*. Routledge.
- Jabi, W. (2016). Linking design and simulation using non-manifold topology. *Architectural Science Review*, 59(5), 411–420. <https://doi.org/10.1080/00038628.2015.1117959>
- Jabi, W., Soe, S., Theobald, P., Aish, R., & Lannon, S. (2017). Enhancing parametric design through non-manifold topology. *Design Studies*, 52, 96–114. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2017.04.003>
- Jabi, W., Aish, R., Lannon, S., Chatzivasileiadi, A., & Wardhana, N. M. (2018). Topologic - A toolkit for spatial and topological modelling. Kepczynska-Walczyk, A, Bialkowski, S (eds.), *Computing for a better tomorrow - Proceedings of the 36th eCAADe Conference - Volume 2*, Lodz University of Technology, Lodz, Poland, 19-21 September 2018, pp. 449-458. <https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2018.2.449>
- Kavuncuoğlu, C., Akgün, Y., & Özener, O. Ö. (2022). Kinetic Architecture and BIM Integration - A case study on a Bricard linkage canopy system. In Pak, B., Wurzer, G., & Stouffs, R. (eds.), *Co-creating the Future: Inclusion in and through Design - Proceedings of the 40th Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe (eCAADe 2022) - Volume 1*, Ghent, 13-16 September 2022, pp. 243–252 <https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2022.1.243>

- Maierhofer, M., & Menges, A. (2019). Towards integrative design processes and computational design tools for the design space exploration of adaptive architectural structures. *International Conference on Emerging Technologies in Architectural Design (ICETAD2019)*, 2019, Toronto, Canada. ([hal-03807010](#))
- Massafra, A., Jabi, W., & Gulli, R. (2024). Topological BIM for building performance management. *Automation in Construction*, 166, 105628. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105628>
- Matheou, M., Phocas, M. C., Christoforou, E. G., & Müller, A. (2023). New perspectives in architecture through transformable structures: A simulation study. *Frontiers in Built Environment*, 9, 1051337. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2023.1051337>
- Mohammadi, M., & Koutamanis, A. (2025). Affordance-based design evaluation: Bridging architectural intention and adaptive user behavior. *Design Studies*, 101, 101361. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2025.101361>
- Nederveen, S. V., Beetz, J., & de Vries, B. (2022). Digital Twins for the Built Environment. *Automation in Construction*, 133, 104001.
- Nguyen, A. T., Reiter, S., & Rigo, P. (2016). A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. *Applied Energy*, 168, 523–541.
- Ostwald, M. J., & Dawes, M. J. (2020). The Spatio-Visual Geometry of the *Hollyhock House*: A Mathematical Analysis of the ‘Wright Space’ using Isovist Fields. *Nexus Netw J*, 22, 211–228. <https://doi.org/10.1007/s00004-018-00422-3>
- Tsourni, D. (2023). Architectural space as an open, adaptable system: A design experiment. *International Journal of Architectural Computing*, 21(4), 602–621. doi:[10.1177/14780771231162382](#)
- Turner, A., Doxa, M., O’Sullivan, D., & Penn, A. (2001). From Isovists to Visibility Graphs: A Methodology for the Analysis of Architectural Space. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 28(1), 103–121.
- Woodbury, R. (2010). *Elements of Parametric Design*. Routledge.
- Wang, X., Yang, M., Li, W., Yuan, L., Ren, Q., Xie, Q., & Liu, R. (2025). Natural movement: Measuring optimal pathway configuration of museum layout and pedestrian accessibility through visibility graph analysis and intelligent agent simulation. *Frontiers of Architectural Research*, 14(5), 1228–1248. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2025.03.001>
- Yamu, C., van Nes, A., & Garau, C. (2021). Bill Hillier’s Legacy: Space Syntax—A Synopsis of Basic Concepts, Measures, and Empirical Application. *Sustainability*, 13(6), 3394. <https://doi.org/10.3390/su13063394>
- Young, F., & Cleveland, B. (2022). Affordances, architecture and the action possibilities of learning environments: A critical review of the literature and future directions. *Buildings*, 12(1), Article 76. <https://doi.org/10.3390/buildings12010076>
- Zboinska, M. A. (2015). Hybrid CAD/E platform supporting exploratory architectural design, *Computer-Aided Design*, 59, 64–84, <https://doi.org/10.1016/j.cad.2014.08.029>.
- Zuk, W., & Clark, R. H. (1970). *Kinetic Architecture*. Van Nostrand Reinhold.

MSTAS 26 “KAPSAM DIŞI”

XX. MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM ULUSAL SEMPOZYUMU

OTURUM 9

SANAL, ARTIRILMIŞ ve KARMA GERÇEKLİK

Fiziksel ve Sanal Gerçeklik Ortamlarında Aydınlatma Koşullarının ve Görsel Konforun Karşılaştırılması: Durum Çalışması

Sevim Sevide Güngör¹ ; Berk Ekici² ; Zehra Tuğçe Kazanasmaz³ 

^{1,2,3}İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü

¹sevimgungor@iyte.edu.tr; ²berkekici@iyte.edu.tr; ³tugcekazanasmaz@iyte.edu.tr

Özet

Bu çalışma, fiziksel bir derslik ortamındaki aydınlatma koşullarının ve görsel konforun sanal gerçeklik ortamında ne ölçüde doğru temsil edilebileceğini bir durum çalışması üzerinden incelemektedir. Bu çalışmanın temel amacı, tasarımın erken aşamalarında sanal gerçeklik teknolojisinin güvenilir bir karar destek aracı olarak kullanılabilirliğini araştırmaktır. Çalışmanın yöntemi beş aşamadan oluşmaktadır. İlk olarak, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mimarlık Fakültesi E Blok'ta yer alan bir derslik, Relux programı kullanılarak modellenmiştir. İkinci aşamada, dersliğin aydınlık düzeyi ölçümlerini almak için çalışma yüzeylerinde 11 nokta belirlenmiştir ve alınan aydınlık düzeyi ölçümleri ile üçüncü aşamada modelin validasyon süreci tamamlanmıştır. Fiziksel mekânın aydınlık düzeyi ölçümleri ve Relux programından yapılan simülasyon hem günışığı hem de yapay aydınlatma koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Validasyon süreci için ise Pearson korelasyon katsayısı, R² ve p değeri hesaplanmıştır. Ardından, fiziksel derslik ile sanal gerçeklik ortamına aktarılan dersliğin aydınlatma koşullarının ve görsel konforunun değerlendirilebilmesi için bir anket hazırlanmıştır. Bu anket 11 kadın ve 6 erkekten oluşan toplam 17 kişilik bir katılımcı grubuna uygulanmıştır. Katılımcılar ilk olarak fiziksel derslik ortamı için aydınlatma tercihleri anketini tamamlamışlardır. Daha sonrasında ise dersliğin modeli, sanal gerçeklik gözlüğü kullanılarak sanal gerçeklik ortamında katılımcılar tarafından deneyimlenmiştir. Bu deneyim sonrasında, aynı anket sorularını sanal gerçeklik ortamına aktarılmış derslik için katılımcılar tekrar cevaplandırmışlardır. Böylece katılımcıların fiziksel derslik ve sanal gerçeklik ortamlarındaki değerlendirmelerini içeren iki farklı veri seti elde edilmiştir. Araştırmanın son aşamasında ise elde edilen bu veri setlerinin kendi içlerindeki tutarlılıklarını değerlendirmek ve birbirleriyle kıyaslamak amacıyla çeşitli istatistiksel analiz yöntemleri (güvenilirlik analizi, Wilcoxon işaretli sıralar testi, Spearman sıra korelasyonu ve betimsel istatistikler) kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda fiziksel ve sanal gerçeklik ortamlarının genel görsel kalitesinde önemli bir fark bulunmamış ve güçlü bir algısal tutarlılık gözlemlenmiştir. Donanım sınırlamaları ve bireysel deneyim farklılıkları nedeniyle görsel konfor ve kamaşma ile ilgili parametrelerde sapmalar olsa da sanal gerçeklik ortamı fiziksel mekânı etkili bir şekilde temsil edebilmiştir. Bulgular, aydınlatma tasarımının erken aşamalarında kullanıcı deneyimlerini öngörmek adına sanal gerçeklik teknolojisinin güvenilir ve etkili bir yöntem olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Sanal Gerçeklik, Aydınlatma Tasarımı, Işık Algısı, Görsel Konfor.

Comparison of Lighting Conditions and Visual Comfort in Physical and Virtual Reality Environments: A Case Study

Sevim Sevide Güngör¹ ; Berk Ekici² ; Zehra Tuğçe Kazanasmaz³ 

^{1,2,3}Izmir Institute of Technology

¹sevimgungor@iyte.edu.tr; ²berkekici@iyte.edu.tr; ³tugcekazanasmaz@iyte.edu.tr

Abstract

This study examines, through a case study, the extent to which lighting conditions and visual comfort in a physical classroom environment can be accurately replicated in a virtual reality environment. The main objective of this study is to investigate the potential of utilizing virtual reality technology as a reliable decision-support tool in the early design phases. The study's methodology includes five stages. In the first stage, this paper modeled a classroom located in Block E of the Izmir Institute of Technology's Faculty of Architecture using Relux software. In the second stage, 11 points on the study surfaces were selected to measure illuminance values in the classroom. The model validation process was completed in the third stage using the obtained illuminance measurements. These illuminance measurements in the physical environment and the Relux simulation were conducted under both daylight and artificial lighting conditions. For validation, the study calculated the Pearson correlation coefficient, R^2 , and p-value. In the fourth stage, a questionnaire was administered to assess lighting conditions and visual comfort in both physical and virtual reality environments. A total of 17 individuals, including 11 women and 6 men, participated. First, they completed the lighting preferences questionnaire for the physical classroom. Then, participants experienced the classroom model in a virtual reality environment with a headset. Following this experience, they completed the same questionnaire again for the virtual reality environment. As a result, the paper yielded two different datasets, including participants' evaluations from the physical classroom and the virtual reality environment. In the final stage of the research, various statistical methods (reliability analysis, the Wilcoxon signed-rank test, Spearman's rank correlation, and descriptive statistics) were employed to assess the internal consistency of the datasets and to compare them. This study found no significant difference in overall visual quality between physical and virtual reality environments, presenting strong perceptual consistency. The virtual reality environment demonstrated high consistency in reflecting the overall atmosphere and lighting conditions of the physical environment. However, some deviations were observed in parameters related to visual comfort and glare due to hardware limitations and individual experiential differences. The findings showed that virtual reality technology is a dependable and useful tool for predicting user experiences in the early phases of lighting design.

Keywords: Virtual Reality, Lighting Design, Light Perception, Visual Comfort.

1. Giriş

Sanal gerçeklik (SG/VR) teknolojisi, görsel algı süreçlerinin araştırılmasında umut verici bir yaklaşım olmasından dolayı aydınlatma tasarımı deneyimlemek ve değerlendirmek için fiziksel ortamlara alternatif olarak kullanılabilir (Abd-Alhamid vd., 2019). Aydınlatma koşullarının kullanıcıların duygusal durumları, memnuniyetleri ve bilişsel performansları üzerindeki etkilerini inceleyen SG çalışmalarının yanı sıra (Kayhan vd., 2021; Mostafavi vd., 2023), uzamsal algıyı değerlendiren araştırmalar da literatürde yer almaktadır (Kurpınar vd., 2025). Değişen pencere boyutlarıyla günışığının iç mekanlarda kullanıcıların algılarını nasıl etkilediğini incelemek üzere kontrollü deneyler gerçekleştiren bir çalışmada da SG teknolojisi kullanılmıştır. Sonuçta, sanal gerçekliğin günışığı araştırmaları için güvenilir bir araç olduğu kanıtlanmıştır (Moscato vd., 2021). İzmirlioğlu ve Sözer (2025) tarafından gerçekleştirilen araştırmaya göre, kullanıcıların SG ortamında aydınlatma senaryolarını deneyimlemelerini sağlamak tasarım sürecini hızlandırmıştır. Bunu başarmak için, kullanıcılara gerçek zamanlı görselleştirme kullanan bir SG deneyimi sunulmuştur. Böylece kullanıcılar aydınlatma ile ilgili hızlı geri bildirimlerde bulunmuşlardır. Tasarım sürecindeki sorunları ve tercih farklılıklarını önceden belirleyerek revizyon ihtiyacını azaltmışlardır.

Bu çalışmada ise SG teknolojisinin tercih edilmesinin nedeni, fotoğraf ya da video gibi diğer medya araçlarına göre daha kapsayıcı bir deneyim sunmasından kaynaklanmaktadır (Chen vd., 2019). SG teknolojisinin fiziksel ortamların aydınlatma koşullarını ve görsel konforunu doğru ve etkili bir şekilde temsil etmedeki başarısı konusunda literatürde yeterli örnek bulunmamaktadır. Bu durum, özellikle tasarımın erken aşamalarında SG teknolojisinin güvenilir bir karar destek aracı olarak konumlandırılmasını engellemektedir. Bu çalışmanın amacı, SG tabanlı aydınlatma simülasyonlarının fiziksel ortamın aydınlatma koşullarını ve görsel konforunu ne ölçüde doğru temsil edebileceğini bir durum çalışması üzerinden araştırmaktır.

2. Yöntem

Bu çalışma beş aşamadan oluşan bir yöntemle sahiptir (**Şekil 1**). İlk aşamada İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü (İYTE) Mimarlık Fakültesi E Blok zemin katta bulunan bir derslik, Relux programı kullanılarak modellenmiştir. Oluşturulan model SG ortamına aktarılacağı için, modelin fiziksel derslik ortamını doğru bir şekilde yansıtmayı hedeflenmiştir. Bu nedenle Relux programında modelleme yapılırken malzemeler, fiziksel dersliğin malzemelerine uygun olarak seçilmiştir. Çalışmada dersliğin duvarları için sıva, zemin kaplaması olarak mermer karolar ve tavanı için tavan panelleri kullanılmıştır. Ayrıca yansıtma çarpanı (ρ), aynasal yansıma ve pürüzlülük değerleri ile seçilen malzemelerin dokularının ölçükleri de buna göre ayarlanmıştır. İkinci aşamada, aydınlık düzeyi ölçüm cihazı (*illuminance meter*) kullanılarak dersliğin aydınlık düzeyi ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu aşama için derslikteki çalışma yüzeylerinden 11 nokta belirlenmiş, 12 Aralık 2025 tarihi saat 12.30'da bu noktalardan aydınlık düzeyi değerleri ölçülmüştür. Ardından Relux programı ile günışığı ve yapay aydınlatma koşulları altında simülasyon gerçekleştirilerek aynı noktalar için aydınlık düzeyi değerleri elde edilmiştir. Sonraki aşamada, derslikten ölçülen ve simülasyondan elde edilen aydınlık düzeyi değerleri arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. Validasyon süreci için Pearson korelasyon katsayısı, R^2 ve p değeri hesaplanmıştır. Dördüncü aşamada, aydınlatma koşullarının ve görsel konforun değerlendirilebilmesi için, aydınlatma tercihleri anketi 17 katılımcıya uygulanmıştır. Öncelikle, katılımcılardan bulundukları fiziksel dersliğin aydınlatma koşullarını ve görsel konforunu değerlendirmeleri istenmiştir. Ardından, katılımcılar SG gözlüğünü kullanarak deneyimledikleri dersliğin aydınlatma koşullarını ve görsel konforunu değerlendirmek için aynı anketi tekrar cevaplandırmışlardır. Çalışmada, Relux programında yer alan gerçek zamanlı görselleştirme eklentisi Enscape kullanılarak oluşturulan görseller, SG ortamına aktarılmıştır. Bu çalışmada donanım olarak Meta Quest 3S SG gözlüğü kullanılmıştır. Son aşamada ise fiziksel derslik ve sanal gerçeklik ortamı için elde edilmiş iki farklı veri seti, istatistiksel analiz yöntemleri uygulanarak incelenmiştir.

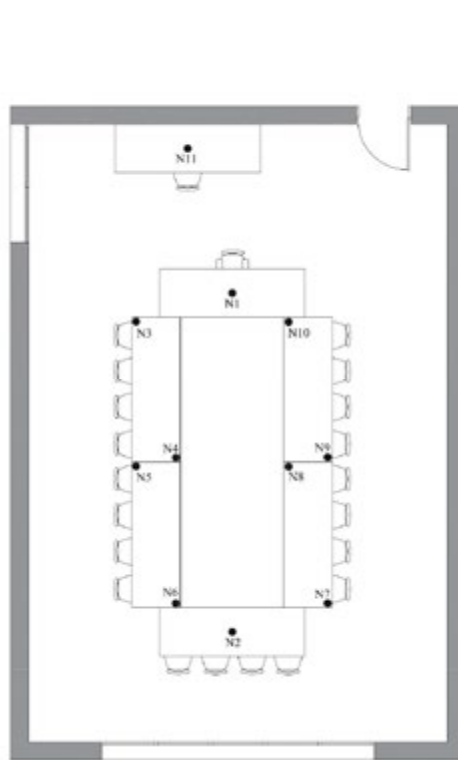


Şekil 1: Çalışmanın yöntemi

3. Bulgular ve Tartışma

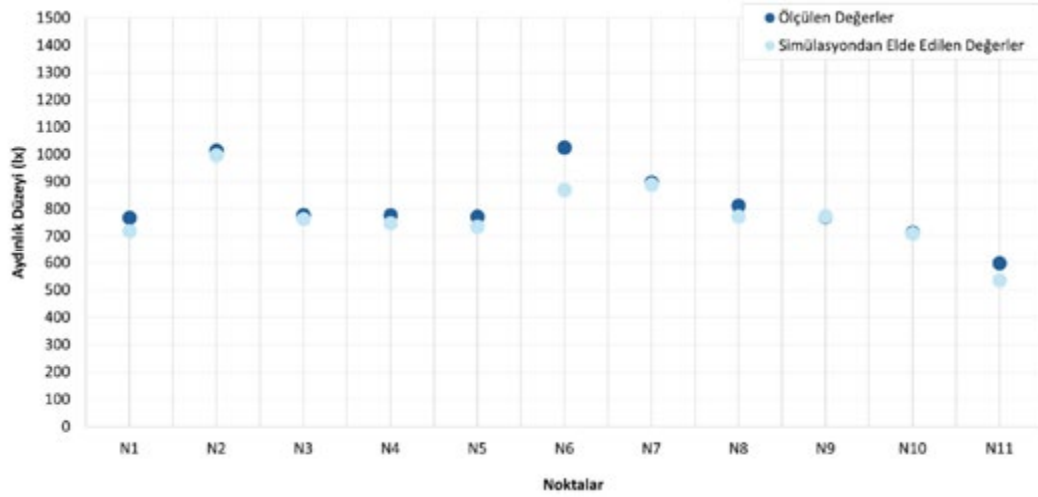
3.1. Aydınlik Düzeyi Ölçümleri ve Validasyon

Çalışma için seçilen derslikte güney ve batı cephelerinde olmak üzere 2 adet pencere ve 12 adet LED yapay aydınlatma elemanı yer almaktadır. Bu aydınlatma elemanlarının boyutları 60 x 60 santimetredir. Hem güney hem de batı cephelerindeki pencerelerde gölgeleme elemanı olarak perdeler kullanılmaktadır. Fakat ölçüm sırasında perdeler açık konumda tutulmuştur. Bu nedenle aydınlık düzeyi ölçümleri ve Relux programından yapılan simülasyon hem günışığı hem de yapay aydınlatma koşulları altında, çalışma yüzeylerinden belirlenen 11 noktadan aydınlık düzeyi ölçüm cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 2).



Şekil 2: Aydınlik düzeyi ölçüm noktaları

Simülasyon ve ölçümlerden elde edilen aydınlatma düzeyi değerlerinin karşılaştırma grafiği **Şekil 3**'te verilmiştir. Derslikten ölçülen aydınlatma düzeyi değerleri, N9 hariç, simülasyon sonucunda elde edilen değerlerden daha yüksektir. Çalışma, seçilen 11 noktada kaydedilen aydınlık düzeyi değerleri için 0,937 (p değeri <0,001) güçlü bir Pearson korelasyonu ve 0,878 yüksek bir R^2 değeri elde etmiştir. Bu sayede, derslik modelinin SG ortamına aktarılma uygun olduğu gösterilmiştir.



Şekil 3: Aydınlatma düzeyi değerleri grafiği

3.2. Aydınlatma Tercihleri Anketi

Bu çalışmada, fiziksel derslik ve SG ortamlarının aydınlatma koşullarını ve görsel konforunu karşılaştırmak için bir anket hazırlanmıştır. Bu anket, 3 bölümden oluşmaktadır ve toplamda 13 soru içermektedir. İlk bölüm, ortamın aydınlatma koşullarını; ikinci bölüm, görsel konforsuzluğu ve son bölüm ise ortamın genel görsel kalitesini değerlendiren sorular içermektedir. Anket, 11 kadın ve 6 erkek olmak üzere 17 kişilik bir katılımcı grubuna uygulanmıştır. Katılımcıların yaş ortalaması 26,6'dır. Ayrıca katılımcılardan 7'si gözlük, 2'si de kontakt lens kullandığını belirtmiştir.

Katılımcılar ilk olarak fiziksel derslik için aydınlatma tercihleri anketini cevaplandırmış, ardından SG gözlüğü ile derslik modelini deneyimleyerek aynı anket sorularını tekrar yanıtlamışlardır. Böylece kıyaslanmak üzere fiziksel derslik ve SG ortamı veri setleri elde edilmiştir. Katılımcılara SG gözlüğü aracılığıyla gösterilen modelin görselleri ve derslikten çekilen fotoğrafların karşılaştırılması **Şekil 4**'te sunulmuştur.

3.3 İstatistiksel Analiz

Katılımcılara uygulanan anketler sonucu elde edilen veri setlerinin kendi içindeki tutarlılıklarını analiz edebilmek için Cronbach alfa katsayısı hesaplanmıştır. Cronbach's alpha katsayıları fiziksel derslik ortamı için 0,788 ve SG ortamı için 0,755 olarak bulunmuştur. Bu değerlerin 0,70 eşliğini aşması, anketin kabul edilebilir bir iç tutarlılığa sahip olduğunu göstermektedir (Cortina, 1993).

Çalışmada, fiziksel ve SG ortamı için elde edilen verileri karşılaştırmak için iki farklı istatistiksel analiz yöntemi kullanılmıştır: Wilcoxon işaretli sıra testi ve Spearman sıra korelasyonu. Her iki analiz yönteminden elde edilen değerler ve katılımcıların her soruya verdikleri yanıtların aritmetik ortalamaları **Tablo 1**'de verilmiştir. Çalışmada, iki ortam arasında katılımcıların tercihlerindeki farklılıkları ölçmek için kullanılan Wilcoxon işaretli sıra testi, özellikle örneklem büyüklüğü nispeten küçük olduğunda T-testine alternatif olarak kullanılabilir (Bridge ve Sawilowsky, 1999). Bu çalışmada, Spearman sıra korelasyonu ise tercih eğilimlerindeki paralellik derecesini değerlendirmek için tercih edilmiştir (Hauke ve Kossowski, 2011).



Şekil 4: Relux modelinin görselleri (solda) ve dersliğin fotoğrafları (sağda)

Elde edilen bulgulara göre, '*Genel: Görsel Kalite*' parametresi açısından fiziksel derslik ve SG ortamı arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olmadığı görülmüştür ($p = 0,904$). Ayrıca, bu iki ortam 0,896 gibi yüksek bir Spearman korelasyonu sergilemektedir. Bu sonuçlar, katılımcıların algılarının her iki ortamda da tutarlı olduğunu ve Relux modelinin fiziksel dersliği, SG ortamında doğru bir şekilde temsil edebildiğini göstermektedir. Bunun aksine, '*Aydınlık: Seviye*', '*Görsel Konfor: Konforlu*' ve '*Görsel Performans: Kamaşma*' parametreleri Wilcoxon testine göre önemli farklılıklar göstermektedir ($p < 0,05$). Özellikle '*Görsel konfor*' ve '*Kamaşma*' parametreleri arasındaki bu önemli fark, fiziksel ortamlardaki ışık kaynaklarının, özellikle güneşin neden olduğu kamaşmanın, SG ortamında daha az rahatsız edici olduğu anlamına gelmektedir. Ayrıca katılımcılar, SG ortamını fiziksel dersliğe kıyasla daha konforlu ve çalışmaya daha uygun bulmuşlardır.

'*Depresif / Keyifli*' ve '*Sıkıcı / İlgi Çekici*' gibi duygusal parametrelerde düşük Spearman korelasyon değerleri, SG teknolojisinin fiziksel ortamdaki deneyimi yansıtmada açısından kısıtlılıklarına işaret etmektedir. Bu iki parametreye göre katılımcılar SG ortamını daha keyifli ve ilgi çekici bulmuşlardır. Bunun nedeni, katılımcıların sanal bir ortamı deneyimleme heyecanından kaynaklanan "yenilik etkisi" (novelty effect) olabilir. '*Renk ve Doğallık*' parametresinde fiziksel ve SG ortamları için aritmetik ortalamalar incelendiğinde ise SG ortamının fiziksel dersliğin ışık rengini ve canlılık algısını yansıtabildiği saptanmıştır.

4. Sonuçlar

Bu çalışma, fiziksel bir dersliğin aydınlatma koşullarını ve görsel konforunu SG ortamına aktarılmış modeliyle karşılaştırmıştır. Araştırma, sanal gerçeğin fiziksel ortamın genel atmosferini ve aydınlatma koşullarını yansıtmada yüksek tutarlılık gösterdiğini ortaya koymuştur.

Tablo 1: İstatistiksel Analiz Sonuçları

		Ortalama (Fiziksel)	Ortalama (SG)	Wilcoxon (p)	Spearman (r _s)
Aydınlık	Seviye	4.3	3.6	0.032*	0.789**
	Dağılım	3.5	4.1	0.653	0.804**
Görsel Konfor	Konforlu	3.4	4.5	0.034*	0.725**
	Sıkıcı / İlgı Çekici	3.2	4.0	0.215	0.51
	Depresif / Keyifli	3.4	4.2	0.147	0.485
Netlik	Bulanık / Net	4.5	4.0	0.046*	0.741**
	Detaylar Görünmez / Detaylar Görünür	4.5	4.2	0.373	0.618
Renk ve Doğallık	Soğuk / Sıcak	3.5	3.9	0.575	0.719**
	Doğallık	3.1	3.8	0.263	0.592
	Suluk / Canlı	3.9	3.8	0.435	0.547
Görsel Performans	Kamaşma	1.9	1.2	0.008*	0.654
Genel	Görsel Kalite	3.9	4.1	0.904	0.896**
	Çalışmaya Elverişlilik	3.6	4.4	0.018*	0.818**
Wilcoxon: *p < 0.05. Spearman **r _s ≥ 0.70					

Bu çalışma, 17 kişilik bir katılımcı grubu ile yürütülmüştür. Gelecek çalışmalarda, örneklem sayısının artırılması planlanmaktadır. Araştırmada fiziksel ve SG ortamları arasındaki en belirgin fark, kamaşma algısında gözlemlenmiştir. Bu durum, SG gözlüğünün donanımsal sınırlılıklarıyla doğrudan ilişkilidir. Çalışmada kullanılan SG gözlüğü, Meta Quest 3S, hızlı geçişli (*fast-switch*) LCD panele ve Fresnel lense sahiptir. Ayrıca parlıltı (luminans) üst sınırı, yaklaşık olarak her göz için 100 nit (cd/m^2) seviyesindedir. SG gözlükleri (HMD), teknolojisindeki sınırlı parlıltı aralıkları nedeniyle kamaşma gibi durumları tam olarak yansıtamamaktadır ve yüksek dinamik aralıklı (HDR) görüntüleri üretememektedir. Bu parlıltı sınırlarından kaynaklı algı farklılıklarını azaltmak amacıyla, “ton eşleme” (tone mapping) algoritmaları literatürde tercih edilmektedir (Moscato vd., 2021). Simülasyonlardan elde edilen HDR görüntülerin, insan gözünün parlaklık algısına en yakın olacak şekilde ton eşlemeden geçirilmesi SG teknolojisi kullanılan görsel konfor değerlendirmelerinde doğruluğu artıracaktır. Bunlara ek olarak, anket sırasında her katılımcının derslik içerisinde farklı konumlarda bulunması da araştırmanın kısıtlılıklarından biridir. Çünkü görsel konfor bireyin bakış açısına ve ıılık kaynağına göre konumuna bağlıdır. Bu durumda, katılımcıların maruz kaldıkları kamaşma konumlarına bağlı olarak da değişmiştir.

Donanım sınırlamaları ve bireysel deneyim farklılıkları nedeniyle bazı parametrelerde sapmalar olsa da katılımcıların yanıt eğilimlerindeki istatistiksel tutarlılık, SG teknolojisinin fiziksel ortamları etkili bir şekilde temsil edebildiğini göstermiştir. Sonuç olarak bu çalışma, aydınlatma tasarımının erken aşamalarında SG tabanlı değerlendirmelerin, fiziksel ortamlardaki kullanıcı deneyimini öngörmek için etkili bir yaklaşım olduğunu göstermektedir.

Teşekkür

Bu çalışmanın içerdığı anketin gerçekleştirilebilmesi için gerekli etik kurul onayı, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Sosyal ve Beşerî Bilimleri Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğı Kurulu’ndan İYTE-SBBAYEK-0008 nolu dosya ile, 31.12.2025 tarihinde ve 12/01 sayılı karar ile alınmıştır. Ankete katılarak vaktini ayıran tüm katılımcılara teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Abd-Alhamid, F., Kent, M., Bennett, C., Calautit, J., & Wu, Y. (2019). Developing an innovative method for visual perception evaluation in a physical-based virtual environment. *Building and Environment*, 162, 106278. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106278>.
- Bridge, P. D., & Sawilowsky, S. S. (1999). Increasing physicians' awareness of the impact of statistics on research outcomes: Comparative power of the t-test and Wilcoxon rank-sum test in small samples applied research. *Journal of Clinical Epidemiology*, 52(3), 229–235. [https://doi.org/10.1016/S0895-4356\(98\)00168-1](https://doi.org/10.1016/S0895-4356(98)00168-1).
- Chen, Y., Lam, J. C., & Li, D. H. W. (2019). Virtual reality in lighting research: Comparing physical and virtual lighting environments. *Building and Environment*, 162, 106273. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106273>.
- Cortina, J. M. (1993). What is coefficient alpha? An examination of theory and applications. *Journal of Applied Psychology*, 78(1), 98–104. <https://doi.org/10.1037/0021-9010.78.1.98>.
- Hauke, J., & Kossowski, T. (2011). Comparison of values of Pearson's and Spearman's correlation coefficients on the same sets of data. *Quaestiones Geographicae*, 30(2), 87–93. <https://doi.org/10.2478/v10117-011-0021-1>.
- İzmirlioglu, M., & Sözer, H. (2025). Enhancing virtual indoor environment and energy efficiency with real-time BIM and Unreal Engine integration in building lighting design. *Ain Shams Engineering Journal*, 16, 103249. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2024.103249>.
- Kayhan, A. M., Şahin, A., & Erkan, İ. (2021). The effect of types of light on people's mood using a church as an example in the virtual reality. *Mental Health, Religion & Culture*, 24(5), 504–518. <https://doi.org/10.1080/13674676.2020.1850665>.
- Kurpınar, G., Çevik, A., & Kurpınar, Y. (2025). Investigation of the use of immersive virtual reality in the architectural design process. *GU Journal of Science, Part C: Design and Technology*, 13(1), 260–271. <https://doi.org/10.29109/gujsc.1572568>.
- Moscoso, C., Chamilothoni, K., Wienold, J., Andersen, M., & Matusiak, B. (2021). Window size effects on subjective impressions of daylight spaces: Indoor studies at high latitudes using virtual reality. *LEUKOS*, 17(3), 242–264. <https://doi.org/10.1080/15502724.2020.1726183>.
- Mostafavi, A., Cruz-Garza, J. G., & Kalantari, S. (2023). Enhancing lighting design through the investigation of illuminance and correlated color temperature's effects on brain activity: An EEG-VR approach. *Journal of Building Engineering*, 75, 106776. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106776>.

The Translation of Architectural Terminology to the Definition of Virtual Territory

Dilşad Nur Altınışik ¹ 

¹TED University

¹dilsadaltinisik@gmail.com

Abstract

This study aims to explore the intersection of architectural concepts and virtual territories, particularly focusing on virtual territories as the unique medium for expressing and understanding space. While traditional architecture relies on physical forms and boundaries, virtual spaces challenge these conventions, emphasizing how virtual territories are defined and represented, tracing the evolution of the entity “cyberspace”, first implied by Gibson, by examining the implications the study focuses on how cyberspace serves as a container for various virtual environments, including metaverses, in relation to representation and translation of architectural space. The analysis emphasizes the role of metaphors and terminology derived from architecture in the understanding of virtual territories. Furthermore, the study examines the translation of architectural terminology from the realm of architecture into the virtual environment, regarding perception. By investigating the process of representation and the subsequent layers of translation, the study aims to uncover the intricacies of space identity in virtual territories, questioning the boundaries of identity and those that define these spaces, and the implications for future discourse of the virtual environment.

Keywords: Virtual Territories, Representation, Translation.

Mimari Terminolojilerin Sanal Alan Kavramının Tanımına Aktarılması

Dilşad Nur Altınışik ¹ 

¹TED Üniversitesi

¹dilsadaltinisik@gmail.com

Özet

Çalışma, mimari kavramlar ve sanal alan arasındaki kesişimi incelemeyi amaçlayarak, özellikle dijital sanal alanları mekânı ifade etme ve aktarma açısından özgün bir ortam olarak ele almaktadır. Mimari alan fiziksel biçimlere ve sınırlara dayanırken, sanal mekanlar bu kabulleri sorgulamakta, sanal alanların nasıl tanımlandığı ve temsil edildiği sorusunu öne çıkarmaktadır. Bu bağlamda çalışma, Gibson tarafından öne sürülen “siberuzam” kavramının dönüşümünü inceleyerek bu kavramın çeşitli sanal ortamlar içinde kapsayıcı yaklaşımını incelemektedir. Siberuzam kavramı içinde Metaverse benzeri sanal ortamlar, mimari mekânın temsili ve aktarımı ile ele alınmaktadır. Ancak bu bildiri, sanal alanların ifade edilmesinde ve anlaşılmasında mimarlıktan türeyen metaforların ve terminolojilerin önemini vurgulamakta ve aktarımını incelemektedir. Bununla birlikte, mimari terminolojinin mimarlık alanından sanal çevreye ve ortama aktarımı algı bağlamında incelenerek, temsil süreci ve bunu izleyen aktarım katmanları araştırılarak, sanal ortamda mekansal kimliğin yapısını anlamak hedeflenmiştir. Dolayısıyla bu çalışma, bu alanları tanımlayan sınırları, kimlik tanımını, ve gelecekte sanal mekân söylemi açısından ortaya çıkabilecek sonuçları sorgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Sanal Alan, Temsil, Aktarım.

1. Virtual Territories in Digital Media

Mind and image function as fundamental and key actors in how space is constructed and perceived, whether the material presence is valid or transformed into another form of representation than phenomenal. The mind plays a crucial role in every construction process, as it enables the first phase of any material to be comprehended and imagined. Thus, imagination, in relation to the mind, creates a virtual first iteration of anything that is supposed to be produced. In the context of creating and representing architectural space in virtual territories, it is possible to discuss how those spaces are not literal architecture and do not reflect the properties of an actual architectural space; yet, they can be represented within conventional architectural frameworks and definitions. These kinds of contributions can be discussed by analyzing the virtual space and virtual territory, forming a distinctive typology of space in terms of the construction and representation of autonomous space. It's virtual, often imaginary, in a different, distinct medium than architecture.

To begin with, it is possible to focus on how that virtual space takes shape, centering on the virtual medium. Crysler, Cairns, and Heynen (2012), relying on the Deleuzian concept of the virtual, which they derived from Deleuze, propose the hypothesis that all architecture, whether built or unbuilt, is virtual (Crysler et al., 2012, p. 484). Virtual one, before the conception of the virtual medium of cyberspace, is a concept of imaginary entities that does not belong to the phenomenal world and is intangible. The virtual one is usually defined as the imaginary entity that was not possible to tangibilize in a phenomenal context, often relying on the mind and memory. Contemporary discussions about the virtual presence of a space, following the frequency of usage of those virtual environments, focus on how these not-so-real environments can be described. For instance, as being only one particular form of virtual space, cyberspace defines a virtual environment that enables communication and data collection, and describes the space in which communication occurs, conceptualized as a virtual territory.

1.1. Cyberspace

Especially in digital media, virtual space forms a significant amount of variables, and cyberspace is one of the fundamental concepts used to define virtual space. To gain a better understanding of the definitions of virtual space, it is relevant to revisit and examine the concept and definition of cyberspace first. Cyberspace can be understood as the container of several virtual spaces, such as metaverses, while virtual space is the medium in which those entities are formed. Rather than addressing those virtual spaces as literal forms of concrete architecture, it is possible to trace how architectural concepts and metaphors have been used to describe and interpret digitally mediated environments. Bukatman (1989) describes cyberspace as a limitless field of data, where science fiction works to make invisible monuments of information visible to human senses (Bukatman, 1989, p. 43). From this perspective, it is possible that the early iterations of the concept rely on the virtuality of cyberspace, which is imaginary and fictional, similar to the definition of virtual entities.

According to the Salem Press Encyclopedia, the term *cyberspace* was first suggested in 1982 by author William Gibson in a story described as "a graphic representation of data abstracted from the banks of every computer in the human system." (Lasky, 2025, p. 2.) The term *cyberspace* is a combination of the words "cyber", meaning anything related to electronic communication, and "space", as in architecture, to refer to an imaginary area of the internet that allows communication and the exchange of information. From this perspective, it is possible that the early iterations of the concept rely on the virtuality of cyberspace, which is imaginary and fictional, similar to the definition of virtual entities.

It is relevant to state that virtual space serves as a conceptual framework for metaphors of place-making, including cyberspace, networking, and information superhighways (Addams, 1997, p. 153). Drawing from this, although the medium of virtual reality is structured in a manner that draws on metaphors and terminologies from architecture, it reveals distinct patterns of spatial construction

that challenge conventional architectural concepts. Virtual worlds do not establish real boundaries and thresholds for conceptualizing a space, unlike the architectural medium. On the other hand, vice versa, virtual structures also take the opportunity to interpret architectural terms in their environment as metaphors, such as "lobby" and "room" (Addams, 1997, p. 155).

Within the light of this definition, it is possible to state that concepts such as cyberspace can be reinterpreted within the metaphorical structures of the virtual territories. Thus, the virtual one remains intangible, but it can be conceptually constructed using conventional architectural concepts that belong to the medium of architecture. Cyberspace becomes the metaphor itself for understanding how the metaverse is constructed. But why not translate? Why use the existing terminology to identify something different? Is that because this is how we perceive? So, what is the identity of the architecturally defined virtual "thing"? What aspects define the boundary of space in virtual territories? In order to answer these questions, it is first required to focus on the meaning of translation and how it is processed between mediums.

1. Translation of Architectural Terminology

It is crucial and relevant that the human mind tends to shape the language according to certain external inputs, such as perception. The translation of architectural terminology is related to how spatial definition is organized, shaped, and perceived. Thus, the translation process is affected by how the target and the reference are perceived. As Evans states, when our minds rely on the predominance of language, we might even risk enclosing architecture within its own compound, denying it communication with anything else to preserve its integrity. Drawing on Paul Valéry's idea that seeing is forgetting the name of the thing one sees, Evans argues that perception is a fundamental factor in shaping identity and relationships. (Evans, pp. 155) In this context, digital representations introduce an additional layer of translation to the process of perception. To discuss, it is needed to define representation as a medium; thus, various representations open new paths of translation. The "*thing we see*" becomes "*how we see*". Fixing on a dominant language or medium prevents us from recognizing the identity of "*how we see it*." Then the definition translates the process and action of "*seeing*" into the identity of "*it*". Thus, the translation and even transgression between mediums should be studied on how processes are perceived.

In the context of perception, translation occurs at the beginning of the understanding process and the act of apprehension. Similarly, the translation of architectural terminology into virtual territories occurs as an initial act of interpretation through which the human brain begins to recognize boundaries, relations, and spatial identities within that virtual environment. These discussions suggest that virtual spaces, or the metaverse, cannot be understood merely as an immaterial or fictional counterpart to literal architecture, but rather as a distinct spatial condition constructed through metaphors and perception on a distinct medium. In this regard, the metaverse is a virtual territory where space is unbuilt but constructed through representation, interaction, and presence. Thus, the question of how virtual space is formed shifts from whether it can be considered a space similar to literal architecture to how architectural thinking is transformed into the medium beyond the phenomenal world.

2.1. Definition of Boundaries

An architectural space, the fundamental defining point of the terminology, is the basic boundaries of a defined space. As the primitive element of architectural space, the room can be understood in various ways, depending on the occupational limitations it imposes. Yet, in architectural discourse, the room, as the unit of classification, often shapes the boundaries of defined space and particular functions. It is often enclosed and identified by its limits. As Evans (1997) suggested, if anything is described by an architectural plan, it is the nature of human relationships; the boundaries of a room rely on what that space is occupied for. Thus, walls, doors, passages, and thresholds are the means by which architecture regulates contact and separation between occupants. Musgrove and Doidge

(1970), on the other hand, argue that the definition of the rooms relies on the names and purposes, which no longer classify their functional and material properties. Rooms defined by temporarily assigned roles instead of their appearance and existence as space. (Musgrove and Doidge, pp. 31) In this regard, it is possible to discuss how the term “room” is translated into virtual territories to define virtual limitations. The question of whether the limitations that shape the boundaries of said virtually defined rooms are the limitations of the virtual space, or whether the virtual space is defined by terminology, is relevant to discussing and defining how this virtual space acts as an environment.

2.2. Translation Between Mediums

Translation, a definition from one medium to another, shifts how the concept fits into the environment. Virtual territories challenge the definitions from a much broader perspective. To identify the conceptual framework for translation to the digital medium, it is relevant to investigate how other terminologies take shape in this medium. Carpo argues that digital systems do not require information to be pre-organized into human taxonomies, since computers search rather than sort (Carpo, 2017, pp. 30). This statement marks a shift in the logic of terminology in virtual environments and provides a useful conceptual frame for the corresponding shift in translation. Carpo’s argument supports how architectural terminology also shifts definition in the digital environment. In the context of the room and its definition, drawing on Musgrove and Doidge’s discussion of how classification works in a virtual environment, it is possible to state that, rather than by function, occupation, or names, the room is defined by relations, access points, paths, and human perception. Thus, the translation of architectural terminology means more than finding an equivalent; it involves reconfiguring existing spatial elements according to their perceptual definitions, as they occur in virtual environments. In addition, its representation also shifts according to the act of transgression.

The translation of architectural terminology into virtual territory conducts a fundamental shift in the way spatial meaning is produced. Then, how can architectural language describe spaces that are spatially perceived, navigated, and inhabited but not built?

In the means of architecture, a building does not need to be built in order to read and discuss. However, space needs to be constructed in a way that allows the user to perceive and navigate in order to be read. In the context of virtual territory, perception becomes a central concept through which architectural space and its elements are translated and apprehended. Gomez-Tone et al. (2021) argue that architectural space is understood through perception, which allows users to construct meaning of sensory experience, pointing out how perception is discussed through decades of studies on architectural space. According to Cavrell (2023), it is not possible to control how the space permits the body in it. When one enters a space that is not a stage with its calculated dimensions and delimitations of light, there is no control over what will happen (Cavrell, 2023, p. 17). The relationship between the environment and bodies throughout the metaphoric structure of virtual environments allows one to understand how interactions work between the body of the twin and virtual environments. This instance leads to a discussion of the virtual parallels created in metaverses as representations of entities from the phenomenal world, such as living creatures, urban environments, and human-made entities.

These discussions are particularly significant for virtual space, as Gomez-Tone et al. (2021) refer to as immersive virtual reality, where space is defined by the experience, rather than the physical existence. Visual perception and bodily cognition take role in the experience of those spaces. Therefore, the translation of architectural terminology into virtual territory is a perceptual process in which spatial meaning is reconstructed through embodied experience of understanding.

2. Room as the Translation

The room functions as a central concept for examining how architectural terminology is translated into virtual territory. Within architectural discourse, the room is typically regarded as a fundamental

spatial unit, characterized by boundaries, occupation, and function. Beatriz Colomina, in her study of the Eameses' multimedia environments, indicates that modern perception is already conditioned by multiple simultaneous images and by what she calls the "space of information" (Colomina, 2001). In such spaces, the boundary is not defined solely by walls, floors, and ceilings, but also by screens, frames, projections, and especially flows. The room becomes more than a container. Zevi also mentioned in his book that the space contains the container and the contained, and that voids and masses create those dimensions of architecture. (Zevi, 1974, pp.24) However, with the shift in paradigm, it is possible to state that the space is now defined by how it is perceived and the kinds of flows it allows, rather than by what it contains and how.

Since the terminology is about how the space is experienced alongside its descriptive function, when shifting from the real world to the virtual environment, architectural terminology need not carry its physical properties. For instance, a door does not have to operate by its swing, but needs to carry the means of access, entrance, and threshold. The translation of the room into virtual territory is therefore a perceptual process. A virtual room is a spatial identity produced through the intersection of representation, perception, and interaction. Thus, the concept of the room as translation demonstrates the transformation of architectural terminology within the virtual medium. Architectural terms do not vanish when their physical references are eliminated; rather, they are reconstructed according to a different spatial logic. The virtual room emerges as a spatial identity formed through the interaction of representation, perception, and interaction. It is not a replica of the physical room, but a translated architectural condition that renders virtual territory intelligible, navigable, and inhabitable.

Thus, the concept of the room as translation demonstrates the transformation of the terminology without losing the concept and meaning. It often changes form and way of perception, but the mind tends to connect similar concepts. Going back to Addams' (1997) reflection on "room" as the concept of defined space in the virtual medium of cyberspace, it does not bear the properties of a container but acts as a container for the content that, as the literal room of the architectural realm, functions. For instance, a chatroom named after its function is similar to the discussion of Musgrove and Doidge (1970) on how architectural space is named after its functions. However, a chatroom lacks physical properties or material existence, and this is where virtual territories shift. The virtual room emerges as a spatial identity formed through the interaction, representation, and perception. Gomez-Tone et al. (2021), on the other hand, help clarify this point by emphasizing that architectural space becomes meaningful through perception and bodily experience. In virtual territory, users apprehend space through movement, scale, visual orientation, and interaction, even when the space lacks material presence. Therefore, the translation of the room into virtual territory occurs at the level of spatial apprehension: the moment when the user begins to perceive a virtual environment as a spatial condition.

In this sense, the room becomes a productive example for understanding translation as a spatial operation rather than a direct transfer of meaning. Its architectural identity is not entirely lost in the virtual medium; instead, it is represented through the conditions of that medium in order to allow itself to be perceived. Virtual territories are a medium in which architectural concepts are transformed into new spatial identities through perception and use. Thus, the virtual room does not need to reproduce the physical characteristics of the architectural room in order to function as a room. Rather, it must produce a recognizable spatial condition through access, orientation, interaction, enclosure, and perceptual distinction.

4. Conclusion

It is relevant that virtual territories do not specifically point to digital environments or the space created within the digital medium. However, this study limits its focus to virtual territories in digital media, and there is a crucial need for further studies to develop an argument for the definition of

virtual space created in the digital medium. The discussion shows that virtual territory should not be understood merely as an immaterial imitation of physical architecture. Rather, it is a distinct spatial condition constructed through representation, perception, interaction, and metaphor. Architectural terminology becomes significant in this context because it provides a language through which users begin to recognize boundaries, relations, and spatial identities within virtual environments.

The room demonstrates this transformation clearly. In physical architecture, the room is usually associated with enclosure, function, occupation, and material limits. However, when the room is translated into virtual territory, these defining conditions are reconfigured. The virtual room is not necessarily defined by permanent physical properties, but by perceptual and operational conditions such as access, orientation, interaction, visibility, and embodied experience.

In this sense, the translation of architectural terminology is also perceptual, as well as descriptive. In virtual territory, users apprehend space through movement, scale, visual orientation, and interaction, even when the space lacks material presence. Therefore, the translation of the room into virtual territory occurs at the level of spatial apprehension: the moment when the user begins to perceive a virtual environment as a spatial condition.

The study also suggests that contemporary virtual environments require a reconsideration of architectural boundaries. Boundaries in virtual territory are not necessarily walls or physical separations. They can be created through images, interfaces, screens, access points, programmed limits, and navigational flows. This allows the virtual room to be understood not as a loss of architecture, but as a transformation of architectural logic.

Consequently, virtual territories challenge architectural discourse to rethink how space is defined when material enclosure is no longer the primary condition. The room, as a translated term, reveals that architecture can persist in virtual media not through physical construction, but through the organization of perception, relation, and experience. In the contemporary situation, it is possible to state that studies and definitions are chaotic. Building on this translation, further studies aim to develop a framework and guidelines for virtual space, in which architectural terminology can be used as a conceptual and perceptual tool for defining, organizing, and evaluating spatial conditions in virtual territories. The framework should rely on the studies about architectural space and terminology in virtual territories in order to specify the representation and construction of space in those mediums.

REFERENCES

- Addams, P. C. (1997). Cyberspace and Virtual Places. *Geographical Review*, 87(2), 155-171.
- Bukatman, S. (1989). The Cybernetic (City) State: Terminal Space Becomes Phenomenal. *Journal of the Fantastic in the Arts*, Vol. 2, No. 2 (6), 42-63.
- Campbell, J. (2025). *Metaverse*. Salem Press Encyclopedia.
- Cavrell, H. E. (2023). *The Body and Space: real and imaginary - Musings on site-specific* Rev. Bras. Estud. Presença.
- Chan, C.-S., Bogdanovic, J., & Kalivarapu, V. (2022). Applying immersive virtual reality for remote teaching architectural history. *Education and Information Technologies*, 27(3), 4365-4397.
- Colomina, B. (2001). Enclosed by Images: The Eameses' Multimedia Architecture. *Grey Room*, 2, 7-29.
- Evans, R. (1997). *Figures, doors and passages*. In R. Evans, *Translations from drawing to building and other essays* (pp. 55-91). MIT Press.
- Crysler, C. G., Cairns, S., & Heynen, H. (2012). *The SAGE Handbook of Architectural Theory*. SAGE Publications Ltd.
- Deleuze, G. (1986). *Cinema 1: The movement-image* (H. Tomlinson & B. Habberjam, Trans.). University of Minnesota Press. (Original work published 1983)
- Evans, R. (1997). *Translations from drawing to building*. In R. Evans, *Translations from drawing to building and other essays* (pp. 153-193). MIT Press.
- Gomez-Tone, H. C., Martin-Gutierrez, J., Bustamante-Escapa, J., Bustamante-Escapa, P., & Valencia-Anci, B. K.

- (2021). Perceived sensations in architectural spaces through immersive virtual reality. *VITRUVIO: International Journal of Architectural Technology and Sustainability*, 6(2), 70–81.
- Lasky, J. (2025). *Cyberspace*. Salem Press Encyclopedia.
- Moneta, A. (2020). Architecture, Heritage, and the Metaverse: New Approaches and Methods for the Digital Built Environment. *Traditional Dwellings and Settlements Review*, 32(1), 37-49.
- Musgrove, J., & Doidge, C. (1970). Room classification. *Architectural Research and Teaching*, 1(1), 31–36.
- Riahi, P. (2017). Expanding the boundaries of architectural representation. *The Journal of Architecture*, 22(5), 815–824.
- Schaik, L. (1985). Walls, Toys and The “Ideal” Room: An Analysis of The Architecture of Sir John Soane. *Aa Files*, 9, 45–53.
- Saunders, C., Rutkowski, A.F., Genuchten, M., Vogel, D., & Orrego, J. M. (2011). Virtual Space and Place: Theory and Test. *MIS Quarterly*, December 2011, Vol. 35, No. 4, 1079-1098.
- Schlemmer, E. & Backes, L. (2014). *Learning in Metaverses : Co-Existing in Real Virtuality*. Information Science Reference.
- Simone, A. (2024), Polymorphic Matters: Architecture, Change and Imagination. *Archit. Design*, 94, 102-109.
- Zevi, B. (1974). *Architecture as Space: How to Look at Architecture*, Horizon Press.

Sanal Gerçeklik Ortamında Etkileşimli Mimari Miras Deneyimi: İstanbul Kara Surları Örneği

Elif Erkol¹ ; Derya Güleç Özer² 

^{1,2}İstanbul Teknik Üniversitesi

¹erkol24@itu.edu.tr; ²dgulec.itu.edu.tr

Özet

Güncel teknolojiler kültürel miras alanlarının yüksek doğrulukta ve dijital olarak belgelenmesine olanak tanımaktadır. Ancak bu yöntemler çoğunlukla fiziksel temsil odaklı kalmakta; kültürel mirasın deneyimsel, anlatısal ve yorumlamaya dayalı boyutlarının kullanıcıya aktarımında sınırlılıklar barındırmaktadır. Bu durum, özellikle farklı tarihi ve fiziksel katmanların bir arada bulunduğu çok katmanlı miras alanlarında daha görünür hale gelmektedir. Bunlara ek olarak, mirasın dijital temsilde dijital araçlara ek olarak oyunlaştırma yöntemlerinin de kullanıcı katılımı ve etkileşimli süreçleri desteklemek üzere tasarım çerçevelerinde sıklıkla yer aldığı görülmektedir. Ancak, bu çalışmalar da mirasın öznel olarak algılanması, yorumlanması noktasında kısıtlı kalmakta; büyük bir kısmı, kullanıcıyı hala önceden tanımlanmış senaryoların aktarımına maruz kalan tek yönlü bir alıcı olarak konumlandırmaktadır. Bu çalışma, sanal gerçeklik (SG) ortamında oyunlaştırma yöntemleriyle desteklenen kişiselleştirilmiş bir kültürel miras deneyimini hedeflemektedir. Çalışma, UNESCO Dünya Mirası listesindeki İstanbul'un dört Üstün Evrensel Değerinden (ÜED) biri olan İstanbul Kara Surları'na, özellikle de Silivrikapı–Mevlanakapı hattına odaklanmaktadır. Çalışmada, alanın fotogrametrik yöntemlerle dijital modelinin oluşturulması, oyunlaştırılmış etkileşimli rotanın tasarımı, SG ortamının tasarlanması ve deneyimin test ve değerlendirme sürecini kapsayacak olan karma bir metodoloji yaklaşımı benimsenmiştir. Oluşturulan rotadaki düğüm noktaları kullanıcılara yazıtlar, devşirme elemanlar ve tarihi anlatılar gibi miras unsurlarının görsel ve işitsel temsillerini içeren etkileşimler sunmaktadır. Aynı zamanda oluşturulan sanal gerçeklik (SG) ortamı, kullanıcıların farklı miras temsilleriyle etkileşime girmelerine ve böylece kendi deneyimsel yollarını oluşturmalarına olanak tanımaktadır. Araştırma, miras alanlarında bu tür seçim temelli oyunlaştırılmış deneyimlerin kullanıcı katılımını nasıl artırabileceğini ve kültürel mirasla daha aktif ve yorumlayıcı bir ilişkiyi nasıl teşvik edebileceğini keşfetmeyi amaçlamaktadır. Çalışma, kültürel mirasın dijital temsil süreçlerinde kullanıcı deneyimi, etkileşim ve katmanlı yorumlama yaklaşımlarını bir araya getirerek sanal gerçeklik ortamında alternatif bir dijital miras deneyimleme yöntemi önermektedir. Ayrıca çalışma, dijital miras çalışmalarında deneyim odaklı temsil yaklaşımlarına yönelik yönetsel bir çerçeve sunarak alana katkı sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Oyunlaştırma, Mimari Mirasın Dijitalleştirilmesi, Sanal Gerçeklik, Kullanıcı Deneyimi, İstanbul Kara Surları.

An Interactive VR Experience for Architectural Heritage: The Istanbul Land Walls

Elif Erkol¹ ; Derya Güleç Özer² 

^{1,2}Istanbul Technical University

¹erkol24@itu.edu.tr; ²dgulec.itu.edu.tr

Abstract

Current technologies enable high-fidelity digital documentation of cultural heritage sites. However, these methods often remain focused on physical representation and have limited capacity to convey the experiential, narrative, and interpretive dimensions of cultural heritage to the user. This issue becomes particularly evident in multi-layered heritage sites where different historical and physical layers coexist. Additionally, to promote user engagement and interactive processes, gamification techniques are frequently integrated into design frameworks alongside digital tools in the digital representation of heritage. However, these studies remain limited in terms of the subjective perception and interpretation of cultural heritage; most of them still position the user as a one-way recipient exposed to the transmission of predefined scenarios. This study aims to create a personalized cultural heritage experience supported by gamification methods within a virtual reality (VR) environment. The study focuses on the Istanbul Land Walls, one of the four Outstanding Universal Values (OUV) of Istanbul listed on the UNESCO World Heritage List, specifically the Silivrikapı–Mevlanakapı section. The study adopts a mixed-methods approach encompassing the creation of a digital model of the site using photogrammetric methods, the design of a gamified interactive route, the design of the VR environment, and the testing and evaluation of the experience. The route offers interactive nodes that display visual and auditory representations of heritage elements such as spolia, architectural features, and historical narratives. At the same time, the virtual reality (VR) environment enables users to interact with various heritage representations, allowing them to design their own experiential paths. The research aims to explore how such choice-based gamified experiences in heritage settings can increase user engagement and foster a more active and interpretive relationship with cultural heritage. The study proposes an alternative VR-based method for experiencing digital heritage by integrating user experience, interaction, and layered interpretation approaches into the digital representation processes of cultural heritage. Additionally, it is anticipated that the study will contribute to the literature by providing a methodological framework for experience-oriented representation approaches in digital heritage research.

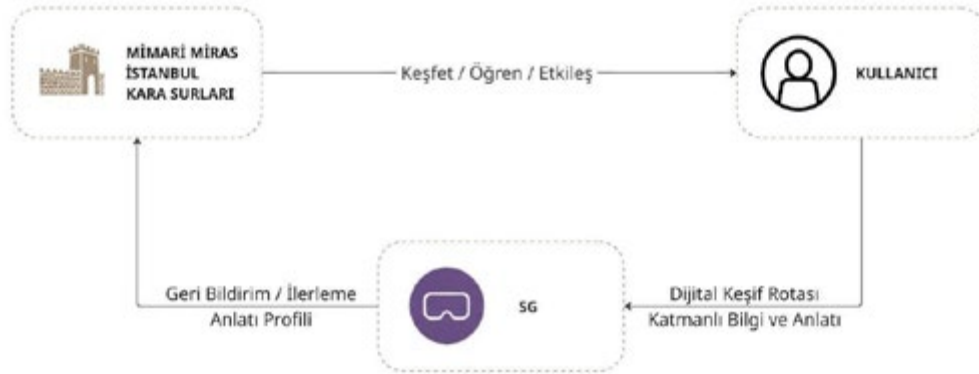
Keywords: Gamification, Digitalization of Architectural Heritage, Virtual Reality, User Experience, Istanbul Land Walls.

1. Giriş

Kültürel miras geçmişten günümüze kümülatif olarak ilerleyen, toplum ve toplumu oluşturan somut ve somut olmayan bileşenleri bir arada barındıran varlıklar bütünüdür. Kültürel miras alanları ortak tarihimizi tanımladığından, bu alanların doğru ve anlamlı bir şekilde algılanmasını sağlamak amacıyla etkili şekilde sunulmaları önemlidir (Gül vd., 2026). Bu bağlamda, ICOMOS (2008) Kültürel Mirasın Algılanması ve Sunumu Tüzüğü (ICOMOS Charter for the Interpretation and Presentation of Cultural Heritage Sites), kültürel miras alanlarının algılanması, yorumlanması ve sosyal değerinin anlaşılması gibi önemli ilkeleri tanımlamaktadır. Bu ilkeler, ziyaretçilerin kültürel miras alanlarıyla olan fiziksel ve bilişsel bağlarını güçlendirmeyi ve alanın tarihsel ve kültürel değerlerinin daha iyi anlaşılmasını desteklemeyi amaçlamaktadır.

Sürükleyici gerçeklik teknolojileri, kullanıcı odaklı anlatılar sunarak, kültürel miras alanlarında erişilebilirliği artırarak ve kültürel varlıkları dijital ortamda erişilebilir hale getirerek kültürel öğrenme süreçlerini desteklemektedir (Bekele vd., 2019). Araştırmalar, Karma Gerçeklik (KG), Sanal Gerçeklik (SG) ve Artırılmış Gerçeklik (AG) gibi dijital yöntemlerin oyunlaştırma yöntemleriyle birleştirilmesinin, kültürel miras alanlarının deneyimini ve sunumunu iyileştirdiğini göstermektedir. Ayrıca, sanal gerçeklik ortamında gerçekleştirilen kültürel miras deneyimlerinin de etkisi açıktır. Kullanıcılar tarihi alanlarla daha derin bir bağ kurar ve öğrenme sonuçlarını iyileştirir, böylece genel katılımı ve kültürel farkındalığı teşvik eder (Varinlioglu & Halici, 2019; Sanfilippo vd., 2025).

Kültürel miras deneyimini zenginleştirmek amacıyla mevcut dijital temsiller ve oyunlaştırma yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Kültürel miras alanındaki güncel oyunlaştırma yaklaşımlarında ise kullanıcı katılımı ve etkileşimli süreçler tasarım çerçevelerinde sıklıkla yer almaktadır. Bununla birlikte, bu çalışmaların büyük bir kısmı, kullanıcıyı hala önceden tanımlanmış senaryoların aktarımına maruz kalan tek yönlü bir alıcı olarak konumlandırmaktadır. Özellikle, özerklik boyutunu ele alan çalışmalar olmasına rağmen, bu tasarımların kullanıcıların mirası öznel olarak algılama ve yorumlama biçimlerini nasıl dönüştürdüğüne dair çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir (Marques vd., 2023).



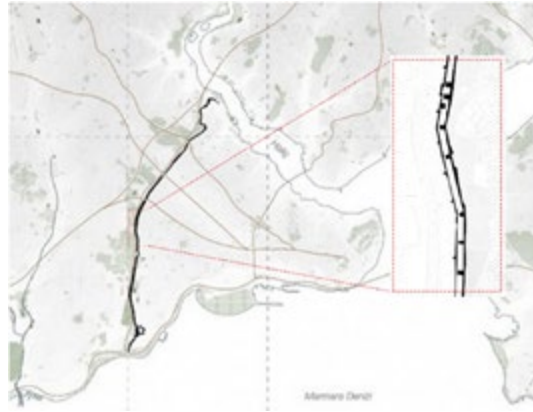
Şekil 1: Çalışmanın konsept diyagramı

Bu bağlamda çalışma kapsamında, katılımcı ile mimari miras arasındaki ilişkiyi güçlendirmeyi amaçlayan oyunlaştırma öğeleriyle desteklenmiş bir sanal gerçeklik deneyim rotası önerilmektedir. Çalışma alanı olarak Bizans döneminden günümüze ulaşan ve çok katmanlı yapısıyla öne çıkan İstanbul Kara Surları Silivrikapı–Mevlanakapı hattı seçilmiştir (Şekil 2). Alan katmanlı yapısı sebebiyle dijital anlatı ve etkileşim senaryoları geliştirmek için uygun bir araştırma zemini sunmaktadır. Ayrıca seçilen hattın okunabilir mimari katmanları ve erişilebilirliği çalışma alanının tercih edilmesinde etkili olmuştur.

Bu çalışma, kültürel mirasın önemli bir bileşeni olan mimari mirası sadece aktarılacak bir bilgi bütünü olarak değil, kullanıcı tercihleriyle şekillenen öznel bir deneyim alanı olarak ele almaktadır. Çalışmanın özgünlüğü, mimari mirasın sunumunda oyunlaştırma yöntemlerine yaklaşımında yatmaktadır. Bu bağlamda, oyunlaştırma yalnızca doğrusal anlatıları sunan bir araç olarak değil, kullanıcı tercihlerine göre şekillenen ve kullanıcının kendi deneyimlerini üretmesine olanak sağlayan bir yöntem olarak benimsenmektedir. Doğrusal anlatılara dayanan mevcut birçok dijital miras uygulamasının aksine bu çalışma, kullanıcıların anlatının pasif taşıyıcılarından deneyimin aktif bileşenlerine dönüşmelerini hedefleyen etkileşimli bir deneyim tasarımı önermektedir.

2. Çalışma Alanı: İstanbul Kara Surları

Çalışma alanını İstanbul'un kent silüetinin öne çıkan en belirgin unsurlarından biri, Bizans döneminden (M.S. 5. yy.) günümüze kadar ayakta kalmış olan İstanbul Kara Surları Silivrikapı-Mevlanakapı hattı oluşturmaktadır. Yapı, Bizans, Osmanlı İmparatorluğu ile günümüz Türkiye'sinin farklı kültürel ve tarihi bağamlarına ışık tutan katmanlarıyla öne çıkmaktadır. Surlar, büyük duvar, ön duvar ve hendek olmak üzere döneminin savunma yapılarından farklı olarak üç ana katmandan meydana gelmektedir. Yapı aynı zamanda geçmiş ile bugünü birbirine bağlayan önemli bir miras alanı olarak, şehrin kültürel kimliğinin hayati bir parçasıdır (Asutay-Effenberger, 2021). Surlar, İstanbul'un Tarihi Alanları olarak belirlenen dört Dünya Mirası Alanı'ndan biri olarak 1985 yılında UNESCO Dünya Mirası Listesi'ne kabul edilmiştir (UNESCO World Heritage Centre, t.y.).



Şekil 2: Çalışma alanı gösterimi

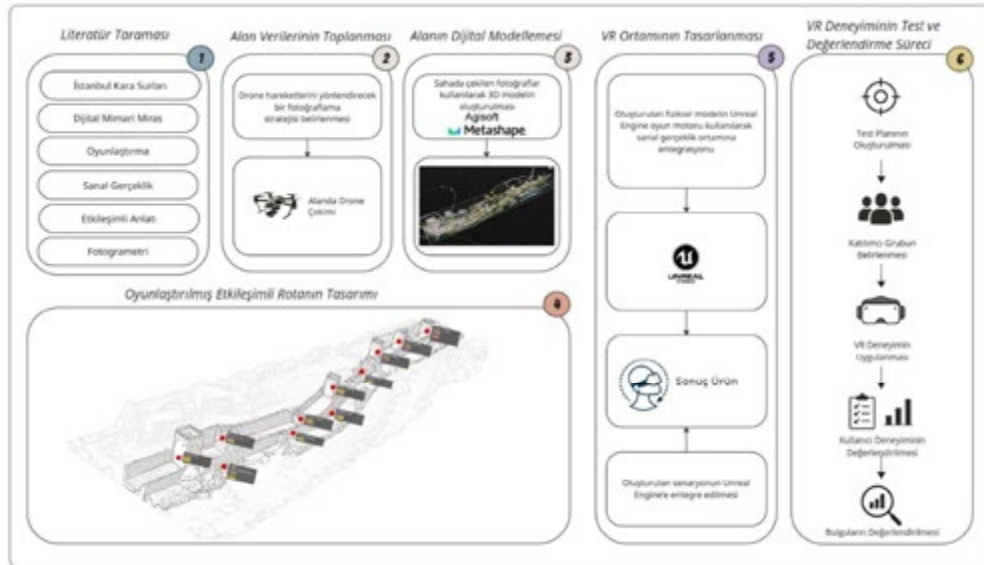
Kara Surları yalnızca bir savunma yapısı değil, aynı zamanda farklı dönemlere ait fiziksel, sosyal ve kültürel katmanların bir arada okunabildiği çok katmanlı bir kültürel peyzaj alanı olarak değerlendirilmektedir (Çorakbaş, 2021). Surlar boyunca gözlemlenen farklı duvar örgüleri, müdahale izleri, devşirme mimari elemanlar (spolia), bostan alanları ve dönemsel ekler, alanın katmanlı yapısını görünür kılan temel mekânsal bileşenler arasında yer almaktadır. Özellikle farklı dönemlere ait müdahalelerin aynı yüzey üzerinde üst üste gelmesi yapının hem anlatısal hem de fiziksel olarak çok katmanlı bir okuma üretmesine neden olmaktadır.

UNESCO'nun Tarihi Kentsel Peyzaj yaklaşımı, kültürel miras alanlarını yalnızca fiziksel yapılar üzerinden değil; sosyal bağlam, kültürel süreklilik ve mekânsal ilişkiler üzerinden değerlendirmektedir. Benzer şekilde ICOMOS (2008) Kültürel Mirasın Algılanması ve Sunumu Tüzüğü, kültürel miras alanlarının yorumlanmasını kullanıcı ile alan arasında anlamlı ilişkiler kuran bir iletişim süreci olarak tanımlamaktadır. Bu bağlamda Kara Surları'nın sahip olduğu çok katmanlı yapı, kültürel mirasın belgelenmesinin yanı sıra, aynı zamanda deneyimlenebilir ve yorumlanabilir biçimde temsil edilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Farklı dönemlere ait fiziksel ve anlatısal izlerin parçalı biçimde okunabilmesi, alanın kullanıcı tarafından bütüncül olarak algılanmasını zorlaştırmaktadır. Fotogrametri, LiDAR ve lazer tarama gibi dijital belgeleme teknolojileri, kültürel miras alanlarının oldukça doğru bir şekilde belgelenmesini sağlasa da kültürel mirasın anlatı, sosyal ve kültürel hafıza katmanlarını yansıtmada sınırlı kalmaktadır (Valtolina, 2016). Güncel dijital belgeleme yöntemleri yüksek doğrulukta veri üretmesine rağmen, alana dair katmanlar arasındaki mekânsal ve anlatısal ilişkilerin deneyim odaklı aktarımında sınırlı kalabilmektedir. Bu durum, Kara Surları'nı dijital miras temsili içerisinde katmanlı yorumlama yaklaşımlarının araştırılması açısından uygun bir çalışma alanına dönüştürmektedir.

3. Yöntem

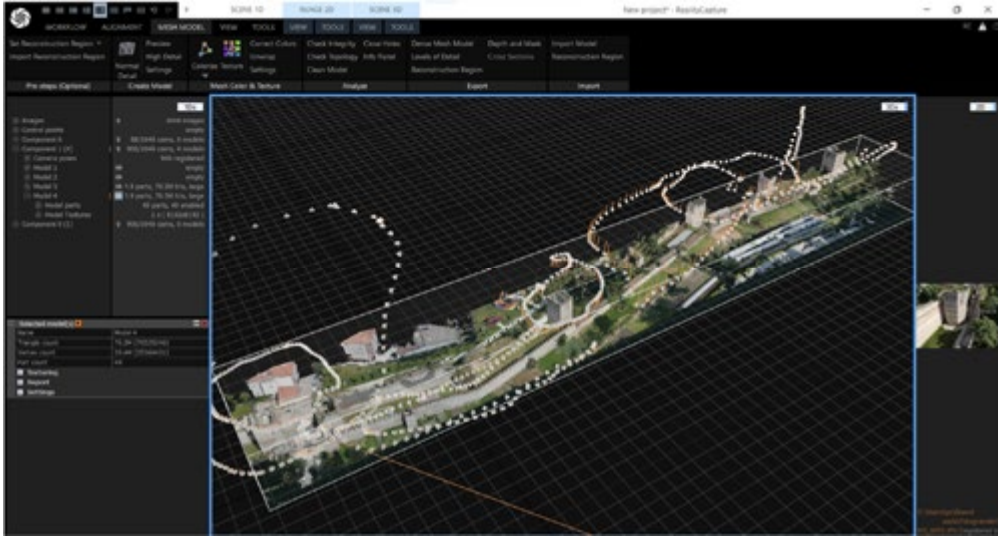
Bu çalışma, 1985 yılında UNESCO Dünya Mirası Listesi'ne dahil edilen İstanbul Surları'na, özellikle de Silivrikapı–Mevlanakapı hattı boyunca uzanan kısmına odaklanmaktadır. Çalışmanın metodolojisi nitel ve nicel araştırmayı bir arada barındıran hibrit bir yapı sunmaktadır. Çalışmanın ilk aşamasında, etkileşimli bir sanal miras ortamı için üç boyutlu bir model oluşturmak üzere İHA ile hava fotoğraflaması yapılarak fotogrametrik belgeleme yapılmıştır. Alanın çok katmanlı yapısından da faydalanarak, bölgedeki mimari ve anlatı unsurları (devşirme elemanlar, yazıtlar, anlatılar ve yapısal unsurlar) uzman görüşlerine dayalı olarak gruplandırılmış ve oyunlaştırılmış rotanın geliştirilmesinde temel bileşen olarak kullanılmıştır. Çalışma, dijital miras belgeleme süreçleri içinde kullanıcı katılımı ve kültürel anlam iletişimi konusunda oyunlaştırma temelli anlatı ve etkileşimli yaklaşımların potansiyelini inceleyen daha geniş bir çalışmanın ilk aşamasını temsil etmektedir.



Şekil 3: Çalışmanın metodolojisi

3.1. Fotogrametrik Belgeleme ve 3B Model Oluşturma Süreci

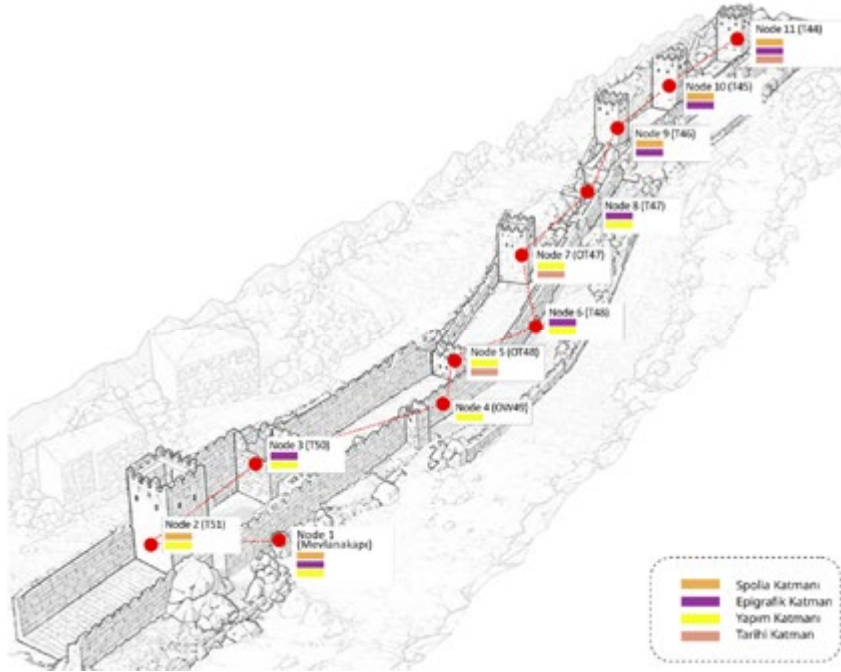
Çalışma kapsamında, alanın dijital olarak belgelenebilmesi amacıyla İHA fotoğraflaması ve fotogrametrik yöntemlerden yararlanılmıştır. Alan, Mevlanakapı hattından başlanarak sistematik bir fotoğraflama kurgusu takibinde kayıt altına alınmıştır. Elde edilen görüntüler "Agisoft Metashape" uygulamasında fotogrametrik işleme sürecinden geçirilerek nokta bulutu verisi oluşturulmuş, ardından üç boyutlu yüzey modeli üretilmiştir. Dijital ortamda üretilen model sanal gerçeklik deneyimi kurgusunun geliştirilmesinde temel kaynak olarak kullanılmak üzere oluşturulmuştur. Modelin geometrik bütünlüğü ve mekânsal doğruluğu kontrol edilerek dijital miras ortamına aktarılacak uygun bir temsil oluşturulması hedeflenmiştir.



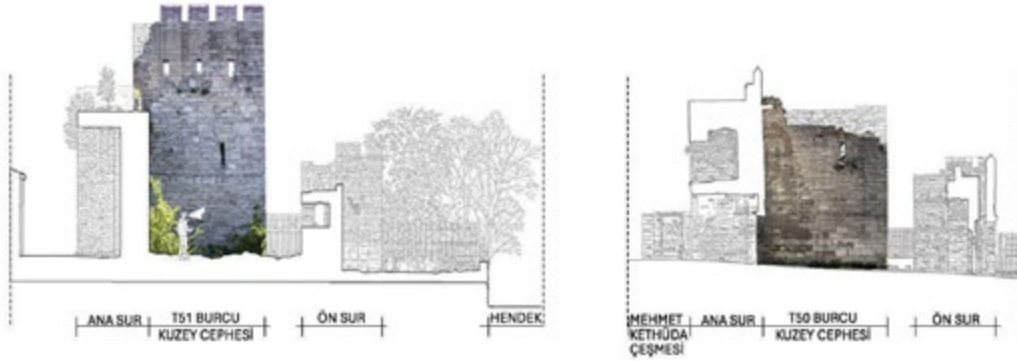
Şekil 4: Agisoft Metashape yazılımında Fotogrametrik 3B model üretimi

3.2. Oyunlaştırılmış Etkileşimli Rotanın Tasarımı

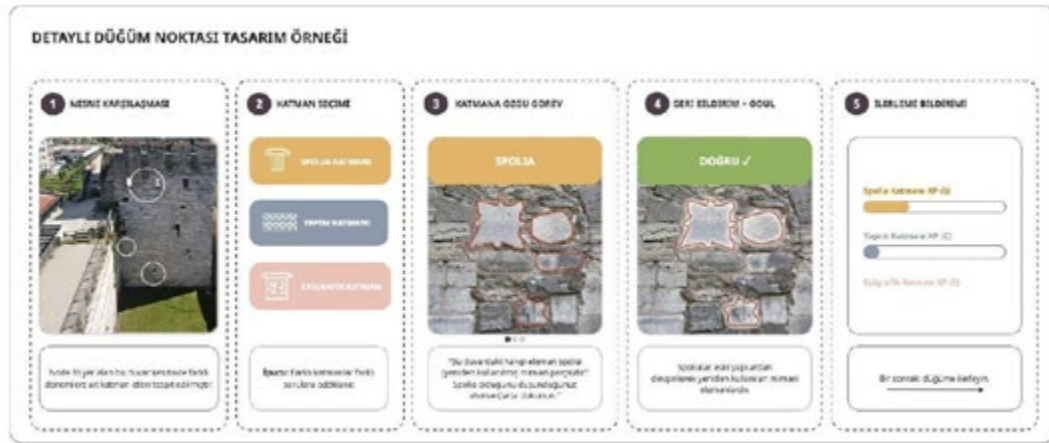
Surların çok katmanlı yapısından da yola çıkarak, bölgedeki mimari unsurlar ve anlatı unsurları KOÇ Üniversitesi Stavros Niarchos Vakfı Geç Antik Çağ ve Bizans Çalışmaları Merkezi (GABAM) tarafından gerçekleştirilen İstanbul Kara Surları Projesi (2017) envanter listesi ve uzman görüşlerinden faydalanılarak gruplandırılmış ve rota tasarımında düğüm noktalarının belirlenmesinde temel bileşen olarak kullanılmıştır. Elde edilen envanterlerin yoğun kesişime sahip olduğu noktalar rota üzerindeki düğüm noktalarının mekânsal olarak belirlenmesinde etkili olmuştur. Oluşturulan sanal gerçeklik rotasında mekânsal sürekliliği bulunmayan alanların, dijital ortamda tanımlanan fiziksel geçişler ve etkileşim senaryoları aracılığıyla bütüncül bir deneyim akışı içinde kurgulanması hedeflenmektedir.



Şekil 5: Rota tasarımı önerisi



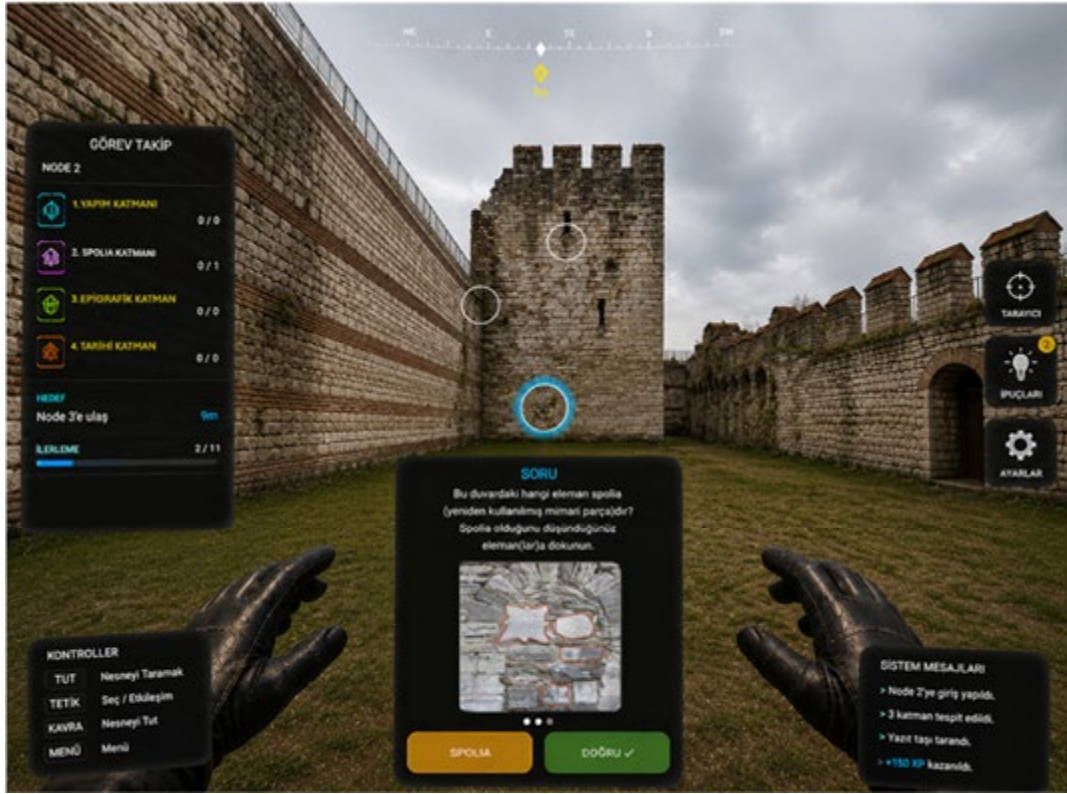
Şekil 6: Düğüm noktası 2-3 deneyim kesiti



Şekil 7: Detaylı düğüm noktası tasarım örneği

3.3. Unreal Engine Arayüzünde Deneyim Tasarımı

Fotogrametri yöntemiyle oluşturulan ve optimize edilen üç boyutlu model, sanal gerçeklik deneyiminin oluşturulması amacıyla Unreal Engine 5.6 oyun motoruna aktarılmıştır. Çalışma kapsamında oluşturulan deneyim senaryosunun dijital ortama entegre edilmesi hedeflenmekte; rota sistemi, etkileşim noktaları ve kullanıcı arayüzüne ilişkin tasarım kararları bu doğrultuda geliştirilmektedir (Şekil 8). Planlanan arayüz yapısında yönlendirme göstergeleri, bilgi panelleri, görev sistemi ve etkileşim ikonları gibi bileşenlerin kullanılması öngörülmektedir. Deneyim ortamı, katılımcının insan gözü seviyesinde birinci kişi bakış kurgusu üzerinden tasarlanmasa hedeflenmektedir. Bu yaklaşım ile katılımcının Kara Surları'nın farklı tarihsel katmanlarını insan ölçeğinde algılaması ve etkileşimli bir deneyim akışı içerisinde keşfetmesi amaçlanmaktadır.



Şekil 8: Sanal Gerçeklik deneyim arayüzü örneği
(Tasarım sürecinde OpenAI ChatGPT’den destek alınmıştır.)

4. Bulgular

Çalışmanın uygulama ve test aşaması halen devam etmektedir. Geliştirilecek bu etkileşimli deneyimin, kullanıcıların mekânı keşfetme isteğini artıracakları öngörülmektedir. Kontrollü iç mekân koşullarında gerçekleştirilecek deneylerden elde edilen verilerle, deneyimin sonunda kullanıcının kendi ilgi alanlarına dayalı kişisel anlatılarının kültürel miras bilgisinin kalıcılığını artırması beklenmektedir. Kullanıcı seçimleriyle tetiklenen içeriğin, geleneksel anlatılara kıyasla daha güçlü bir etki yaratacağı ve kültürel miras alanıyla olan bağı derinleştirmesi öngörülmektedir.

5. Sonuç ve Gelecek Çalışmalar

Bu çalışma, bir mimari miras alanının dijital olarak deneyimlenmesi sürecinde kullanıcıları pasif alıcılardan kendi deneyimlerini şekillendiren aktif katılımcılara dönüştüren bir model önermektedir. Özellikle Kara Surları’nın Silivrikapı-Mevlanakapı güzergahı için tasarlanan bu model, dijital ortamlarda oluşturulan kişiselleştirilmiş deneyimlerin kültürel miras bilgisinin kalıcılığı üzerindeki etkisini ele almaktadır. Sonuç olarak, kullanıcıların merakına dayanan bu deneyim, geleneksel dijital miras anlatılarına alternatif, kapsayıcı ve katılımcı bir bakış açısı sunmaktadır. Gelecekteki araştırmalar, bu modelin farklı yaş ve ilgi alanlarına göre çeşitli kullanıcı grupları üzerindeki etkilerini karşılaştırmayı ve değerlendirmeyi amaçlamaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma, İstanbul Teknik Üniversitesi’nde düzenlenen Erasmus+ Karma Yoğun Programı (Blended Intensive Program - BIP) kapsamında gerçekleştirilen “[TRH] Augmented Thresholds: Sustaining Architectural Heritage of Istanbul Land Walls” projesi tarafından desteklenmiş olup, İstanbul Teknik Üniversitesi Mimari Tasarımda Bilişim Yüksek Lisans Programı Doç. Dr. Derya Güleç Özer danışmanlığında yürütülen yüksek lisans tez çalışmasından üretilmiştir.

KAYNAKLAR

- Asutay-Effenberger, N. (2021). *Theodosian walls. Istanbul City Walls*. Retrieved from <https://istanbulsurlari.ku.edu.tr/en/essay/54/theodosius-surlari>
- Bekele, M. K., & Champion, E. (2019). *A Comparison of Immersive Realities and Interaction Methods: Cultural Learning in Virtual Heritage*. *Frontiers in Robotics and AI*, 6, 91. <https://doi.org/10.3389/frobt.2019.00091>
- Gül, L. F., Özer, D. G., Yağmur-Kilimci, E. S., Coşkun, E., Moralioglu, B., & Yücel, V. (2026). Gamifying cultural heritage: A comparative study of handheld and wearable MR technologies. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 40, e00477. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2025.e00477>
- ICOMOS. (2008). *The ICOMOS Charter for the Interpretation and Presentation of Cultural Heritage Sites (The Ename Charter)*. Retrieved from <https://www.icomos.org.tr/?Sayfa=Icomostuzukleri&dil=tr>
- Çorakbaş, F. K. (2021). The management of multilayered cultural landscape areas: A look at the Istanbul land walls from Tim Ingold's landscape approach. *TÜBA-KED: Journal of Cultural Inventory*, 24, 189–204. <https://doi.org/10.22520/tubaked2021.24.010>
- Koç University – Stavros Niarchos Foundation Center for Late Antiquity and Byzantine Studies (GABAM). (2017). *Istanbul City Walls*. <https://istanbulcitywalls.ku.edu.tr/en>
- Marques, C. G., Pedro, J. P., & Araújo, I. (2023). A Systematic Literature Review of Gamification in/for Cultural Heritage: Leveling up, Going Beyond. *Heritage*, 6(8), 5935–5951. <https://doi.org/10.3390/heritage6080312>
- Sanfilippo, F., Tataru, M., Hua, M. T., Johansson, I. J. S., & Andone, D. (2025). Gamifying Cultural Immersion: Virtual Reality and Mixed Reality in City Heritage. *IEEE Transactions on Games*, 17(4), 893–911. <https://doi.org/10.1109/TG.2025.3553712>
- UNESCO World Heritage Centre. (t.y.). *Historic areas of Istanbul*. Retrieved May 20, 2026, from <https://whc.unesco.org/en/list/356/>
- Valtolina, S. (2016). A Storytelling-Driven Framework for Cultural Heritage Dissemination. *Data Science and Engineering*, 1(2), 114–123. <https://doi.org/10.1007/s41019-016-0007-z>
- Varinlioglu, G., & Halici, S. M. (2019). Gamification of heritage through augmented reality. Sousa, J. P., Xavier, J. P., & Castro Henriques, G. (Eds.), *Proceedings of the 37th eCAADe Conference / 23rd SIGraDi Conference* (Vol. 1, pp. 513–518). University of Porto. https://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/ecaadesigradi2019_168

İnteraktif Mekânlar Ve Sosyal Tepkisellik: Sayısal Tasarımın Sosyo-Mekânsal Bir Eşik Olarak Yeniden Kurgusu

Ahmet Haktan Canpolat¹ ; Yağmur Söker² 

¹Boğaziçi Üniversitesi; ²İç Mimar, Araştırmacı

¹hktncnplt@gmail.com; ²soker.yagmur@hotmail.com

Özet

Dijital teknolojilerin mimarlık ve iç mimarlık alanındaki etkisinin giderek artması, mekân kavramının yeniden tanımlanmasına neden olmuş; mekân yalnızca fiziksel sınırlar üzerinden tanımlanan statik bir yapı olmaktan çıkarak kullanıcıyla etkileşim kurabilen dinamik ve veri temelli bir yapıya dönüşmüştür. Yapay zekâ, sensör teknolojileri, biyometrik veri sistemleri, dijital arayüzler ve gerçek zamanlı veri işleme yöntemleri sayesinde kullanıcı davranışlarına tepki verebilen interaktif mekânlar ortaya çıkmıştır. Bu dönüşüm, kullanıcı ile mekân arasındaki ilişkinin yalnızca fiziksel deneyim üzerinden değil; veri, geri besleme ve dijital etkileşim süreçleri üzerinden de değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır. Günümüzde interaktif mekânlar, fiziksel çevre ile dijital sistemlerin birleştiği hibrit yapılar oluşturarak mimarlık ve sayısal tasarım alanında yeni tartışma alanları açmaktadır. Bu çalışma, interaktif mekânları sosyal tepkisellik kavramı üzerinden ele alarak sayısal tasarımın sosyo-mekânsal bir eşik olarak nasıl yeniden kurgulandığını incelemeyi amaçlamaktadır. Çalışma kapsamında sosyal tepkisellik; kullanıcı, dijital sistem ve mekân arasında oluşan karşılıklı geri besleme ilişkisi olarak tanımlanmaktadır. Bu bağlamda mekân, yalnızca deneyimlenen fiziksel bir yüzey değil; kullanıcı davranışlarını algılayan, verileri analiz eden ve buna bağlı olarak farklı tepkiler üreten aktif bir sistem olarak değerlendirilmektedir. Kullanıcının bedensel hareketleri, biyometrik verileri ve davranış biçimleri mekânsal sistemin temel veri kaynağına dönüşmekte; mekân ise ışık, ses, sıcaklık, dijital yüzey ve görsel arayüzler aracılığıyla kullanıcıya karşılık vermektedir. Böylece kullanıcı ve mekân arasında doğrusal olmayan, sürekli yeniden üretilen bir etkileşim ağı oluşmaktadır. Çalışmada, sosyal tepkisellik kavramını destekleyen interaktif sistemler Pneuma ve Proteus örnekleri üzerinden incelenmiştir. Pneuma örneğinde biyometrik veri, yapay zekâ ve çevresel kontrol sistemleri aracılığıyla kullanıcının davranışlarına göre değişen akıllı mekânsal yapı değerlendirilmiştir. Proteus örneğinde ise kullanıcı hareketlerine gerçek zamanlı tepki veren generatif dijital enstalasyon sistemi ele alınmıştır. Her iki örnek; beden, hareket, veri ve dijital arayüz arasındaki ilişkinin mekânsal deneyimi nasıl dönüştürdüğünü göstermesi açısından önem taşımaktadır. Araştırma sonucunda interaktif mekânların fiziksel ve dijital katmanları bir araya getirerek hibrit mekânsallıklar oluşturduğunu; kullanıcı davranışlarının mekânsal organizasyon üzerinde doğrudan etkili olduğu görülmüştür. Bu durum, mekânın yalnızca tasarlanan bir nesne değil, kullanıcıyla birlikte sürekli yeniden üretilen dinamik bir süreç olduğunu ortaya koymaktadır. Çalışma, sosyal tepkisellik kavramı üzerinden interaktif mekânların mimarlık, iç mimarlık ve sayısal tasarım alanlarında yeni kuramsal ve mekânsal tartışmalar geliştirdiğini savunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: İnteraktif Mekân, Sayısal Tasarım, Sosyal Tepkisellik, Sosyo-Mekânsal Analiz, Disiplinlerarası Tasarım.

Interactive Spaces and Social Responsiveness: Reconstructing Digital Design as a Socio-Spatial Threshold

Ahmet Haktan Canpolat¹ ; Yağmur Söker² 

¹Boğaziçi University; ²Interior Architect, Researcher

¹hktncnplt@gmail.com; ²soker.yagmur@hotmail.com

Abstract

The increasing impact of digital technologies in the fields of architecture and interior architecture has led to the redefinition of the concept of space; space has ceased to be a static structure defined solely through physical boundaries and has transformed into a dynamic and data-driven system capable of interacting with its users. Through artificial intelligence, sensor technologies, biometric data systems, digital interfaces, and real-time data processing methods, interactive spaces that can respond to user behaviors have emerged. This transformation necessitates the evaluation of the relationship between user and space not only through physical experience, but also through data, feedback, and digital interaction processes. Today, interactive spaces create hybrid structures in which physical environments and digital systems merge, opening new fields of discussion in architecture and computational design. This study aims to examine interactive spaces through the concept of social responsiveness and to explore how computational design is reconstructed as a socio-spatial threshold. Within the scope of the study, social responsiveness is defined as a mutual feedback relationship established between the user, digital systems, and space. In this context, space is evaluated not merely as a physically experienced surface, but as an active system that perceives user behaviors, analyzes data, and produces various responses accordingly. Users' bodily movements, biometric data, and behavioral patterns become the primary data source of the spatial system, while the space responds through light, sound, temperature, digital surfaces, and visual interfaces. Thus, a non-linear and continuously reproduced interaction network emerges between the user and space. Within the study, interactive systems supporting the concept of social responsiveness are examined through the examples of Pneuma and Proteus. In the case of Pneuma, an intelligent spatial structure that changes according to user behavior through biometric data, artificial intelligence, and environmental control systems is evaluated. In the case of Proteus, a generative digital installation system that reacts to user movements in real time is discussed. Both examples are significant in demonstrating how the relationship between body, movement, data, and digital interfaces transforms spatial experience. The research findings reveal that interactive spaces create hybrid spatialities by combining physical and digital layers, and that user behaviors directly influence spatial organization. This situation demonstrates that space is not merely a designed object, but a dynamic process continuously reproduced together with the user. The study argues that, through the concept of social responsiveness, interactive spaces generate new theoretical and spatial discussions in the fields of architecture, interior architecture, and computational design.

Keywords: Interactive Space, Computational Design, Social Responsiveness, Socio-Spatial Analysis, Interdisciplinary Design.

1. Giriş

Bilgi ve iletişim teknolojilerindeki gelişmeler, mimarlık ve iç mimarlık alanında mekân anlayışının dönüşmesine neden olmuş; mekân yalnızca fiziksel sınırlarla tanımlanan statik bir yapı olmaktan çıkarak kullanıcıyla etkileşim kurabilen dinamik sistemlere dönüşmüştür (Negroponte, 1969; Senagala, 2006). Yapay zekâ, sensör teknolojileri, veri işleme sistemleri ve dijital arayüzlerin gelişmesiyle birlikte kullanıcı davranışlarını algılayabilen ve bu verilere göre tepki üretebilen akıllı çevreler ortaya çıkmıştır (Asensio et al., 2021; Hajjaji et al., 2021; Kotsev et al., 2016; Tao, 2020). Bu bağlamda interaktif mekânsal sistemler, kullanıcı ile karşılıklı ilişki kuran hesaplama temelli çevreler olarak değerlendirilmektedir (Senagala, 2006).

Günümüzde interaktif mekânsal sistemler yalnızca teknik yapılar olarak değil; kullanıcı, veri ve çevre arasındaki ilişkiyi yeniden tanımlayan hibrit yapılar olarak ele alınmaktadır. Gerçek zamanlı veri işleme teknolojileri sayesinde mekân, kullanıcı davranışlarını algılayan, yorumlayan ve buna karşılık çeşitli mekânsal tepkiler üreten aktif bir sisteme dönüşmektedir (Zuk, 1970; Meagher, 2015). Böylece kullanıcı ile mekân arasında doğrusal olmayan, sürekli yeniden üretilen bir geri besleme ilişkisi oluşmaktadır (Negroponte, 1975). Kullanıcının hareketleri, biyometrik verileri ve çevresel girdileri mekânsal sistemin temel veri kaynağı hâline gelirken; mekân da ışık, ses, sıcaklık, görsel arayüzler ve dijital yüzeyler aracılığıyla kullanıcıya karşılık vermektedir.

Bu dönüşümle birlikte fiziksel ve dijital çevre arasındaki sınırlar giderek bulanıklaşmakta ve mekânın yapısı sosyo-dijital bir karakter kazanmaktadır (Velikov et al., 2012). Bu durum, mekânın yalnızca deneyimlenen fiziksel bir yüzey olmaktan çıkarak kullanıcıyla eş zamanlı etkileşim kuran bir sistem hâline gelmesini sağlamaktadır. İnteraktif mekânsal sistemler, etkileşimli ve somutlaştırılmış tepkiler üreterek yapıyı çevreyi statik nesnelerden dinamik ve sürekli dönüşen bir yapıya dönüştürmektedir (Lee et al., 2018; Kroner, 1997). Böylece, interaktif mekanlar, toplumsal eylemliliğin dijital katmanlar üzerinden anlık olarak müzakere edildiği dinamik bir ilişkiler ağı kurmaktadır. Bu bağlamda mekân, yalnızca fiziksel bir organizasyon değil; aynı zamanda sosyal bilişsel süreçlerin, kullanıcı davranışlarının ve dijital süreçlerin kesiştiği sosyo-mekânsal bir eşik olarak yeniden kurgulanmaktadır.

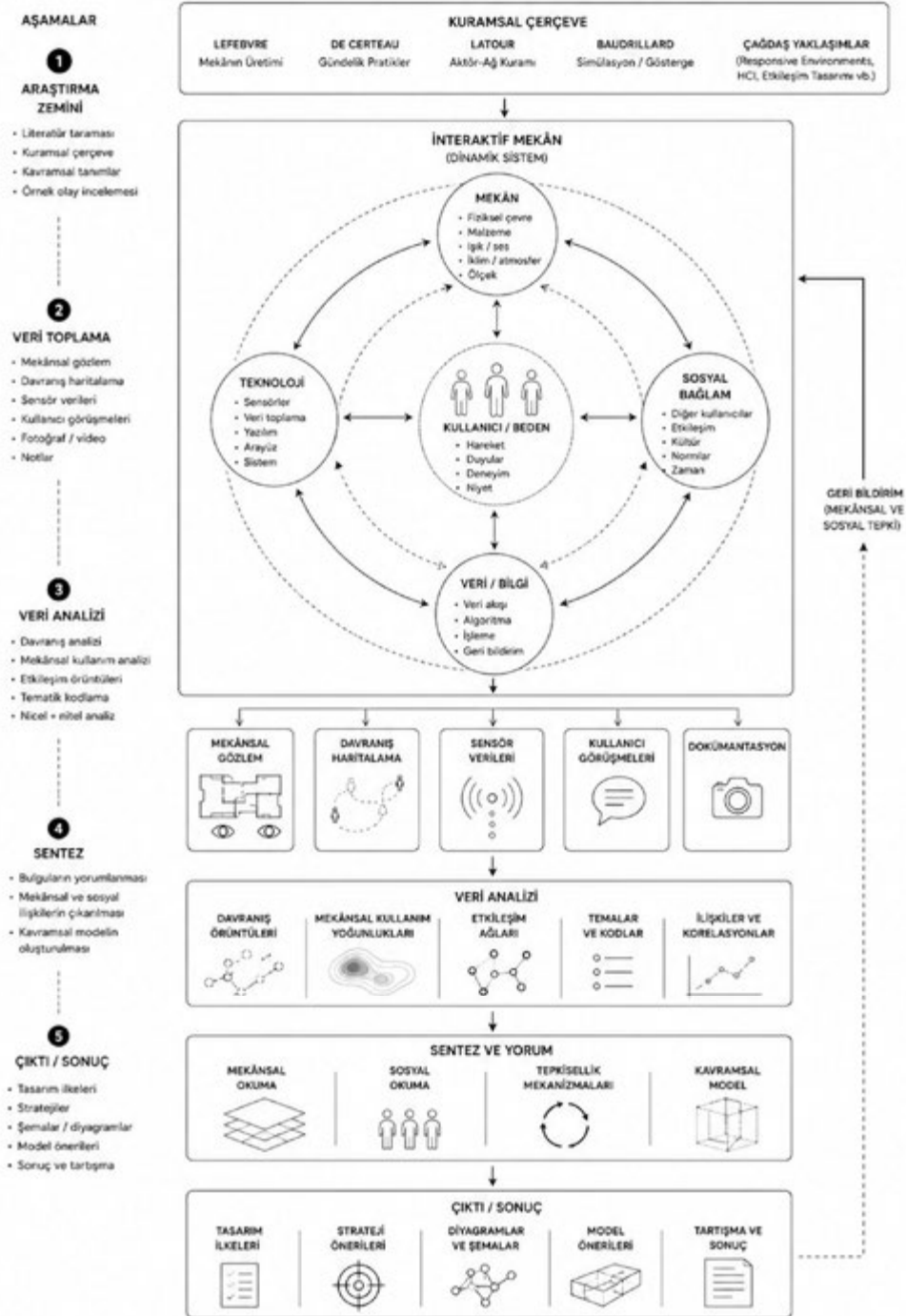
2. İnteraktif Mekân

Geçmişten günümüze bireylerin mekânsal tercihleri, toplumsal dinamikler doğrultusunda değişmiş; kullanıcıların farklılaşan beklenti ve ihtiyaçları çerçevesinde yeniden biçimlenmiştir. Mekânın statik yapısı ile üstlendiği işlev arasındaki gerilim, özellikle İnsan-Bilgisayar Etkileşimi alanındaki gelişmelerle birlikte uzamın daha esnek, uyarlanabilir ve dönüşebilir bir yapı olarak ele alınmasını mümkün kılmıştır (Nguyen vd., 2020).

İnteraktif kavramı, köken olarak Latince *inter* edatı ile *agere/act* fiilinden türeyen *interactive* sözcüğüne dayanmaktadır (Nişanyan, 2026). Türk Dil Kurumu Güncel Türkçe Sözlüğü'nde interaktif kavramı “etkileşimli” olarak tanımlanırken, etkileşim ise “birbirini karşılıklı olarak etkileme işi” şeklinde açıklanmaktadır (Türk Dil Kurumu). Literatürde bu kavramın farklı biçimlerde kullanıldığı görülmektedir. Bazı çalışmalar “interaktif mekân” kavramını tercih ederken (Şen, 2020), bazıları “etkileşimli mekân” ifadesini kullanmaktadır (Özdemir & Arabacıoğlu, 2022).

İnteraktif mekânlar, teknolojik sistemlerin mimari bir vizyon doğrultusunda yeniden yorumlanmasıyla ortaya çıkan; fiziksel değişimi otomatikleştirerek kendini yeniden yapılandırabilen tasarım yaklaşımlarıdır (Fox, 2023). Bu mekânlar, yalnızca statik bir çevre sunmak yerine kullanıcı davranışlarına, çevresel verilere ve değişen ihtiyaçlara tepki verebilen dinamik yapılar olarak öne çıkmaktadır. Dolayısıyla interaktif mekân, sürekli dönüşebilen yapısı sayesinde kullanıcı gereksinimlerine hızlı ve etkili biçimde yanıt üretebilen bir sistem olarak değerlendirilmektedir. Bu bağlamda interaktif mekânlar, değişen koşullara göre fiziksel olarak yeniden organize olabilen alanlar ve nesneler bütünü olarak tanımlanmaktadır (Söker & Güney Yüksel, 2024). Bu dönüşüm, mekânın yalnızca fiziksel bir çevre olarak değil; kullanıcı davranışlarını algılayan, verileri işleyen ve değişen

koşullara tepki üretebilen dinamik bir sistem olarak ele alınmasına neden olmuştur. Böylece interaktif mekânlar, kullanıcı ile çevre arasında karşılıklı etkileşim kurarak deneyim, davranış ve mekânsal kullanım biçimlerini yeniden şekillendiren yapılar hâline gelmiştir. Mekânın bu esnek ve uyarlanabilir karakteri, onu sosyal hareketliliğin anlık değişimlerine açık ilişkisel bir düzleme taşımaktadır.



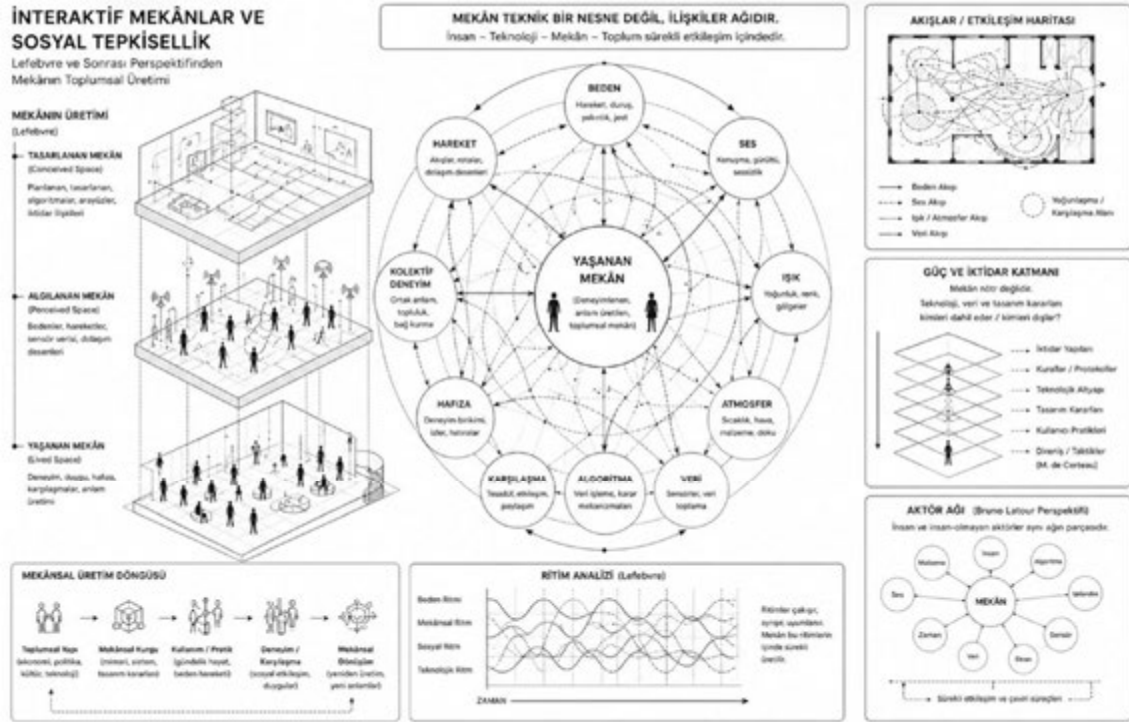
Şekil 1. İnteraktif mekânın sosyal tepkisellik bağlamında analizine yönelik kavramsal ve metodolojik çerçeve
(Kaynak: Yazarlar tarafından oluşturulmuştur.)

2.1. Sosyal Tepkisellik ve Veri Odaklı Mekânsal Üretim

İnteraktif mekânlarda sosyal tepkisellik; mekânın kullanıcıların hareketlerine, mekân içindeki yoğunlaşma noktalarına, etkileşim biçimlerine ve anlık davranış kalıplarına yanıt verebilme kapasitesini ifade eder. Bu yaklaşım, Henri Lefebvre'nin (1991) mekânı salt fiziksel bir boşluk değil, "toplumsal bir ürün" olarak tanımladığı kuramsal çerçevenin eş zamanlı ve hesaplanabilir bir versiyonu olarak karşımıza çıkar. Geleneksel tasarımda tasarımcı tarafından öngörülen ve sabitlenen statik senaryolar, interaktif mekânlarda yerini kullanıcı tarafından yönlendirilen ve sürekli güncellenen açık uçlu süreçlere bırakır. Gelişen teknolojik altyapılar sayesinde mekân, çevresel koşullara pasif bir şekilde uyum sağlamanın ötesine geçerek, kendi failliğine sahip aktif bir toplumsal ilişki katılımcısına dönüşür (Boychenko, 2019). Böylece, geleneksel mimaride durağan ve uzun zamana yayılan sosyo-mekânsal üretim süreci, interaktif mekânda toplum ve mekân arasında gerçekleşen anlık ve çift yönlü bir iletişim pratiğine evrilir (Boychenko, 2019).

İnteraktif mekânlarda kullanıcı artık pasif bir gözlemci değil, Fox ve Kemp'in (2009) deyiimiyle tasarımın "aktif bir bileşeni"dir. Mimari çevrenin kullanıcıyla girdiği bu diyalog karşılıklı bir öğrenme ve uyum süreci olarak kurgulanırken; mekân, tasarımcının tekelinden çıkarak kullanıcının eylemleriyle ortaklaşa üretilen katılımcı bir platforma dönüşür. Mekânın bu etkileşim kapasitesi, öznelere çevreleriyle kurduğu kişilerarası mesafeleri ve mekânsal mevcudiyeti de doğrudan şekillendirir (Lyu, 2023). Kullanıcıların mekân içindeki konumlarına, yakınlıklarına ve eylemliliklerine göre görsel, işitsel ve dokunsal uyarıların eş zamanlı olarak değişimi, katılımcılar arasındaki mahrem, kişisel veya sosyal alan sınırlarının anlık olarak yeniden tanımlanmasını ve iş birliğine dayalı yepyeni ilişkiseliliklerin doğmasını sağlar (Lyu, 2023). Örneğin, bir kamusal alanda veya iç mekânda kullanıcıların yoğunluğuna göre fiziksel formunu değiştiren kinetik yüzeyler ya da sosyal mesafeyi ve etkileşimi yönlendiren akıllı aydınlatma ve ses enstalasyonları, sosyal tepkiselliğin somut örnekleridir. Bu tür sistemlerde, eylemcilerin mekândaki bir noktada kümelenmesi, sistemin o bölgedeki aydınlatma düzeyini veya tavan yüksekliğini değiştirmesini tetikler. Bu durum, mekânın işlevsel ergonomisinin ötesine geçerek, insan psikolojisi ve toplumsal hareketlilik üzerinde doğrudan söz sahibi olan aktif bir aktör hâline gelmesini sağlar.

Öte yandan etkileşim, yalnızca insan odaklı tek yönlü bir eylemlilik hâli değildir. Muğlak ve spekülâtif yorumların aksine, tamamen nesnel, gözlemlenebilir ve ölçülebilir verilere dayanan bu etkileşimlilik, Bruno Latour'un (2005) aktör-ağ teorisi perspektifiyle ele alındığında daha da berraklaşır; sürece dâhil olan sensörlerin, algoritmaların, dijital yüzeylerin ve biyometrik veri okuyucuların ağı şekillendiren "insan-dışı aktörler" olarak konumlandığı görülür. Işık, ses ve hareket gibi ampirik olarak saptanabilen sözsüz iletişim sinyalleri, mekânın zekâsını ortaya koymasını ve çevredeki diğer aktörlerle gerçek zamanlı bir şekilde veri alışverişine girmesini olanaklı kılar (Knox, 2021). Kullanıcının bedensel hareketleri ile mekânsal sistemin bu verilere verdiği fiziksel yanıtlar arasındaki geri besleme döngüsü, insan ve insan-dışı aktörlerin simetrik bir ilişki içinde kurduğu dinamik bir ağ inşa eder. Dolayısıyla interaktif mekân, kullanıcının içinde bulunduğu bir kabuk değil; mekânı oluşturan tüm teknolojik ve biyolojik bileşenlerle birlikte eyleyerek, somut mekânsal ve toplumsal ilişkileri sürekli yeniden ürettiği aktif bir eylemlilik eşiği konumundadır.



Şekil 2. İnteraktif mekânın toplumsal üretim, kullanıcı etkileşimi ve sosyal tepkisellik bağlamında kavramsal gösterimi (Kaynak: Lefebvre, De Certeau, Latour ve responsive environment yaklaşımlarından yararlanılarak yazarlar tarafından oluşturulmuştur.)

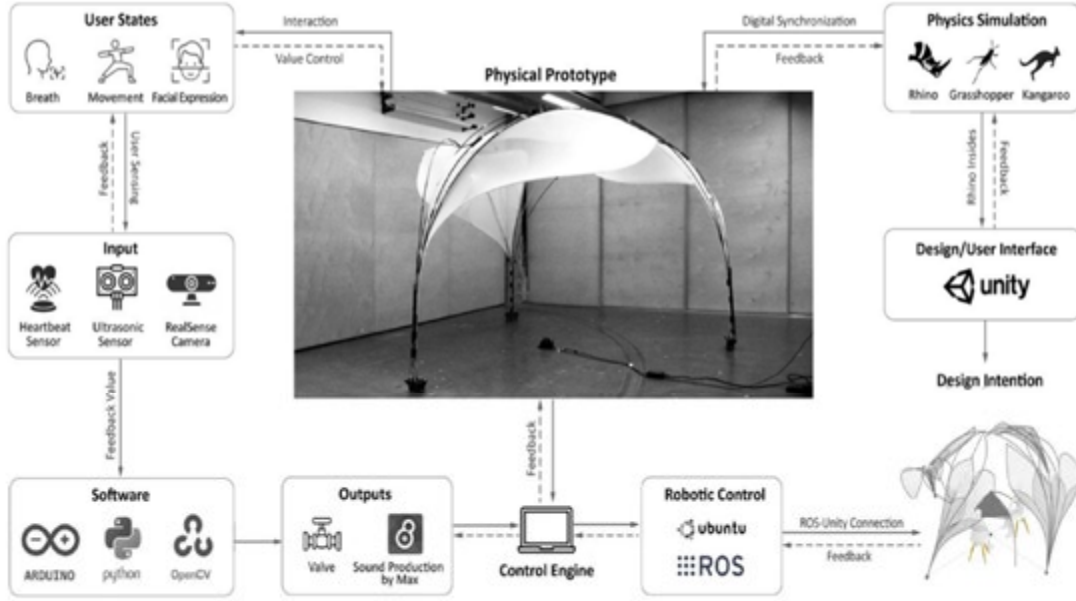
3. Sosyal Tepkisellik Temelli İnteraktif Mekân Örnekleri

Sosyal tepkisellik temelli interaktif akıllı mekân sistemlerine örnek olarak Pneuma ve Proteus projeleri ele alınmaktadır. Seçilen bu örnekler, kullanıcı–mekân arasındaki geri besleme ilişkisini farklı teknolojik ve mekânsal yaklaşımlar üzerinden ortaya koymaları açısından değerlendirilmektedir. Bu doğrultuda her iki örnek, interaktif mekânın sosyo-mekânsal bir üretim alanı olarak yeniden kurgulanmasına katkı sunmaktadır.

3.1. Pneuma

Pneuma (2024), Bartlett School of Architecture AD Research Cluster 2 kapsamında geliştirilen, insan hareketi, nabız ve nefes verilerine tepki vererek biçim değiştiren yumuşak robotik bir interaktif mekân araştırmasıdır. Robotik sistemler ile esnek malzemeleri birleştiren proje; bending-active tensile ve pnömatik hibrit sistemler aracılığıyla gerçek zamanlı mekânsal dönüşümler üretmektedir. Gelişmiş bir siber-fiziksel kontrol sistemiyle çalışan yapı, kullanıcı ile çevre arasında sürekli veri alışverişine dayalı dinamik bir ilişki kurmaktadır. İnsan nefesini duygular, ses ve atmosfer ile ilişkilendiren Pneuma, mekânı yalnızca fiziksel bir çevre değil; biyometrik verileri işleyen duysal ve terapötik bir organizma olarak yeniden tanımlamaktadır. Bu yönüyle proje, interaktif mimarlığın sosyal tepkisellik, beden-mekân ilişkisi ve duysal deneyim üretimi üzerinden nasıl dönüşebileceğini göstermektedir. Bu bağlamda, mekân pasif bir kabuk olmaktan çıkarak kullanıcı verilerine göre davranış geliştiren aktif bir organizmaya dönüşmektedir (Şekil 3,4,5,6; Tablo 1) (<https://uujay.com/Pneuma>).

İnteraktif Mekânlar Ve Sosyal Tepkisellik: Sayısal Tasarımın Sosyo-Mekânsal Bir Eşik Olarak Yeniden Kurgusu
| Canpolat, Ahmet Haktan; Söker, Yağmur



Şekil 3. Mekansal Sistem Organizasyonu ve Çalışma Prensibi



Şekil 4. Etkileşim Yüzeyi, Gerçek zamanlı Tepki Sistemi



Şekil 5. Veri Akışı ve Tepki Süreci



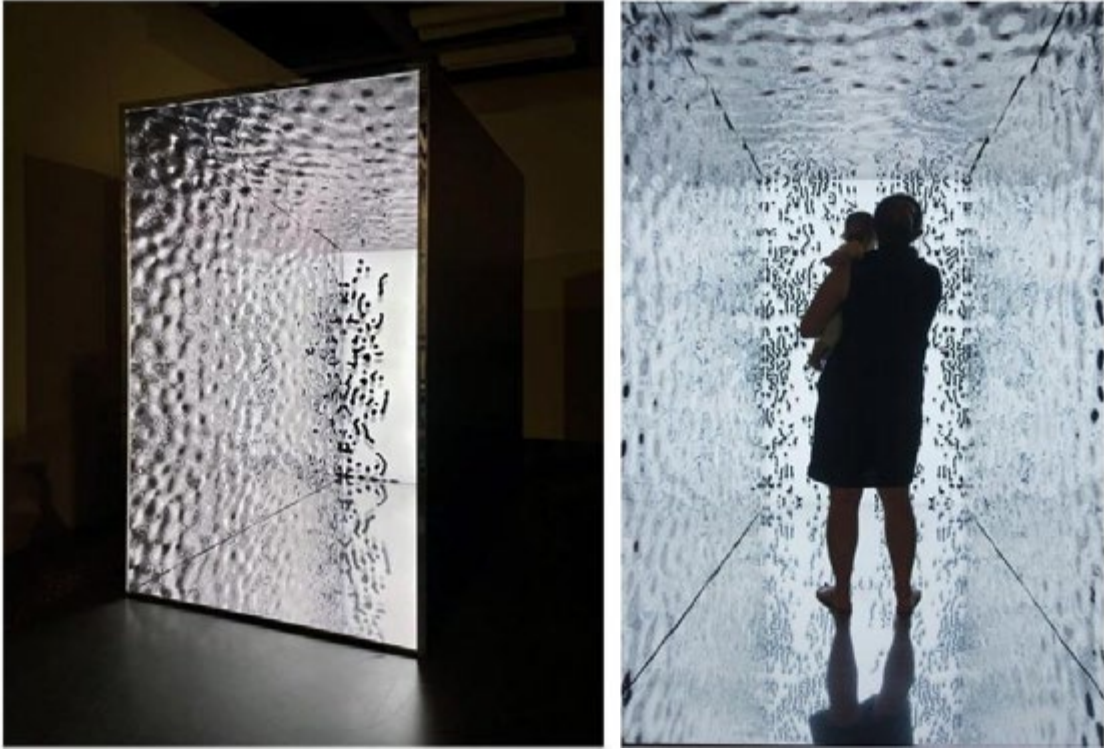
Şekil 6. Kullanıcı Deneyimi

Tablo 1. Pneuma'nın Sosyal Tepkisellik ve Kullanıcı-Mekân Etkileşimi Açısından Değerlendirilmesi

Süreç Aşaması	Kullanıcı / Sistem Eylemi	Mekânsal Tepki	Sosyal Tepkisellik Açısından Anlamı
Veri Üretimi	Kullanıcının hareket, duygu ve biyometrik verileri algılanır	Sistem kullanıcıyı izlemeye başlar	Beden mekân için aktif bir veri kaynağına dönüşür
Veri Analizi	Yapay zekâ kullanıcı davranışını yorumlar	Ortam koşulları yeniden düzenlenir	Mekân pasif olmaktan çıkar, karar veren bir yapıya yaklaşır
Mekânsal Tepki	Işık, ses, sıcaklık ve dijital arayüz değişir	Kullanıcı yeni bir atmosfer deneyimler	Mekân kullanıcı davranışına karşılık veren bir aktör hâline gelir
Kullanıcı Geri Bildirimi	Kullanıcı yeni davranışlar geliştirir	Sistem yeniden veri toplamaya başlar	İnsan ve mekân arasında sürekli bir geri besleme döngüsü oluşur
Sosyo-Mekânsal Eşik	Kullanıcı ve sistem karşılıklı etkileşim kurar	Fiziksel ve dijital katman birleşir	İnteraktif mekân sosyal tepkiselliğin üretildiği hibrit bir eşik hâline gelir

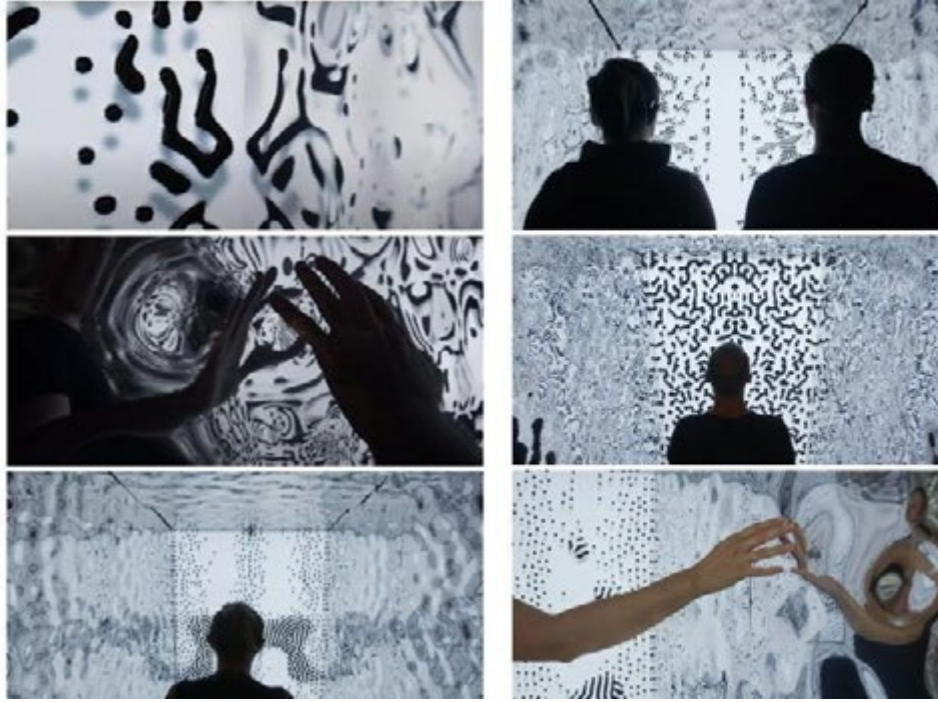
3.2. Proteus 3.5

Proteus 3.5, Maria Smigielska ve CompMonks tarafından geliştirilen, kullanıcıların beyin aktiviteleri aracılığıyla dijital bir ferrofluid görüntüsüyle etkileşim kurmasını sağlayan interaktif ve üretken bir mekân enstalasyonudur. Varşova'daki Copernicus Science Centre'da yer alan ve yaklaşık 4 m² ölçeğindeki proje, "The Future is Today, Man 2.0" sergisinin bir parçası olarak geleceğin tıbbi ve siborglaşma kavramlarını tartışmaktadır. Beyin-bilgisayar arayüzü (BCI) teknolojisi kullanan sistem, ziyaretçilerin nöral aktivitelerini ölçerek ferrofluid görüntüsünün çözünürlüğünü gerçek zamanlı olarak değiştirmekte; böylece insan ile dijital materyal arasında doğrudan bir etkileşim oluşturmaktadır. 2.5 × 2.5 × 1.5 metre ölçülerindeki mimari niş, küçük şapel ve kontemplasyon mekânlarına referansla tasarlanmış; dışarıdan sade bir geometrik hacim olarak kurgulanırken, iç mekânda yansıtıcı metal yüzeyler ve dalga benzeri deformasyonlarla immersif bir atmosfer oluşturulmuştur. Ferrofluid malzemenin sürekli değişen organik davranışı, difüzyon reaksiyon algoritmaları aracılığıyla dijitalleştirilerek ziyaretçilerin görsel-algisal deneyimine aktarılmıştır. Bu yönüyle Proteus 3.5, interaktif mimarlığın yalnızca fiziksel tepki üreten sistemler değil, aynı zamanda nörolojik verileri işleyerek algısal, duyuşsal ve düşünsel deneyimler oluşturan sosyal-tepkisel çevreler geliştirebildiğini göstermektedir (Şekil 7, 8; Tablo 2).



Şekil 7. Proteus 3.5 Mekânsal Görünümü

(<https://www.whitemad.pl/en/proteus-3-5-interactive-installation-at-the-copernicus-science-centre/>)



Şekil 8. Proteus 3.5 Kullanıcı-Mekân Etkileşimi

Tablo 2. Proteus 3.5'in Sosyal Tepkisellik ve Kullanıcı-Mekân Etkileşimi Açısından Değerlendirilmesi

Süreç Aşaması	Kullanıcı / Sistem Eylemi	Mekânsal Tepki	Sosyal Tepkisellik Açısından Anlamı
Hareket Algılama	Kullanıcının bedensel hareketleri ve konumu sistem tarafından algılanır	Dijital yüzeylerde biçimsel değişimler oluşur	Kullanıcı bedeninin mekân üzerindeki etkisi görünür hâle gelir
Gerçek Zamanlı Veri İşleme	Sistem kullanıcı verilerini anlık olarak analiz eder	Görsel ve generatif desenler dönüşür	Mekân statik değil, anlık ilişkilere göre değişen dinamik bir yapıya dönüşür
İnteraktif Tepki Üretimi	Kullanıcı hareket ettikçe sistem yeni çıktılar üretir	Dijital imgeler, ışık ve yüzey davranışları değişir	Kullanıcı ve mekân arasında karşılıklı bir etkileşim ağı oluşur
Davranışın Yeniden Üretimi	Kullanıcı sistemin tepkilerine göre yeni hareketler geliştirir	Enstalasyon sürekli farklılaşan deneyimler üretir	Sosyal tepkisellik doğrusal değil, geri beslemeli bir süreç hâline gelir
Hibrit Mekânsallık	Fiziksel beden ile dijital arayüz eşzamanlı çalışır	Mekân hem fiziksel hem sayısal bir deneyim üretir	İnteraktif mekân sosyo-dijital bir eşik olarak yeniden tanımlanır

4. Sonuçlar

Çalışma, interaktif mekânları sosyal tepkisellik kavramı üzerinden ele alarak sayısal tasarımın sosyo-mekânsal boyutlarını incelemeyi amaçlamıştır. Yapılan literatür incelemesi ve örnek analizleri, günümüz mekânlarının yalnızca fiziksel sınırlar ve işlevler üzerinden tanımlanamayacağını; kullanıcı, veri ve dijital sistemler arasındaki etkileşimlerle sürekli yeniden üretilen dinamik yapılar hâline geldiğini göstermektedir. Bu bağlamda sosyal tepkisellik, kullanıcı ile mekân arasında kurulan karşılıklı geri besleme ilişkisini açıklayan önemli bir kavramsal çerçeve sunmaktadır.

Çalışma kapsamında incelenen Pneuma ve Proteus projeleri, sosyal tepkiselliğin farklı biçimlerde ortaya çıkabileceğini göstermiştir. Pneuma, biyometrik veriler ve yapay zekâ destekli sistemler aracılığıyla kullanıcının ihtiyaçlarına uyum sağlayan çevresel bir yaklaşım sunarken; Proteus, gerçek zamanlı generatif etkileşimler yoluyla kullanıcı davranışlarına doğrudan tepki veren deneyim odaklı bir yapı ortaya koymaktadır. Farklı teknolojik yöntemlere sahip olmalarına rağmen her iki örnek de kullanıcı davranışlarının mekânsal deneyimin oluşumunda belirleyici bir role sahip olduğunu göstermektedir.

Elde edilen bulgular, interaktif mekânların yalnızca teknik veya dijital sistemler olarak değerlendirilmemesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu mekânlar aynı zamanda kullanıcı davranışları, sosyal ilişkiler ve teknolojik altyapılar arasında sürekli etkileşim üreten sosyo-mekânsal ortamlar olarak işlev görmektedir. Sonuç olarak sayısal tasarımın gelişmesiyle birlikte mekân, pasif bir kullanım nesnesi olmaktan uzaklaşarak kullanıcıyla birlikte şekillenen, tepki veren ve dönüşen bir yapıya evrilmektedir. Bu durum, mimarlık ve iç mimarlık disiplinlerinde mekânın geleceğine ilişkin yeni araştırma ve tasarım yaklaşımlarının geliştirilmesine katkı sağlayabilecek önemli bir tartışma alanı oluşturmaktadır.

Not

Yazarlar Eşit Katkı Sağlamıştır.

KAYNAKLAR

- Asensio, A., Masip-Bruin, X., Garcia, J., & Sánchez, S. (2021). On the optimality of concurrent container clusters scheduling over heterogeneous smart environments. *Future Generation Computer Systems*, 118, 157–169.
- Boychenko, K. (2019). Re-defining the role of interactive architecture in social relationships. In *Proceedings of the International Conference on the 4th Game Set and Match (GSM4Q-2019)* (pp. 99–107). Qatar University Press. <https://doi.org/10.29117/gsm4q.2019.0016>
- Fox, M. (2023). Demystification: The evolving design process of interactive architecture. In B. Farahi & N. Leach (Eds.), *Interactive design: Towards a responsive environment* (pp. 213–220). Birkhäuser. <https://doi.org/10.1515/9783035626896-030>
- Hajjaji, Y., Boulila, W., Farah, I. R., Romdhani, I., & Hussain, A. (2021). Big data and IoT-based applications in smart environments: A systematic review. *Computer Science Review*, 39, 100318.
- Knox, K. (2021). Communicative performance of interactive space in social relationship through Actor-Network Theory. In *2021 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/EMCTECH53459.2021.9619170>
- Kotsev, A., Schade, S., Craglia, M., Gerboles, M., Spinelle, L., & Signorini, M. (2016). Next generation air quality platform: Openness and interoperability for the Internet of Things. *Sensors*, 16(3), 403.
- Kroner, W. M. (1997). An intelligent and responsive architecture. *Automation in Construction*, 6(5–6), 381–393.
- Latour, B. (2005). *Reassembling the social: An introduction to Actor-Network-Theory*. Oxford University Press.
- Lee, J. H., Gu, N., Mark, T., & Ostwald, M. (2018). Rethinking and designing the key behaviors of architectural responsiveness in the digital age. In T. Fukuda, W. Huang, P. Janssen, K. Crolla, & S. Alhadidi (Eds.), *Learning, adapting and prototyping: Proceedings of the 23rd International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA 2018)* (pp. 359–368). Tsinghua University Press.

- Lyu, Y. (2023). Designing for children's social play in responsive multi-sensory environments. In Companion proceedings of the 2023 conference on interactive surfaces and spaces (ISS Companion '23) (pp. 89–92). Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3626485.3626552>
- Meagher, M. (2015). Designing for change: The poetic potential of responsive architecture. *Frontiers of Architectural Research*, 4(2), 159–165.
- Negroponte, N. (1969). Toward a theory of architecture machines. *Journal of Architectural Education*, 23(2), 9–12.
- Negroponte, N. (1975). *Soft architecture machines*. MIT Press.
- Nguyen, B. V. D. (Alex), Vande Moere, A., & Achten, H. (2020). How to explore the architectural qualities of interactive architecture—Virtual or physical or both? In L. Werner & D. Koering (Eds.), *Anthropologic: Architecture and fabrication in the cognitive age – Proceedings of the 38th eCAADe Conference* (Vol. 2, pp. 219–231). <https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2020.2.219>
- Nişanyan, S. (2026). Nişanyan sözlük: <https://www.nisanyansozluk.com>
- Özdemir, S., & Arabacıoğlu, B. C. (2022). Mikrodenetleyici sistemlerin kullanımı ile etkileşimli mekân çözümlerinin iç mekân tasarımında sunduğu güncel olanak ve kısıtlar. *Modular Journal*, 5(2), 203–224.
- Şen, B. (2020). İnteraktif mekân kavramının işlevsel dönüşüme katkısının incelenmesi. *Tasarım Enformatiği*, 2(1), 3–13.
- Senagala, M. (2006). Rethinking smart architecture: Some strategic design frameworks. *International Journal of Architectural Computing*, 4(3), 33–46. <https://doi.org/10.1260/147807706778658838>
- Söker, Y., & Güney Yüksel, F. C. (2024). İnteraktif mekân kurgulu akıllı evlerin hasta bakımındaki rolü. *Sürdürülebilir Mühendislik Uygulamaları ve Teknolojik Gelişmeler Dergisi*, 7(2), 114–130. <https://doi.org/10.51764/smutgd.1523487>
- Tao, Z. (2020). Advanced wavelet sampling algorithm for IoT based environmental monitoring and management. *Computer Communications*, 150, 547–555.
- Velikov, K., Thün, G., & Ripley, C. (2012). Thick air. *Journal of Architectural Education*, 65(1), 69–79.
- Zuk, W. (1970). *Kinetic architecture*. Van Nostrand Reinhold.

MSTAS 26 "KAPSAM DIŞI"

XX. MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM ULUSAL SEMPOZYUMU

OTURUM 10

AKILLI KENTLER,
VERİ-TEMELLİ KENTSEL SİSTEMLER
ve DİJİTAL İYİLEŞTİRME

Afet Sonrası Mekânsal Engellerin Tahliye Performansı Üzerindeki Etkisi: Etmen Tabanlı Bir Simülasyon Analizi

Süphan Kaan Çiftci¹ ; Mehmet Ali Altın² 

¹Yalova Üniversitesi; ²Eskişehir Teknik Üniversitesi

¹suphan.ciftci@yalova.edu.tr; ²maaltin@eskisehir.edu.tr

Özet

Mevcut yapı yönetmelikleri ve tahliye güvenliği standartları kaçış rotalarını genellikle statik ve engelsiz geometriler üzerinden değerlendirmektedir. Ancak afetler zaman ve mekân bağlamında sürekli değişen dinamik olaylardır. Özellikle iç mimari tasarım kararlarının ve yapısal olmayan donatıların yaşam güvenliği üzerindeki etkisi mevcut yönetmeliklerde ikincil planda kalmaktadır. Afet anında ve sonrasında iç mekândaki tefriş elemanlarının devrilmesi, koridoru daraltan etkenler veya yangın anında dumanın kaçış koridorunu kapatması kaçış rotalarını anlık olarak değiştirme zorunluluğu yaratmaktadır. Yönetmelikler, insanların kaçış koridorlarında düzenli bir şekilde tahliye olacağını varsayarak standartları belirler. Bu sebeple insanların panik durumlarını, olası bir fiziksel engelin yarattığı darboğazı ve kapı önündeki yığılmaları göz ardı eder. Ayrıca afet anında acil çıkış tabelaları statik bir şekilde aynı yönlendirmeleri yapmaya devam ederek insanları tehlikenin merkezine yönlendirme riski de taşımaktadır. Çalışma, yönetmeliklerdeki statik plan yanılığını etmen tabanlı modelleme teknikleri ile sorgulamayı amaçlamaktadır. Bu doğrultuda yönetmeliklerin öngördüğü ideal engelsiz kaçış koridorlarındaki tek bir fiziksel engelin etkisi, farklı genişlik ve uzunluklarda gerçekleştirilen toplam 990 simülasyon koşusu ile ortaya koyulmaktadır. Literatürde insan davranışlarını en gerçekçi şekilde modelleyen Sosyal Kuvvet Modeli temel alınarak yürütülen etmen tabanlı simülasyonlar, Anylogic yazılımı ortamında gerçekleştirilmiştir. Sosyal Kuvvet Modeli yaklaşımıyla etmenlerin koridorda yer alan bir engelin etrafından dolaşma davranışlarının, birbirlerini ittirmelerinin ve koridorda oluşan darboğaz durumlarının gerçekçi şekilde simüle edilmesi sağlanmaktadır. Kalabalık dinamiğindeki yapıyı modele yansıtabilmek için etmenlerin hem başlangıç hem de konforlu yürüyüş hızları için üçgensel dağılım kullanılmıştır. Elde edilen bulgular doğrultusunda kemerleşme etkisi, darboğaz oluşumu, koridor genişliklerine göre şerit oluşumları açıkça ortaya konmaktadır. Kaçış koridorunda bulunan yapısal olmayan bir donatı veya engelin, tahliye süresini istikrarlı ve kesin bir şekilde uzattığı (en fazla %65 oranında) ortaya konulmuştur. Engelin yarattığı bu gecikme mekânın geometrisine bağlı olarak farklı darboğazlar oluşturmaktadır. Elde edilen veriler doğrultusunda, BYKHY gibi yönetmeliklerde kaçış koridorlarının asgari ölçüleri hesaplanırken koridorların boş ve temiz olarak varsayılmasının ciddi bir risk oluşturduğu görülmektedir. Çalışma, tek bir iç mimari unsurun bile tahliye verimliliğini büyük oranlarda düşürdüğünü ortaya koymakta ve tahliyelere yönelik yönetmeliklerde dinamik performans analizlerinin ve performansa dayalı tasarım yaklaşımlarının zorunluluğunu vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Tahliye Simülasyonu, Etmen Tabanlı Modelleme, Sosyal Kuvvet Modeli, Afet.

The Impact of Post-Disaster Spatial Obstacles on Evacuation Performance: An Agent-Based Simulation Analysis

Süphan Kaan Çiftci¹ ; Mehmet Ali Altın² 

¹Yalova University; ²Eskişehir Technical University

¹suphan.ciftci@yalova.edu.tr; ²maaltin@eskisehir.edu.tr

Abstract

Current building codes and evacuation safety standards generally evaluate escape routes based on static and unobstructed geometries. However, disasters are dynamic events that continuously change within the context of time and space. In particular, the impact of interior design decisions and non-structural elements on life safety remains secondary in existing regulations. During and after a disaster, the overturning of interior furnishings, factors narrowing the corridors, or smoke blocking the escape corridor during a fire necessitate instantaneous alterations to escape routes. Regulations establish standards assuming that occupants will evacuate in an orderly manner through escape corridors. Consequently, they ignore the panic states of individuals, the bottlenecks caused by potential physical obstacles, and the queuing at doorways. Furthermore, static emergency exit signs continue to provide the same directions during a disaster, carrying the risk of guiding people toward the center of the hazard. This study aims to question the static plan fallacy in regulations using agent-based modeling techniques. The research reveals the impact of a single physical obstacle within the ideal unobstructed escape corridors prescribed by regulations, through a total of 990 simulation runs conducted at various widths and lengths. The agent-based simulations, rooted in the Social Force Model—which most realistically models human behavior in the literature—were conducted in the AnyLogic software environment. Through the Social Force Model approach, the agents' behaviors of navigating around an obstacle in the corridor, pushing one another, and the resulting bottleneck situations are realistically simulated. To reflect crowd dynamics in the model, a triangular distribution was utilized for both the initial and comfortable walking speeds of the agents. Based on the findings, the arching effect, bottleneck formation, and lane formations corresponding to corridor widths are clearly demonstrated. It is revealed that a non-structural fixture or obstacle located in the escape corridor consistently and definitively prolongs the evacuation time (by up to 65%). This delay caused by the obstacle creates different bottlenecks depending on the geometry of the space. In light of the obtained data, it is evident that assuming corridors to be empty and clear when calculating the minimum dimensions of escape corridors in regulations such as BYKHY poses a severe risk. The study demonstrates that even a single interior architectural element significantly reduces evacuation efficiency, emphasizing the necessity of dynamic performance analyses and performance-based design approaches in evacuation regulations.

Keywords: Evacuation Simulation, Agent-Based Modeling, Social Force Model, Disaster.

1. Giriş

Beklenmedik afet durumlarında, insanların zamanında ve güvenli bir şekilde tahliyesi büyük önem taşımaktadır (Yu, vd., 2018). Afetler veya acil durumlarda insanlar tehlikeli alanlardan güvenli alanlara zamanında tahliye edilirse kayıplar azaltılabilir veya önlenir (Urbina ve Wolshon, 2003). 21 Ocak 2025 tarihinde Bolu Kartalkaya kayak merkezinde bulunan bir otelde meydana gelen yangın sonucu bina tamamen kullanılamaz hale gelmiş ve 78 kişi hayatını kaybetmiştir. Bu gibi olayların önüne geçebilmek için afet sonrası tahliye simülasyonlarının aktif ve doğru bir şekilde kullanılması ve gereken önlemlerin alınması gerekmektedir.

Literatürde en doğru sonuçlara götüren ve en yaygın kullanılan simülasyon modelleri Ayrık Olay Simülasyonu (DES) ve Etmen Tabanlı Simülasyondur (ABS). Ayrık Olay Simülasyonu, bir sistemin çalışmasını zaman içinde meydana gelen ayrık olaylar dizisi olarak modeller (Robinson, 2025). Etmen Tabanlı Simülasyon ise, bağımsız olarak çalışabilen veya birbirleriyle etkileşime girebilen, çevreyi algılayabilen, bilgi alışverişinde bulunabilen ve kararlar alabilen, otonom, proaktif ve yapay zekâ tabanlı akıllı etmenleri (ajanları) içeren hibrit bir ayrık-sürekli simülasyon modelidir (Chan, vd., 2010; Ribino, vd., 2018).

Afet sonrası yaya tahliyesi simülasyonları, mikroskobik ve makroskobik modeller olarak ikiye ayrılır (Tak, vd., 2018). Mikroskobik modeller, yayaların bireysel hareketlerinin yanı sıra diğer varlıklarla (yayalar, engeller) etkileşimlerine odaklanır. Mikroskobik modellerin üç ana türü, Sosyal Kuvvet Modeli, Hücresel Otomat Modelleri ve Ayrık Seçim Modelleridir ve bunlar toplu yaya hareket kalıplarını yorumlamak için kullanılır (Zeng, vd., 2017). Sosyal Kuvvet Modelinde yayalara etki eden kuvvetler arasında istenen yönde bir ivme, yayaların kişisel alanlarını korumalarına neden olan bir kuvvet ve diğer yayalara doğru bir tür çekim kuvveti bulunmaktadır (Helbing ve Molnar, 1995). Sosyal Kuvvet Modeli, “dur-kalk”, “hızlı olan yavaştır” ve “kemerleşme ve tıkanma” gibi birçok toplu davranışı modelleyebilmektedir (Helbing, vd., 2000; Johansson, vd., 2007).

İlgili çalışmalar incelendiğinde afet sonrası tahliye performanslarını izlemek için Etmen Tabanlı Simülasyonun sıklıkla kullanıldığı görülmektedir. Çakıcı Alp (2011); ABEvac isimli, mekânı CAD planlarından analiz eden, Anadolu insanının özelliklerini içeren etmen tabanlı bir model geliştirmiştir. Ukkusuri vd. (2017); evleri tahliye eden hane halklarını etmen olarak ele alan, hane halkı karar verme modülünü kullanan, A-RESCUE adlı çoklu-etmen simülasyon modelini önermiştir. Model, tahliye sürelerini değerlendirme ve tahmin etme yeteneğine sahiptir. Wang vd. (2016); çok modlu (yürüme ve araçla) tsunami tahliye simülasyonu için etmen tabanlı simülasyon çerçevesi geliştirmişlerdir. Modellerini Oregon’da vaka çalışması olarak uygulamış ve karar verme süresinin ölüm oranı ile yakından ilişkili olduğunu, ölüm oranının tahliye edilenlerin yürüme hızındaki değişikliklere duyarlı olduğunu ve tsunami tahliyesi sürecinde araç kullanımının yüksek olmasının ölüm oranını artırdığını ortaya koymuşlardır. Wagner, vd. (2014); yangın sırasında konser kalabalığının tahliyesini simüle etmek amacıyla etmen tabanlı modelleme kullanarak bir simülasyon ve karar destek sistemi geliştirmişlerdir. Cheng, vd. (2014); Etmen Tabanlı Simülasyon modeli ile havalimanlarındaki güvenlik seviyelerini ve grup halinde seyahat eden yolcuların tahliye süresine etkisini incelemişlerdir. D’Orazio vd. (2014); deprem sonrası insanları tahliye davranışlarını gösteren video kayıtlarını analiz ederek etmenler için bir dizi hareket kuralı geliştirmişlerdir. Wang ve Cui, (2020); metro istasyonlarında kalabalık tahliyesi ve yaya akışı problemlerini Sosyal Kuvvet Modelini içeren Etmen Tabanlı Model ile incelemiş ve çeşitli önerilerde bulunmuşlardır. Chang vd., (2022); Stokastik Yaya Hücre İletim Modeli olarak bilinen kentsel bir ortamdaki yolların ve acil durum sığınaklarının gerçek verileri ile yaya akışı tahmin modelleri, deprem sonrası tahliye edilmesi gereken kişi sayısı ve depremlerin kentsel altyapı üzerindeki etkisine dayanan etmen tabanlı dinamik bir model oluşturmuşlardır. Bakar, vd. (2023); Etmen Tabanlı Model ve Sosyal Kuvvet Modelinin hem açık hem de kapalı mekânlarda insan tahliye hareketlerini modellemek için en uygun olan yöntemler olduğunu ortaya koymuşlardır. Bu çalışmalar konser alanı, metro, havalimanı veya diğer tekil binalar gibi örneklerle sınırlı kalmıştır. Çoğu çalışma

tahliyelerin dinamik süreçlerini ortaya koymuş, statik bir yaklaşımla mekândaki değişimleri simülasyonlarına dahil etmemiştir (Li ve Liu, 2019; Hardiansyah, vd. 2022; Muttaqien, vd. 2024; Wang, vd. 2025).

Tahliye simülasyonlarında engellerin aktif şekilde kullanıldığı az sayıda çalışma çıkış kapısının önüne engel koymanın kemerleşme etkisini ortadan kaldırdığını ve tahliye performansını arttırdığını ortaya koymuştur. Jiang, vd., (2014); izdihamlarla başa çıkabilmek için, çıkışın önüne uygun şekilde bir sütun veya başka şekilde engeller yerleştirilerek tahliye akışını artırma olasılığını ortaya koymuşlardır. Hamizan, vd. (2021); Çıkış yolunun yakınına yerleştirilen engelin anti-kemerleşme olgusuyla uyumlu olduğunu ve tahliye süresini azaltabildiğini aktarmışlardır. İlgili çalışmalarda afet sonrası tahliye simülasyonlarında mekânın dinamik koşullarının kısıtlı şekillerde değerlendirildiği görülmüştür. Yönetmelikler, kaçış rotalarını, duman veya yangın yokmuş gibi boş bir alan kabul ederek sabit metriklerle (örn. 20m/45m) sınırlandırır (Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik [BYKHY], 2007, Madde 32-(6) ve Ek-14). İnsanların koridorlarda düzenli bir akışta tahliye olacağı varsayılarak panik ve kapı yığılmaları göz ardı edilir (Planlı Alanlar İmar Yönetmeliği, 2017, Madde 39-(2); BYKHY, 2007, Madde 33-(1), 47-(1)). Acil çıkış tabelaları tehlikenin nerede olduğuna göre değişmez, sadece yönetmeliğin kuralına göre sabitlenir (BYKHY, 2007, Madde 73-(1), (4)). Tehlike anında alternatif rotalar üretmek yerine, yapıların belirli sürelerle (90-120 dk) yangına dayanıklı yapılması şart koşulur (BYKHY, 2007, Madde 38-(3) ve 50-(1/a)). Yönetmelikler, engeli sadece kilit veya koli gibi nesneler olarak tanımlar (BYKHY, 2007, Madde 30-(4) ve 35-(1)). Depremde çökebilecek asma tavan veya donatıların statik yük hesabı yüksek riskli deprem bölgelerindeki yapılarda istense de (Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı [AFAD], 2018, Madde 6.1.1 ve 6.1.2), bunların yıkılarak koridorlarda yaratacağı anlık tahliye engelleri hesaba katılmaz.

Türkiye’de yönetmelikler statik yaklaşımlara bağlıken; İngiltere (British Standards Institution [BSI], 2019, Madde 0.18, 0.19) , Amerika Birleşik Devletleri (International Code Council [ICC], 2021, 1 Ek O; National Fire Protection Association [NFPA], 2021, Bölüm 4.4.3, 5.4.5.2) ve Birleşik Arap Emirlikleri (United Arab Emirates Ministry of Interior, 2018, Bölüm 3.b.c) gibi ülkeler karmaşık binalarda panik durumlarını ve etmen davranışlarını çözen Performansa Dayalı Tasarım yaklaşımlarını yasal bir alternatif veya zorunluluk olarak mevzuatlarında bulundurmaktadırlar.

Çalışmanın amacı, mevcut yapı yönetmeliklerinde kaçış rotalarının afet anında sabit ve engelsiz kalacağı varsayımına dayanan statik plan yanılığını nicel verilerle sorgulamaktır. Bu doğrultuda çalışmanın kapsamı, AnyLogic 8.9.7 yazılımı ile Etmen Tabanlı Simülasyon modeli ve Sosyal Kuvvet Modeli’ni kullanan, boş koridor ve koridorda engel oluşturan yapısal olmayan bir elemanın yaya tahliye süresi üzerindeki etkisi ve yarattığı darboğazı ölçmektir.

2. Yöntem

Bu çalışmada Simülasyon Tabanlı Deneysel Araştırma deseni kullanılmaktadır. İnsan davranışlarının, mekânsal kısıtlamaların ve kalabalık dinamiklerinin yapısını analiz edebilmek amacıyla, Etmen Tabanlı Modelleme yöntemi kullanılmıştır. Simülasyonlar, yaya dinamikleri ve dijital ikiz modellemesinde yüksek geçerliliğe sahip AnyLogic 8.9.7 yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Model, Helbing ve Molnar (1995) tarafından geliştirilen Sosyal Kuvvet Modeli ile oluşturulmaktadır. Bu altyapı, koridorda yer alan bir engelin etrafından dolaşma ve koridorda darboğaz davranışlarını gerçekçi şekilde simüle etmeyi sağlamaktadır.

2.1. Mekânsal Kurgu ve Senaryolar

Çalışma alanı olarak bir otel yapısını temsil eden tipik bir koridor modellenmiştir. Bu koridor parametrik yaklaşımla farklı boyutlarda simüle edilmiştir. Koridor uzunluğu 8 metre ile başlayıp 0.5m artışla 15 metre uzunluğa kadar değişmekte, koridor genişliği ise 1.2 metre ile başlayıp 0.2m artışla 2.0 metre genişliğe kadar değişmektedir. Bu bağlamda 15 farklı uzunluk ve 6 farklı genişlikte toplam

90 simülasyon senaryo_1 için 90 simülasyon da senaryo_2 için uygulanmıştır. Koridor uzunluk ve genişlik ölçüleri Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik (BYKHY, 2007) baz alınarak belirlenmiştir.

Senaryo_1, koridorlarda mevcut yönetmeliklerin öngördüğü deprem sonrası temiz ve boş tahliye sürelerinin ölçüldüğü, Senaryo_2 ise deprem sonrası koridor sınırlarında yer alan yapısal olmayan bir elemanın (iç mimari donatı) tahliye aksında yer aldığı sürelerin ölçüldüğü senaryodur. Senaryo_2’de koridorda bulunan engel 0.8x0.4m ölçülerinde ve çıkış kapısından uzaktadır. İki senaryoda da ortak olan değişkenler şu şekildedir;

- Etmen sayısı: N=50
- Varışlar arası süre: Düzensiz yığılma ve kaçış davranışını simüle etmek için etmenlerin sisteme giriş aralıkları 0.1 saniye ile 0.5 saniye arasında Tekdüze Dağılım ile kurgulanmıştır.
- Hız Dağılımları: Etmenlerin hem başlangıç hem de konforlu yürüyüş hızları için Üçgensel Dağılım kullanılmıştır. Modelde 1.35 m/s hız değeri mod olarak alınmıştır. Minimum hız 0.6 m/s yavaş hareket eden veya dezavantajlı bireyler göze alınarak belirlenmiş, maksimum hız ise 1.6 m/s olarak sınırlandırılmıştır. Hızlar belirlenirken Fruin (1971)’in ölçümleri ve SFPE kılavuzu baz alınmıştır (DiNenno, 2002).
- Acil çıkış kapı ölçüsü 90 cm olarak modellenmiştir (BYKHY, 2007).

2.2. Veri Toplama ve İstatistiksel Analiz

Etmen Tabanlı Modeller doğası gereği insan davranışlarının rastlantısallığını barındırdığı için tekil simülasyonlar bilimsel olarak kabul edilmemektedir. Rastgele seçilen yeterli büyüklükteki bir örneklem, istatistiksel çıkarım kullanılarak popülasyonun parametrelerini tahmin etmek için kullanılabilir (Kwak ve Kim, 2017). Ronchi vd. (2013)’e göre, tahliye simülasyonlarında, ortalama model sonucunu temsil edecek uygun sayıda simülasyonu çalıştırma kaygısı bir sorun yaratmaktadır. Bu sorunu çözmek için Hogg vd., (2001)’in belirttiği $N = 30$ örneklem büyüklüğü, örneklem ortalaması için güvenilir bir normal yaklaşım sağlar (Hogg, vd., 2001). Hansen, vd., (2011), Pearson, vd., (2020) ve Fine, vd., (2022)’in çalışmalarında görüldüğü gibi, simülasyon mimarisinde %10’un altında Değişim/Varyasyon Katsayısı değerinin araştırmacılar tarafından altın standart hedef olarak kabul edildiği anlaşılmaktadır. Çalışmada 30 iterasyon yapılan simülasyonlardan elde edilen verilerin Tanımlayıcı İstatistikleri hesaplanmıştır.

3. Bulgular

Farklı koridor geometrileri üzerinden gerçekleştirilen toplam 990 simülasyon koşusundan elde edilen veriler statik plan yaklaşımlarının sebep olduğu güvenlik zafiyetlerini net bir şekilde ortaya koymaktadır. Bulgular; tanımlayıcı istatistikler, varyans analizi ve mekânsal yoğunluk dağılımları olmak üzere üç aşamada incelenmiştir.

3.1. Tanımlayıcı İstatistikler

Modelin stokastik güvenilirliğini ölçmek ve senaryolar arası farkları saptamak amacıyla, koridorun uç (8 metre ve 15 metre) uzunluk ve genişlik (1.2m - 2.0m) kombinasyonlarında gerçekleştirilen 30 iterasyonlu simülasyonların temel tanımlayıcı istatistikleri incelenmiştir.

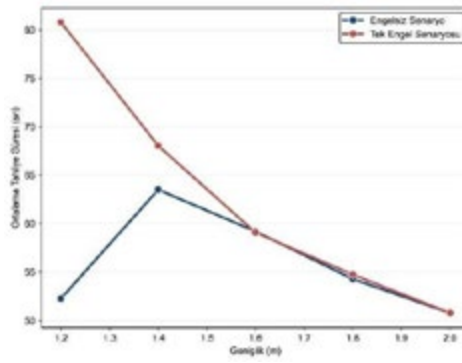
Elde edilen veriler değerlendirildiğinde, simülasyonun her iki senaryoda da yüksek istatistiksel kararlılık gösterdiği tespit edilmiştir. Senaryo 1’de (Engelsiz Koridor) tahliye sürelerinin Varyasyon Katsayısı (CV) %3.19 ile %8.86 aralığında; Senaryo 2’de (Tek Engel) ise %2.72 ile %6.37 aralığında seyretmiştir (**Tablo 1**). Her iki senaryoda da %10’un altında bir varyasyon katsayısına sahip olması ve dar bir %95 Güven Aralığında (GA) dağılması, mekândaki yaya akışının tesadüfi ve kaotik değil, sistemin kendi geometrisinden kaynaklanan öngörülebilir bir davranış sergilediğini kanıtlamaktadır.

Tablo 1. En Kısa ve En Uzun Koridorların Tanımlayıcı İstatistikleri

<i>Senaryo</i>	<i>Uzunluk (m)</i>	<i>Genişlik (m)</i>	<i>N</i>	<i>Aritmetik Ortalama (μ)</i>	<i>Standart Sapma (σ)</i>	<i>Varyasyon Katsayısı (%CV)</i>	<i>%95 Güven Aralığı</i>	<i>Alt Sınır</i>	<i>Üst Sınır</i>
<i>Engelsiz</i>	8	1,2	30	46,3	2,29	4,95	0,82	45,47	47,12
<i>Engelsiz</i>	8	1,4	30	58,88	3,27	5,55	1,17	57,70	60,05
<i>Engelsiz</i>	8	1,6	30	54,82	4,21	7,69	1,50	53,31	56,32
<i>Engelsiz</i>	8	1,8	30	50,87	4,50	8,86	1,61	49,25	52,48
<i>Engelsiz</i>	8	2	30	46,74	3,03	6,50	1,08	45,65	47,82
<i>Engelsiz</i>	15	1,2	30	58,15	1,85	3,19	0,66	57,49	58,82
<i>Engelsiz</i>	15	1,4	30	68,28	2,53	3,71	0,90	67,37	69,18
<i>Engelsiz</i>	15	1,6	30	63,22	3,50	5,54	1,25	61,96	64,47
<i>Engelsiz</i>	15	1,8	30	58,05	3,27	5,64	1,17	56,88	59,22
<i>Engelsiz</i>	15	2	30	54,91	2,24	4,08	0,80	54,10	55,71
<i>Tek Engel</i>	8	1,2	30	76,38	4,80	6,29	1,71	74,66	78,09
<i>Tek Engel</i>	8	1,4	30	64,25	4,09	6,37	1,46	62,78	65,71
<i>Tek Engel</i>	8	1,6	30	55,53	2,53	4,56	0,90	54,62	56,43
<i>Tek Engel</i>	8	1,8	30	50,97	1,60	3,14	0,57	50,40	51,55
<i>Tek Engel</i>	8	2	30	46,37	1,90	4,11	0,68	45,68	47,05
<i>Tek Engel</i>	15	1,2	30	85,22	3,31	3,88	1,18	84,03	86,40
<i>Tek Engel</i>	15	1,4	30	72,00	4,00	5,55	1,43	70,57	73,43
<i>Tek Engel</i>	15	1,6	30	62,74	2,86	4,57	1,02	61,71	63,76
<i>Tek Engel</i>	15	1,8	30	58,96	1,60	2,72	0,57	58,38	59,53
<i>Tek Engel</i>	15	2	30	55,11	1,53	2,77	0,54	54,56	55,66

Tek bir engelin, tahliye süresini şansa bağılı olarak artırmadığı görülmektedir. Kesin ve sistematik bir darboğaz yaratarak, özellikle dar koridorlarda tahliye süresini istikrarlı bir şekilde artırmaktadır. Aritmetik ortalamalar (μ) üzerinden yapılan inceleme tekil engelin mekânsal ölçülere bağılı olarak yarattığı sistematik darboğazı net bir şekilde ortaya koymuştur:

Tablo 1’de görüldüğü gibi 2.0 metre genişliğindeki 8 metrelik bir koridorda engel bulunması, tahliye süresini etkilememiştir (Engelsiz: 46.74 sn, Engelli: 46.37 sn). Bu durum, koridor genişliğinin, etmenlerin yön değıştirme ve engelden kaçınma refleksini bastırmaya yettiğini göstermektedir. Ancak koridor genişliği 1.2 metreye yaklaştığında, engelin çarpan etkisi dramatik bir şekilde ortaya çıkmıştır. 8x1.2 metrelik planda engelsiz tahliye 46.30 saniyede tamamlanırken, aynı mekâna tek bir engelin eklenmesi süreyi %65’lik net bir artışla 76.38 saniyeye yükseltmiştir (**Tablo 1**). Düşük varyasyon oranlarıyla doğrulan bu %65’lik gecikme, engelin yarattığı riskin şansa bağılı olmadığını net bir göstergesidir. Bu durum mekânsal daralma ile fiziksel engelin kesiştiğı noktada ortaya çıkan darboğazı ortaya koymaktadır. Şekil 1’de görüldüğü gibi 1.6 metre ve daha geniş koridorlarda tekil bir engelin tahliye süresinde anlamlı bir etkisi olmadığı görülmektedir.



Şekil 1. Koridor Genişliklerine Göre Ortalama Tahliye Süreleri

3.2. Plan Tipolojilerinin Etkisi ve Çift Yönlü Varyans Analizi (ANOVA)

Koridor uzunluğu ve genişliğinin tahliye süresi üzerindeki etkilerini istatistiksel olarak açıklamak amacıyla veriler IBM SPSS Statistics 27 yazılımında Çift Yönlü Varyans Analizi'ne (Two-Way ANOVA) tabi tutulmuştur. Çift Yönlü Varyans Analizi sonucunda, koridora engel koyulduğunda etmenler darboğazda rastgele sıkışarak sistemin kararlılığını değiştirmiş ve varyansların bozulduğu görülmüştür. Bu sebeple modelin istatistiksel güvenilirliğini korumak adına varyans eşitsizliğini hesaba katan Welch ANOVA testi ve varyansların eşit olmadığı durumlarda kullanılan Games-Howell Post-Hoc testi uygulanmıştır.

Tablo 2. Senaryo ve Koridor Genişliği İki Yönlü Varyans Analizi (ANOVA)

Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Der. (df)	F Değeri	Anlamlılık (p)	Etki Büyüklüğü
Senaryo	8124,22	1	325,07	< 0.001	0,311
Genişlik	27669,32	4	276,78	< 0.001	0,606
Senaryo: Genişlik	22270	4	222,77	< 0.001	0,553
Hata	17994,14	720	-	-	-

Tablo 2'de Çift Yönlü Varyans Analizi (ANOVA) sonuçları yer almaktadır. Senaryo (Engelli/Engelsiz) temel değişkeninin tahliye süresi üzerinde istatistiksel olarak ileri düzeyde anlamlı bir ana etkisi bulunmuştur (İki Yönlü ANOVA: $F = 325.07$, $p < 0.001$; Welch ANOVA: $F = 87.06$, $p < 0.001$). Anlamlılık değerinin < 0.001 olması tahliye süresindeki artışın şans eseri olma ihtimalinin binde birden bile düşük olduğunu göstermektedir. Etki Büyüklüğü değerlerine bakıldığında koridorun daralması tahliye süresini %60 oranında etkilerken engelin eklenmesiyle birlikte tahliye süresinin arttığı görülmektedir. Koridor genişliği değişkeni de tek başına anlamlı bir etkiye sahiptir ($F = 276.78$, $p < 0.001$). Çalışmanın bir diğer önemli bulgusu Senaryo ve Koridor Genişliği arasındaki etkileşim etkisidir. Analiz, engelin yarattığı tahliye süresindeki gecikmenin sabit olmadığını ve koridor genişliğine bağlı olarak radikal biçimde değiştiğini kesin bir şekilde ispatlamıştır ($F = 222.77$, $p < 0.001$). Bu etkileşim, mekânsal daralmanın eşik noktalarını açıkça ortaya koymuştur: Engelsiz senaryoda genişliğin daralması süreyi yalnızca tolere edilebilir ve doğrusal düzeyde etkilerken; engelli senaryoda genişlik 1.4 metre ve altındaki sınır değerlere (özellikle 1.2m'ye) düştüğünde, tahliye süresi genel istatistiksel eğilimi kırarak doğrusal olmayan bir sıçrama göstermektedir.

Tablo 3. Senaryoya Bağlı Welch ANOVA Testi

Kaynak	Serbestlik Der. 1 (df1)	Serbestlik Der. 2 (df2)	Welch F Değeri	Anlamlılık (p)	Etki Büyüklüğü
Senaryo	1	595,11	87,06	< 0.001	0,107

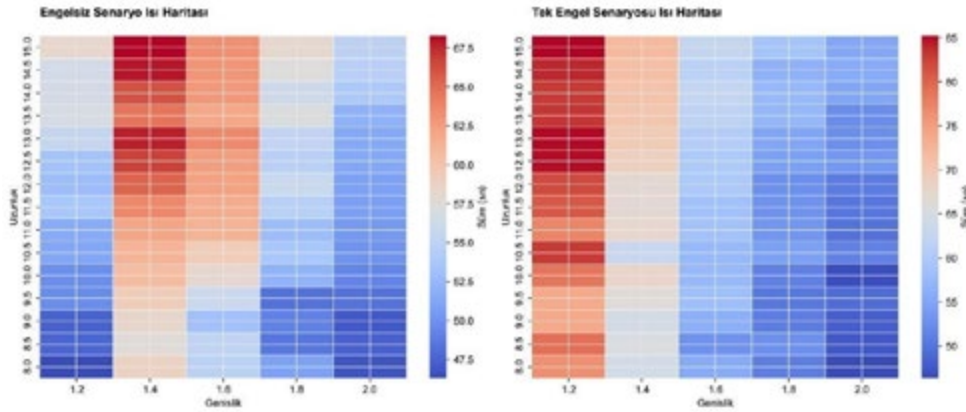
Tablo 3’de Welch testi, eşitsizliği matematiksel olarak cezalandırmış ve Çift Yönlü Varyans Analizi sonucunda 325 olan F değeri 87,06’ya düşmüştür. Welch ANOVA testinin bu matematiksel cezasına rağmen bu değer etkinin çok yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca engel durumunun tahliye süresini uzattığı gerçeği, binde birden bile daha düşük bir p değeri ile istatistiksel olarak kesinliğini korumuştur.

Tablo 4. Senaryoya Bağlı Games-Howell Post-Hoc Testi

Kaynak	Ortalama Farkı (A-B)	Standart Hata (se)	Serbestlik Der. (df)	T	Anlamlılık (p)	Etki Büyüklüğü (hedges)
Engelsiz-Tek Engel	-6,67	0,72	595,11	-9,33	< 0.001	-0,69

Games-Howell Post-Hoc testi, varyans farklılıkları hesaba katıldığında dahi, engelli senaryonun genel ortalamada engelsiz duruma kıyasla mutlak olarak 6.67 saniyelik istatistiksel bir gecikmeye neden olduğunu kanıtlamıştır ($p < 0.001$) (**Tablo 4**). Standart Hata değeri 0,72 saniye ile ölçümün yüksek bir hassasiyete sahip olduğunu göstermektedir. Etki büyüklüğü değeri engelin yarattığı darboğazın genel ortalamada bile orta-yüksek şiddette etki ettiğini göstermektedir.

Elde edilen bu sonuçlar, BYKHY gibi yönetmeliklerde asgari kaçış genişliği belirlenirken, kaçış koridorunu daraltacak dinamik engellerin doğrusal olmayan darboğaz çarpanı olarak hesaba katılmasının zorunluluğunu istatistiksel olarak doğrulamaktadır.



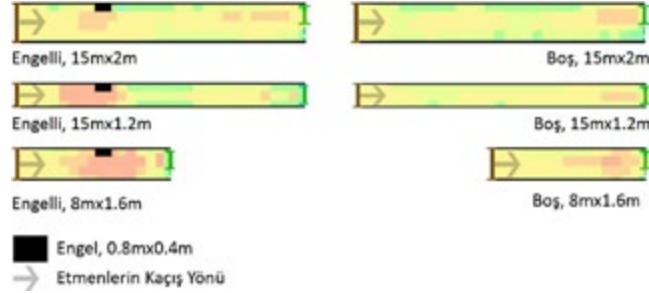
Şekil 2. Genişlik ve Uzunluğa Bağlı Senaryo Bazlı Tahliye Süreleri

Şekil 2’de koridor genişliğine ve uzunluğuna bağlı senaryo bazlı tahliye süreleri yer almaktadır. Simülasyon sonuçlarında engelsiz koridorda 1.2 metrede tahliyenin daha hızlı olup 1.4 ve 1.6 metrelerde sürenin uzamasının temel sebepleri şunlardır:

- **Şerit Oluşumu:** Etmenler tahliye sırasında içgüdüsel olarak şeritler oluşturur. 1.2 metre genişlikte tek bir baskın şerit oluşur ve sıkışık bir düzenle tahliye tamamlanır. Bu sebeple akış çizgisel olarak ilerler. 1.4 ve 1.6 metre genişlikte ise kararsız bir koridor alanı ortaya çıkar. Tahliye anında iki kişinin yan yana geçmesi için yeterli mesafe oluşmadığı söylenebilir. Bu durum insanların birbirlerini geçmeye çalışmasına, çarpışmalara ve birbirlerini itmelerine neden olur. Genişlik artmasına rağmen ikinci bir şerit verimli olarak oluşmaz.
- **Sıkışma ve Kemerleşme Etkisi:** 1.4 metre gibi oldukça kararsız genişliklerde çıkışa yönelen kalabalık kemer şeklinde bir darboğaz oluşturur. Jiang, vd., (2014) ve Hamizan, vd. (2021) çalışmalarında çıkışın hemen önüne koyulan bir engelin kemerleşme etkisini azalttığını ve tahliye süresini kısalttığını ortaya koymuşlardır. Ancak çalışmada çıkıştan uzakta bulunan engel darboğaz oluşturarak tahliye süresini artırmaktadır.
- **Sosyal Kuvvet Modeli:** Bu modele göre simülasyonda etmenler kişisel alanlarını koruma isteği güderler. 1.4 ve 1.6 metre genişlikte etmenler yanlarındaki boşluğu geçiş fırsatı olarak görür

ancak fiziksel genişlik (omuz genişliği + güvenlik mesafesi) yeterli gelmediği için yavaşlama-hızlanma döngüsüne girerler. Bu kararsızlık da toplam tahliye süresini artırır.

1.8 ve 2.0 metrelerde sürenin düştüğü görülmektedir. Bunun sebebi ise genişliğin iki veya üç şeride izin vermesiyle akışın çizgisel olarak düzenli hale gelmesidir.



Şekil 3. AnyLogic Simülasyonlarından Elde Edilen Etmen Yoğunluk Haritaları

İstatistiksel analizlerde tespit edilen doğrusal olmayan süre artışının mekânsal nedenlerini görselleştirmek amacıyla, AnyLogic üzerinden elde edilen "Etmen Yoğunluk Haritaları" farklı koridor geometrileri (15mx2m, 15mx1.2m ve 8mx1.6m) için karşılaştırmalı olarak incelenmiştir (**Şekil 3**).

Görsel bulgular değerlendirildiğinde, "Boş" (Senaryo 1) durumdaki tüm koridor tipolojilerinde yaya akışının büyük oranda homojen dağıldığı ve kesintisiz bir serbest akış karakteri sergilediği görülmüştür. Kapı genişliğinin 90 cm olması etmenlerin kapıya yaklaştıkça darboğaz yaratma eğiliminde olduğunu göstermektedir. Ancak koridora, yapısal olmayan bir elemanı temsil eden 0.8mx0.4m (uzunluk x genişlik) boyutlarındaki dinamik engel dahil edildiğinde, akış dinamiği koridor genişliğine bağlı olarak çökmektedir.

Geniş koridor modelinde (15m x 2.0m), 0.4m genişliğindeki engelin yarattığı daralma, etmenlerin manevra kabiliyeti ile tolere edilebilmiş ve akış büyük ölçüde korunmuştur. Ancak koridor genişliği 1.2m'ye çekildiğinde, aynı engelin yarattığı mekânsal felç Fruin (1971)'in tanımladığı haritadaki kırmızı "Kritik Yoğunluk" (LOS F) bölgeleriyle kanıtlanmıştır.

Sosyal Kuvvet Modelinde de bulunan, bu dramatik yığılmanın temel nedeni yaya dinamiği literatüründe "Sınır Tabakası" (Boundary Layer / Edge Effect) olarak bilinen fiziksel olgudur (Fruin, 1971; DiNenno, 2002). 1.2 metrelik bir koridorda 0.4m genişliğindeki bir engel teorik olarak 0.8m'lik bir boşluk bırakır. Ancak etmenlerin hem duvardan hem de engelden kaçınma refleksi her iki tarafta yaklaşık 15-20 cm'lik kullanılamayan ölü hacimler yaratmaktadır. Bu durum net geçiş açıklığını insanın ortalama omuz genişliği olan 0.4 - 0.5 metre sınırına kadar düşürmektedir.

Meydana gelen bu net açıklık, iki etmenin yan yana geçmesini imkânsız kılarak tahliyeyi mecburi olarak tek bir şerit formuna zorlamıştır. Ayrıca engelin 80 cm'lik uzunluğu, bu darboğazda anlık olmayan yavaşlatıcı bir etkiye neden olmuştur. Haritada (15mx1.2m) engelin yaya geliş yönünde biriken ve tahliye süresini 46 saniyeden 76 saniyelere çıkaran kırmızı darboğaz bölgesi, insan antropometrisi ile sınır tabakası etkisinin hesaba katılmadığı statik plan yaklaşımlarının yetersizliğinin doğrudan matematiksel sonucudur (**Şekil 2**).

4. Sonuçlar

Çalışmada, Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik (BYKHY) standartlarında yer alan asgari kaçış genişliklerinin afet sonrası fiili performansı, AnyLogic platformu üzerinden Etmen Tabanlı Modelleme ve Sosyal Kuvvet Modeli yöntemiyle test edilmiştir. Mevcut standartlar, kaçış rotalarını

afet anında hiçbir donatının devrilmediği, engelin olmadığı boş koridor olarak varsayan bir yaklaşıma dayanmaktadır. Ancak simülasyon sonuçları, afet tahliyesinin doğrusal bir tahliye problemi olmadığını, etmenlerin engellerle, duvarlarla ve birbirleriyle etkileşime girdiği stokastik (rastgele) bir kaos yönetimi olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Asgari yönetmelik ölçülerinin salt iki boyutlu çizgiler olarak uygulanması, mekânın içine düşebilecek dinamik engellerin yaratacağı akış felcini ve darboğazları göz ardı etmektedir. Araştırma bulguları, mimari tasarım ve onay süreçlerinde kabul gören statik plan yanılığının özellikle dar koridorlarda kritik bir güvenlik açığı yarattığını nicel ve mekânsal olarak kanıtlamıştır. Elde edilen bulgulara göre,

- Kaçış koridorunda yer alan yapısal olmayan tekil bir engel, tahliye süresini istikrarlı ve kesin bir şekilde uzatmaktadır. Engelin yarattığı gecikme mekânın geometrisine bağlı bir darboğaz oluşturmaktadır. 2.0 metre genişlikte bir koridorda tahliye süresini etkilememekte ancak 1.4 metre ve altındaki genişliklerde tahliye süresinde %65'lik doğrusal olmayan bir artış olmaktadır.
- Engel olmayan senaryolarda, 1.2 metre genişliğindeki koridorun 1.4 ve 1.6 metrelik koridorlardan daha hızlı tahliye sağladığı tespit edilmiştir. 1.4 ve 1.6m gibi kararsız genişlikler etmenlerin net bir şerit oluşturmasını engelleyip çıkış kapısı önünde kemerleşme yarattığı için tahliye süresini olumsuz etkilemektedir.
- 1.2 metre genişlikteki koridorda 0.4m'lik bir engel 0.8metrelik fiziksel bir boşluk yaratmaktadır. Ancak etmenlerin duvarlara ve engellere sürtünmemek için bıraktığı güvenlik mesafesi (sınır tabakası) sebebiyle fiilen kullanılan net genişlik 0.4-0.5metreye düşmektedir. Bu durum akışı tekli sıraya zorlayarak darboğaza sebep olmaktadır.
- Elde edilen veriler, BYKHY gibi yönetmeliklerde asgari kaçış genişlikleri hesaplanırken koridorların boş ve temiz olarak varsayılmasının riskli olduğunu göstermektedir. Yönetmeliklerde kaçış genişlikleri hesaplanırken mekânın boş bir geometri olarak değil, sınır tabakası, insan antropometrisi, insan davranışları ve dinamik engellerin yaratacağı doğrusal olmayan darboğaz çarpanları ile birlikte hesaplanması mekânsal ve tahliye güvenliği açısından zorunludur.

Sonuç olarak; kamusal yapılarda, tahliye simülasyonlarının mobilyalı ve afet sonrası oluşabilecek engellere bağlı senaryoları da içerecek şekilde zorunlu kılınması, iç mimari tasarım süreçlerinde mobilyaların sabitlenmesinin sadece bir deprem önlemi olarak değil, tahliye akış güvenliği kriteri olarak da ele alınması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Böylelikle dolaşım alanları ve iç mimari donatılar henüz tasarım ve ruhsatlandırma aşamasındayken afet stres testlerine tabi tutulabilecek, yasal standartlar sadece boş koridorlar için değil, afetin kaotik gerçekliği için yeniden tanımlanabilecektir. Gelecek çalışmalarda, ortaya konan bu simülasyon modelinin dijital ikiz süreçlerine entegre edilmesi ve yapılar henüz tasarım aşamasındayken mimari planları afet stres testlerine tabi tutacak otomatik risk denetim algoritmalarının geliştirilmesi hedeflenmektedir. Ayrıca, mekâna yerleştirilecek sensörlerden alınacak gerçek zamanlı verileri işleyen akıllı bir dijital ikiz mimarisi kurgulanarak; afet anında oluşan anlık darboğazlara ve çeşitli kısıtlamalara göre rotayı değiştirebilen dinamik yönlendirme tabelalarının tahliye performansına olan katkısının test edilmesi planlanmaktadır. Bu yaklaşım, afet yönetimini statik ve kuralcı tasarım anlayışından çıkararak; mekânı ve insanı okuyan, anlayan ve afetin kaotik gerçekliğine anlık tepki verebilen akıllı mimari sistemlere dönüştürmenin temelini oluşturacaktır.

KAYNAKLAR

- Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. (2018). Türkiye bina deprem yönetmeliği. *T.C. Resmî Gazete* (30364 Mükerrer, March 18, 2018).
- Bakar, N. A. A., Hashim, N. M., Aminuddin, A., Zakaria, S. A., & Majid, M. A. (2023). Towards effective evacuation procedures in disaster management (DM): Simulation modelling and governance strategies. *Journal of Governance and Integrity*, 6(1), 483–494.
- Binaların yangından korunması hakkında yönetmelik. (2007). *T.C. Resmî Gazete* (26735, December 19, 2007).
- British Standards Institution. (2019). *Application of fire safety engineering principles to the design of buildings: Code of practice* (BS 7974:2019).
- Chan, W. K. V., Son, Y. J., & Macal, C. M. (2010). Agent-based simulation tutorial-simulation of emergent behavior and differences between agent-based simulation and discrete-event simulation. In *Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference* (pp. 135–150). IEEE.
- Chang, K. H., Wu, Y. Z., & Ke, S. S. (2022). A simulation-based decision support tool for dynamic post-disaster pedestrian evacuation. *Decision Support Systems*, 157, 113743.
- Cheng, L., Reddy, V., Fookes, C., & Yarlalagadda, P. K. (2014). Impact of passenger group dynamics on an airport evacuation process using an agent-based model. In *2014 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence* (Vol. 2, pp. 161–167). IEEE.
- Çakıcı Alp, N. (2011). *Binalarda kullanıcıların acil durum davranışının ve hareketinin etmen tabanlı bir model ile temsili ve benzetimi* [Doctoral dissertation, Istanbul Technical University].
- D’Orazio, M., Spalazzi, L., Quagliarini, E., & Bernardini, G. (2014). Agent-based model for earthquake pedestrians’ evacuation in urban outdoor scenarios: Behavioural patterns definition and evacuation paths choice. *Safety Science*, 62, 450–465.
- DiNenno, P. J. (Ed.). (2002). *SFPE handbook of fire protection engineering* (3rd ed.). National Fire Protection Association.
- Fine, J., McShane, M. J., Coté, G. L., & Scully, C. G. (2022). A computational modeling and simulation workflow to investigate the impact of patient-specific and device factors on hemodynamic measurements from non-invasive photoplethysmography. *Biosensors*, 12(8), 598. <https://doi.org/10.3390/bios12080598>
- Fruin, J. J. (1971). *Pedestrian planning and design*. Metropolitan Association of Urban Designers & Environmental Planners.
- Hamizan, S., Roselina, S., Habibollah, H., Yusliza, Y., & Lizawati, M. Y. (2021). Crowd emergency evacuation simulation time analysis via obstacle optimization strategy. *Journal of Physics: Conference Series*, 2129(1), Article 012045. IOP Publishing.
- Hansen, K. T., Cronin, J. B., & Newton, M. J. (2011). The reliability of linear position transducer and force plate measurement of explosive force–time variables during a loaded jump squat in elite athletes. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25(5), 1447–1456.
- Hardiansyah, W. F., Edriani, A. F., Hardiansyah, R., Lestyanti, R., & Mase, L. Z. (2022). Implementation of agent-based modelling to observe the evacuating behaviour at Faculty of Engineering Building, University of Bengkulu, Indonesia. *Journal of the Civil Engineering Forum*, 8(2), 179–192.
- Helbing, D., & Molnar, P. (1995). Social force model for pedestrian dynamics. *Physical Review E*, 51(5), 4282.
- Helbing, D., Farkas, I., & Vicsek, T. (2000). Simulating dynamical features of escape panic. *Nature*, 407(6803), 487–490.
- Hogg, R. V., Tanis, E. A., & Zimmerman, D. (2001). *Probability and statistical inference* (Vol. 6). Prentice Hall.
- International Code Council. (2021). *International building code*.
- Jiang, L., Li, J., Shen, C., Yang, S., & Han, Z. (2014). Obstacle optimization for panic flow-reducing the tangential momentum increases the escape speed. *PloS one*, 9(12), e115463.
- Johansson, A., Helbing, D., & Shukla, P. K. (2007). Specification of the social force pedestrian model by evolutionary adjustment to video tracking data. *Advances in Complex Systems*, 10(supp02), 271–288.
- Kwak, S. G., & Kim, J. H. (2017). Central limit theorem: The cornerstone of modern statistics. *Korean Journal of Anesthesiology*, 70(2), 144.
- Li, Y., & Liu, X. (2019). Guidance and evacuation research on passenger flow of rail transit outbound bottleneck based on anylogic. In *2019 IEEE 7th International Conference on Computer Science and Network Technology (ICCSNT)* (pp. 9–12). IEEE.
- Muttaqien, I. Y., Tanugraha, S., Puspitaningrum, J. E., & Manik, H. A. W. (2024). Evaluation of emergency access evacuation routes using agent-based model application. *Journal of Artificial Intelligence in Architecture*, 3(2), 71–80.

- National Fire Protection Association. (2021). *Life safety code* (NFPA 101).
- Pearson, M., García-Ramos, A., Morrison, M., Ramirez-Lopez, C., Dalton-Barron, N., & Weakley, J. (2020). Velocity loss thresholds reliably control kinetic and kinematic outputs during free weight resistance training. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(18), 6509.
- Planlı alanlar imar yönetmeliği. (2017). *T.C. Resmî Gazete* (30113, July 3, 2017).
- Ribino, P., Cossentino, M., Lodato, C., & Lopes, S. (2018). Agent-based simulation study for improving logistic warehouse performance. *Journal of Simulation*, 12(1), 23–41.
- Robinson, S. (2025). *Simulation: The practice of model development and use*. Bloomsbury Publishing.
- Ronchi, E., Kuligowski, E. D., Reneke, P. A., Peacock, R. D., & Nilsson, D. (2013). *The process of verification and validation of building fire evacuation models*.
- Tak, S., Kim, S., & Yeo, H. (2018). Agent-based pedestrian cell transmission model for evacuation. *Transportmetrica A: Transport Science*, 14(5-6), 484–502.
- Ukkusuri, S. V., Hasan, S., Luong, B., Doan, K., Zhan, X., Murray-Tuite, P., & Yin, W. (2017). A-RESCUE: An agent based regional evacuation simulator coupled with user enriched behavior. *Networks and Spatial Economics*, 17(1), 197–223.
- United Arab Emirates Ministry of Interior. (2018). *UAE fire and life safety code of practice*.
- Urbina, E., & Wolshon, B. (2003). National review of hurricane evacuation plans and policies: A comparison and contrast of state practices. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 37(3), 257–275.
- Wagner, N., & Agrawal, V. (2014). An agent-based simulation system for concert venue crowd evacuation modeling in the presence of a fire disaster. *Expert Systems with Applications*, 41(6), 2807–2815.
- Wang, H., & Cui, Y. (2020). Anylogic simulation research on passenger evacuation system of urban transportation hub. In *Proceedings of the International Symposium on Frontiers in Intelligent Transportation Systems* (pp. 5–11).
- Wang, H., Mostafizi, A., Cramer, L. A., Cox, D., & Park, H. (2016). An agent-based model of a multimodal near-field tsunami evacuation: Decision-making and life safety. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 64, 86–100.
- Wang, K., Li, Q., Deng, J., Su, C., & Feng, Y. (2025). Emergency evacuation paths for three-line transfer subway station by AnyLogic simulation: A case study. *IET Intelligent Transport Systems*, 19(1), Article e70075.
- Yu, J., Zhang, C., Wen, J., Li, W., Liu, R., & Xu, H. (2018). Integrating multi-agent evacuation simulation and multi-criteria evaluation for spatial allocation of urban emergency shelters. *International Journal of Geographical Information Science*, 32(9), 1884–1910.
- Zeng, W., Chen, P., Yu, G., & Wang, Y. (2017). Specification and calibration of a microscopic model for pedestrian dynamic simulation at signalized intersections: A hybrid approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 80, 37–70.

Afet Sonrası Karar Destek Mekanizmalarında Epistemik Geçirimsizlik: Adıyaman Hasar Tespit Verilerinin Mekânsal Analizi

Başak Ünver¹ ; Betül İlayda Ebrinç² 

¹Orta Doğu Teknik Üniversitesi; ²Bilkent Üniversitesi

¹basak.unver@metu.edu.tr; ²betul.yilmaz@bilkent.edu.tr

Özet

Afet sonrası hasar tespit çalışmaları, yalnızca binaların fiziksel durumunu belirleyen teknik bir süreç değil, aynı zamanda afetten etkilenen grupların iyileşme sürecini belirleyen en önemli aşamalardan biridir. Hasar tespit raporları da bu süreçte afetzedelerin devlet yardımlarına erişimini doğrudan belirleyen yasal bir zemin oluşturur. Binaların hasar derecelerine göre kategorize edilmesi; kimin yaşam alanına geri dönebileceği, kimin yerinden edileceği ve kimin hak sahibi olacağını belirleyen temel unsurdur. Bu çalışma, 2023 Kahramanmaraş depremleri sonrası Adıyaman Merkez ilçesindeki hasar tespit süreçlerini, mimari sayısal tasarım ve epistemik adalet perspektifinden inceleyen bir analiz hedeflemektedir. Araştırmada, Adıyaman Merkez ilçesindeki 9010 binaya ait hasar verileri, mülk sahiplerinin itiraz süreçleri ve bu süreçlerin sonucunda değişen kategoriler temel veri seti olarak kullanılmıştır. Çalışmanın metodolojisi, Adıyaman Merkez ilçesindeki binaların yapı-ruhsat ve koordinat verilerinin, mahalle ölçeğindeki sosyo-ekonomik veri katmanlarıyla entegre edildiği çok boyutlu bir veri madenciliği sürecine dayanmaktadır. Elde edilen ham veriler, Google MyMaps platformu üzerinden dinamik dijital haritalara dönüştürülerek mekânsallaştırılmıştır. Böylece resmi hasar tespit kategorileri ile itiraz süreçleri sonrasında ortaya çıkan tutarsız hasar tespit değişimleri veri odaklı görselleştirilmiştir. Bulgular, resmi hasar tespit sisteminin yerel bilgiyi ve profesyonel görüşleri dışlayan, teknokratik ve kapalı bir yapı sergileyerek epistemik geçirimsizlik yarattığını göstermektedir. Bu durum, itiraz ve dava süreçlerine ekonomik veya bilgi odaklı erişimi kısıtlı olan dezavantajlı gruplar aleyhine sistematik bir prosedürel adaletsizlik üretmektedir. Adıyaman örneğinde, itirazlar sonucunda ağır hasarlı binaların “hasarsız” kategorisine çekilmesi gibi radikal değişimler kamuoyunda bürokratik ve kurumsal bir epistemik güvensizlik yaratırken, çalışmada bu tür eşitsiz güç ilişkilerinin ürettiği bilgi temelli dışlanma biçimleri epistemik adaletsizlik olarak tanımlanmaktadır. Bu araştırma, güncellenen verilerle kendini yenileyen, katılımcı bir sayısal arşiv modeli hedefleyerek afet yönetiminde adalet ve erişim odaklı bir dönüşümü önermektedir.

Anahtar Kelimeler: Epistemik adaletsizlik, hasar tespit, veri odaklı analiz, afet sonrası toparlanma, Adıyaman.

Epistemic Impermeability in Post-Disaster Decision Support Mechanisms: Spatial Analysis of Adıyaman Damage Assessment

Başak Ünver¹ ; Betül İlayda Ebrinç² 

¹Middle East Technical University; ²Bilkent University

¹basak.unver@metu.edu.tr; ²betul.yilmaz@bilkent.edu.tr

Abstract

Post-disaster damage assessment is not merely a technical process; but also one of the most important stages determining the recovery process of affected communities. In that process, damage assessment reports constitute a legal basis that directly determines disaster victims' access to state aids. Categorizing buildings according to their damage level is a key factor in determining who can return to their homes, who will be displaced, and who will be entitled to compensation. This study aims to analyse the damage assessment processes in the Central district of Adıyaman, after the 2023 Kahramanmaraş earthquakes, from the perspective of architectural digital design and epistemic justice. The research is based on a dataset that has damage records of 9010 buildings in the central district, property owners' objection process, and the category changes resulting from these appeals. The methodology includes a multidimensional data mining process in which building permit and coordinate data are integrated with socio-economic data layers at the neighbourhood scale. The raw data were spatialized by transforming it into dynamic digital maps via the Google My Maps platform. In this way, inconsistencies between official damage assessment categories and the changes that emerged after objection processes were visualized. The findings reveal that the official damage assessment system creates epistemic impermeability through a technocratic and closed structure that excludes local knowledge and professional opinions. This situation generates procedural injustice against disadvantaged groups, while radical category shifts such as severely damaged buildings being reclassified as "undamaged" creates institutional epistemic distrust. In this study, such forms of exclusion produced by unequal power relations are defined as epistemic injustice. The research proposes a participatory digital archive model focused on justice and accessibility-oriented transformation in disaster management.

Keywords: Epistemic injustice, damage assessment, data driven analysis, post-disaster recovery, Adıyaman.

1. Giriş

Afetler yalnızca sismik sarsıntılar değil, politik, ekonomik ve sosyal süreçlerin birer sonucudur. Wisner et al. (1976), afetlerin 'doğallığını' sorgulayarak riskin fiziksel koşullardan ziyade insan kararları ve sosyo-tarihsel süreçlerle şekillendiğini savunur. Benzer şekilde Wisner (2004), afetlerin sosyo-politik kararların bir sonucu olduğunu ve toplumsal grupların afet sonrası yaşamlarını doğrudan şekillendirdiğini savunmaktadır. Endüstri 4.0 çağında karar süreçlerinde aktif bir tasarım girdisi kabul edilen veri (Sawhney et al., 2020; Xu et al., 2018), afet riskini şekillendiren sosyo-mekânsal ilişkilerin çözülmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Bu çalışma, Adıyaman Merkez ilçesinde 2023 Kahramanmaraş depremleri sonrası gerçekleştirilen hasar tespit sürecini incelemektedir. 9010 binaya ait veri setine dayanan haritalama çalışmaları, hasar kategorilerindeki tutarsızlıkları ortaya koyarak veri temelli yönetim sistemlerinin üretebileceği "yapılandırılmış kırılگانlıkları" görünür kılmaktadır. Bu bağlamda çalışma, hasar tespit verileri ile epistemik adaletsizlik arasındaki ilişkiyi sorgulamayı amaçlamaktadır.

1.1. Veri-Temelli Kentsel Sistemler ve Vaka Alanı (Adıyaman Merkez İlçesi)

Adıyaman Merkez ilçesi, 2023 Kahramanmaraş depremlerinde yıkımdan en çok etkilenen bölgelerden birisi olması nedeniyle ve listelenen 9010 binaya ait veri setinin derinliği sebebiyle seçilmiştir. 2025 bahar döneminde yapılan ilk hasar tespit verilerine dayanan haritalama çalışmaları, bölgedeki hasar tespit kategorilerindeki tutarsızlıkları ortaya çıkarmıştır. Özellikle başlangıçta "ağır hasarlı" olarak raporlanan 348 binanın, itirazlar sonucunda herhangi bir yapısal müdahale olmaksızın "az hasarlı" kategorisine geçirilmesi, resmi raporların nesnelliğini tartışmaya açmaktadır. Bu irrasyonel veri değişimleri ve hukuki süreçlere erişimdeki ekonomik kısıtlar, bilginin yönetiminde bir "epistemik geçirimsizlik" yaratarak yerel seslerin duyulmasını engellemektedir. Metodolojik olarak çalışma; binaların koordinat ve yapı-ruhsat verilerine ek olarak sosyo-ekonomik katmanları da işlemiş, elde edilen veri-temelli çıktıları Google MyMaps üzerinden dinamik dijital haritalara dönüştürerek kentsel adaletsizliğin mekânsal dağılımını görselleştirmiştir.

2. Teorik Çerçeve, Epistemik ve Mekânsal Adalet

Afet sonrası süreçler, yalnızca fiziksel bir yenilenme değildir. Bilginin doğruluğundan hak sahipliğine kadar konut yardımını ve mülkiyet haklarını doğrudan etkileyen bir dağıtımsal adalet meselesidir. Tafti ve Tomlinson (2019), afet sonrası toparlanma sürecinde, sınırlı kaynakların (hibe, kredi, yeni konut, vb.) kimlere aktarılacağını belirleyen politik bir dönem olduğunu vurgular. Bu bağlamda Nancy Fraser'ın (2007) "yeniden dağıtım" ve "tanıma" kavramları çok boyutlu bir perspektif sunar. Bu iki kavram adaletin hem maddi hem de sembolik boyutlarını ele alır. Yeniden dağıtım kavramı, adaletin sosyo-ekonomik boyutuna odaklanır. Kaynakların (konut ve finansal yardımların) toplumdaki farklı gruplar arasında adil bir şekilde paylaşılmasını hedefler. Bu durum afet sonrası süreçte kimlerin geçici barınma hakkına sahip olacağı, yardımların hangi mahallelere öncelikli gideceği ve kimlerin mülkiyet haklarının korunacağı gibi "hak sahipliği" meseleleriyle doğrudan ilişkilidir. Öte yandan tanıma kavramı adaletin kültürel ve sembolik boyutu ile ilişkilidir. Bu kavram marjinalleşmiş grupların kimliklerine ve kültürel değerlerine saygı duyulması ve bunların kamusal alanda geçerli kabul edilmesi anlamına gelir. Bu iki kavramın birlikte çalışması önemlidir çünkü bir grubun tanınmaması genellikle o grubun kaynaklara erişiminde de adaletsizliğe yol açar. Adıyaman bağlamında hasar tespit süreçlerinde mülk sahiplerinin binalarına dair bilgilerinin resmen yok sayıldığı adaletsizlik alanlarını analiz etmek için Fraser (2007) temel bir zemin sunar.

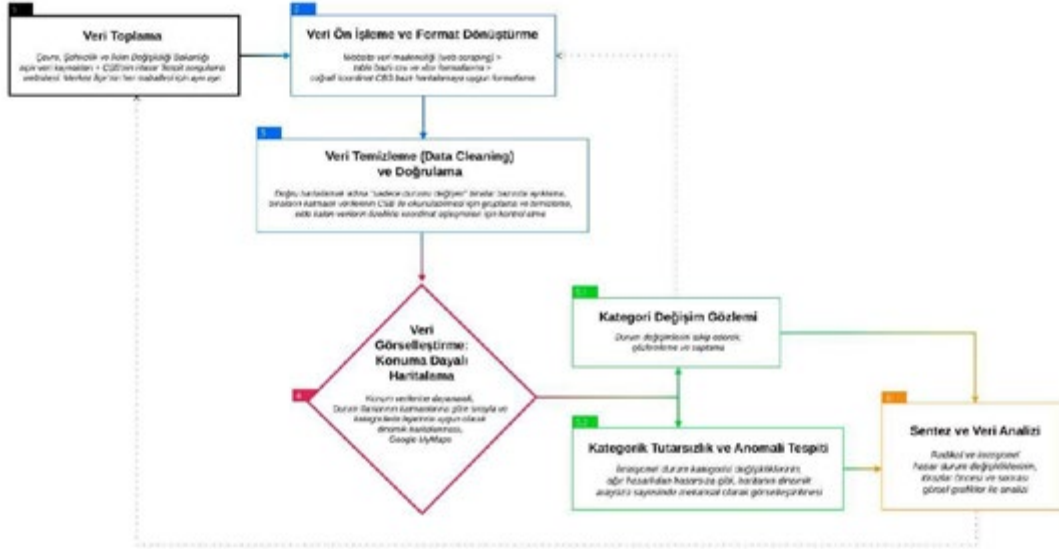
Epistemik adaletsizlik, belirli seslerin ve bilgi türlerinin haksız yere itibarsızlaştırılması veya karar mekanizmalarından sistematik olarak dışlanması durumunda ortaya çıkar. Byskov (2021) ise epistemik adaletsizliği; önyargı, dezavantaj, yeterlilik, paydaşlık ve sosyal adalet kavramlarının ihlali üzerinden tanımlamaktadır. Özellikle paydaşlık koşulu, bir kişinin etkilenen taraflardan biri olmasına rağmen dışlanmasının yarattığı zararı açıklar. Lennon ve Kamjou (2025) da bu kavramı planlama süreçlerine taşıyarak, belirli seslerin sistemik olarak susturulmasının yarattığı "zarar derecelerini"

analiz etmektedir. Bu çerçevede, Adıyaman bağlamındaki hasar tespit sisteminde mülk sahiplerinin kendi yaşam alanlarına dair tanıklıkları, sistematik olarak değersizleştirilmesini anlamak için temel sağlar.

Mekânsal boyutta ise Gasselöglü ve Gonçalves (2026) tarafından önerilen Mekân-Adalet-Afet çerçevesi (SJ Disaster Framework), toparlanma sürecini birey, mahalle ve şehir ölçeklerini kapsayıcı bir açıdan değerlendirir. Bu çerçeve; kaynakların adil dağılımı, kapsayıcı yönetim ve yerel kimliklerin tanınması boyutlarını bir araya getirir. Adıyaman'daki hasar tespit sisteminde vatandaşların itiraz haklarının ancak ekonomik imkân ve hukuki bilgiyle (dava açma süreci) kullanılabilmesi, prosedürel bir adaletsizlik yaratmaktadır. Türkiye'nin resmi hasar tespit sistemindeki tutarsızlıklar, teorik çerçevede incelendiğinde Ottinger'in (2018) "black box" kara kutu konsepti ile paralel bir emsal oluşturmaktadır. Örneğin Adıyaman'daki hasar tespit çalışmalarında bir binanın önce "ağır hasarlı" raporlanıp itirazla "hasarsız" kategorisine çekilmesi verilebilir. Hasar kategorilerindeki irrasyonel değişimler, teknik görünen süreçlerin ardındaki politik ve ekonomik motivasyonları gizleyen birer kara kutu gibi işleyerek, halkın kurumlara duyduğu güveni sarsmaktadır. Bu durum, "epistemik geçirimsizlik" olarak tanımlanır ve hem profesyonellerin (mimar, mühendis) hem de halkın bilgi akışından dışlandığı bir kurumsal güvensizlik ortamı yaratmaktadır. Sonuç olarak, afet sonrası toparlanma sadece bir mühendislik problemi değil, bilginin ve mekânın adil yönetimiyle ilgilidir. Epistemik ve mekânsal adalet teorilerinin sentezlenmesi, eski kusurlu duruma dönme yerine; yerel seslerin duyulduğu, uzmanların dışlanmadığı ve şeffaf bir güven sisteminin kurulduğu dönüştürücü bir iyileşme bir gerekliliktir.

3. Yöntem: Çok Katmanlı Epistemik ve Mekânsal Adalet Analizi

Bu çalışma, afet sonrası hasar tespit süreçlerini mimari bilişim ve mekânsal adalet kesişiminde analiz etmek amacıyla beş aşamalı bir hesaplamalı yöntem izlemektedir. Metodoloji kurgusu, aşağıdaki belirtilmiştir (Şekil 1).

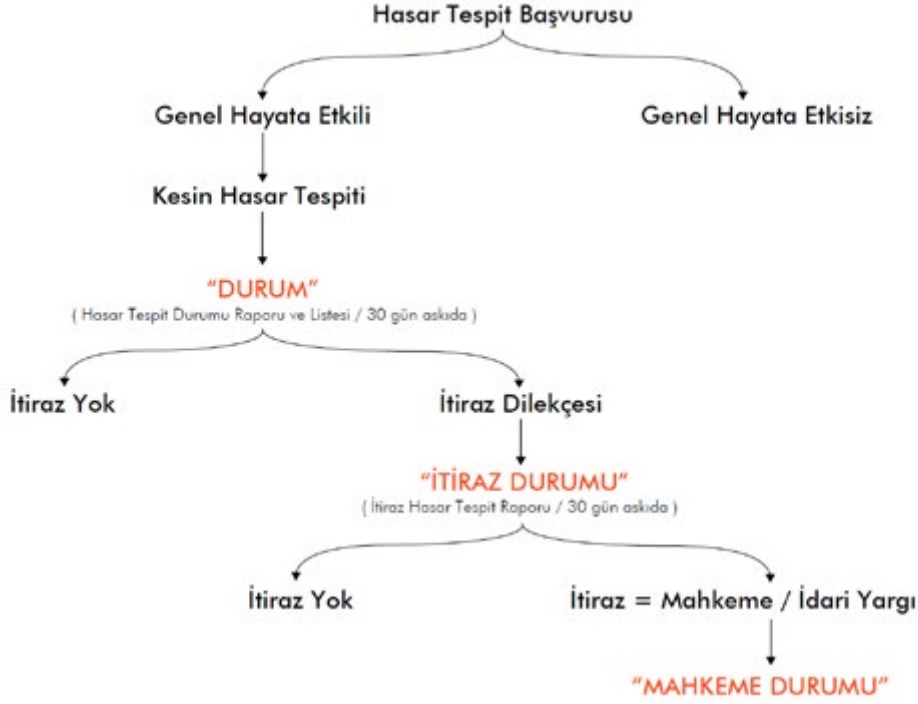


Şekil 1: Akış Diyagramı

3.1. Veri Toplama (Data Mining) ve Dijitalleştirme

Araştırmamızın ilk aşamasında, 2023 depremleri sonrası Adıyaman Merkez ilçesindeki 9010 adet binanın resmi hasar tespit web sitesinden (hasartespit.csb.gov.tr) veri setleri derlenmiştir. Bu veri setlerinde binaların hasar durumları ve yanlarında "askı kodu", "yapı kimlik no", "açık adres" gibi bilgileri de yer almaktadır. Hasar durum verileri, ilk olarak, ön inceleme (Afet Etkisi Belirleme) sonucunda "Genel Hayata Etkili" kararı alınan binaların daha sonrasında "Kesin Hasar Tespiti" için

tekrar incelenerek *hasarsız, az, orta, ağır hasarlı, yıkık* ya da *acil yıkılacak* şeklinde sınıflandırılmasıdır. Binaların ilk veri setine (Durum) ek olarak, hasar durumlarına itiraz eden mülk sahiplerinin birinci itiraz sonuçları (İtiraz Durumu), daha sonrasında itiraz devam ediyorsa ikinci itiraz ve Mahkeme Durumları da data madenciliği uygulamaları (Data Miner.io) ile dijital ortama uygun tablo bazlı (.csv, .xlsx ve benzeri) formatlara çevrilmiştir. Hasar tespitine ilişkin karar mekanizmasını özetleyen süreç aşamaları, ÇŞİDB (2023) ve AFAD (2019) kaynaklarından yararlanılarak oluşturulan akış şemasında sunulmuştur (Şekil 2).



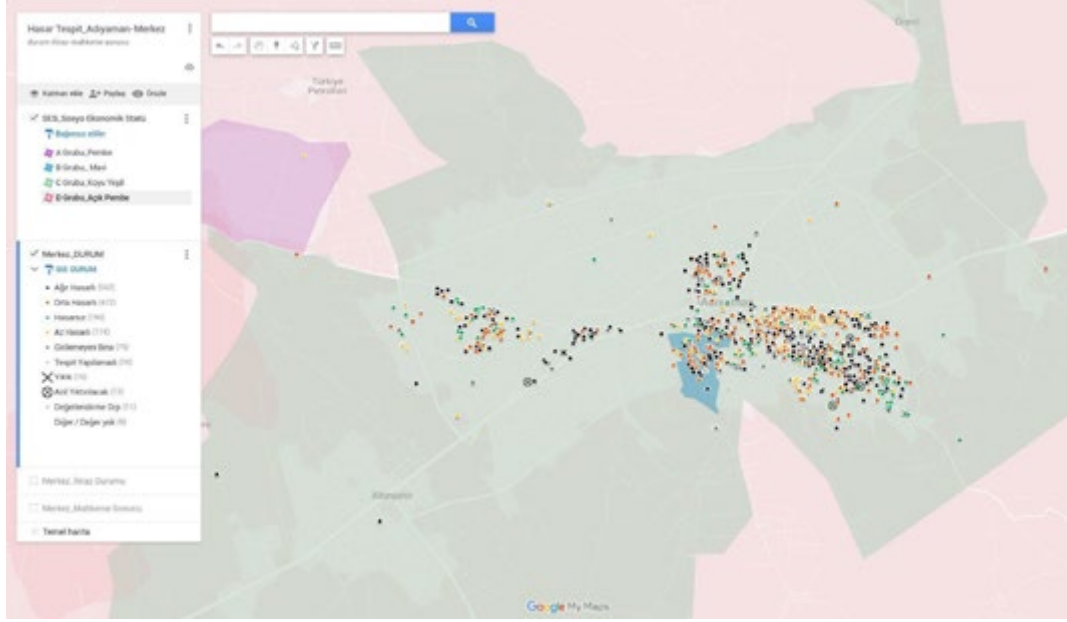
Şekil 2: Hasar Tespit Sistemi Akış Şeması

Toplanan veriler, hasar kategorilerindeki radikal değişimleri (örn. Ağır Hasarlı/Yıkık'dan Hasarsız'a) görünür kılmak üzere filtrelenmiş; geçirdikleri itirazlar/değişimler için zamansal katmanlar halinde yapılandırılmış ve hasar durumlarını birbirinden ayırt edebilmek için renk bazında kodlandırılmıştır. Veriler içerisindeki uyumsuzlukların daha derin tartışmasını yapabilmek adına Merkez ilçesinin, etkin yaş grubu, demografik veriler, ATM sayısı, konut kiralari, arsa emlak değerleri ve harcama alışkanlığı gibi parametreler ile belirlenen sosyo ekonomik statü verileri leke boyaması gösterimi ile temsil edilmek üzere veri setine eklenmiştir.

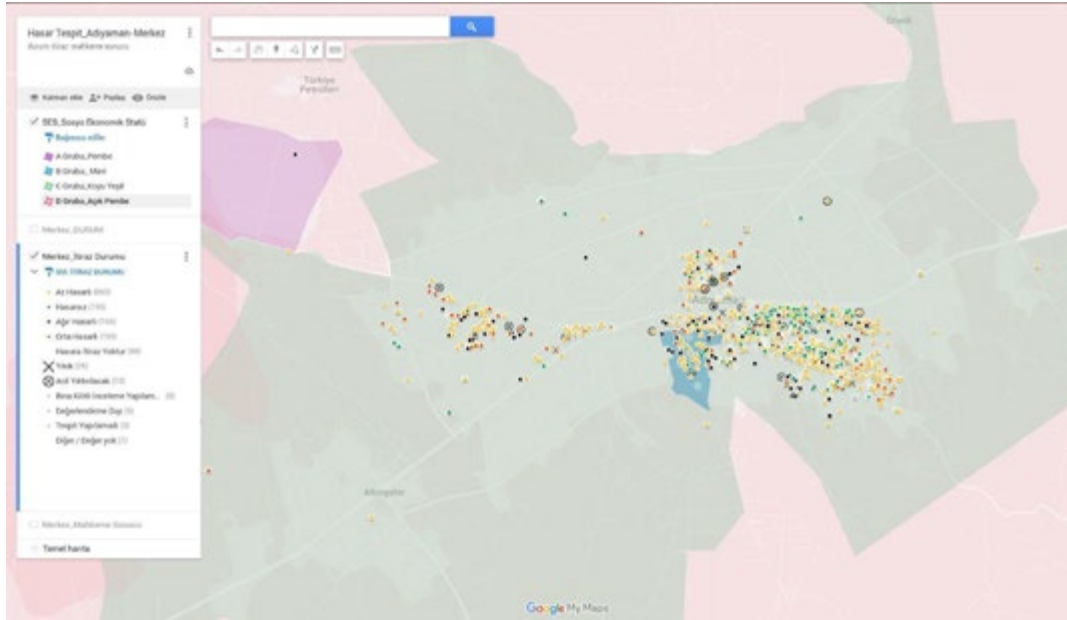
3.2. Adalet Koşullarının Analizi ve Dinamik Haritalama

Hasar tespit mekanizması, Byskov'un (2021) epistemik adalet için tanımladığı beş temel şart (önyargı, dezavantaj, epistemik yeterlilik, paydaşlık, sosyal adalet) üzerinden nitel ve nicel analize tabi tutulmuştur. Bu aşamada, resmi teknik raporların yerel mülk sahibi tanıklıklarını "güvenilmez" olarak kodlayıp kodlamadığı ve teknokratik bir geçirimsizlik oluşturup oluşturmadığı incelenmek üzere katmanlaştırılan entegre ve geniş veri seti (sadece değişenler için), zamansal ve renksel kodlamalarına sadık kalarak paylaşıma ve etkileşime açık, aynı zamanda koordinat verileri konusunda en tutarlı atamayı yapabilen bir dinamik haritalama platformu olan Google MyMaps üzerinden işlenmiştir (Şekil 3.1, 3.2 ve 3.3). Böylelikle, resmi raporlardaki verilerin değişimleri mekânsal bir düzleme aktarılarak dağılım örüntülerinin görünür kılınması sağlanmaktadır.

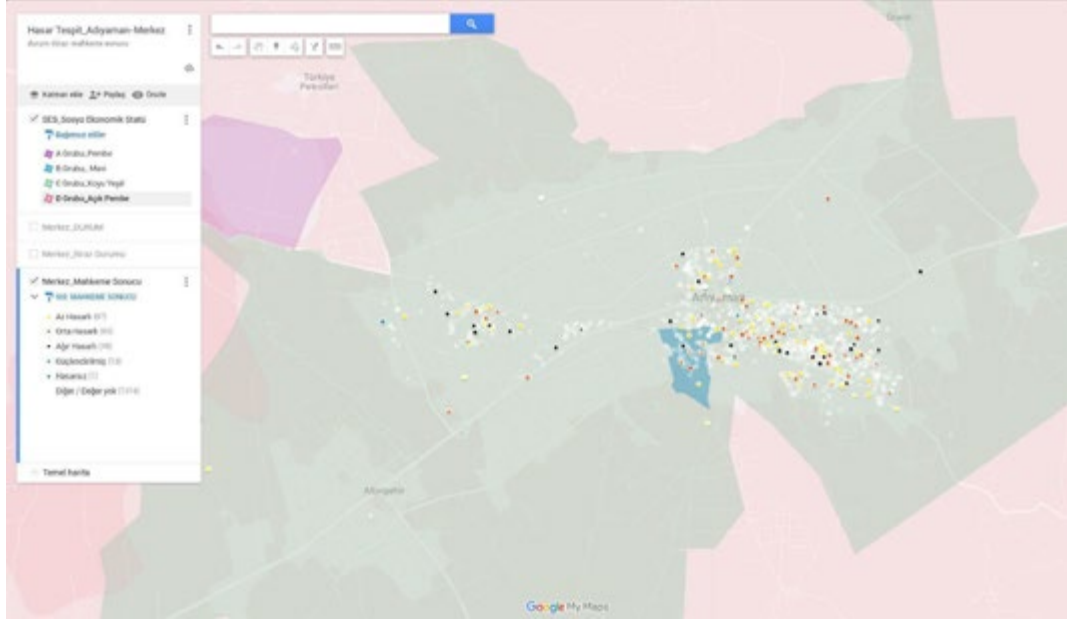
Afet Sonrası Karar Destek Mekanizmalarında Epistemik Geçirimsizlik: Adıyaman Hasar Tespit Verilerinin Mekânsal Analizi | Ünver, Başak; Ebrinç, Betül İlayda



Şekil 3.1: Adıyaman Merkez İlçe Hasar Tespit İlk Durum Haritası (Hasar durumu değişen tüm binalar)



Şekil 3.2: Adıyaman Merkez İlçe Hasar Tespit İtiraz Sonrası Durum Haritası (Sadece itiraz edilen binalar)



Şekil 3.3: Adıyaman Merkez İlçe Hasar Tespit Mahkeme Sonucu Haritası (Sadece dava açılan binalar)

3.3. Mekânsal Adalet Matrisi ve Ölçeksel Sürtünme

Son aşamada, hazırlanan haritalar üzerinden resmi hasar tespit kategorileri ile itiraz süreçleri sonrasında ortaya çıkan irrasyonel değişimler (örneğin, ağır hasarlıdan hasarsıza dönüşler) SJ-Disaster (Mekân-Adalet-Afet) çerçevesi (Gasseloğlu ve Gonçalves, 2026) kullanılarak bir Mekânsal Adalet Matrisi ile analiz edilmiştir. CBS (Coğrafi Bilgi Sistemleri) ortamında, hasar tespit kararlarının mülk sahibi (birey), mahalle ve şehir ölçekleri arasında yarattığı "scalar friction" (ölçeksel sürtünme) (Cretney, 2019) analiz edilmiştir. Bu değişimlerin dinamik harita katmanları ve ölçek değişimleri ile okunmasına alternatif olarak daha net bir okuma için çevrimiçi infografik araçlarından yardım alınarak verilerdeki değişimler simit diyagramları ile görselleştirilmiştir (**Şekil 4**). Ortaya çıkan karşılaştırmada, renklerin basit bir takibi ile hasar tespit raporlarının itirazlar sonucu irrasyonel yönelimlerde değiştirdikleri okunabilir. Dolayısıyla bu analiz, veriye dayalı yönetim sistemlerinin yarattığı "epistemik geçirimsizlik" bölgelerini coğrafi olarak haritalandırmaktadır.



Şekil 4: Merkez İlçe Hasar Durum Değişim Infografikleri (Görselleştirme Aracı: rawgraphs.io)

4. Bulgular ve Tartışma

Hasar Tespit çalışmalarının amacı, binaların yıkım ve güçlendirme kararlarının belirlenmesi ve halkın hasarsız ya da az hasarlı binalarına dönüşünü olabildiğince hızlandırmaktır (TMMOB İMO, 2023). Bu yaklaşım, dirençlilik kavramının çoğu zaman “eski haline geri dönme” (Manyena, 2006) üzerinden tanımlanmasına dayanmaktadır ve süreci çoğunlukla fiziksel bir iyileşmeye indirgemektedir. Buna paralel olarak, Adıyaman ilinin Merkez ilçesinde yapılan bu araştırmanın sonucunda, hasar tespitteki tutarsızlıkların yapıların ilk hasar derecelerinden başladığı görülmüştür ve hasarsız/az hasarlı birçok yapının yapısal sayılmayan hasarları ya da yanlış tespit edilmiş hasar durumları vatandaşın yapıya geri dönüşünü engellediği gibi yapısı orta/ağır hasarlı olan mülk sahiplerinin güçlendirme/onarım devlet katkısından mahrum kalmasına da sebep olmuştur. Bu durum, hasar tespit sisteminin paydaşlık ve sosyal adalet koşulları açısından güvenilirliğini sarsmaktadır (Byskov, 2021).

4.1. Hasar Verilerindeki Kategorik Çelişkiler

Araştırmanın veri setindeki 9010 binanın 1538 tanesi hasar durumunda değişiklik geçirmiş, 220’si ise ikinci bir itiraz ile kararı idari yargıya taşımıştır. Analizler itiraz süreçleri ve tekrarlanan hasar tespitler arasında bilimsel olarak açıklanması güç geçişler olduğunu göstermiştir. Hasar derecesindeki değişimlerin büyük çoğunluğu orta hasarlıdan az hasarlıya doğru 340 binada tek itiraz süreci ile, 40 binada ise ikinci itiraz süreci ile gerçekleşerek toplamda 380 yapı ile yaklaşık tüm değişimlerin %25’ini oluşturmaktadır. Fakat, irrasyonel değişimlerin takibi daha ilginç sonuçlar göstermektedir; hasar derecesini değiştirmiş olan 1538 yapının içerisinde statüsü “hayata etkili/kullanılamaz” kategorisinden “kullanılabilir/güçlendirilebilir” kategorisine değişen toplamda 410 bina bulunmaktadır. Bu pozitif yönde değişim geçiren yapılar tüm değişimlerin %27’sini oluşturmaktadır; ağır hasarlıdan hasarsıza 42, az hasarlıya 348, acil yıkılacak ve yıkıktan az/orta hasarlıya ise 20 yapı. Örneklenen pozitif yöndeki değişimlerin tersi yönüne ise toplamda 141 yapıda kategori değişimi gözlemlenmiştir; tüm değişimlerin %9’unu kapsayan bu negatif değişimde az hasarlı/hasarsız/kilitli bina gibi kategorilerden orta/ağır hasarlı/yıkık kategorilerine doğru bir değişim olmuştur. İlk hasar tespit durumları ile mahkeme kararı sonrası son durumlarının çevrimiçi haritaları karşılaştırıldığında, hasar statü değişimleri okunabilmektedir (Şekil 5).

4.2. Mekânsal Adalet Matrisi: Ölçeksel Sürtünme ve Yapılandırılmış Kırılganlıklar

İtiraz sonuçlarının değerlendirilmesi ve yeniden farklı bir hasar tespit rapor ekibinin görevlendirilmesi vatandaşın bu konuda yetkin sayıldığı algısını desteklese ve Mekânsal Adalet Matrisinde tanıklık adaleti sağlıyor gibi görünse de; içinde çeşitli kurumlar, mesleki odalar, kuruluşlar, laboratuvarlardan profesyonellerin bulunduğu ekiplerin HTS (Hasar Tespit Sistemi) portalına işleyebildikleri bilgilerin sınırları (ÇŞB Yapı İşleri Genel Müdürlüğü, 2019), aldıkları eğitimlerin geçmişi ve sürekliliği, verilen eğitimler ile sahada uygulanan tanımsal farklılıklar (TMMOB İMO, 2023) matrisin genel çerçevesinde vatandaş ve profesyonelleri de içine alan operasyonel bir adaletsizliğe sebebiyet vermektedir. Bu süreç, aynı zamanda merkezi otoritenin yerel gerçekliği kendi teknik ve sayısal dili üzerinden yeniden kurduğu bir “Afet Kolonyalizmi” tartışmasına da açılmaktadır (Rivera, 2022). Çünkü hasar tespit aşamalarında vatandaşın ulaşabildiği ana mekanizmaları; sorgulamalar için E-Devlet portalı, dilekçeler için Kaymakamlık ve muhtarlıklar, ve son aşamada itiraz edebilmek için mecburi olarak hukuk büroları olduğu göz önüne alınırsa, sosyo-ekonomik şartlardaki eşitsizlikler matrisin prosedürel ve dağıtımsal adalet eksenlerinde bu tespit sistemi için eksik bulunmuştur. Bu durum kırılganlığın sınıf ve politik ekonomi ile doğrudan ilişkisini de görünür kılmaktadır (Blaikie vd., 1994).

Afet sonrası karar destek mekanizmalarında, zamanın insan hayatı üzerindeki baskısı nedeniyle hızın öncelenmesi, çoğu zaman çelişkili raporlar ve tanımsal tutarsızlıklar üretmiştir (TMMOB, İMO 2023). Saha gönüllülerinin eğitimlerinin kontrollerinin eksik yapılmasının, hasar tespit tanımlarının verilen eğitimler ile e-Devlet ve AFAD tanımlarında farklı olması ve kabul edilmesinin, resmi açıklamaların ‘güçlendirmelerin iptali’ üzerine sebep olduğu çelişkinin kamuoyu ve halkta yarattığı güvensizliğin ve artçı depremler sebebiyle uzayan süreçte masa başında alındığı iddia edilen kararların (TMMOB İMO, 2023), hasar tespit sisteminin bütününde kontrolsüz ve kümülatif hatalar dizilimine yol açtığı

düşünülmektedir. Bu durum, aynı zamanda yapısal eşitsizlikleri görünmez kılma ve sorumluluğu bireylere yükleme riskinin (Neocleous, 2013) bu tür teknik sistemlerde nasıl yeniden üretilebildiğini de göstermektedir.



Şekil 5: Adıyaman Merkez İlçe Hasar Tespit İlk ve Son Durum Haritaları

5. Sonuç ve Gelecek Vizyonu

Araştırma, afet yönetiminde dirençliliğin statik bir iyileşme yerine, Aijazi'nin (2015) "sosyal onarım" yaklaşımını temel alan, şeffaf ve katılımcı olması gerektiğini savunmaktadır. Bu doğrultuda, 2026 yılındaki sunum, 2025'te konu hakkında yayınlanan 32934 sayılı yönetmelikten önce alınan verilerdeki epistemik geçirimsizliği göstermeyi hedeflemektedir. Çalışmanın 2026 hedefi, devam eden hukuki süreçlerin sonuçlanmasıyla elde edilen güncel verilerin bir dijital kentsel arşiv sistemine entegre edilmesi ve farklı ilçeler ile analizi genişletmektir. Bu yaklaşım, yalnızca fiziksel bir yeniden inşa değil, aynı zamanda güvenin ve bilginin yeniden inşasını da içermektedir.

Teşekkür

Bu araştırma, Bilkent Üniversitesi bünyesinde Doç. Dr. Bülent Batuman tarafından yürütülen "ARCH 564 Mekân ve Kültür (Space and Culture)" dersinin 2025 Bahar dönemindeki "Urban Research Studio: Mapping the Post-Disaster" modülü kapsamında geliştirilmiştir. Araştırmanın her aşamasındaki değerli akademik danışmanlığı, titiz emekleri, projeye olan inancı ve çalışma sürecinde bizlere aşıladığı motivasyon için Sayın Doç. Dr. Bülent Batuman'a en içten teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

- Disaster and Emergency Management Presidency [AFAD]. (2019). *Post-disaster damage assessment*. Republic Of Turkey Internal Affairs Disaster And Emergency Management Presidency.
- Disaster and Emergency Management Presidency [AFAD]. (2025, June 22). Regulation on general rules regarding building damage assessment after disasters. *Official Gazette*, (32934). <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2025/06/20250622-1.htm>
- Aydoğdu Gürbüz, İ., & Aslan, B. (2023). An evaluation on damage assessment studies in Kahramanmaraş earthquake. *Journal of Environment, Urban and Climate*, 2(4), 180-195. <https://izlik.org/JA75AW24HS>

- Blaikie, P., Cannon, T., Davis, I., & Wisner, B. (1994). *At risk: Natural hazards, people's vulnerability and disasters*. Routledge.
- Byskov, M. F. (2021). What makes epistemic injustice an "injustice"? *Journal of Social Philosophy*, 52(1), 114-131. <https://doi.org/10.1111/josp.12348>
- Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change [ÇŞİDB]. (2023, February 14). *What is damage assessment? Frequently asked questions*. General Directorate of Construction Affairs. https://webdosya.csb.gov.tr/db/kilis/duyurular/hasar_tesp-t-sunum-20230214114704.pdf
- Clark, N., Chhotray, V., Few, R. (2013). Global justice and disasters. *Geographical Journal*, 179(2), 105-113. <https://doi.org/10.1111/geoj.12005>
- Cretney, R. (2019). 'An opportunity to hope and dream': Disaster politics and the emergence of possibility through community-led recovery. *Antipode*, 51(2), 497-516. <https://doi.org/10.1111/anti.12431>
- Fraser, N. (2007). (Mis)recognition, social inequality and social justice. In T. Lovell (Ed.), *Misrecognition, social inequality and social justice* (pp. 17-35). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203932667>
- Fricker, M. (2017). Evolving concepts of epistemic injustice. In *The Routledge handbook of epistemic injustice* (pp. 53-60). Routledge.
- Gasseloğlu, M. A., & Gonçalves, J. E. (2026). Reframing disaster recovery through spatial justice: an integrated framework. *Buildings & Cities*, 7(1), 45-62. <https://doi.org/10.5334/bc.701>
- Lennon, M., & Kamjou, E. (2025). Epistemic injustice in planning: a framework for identifying degrees of harm. *Local Environment*, 30(1), 98-115. <https://doi.org/10.1080/13549839.2024.2428218>
- Manyena, S. B. (2006). The concept of resilience revisited. *Disasters*, 30(4), 434-450. <https://doi.org/10.1111/j.0361-3666.2006.00331.x>
- Neocleous, M. (2013). Resisting resilience. *Radical Philosophy*, 178(6), 2-7.
- O'Keefe, P., Westgate, K., & Wisner, B. (1976). Taking the naturalness out of natural disasters. *Nature*, 260(5552), 566-567. <https://doi.org/10.1038/260566a0>
- Ottinger, G. (2017). Opening black boxes: Environmental justice and injustice through the lens of science and technology studies. In *The Routledge handbook of environmental justice* (pp. 89-100). Routledge.
- Rivera, D. Z. (2022). Disaster colonialism: A commentary on disasters beyond singular events to structural violence. *International Journal of Urban and Regional Research*, 46(1), 126-135. <https://doi.org/10.1111/1468-2427.12950>
- Sawhney, A., Riley, M., & Irizarry, J. (Eds.). (2020). *Construction 4.0: An innovation platform for the built environment*. Routledge.
- R.T. Ministry of Environment and Urbanization, General Directorate of Construction Affairs. (2019). *Damage assessment training documents*. <https://istanbul.csb.gov.tr/hasar-tespit-egitim-dokumanlari-95359>
- Tafti, M. T., & Tomlinson, R. (2019). Theorizing distributive justice and the practice of post-disaster housing recovery. *Environmental Hazards*, 18(1), 7-25. <https://doi.org/10.1080/17477891.2018.1435406>
- UCTEA Chamber of Civil Engineers. (2023, March 20). *6 February 2023 Kahramanmaraş earthquake damage assessment studies evaluation report*. <https://www.imo.org.tr/Eklenti/8219,hasar-tespit-raporu20032023pdf.pdf?0>
- UCTEA. (2023, July). *6 February 2023 Kahramanmaraş earthquakes report*. https://www.tmmob.org.tr/sites/default/files/tmmob_deprem_raporu_18agustos_revize-part-1_compressed.pdf
- Wisner, B., Blaikie, P., Cannon, T., & Davis, I. (2004). *At risk: Natural hazards, people's vulnerability and disasters* (2nd ed.). Psychology Press. <https://doi.org/10.4324/9780203714775>
- 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>

Katılımcı Kentsel Tasarım Oyunlarından Sayısal Tasarıma Veri Entegrasyonu: Karşılaştırmalı Bir Analiz

Berkutay Ali Coşkun¹ ; Sema Alaçam² ; Oğuz Orkun Doma³ 

^{1,2}İstanbul Teknik Üniversitesi; ³Southampton Üniversitesi

¹coskunb20@itu.edu.tr; ²alacams@itu.edu.tr; ³oguz.doma@soton.ac.uk

Özet

Çağdaş kentsel tasarımda katılımcı süreçlerin çok aktörlü bir müzakere yapısına dönüşmesi, oyun-temelli araçların yaygınlaşması ve sayısal tasarımın veri odaklı iş akışlarına yönelmesi, katılımcı verisinin tasarım kararlarına nasıl bağlanacağı sorusunu gündeme getirmektedir. Bu çalışma, katılımcı kentsel tasarım oyunlarında üretilen verinin sayısal tasarımla kurduğu ilişkiyi değerlendirmek için iki katmanlı bir analitik çerçeve önermektedir. İlk katman, vakaları veri türü, temsil biçimi, bağlanma mekanizması, tasarım aşaması ve etki eksenlerinde karşılaştırmaktadır. İkinci katman, veri ile tasarım kararı arasındaki bağın niteliğini tanımlanabilirlik, temsil edilebilirlik ve izlenebilirlik koşulları üzerinden aktarım, kısmi entegrasyon ve yapısal entegrasyon düzeylerinde değerlendirmektedir. Karşılaştırmalı vaka analizi yöntemiyle BIM, dijital ikiz, algoritmik motor, karma gerçeklik ve analog oyun ortamlarından oluşan 14 vaka incelenmiştir. Bulgular, vakaların katılımcı verisinin hesaplamalı iş akışına doğrudan bağlandığı süreçler ile verinin yorumlama ve yönlendirme belgeleri aracılığıyla taşındığı süreçler arasında farklılaştığını göstermektedir. Doğrudan bağlanma, verinin sayısal temsile ve karar mekanizmasına eklenmesini desteklerken, izlenebilirliğin sınırlı olduğu örneklerde entegrasyon kısmi düzeyde kalmaktadır. Dolaylı bağlanma ise katılımcı değerini korumakla birlikte, veri-karar bağının teknik olarak izlenememesi nedeniyle aktarım düzeyinde konumlanmaktadır. Çalışma, oyun-temelli katılımın sayısal tasarımla ilişkisini kullanılan teknolojiden çok veri-tasarım bağının yapısı üzerinden tartışmaya açmakta ve kentsel oyunların tasarım sürecine entegrasyonunu değerlendirmek için operasyonel bir çerçeve sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Katılımcı tasarım, Ciddi oyunlar, Sayısal tasarım, Veri-entegreli iş akışları, Kentsel planlama.

Data Integration from Participatory Urban Design Games into Computational Design: A Comparative Analysis

Berkutay Ali Coşkun¹ ; Sema Alaçam² ; Oğuz Orkun Doma³ 

^{1,2} İstanbul Technical University; ³University of Southampton

¹coskunb20@itu.edu.tr; ²alacams@itu.edu.tr; ³oguz.doma@soton.ac.uk

Abstract

The transformation of participatory processes into multi-actor negotiation structures, the proliferation of game-based tools, and the emergence of data-driven computational design workflows raise the question of how participatory data can be connected to design decisions. This study proposes a two-layered analytical framework for evaluating the relationship between data generated in participatory urban design games and computational design. The first layer compares cases through five axes: data type, representation format, coupling mechanism, design stage, and impact. The second assesses the quality of the data–decision link through three threshold conditions—definability, representability, and traceability—distinguishing transfer, partial integration, and structural integration. Using comparative case analysis, the study examines 14 cases involving BIM, digital twins, algorithmic engines, mixed reality, and analogue game environments. The findings indicate a distinction between processes in which participatory data is directly coupled with computational workflows and those in which it is carried into design through interpretation and guidance documents. Direct coupling supports the incorporation of data into digital representations and decision mechanisms; however, where traceability remains limited, integration is only partial. Mediated coupling may retain substantial participatory value, yet remains at the level of transfer when the technical relationship between data and design decisions cannot be traced. The study therefore discusses the connection between game-based participation and computational design in terms of the structure of the data–design link rather than the technology used, and provides an operational framework for assessing the integration capacity of urban games.

Keywords: Participatory design, Serious games, Computational design, Data-integrated workflows, Urban planning.

1. Giriş

Mimarlık ve kentsel tasarımda katılımcı süreçler, kullanıcıların ve farklı paydaşların gereksinim, deneyim ve beklentilerinin mekânsal kararlara yansıtılabilmesi açısından uzun süredir önemli bir araştırma ve uygulama alanı oluşturmaktadır (Sanoff, 2000). Günümüzde bu süreçler, tasarımcının tek yönlü bilgi topladığı modellerden uzaklaşarak, farklı aktörlerin kentsel sorunları birlikte tanımladığı, alternatifleri tartıştığı ve kararları müzakere ettiği daha çoğulcu anlayışa evrilmektedir (Healey, 1997). Bu dönüşüm içinde oyun temelli araçlar, karmaşık kentsel meselelerin katılımcılar tarafından deneyimlenebilir, tartışılabilir ve yeniden yorumlanabilir hâle gelmesini sağlayan önemli katılım ortamları olarak öne çıkmaktadır. Kutu oyunları, ciddi oyunlar ve oyunlaştırılmış uygulamalar, farklı aktörlerin görüşlerini görünür kılabilecek, müzakereyi teşvik edebilecek ve ortak düşünme süreçlerini destekleyebilecek yapılar sunmaktadır (Ampatzidou vd., 2018; Demirel ve Alanyalı Aral, 2025; Sevinç vd., 2026).

Katılımcı süreçlerdeki bu gelişmelere paralel olarak, mimari ve kentsel tasarım pratikleri de sayısal tasarımın olanaklarıyla dönüşmektedir. Bilgisayar destekli temsil araçlarından yapı bilgi modellemesine ve hesaplamalı tasarım yaklaşımlarına uzanan süreçte, tasarım artık yalnızca geometrik bir çizim ya da model üretimi olarak değil, verinin işlenebildiği, parametrelerin ilişkilendirilebildiği ve alternatiflerin hesaplamalı olarak değerlendirilebildiği bir karar üretim alanı olarak ele alınmaktadır (Aish ve Bredella, 2017; Caetano ve Leitão, 2020). Özellikle veri entegreli iş akışları, çevresel, mekânsal ve kullanıcı kaynaklı verilerin tasarım sürecine farklı ölçeklerde dâhil edilmesini mümkün kılmakta; böylece analiz ve tasarım arasındaki ilişkiyi yeniden kurmaktadır (Sunguroğlu Hensel vd., 2022). Bununla birlikte, hesaplamalı tasarımın kentsel ölçekte kullanımının henüz gelişmekte olduğu ve kullanıcı katılımı ile veri odaklı karar verme arasındaki ilişkinin uygulamada sınırlı kaldığı belirtilmektedir (Gün, 2023).

Son yıllarda farklı teknolojik ortamlarda geliştirilen çalışmalar yun-temelli araçlar ve sayısal tasarımın kesişimin çeşitliliğini ortaya koymaktadır. Dijital ikiz ve oyun platformlarını bir araya getiren uygulamalar, katılımcıların sanal kentsel ortamlarda mekânsal öneriler geliştirmesine olanak tanımaktadır (Wang ve Vu, 2023). BIM ve sanal gerçeklik temelli çalışmalar, kullanıcı geri bildiriminin üç boyutlu tasarım modelleriyle ilişkilendirilebilmesini araştırmaktadır (Ehab vd., 2023). Matematiksel ve algoritmik ciddi oyunlar, farklı paydaş tercihlerinin hesaplamalı değerlendirme ve mekânsal konfigürasyon üretimiyle bütünleştirilebileceğini göstermektedir (Aguilar vd., 2021; Nourian vd., 2024). Karma gerçeklik ve geogame yaklaşımları, dijital kent verisi ile bağlama özgü katılımcı deneyimler arasındaki ilişkinin nasıl kurulabileceğini tartışmaktadır (Förster vd., 2026). Bunun yanında, LEGO® tabanlı işbirlikçi oyunlar veya analog kent oyunları, katılımcıların fikirlerini görünür kılma ve ortak öneriler geliştirme bakımından güçlü araçlar sunsa da, bu çıktıların sayısal tasarım sürecine çoğunlukla yorumlama ve raporlama aracılığıyla taşındığını göstermektedir (Sousa, 2023; Tewdwr-Jones ve Wilson, 2022).

Bu çeşitlilik, oyun temelli katılımın kentsel tasarım açısından taşıdığı potansiyeli görünür kılssa da, önemli bir metodolojik sorunu da beraberinde getirmektedir. Literatürde oyunlar ve oyunlaştırılmış araçların katılımı artırma, sosyal öğrenmeyi destekleme ve karmaşık kentsel sorunları tartışmaya açma kapasiteleri yaygın biçimde ele alınmaktadır (Ampatzidou vd., 2018; Bakhanova vd., 2020). Benzer şekilde, oyunların gerçek tasarım süreçlerine katkı sağlayabilmesi için temsil doğruluğu, soyutlama düzeyi ve oyun ile gerçeklik arasındaki aktarım ilişkisinin dikkatle kurulması gerektiği vurgulanmaktadır (Raghothama ve Meijer, 2018). Bununla birlikte, oyunlarda üretilen katılımcı verisinin sayısal tasarım iş akışlarına ne zaman yalnızca aktarıldığı, ne zaman yapısal olarak entegre edildiği ve bu farkın hangi ölçütlerle değerlendirilebileceği yeterince açıklığa kavuşturulmamıştır. Güncel sistematik incelemeler de geogames, oyunlaştırma ve kentsel planlama alanlarının hızla gelişmesine karşın, uygulamaları karşılaştırmaya ve yöntemsel farklılıklarını değerlendirmeye olanak tanıyan analitik çerçevelere ihtiyaç olduğunu göstermektedir (Crilly vd., 2026).

Bu boşluk, güncel literatürde üç temel eksiklikte somutlaşmaktadır: kentsel oyun vakalarını sistematik biçimde karşılaştıran analitik bir çerçevenin yokluğu (Crilly vd., 2026), verinin tasarım sürecine bağlanma sürecini kavramsal olarak ayrıştıran bir okumanın eksikliği (Ampatzidou vd., 2018) ve entegrasyonun tam olarak ne zaman gerçekleştiğini belirleyen ölçülebilir koşulların bulunmayışıdır (Bakhanova vd., 2020).

Bu çalışma, söz konusu boşluğa iki katmanlı bir analitik çerçeve önererek yanıt vermektedir. İlk katman, katılımcı kentsel tasarım oyunlarında üretilen verinin sayısal tasarımla ilişkisini veri türü, temsil biçimi, bağlanma mekanizması, tasarım aşaması ve etki eksenlerinde karşılaştırmaktadır. İkinci katman, verinin tasarım sürecine bağlanma düzeyini aktarım, kısmi entegrasyon ve yapısal entegrasyon olarak değerlendirmek üzere tanımlanabilirlik, temsil edilebilirlik ve izlenebilirlik koşullarını kullanmaktadır. Çalışma, farklı teknolojik ve yöntemsel altyapılara sahip 14 vaka üzerinden, katılımcı veri ile tasarım kararı arasındaki ilişkinin teknoloji türünden çok bağlanma yapısına bağlı olduğunu tartışmaktadır.

2. Kavramsal Çerçeve

2.1. Aktarım ve Entegrasyon: Kavramsal Ayrım

Sayısal tasarım, tasarım temsilini yalnızca geometrik bir çıktı olarak değil, değişkenler, ilişkiler ve işlemler üzerinden üretilebilen hesaplamalı bir yapı olarak ele almaktadır. Aish ve Bredella (2017) ile Caetano ve Leitão'nun (2020) işaret ettiği bu dönüşüm, tasarım sürecinin veriyi belgeleyen bir yapı olmaktan çıkarak, veriye bağlı alternatiflerin üretildiği ve değerlendirildiği bir iş akışına dönüşmesini beraberinde getirmiştir. Sunguroğlu Hensel vd. (2022) ise veri entegreli iş akışlarını, farklı bilgi alanları ve mekânsal ölçeklerden gelen verilerin analiz ve tasarım aşamalarında birbirine bağlandığı hesaplamalı süreçler olarak tartışmaktadır. Bu çerçevede bir verinin tasarımla ilişkilendirilmesi, yalnızca dijital ortamda bulunması değil; tasarım temsilde karşılık bulması, bir değerlendirme ya da üretim mekanizmasına bağlanması ve tasarım kararındaki etkisinin izlenebilir olması anlamına gelmektedir.

Katılımcı kentsel tasarım oyunları, bu iş akışlarına potansiyel girdi oluşturabilecek farklı türlerde bilgi üretmektedir. Mekânsal seçimler, yerleşim kararları, önceliklendirmeler, anlatılar, oylamalar ve müzakereler aracılığıyla oluşan bu bilgi, niceliksel olduğu kadar niteliksel içerik de taşımaktadır. Ampatzidou vd. (2018), oyunların ve oyunlaştırılmış uygulamaların karmaşık kentsel meseleleri görünür kılma, sosyal öğrenmeyi destekleme ve katılımı erişilebilir hâle getirme potansiyelini vurgulamaktadır. Beattie vd. (2020), ciddi oyunların katılımcıların örtük deneyimlerini ve gelecek tahayyüllerini tasarım düşüncesine taşıyabilecek bir ortam sunduğunu gösterirken, Ampatzidou vd. (2022), oyun çıktılarının oyunun kuralları, temsil araçları ve yinelemeli tasarım kararlarıyla biçimlendiğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte bu çalışmalar, oyun içinde üretilen bilginin sayısal tasarım kararına hangi teknik mekanizma üzerinden bağlandığını ortak ve operasyonel bir ayrım üzerinden tanımlamamaktadır.

Oyun-temelli süreçlerin katılımcı bilgi üretme potansiyeli ile bu bilginin sayısal tasarım kararlarına bağlanması arasındaki fark, mevcut literatürde farklı vurgularla ele alınmaktadır. Bakhanova vd. (2020), ciddi oyunlar ve oyunlaştırmanın katılımcı modelleme süreçlerinde öğrenme, iletişim ve katılım açısından önemli olanaklar sunduğunu; ancak uygulamaların çoğunlukla arayüz, görselleştirme ve anlatılaştırma düzeyinde kaldığını belirtmektedir. Raghothama ve Meijer (2018), oyun ile somut tasarım sonucu arasındaki ilişkinin kurulabilmesi için oyun içinde üretilen bilginin modelin parametreleri, görselleştirmeleri veya yapısıyla açık biçimde ilişkilendirilmesi gerektiğini savunmaktadır. Ampatzidou vd. (2022) ve Beattie vd. (2020) oyun çıktılarının bağlamsal ve ilişkisel değerini görünür kılarken, Gün (2023) teknoloji odaklı katılım araçlarının kullanıcı girdisini hesaplamalı tasarım süreçlerine bağlamadaki güçlükler nedeniyle sayısal iş akışlarına zayıf biçimde

eklemlenebildiğini belirtmektedir. Dolayısıyla temel sorun, katılımcı verisinin üretilmesi ya da dijital ortamda temsil edilmesi değil, tasarım kararına hangi mekanizma üzerinden ve ne ölçüde izlenebilir biçimde bağlandığıdır.

Bu çalışma kapsamında aktarım (transfer) ve entegrasyon (integration) kavramları, oyun-temelli süreçlerde üretilen katılımcı bilginin sayısal tasarım süreciyle kurduğu ilişkinin niteliğini açıklamak üzere farklı anlamlarda ele alınmaktadır. Aktarım, oyun sürecinde üretilen katılımcı bilgisinin tasarım sürecine taşınmasını ifade etmektedir. Bu taşıma, atölye notları, sözlü değerlendirmeler, politika önerileri, tasarım yönlendirme belgeleri, tematik raporlar veya kolaylaştırıcı yorumları aracılığıyla gerçekleşebilir. Aktarım sürecinde oyun çıktısı tasarımda değerlendirilebilecek bir girdi üretmektedir; ancak bu girdinin hangi hesaplamalı temsil üzerinden hangi tasarım kararını etkilediği doğrudan izlenemeyebilir. Dolayısıyla aktarım, katılımın ya da tasarım katkısının zayıf olduğu anlamına gelmez; yalnızca veri ile sayısal tasarım kararı arasında teknik olarak tanımlanmış bir bağ bulunmadığını ifade eder.

Entegrasyon ise katılımcı verisinin sayısal tasarım iş akışının içsel bir bileşeni hâline gelmesi olarak tanımlanmaktadır. Bu durumda oyun çıktısı, parametre değişkeni, BIM nesnesi, harita katmanı, voksel, skor matrisi veya başka bir hesaplanabilir temsil biçimine dönüştürülerek analiz, değerlendirme ya da üretim mekanizmasına bağlanır; verinin tasarım kararındaki etkisi belgelenebilir ve geri izlenebilir hâle gelir. Bu nedenle dijital bir ortamın, BIM, dijital ikiz, VR/AR ya da oyun motorunun kullanılması tek başına entegrasyonu garanti etmez. Belirleyici olan, katılımcı girdisinin tasarım kararına hangi temsil ve işlem mekanizması üzerinden bağlandığıdır. Bu doğrultuda aktarım ile entegrasyon birbirini dışlayan değer yargıları olarak değil, veri ile tasarım kararı arasındaki bağın niteliğini açıklayan analitik konumlar olarak ele alınmaktadır. Verinin sayısal modele bağlandığı ancak karar üzerindeki etkisinin yalnızca sınırlı ölçüde izlenebildiği durumlar ise kısmi entegrasyon olarak değerlendirilmektedir. Bir sonraki alt bölümde tanımlanan tanımlanabilirlik, temsil edilebilirlik ve izlenebilirlik koşulları, bu bağlanma düzeylerinin operasyonel olarak değerlendirilmesini sağlamaktadır.

2.2. Üç Eşik Koşulu

Aktarım, kısmi entegrasyon ve yapısal entegrasyon arasındaki bağlanma düzeyleri, katılımcı verisinin tanımlanabilir, temsil edilebilir ve izlenebilir hâle gelmesi üzerinden değerlendirilmektedir. Tanımlanabilirlik (definability), katılımcı verisinin sayısal sistemde işlenebilecek biçimde yapılandırılabilmesini ifade eder. Mekânsal seçimler, oylamalar ve derecelendirmeler bu açıdan doğrudan işlenebilir veri üretebilirken, sözlü tartışmalar, serbest eskizler veya bağlama özgü anlatılar önce yorumlanmayı gerektirebilir. Bu yorum, verinin değerini azaltmaz; ancak tasarım sürecine insan aracılı bir dolayım ekler. EquiCity’de tercihlerin ilgi ve kontrol matrisleri olarak tanımlanması ve mekânsal birimlerin voksel ile Morton kodları üzerinden indekslenmesi bu koşulu sağlamaktadır (Nourian vd., 2024). Buna karşılık, açık uçlu katılımcı ifadelerin yapılandırılmış dijital sistemlerde bütünüyle karşılık bulması güçtür (Förster vd., 2026). Kentsel problemleri kategorik veri sınıflarıyla ele alan uygulamalar ise tanımlanabilirliği desteklemektedir (Gün, 2023).

Temsil edilebilirlik (representability), tanımlanmış verinin sayısal tasarım dilinde bir karşılığa dönüşmesidir. Bu aşamada veri, parametre değişkeni, BIM nesnesi, voksel, harita katmanı veya skor matrisi olarak tasarım iş akışına bağlanabilir. Veri entegreli iş akışlarının temel niteliği, farklı kaynaklardan gelen veriyi analiz ve tasarım aşamaları arasında ilişkilendirebilmesidir (Sunguroğlu Hensel vd., 2022). Bu nedenle verinin kaydedilmesi ya da görselleştirilmesi tek başına yeterli değildir; tasarım alternatiflerinin üretilmesi veya değerlendirilmesinde işlenebilir olması gerekir. Edible City Game örneğinde mekânsal seçimlerin Tygron ortamındaki göstergelerle ilişkilendirilmesi, bu koşulun karşılığını göstermektedir (Pueyo Ros vd., 2023).

İzlenebilirlik (traceability), katılımcı girdisi ile tasarım kararı arasındaki bağın belgelenebilir ve yeniden kurulabilir olmasıdır. Yapılandırılmış ve sayısal olarak temsil edilmiş bir veri, hangi kararı nasıl etkilediği görülemediğinde entegrasyon açısından sınırlı kalır. Bakhanova vd. (2020), oyunlaştırılmış katılımcı modelleme süreçlerinde katılımcı etkileşimi ile model işleyişi arasındaki ilişkinin açıklığının önemini vurgulamaktadır. EquiCity’de tercih verilerinin matematiksel değerlendirme mekanizmasına bağlanması, bu ilişkinin izlenmesini desteklerken (Nourian vd., 2024), BIM ve sanal gerçeklik temelli yaklaşımlar kullanıcı geri bildiriminin tasarım alternatifleriyle ilişkilendirilmesi açısından benzer bir potansiyel sunmaktadır (Ehab vd., 2023). Buna karşılık, çıktıların yalnızca rapor veya tasarım yönlendirme belgesi yoluyla taşındığı durumlarda girdinin mekânsal karara etkisi belirsiz kalabilmektedir (Sevinc vd., 2026).

Tablo 1: Katılımcı Kentsel Tasarım Oyunlarında Veri–Tasarım Bağını Değerlendirme Çerçevesi

Analiz Eksen	Keşfedici Soru	Eşik Koşuluyla İlişkisi
Veri Türü	Katılımcılar oyun ortamında hangi tür veri üretiyor? (örn. mekânsal seçim, 3B yerleşim, oylama, rota, anlatı, rol-müzakere)	<i>Tanımlanabilirlik koşulunun ön-koşulu. Verinin yapılandırılmış, kategorize edilmiş ve etiketli bir biçimde üretilebilmesi entegrasyonun ilk adımıdır.</i>
Temsil Biçimi	Üretilen veri hangi temsil biçimine dönüşüyor? (örn. parametre değişkeni, BIM/3B model nesnesi, harita katmanı, brif maddesi, metin notu)	<i>Temsil edilebilirlik koşulunun doğrudan göstergesi. Verinin tasarım dilinde (sayısal, mekânsal, parametrik) bir karşılığı olması gerekir.</i>
Entegrasyon Mekanizması	Veri tasarım sürecine hangi yolla bağlanıyor? Sayısal iş akışının hesaplamalı aşamalarına doğrudan mı (Doğrudan Bağlanma), yoksa bir yorumlayıcı aracılığıyla metne dönüşerek mi (Dolaylı Bağlanma)?	<i>Eşiği geçme yolunu belirler. Doğrudan Bağlanma entegrasyon yapısıdır. Dolaylı Bağlanma ise aktarım kategorisinde kalır. Aradaki temel fark insan-aracı yorum katmanının varlığıdır.</i>
Tasarım Aşaması	Veri tasarım sürecinin hangi aşamasına etki ediyor? (problem tanımlama, kavramsal tasarım, geliştirme, değerlendirme)	<i>İzlenebilirlik koşulunun kapsamını belirler. Verinin hangi aşamada etkili olduğu, etkinin geri izlenebilirliğini şekillendirir.</i>
Etki	Verinin tasarım kararındaki gözlenebilir izi nedir? Belirli bir mekânsal kararı şekillendirdi mi, alternatif senaryolar mı üretti, çelişkili görüşleri mi görünür kıldı?	<i>İzlenebilirlik koşulunun sınanması. Veri-karar bağı somut ve geri izlenebilir mi, yoksa tasarımcının yorumuna bırakılmış mı?</i>

Bu çerçevede aktarım, verinin tasarım sürecine taşındığı ancak hesaplamalı karar bağına dönüşmediği; kısmi entegrasyon, sayısal temsile bağlandığı ancak etkisinin bütünüyle izlenemediği; yapısal entegrasyon ise tanımlanabilir, temsil edilebilir ve izlenebilir biçimde tasarım kararına bağlandığı durumu ifade etmektedir. Bu ilişki Tablo 1’de özetlenmektedir.

3. Yöntem

Bu çalışma, oyun-temelli katılımcı süreçlerde üretilen verinin sayısal tasarımla kurduğu ilişkiyi incelemek üzere karşılaştırmalı vaka analizi yöntemine dayanmaktadır (Yin, 2018). Farklı kentsel bağlamlarda, ölçeklerde ve teknolojik ortamlarda geliştirilen oyun uygulamaları, katılımcı veri üretimi ve bu verinin tasarım sürecine bağlanması bakımından ortak bir inceleme zemini sunmaktadır. Çalışmanın amacı, tekil vakaların başarısını ölçmek değil, kavramsal çerçevede tanımlanan beş analiz eksen ve üç eşik koşulu aracılığıyla vakalar arası yapısal benzerlikleri ve farklılıkları görünür kılmaktır.

Vaka seti, önerilen çerçevenin farklı bağlamlardaki çözümleme kapasitesini değerlendirmek üzere amaçlı örnekleme yoluyla oluşturulmuştur. Çalışmaya dâhil edilen vakaların üç ölçütü karşılaması aranmıştır: yazılı bir kaynaktan belgelenmiş olması; kentsel ya da mekânsal tasarım bağlamında katılımcı bir oyun veya oyunlaştırılmış süreç içermesi; oyun sürecinde üretilen çıktının sonraki tasarım

ya da karar verme aşamasıyla ilişkisine dair bilgi sunması. Ayrıca vaka kümesinde BIM, dijital ikiz, algoritmik motor, karma gerçeklik ve analog kutu oyunu gibi farklı teknolojik ve yöntemsel yaklaşımların temsil edilmesi gözetilmiştir. Bu ölçütler doğrultusunda toplam 14 vaka incelemeye alınmıştır.

Her vaka, veri türü, temsil biçimi, bağlanma mekanizması, tasarım aşaması ve etki olmak üzere beş eksen üzerinden kodlanmıştır. Veri türü, katılımcıların oyun sürecinde ürettiği çıktıyı; temsil biçimi, bu çıktının fiziksel veya sayısal karşılığını; bağlanma mekanizması, verinin tasarım sürecine hesaplamalı bir işlemle doğrudan mı, yoksa yorumlama ve yönlendirme belgeleri aracılığıyla dolaylı mı taşındığını; tasarım aşaması, verinin etkili olduğu süreci; etki ise kaynakta katılımcı girdisiyle ilişkilendirilen karar veya mekânsal çıktıyı ifade etmektedir. Bu okuma, farklı vakalardan elde edilen nitel verilerin ortak bir matris üzerinde karşılaştırılmasına olanak sağlayan nitel veri matrisi analizi yaklaşımına dayanmaktadır (Miles ve Huberman, 1994).

Beş eksenli kodlamaya ek olarak vakalar, tanımlanabilirlik, temsil edilebilirlik ve izlenebilirlik koşulları açısından değerlendirilmiştir. Bağlanma mekanizması verinin tasarım sürecine hangi yolla geçtiğini, eşik konumu ise bu ilişkinin aktarım, kısmi entegrasyon veya yapısal entegrasyon düzeylerinden hangisine karşılık geldiğini göstermektedir. Değerlendirme, kaynaklarda açıkça belgelene bilgilere dayandırılmış; veri ile tasarım kararı arasındaki ilişkinin sınırlı açıklandığı durumlar, ilgili koşulun değerlendirilmesine yansıtılmıştır. Beş analiz eksenini üzerinden yürütülen karşılaştırmalı okuma Tablo 2’de, eşik koşullarına dayalı değerlendirme ise Tablo 3’te sunulmaktadır. Ayrıca aktarım ile yapısal entegrasyon arasındaki farkı somutlaştırmak amacıyla, EquiCity (Nourian vd., 2024) ve Newcastle City Futures (Tewdwr-Jones ve Wilson, 2022) karşıt örnekler olarak ayrıntılı biçimde ele alınmıştır.

Çalışmanın iki temel yöntemsel sınırlılığı bulunmaktadır. İlk olarak vaka seti, erişilebilen İngilizce ve Türkçe kaynaklarla sınırlıdır. İkinci olarak çalışma, alanın tamamını haritalayan sistematik bir literatür taraması değil, önerilen analitik çerçevenin seçilmiş vakalar üzerinden uygulanabilirliğini değerlendiren karşılaştırmalı bir incelemedir. Bu nedenle bulgular, tüm oyun-temelli katılımcı tasarım uygulamalarına genellenebilir sonuçlar olarak değil, veri ile tasarım kararı arasındaki bağlanma biçimlerini tartışmaya açan metodolojik bir öneri olarak değerlendirilmelidir.

4. Bulgular

Bu bölüm, çalışmanın bulgularını beş adımlı bir akışla sunar. İlk adımda, 14 vaka Kavramsal Çerçeve tanımlanan beş analiz eksenini üzerinden okunarak **Tablo 2’de** karşılaştırılır. İkinci adımda, sayısal tasarım iş akışının referans çerçevesi tanıtılır ve vakaların bu akış içindeki konumlarına göre iki farklı bağlanma türü ayrıştırılır. Son iki adımda ise vakalar üç eşik koşulu (tanımlanabilirlik, temsil edilebilirlik, izlenebilirlik) açısından değerlendirilip bulgular sentezlenir. Bu kurgu, yapısal analizden kavramsal çıkarımlara uzanan mantıksal bir dizge izler.

4.1. Vakaların Analitik Çerçeve Üzerinden Okunması

Vaka setini oluşturan 14 çalışma; veri türü, temsil biçimi, entegrasyon mekanizması, tasarım aşaması ve etki eksenleri üzerinden incelenmiş ve **Tablo 2’de** karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Tablonun her satırı bir vakayı, sütunlar ise vakanın ilgili eksenindeki konumunu temsil eder. Vaka seti coğrafi açıdan Avrupa, Asya, Kuzey/Güney Amerika ve Türkiye’yi kapsayan geniş bir dağılım sergiler. Teknolojik altyapı açısından süreçler; BIM ve dijital ikiz tabanlı sanal ortamlar (Ehab vd., 2023; Kavouras vd., 2025; Wang ve Vu, 2023), algoritmik motorlar (Aguilar vd., 2021; Nourian vd., 2024), karma gerçeklik uygulamaları (Förster vd., 2026) ve analog kutu oyunu formatlarını (Sousa, 2023; Tewdwr-Jones ve Wilson, 2022) kapsayan çeşitli yapılar üzerinden ilerler. Bu çeşitlilik, oyun-temelli katılım pratiklerinin bağlamsal zenginliğini ve karşılaştırmalı bir çerçevenin gerekliliğini somutlaştırır.

Tablo 2'nin analizi, vaka seti içinde üç temel örüntünün belirginleştiğini gösterir. Birinci örüntü veri türünün çeşitliliğidir: Oyun ortamlarında sayısal derecelendirme, mekânsal seçim, rol-müzakere veya anlatı gibi çok çeşitli formatlarda veri üretilebilir. Bu durum, oyun-temelli katılımın salt bir anket aracı değil, çok-değişkenli bir veri üretim ortamı olduğunu kanıtlar. İkinci örüntü, temsil biçiminin teknolojik altyapılara yapısal bağımlılığıdır; zira BIM nesneleri, parametre değişkenleri veya brif maddeleri gibi temsil dilleri farklı teknolojik bağlamlara karşılık gelir. Üçüncü ve en belirleyici örüntü ise entegrasyon mekanizması eksenindedir: Vakalar, katılımcı verisinin tasarıma bağlanma biçimi açısından iki belirgin küme oluşturur. Bu kümeleşmenin yapısı, bir sonraki alt-başlıkta ayrıntılı incelenmektedir.

Tablo 2: Vakaların Analitik Çerçeve Üzerinden Karşılaştırmalı Konumlanması

Vaka	Kaynak	Bağlanma Türü	Veri Türü	Temsil Biçimi	Tasarım Aşaması	Etki	Eşik Konumu
EquiCity	Nourian vd. (2024)	Doğrudan	Sayısal derecelendirme, 3B yerleşim, oylama, rol-müzakere	Ağırlık katsayısı, oylama matrisi, parametre değişkeni	Problem tanımlama, Kavramsal, Geliştirme	Çelişkili görüşler Markov+MCD A ile matematiksel dengelendi	Entegrasyon
Metropolis	Aguilar vd. (2021)	Doğrudan	Oylama, rol-müzakere kararı	Parametre değişkeni, sayısal skor	Değerlendirme/karar	ACO simülasyonu alternatif kentsel senaryolar üretti	Entegrasyon
Urban Shaper	Olszewski vd. (2016)	Doğrudan	Konum işaretleme, oylama, sözel öneri	XLS tablo, harita katmanı, sayısal skor	Problem tanımlama, Kavramsal	ML/veri madenciliği canlandırma önceliklerini belirledi	Entegrasyon
Geo-Zombie (mPASS)	Prandi vd. (2017)	Doğrudan	Konum işaretleme, rota, sözel öneri	Harita katmanı/GIS, sayısal skor	Problem tanımlama	Routing algoritması erişilebilirlik öncelikleri haritaladı	Entegrasyon
euPOLIS Game	Kavouras vd. (2025)	Doğrudan	3B yerleşim, mekânsal seçim, oylama	BIM/3B model nesnesi, sayısal skor	Kavramsal, Değerlendirme	Dijital ikiz NBS önerileriyle eşzamanlı güncellendi	Entegrasyon
Minecraft Dadaocheng	Wang ve Vu (2023)	Doğrudan	3B yerleşim, mekânsal seçim	BIM/3B model nesnesi (voksel)	Problem tanımlama, Kavramsal	Voksel dijital ikiz blok-blok revize edildi	Entegrasyon
Edible City Game	Pueyo-Ros vd. (2023)	Doğrudan	Mekânsal seçim, 3B yerleşim, rol-müzakere	Harita katmanı, sayısal skor	Kavramsal, Değerlendirme	Tygron dijital ikiz inşa/yıkımla otomatik güncellendi	Entegrasyon
BIM-VR Sky Garden	Ehab vd. (2023)	Doğrudan	3B yerleşim, mekânsal seçim, davranış logu	BIM/3B model nesnesi, metin notu	Kavramsal, Değerlendirme	BIM/VR sahne katılımcı geri bildirimiyle eşzamanlı revize edildi	Entegrasyon
Mark Your Future	Förster vd. (2026)	Doğrudan	3B yerleşim, mekânsal seçim	BIM/3B model nesnesi,	Kavramsal	AR sensör/markeri ile Unity 3B modele	Entegrasyon

Katılımcı Kentsel Tasarım Oyunlarından Sayısal Tasarıma Veri Entegrasyonu: Karşılaştırmalı Bir Analiz |

Coşkun, Berkutay A.; Alaçam, Sema; Doma, Oğuz Orkun

Vaka	Kaynak	Bağlanma Türü	Veri Türü	Temsil Biçimi	Tasarım Aşaması	Etki	Eşik Konumu
				parametre değişkeni		otomatik yansıtıldı	
Newcastle City Futures	Tewdwr-Jones ve Wilson (2022)	Dolaylı	3B yerleşim, anlatı/senaryo	Fiziksel 3B (LEGO), senaryo bileşeni	Problem tanımlama, Kavramsal	LEGO konseptler gerçek dünya projelerine dönüştü	Aktarım
Urban Placemakers	Sevinc vd. (2026)	Dolaylı	Mekânsal seçim, oylama, rol-müzakere, anlatı	Metin notu, brif maddesi	Problem tanımlama, Kavramsal	Atölye çıktıları politika eylem planlarına aktarıldı	Aktarım
@Stake	Michel (2006)	Dolaylı	Rol-müzakere, anlatı, oylama	Metin notu, brif maddesi	Problem tanımlama, Kavramsal	Dijital oylama bütçeleme uzlaşma briflerine dönüştü	Aktarım
Modelling Urban Spaces	Sousa (2023)	Dolaylı	3B yerleşim, mekânsal seçim, sayısal derecelendirme	Fiziksel küp/hexagon grid, sayısal skor	Kavramsal	Hexagon/kare grid yerleşimleri arazi kullanım brifine dönüştü	Aktarım
Beyoğlu İklim Uyum Oyunu	Play the City (2022)	Dolaylı	Mekânsal seçim, oylama, anlatı, rol-müzakere	Eylem kartı, oy taşı, fiziksel harita	Problem tanımlama, Kavramsal	Beyoğlu Strateji Planı'na plan notları ve yönetmelik maddeleri	Aktarım

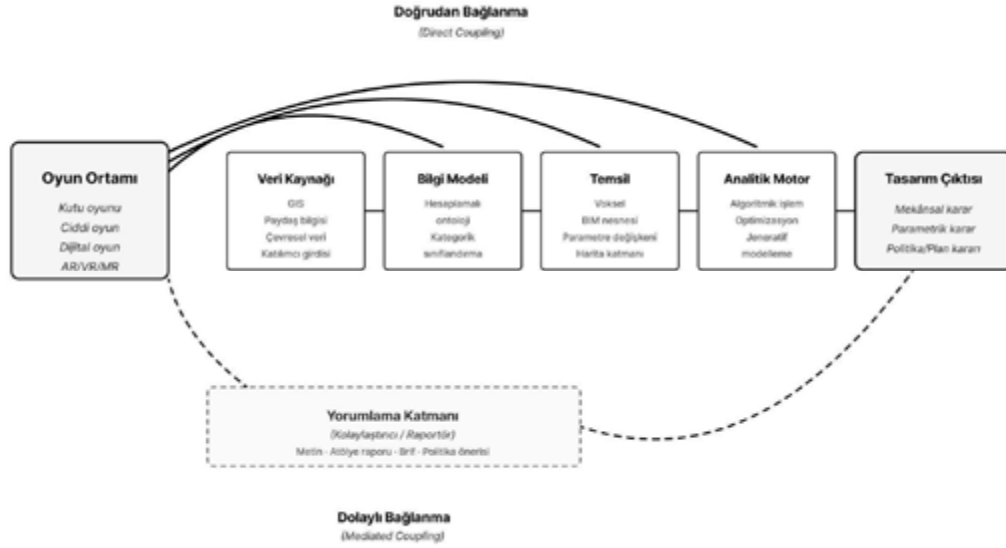
Bağlanma Türü Renk Kodu

Doğrudan Bağlanma — 9 vaka Dolaylı Bağlanma — 5 vaka

4.2. Sayısal Tasarım İş Akışı ve Bağlanma Noktaları

Sayısal tasarım iş akışı, veriye dayalı kararların mekânsal ölçekte nasıl üretildiğini gösteren çok aşamalı bir referans zinciridir (Hensel vd., 2022). Bu zincir beş temel aşamadan oluşur: veri kaynağı (coğrafi bilgi sistemleri, çevresel ölçümler vs.), bilgi modeli (hesaplamalı ontoloji), temsil (voksel, BIM nesnesi, parametre değişkeni), analitik motor (jeneratif modelleme, optimizasyon) ve tasarım çıktısı. Kurgunun temel amacı, veri kaynağından nihai tasarıma kadar sürekli ve izlenebilir bir akış kurarak, verinin karara dönüşme yolculuğunu her aşamada doğrulanabilir kılmaktır.

Oyun-temelli süreçler bu iş akışının farklı aşamalarına veri besleme potansiyeli taşısa da, vakaların analizi bu beslemenin iki belirgin biçimde gerçekleştiğini gösterir. Birinci gruptaki vakalarda katılımcı verisi; bilgi modeli, temsil veya analitik motor aşamalarına girerek zincirin ayrılmaz bir parçası gibi işlenir ve tasarım çıktısına algoritmik olarak bağlanır. Buna karşın ikinci grupta veri; iş akışının teknik sınırları dışından, metin veya brif gibi yorumlanmış belgeler aracılığıyla sürece eklenir. Bu durumda veri, jeneratif zincirin organik bir parçası olmak yerine dışsal bir girdi olarak kalır. Bağlanma noktasındaki bu yöntem farkı, önceki alt-başlıkta işaret edilen iki temel kümeleşmenin kavramsal zeminini oluşturur. **Şekil 1**, bu iş akışını ve vakaların bağlanma noktalarını özetlemektedir.



Şekil 1: Sayısal Tasarım İş Akışı ve Oyun-Temelli Katılım Vakalarının Bağlanma Noktaları

4.3. İki Bağlanma Türü: Doğrudan ve Dolaylı

Vakaların analizi, oyun-temelli katılımın iş akışına iki belirgin biçimde bağlandığını gösterir: Doğrudan Bağlanma (Direct Coupling) ve Dolaylı Bağlanma (Mediated Coupling). Doğrudan Bağlanmada katılımcı verisi, herhangi bir yorum katmanından geçmeksizin hesaplamalı aşamalara dahil olur ve algoritmik olarak işlenir. Dolaylı Bağlanmada ise veri, bir kolaylaştırıcı tarafından yorumlanıp brif veya politika önerisi formatına dönüştürülür. Bu yorumlanmış belge, hesaplamalı zinciri tamamen atlayarak tasarım sürecine dışsal bir girdi sıfatıyla aktarılır. Bu ayrım, veri ile tasarım kararı arasındaki bağın yapısal niteliğine dair temel bir kırılmayı ifade eder.

Dokuz vaka Doğrudan Bağlanma kategorisinde konumlanır (**Tablo 2**). Bu vakalar; BIM, dijital ikiz ve sanal ortam yaklaşımları (Ehab vd., 2023; Förster vd., 2026; Kavouras vd., 2025; Pueyo-Ros vd., 2023; Wang ve Vu, 2023) ile algoritmik motorları (Aguilar vd., 2021; Nourian vd., 2024; Olszewski vd., 2016; Prandi vd., 2017) kapsayan çeşitli teknolojiler kullansalar da, ortak özellikleri katılımcı verisinin tasarım sürecine algoritmik olarak entegre edilmesidir. Kategorinin olgun bir örneği olan EquiCity'de; paydaşların yatırım tercihleri üç boyutlu ilgi/kontrol matrisleri olarak yapılandırılırken, tasarım alanı Voksel ve Morton Kodları ile algoritmaya tanımlanır. Bu yapılandırılmış veri, Markov tasarım makinesi ve çok kriterli karar analizi (MCDA) gibi hesaplamalı motorlar tarafından eş zamanlı olarak mekânsal kararlara dönüştürülür. Sistemin sunduğu cebirsel şeffaflık, EquiCity'yi Doğrudan Bağlanmanın yetkin bir temsilcisi konumuna taşır.

Buna karşın, beş çalışma Dolaylı Bağlanma kategorisinde yer alır (Michel, 2006; Play the City, 2022; Sevinc vd., 2026; Sousa, 2023; Tewdwr-Jones ve Wilson, 2022). Bu vakaların ortak noktası, verinin sayısal sisteme girmeden önce insan aracısı tarafından yorumlanarak atölye brifine dönüştürülmesidir. Kategorinin açıklayıcı örneklerinden Newcastle City Futures projesinde katılımcılar, kentsel müdahaleleri LEGO® tuğlalarıyla fiziksel olarak inşa edip müzakere ederler. Ancak atölye sonunda üretilen konfigürasyonlar ve temalar, kolaylaştırıcılar tarafından derlenerek bir politika brifi raporuna dönüştürülür. Diğer bir deyişle katılımcı çıktısı, jeneratif bir tasarım modeline değil yorumlanmış bir metne evrilir. Verinin hesaplamalı aşamalara hiç girmemesi, bu kurguyu Dolaylı Bağlanmanın klasik bir örneği yapar.

EquiCity ve Newcastle City Futures, oyun-temelli katılımın sayısal tasarımla kurduğu ilişkinin iki uç biçimini temsil eder: İlkinde veri matematiksel temsil yoluyla doğrudan tasarım kararına dönüşürken, ikincisinde yorumlanmış bir politika önerisine evrilir. Bu yapısal farklılık salt teknolojik bir altyapı tercihi değil, veri-tasarım bağının doğrulanabilirliği açısından kavramsal bir kırılmadır. Bu kırılmanın entegrasyon bağlamındaki somut sonuçları, vakaların üç eşik koşulu açısından değerlendirildiği bir sonraki alt-başlıkta sunulmaktadır.

4.4. Üç Eşik Koşulu Açısından Vakaların Değerlendirilmesi

Vaka setini oluşturan 14 çalışma, Kavramsal Çerçeve'de tanımlanan üç eşik koşulu (tanımlanabilirlik, temsil edilebilirlik, izlenebilirlik) açısından sistematik biçimde değerlendirilmiştir. Her vaka için kaynak metinler incelenmiş ve vakaya özgü katılımcı-veri özellikleri bu koşullar açısından kodlanmıştır.

Değerlendirme süreci, ilgili koşulun tam sağlandığı (✓), kısmen sağlandığı (●) ve sağlanmadığı (X) durumları kapsayan üç düzeyli bir ölçek üzerinden yürütülmüştür. Bu değerlendirmenin karşılaştırmalı sonuçları ve vakaların eşik konumları **Tablo 3**'te sunulmaktadır.

Tablo 3: Vakaların Üç Eşik Koşulu Açısından Değerlendirilmesi

Vaka	Bağlanma Türü	Tanımlanabilirlik	Temsil Edilebilirlik	İzlenebilirlik	Eşik Konumu
EquiCity (Nourian vd., 2024)	Doğrudan	✓	✓	✓	Entegrasyon
Metropolis (Aguilar vd., 2021)	Doğrudan	✓	✓	✓	Entegrasyon
Urban Shaper (Olszewski vd., 2016)	Doğrudan	✓	✓	●	Entegrasyon
Geo-Zombie (mPASS) (Prandi vd., 2017)	Doğrudan	✓	✓	✓	Entegrasyon
euPOLIS Game (Kavouras vd., 2025)	Doğrudan	✓	✓	✓	Entegrasyon
Minecraft Dadaocheng (Wang ve Vu, 2023)	Doğrudan	✓	✓	●	Entegrasyon
Edible City Game (Pueyo-Ros vd., 2023)	Doğrudan	✓	✓	✓	Entegrasyon
BIM-VR Sky Garden (Ehab vd., 2023)	Doğrudan	✓	✓	✓	Entegrasyon
Mark Your Future (Förster vd., 2026)	Doğrudan	✓	✓	●	Entegrasyon
Newcastle City Futures (Tewdwr-Jones ve Wilson, 2022)	Dolaylı	●	X	X	Aktarım
Urban Placemakers (Sevinc vd., 2026)	Dolaylı	●	X	X	Aktarım
@Stake (Michel, 2006)	Dolaylı	●	X	X	Aktarım
Modelling Urban Spaces (Sousa, 2023)	Dolaylı	●	X	X	Aktarım
Beyoğlu İklim Uyum Oyunu (Play the City, 2022)	Dolaylı	●	X	X	Aktarım

Değerlendirme ölçeği

✓ Sağlanıyor	● Kısmen sağlanıyor	X Sağlanmıyor

Tablo 3, bağlanma türü ile eşik koşullarının karşılanma düzeyi arasında belirgin bir ilişki bulunduğunu göstermektedir. Doğrudan Bağlanma vakalarında katılımcı verisi çoğunlukla yapılandırılmış biçimde üretilmekte, sayısal tasarım dilinde temsil edilmekte ve sistem kayıtları ya da hesaplamalı mekanizmalar aracılığıyla izlenebilmektedir. Buna karşılık Dolaylı Bağlanma vakalarında veri, yorumlama ve raporlama aşamalarından geçerek tasarıma taşındığı için özellikle temsil edilebilirlik ve izlenebilirlik koşulları sınırlı kalmaktadır. Bununla birlikte, izlenebilirliğin kısmen sağlandığı doğrudan bağlanma örnekleri, entegrasyonun aktarım ile yapısal entegrasyon arasında dereceli bir yapı olarak değerlendirilmesi gerektiğine işaret etmektedir

Ortaya çıkan bu örüntü, iki bağlanma türü ile üç eşik koşulu arasında tesadüfi olmayan, sistematik bir yapısal ilişki bulunduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Doğrudan Bağlanma vakaları, üç koşulun tamamını veya büyük çoğunluğunu sağladıkları için yapısal entegrasyon eşiğini aşabilmektedir. Dolaylı Bağlanma vakaları ise özellikle temsil edilebilirlik ve izlenebilirlik koşullarında zayıf kaldıkları için yalnızca aktarım kategorisinde kalmaktadır. Bu ilişkinin kavramsal anlamı ve çalışmanın merkezi argümanı açısından taşıdığı sonuçlar, bir sonraki alt-başlıkta sentezlenerek tartışılmaktadır.

Karşılaştırmalı analiz, vakaların Doğrudan ve Dolaylı Bağlanma biçimleri etrafında farklılaştığını ve bu farklılığın eşik konumlarına yansıdığını göstermektedir. Doğrudan Bağlanma vakalarında katılımcı verisi sayısal temsil ve işlem mekanizmalarına bağlanarak entegrasyon kapasitesi kazanırken, Dolaylı Bağlanma vakalarında veri çoğunlukla yorumlanmış bir girdi olarak tasarım sürecine aktarılmaktadır. Bununla birlikte, izlenebilirliğin yalnızca kısmen sağlandığı doğrudan bağlanma örnekleri, entegrasyonun ikili değil dereceli bir yapı içinde değerlendirilmesi gerektiğine işaret etmektedir. Bu örüntünün literatür ve uygulama açısından anlamı bir sonraki bölümde tartışılmaktadır.

5. Tartışma

Bu çalışma, katılımcı kentsel tasarım oyunlarında üretilen verinin sayısal tasarımla kurduğu ilişkinin, kullanılan araçların türünden çok veri ile karar arasındaki bağın niteliği üzerinden değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Önerilen beş eksenli matris ve üç eşik koşulu, Crilly vd.'nin (2026) işaret ettiği karşılaştırmalı değerlendirme gereksinimine, farklı oyun vakalarının ortak bir analitik düzlemde okunmasını sağlayarak yanıt vermektedir. Aynı zamanda çalışma, Gün'ün (2023) teknoloji odaklı katılım araçlarının sayısal tasarım süreçleriyle zayıf bağlar kurabildiğine ilişkin saptamasını genişletmekte; bu zayıflığın yalnızca platform eksikliğinden değil, katılımcı girdisinin tasarım kararına tanımlı, temsil edilebilir ve izlenebilir biçimde bağlanmamasından kaynaklanabileceğini ortaya koymaktadır.

Çalışmanın temel katkısı, dijital teknoloji kullanımını entegrasyonun kendisi olarak kabul eden teknoloji merkezli bir okumadan ayrılmasıdır. BIM, dijital ikiz, karma gerçeklik veya algoritmik motor kullanan bir oyun ortamı, katılımcı çıktısını sayısal bir temsile dönüştürse dahi, bu çıktının hangi tasarım kararını nasıl etkilediği görünür değilse ancak kısmi bir entegrasyon üretebilir. Buna karşılık analog ya da insan aracılı süreçlerin aktarım düzeyinde kalması, bu yöntemlerin katılım, müzakere veya ortak anlam üretimi bakımından değersiz olduğu anlamına gelmez. Ampatzidou vd.'nin (2018) oyunların katılımcı planlamadaki sosyal öğrenme ve erişilebilirlik potansiyeline ilişkin vurgusu bu noktada önemlidir: önerilen çerçeve, katılımcı değeri hiyerarşik olarak ölçmekten çok, üretilen bilginin sayısal tasarım kararıyla kurduğu teknik ilişkiyi ayırt etmektedir.

Bu ayırım, uygulama açısından da kullanılabilir bir değerlendirme zemini sunmaktadır. Tanımlanabilirlik, temsil edilebilirlik ve izlenebilirlik koşulları, bir oyun-temelli katılım sürecinin tasarımın hangi aşamasına veri üreteceğini ve bu verinin hesaplamalı karar zincirinde nasıl takip

edilebileceğini önceden sorgulamaya olanak verir. Böylece çerçeve, oyun sonucunda elde edilen çıktının yalnızca raporlanıp raporlanmadığını değil, tasarım alternatiflerinin oluşumunda izlenebilir bir rol üstlenip üstlenmediğini incelemeye yardımcı olur.

Bununla birlikte, önerilen bu kavramsal çerçevenin belirli sınırları bulunmaktadır. İlk olarak, doğrudan ve/veya dolaylı bağlanmanın birlikte işlediği hibrit süreçler, tek bir kategoriye indirgenemeyebilir; bu nedenle kısmi entegrasyon düzeyinin farklı vaka kümeleri üzerinde ayrıntılandırılması gerekmektedir. İkinci olarak, üç eşik koşulu veri ile tasarım kararı arasındaki yapısal bağı değerlendirmekte, ancak katılımın kapsayıcılığı, temsil adaleti veya kararların toplumsal meşruiyeti gibi boyutları tek başına açıklamamaktadır. Bu nedenle önerilen çerçeve, tasarım pratiğini normatif olarak yöneten bir kılavuzdan çok, oyun-temelli katılımcı verinin sayısal tasarımıyla kurduğu ilişkiyi çözümleyen analitik bir araç olarak değerlendirilmelidir.

6. Sonuç

Bu çalışma, katılımcı kentsel tasarım oyunlarında üretilen verinin sayısal tasarım süreciyle kurduğu ilişkiyi değerlendirmek için beş analiz eksenini ve üç eşik koşulundan oluşan bir çerçeve önermiştir. On dört vakanın karşılaştırmalı incelemesi, katılımcı verinin sayısal temsile ve karar mekanizmalarına bağlandığı durumlarda entegrasyon kapasitesinin güçlendiğini; yorumlama ve raporlama aracılığıyla taşındığı durumlarda ise aktarım düzeyinde kaldığını göstermektedir. İzlenebilirliğin sınırlı olduğu bazı doğrudan bağlanma örnekleri, kısmi entegrasyonun ayrıca dikkate alınması gerektiğine işaret etmektedir. Gelecek araştırmalar, vaka setini farklı dil ve coğrafyalara genişletebilir; doğrudan ve dolaylı bağlanmayı birlikte kullanan hibrit süreçleri inceleyebilir ve yapısal entegrasyon koşullarını kapsayıcılık, temsil adaleti ve etik boyutlarla birlikte değerlendirebilir. Önerilen çerçevenin uygulamalı bir kentsel tasarım atölyesinde sınanması, analitik yaklaşımın pratik işlevliliğini değerlendirmek açısından önemli bir sonraki adım olacaktır.

Teşekkür

Bu çalışma, İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bilişim Anabilim Dalı, Mimari Tasarımda Bilişim Lisansüstü Programı'nda yürütülen yüksek lisans tezi kapsamında hazırlanmıştır.

KAYNAKLAR

- Aguilar, J., Díaz, F., Altamiranda, J., Cordero, J., Chavez, D., & Gutierrez, J. (2021). Metropolis: Emergence in a serious game to enhance the participation in smart city urban planning. *Journal of the Knowledge Economy*, 12, 1594–1617. <https://doi.org/10.1007/s13132-020-00679-5>
- Aish, R., & Bredella, N. (2017). The evolution of architectural computing: From Building Modelling to Design Computation. *Architectural Research Quarterly*, 21(1), 65–73. <https://doi.org/10.1017/s1359135517000185>
- Ampatzidou, C., Gugerell, K., Constantinescu, T., Devisch, O., Jauschneg, M., & Berger, M. (2018). All Work and No Play? Facilitating Serious Games and Gamified Applications in Participatory Urban Planning and Governance. *Urban Planning*, 3(1), 34. <https://doi.org/10.17645/up.v3i1.1261>
- Ampatzidou, C., Vervoort, J., Falay von Flittner, Z., & Vaajakallio, K. (2022). New Insights, New Rules: What Shapes the Iterative Design of an Urban Planning Game? *Urban Planning*, 7(2). <https://doi.org/10.17645/up.v7i2.5112>
- Bakhanova, E., Garcia, J. A., Raffe, W. L., & Voinov, A. (2020). Targeting social learning and engagement: What serious games and gamification can offer to participatory modeling. *Environmental Modelling & Software*, 134, 104846. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104846>
- Beattie, H., Brown, D., & Kindon, S. (2020). Solidarity through difference: Speculative participatory serious urban gaming (SPS-UG). *International Journal of Architectural Computing*, 18(2), 141–154. <https://doi.org/10.1177/1478077120924337>

- Caetano, I., & Leitão, A. (2019). Architecture meets computation: an overview of the evolution of computational design approaches in architecture. *Architectural Science Review*, 63(2), 165–174. <https://doi.org/10.1080/00038628.2019.1680524>
- Crilly, M., Varna, G., Coaker, A., Gibbon, R. C., Jackson, J., McDonald, N. E., & Smith, D. R. (2026). Experimenting With Gamification and Geogames in Urban Planning: A Systematic Literature Review. *Urban Planning*, 11. <https://doi.org/10.17645/up.10780>
- Demirel, A. E., & Alanyalı Aral, E. (2025). Board Game as a Participatory Design Technique for Urban Spaces: A Ludological Analysis. *Simulation & Gaming*. <https://doi.org/10.1177/10468781251338439>
- Deterding, S., Sicart, M., Nacke, L., O'Hara, K., & Dixon, D. (2011). Gamification. using game-design elements in non-gaming contexts. *Proceedings of the 2011 Annual Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems - CHI EA '11*, 66, 2425–2428. <https://doi.org/10.1145/1979742.1979575>
- Ehab, A., Burnett, G., & Heath, T. (2023). Enhancing Public Engagement in Architectural Design: A Comparative Analysis of Advanced Virtual Reality Approaches in Building Information Modeling and Gamification Techniques. *Buildings*, 13(5), 1262. <https://doi.org/10.3390/buildings13051262>
- Förster, N., Drechsel, M., Schubert, G., & Petzold, F. (2025). Playful Reconfigurations: Learning, Making, and Playing Geogames for Urban Participation. *Urban Planning*, 11. <https://doi.org/10.17645/up.10675>
- Gün, A. (2023). Urban Design Evolved: The Impact of Computational Tools and Data-Driven Approaches on Urban Design Practices and Civic Participation. *Journal of Contemporary Urban Affairs*, 7(1). <https://doi.org/10.25034/jicua.2023.v7n1-16>
- Healey, P. (1997). *Collaborative Planning*. Macmillan Education UK. <https://doi.org/10.1007/978-1-349-25538-2>
- Sunguroğlu Hensel, D., Tyc, J., & Hensel, M. (2022). Data-driven design for Architecture and Environment Integration. *SPOOL*, 9(1), 19–34. <https://doi.org/10.47982/spool.2022.1.02>
- Kavouras, I., Rallis, I., Sardis, E., Protopapadakis, E., Doulamis, A., & Doulamis, N. (2025). Empowering Communities Through Gamified Urban Design Solutions. *Smart Cities*, 8(2), 44. <https://doi.org/10.3390/smartcities8020044>
- Miles, M. B. (1994). *Qualitative data analysis: An expanded sourcebook*. Thousand Oaks.
- Nourian, P., Azadi, S., Bai, N., de Andrade, B., Abu Zaid, N., Rezvani, S., & Pereira Roders, A. (2024). EquiCity game: a mathematical serious game for participatory design of spatial configurations. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-61093-4>
- Olszewski, R., Turek, A., & Marcin Łączyński. (2016). Urban Gamification as a Source of Information for Spatial Data Analysis and Predictive Participatory Modelling of a City's Development. In *Proceedings of the 5th International Conference on Data Management Technologies and Applications – DATA*, 176–181. <https://doi.org/10.5220/0006005201760181>
- Özbay, H. S., & Alaçam, S. (2024). Examining Collaborative Design: A Critical Review of Participatory Architectural Practices. In *The 12th International Conference of the ASCAAD* (pp. 148–184).
- Play the City. (2022). Climate Game, Beyoglu. <https://www.playthecity.eu/gamereports>
- Prandi, C., Rocchetti, M., Salomoni, P., Nisi, V., & Nunes, N. J. (2016). Fighting exclusion: a multimedia mobile app with zombies and maps as a medium for civic engagement and design. *Multimedia Tools and Applications*, 76(4), 4951–4979. <https://doi.org/10.1007/s11042-016-3780-9>
- Pueyo-Ros, J., Comas, J., Säumel, I., Castellar, J. A. C., Popartan, L. A., Acuña, V., & Corominas, L. (2023). Design of a serious game for participatory planning of nature-based solutions: The experience of the Edible City Game. *Nature-Based Solutions*, 3, 100059. <https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2023.100059>
- Raghothama, J., & Meijer, S. (2018). Rigor in Gaming for Design: Conditions for Transfer Between Game and Reality. *Simulation & Gaming*, 49(3), 246–262. <https://doi.org/10.1177/1046878118770220>
- Sanoff, H. (2000). *Community participation methods in design and planning*. John Wiley & Sons.
- Sevinc, D., Scott, A., Bryson, J., & Leach, J. (2025). Reading cities: Towards a participatory tool for disentangling the complexity of urban systems. *Local Economy: The Journal of the Local Economy Policy Unit*, 40(1), 3–18. <https://doi.org/10.1177/02690942251380527>
- Sousa, M. (2023). Modeling Urban Spaces with Cubes: Building analogue serious games for collaborative planning. *International Journal of Film and Media Arts*, 8(1), 8–35. <https://doi.org/10.24140/ijfma.v8.n1.01>
- Tewdwr-Jones, M., & Wilson, A. (2022). Co-Designing Urban Planning Engagement and Innovation: Using LEGO® to Facilitate Collaboration, *Participation and Ideas*. *Urban Planning*, 7(2). <https://doi.org/10.17645/up.v7i2.4960>
- Wang, S.-M., & Lan Hong Vu. (2023). The integration of digital twin and serious game framework for new normal virtual urban exploration and social interaction. *Journal of Urban Management*, 12(2), 168–181. <https://doi.org/10.1016/j.jum.2023.03.001>

Katılımcı Kentsel Tasarım Oyunlarından Sayısal Tasarıma Veri Entegrasyonu: Karşılaştırmalı Bir Analiz |
Coşkun, Berkutay A.; Alaçam, Sema; Doma, Oğuz Orkun

Yin, R. K. (2018). *Case Study Research and Applications: Design and Methods* (6th ed.). Thousand Oaks, CA: Sage.

Yapay Gece Işıklarının Karşılaştırmalı Analizi: Karanlık Gökyüzü Sertifikalı Alanlar ve Işık Kirliliği Altındaki Kentsel Ortamlar için Rastgele Orman Regresyonu

Zeynep Çolakoğlu ¹ 

¹Orta Doğu Teknik Üniversitesi

¹zeynep.colakoglu@metu.edu.tr

Özet

Yapay gece ışıklarının (ANTL) kontrolsüz kullanımıyla ortaya çıkan ışık kirliliğinin insan sağlığı, özellikle sirkadiyen ritim ile bağlantılı olarak, ekolojik sistemler, astronomik gözlemler ve fazla enerji kullanımı dolayısıyla ekonomi üzerinde çeşitli olumsuz etkileri mevcuttur. Bu çalışmada, "Karanlık Gökyüzü" (Dark Sky) sertifikalı korunan alanlar ile ışık kirliliği yaşayan kentsel alanlar arasındaki radyans farkından yola çıkılarak ortaya çıkan fazla enerji kullanımının makine öğrenmesi yöntemleriyle analiz edilmesi hedeflenmiştir. Bu çalışma kapsamında çok değişkenli verileri etkin bir biçimde işleyebilen Rastgele Orman Regresyonu (RFR) seçilmiştir. Modelin eğitimi için sertifikalı alanlar olan kentsel bir morfolojiye sahip Fulda (Almanya) ve kırsal dokuya sahip Gower (Birleşik Krallık) seçilerek ideal durumlar öğrenilmiş; fazla enerji kullanımı tahmini için ise Nancy (Fransa) ve Stuttgart (Almanya) kentleri çalışma alanı olarak belirlenmiştir. Çalışmada, NASA'nın Black Marble projesinin VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) cihazından toplanan pikseller halindeki yıllık radyans verileri, Avrupa Birliği'ne ait Copernicus uydusunun verilerine dayanan Urban Atlas projesinden elde edilen arazi kullanımı ve ağırlıklandırılmış nüfus verileri ile bina yüksekliği veri setleri entegre edilmiştir. Verilerin ölçekleri birbirlerinden farklı olduğundan, öncelikle veriler öncelikli veri seti olan VIIRS verilerine göre düzenlenmiş, daha sonra model eğitiminde kullanılmak üzere %80'i eğitim (train) ve %20'si test setlerine bölünmüştür. Model kurgusunda arazi kullanımları ana değişken olarak, nüfus ve bina yüksekliği ise bu parametrelerin birer katsayısı olarak işlenmiştir. Fulda ve Gower üzerinden ideal durumu öğrenen modelin başarı oranı (R^2) 0,7386 olarak hesaplanmış ve bu değer denenen diğer modeller olan XGBoost ve Karar Ağacı modellerinden daha yüksek olduğu görülmüştür. Öznitelik önem derecesi analizlerinde, tahmin yeteneğinde en etkili ve radyans değerlerini en etkili biçimde artıran parametrelerin endüstriyel/ticari bölgeler, yollar ve yoğun kentsel doku olduğu; meraların, tarım alanlarının ve ormanların ise VIIRS tarafından ölçülen radyansı en çok azaltan unsurlar olduğu saptanmıştır. RFR Modeli doğrultusunda gerçek değerler ile tahmin edilen ideal değerler arasındaki farkı ifade eden "Fazla Radyans" miktarı Nancy için yaklaşık $38.500 \text{ nW.cm}^{-2}.\text{sr}^{-1}$, Stuttgart için ise yaklaşık $103.700 \text{ nW.cm}^{-2}.\text{sr}^{-1}$ olarak tahmin edilmiştir. Bu değerlerin yaklaşık olarak Nancy için 14661,34 kW ve Stuttgart için 39541,21 kW'a karşılık geldiği öngörülmektedir. Stuttgart'ın büyüklüğü ve nüfusu gereği Nancy ile aralarındaki farkın çok daha fazla olacağı beklenirken, aralarındaki farkın beklenenden az olması, alandaki diğer çalışmalar incelendiğinde Almanya'nın ışık kirliliği değerlerinin Fransa'ya kıyasla daha düşük olması durumuyla paralel bulunmuştur. Sonuç olarak, veri odaklı makine öğrenmesi yaklaşımıyla kentsel aydınlatmadaki verimsizlik somutlaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Işık Kirliliği, Yapay Gece Işıkları, Karanlık Gökyüzü Sertifikasyonu, VIIRS, Rastgele Orman Regresyonu.

Comparative Analysis Of Artificial Night-Time Lights: Random Forest Regression for Dark Sky Certified Places and Light-Polluted Urban Environments

Zeynep Çolakoğlu ¹ 

¹Middle East Technical University

¹zeynep.colakoglu@metu.edu.tr

Abstract

Light pollution, resulting from the uncontrolled use of artificial night-time lights (ANTL), has various negative impacts on human health, particularly in relation to circadian rhythms, as well as on ecological systems, astronomical observations, and the economy due to excessive energy consumption. This study aims to analyze the excessive energy consumption arising from the difference in radiance between "Dark Sky" certified areas and urban areas experiencing light pollution through a machine learning method. Random Forest Regression (RFR), which can efficiently process multivariate data, was chosen for this study. For the training of the model, Fulda (Germany), with its urban morphology, and Gower (United Kingdom), with its rural texture, both certified areas, were selected to learn ideal conditions; Nancy (France) and Stuttgart (Germany) were chosen as the study areas for estimating excessive energy consumption. In this study, annual radiance data in pixel form collected from NASA's Black Marble project's VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) instrument, land use and weighted population data, and building height datasets obtained through the European Union's Copernicus satellite-based Urban Atlas project were integrated. Since the scales of the data differed, the data were first organized according to the main dataset, which is the VIIRS data, and then divided into 80% train and 20% test sets for the training of the model. For the preparation of the model, land use was treated as the main variable, and population and building height data were treated as coefficients of these parameters. The success rate (R^2) of the model, which learned the ideal situation via Fulda and Gower, was calculated as 0.7386, and this value was found to be higher than the other models tested, namely the XGBoost and Decision Tree models. In global feature importance analyses, industrial/commercial areas, roads, and dense urban fabric were found to be the parameters that most effectively increased predictive ability and radiance values; It was also found that pastures, agricultural areas, and forests are the elements that reduce radiance that is detected by the VIIRS. According to the RFR Model, the amount of "Excess Radiance" representing the difference between the actual values and the predicted ideal values, was estimated to be approximately $38,500 \text{ nW.cm}^{-2}.\text{sr}^{-1}$ for Nancy and approximately $103,700 \text{ nW.cm}^{-2}.\text{sr}^{-1}$ for Stuttgart. These values are estimated to correspond to approximately 14,661.34 kW for Nancy and 39,541.21 kW for Stuttgart. While a much larger difference would be expected between Nancy and Stuttgart due to Stuttgart's size and population, the fact that the difference is less than expected is consistent with other studies in the area showing that Germany's light pollution values are lower than France's. In conclusion, the inefficiency in urban lighting has been demonstrated using a data-driven machine learning approach.

Keywords: Light Pollution, Artificial Night-Time Lights (ANTL), Dark-Sky Certification, Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS), Random Forest Regression (RFR).

1. Giriş

Yapay gece ışıkları yol güvenliği, kişisel emniyet ve sosyal aktivitelerin gece sürdürülebilmesi açısından öneme sahiptir (Bhattarai & Lucieer, 2024). Ancak görsel konfor bağlamında aydınlatma seviyesi, ışık rengi gibi faktörlerin göz önünde bulundurulması gerekmektedir (Singh, 2024).

Işık kirliliği ve dolayısıyla yapay gece ışıklarına (Artificial night-time lights - ANTL) maruziyet insan sağlığı için potansiyel bir risk teşkil etmektedir (Haim & Portnov, 2013). Gün batımında sıcak tonlardaki ışıklara ve geceleri düşük ışık seviyelerine maruz kalmak kandaki melatonin seviyesinin artmasını sağlar, böylece beden dinlenme durumuna geçmeye başlar, vücut sıcaklığı düşer, kaslar ve organlar dinlenme moduna geçer ve uyku hali baş gösterir, bu süreçte bağışıklık sistemi aktiftir (Karlen et al., 2012). Fakat soğuk beyaz LED aydınlatmalar melatonin üretimini, yüksek basınçlı sodyum (HPS) lambalara göre 5 kat ve alçak basınçlı sodyum (LPS) lambalara göre 20 kat daha fazla baskılamaktadır (Haim & Portnov, 2013). Melatonin hormonu üretiminin bu şekilde baskılanması sirkadiyen ritmin bozulmasını tetikleyerek uyku bozuklukları, kalp sorunları, hormona bağlı meme ve prostat kanseri gibi insan sağlığı açısından tehlikeli sorunlara yol açabilmektedir (Haim & Portnov, 2013).

Ayrıca, ışık kirliliği çevresel sorunlara yol açabilmektedir. Ekolojik olarak, örneğin gece avlanan memelilerde olduğu gibi yaban hayatını olumsuz etkileyebilmektedir (Beier, 2006). Astronomik çalışmalar bağlamında ışık kirliliğinin sebep olduğu gökyüzü parlaması (skyglow) atmosferik objelerin görünürlüğünü azaltmakta ve atmosferik gözlemi zorlaştırmaktadır (Mizon, 2012).

Işık kirliliğinin ekonomi ve enerji kullanımı bağlamında etkileri olduğu saptanmıştır. DarkSky International'a göre yalnızca ABD'de 120 teravat-saat enerji harcanmış olup, bu miktar yaklaşık olarak New York'un iki yıllık toplam enerji ihtiyacını karşılamaya yetecek düzeydedir. Sadece ABD'de dış aydınlatma için harcanan enerjinin %30'unun boşa kullanıldığı gözlemlenmiştir. Bunun yıllık olarak yaklaşık 3,3 milyar dolarlık bir ekonomik kayba ve 21 milyon tonluk karbondioksit salınımına denk geldiği düşünülmektedir (DarkSky International, 2023).

Makine öğrenmesi yaklaşımları, ışık kirliliğini analiz ve tahmin etmek için kullanılan araçlardan biridir. Örneğin, Bhattarai ve Lucieer (2024) VIIRS ile elde edilen uydu görüntülerinde gözlemlenen ANTL'ye etki eden birincil faktörleri belirlemek amacıyla 0.94 R² skorunda Rastgele Orman Regresyonu (Random Forest Regression (RFR)) modeli kullanmışlardır. Söz konusu çalışma sonucunda, Tasmanya, Avustralya'daki Hobart şehrinde ANTL'nin en belirleyici faktörünün sokak lambaları olduğu ve bunun yapı taban alanlarınca takip edildiği görülmüştür.

Özetle, kontrolsüz ANTL sonucu ortaya çıkan ışık kirliliği insan sağlığını, ekolojik sistemleri, astronomik gözlemleri ve ekonomiyi tehdit ederek enerji israfına sebep olmaktadır. Bu çalışma, ışık kirliliğine maruz kalan kentsel çevreler ile ışık kirliliğinden korunan sertifikalı alanları karşılaştıran bir makine öğrenmesi modeli aracılığıyla, yapılı çevredeki kontrolsüz aydınlatmadan kaynaklanan fazla enerji kullanımını nicel ve mekânsal olarak tahmin etmeyi amaçlamaktadır.

2. Amaç ve Kapsam

Bu çalışma ANTL dolayısıyla ışık kirliliği ile ortaya çıkan fazla enerji kullanımının tahmin edilmesini amaçlamaktadır. Bu bağlamda bir makine öğrenmesi modeli olan RFR ile Fulda (Almanya) ve Gower (Birleşik Krallık) Karanlık Gökyüzü Sertifikalı şehirler "ideal" kabul edilerek Nancy (Fransa) ve Stuttgart (Almanya) şehirleri için fazla enerji kullanımı tahmini yapılmıştır.

3. Materyal ve Yöntem

3.1. Çalışma Alanları

RFR modelinin eğitimi için Karanlık Gökyüzü sertifikasına sahip Fulda (Almanya) ve Gower (Birleşik Krallık) seçilmiştir. 2019 yılında Dark Sky International tarafından sertifikalandırılan Fulda, 68.000 nüfuslu, 104,04 km² yüzölçümünde, tarihi binaları ve üretim yapıları bulunan bir kenttir (DarkSky International, n.d.-a). Sertifikasyon süreci 2017’de başlayan ve 2024’te resmi olarak sertifikalandırılan Gower ise 3.000 kişilik nüfusa sahip, 186 km² yüzölçümünde kırsal bir alandır (DarkSky International, n.d.-b).

Fazla enerji kullanımı tahmini için seçilen sertifikasız alanlar ise Nancy (Fransa) ve Stuttgart (Almanya)’dır. Nancy’nin ortalama nüfusu 2016 ve 2018 yılları arasında 104.000’dir (Institut national de la statistique et des études économiques [Insee], 2025). Yüzölçümü ise 17 km²’dir (Institut national de la statistique et des études économiques [Insee], 2024). Stuttgart ise 207 km² yüzölçümünde ve 630.000 kişilik bir nüfusa sahiptir (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, 2024). Nancy şehir merkezinin Bortle ölçeğine göre değeri yaklaşık olarak 8,5 iken, Stuttgart şehir merkezi ise Bortle 9 olarak belirlenmiştir (Stare, n.d.).

3.2. Veri Setleri

Makine öğrenmesi modelinde kullanılmak üzere radyans, arazi kullanımı, popülasyon ve bina yüksekliği verileri kullanılmıştır. Yeryüzünden uzaya sızan elektromanyetik ışımlar NASA’nın Suomi National Polar-orbiting Partnership (NPP) uydusu üzerinde konumlandırılan Görünür Kızılötesi Görüntüleme Radyometresi Süiti (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS))’nin Gün/Gece Bandı (Day-night band (DNB)) aracılığıyla toplanmaktadır (National Aeronautics and Space Administration [NASA], n.d.). DNB görünür ve yakın kızılötesi dalga boylarına hassas olan pankromatik bir banttır. NASA bünyesindeki Black Marble Projesi günlük olarak kalibre edilmekte ve atmosferik bozulmalara karşı düzeltmeler gerçekleştirilmektedir. Bu sayede gece ışığı verileri, ışık kirliliği, yangın ve insan faaliyeti gibi gözlemleri yapmaya olanak vermektedir. Bu çalışma kapsamında, 15 ark-saniye mekânsal çözünürlüğe sahip yeryüzündeki yaklaşık 500 m × 500 m bir alanın radyans değerini bir piksel halinde veren çok katmanlı .h5 uzantılı “VNP46A4” veri seti tercih edilmiştir. Söz konusu veri seti içerisinde enlem, boylam, radyans değerleri gibi veriler bulunmakta olup, bu çalışma için “AllAngle_Composite_Snow_Free” başlıklı veriler kullanılmıştır (NASA, n.d.).

Proje kapsamında, Fulda için 2019, Gower için 2024, Nancy için 2018 ve Stuttgart için 2018 VIIRS veri setleri kullanılmıştır. Gower ve Fulda için seçilen yıllar resmi sertifikasyon yıllarıdır. Nancy ve Stuttgart için 2018 yılının seçilme sebebi ise arazi kullanımı ve nüfus verileriyle en uyumlu olan VIIRS veri setini seçme amacından ileri gelmektedir. VIIRS DNB’nin yalnızca yakın kızılötesi ve kızılötesi ışınımına hassas olması sebebiyle radyans çıktıları sokak lambalarının renk sıcaklığından etkilenmeye açıktır ve LED lambalar özelinde VIIRS DNB mavi bantta hassasiyet göstermemekte ve dolayısıyla LED lambalardan gelen ışının bir kısmını görmemektedir (Bhattarai & Lucieer, 2024). Bu sebeple, arazi kullanımı, nüfus ve bina yüksekliği verileriyle en uyumlu olan ve LED sokak aydınlatması kullanımının olabilecek en az olması amacıyla seçilebilecek en eski veri seti olan 2018 veri seti seçilmiştir.

Arazi kullanımı ve nüfus veri setleri Avrupa Birliği’nin Copernicus uydusunun dünya gözlem Urban Atlas projesinden elde edilmiştir (European Union, n.d.-a). Urban Atlas, Avrupa şehirlerinin 6 yıllık periyotlarla üretilen vektörel (.gpkg formatında) kentsel arazi örtüsü, arazi kullanımı ve ağırlıklandırılmış popülasyon veri setlerini içermektedir. Bu çalışmada ana parametreler olarak kullanılan Urban Atlas Arazi Kullanımı veri setleri, 17 farklı arazi kullanım sınıfı içermekte olup sınıflar şu şekildedir: Sürekli yoğun kentsel doku (S.L. (Sealing Level, Geçirimsizlik Seviyesi) > %80), kesintili yoğun kentsel doku (S.L. : %50-%80), kesintili orta yoğun kentsel doku (%30-%50), kesintili düşük yoğun kentsel doku (S.L. : %10-%30), kesintili çok düşük yoğunluklu kentsel doku (S.L. < %10), izole

yapılar, endüstriyel, ticari, kamu, askeri ve özel birimler, transit yollar ve ilişkili araziler, diğer yollar, demiryolları, liman alanları, havaalanları, maden çıkarma ve katı atık sahaları, şantiyeler, güncel kullanımı olmayan araziler, kentsel yeşil alanlar, spor ve eğlence tesisleri, tarım arazileri: kalıcı ürünler (bağlar, meyve bahçeleri), meralar, karmaşık tarım desenleri, ormanlar, doğal otsu bitki örtüsü alanları, açık alanlar (sahiller, kayalıklar), sulak alanlar ve su kütleleri (European Union, n.d.-b). Ağırlıklandırılmış nüfus verileri ise bu çalışma kapsamında kentsel aktivite düzeyini yansıtmak amacıyla birer katsayı olarak kullanılmıştır.

Bina yüksekliği verileri yine Copernicus Urban Atlas projesinden elde edilen, 2012 yılı için Avrupa'da 870 kenti kapsayan, 10 m çözünürlükteki, .tiff uzantılı veri setleridir (European Union, 2012). Bu çalışma kapsamında, tıpkı nüfus verisi gibi, kentsel yapıların yapay ışık yayma potansiyeli göz önünde bulundurularak RFR modeli için bir katsayı olarak kullanılan bina yükseklik verileri yapı çevrenin düşey morfolojik katmanlarını kararlı hale getirmek amacıyla 3'er metrelik düşey sınıflara (0-3 m, 3-6 m, 6-9 m, ..., 27-30 m ve 30+ m) ayrılmıştır.

3.3. Metot

Veri işleme sürecinde 15 ark-saniyelik coğrafi çözünürlüğe sahip VIIRS verileri, yaklaşık 500 m × 500 m'lik pikseller halinde coğrafi altlık (Base map) olarak kabul edilmiş ve elde edilen diğer tüm veriler bu piksel geometrisine göre hizalanmıştır. Vektörel arazi kullanım poligonları piksel sınırlarına göre bölünmüş ve her bir piksel için arazi kullanım türleri oransal olarak ağırlıklandırılmıştır. Arazi kullanım verileriyle birlikte elde edilen nüfus verileri de tanımlanan piksel geometrisine göre bölünmüştür. Aynı işlem bina yükseklik verilerine de uygulanarak her bir piksel geometrisi için bina yükseklik verileri tanımlanarak üçer metrelik sınıflara göre ağırlıklandırılmıştır.

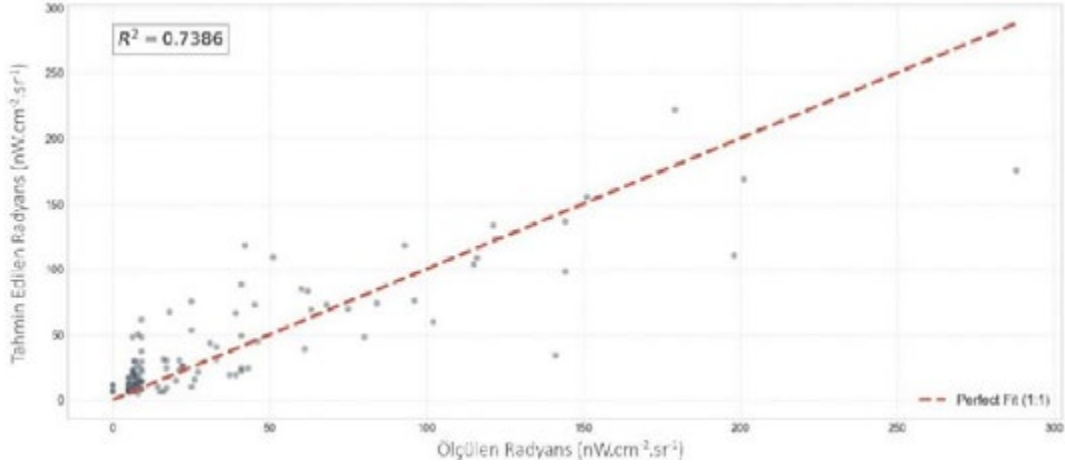
Makine öğrenmesi modelinin seçimi, bir ağaç formunda çok değişkenli verileri doğrusal olmayan bir biçimde işleyebildiği için RFR (Random Forest Regression: Rastgele Orman Regresyonu) modelinden yana yapılmıştır. Çalışmada hedef çıktı sürekli sayısal verilerden oluştuğu için problem bir kümeleme veya sınıflandırma değil, bir regresyon problemidir. Bu nedenle, K-means gibi doğrudan kümelemeye odaklanan algoritmalar çalışma kapsamı dışında tutulmuştur. Kentsel parametrelerin doğrusal olmayan ve birbiriyle etkileşimli yapısı nedeniyle, çok değişkenli verilerle çalışabilseler de, karmaşık ve doğrusal olmayan ilişkileri yakalamakta yetersiz kalan doğrusal regresyon gibi klasik modeller tercih edilmemiştir. Bu sebeple, doğrusal olmayan yapıyı çözmekte daha başarılı olan ağaç tabanlı topluluk modelleri üzerinde durulmuş ve RFR modeli bu çalışma için uygun görülmüştür. Model sertifikalı alanlar olan Fulda ve Gower'in radyans, arazi kullanımı, popülasyon ve bina yüksekliği verileriyle (%80 eğitim (training set), %20 test (test set)) ideal aydınlatma durumlarını öğrenmiştir. Model başarısı (R^2 değeri) **Şekil 1**'de görülebildiği üzere 0.7386 olarak bulunmuştur. Denenen diğer olası modeller ise R^2 değeri 0,7303 olan XGBoost ve R^2 değeri 0,2310 olan Karar Ağacı'dır. Diğer olası modellerden öngörüldüğü üzere daha iyi başarı oranı vermesi sebebiyle RFR modeli seçilmiştir.

Modelin hiperparametreleri; n_estimators=500, max_depth=20, max_features='sqrt' ve random_state=42 olarak yapılandırılmıştır. Ayrıca, VIIRS uydusunun sensör hatalarından, su kütlelerinin anlık yansımalarından veya yerel olağandışı etkinliklerden kaynaklanabilen uç değerler (outliers), modelin tahmin doğruluğunu ve genelleme kararlılığını üst düzeyde tutmak amacıyla veri setinden temizlenmiştir.

4. Bulgular ve Tartışma

4.1. Model Performansı ve Doğrulama

Dark Sky International tarafından sertifikalı Fulda ve Gower'ın arazi kullanımı, popülasyon, bina yüksekliği ve radyans verileriyle eğitilen RFR modelinin R^2 skoru 0.7386'dır (**Şekil 1**).

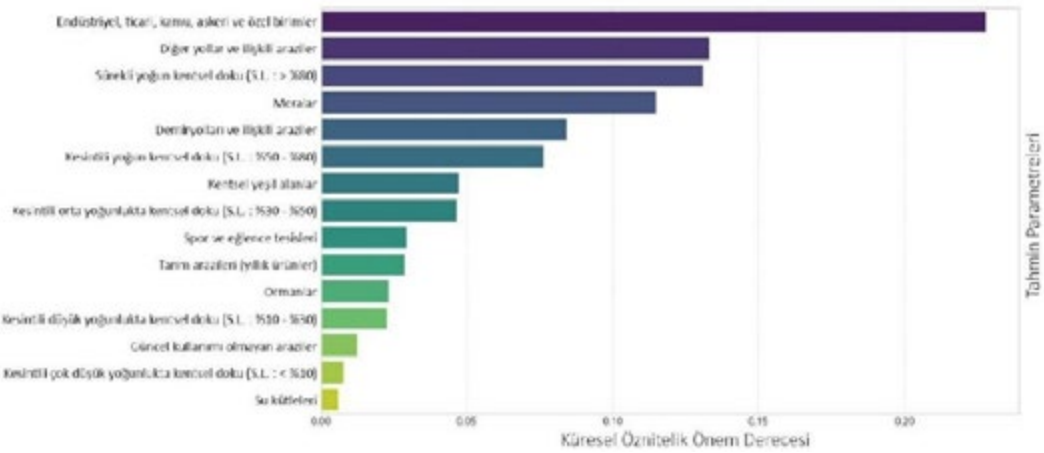


Şekil 1: Fulda ve Gower için Gözlemlenen ve Tahmin Edilen Gece Radyans Değerleri

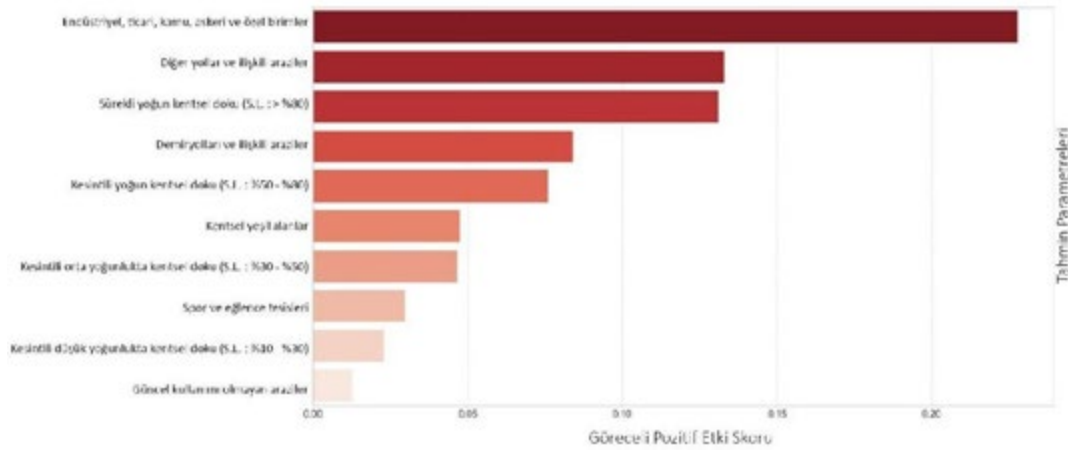
4.2. Öznitelik Önem Derecesi (Feature Importance)

Modelin genel tahmin yeteneğini belirleyen birincil faktörler **Şekil 2**'de sunulmuştur. Parametrelerin genel ağırlıkları incelendiğinde endüstriyel/ticari bölgelerin, yolların, yoğun kentsel dokunun (Continuous Urban Fabric) ve meraların model üzerinde en yüksek öznitelik önem derecesine sahip olduğu görülmüştür. Yolların en etkili faktör olması beklenirken, ikincil konumda bulunması katasayı olarak bina yüksekliği ve popülasyonun ağırlığından dolayı ortaya çıktığı öngörülmektedir.

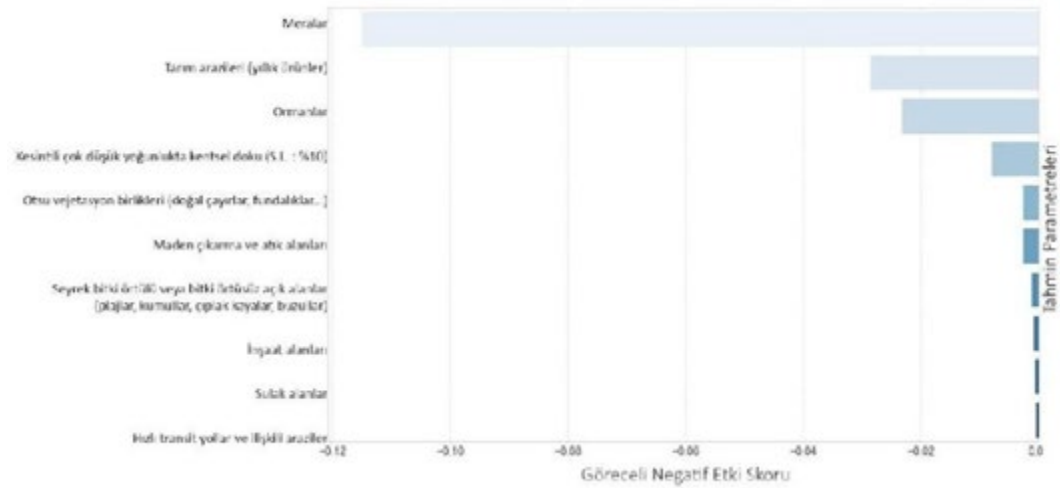
Radyans yoğunluğunu doğrudan artıran birincil faktörlerin endüstriyel/ticari bölgeler, yollar, yoğun kentsel doku (Continuous Urban Fabric) ve demiryolları olduğu belirlenmiştir (**Şekil 3**). Meralar, ekilebilir alanlar ve ormanlar ise radyansı en etkin biçimde azaltan (Mitigating) unsurlar olarak ortaya çıkmıştır (**Şekil 4**).



Şekil 2: Öznitelik Önem Sıralaması



Şekil 3: Pozitif Öznitelik Önem Sıralaması



Şekil 4: Negatif Öznitelik Önem Sıralaması

4.3. Karşılaştırmalı Analiz: Nancy ve Stuttgart

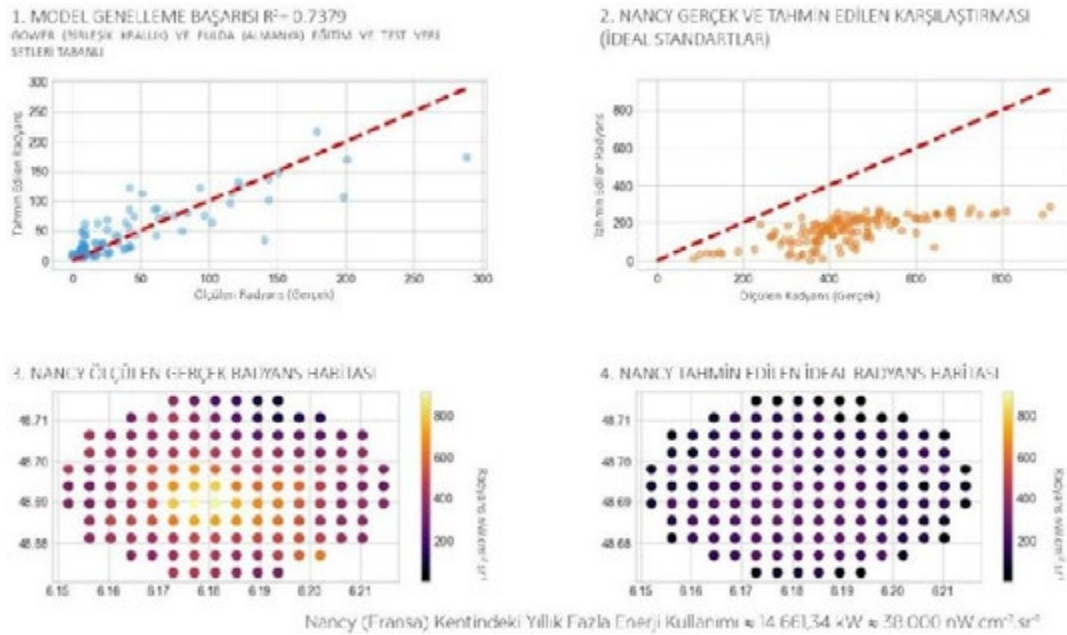
RFR modeli Nancy ve Stuttgart için, eğer “Karanlık Gökyüzü” standartlarında olsaydı, sahip olacakları radyans değerlerini tahmin etmiştir. Gerçek değerler ve tahmin edilen ideal değerler arasında çıkan fark “Fazla Radyans” (Excess Radiance) olarak nitelendirilmiştir.

Nancy için ortaya çıkan fazla radyans değeri, Şekil 5’te görüldüğü üzere yaklaşık olarak 38.500 nW.cm⁻².sr⁻¹, Stuttgart için ortaya çıkan değer ise Şekil 6’dan anlaşılabilir üzere 103.700 nW.cm⁻².sr⁻¹ olarak tahmin edilmiştir. Cao ve Bai (2014)’nin VIIRS’tan elde edilen radyans değerini kW’a çevirmesini de kapsayan çalışmalarına dayanarak, bu iki değer yaklaşık olarak Nancy için 14661,34 kW ve Stuttgart için 39541,21 kW’a karşılık gelmektedir. Stuttgart’ın şehrin büyüklüğü ve kalabalıklığı açısından ortaya çıkan fazla radyans değerinin çok daha büyük olması beklense de, bu değer beklenenden düşük çıkmıştır. Fakat Falchi et al. (2019) tarafından yapılan çalışmada Almanya’nın ışık kirliliği bakımından en düşük değerlere sahip ülkelerden olduğu saptandığından ve Fransa’nın ışık kirliliğinin Almanya gibi ülkelerden daha fazla olduğu göz önünde bulundurulduğunda, çıkan sonuçların var olan durum ile paralel olduğu anlaşılmıştır.

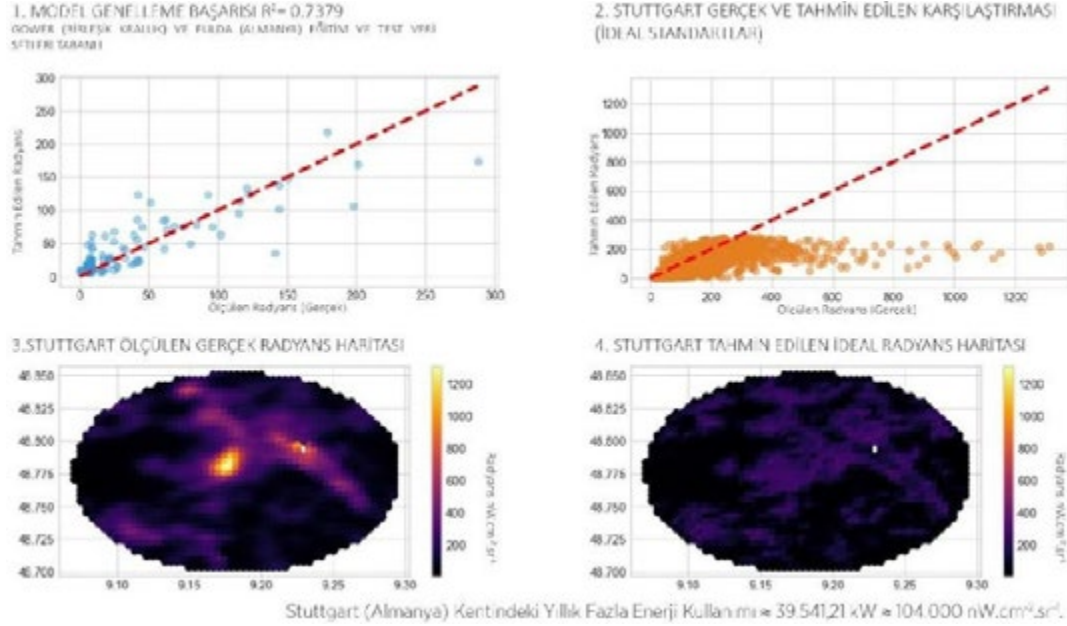
Nancy özelinde, ölçülen radyans değerleri şehir merkezine yaklaştıkça artmakta ve büyük oranda 300 ila 500 nW.cm⁻².sr⁻¹ arasında seyretmektedir (Şekil 5). Buna karşın, şehrin arazi kullanımı, nüfusu,

bina yükseklikleri göz önünde bulundurularak sertifikalı Fulda ve Gower ile kıyaslandığında beklenen değerler $200 \text{ nW.cm}^{-2}.\text{sr}^{-1}$ bandında seyretmektedir.

Stuttgart örneği ele alındığında, morfolojik olarak ve nüfus bağlamında Nancy'ye kıyasla çok daha büyük ölçekli bir şehir olmasıyla beraber, ölçülen değerler 0 ila $600 \text{ nW.cm}^{-2}.\text{sr}^{-1}$ bandında kümelenmiş ve $1300 \text{ nW.cm}^{-2}.\text{sr}^{-1}$ 'e varan değerler gözlemlenmiştir (**Şekil 6**). Bununla birlikte, arazi kullanımı, popülasyon ve bina yükseklik verileri göz önünde bulundurulduğunda, model radyans değerlerinin büyük oranda 0 ila $300 \text{ nW.cm}^{-2}.\text{sr}^{-1}$ bandında seyredeceğini öngörmüştür. Tahmin edilen ve ölçülen değerler arasındaki farklar büyük oranda şehrin merkezi bölgelerinde ortaya çıkmıştır. Fakat, merkezi bölgeler dışında kalan bölgelerin ölçülen değerleri, sertifikalı Fulda ve Gower'den öğrenen RFR modelinin tahminleriyle büyük oranda paralellik göstermiştir.



Şekil 5: Nancy (Fransa) için Gerçek ve Tahmin Edilen Radyans Değerleri ve Radyans Yoğunluk Haritaları



Şekil 6: Stuttgart (Almanya) için Gerçek ve Tahmin Edilen Radyans Değerleri ve Radyans Yoğunluk Haritaları

5. Sonuç

Sonuç olarak, yapay gece ışıklarının (ANTL) kontrolsüz kullanımından kaynaklanan ışık kirliliğinin insan sağlığı, ekolojik sistemler, gökyüzü gözlemleri ve kontrolsüz enerji kullanımı dolayısıyla ekonomi üzerindeki çok boyutlu negatif etkileri, bu çalışmada veri odaklı bir makine öğrenmesi yaklaşımıyla mekânsal ve nicel olarak somutlaştırılmıştır. Karanlık gökyüzü sertifikalı alanlarının ideal aydınlatma koşullarını referans alan RFR modeli aracılığıyla, Nancy ve Stuttgart kentlerindeki aydınlatma verimsizliği sırasıyla yaklaşık 14.661,34 kW ve 39.541,21 kW fazla enerji kullanımı olarak hesaplanmıştır. Elde edilen radyans yoğunluk haritalarında, sirkadiyen ritmi baskılayan ve özellikle şehir merkezlerinde gökyüzü parlamasına sebep olan bu yapay ışık yoğunluğunun belirgin bir biçimde şehir merkezlerinde kümелendiği, merkezi alanların dışında kalan bölgelerde ise referans karanlık gökyüzü taban çizgisine yakınsadığı gözlemlenmiştir. Işık kirliliği olan bölgelerde, Fulda ve Gower gibi ışık kirliliğini azaltma amacı güden sertifikalı alanlardaki yapay ışığın kontrollü kullanılması durumunda şehirlerde ışık kirliliğine bağlı gökyüzü parlaması gibi sorunların hafifletilebileceği öngörülmektedir. Buna bağlı olarak, insan sağlığı ve ekolojik sistemler üzerindeki negatif etkilerin, özellikle sirkadiyen ritim ve gece yaban hayatı bağlamında minimize edilebileceği değerlendirilmektedir. Aynı zamanda bu yaklaşımlar gökyüzü parlamasını azalttığından, yeterli ölçekte yapıldığı takdirde astronomik gözlemlerin kolaylaşabileceği düşünülmektedir. Aydınlatmada harcanan fazla enerji hem çevreyi hem de ekonomiyi olumsuz etkilediğinden, ışık kirliliğine karşı önlemler almak bu iki alandaki negatif sonuçların önüne geçebilecek bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir.

Gelecekte bu çalışmayı geliştirmek için öncelikli olarak ışık kirliliğini etkileyen faktörlere ait verilerin modelde kullanılması amacıyla artırılması gerektiği öngörülmektedir. Özellikle çalışma yapılan alanlara dair sokak aydınlatmaları hakkında bilgilere ulaşmak, modelin daha doğru sonuçlar vermesi bakımından faydalı olacaktır. Ek olarak, model eğitimi ve dolayısıyla doğruluğunu güçlendirmek amacıyla Fulda ve Gower dışında farklı sertifikalı alanlara ait veriler de (Flagstaff, ABD gibi) modelde kullanılabilir. Ayrıca, modeldeki parametre katsayılarının, özellikle yollar, ormanlar gibi nüfus ve bina bakımından seyrek alanların katsayılarının gözden geçirilmesinin özellikle öznetelik önem derecesi üzerinde etkili olabileceği tahmin edilmektedir.

Yazar Beyanı

Bu çalışma Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ) Yapı Bilimleri Yüksek Lisans Programı'nda Prof. Dr. Arzu Gönenç Sorguç tarafından verilen BS 723 Mimarlıkta Makine Öğrenmesi (Machine Learning Applications in Architecture) dersi kapsamında hazırlanan dönem projesi sürecinde ortaya çıkmıştır. Dönem süresince yardımlarından dolayı Prof. Dr. Arzu Gönenç Sorguç'a teşekkür ederim.

Üretken Yapay Zekâ Kullanım Beyanı: Bu çalışmanın hazırlık sürecinde Gemini (Google), Türkçe akademik dilin düzenlenmesi ve metin akıcılığının sağlanmasında, Python tabanlı kodların geliştirilmesinde ve radyans verilerinin enerji birimlerine dönüştürülmesi aşamalarında yardımcı araç olarak kullanılmıştır. Ek olarak, Grammarly'nin desktop versiyonu Türkçe akademik dilin düzenlenmesi ve metin akıcılığının sağlanmasında ek bir araç olarak kullanılmıştır.

Bu çalışmada kullanılan NASA VIIRS veri setleri halka açık olup EarthData Search web sitesinden erişilebilmektedir (NASA VIIRS Land Science Investigator-Led Processing System [SIPS], 2021). Çalışma dahilinde kullanılan ve Avrupa Birliği'nin Copernicus uydusunun Urban Atlas projesi dahilinde elde edilen arazi kullanımı verilerine (European Environment Agency [EEA], 2018) ve bina yüksekliği verilerine (European Environment Agency [EEA], 2012) talebe bağlı olarak erişilebilmektedir.

KAYNAKLAR

- Beier, P. (2006). Effects of artificial night lighting on terrestrial mammals. In C. Rich & T. Longcore (Eds.), *Ecological consequences of artificial night lighting* (pp. 19–42). Island Press.
- Bhattarai, D., & Lucieer, A. (2024). Random forest regression exploring contributing factors to artificial night-time lights observed in VIIRS satellite imagery. *International Journal of Digital Earth*, 17(1), Article 2324941. <https://doi.org/10.1080/17538947.2024.2324941>
- Cao, C., & Bai, Y. (2014). Quantitative analysis of VIIRS DNB nightlight point source for light power estimation and stability monitoring. *Remote Sensing*, 6(12), 11915–11935. <https://doi.org/10.3390/rs61211915>
- DarkSky International. (n.d.-a). *Fulda Dark Sky Community*. DarkSky International. Retrieved January 21, 2026, from <https://darksky.org/places/fulda-dark-sky-community/>
- DarkSky International. (n.d.-b). *Gower National Landscape, Wales*. DarkSky International. Retrieved January 21, 2026, from <https://darksky.org/places/gower-national-landscape-wales/>
- DarkSky International. (2023, October 17). Light pollution wastes energy and money and damages the climate. *DarkSky International*. Retrieved January 21, 2026, from <https://darksky.org/resources/what-is-light-pollution/effects/energy-climate/>
- European Environment Agency (EEA). (2012). *Urban Atlas 2012*. Copernicus Land Monitoring Service. <https://doi.org/10.2909/42690e05-edf4-43fc-8020-33e130f62023>
- European Environment Agency (EEA). (2018). *Urban Atlas 2018*. Copernicus Land Monitoring Service. <https://doi.org/10.2909/fb4dffa1-6ceb-4cc0-8372-1ed354c285e6>
- European Union. (n.d.-a). About Copernicus. Copernicus. <https://www.copernicus.eu/en/about-copernicus>
- European Union. (n.d.-b). Copernicus Land Monitoring Service - Map Viewer. Copernicus. <https://land.copernicus.eu/en/map-viewer?dataset=70903c20fc2a4a90ad200bc95a7557d4>
- European Union. (2012). *Building Height 2012*. Copernicus Land Monitoring Service. <https://land.copernicus.eu/en/products/urban-atlas/building-height-2012>
- Falchi, F., Furgoni, R., Gallaway, T. A., Rybnikova, N. A., Portnov, B. A., Baugh, K., Cinzano, P., & Elvidge, C. D. (2019). Light pollution in USA and Europe: The good, the bad and the ugly. *Journal of Environmental Management*, 248, 109227. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.128>
- Haim, A., & Portnov, B. A. (2013). *Light pollution as a new risk factor for human breast and prostate cancers*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-6033-2>
- Institut national de la statistique et des études économiques. (2024). *Comparateur de territoires – Commune de Nancy (54395)*. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/1405599?geo=COM-54395>
- Institut national de la statistique et des études économiques. (2025, January 1). *Dossier complet – Commune de Nancy (54395)*. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2011101?geo=COM-54395>
- Karlen, M., Benya, J., & Spangler, C. (2012). *Lighting design basics*. Wiley.

MSTAS 26

XX. MİMARLIKTA SAYISAL TASARIM
ULUSAL SEMPOZYUMU

“KAPSAM DIŞI”



TED ÜNİVERSİTESİ

TEDU
ARCH

21 - 23 / 06 / 26
TED ÜNİVERSİTESİ