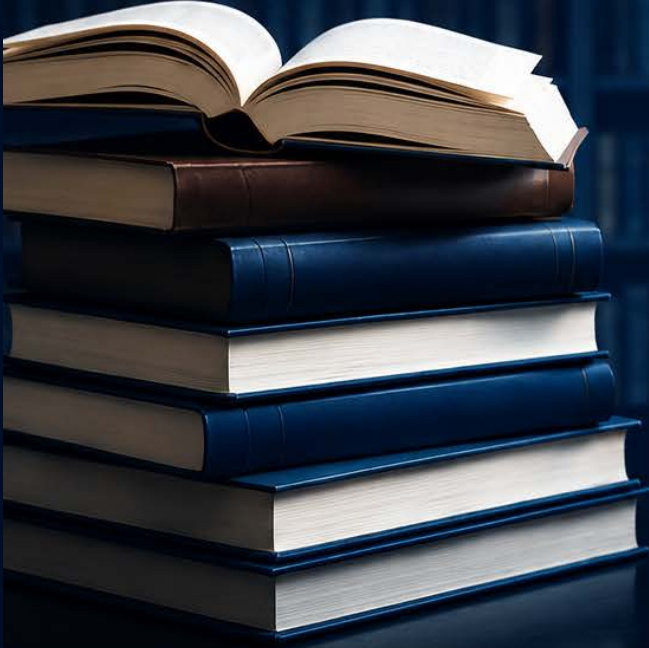


MİMARLIK ALANINDA
GÜNCEL KONULAR VE
AKADEMİK DEĞERLENDİRMELER

Editör: Dr.Öğr.Üyesi Şerife ÖZATA



yaz
yayınları

Mimarlık Alanında
Güncel Konular ve Akademik Değerlendirmeler

Editör

Dr.Öğr.Üyesi Şerife ÖZATA

yaz
yayınları

2026

**Mimarlık Alanında Güncel Konular ve
Akademik Değerlendirmeler**

Editör: Dr.Öğr.Üyesi Şerife ÖZATA

© YAZ Yayınları

Bu kitabın her türlü yayın hakkı Yaz Yayınları'na aittir, tüm hakları saklıdır. Kitabın tamamı ya da bir kısmı 5846 sayılı Kanun'un hükümlerine göre, kitabı yayınlayan firmanın önceden izni alınmaksızın elektronik, mekanik, fotokopi ya da herhangi bir kayıt sistemiyle çoğaltılamaz, yayınlanamaz, depolanamaz.

E_ISBN 978-625-8926-81-1

Ekim 2026 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar/AFYONKARAHİSAR

www.yazyayinlari.com

yazyayinlari@gmail.com

İÇİNDEKİLER

İklim Değişikliği Bağlamında Atıksu Arıtma Tesisleri: Bibliyometrik Bir Değerlendirme ve Mimarlık Perspektifi	1
<i>Tuğba Nur SEZEN TÜRKMEN, Asena SOYLUK</i>	
Beşiktaş Sinan Paşa Camisinin Osmanlı Yapı Teknikleri Bağlamında İncelenmesi.....	34
<i>Sedat AKDOĞMUŞ</i>	
Binalar ve Yapım Sektöründe Yapay Zekâ Destekli Döngüsel Ekonomi Uygulamaları.....	55
<i>Suna KAYA</i>	
Çift Cidarlı Cephe Sistemlerinin Performans Değerlendirilmesinde Kullanılan Simülasyon Araçları..	87
<i>Resul ÖZLÜK, Mehmet TOSUN, Ahmet Selim ALBAYRAK, Mustafa Serhan ÜNLÜTÜRK</i>	
Mimari Cephelerde Müdahale, Hasar ve Bozulmaların İncelenmesi: Dergipark Veritabanındaki Ulusal Literatür Üzerine Sistematik Bir Değerlendirme	107
<i>Minel KURTULUŞ GENÇAY</i>	
Mimarlık Eğitiminde Erişilebilir Konut Tasarımı.....	125
<i>Sebile Merve KORKMAZ</i>	
Optimizasyonun Mimarlıktaki Epistemolojik Konumu: Tarihsel Dönüşüm ve Çok Boyutlu Sınıflandırma	136
<i>Hasan TAŞTAN</i>	

Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) Bağlamında Mimari Tasarım ve Proje Üretimi: İdecad Üzerinden Bir İnceleme.....	165
--	------------

Seda ERDOĞAN

An Analysis of Livestock Structures in Hot Climate Regions from the Perspective of Sustainable Architecture	186
--	------------

Emine SATICI, Yahya MELİKOĞLU

Kars İlindeki Rus Dönemi Yapıları Üzerine Bir Değerlendirme	204
--	------------

Tümay GÜNEŞ, Selim KARTAL

Farklı İklim Koşullarında Dış Duvar ve Çatı U-Değerlerinin Konutlarda Enerji Tüketimine Etkisi ...	225
---	------------

Okan ŞİMŞEK

Carpenter Görsel Sanatlar Merkezi Binasının Le Corbusier'in İlkeleri Bağlamında Değerlendirilmesi	242
--	------------

Elif Merve ERTURAN

An Overview of BIM-Supported Digital Twin Capabilities in Healthcare Facility Management: Cutting-Edge Approaches	258
--	------------

Fatma Handan SARIGÜL

"Bu kitapta yer alan bölümlerde kullanılan kaynakların, görüşlerin, bulguların, sonuçların, tablo, şekil, resim ve her türlü içeriğin sorumluluğu yazar veya yazarlarına ait olup ulusal ve uluslararası telif haklarına konu olabilecek mali ve hukuki sorumluluk da yazarlara aittir."

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ BAĞLAMINDA ATIKSU ARITMA TESİSLERİ: BİBLİYOMETRİK BİR DEĞERLENDİRME VE MİMARLIK PERSPEKTİFİ

Tuğba Nur SEZEN TÜRKMEN¹

Asena SOYLUK²

1. GİRİŞ

İklimin hızla değişmesi küresel sıcaklık artışları, aşırı yağış ve taşkın olayları ile birlikte kuraklıkların sıklık ve şiddetinde artışa yol açarak, su döngüsünü doğrudan etkilemektedir. Bu süreç, tatlı su kaynaklarının mevcudiyeti ve kalitesi üzerindeki baskıları artırmaktadır. Çevresel bir sorun olan su güvenliği kavramı planlama, altyapı ve mekânsal tasarım disiplinleri açısından merkezi bir problem alanına dönüştürmüştür (IPCC, 2023).

Su güvenliğine ilişkin risklerin artmasında iklim değişikliği kadar, hızlanan kentleşme, nüfus artışı ve tüketim baskısı da belirleyici rol oynamaktadır. Güncel küresel izleme raporları, güvenli içme suyu ve sanitasyon hizmetlerine erişimde süregelen kırılganlıkların devam ettiğini göstermektedir. Bu kırılganlıkların kuraklık ve taşkın gibi iklim kaynaklı şoklarla daha da derinleştiğini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda suya erişim, doğal kaynak yönetimi, halk sağlığı, ekonomik sürdürülebilirlik ve kentsel dayanıklılık boyutlarını içeren çok

¹ Doktora Öğrencisi, Gazi Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Mimarlık Bölümü, ORCID: 0000-0002-1245-5577.

² Prof. Dr., Gazi Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Mimarlık Bölümü, ORCID: 0000-0002-6905-4774.

katmanlı bir altyapı meselesi olarak ele alınmaktadır (UN World Water Development Report, 2024).

Bu dönüşen çerçevede atıksu arıtma tesisleri (AAT/WWTP), kentsel yaşamın sürekliliği açısından kritik altyapı bileşenleri olarak öne çıkmaktadır. AAT'ler, alıcı ortamların korunması ve halk sağlığının güvence altına alınması için zorunlu bir arıtım işlevi üstlenirken; enerji tüketimi, süreç kaynaklı emisyonlar ve işletme maliyetleri üzerinden iklim gündemiyle doğrudan ilişki kurmaktadır. Özellikle metan (CH_4) ve diazot monoksit (N_2O) gibi yüksek küresel ısınma potansiyeline sahip sera gazlarının atıksu sistemleriyle ilişkisi açısından bu tesislerin emisyon ve enerji yönetimi perspektifiyle değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymuştur (IPCC, 2023).

Öte yandan atıksu arıtma tesisleri, iklim değişikliğinin etkilerine doğrudan maruz kalan altyapılar arasında yer almaktadır. Aşırı yağış ve taşkın olayları hidrolik yükleri artırarak proses stabilitesini zorlayarak deniz seviyesi yükselmesi kıyı bölgelerindeki tesislerde tuzluluk ve geri basma risklerini büyütebilmektedir. Artan sıcaklıklar ise biyolojik arıtma performansı ve çamur yönetimi süreçlerinde yeni işletme rejimlerini zorunlu kılabilmektedir. Bu yönüyle AAT'ler, iklim değişikliğine hem katkı veren hem de iklim etkilerinden etkilenen çift yönlü bir düğüm noktası olarak konumlanmaktadır. Ayrıca mikroplastikler ve farmasötik/antibiyotik kalıntıları gibi “yeni kirleticiler”in (emerging contaminants) gündeme gelmesi, arıtma süreçlerinin etkinliğini ve alıcı ortam üzerindeki etkilerini yeniden tartışmaya açmıştır. Bu gelişmeler, atıksu arıtımının klasik performans göstergelerinin yanı sıra (BOİ, KOİ, azot ve fosfor giderimi) daha geniş bir çevresel risk ve sürdürülebilirlik çerçevesi içinde ele alınmasını gerekli kılmaktadır.

Bu çalışma, iklim değişikliği-su yönetimi-atıksu arıtma tesisleri kesişiminde oluşan bilimsel üretimi iki aşamalı bir

yaklaşım ile incelemeyi amaçlamaktadır. İlk aşamada, geniş bir veri seti üzerinden bibliyometrik ağ analizleri (ortak yazarlık, anahtar kelime eş-oluşumları, atıf ağları ve bibliyografik eşleşmeler) aracılığıyla alanın genel yapısı ve kavramsal yönelimleri ortaya konulmaktadır. İkinci aşamada ise mimarlık ve yapı çevre perspektifi temelinde daraltılmış bir alt küme üzerinden literatür içerik düzeyinde analiz edilmektedir. Böylece arıtma tesislerinin tasarım, yer seçimi ve dirençlilik bağlamında sunduğu potansiyeller tartışılmaktadır.

Bu çerçevede çalışma;

- iklim değişikliği-atıksu arıtma literatürünün kavramsal kümelerini ve zaman içindeki yönelimlerini,
- baskın araştırma temalarını ve ağ yapılarını,
- mimarlık alanı açısından öne çıkan boşlukları ve tasarımda iyileştirme potansiyellerini birlikte ele alarak, atıksu arıtma tesislerinin iklim çağındaki rolünü disiplinlerarası bir bakışla yeniden konumlandırmayı hedeflemektedir.

2. YÖNTEM

Bu çalışma, atıksu arıtma tesisleri (wastewater treatment plant) literatürünün iklim değişikliği bağlamındaki araştırma örüntülerini ve bu tartışmanın mimarlık/yerleşik çevre alanıyla kesişim noktalarını görünür kılmak amacıyla bibliyometrik analiz yaklaşımını benimsemiştir. Bibliyometri; belirli bir araştırma alanındaki yayın üretimini, atıf örüntülerini ve kavramsal kümelenmeleri nicel göstergeler üzerinden inceleyerek literatürün yapısını ortaya koymaya olanak sağlayan bir yöntemdir (Zupic ve Čater, 2015). Bu kapsamda veri toplama ve analiz süreci iki aşamalı bir iş akışı üzerinden yürütülmüştür. Bu akış süreci Lens platformu ile veri setinin oluşturulması ve

VOSviewer ile bibliyometrik ağ haritalarının üretilmesi şeklindedir.

2.1. Kavramsal Çerçeve

Bu çalışmanın kavramsal çerçevesi, üç temel anahtar kavram etrafında yapılandırılmıştır: atıksu arıtma tesisi, iklim değişikliği ve mimarlık. Öncelikle atıksu arıtma tesisleri (AAT/WWTP), evsel ve/veya endüstriyel kaynaklı atıksuyun fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçler aracılığıyla arıtılarak alıcı ortama deşarj edilebilir veya yeniden kullanım için uygun kaliteye getirildiği altyapı sistemleri olarak tanımlanmaktadır (Ebu-Orf ve ark.,2013). İkinci olarak iklim değişikliği, iklim sisteminin durumunda (ör. ortalama sıcaklıklar, yağış rejimleri ve uç olayların istatistiksel özellikleri) uzun dönemli değişimler olarak ele alınmaktadır. Bu değişimlerin önemli bir bölümünün insan faaliyetleri kaynaklı sera gazı birikimleriyle ilişkili olduğu bilimsel değerlendirmelerde vurgulanmaktadır (IPCC, 2023). Son olarak mimarlık, yalnızca yapı tasarımıyla sınırlı bir pratik alan olarak değil yerleşik çevrenin mekânsal örgütlenmesi, altyapı sistemleriyle ilişkisi, kaynak kullanımı ve riskler karşısında dayanıklılık üretme kapasitesi üzerinden okunabilen disiplinlerarası bir tasarım ve karar verme alanı olarak değerlendirilmektedir (UN-Habitat, 2022). Bu tanımlar doğrultusunda çalışma, AAT'leri iklim çağında hem çevresel performans hem de mekânsal/operasyonel dayanıklılık gereksinimleri üzerinden ele alarak, mimarlık alanının altyapı odaklı dönüşüm süreçlerine sağlayabileceği katkıları literatür haritalaması ve içerik analizi yoluyla tartışmayı amaçlamaktadır.

2.2. Veri Kaynağı ve Veri Setinin Oluşturulması-Lens

Çalışmanın bibliyografik verileri, Lens.org üzerinden yürütülen taramalar sonucunda elde edilmiştir. Lens; akademik yayınları indeksleyen ve sorgu temelli bibliyografik çıktılar üretmeye imkân veren bir platform olup, veri setinin zaman

aralığı ve sorgu terimlerinin bileşimi üzerinden sistematik tarama yürütmeyi mümkün kılmaktadır (Lens.org,2026). Bu çalışmada tarama stratejisi, geniş literatürden başlayarak araştırma odağını temsil eden daha dar bir çekirdeğe ilerleyecek şekilde kurgulanmıştır. Anahtar terimler, araştırma problemini temsil eden üç kavramsal eksene dayalı olarak belirlenmiştir: atıksu arıtma tesisleri (wastewater treatment plant), iklim değişikliği (climate change), yapıli çevre ve mimarlık perspektifi (architecture). Sorgular AND bağlacıyla birleştirilerek kesişim kümesi oluşturulmuş; zaman aralığı 2015–2026 olarak tanımlanmıştır. Bu aşamaların sonunda, çalışma kapsamında bibliyometrik analizlere temel teşkil eden ana veri seti elde edilmiştir (N = 856).

2.3. Verileri Dışa Aktarması ve Analiz Edilmesi

Lens üzerinde elde edilen bibliyografik kayıtlar CSV formatında dışa aktarılmış ve bibliyometrik haritalama için VOSviewer yazılımına aktarılmıştır. VOSviewer; bibliyometrik ağların (ör. ortak yazarlık, anahtar kelime eş-oluşum, bibliyografik eşleşme) oluşturulması ve görselleştirilmesi için yaygın olarak kullanılan bir haritalama aracıdır (Van Eck ve Waltman, 2010). Analizlerde VOSviewer’ın ağ görselleştirmeleri (network visualization), yoğunluk görselleştirmeleri (density visualization) ve gerekli durumlarda zaman katmanlı görselleştirmeleri (overlay visualization) kullanılmıştır.

2.4. Analiz Adımları ve Ölçütler

Çalışmada, veri setinin yapısını farklı açılardan ortaya koymak için aşağıdaki bibliyometrik analizler yürütülmüştür:

1. *Yayın mecraları / kaynak analizi (Sources)*: Dergilerin alan içindeki üretkenliği ve dergiler arasındaki entelektüel yakınlık, bibliyografik eşleşme (bibliographic coupling) yaklaşımıyla incelenmiştir (Zupic ve Čater, 2015).

2. *Ortak yazarlık analizi (Co-authorship)*: Araştırma alanındaki işbirliği örüntülerini görmek amacıyla yazarlar düzeyinde ortak yazarlık ağı oluşturulmuştur.
3. *Anahtar kelime eş-oluşum analizi (Co-occurrence)*: Alanın tematik yapısını ve kavramsal kümelenmelerini belirlemek amacıyla “Author keywords” temel alınarak eş-oluşum ağı üretilmiştir. Ağın şişmesini önlemek için uygun eşik değerleri belirlenmiş ve büyük yazarlı belgeler gerektiğinde analiz dışında bırakılmıştır.
4. *Atıf etkisi (Lens tabanlı)*: Literatürde öne çıkan yüksek etkili çalışmalar, Lens’in atıf göstergeleri üzerinden değerlendirilmiştir.

Bu iş akışı, literatürün hem üretkenlik dağılımlarını (yıllara, kaynaklara, ülkelere göre) hem de ilişki-ağı temelli yapısını (işbirliği, tematik kümelenme, dergiler arası yakınlık) birlikte okumayı hedeflemektedir.

2.5. Kısıtlılıklar

Bu çalışmanın bulguları, kullanılan veri tabanı, anahtar kelime stratejisi ve filtreleme yaklaşımına bağlı olarak belirli kısıtlar içermektedir. Öncelikle veri seti yalnızca Lens.org üzerinden elde edilmiş olup, Web of Science ve Scopus gibi diğer veri tabanlarında yer alan çalışmaların bir kısmı analiz kapsamı dışında kalmış olabilir. İkinci olarak, analiz sürecinde kullanılan anahtar kelimeler belirli bir terminolojik çerçeveye dayanmakta olup, biyomalzemeler alanında kullanılan alternatif kavramlar (örneğin bio-based materials, biodegradable materials vb.) veri setinin kapsamını etkilemiş olabilir. Üçüncü olarak, mimarlık ve yapı çevre perspektifini temsil etmek amacıyla uygulanan alan filtreleri, disiplinler arası çalışmaların bir kısmının dışlanmasına neden olmuş ve alt kümenin sınırlı sayıda yayına indirgenmesine yol açmıştır. Ayrıca, bibliometrik analiz yöntemi literatürün

kavramsal ve ilişkisel yapısını ortaya koymakla birlikte, çalışmaların içeriksel derinliğini ve metodolojik çeşitliliğini tam olarak yansıtamamaktadır. Son olarak, çalışma 2015–2026 yılları ile sınırlandırılmış olup, yeni dönem literatür kapsamı irdelenmek istenmiştir.

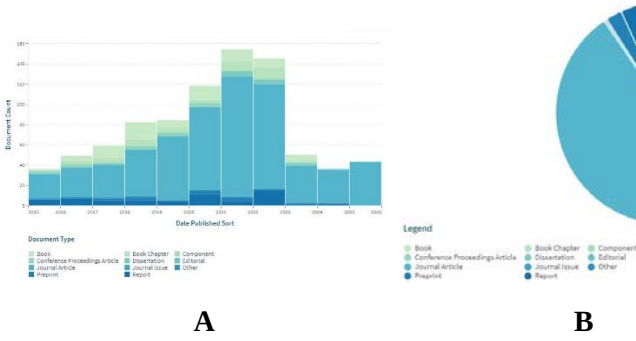
3. BULGULAR

Bu bölümde sunulan bibliyometrik bulgular, Lens platformu üzerinden yürütülen aşamalı tarama stratejisiyle oluşturulan veri setine dayanmaktadır. Araştırma odağı, atıksu arıtma tesisleri (wastewater treatment plant) literatürünün iklim değişikliği bağlamındaki araştırma örüntülerini ortaya koymak ve bu tartışmanın mimarlık/yapılı çevre alanı ile kesişim düzeyini görünür kılmaktır. Bu doğrultuda, geniş literatürden başlanarak kavramsal kesişimi temsil eden daha dar bir çekirdeğe doğru ilerlenmiştir. İlk olarak “wastewater treatment plant” anahtar kelimesiyle yapılan taramada 2015–2026 yılları arasında 63.183 yayın tespit edilmiştir. İkinci adımda iklim odağını güçlendirmek amacıyla aynı yıl aralığında “wastewater treatment plant” AND “climate change” sorgusu yürütülmüş ve sonuç sayısı 7.250 olarak belirlenmiştir. Son adımda yapılı çevre perspektifini temsil etmek üzere “architecture” terimi sorguya dahil edilmiş; böylece 2015-2026 döneminde “wastewater treatment plant” AND “climate change” AND “architecture” sorgusu ile 856 kayıttan oluşan nihai veri setine ulaşılmıştır (N = 856). Bu veri seti üzerinden yayın mecraları (dergiler/kaynaklar), işbirliği yapıları (ortak yazarlık), tematik örüntüler (anahtar kelime eş-oluşum ağları) ve Lens tabanlı atıf etkisi göstergeleri analiz edilmiştir.

3.1. Yayın Sayısı ve Yayın Türleri Analizi

Lens üzerinde “wastewater treatment plant” AND “climate change” AND “architecture” sorgusu ile 2015–2026 aralığında 856 kayıt elde edilmiştir. Yayın üretiminin 2015’ten

itibaren kademeli biçimde arttığı, 2020 sonrası belirgin bir ivmelenme gösterdiği ve 2021–2022 döneminde zirveye ulaştığı görülmüştür. 2022’de 140’ı aşan yayın sayısının 2023’te 40’lı rakamlara gerilediği gözlenmiştir. Analize göre, 2023’te 36 makale, 2 tez, 1 bildiri, 6 kitap be 2 kitap bölümü yayınlamışken, 2024’te 33 makale ve 1 rapor ile sınırlı kalmıştır. 2025 yılında ise sadece 43 adet makale yayınlamıştır. Bu desen, konu alanının özellikle 2020 sonrasında “sürdürülebilirlik-iklim etkileri-su yönetimi” ekseninde hızla genişlediğine, ancak son yıllarda alt temalara ayrışma ve/veya indeksleme dinamiklerine bağlı bir plato/daralma oluşabileceğine işaret etmektedir. (Şekil 1/A-B)



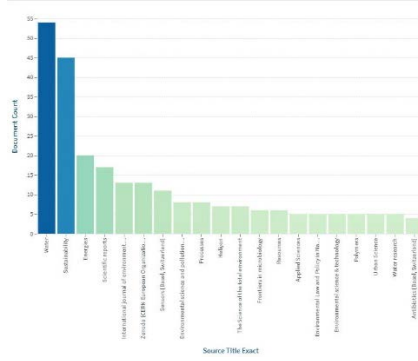
Şekil 1. (A)“Scholarly Works Over Time” Grafiği (B) “Publication Types” Grafiği (Lens.org sitesinden elde edilmiştir.)

Yayın türleri incelendiğinde, kayıtların çok büyük bölümünün hakemli dergi makalesi (%71) niteliğinde olduğu; bunun ardından konferans bildirileri ve diğer türlerin (kitap bölümü, rapor, ön baskı vb.) daha sınırlı bir paya sahip olduğu görülmüştür. Bu dağılım, alanın ağırlıklı olarak dergi temelli akademik üretim üzerinden ilerlediğini göstermektedir.

3.2. Öne Çıkan Kaynaklar ve Belge Temelli Bibliyografik Eşleme Analizi

Lens üzerinde elde edilen sonuçlar, veri setinde yayınların en yoğun biçimde Water ve Sustainability dergilerinde toplandığını; bunu enerji/proses ve çevre bilimleri odaklı

dergilerin izlediğini göstermiştir. Bu dağılım, araştırma alanının su odaklı bir çekirdeğe sahip olduğunu, ancak sürdürülebilirlik ve mühendislik/proses literatürüyle güçlü biçimde kesiştiğini düşündürmüştür. (Şekil 2)

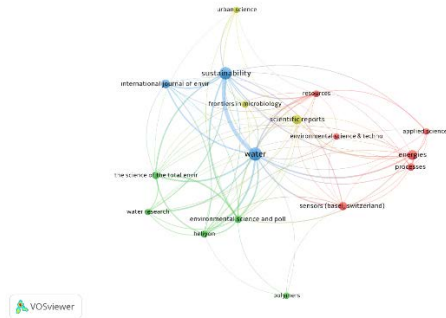


Şekil 2. “Top Journals” Grafiği (Lens.org sitesinden elde edilmiştir.)

Bu çalışmada dergiler arasındaki entelektüel yakınlık, bibliyografik eşleşme (bibliographic coupling) yaklaşımıyla incelenmiştir. Bibliyografik eşleşme, iki kaynağın aynı referanslara birlikte atıf yapma düzeyi üzerinden aralarındaki benzerliği ortaya koymaktadır. Ayrıca alanın kuramsal/tematik omurgasının hangi yayın mecralarında yoğunlaştığını görünür kılmaktadır (Zupic ve Cater,2015).

Analiz, VOSviewer yazılımı kullanılarak Type of analysis: Bibliographic coupling, Unit of analysis: Sources ve Counting method: Full counting seçenekleriyle yürütülmüştür (Van Eck ve Waltman, 2010). Veri setinde toplam 384 kaynak (source) tespit edilmiş; bir derginin haritaya dahil edilmesi için en az 5 doküman koşulu tanımlanmış ve bu eşik sonucunda 19 dergi ağ haritasına dahil edilmiştir. Haritada düğüm (node) büyüklüğü ilgili derginin veri setindeki yayın sayısı, düğümler arasındaki bağ (link) kalınlığı ise iki derginin ortak referanslara dayanma düzeyi (toplam bağ gücü / total link strength) ile ilişkilendirilmiştir. Renklerle gösterilen kümeler (clusters),

benzer referans havuzunu paylaşan dergilerin bir araya gelerek alan içindeki alt tematik/kuramsal yakınlıkları yansıttığını düşündürmektedir. Elde edilen ağ yapısı, Water ve Sustainability dergilerinin ağıın çekirdeğinde konumlandığını ve farklı kümeler arasında köprü rolü üstlendiğini göstermiştir. Buna karşılık, Energies-Processes-Applied Sciences ekseninde daha teknik/proses odaklı dergilerin belirgin bir alt kümeye ayrıştığı; çevre bilimleri ve su kalitesi odağındaki dergilerin (Science of the Total Environment, Environmental Science and Pollution Research, Water Research) ise başka bir yakınlık kümesi oluşturduğu gözlenmiştir. Bu bulgu, literatürde su-sürdürülebilirlik ekseninin disiplinler arası bir çekirdek oluşturduğunu ve enerji/proses odaklı yayınlarla güçlü fakat kısmen ayrışan bir ilişki kurduğunu işaret etmektedir (Şekil 3).

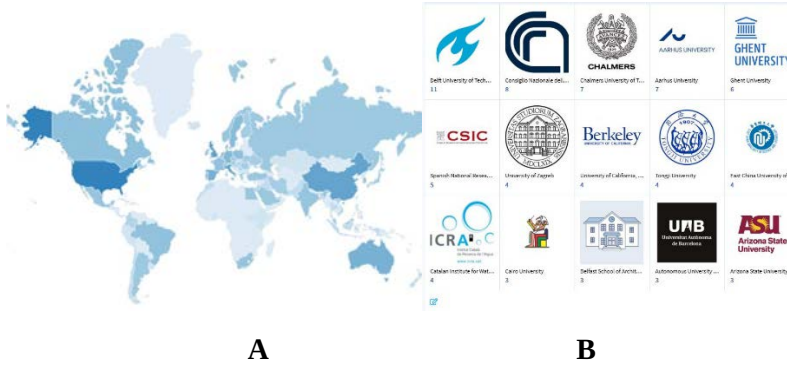


Şekil 3. Dergiler düzeyinde bibliyografik eşleşme (bibliographic coupling) ağı (VOSviewer; sources; full counting; min. doküman=5)

3.3. Coğrafi ve Kurumsal Dağılım Analizi

Lens analizinde “Most active Countries/Regions” görselleştirmesi, taranan yayınların ülke/region bazında üretkenlik dağılımını göstermektedir. Harita tonunun koyulaşması ilgili ülkenin yayın hacminin arttığına işaret etmektedir. Görsel inceleme, üretkenliğin özellikle Kuzey Amerika (ABD başta olmak üzere) ve Doğu Asya (Çin)

ekseninde yoğunlaştığını; Avrupa’da ise çok sayıda ülkenin orta yoğunlukta katkı verdiğini göstermektedir. Avustralya ve Kanada gibi ülkeler ikinci düzeyde belirginleşirken; Hindistan, Brezilya ve Rusya gibi geniş araştırma ekosistemine sahip ülkeler de haritada görünür üretkenlik sergilemektedir. Bu dağılım, çalışılan temanın (su/arıtma–iklim–yapılı çevre kesişimi) küresel ölçekte çok-disiplinli bir araştırma alanına dönüştüğünü ve üretimin belirli merkezlerde yoğunlaşmakla birlikte farklı bölgelere yayıldığını düşündürmektedir (Şekil 4/A).



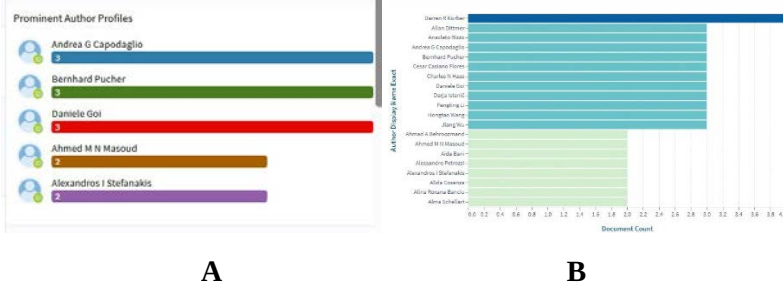
Şekil 4. (A)“Most active Countries/Regions” Grafiği (B) Top Institutions Logo Grid (Lens.org sitesinden elde edilmiştir.)

Kurumsal dağılımda öne çıkan kuruluşlar arasında Delft University of Technology (11), Consiglio Nazionale delle Ricerche (8), Chalmers University of Technology (7), Aarhus University (7) ve Ghent University (6) yer almaktadır. Ayrıca CSIC (5), University of Zagreb (4), UC Berkeley (4), Tongji University (4) gibi kurumlar dikkat çekmektedir. Bu dağılım, altyapı-çevre-kent çalışmaları güçlü olan araştırma merkezlerinin tematik kümeyi sürüklediğini göstermektedir. (Şekil 4/B)

3.4. Yazar Üretkenliği ve Ortak Yazarlık Analizi

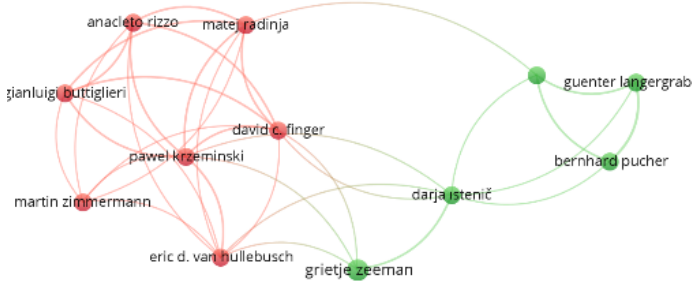
En üretken yazarlar grafiği, yazar başına yayın sayısının genellikle düşük-orta düzeyde (2-4 yayın) yoğunlaştığını göstermektedir. Bu durum, konunun çok geniş bir araştırmacı

havuzuna yayıldığını; ancak çekirdek birkaç yazarın tek başına baskınlık kurmadığını düşündürmektedir. (Şekil 5/A-B)



**Şekil 5. (A)Most Active Authors / Prominent Author Profiles
(B)Most Active Authors Grafiği (Lens.org sitesinden elde edilmiştir.)**

Bu çalışmada yazarlar arası işbirliği yapısını ortaya koymak amacıyla VOSviewer kullanılarak ortak yazarlık (co-authorship) analizi gerçekleştirilmiştir. Analizde bir yazarın ağa dahil edilebilmesi için minimum yayın sayısı 3 olarak belirlenmiş, atıf eşiği 0 tutulmuştur. Bu seçimle toplam 3536 yazar arasından 37 yazar eşik koşulunu sağlamış; görselleştirme aşamasında en temsil edici yazarlar seçilerek ağ haritası oluşturulmuştur (Şekil 6). Haritada düğüm büyüklükleri yazarların üretkenliğini (yayın sayısını), düğümler arasındaki çizgiler ortak yayın ilişkisini; çizgi kalınlıkları ise işbirliği yoğunluğunu göstermektedir. Elde edilen ağ yapısı iki ana kümeye ayrılmakta ve kümeler arası sınırlı sayıda bağ, alan içindeki işbirliğinin belirli ekipler etrafında yoğunlaştığını düşündürmektedir. Bazı düğümlerin kümeler arasında köprü rolü üstlenmesi, farklı araştırma grupları arasında bilgi/işbirliği aktarımının belirli yazarlar üzerinden gerçekleştiğine işaret etmektedir.



Şekil 6. co-authorship analiz haritası

3.5. Anahtar Kelime Eşleşme Analizi

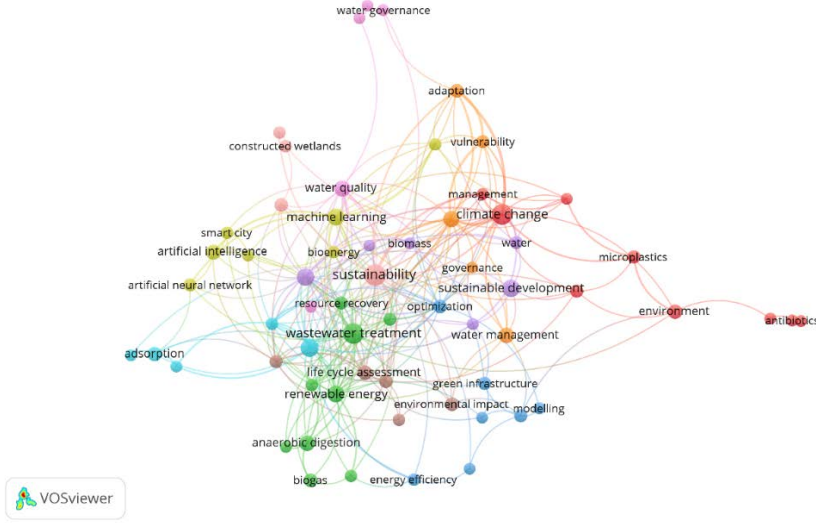
VOSviewer ile anahtar kelime eş-oluşum analizi yürütülmüştür. Bu analizde Author keywords temel alınmış, sayım yöntemi olarak fractional counting kullanılmış, anahtar kelimeler için minimum tekrar eşiği 5 olarak belirlenmiştir. Bu eşik altında 5080 anahtar kelimeden 66 tanesi eşik değerini sağlamış ve ağ haritasına dâhil edilmiştir. Büyük yazar ekiplerinin ağı şişirmesini azaltmak amacıyla 25 yazardan fazla yazarlı belgeler dışarıda bırakılmıştır. Nihai ağda 62 öge, 10 küme, 269 bağlantı ve toplam bağlantı gücü 340 elde edilmiştir.

Ağ haritasında “sustainability”, “climate change” ve “wastewater treatment” merkezî düğümler olarak öne çıkmaktadır. Bunlara eklemlenen ana temalar;

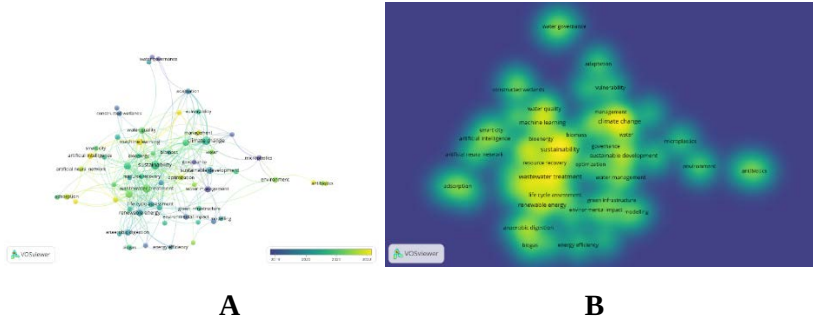
- circular economy-resource recovery,
- machine learning / artificial intelligence-optimization,
- water quality-governance-management,
- renewable energy-anaerobic digestion-biogas / energy efficiency ve
- microplastics-antibiotics

gibi kirleticiler etrafında kümelenmektedir. Overlay ve density görselleştirmeleri, çekirdek temaların “sürdürülebilirlik

ve artırma” etrafında yoğunlaştığını; bunun üzerine veri-temelli yöntemler ve yeni kirleticiler gibi alt temaların eklemlendiğini göstermektedir. (Şekil 7, Şekil 8/A/B)



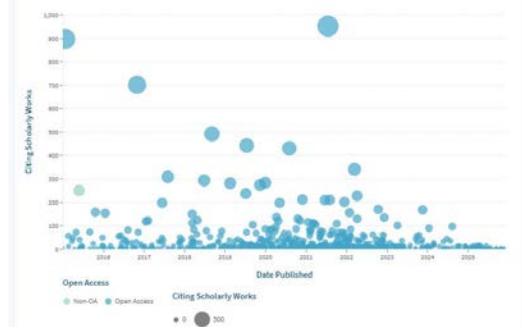
**Şekil 7. Network Haritası (Author keywords- fractional counting-
min tekrar 5)**



**Şekil 8. A: Overlay Haritası B: Density Visualization (Author
keywords- fractional counting-min tekrar 5)**

3.6. Ağırlıklı Atıf Analizi

Bu çalışmada, veri setinin atıf etkisini ve alan içinde öne çıkan çalışmaları belirlemek amacıyla Lens.org platformunda sunulan “Top Cited Scholarly Works Over Time” çıktısı incelenmiştir. Bulgular, en çok atıf alan yayınların yalnızca atıksu arıtımı odağında kalmadığını göstermiştir. Konunun adsorpsiyon temelli boya giderimi, yeni kirleticiler, antimikrobiyal direnç, kontrollü yeraltı suyu beslemesi (managed aquifer recharge) ve CO₂ metanasyonu gibi birbiriyle ilişkili alt alanlara yayıldığını göstermiştir (Şekil 9). Bu kapsamda, atık sudan boyaların farklı adsorbanlar kullanılarak giderimine yönelik kritik derleme çalışması 958 atıf ile ilk sırada yer almaktadır (Dutta ve ark., 2021). Bunu, gıdalarda bisfenol A (BPA) varlığının halk sağlığı açısından risklerini değerlendiren EFSA yürütücü özeti 896 atıf ile izlemektedir (EFSA CEF Panel, 2015). Üçüncü sırada ise çevrede antimikrobiyal direnç olgusunu ve bu konunun çevresel düzenleyiciler açısından önemini ele alan derleme çalışma 706 atıf ile öne çıkmaktadır (Singer ve ark., 2016). Ayrıca, yeraltı suyu rezervlerinin kontrollü yenilenmesine ilişkin altmış yıllık küresel ilerlemeyi özetleyen çalışma 491 atıf almış (Dillon ve ark., 2019) ve fotokatalitik CO₂ metanasyonunun temelleri ile uygulamalarını ele alan çalışma 446 atıf ile dikkat çekmiştir (Ulmer ve ark., 2019). Genel olarak bu sonuçlar, veri setinin entelektüel etkisinin ileri arıtım ve adsorpsiyon teknolojileri, risk odaklı çevresel sağlık değerlendirmeleri ve iklim-su-enerji kesişimindeki süreçler tarafından şekillendiğini göstermektedir (Şekil 9).



Şekil 9. Top Cited Scholarly Works Over Time

4. LİTERATÜR PERSPEKTİFİ

Bulgular bölümünde yer alan ağ analizleri ve dağılım çıktıları, alanın genel yapısını değerlendirmek amacıyla 856 kayıtlık çekirdek veri seti üzerinden yürütülmüştür. Bununla birlikte, çalışmanın mimarlık ve yapıli çevre perspektifini daha doğrudan tartışabilmek amacıyla literatür değerlendirmesi aşamasında veri setine Field of Study temelli bir alan filtresi eklenmiştir. Bu filtre kapsamında “Architecture”, “Landscape architecture” ve “Atmosphere (architecture and spatial design)” alanları seçilmiş ve sonuç kümesi 7 kayda düşürülmüştür (N = 7). Literatür perspektifi bölümünde, bu daha dar alt kümedeki çalışmalar içerik düzeyinde incelenerek tablolastırılmış; arıtma tesisleri-iklim değışikliğı-mimarlık kesişiminde öne çıkan temalar, yöntemler ve tartışma başlıkları yapılandırılmış biçimde sunulmuştur.

Bibliyometrik analiz ve alan filtresi sonucunda belirlenen 7 yayın, mimarlık ve yapıli çevre perspektifinin atıksu arıtma tesisleri ve iklim değışikliğı literatürüyle kurduğı ilişkinin niteliğini daha ayrıntılı biçimde incelemek amacıyla Tablo 1’de yapılandırılmış olarak sunulmuştur. Söz konusu tablo, bu çalışmaların künyesel bilgilerini (yazar, yıl, yayın türü), yöntemsel yaklaşımlarını, coğrafi bağlamlarını ve çalışmaların

kendi özetlerinden türetilen temel içerik odaklarını karşılaştırmalı biçimde bir araya getirmeyi amaçlamaktadır. Tablo, literatürde mimarlık alanının bu kesişime hangi başlıklar üzerinden dâhil olduğunu, hangi yöntemlerle üretim yaptığını ve atıksu arıtma altyapılarını doğrudan ya da dolaylı olarak nasıl ele aldığını şeffaf ve izlenebilir bir biçimde ortaya koymak üzere hazırlanmıştır. Bu bağlamda tablo analitik bir okuma için zemin oluşturan özetleyici bir çerçeve sunmaktadır. Çalışmanın devamında yer alan metinlerde ise bu yayınlar tek tek ve eleştirel bir bakışla, atıksu arıtma tesisleri-iklim değişikliği-mimarlık ilişkisi bağlamında ayrıntılı olarak tartışılmaktadır.

Tablo 1. Atıksu arıtma tesisleri-iklim değişikliği-mimarlık kesişiminde belirlenen çalışmaların yöntemsel ve tematik özeti

Abstract	Method
The effects of climate change and the rapid growth of societies often lead to water scarcity and inadequate water quality, resulting in a significant number of diseases. The digitalization of infrastructure and the use of Digital Twins are presented as alternatives for optimizing resources and the necessary infrastructure in the water cycle. This paper presents a framework for the development of a Digital Twin platform for a wastewater treatment plant, based on a microservices architecture which optimized its design for edge computing implementation. The platform aims to optimize the operation and maintenance processes of the plant's systems, by employing machine learning techniques, process modeling and simulation, as well as monitoring the information generated in the plant.	Literature Review-Case Study
This thesis considers the architectural potential of hidden hydraulic systems and the cycle of water within cities with a view to acknowledging water's invisible, yet essential movements through an urban area. A combined sewage system dating from the late 19th century in older parts of Ottawa causes untreated wastewater to be discharged directly into the river at sixteen locations. Architecture at the Outfalls proposes the design of sixteen habitable spaces at these locations to materialize the collision of hidden hydraulic infrastructures and everyday paths, and engineering systems and the public realm. The architectural interventions also reveal water as an essential resource for living and the Ottawa River as a visible Two of the most commonly discussed responses to climate change are mitigation and adaptation. It is necessary that the world continues to mitigate greenhouse gases in the atmosphere to prevent the most severe effects of climate change, but it is just as important that adaptation measures are implemented to prepare for the unmitigable effects. With the ongoing Israeli occupation—now reaching its fifty-third year—Palestinians in the Occupied Palestinian Territory (OPT) are prohibited from accessing resources and pursuing necessary measures to repair their existing infrastructure or prepare for the environmental effects of climate change. As such, this Comment sheds light on the Palestinian voice, struggle, and experience while examining climate impacts under occupation by analyzing the environmental, political, legal, and humanitarian impacts of climate change on Context	Qualitative Research through Design

Abstract		Method				
Waste materials are a serious environmental issue and an enormous problem for the environment. This material's discharge and reuse have become necessary. Reusing components and recycling waste into raw materials for the making of building materials are the two ways waste in the construction industry can be recycled. Building industry has incorporated wastes for energy, economic and environmental protection. The most recent type of construction materials that are mixed with different kinds of waste (By-product, Agricultural, Construction and demolition (C&D) materials, Transportation industry waste, etc.) can propose a probability of consuming disposal materials and lessen the environment pollution. Recycled materials in Egypt have potential to improve the environment and construction sector according to Egypt Vision 2030, but need further investigation. In order to manage waste effectively and sustainably, this study investigates how different kinds of recyclable materials may be used in building initiatives as a green concept that eventually minimizes environmental pollution. The results confirm by implementation of recycled materials in Architecture is of a great benefit towards a greener future.		Literature Review, Conceptual/Descriptive Analysis				
Urban environments contain and are part of a wide range of interconnected complex systems, including infrastructures and services. Rapid and often uncontrolled urbanization triggers distributive inequities and environmental injustices, posing urgent and interconnected challenges that demand inter- and transdisciplinary solutions. Despite architecture's commitment to 'sustainability', its central role in urban systems and their dynamics as well as the discipline's intersections with other disciplines remain relatively little explored. In this contribution, we focus on the water–energy–sanitation (WES) nexus in Brazil, drawing from transdisciplinary workshops, scoping reviews, and systems mapping. We propose a framework for the analysis of urban Review, Systems identification of nexus components, nodes, and their interconnections. Our findings indicate that a nexus perspective allows us to identify challenges in urban nexuses, productive intersections with the knowledge and approaches from other disciplines, and possible solutions in collaboration with non-academic stakeholders. We advocate for an expanded professional field and a redefined sense of responsibility within the discipline.		Transdisciplinary Workshop, Scoping Review, Systems Mapping				
No	Article	Publication	Year	Authors	Keywords / Field of Study	Country
1	Digital Twin Platform for Water Treatment Plants Using Microservices Architectures	Journal article	2024	Carlos Rodríguez-Alonso, Iván Penagos Regueiro, Óscar...	digital twin ,hmi ,artificial intelligence ,edge computing ,microservices ,water treatment plant	Switzerland
2	Architecture at the Outfalls: Sixteen Constructions for the Ottawa River	dissertation	2016	Julien Hebert	Outfall ,Architecture ,Realm ,Civil engineering ,Geography ,Environmental planning ,Hydrology ,Agriculture)	Ontario
3	Climate Change and the Vulnerable Occupied Palestinian Territories	journal article	2021	Lena Freij	Effects of global warming ,Climate change ,Natural resource economics ,Political science ,Greenhouse gas ,Atmosphere (architecture and spatial design) ,Adaptation	California

Method	No	Article	Publication	Year	Authors	Keywords /	Count
Research Synthesis / Critical Reflection (Habitat on Portfolio), STS-based Analysis, Technology Assessment Reflection	4	Utilization of Recycled and Waste Materials in Architecture: A Green Concept in Egypt	journal article	2023	Nermin Mokhtar Farrag, Vitta Abdel Rehim Ibrahim	building construction ,wastes ,architecture form ,sustainability ,friendly environment building materials ,recycling	Egypt
Literature Review, Conceptual/Descriptive Analysis	5	An Experiment in Transdisciplinary Systems Mapping: Architecture and the Water-Energy-Sanitation Nexus in Brazil	journal article	2024	Marco Aurélio Soares de Castro ^{1,*} , Norma Valencio ² , Deljana Iossifova ^{3,*} , Cristine Diniz Santiago ⁴ , Luciana Ziglio ⁵ , Arthur Valencio ⁶ , Erica	water-energy-sanitation (wes) nexus ,transdisciplinary approach ,systems mapping ,urban nexus ,brazil ,water ,energy ,sanitation	Brazil

No	Punlicati on	Publicati on Info	Year	Authors	Keywords / Field of Study	Country	Abstract
6	Habilitation Thesis: Sustainable Technology- Studies on User Innovation, Social Learning and Innovation in Networks	report	2016	Michael Ornetzeder	user-innovation social-learning innovation-networks habilitation-thesis	Avusturya	Dept. of Landscape, Spatial and Infrastructural Sciences Institute of Landscape Architecture (ILA) Department für Raum, Landschaft und Infrastruktur Institut für Landschaftsarchitektur (ILA) Head of Institute: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Lilli Licka SUSTAINABLE TECHNOLOGY Studies on User Innovation, Social Learning and Innovation Networks Habilitation Thesis University of Natural Resources and applied Life Sciences, Vienna Universität für Bodenkultur – BOKU Wien Submitted by Michael Ornetzeder The aim of the habilitation project was to conclude and critically discuss ten years of sociological research in the field of sustainable technology. In the introductory text of this collection three main aspects of my work are discussed: 1) The concept of sustainability is introduced as both a normative orientation and a new way to frame and organise research. 2) Own research in the field of Science and Technology Studies is discussed in respect of its contribution to our understanding of user innovation, social learning in technological development, and innovation networks in the field of sustainable technology. 3) In the third part the introductory text reports on experiences with several technology assessment activities. In this combination the presented work can be seen as an attempt to contribute to what Sismondo (2008) has called ‘ engaged programme’ of Science and Technology Studies.
7	The Redundant City	Book	2020	Norbert Kling	Urbanism ,Narrative ,Situational ethics ,Architecture ,Real estate ,Geography ,Sociology ,Economic geography ,Epistemology ,Political science	Deutschland	Dynamic processes and conflicts are at the core of the urban condition. Against the background of continuous change in cities, concepts and assumptions about spatial transformations have to be constantly re-examined and revised. Norbert Kling explores the rich body of narrative knowledge in architecture and urbanism and confronts this knowledge with an empirically grounded situational analysis of a large housing estate. The outcome of this twofold research approach is the sensitising concept of the Redundant City. It describes a specific form of collectively negotiated urban change.

Rodríguez-Alonso, Peña-Regueiro ve García (2024) tarafından geliştirilen çalışma, iklim değişikliği etkileri ve

toplumsal büyüme dinamiklerinin tetiklediği su kıtlığı ve yetersiz su kalitesi gibi risklerin, su döngüsündeki altyapı sistemlerinin daha etkin yönetimini zorunlu kıldığı ön kabulünden hareket etmektedir. Bu çerçevede yazarlar, su altyapısının dijitalleşmesini ve özellikle Dijital İkiz (Digital Twin) yaklaşımını; kaynakların optimizasyonu, işletme verimliliği ve karar destek mekanizmalarının güçlendirilmesi açısından kritik bir alternatif olarak ele almaktadır. Çalışma, bir atıksu arıtma tesisi için mikroservis mimarisi temelli ve edge computing uyumlu bir dijital ikiz platformunun geliştirilmesine yönelik bir çerçeve önermektedir. Ayrıca platformun temel hedefini tesisin işletme ve bakım süreçlerini (O&M) iyileştirmek ve karar verme süreçlerini hızlandırmak olarak tanımlamaktadır. Bu kapsamda makine öğrenmesi teknikleri, süreç modelleme ve simülasyon bileşenleri ile tesisin dijital temsili güçlendirilmektedir. Böylece anomali tespiti, öngörücü bakım ve işletme optimizasyonu gibi işlevlerin mümkün kılındığı vurgulanmaktadır.

Çalışmanın mimarlık ve yapı çevre ile kurduğu ilişki, doğrudan “bina tasarımı” düzeyinde değil; altyapının mekânsal/kurumsal bir bileşeni olarak ele alınması üzerinden okunmalıdır. Bu noktada makalenin önemli katkılarından biri, Dijital İkiz ile BIM’in birbirine indirgenemeyeceğini açık biçimde ayırmasıdır: BIM modelleri çoğunlukla geometrik ve parametrik bilgiyi içeren statik temsiller iken, Dijital İkiz fiziksel sistemle gerçek zamanlı iletişim kuran dinamik bir yapı olarak tanımlanmaktadır. Bununla birlikte yazarlar, dijital ikiz platformunun karar desteğini güçlendirmek için BIM modellerinde bulunan bilgidен yararlanmayı özellikle vurgulamaktadır. Bu vurgu, AAT’lerin yalnızca teknik tesisler değil; kentsel sistem içinde yer alan, arazi kullanımı-erişilebilirlik-operasyonel güvenlik-risk yönetimi gibi bileşenleriyle yerleşik çevrenin parçası olan altyapılar olarak yeniden okunmasına imkân tanır. Diğer bir ifadeyle çalışma,

iklim değışikliğı karşısında AAT'lerin dayanıklılığının yalnızca proses verimliliğıyle sınırlı olmadığını; dijitalleşme yoluyla izlenebilirlik, senaryo temelli işletme ve karar süreçlerinin mekânsal/kurumsal koordinasyonu gibi tasarım ve planlama alanlarını da dolaylı biçimde etkileyebileceğini göstermektedir. Böylece Dijital İkiz yaklaşımı, AAT'leri iklim riskleri karşısında kent ölçeğinde su-enerji-çevre etkileşimlerini yöneten ve yönetimi görünür kılan çok katmanlı bir yapılı çevre bileşeni olarak ele almayı desteklemektedir.

Hebert'in (2016) tez çalışması, kentsel su altyapısının çoğu zaman görünmez kalan bileşenlerinden biri olan deşarj (outfall) noktalarını mimarlık tartışmasının odağına taşımaktadır. Çalışma, Ottawa'nın eski bölgelerinde birleşik kanalizasyon sisteminin belirli koşullarda arıtılmamış/az arıtılmış akışları nehre aktarması olgusunu bir problem bağlamı olarak ele almaktadır. Bu altyapısal "eşik"leri mühendislik performansının yanı sıra kentsel deneyim, kamusalılık ve farkındalık üretimi üzerinden yeniden düşünmeyi amaçlamıştır. Bu doğrultuda tez, Ottawa Nehri boyunca konumlanan outfall noktalarında on altı adet yaşanabilir mekânsal müdahale önerisi geliştirerek; altyapı ile gündelik kentsel güzergâhlar, teknik sistemler ile kamusal alan ve suyun yaşamsal bir kaynak olarak kentsel mekânla ilişkisi arasında yeni bir arayüz kurmayı hedeflemektedir.

Bu yaklaşım, doğrudan arıtma prosesini ele alan atıksu altyapısının mekânsal ve toplumsal boyutunu görünür kıldığı için AATP-iklim değışikliğı bağlamına özgün bir katkı sunmaktadır. İklim değışikliğı; aşırı yağışların artışı, taşkın rejimlerinin değışimi ve kentsel drenaj yüklerinin yükselmesi gibi etkiler üzerinden birleşik sistemlerde taşkın/deşarj olaylarını artırabilmektedir. Bu durum su kalitesi, ekosistem sağlığı ve kentlilerin risk algısı üzerinde belirleyici olmaktadır. Hebert'in önerdiği mimari müdahaleler, altyapı kararlarının kentsel yaşamın içinde karşılıkları olduğunu vurgulayarak iklim

uyumunun (adaptation) teknik kapasite artırımı kadar kamusal iletişim, mekânsal temsil ve toplumsal sahiplenme boyutlarıyla da ele alınması gerektiğini ima etmektedir. Böylece tez, atıksu altyapısını su yönetiminin iklim baskıları altında yeniden örgütlendiği bir dönemde, mimarlığın altyapı-kamusal alan-çevresel farkındalık kesişiminde kurabileceği rolü tartışmaya açmaktadır.

Freij (2021), iklim değişikliği literatüründe sık tartışılan iki temel yanıt olan azaltım (mitigation) ve uyum (adaptation) yaklaşımlarını çıkış noktası olarak, uyum kapasitesinin her bağlamda “teknik çözümlere erişim” ile belirlenmediğini; kimi coğrafyalarda siyasal ve yönetsel kısıtların uyumu yapısal biçimde sınırlayabildiğini göstermektedir. Makale, İşgal Altındaki Filistin Toprakları’nda (OPT) iklim etkilerinin; su kaynakları, su kalitesi, tarım ve insani kırılganlık gibi başlıklarda hissedildiğini, ancak bu etkilerin belirleyiciliğinin altyapıların onarılamaması, kaynaklara erişim kısıtları ve yönetsel engeller nedeniyle katlanarak arttığını tartışmaktadır. Yazar, özellikle “uyum önlemlerinin uygulanabilmesi için” mevcut altyapının iyileştirilmesi ve planlama kapasitesinin güçlenmesi gerektiğini; buna karşın işgal koşullarının bu imkânları sınırladığını vurgulamaktadır.

Bu çerçeve, atıksu arıtma tesisleri (AAT) açısından okunduğunda, çalışmanın doğrudan proses/teknoloji tartışması yürütmese dahi, sanitasyon altyapısının iklim uyumu içindeki kritik rolünü güçlü biçimde görünür kıldığı söylenebilir. Çünkü AATP’ler; su kalitesinin korunması, halk sağlığı risklerinin azaltılması, enerji-su döngüsünün yönetilmesi ve ekstrem hava olayları karşısında hizmet sürekliliğinin sağlanması gibi işlevleriyle iklim değişikliğine uyumun temel bileşenlerinden biridir. Freij’in ortaya koyduğu argüman, iklim uyumunun yalnızca “tesis kapasitesi artırımı” ya da “yeni teknoloji yatırımı” ile sınırlı olmadığını; altyapının işletilebilirliği, bakım-onarım

yapılabilirliği ve müdahale edilebilirlik kapasitesi gibi alanların en az teknik parametreler kadar belirleyici olduğunu işaret etmektedir. Bu bakımdan çalışma, AATP literatüründe sıkça ihmal edilebilen “politik-ekolojik kısıtlar” katmanını güçlendiren bir referans niteliği taşımaktadır.

Mimarlık/yapılı çevre perspektifinde ise makale, iklim değişikliğini altyapı, mekânsal adalet ve çevresel adalet ekseninde yeniden çerçevelemektedir. OPT bağlamında su ve sanitasyon altyapısına erişimin sınırlandırılması, kentlerin ve yerleşimlerin çevresel risklere karşı kırılganlığını artırmaktadır. Dolayısıyla iklim uyumu, mekânsal planlama ve altyapı yatırımlarından bağımsız düşünülememektedir. Bu yaklaşım, mimarlık ve yerleşik çevre alanı açısından iki açıdan önemlidir: altyapı sistemlerinin (su, sanitasyon, enerji) kent morfolojisi ve yaşam kalitesiyle kurduğu ilişkileri görünür kılması, iklim uyumunun “tasarım/planlama” boyutunun, eşitsiz güç ilişkileri ve yönetim kısıtları nedeniyle nasıl sınırlanabildiğini göstermesidir. Böylece Freij (2021), AAT-iklim tartışmasına doğrudan teknik bir katkı sunmaktan çok, iklim uyumu ve altyapı dayanıklılığının sosyal-siyasal belirleyenlerini vurgulayarak, mimarlık literatürünün altyapıya ilişkin eleştirel okumalarını destekleyen bir kavramsal zemin sağlamaktadır.

Farrag ve Ibrahim’in (2023) çalışması, iklim değişikliği tartışmasını yapılı çevrenin çevresel yükünü azaltma hedefi doğrultusunda atık ve geri dönüştürülmüş malzemelerin mimarlıkta kullanımı temasına odaklanmaktadır. Makale, atıkların çevresel bir sorun olarak büyüyen etkisini ve inşaat sektörünün bu problemdeki payını vurgulayarak; yan ürünler, tarımsal atıklar, inşaat ve yıkıntı (C&D) atıkları ve ulaşım/endüstri kaynaklı atıkların yapı malzemelerine dönüştürülmesi fikrini “yeşil mimarlık” çerçevesinde tartışmaktadır. Çalışmada, bu yaklaşımın çevresel kirliliği azaltma ve sürdürülebilir yapı üretimine katkı sağlama

potansiyeli öne çıkarılmaktadır. Mısır bağlamında ise “Egypt Vision 2030” hedefleriyle uyumlu bir yönelim olarak değerlendirilmektedir.

Bu bulgu Bibliyometrik filtreleme sonucunda “architecture” teriminin kesişim kümesine girmesi, genel ölçekte sürdürülebilirlik/çevresel etki azaltımı ve özellikle malzeme döngüsellliği gibi temalar üzerinden gerçekleşmektedir. Nitekim bu çalışma da, AATP’leri doğrudan tartışmasa bile, iklim değişikliği bağlamında arıtma tesisleriyle ilişkili iki kritik kavrama dolaylı bir katkı sunmaktadı; döngüsel ekonomi ve kaynak geri kazanımı. Çünkü AATP’ler güncel literatürde arıtma yapan yapılar olmanın yanı sıra kaynak geri kazanımı ile (enerji, besin, malzeme) üretebilen altyapılar olarak ele alınmaktadır. Bu perspektiften bakıldığında, mimarlık alanındaki “geri dönüştürülmüş malzeme” odağı, arıtma tesisleri bağlamında da çamur/yan ürünlerin değerlendirilmesi, yapı malzemesi döngüsü ve tesislerin kentsel metabolizma içindeki rolü gibi başlıklara kavramsal köprü kurabilecek bir zemin üretmektedir.

Castro ve arkadaşları (2024), iklim değişikliği ve hızlı kentleşmenin tetiklediği kırılganlıkların birbirine bağlı sistemler üzerinden okunması gerektiğini savunarak çalışmayı su-enerji-sanitasyon (WES) nexus’u çerçevesinde konumlandırmaktadır. Bu yaklaşım, atıksu arıtma tesislerini (AATP) kentsel su döngüsü, enerji tüketimi/üretimi, hizmet sürekliliği ve sosyal adalet tartışmalarıyla birlikte ele alan bütüncül bir bakış üretmektedir. Çalışmada önerilen yöntem, transdisipliner atölyeler, kapsam taraması (scoping review) ve sistem haritalama adımlarını birleştirerek; su, enerji ve sanitasyon bileşenlerinin düğümlerini ve aralarındaki ilişkileri görünür kılmaktadır.

Bu makalenin mimarlık/yapılı çevre literatürüne katkısı, AATP’leri doğrudan tasarım nesnesi olarak ele almasından çok; mimarlığın kentsel karmaşık sistemlerdeki rolünü, altyapı

hizmetlerinin mekânsal örgütlenmesi ve yönetimi üzerinden yeniden çerçevelemesinde ortaya çıkmaktadır. Nexus haritalama, altyapı kararlarının (ör. arıtma kapasitesi, enerji girdileri, dağıtım adaleti, hizmet erişimi) mekânsal karşılıklarını tartışmaya açtığı için mimarlık disiplininin “yapı ölçeği” ile sınırlı kalmayan, altyapı-kamusal alan-sosyoteknik sistem kesişiminde konumlanan bir araştırma alanına işaret etmektedir. Dolayısıyla çalışma, iklim değişikliği bağlamında AATP’lerin dayanıklılığını tartışırken kent ölçeğinde hizmet sürekliliği, kırılgan grupların erişimi ve altyapı kararlarının mekânsal sonuçları gibi mimarlıkla ilişkili katmanları da görünür kılmaktadır.

Ornetzeder (2010) çalışması, sürdürülebilir teknolojilerin gelişimini belirleyen sosyoteknik dinamikleri tartışan bir çerçeve sunmaktadır. Çalışmanın odak noktası, kullanıcı yeniliği (user innovation), sosyal öğrenme (social learning) ve inovasyon ağları (innovation networks) gibi kavramlar üzerinden, sürdürülebilirlik hedeflerinin teknoloji geliştirme süreçlerini nasıl yönlendirdiğini ve bu süreçlerde farklı aktörlerin nasıl rol üstlendiğini açıklamaktır. Bu bakımdan metin, sürdürülebilirliğin performans artışı, çok aktörlü koordinasyon, bilgi paylaşımı ve kurumsal araçların (intermediaries) desteğiyle biçimlenen bir dönüşüm alanı olduğunu vurgular.

Bu yaklaşım, AATP-iklim değişikliği bağlamına dolaylı fakat metodolojik açıdan değerli bir katkı sağlamaktadır. İklim değişikliği koşullarında AATP’lerin dönüşümü (enerji verimliliği, kaynak geri kazanımı, dijitalleşme, dirençlilik vb.) çoğu zaman “en iyi teknolojinin seçimi” gibi dar bir teknik karara indirgenme riski taşımaktadır. Oysa Ornetzeder’in sunduğu sosyo-teknik perspektif, arıtma altyapısının yenilenmesini; yerel yönetimler, işletmeciler, düzenleyici kurumlar, teknoloji sağlayıcılar ve kullanıcılar arasında gerçekleşen öğrenme süreçleri ve ağ ilişkileri içinde okumayı mümkün kılmaktadır. Böylece AATP’lerin iklim uyumuna yönelik kapasite artırımını,

kurumsal öğrenme, paydaş koordinasyonu ve yeniliklerin yayılımı üzerinden biçimlenen bir “geçiş süreci” olarak tartışmaya zemin hazırlamaktadır.

Mimarlık/yapılı çevre açısından ise çalışma, altyapı ve teknolojinin kent yaşamındaki rolünü tartışırken, tasarım disiplinlerinin çoğu zaman gözden kaçırdığı bir noktayı güçlendirmektedir. Sürdürülebilir altyapı dönüşümü, mekânsal yer seçimi ve form tasarımı ile yeniliklerin benimsenmesi, işletme kültürü, kullanıcı davranışları ve kurumsal kapasite gibi katmanlarla birlikte değerlendirilmelidir.

Kling (2020), kentlerin doğasını sürekli değişim, dinamik süreçler ve çatışmalar üzerinden kavramsallaştırarak, mekânsal dönüşümün yerleşik varsayımlarının her seferinde yeniden sorgulanması gerektiğini ileri sürmektedir. Yazar, mimarlık ve kentçilikte biriken anlatsal bilgi birikimini (narrative knowledge), büyük ölçekli bir konut yerleşkesi üzerinden yürütülen ampirik/durumsal (situational) analiz ile karşı karşıya getirmektedir. Bu iki katmanlı okumanın çıktısı olarak “Redundant City” kavramını, kolektif müzakereyle şekillenen özgül bir kentsel değişim biçimini açıklayan “duyarlılaştırıcı (sensitizing) bir kavram” olarak önerir.

Bu kitabın atıksu arıtma tesisleri (AATP) ve iklim değişikliği bağlamındaki katkısı iklim baskıları altında kentsel altyapıların (su, atıksu, enerji vb.) dönüşümünün nasıl müzakere edildiğini, hangi çatışmaların doğduğunu ve değişimin hangi anlatılarla meşrulaştırıldığını okumaya yarayan kuramsal bir zemin sağlamasından kaynaklanmaktadır. İklim değişikliği, altyapı sistemlerinde kapasite, güvenlik, süreklilik ve kaynak kullanımı gibi başlıklarda yeni öncelikler üretirken; AATP’ler de yalnızca “işleyen teknik tesisler” değil, kentte yer seçimi, çevresel risk, kamusal algı, yatırım kararları ve yönetim süreçleri üzerinden toplumsal müzakerenin parçası hâline gelmektedir.

Kling'in önerdiği çerçeve, bu dönüşümü çatışma-değişim ilişkisini görünür kılan bir okuma sunarak AATP'lerin iklim uyumu bağlamında ele alınabileceği daha geniş bir mimarlık/kentçilik tartışması kurmaktadır.

Mimarlık ve yapıli çevre perspektifinde ise kitap, altyapı odaklı müdahalelerin (ör. arıtma tesislerinin genişlemesi, yeni arıtma tipolojileri, kıyı/nehir arayüzlerinde altyapı kararları) kentsel anlatılar, temsil biçimleri ve kolektif uzlaşa süreçleri içinde şekillenen mekânsal pratikler olarak ele alınmasına imkân vermektedir.

5. SONUÇ

Bu çalışma, iklim değışikliğı-su yönetimi-atıksu arıtma tesisleri kesişiminde üretilen bilimsel literatürü, bibliyometrik analiz ve içerik temelli nitel okuma yaklaşımlarını birleştirerek incelemiştir. Özellikle mimarlık ve yapıli çevre perspektifinin bu alandaki konumunu görünür kılmayı amaçlamıştır. Elde edilen bulgular, iklim değışikliğı ile atıksu arıtma sistemleri arasındaki ilişkinin literatürde büyük ölçüde mühendislik, çevre bilimleri ve enerji odaklı ele alındığını göstermiştir. Buna karşılık mimarlık ve mekânsal tasarım disiplinlerinin katkısının sınırlı ve parçalı kaldığını ortaya koymaktadır.

Bibliyometrik ağ analizleri, iklim değışikliğı bağlamında atıksu arıtma tesislerinin; sera gazı emisyonları, enerji tüketimi, kaynak geri kazanımı, yeni kirleticiler ve dirençlilik başlıkları etrafında yoğunlaştığını göstermiştir. Ancak bu temaların büyük ölçüde teknik performans, proses optimizasyonu ve işletme verimliliğı ekseninde ele alınmasına rağmen tesislerin mekânsal yerleşimi, kentsel bağlamla ilişkisi ve mimari tasarım kararlarının iklim uyumuna katkısı gibi konuların ikincil düzeyde kaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, atıksu arıtma tesislerinin hâlen çoğu çalışmada teknik altyapılar olarak konumlandırıldığını ve yapıli

çevreyle kurdukları ilişkilerin yeterince sorgulanmadığını göstermektedir.

İçerik düzeyinde incelenen ve mimarlık alanı odağında daraltılan sınırlı sayıdaki yayın ise, bu boşluğun nedenlerine ve potansiyel açılımlarına işaret etmektedir. Bu çalışmalar, atıksu arıtma tesislerinin iklim çağında yalnızca arıtım yapan kapalı sistemler değil kentsel metabolizmanın parçası, kamusal algı ve çevresel farkındalık üretme kapasitesine sahip mekânsal altyapılar olarak yeniden ele alınabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, mimarlık literatüründe bu yaklaşımın henüz sistematik bir araştırma hattına dönüşmediği görülmüştür. Çoğu çalışmanın dolaylı, kavramsal ya da bağlamsal katkılarla sınırlı kaldığı anlaşılmaktadır.

Bu bulgular, iklim değişikliğinin giderek derinleştiği bu dönemde atıksu arıtma tesislerinin rolünün yeniden düşünülmesini gerekli kılmaktadır. AAT'ler, bir yandan iklim değişikliğine katkı sunabilen emisyon ve enerji yoğun altyapılar olarak diğer yandan iklim etkilerine doğrudan maruz kalan ve kentsel hizmet sürekliliği açısından kritik öneme sahip sistemler olarak çift yönlü bir düğüm noktası oluşturmaktadır. Bu çift yönlü konum, mimarlık disiplinine; tesislerin yer seçimi, kentsel entegrasyonu, mekânsal organizasyonu, esneklik ve uyarlanabilirlik kapasitesi gibi başlıklarda önemli sorumluluklar ve araştırma alanları açmaktadır.

Bu çalışma, iklim değişikliği-atıksu arıtma tesisleri literatüründe mimarlık ve yapı çevre perspektifinin henüz yeterince temsil edilmediğini, ancak disiplinlerarası bir yaklaşımla ele alındığında önemli bir potansiyel barındırdığını ortaya koymaktadır. Bibliyometrik haritalama ve nitel içerik analizi birlikte değerlendirildiğinde, mimarlık alanının gelecekte, atıksu arıtma tesislerini teknik yapılar olmanın dışına çıkararak iklim uyumunun mekânsal araçları olarak ele alan araştırma ve

tasarım yaklaşımlarını geliştirmesi gerektiği görülmektedir. Bu doğrultuda, çalışmanın bulgularının hem akademik literatüre hem de iklim çağında altyapı odaklı tasarım ve planlama tartışmalarına katkı sunması beklenmektedir.

KAYNAKÇA

- Castro, M. A. S. de, Valencio, N., Iossifova, D., Santiago, C. D., Ziglio, L., Valencio, A., Pugliesi, E., Gonçalves, J. C., Cheung, E., & Sengupta, U. (2024). *An experiment in transdisciplinary systems mapping: Architecture and the water–energy–sanitation nexus in Brazil*. *Architecture*, 4(1), 73–88. <https://doi.org/10.3390/architecture4010006>
- Dillon, P., Stuyfzand, P. J., Grischek, T., Lluria, M., Pyne, R. D. G., Jain, R. C., Bear, J., Schwarz, J., Wang, W., Fernandez, E., Stefan, C., Pettenati, M., van der Gun, J., Sprenger, C., Massmann, G., Scanlon, B. R., Xanke, J., Jokela, P., Zheng, Y., & Rossetto, R. (2019). Sixty years of global progress in managed aquifer recharge. *Hydrogeology Journal*, 27(1), 1–30. <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1841-z>
- Dutta, S., Gupta, B., Srivastava, S. K., & Gupta, A. K. (2021). Recent advances on the removal of dyes from wastewater using various adsorbents: A critical review. *Materials Advances*, 2(14), 4497–4531. <https://doi.org/10.1039/D1MA00354B>
- EFSA Panel on Food Contact Materials, Enzymes, Flavourings and Processing Aids (CEF). (2015). Scientific opinion on the risks to public health related to the presence of bisphenol A (BPA) in foodstuffs: Executive summary. *EFSA Journal*, 13(1), 3978. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2015.3978>
- Farrag, N. M., & Ibrahim, V. A. R. (2023). *Utilization of recycled and waste materials in architecture: A green concept in Egypt*. *Arts and Architecture Journal*, 4(2), 215–235. <https://doi.org/10.21608/aaj.2024.235489.1043>

- Freij, L. (2021). *Climate change and the vulnerable occupied Palestinian territories*. *UCLA Journal of Environmental Law and Policy*, 39(1), 65–88. <https://doi.org/10.5070/L5391052536>
- Hebert, J. (2016). *Architecture at the outfalls: Sixteen constructions for the Ottawa River* (Unpublished master's thesis). Carleton University.
- IPCC. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC. DOI:10.59327/IPCC/AR6-9789291691647
- Kling, N. (2020). *The redundant city: A multi-site enquiry into urban narratives of conflict and change*. transcript Verlag. <https://doi.org/10.14361/9783839451144>
- Lens.org. (n.d.). *The Lens*. <https://www.lens.org>
- Ornetzeder, M. (2010). *Sustainable technology: Studies on user innovation, social learning and innovation networks* (Habilitation thesis/ITA Paper). Austrian Academy of Sciences, Institute of Technology Assessment (ITA). <https://doi.org/10.1553/ita-pa-MO-10-1>
- Rodríguez-Alonso, C., Peña-Regueiro, I., & García, Ó. (2024). *Digital twin platform for water treatment plants using microservices architecture*. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 24(5), 1568. <https://doi.org/10.3390/s24051568>
- Singer, A. C., Shaw, H., Rhodes, V., & Hart, A. (2016). Review of antimicrobial resistance in the environment and its relevance to environmental regulators. *Frontiers in Microbiology*, 7, 1728. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01728>

- Ebu-Orf. M., G. Tchobanoglous, G., Stensel, H. D., Tsuchihashi, R., Burton, F. L., Pfrang. B., (2013). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery* (5th ed.). McGraw-Hill Education, ISBN: 0073401188
- Ulmer, U., Dingle, T. L., Duchesne, P. N., Morris, R. H., Tavasoli, A., Wood, T. E., & Ozin, G. A. (2019). Fundamentals and applications of photocatalytic CO₂ methanation. *Nature Communications*, 10, 3169. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10996-2>
- UN-Habitat. (2022). *World cities report 2022: Envisaging the future of cities*. United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat). https://unhabitat.org/sites/default/files/2022/06/wcr_2022.pdf
- UN World Water Development Report: <https://www.unesco.org/reports/wwdr/en/2024/s>
- Van Eck, N. J., Waltman, L. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 84(2), 523–538. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>
- Zupic, I., Čater, T. (2015). Bibliometric methods in management and organization. *Organizational Research Methods*, 18(3), 429–472. <https://doi.org/10.1177/1094428114562629>

BEŞİKTAŞ SİNAN PAŞA CAMİSİNİN OSMANLI YAPI TEKNİKLERİ BAĞLAMINDA İNCELENMESİ

Sedat AKDOĞMUŞ¹

1. GİRİŞ

Sinan Paşa Külliyesi, Vezir-i Âzam Rüstem Paşa'nın kardeşi ve Kaptan-ı Derya Sinan Paşa tarafından inşa ettirilmiştir. Hırvat asıllı bir Hristiyan çocuğu olarak Saraybosna'da doğan Sinan Paşa, Enderun'da yetişmiş; Hersek Sancak Beyliği'nin ardından 1548 yılında Kaptan-ı Derya olmuştur. 1556 yılında tamamlanan caminin inşası sırasında hastalanarak vefat eden Sinan Paşa'nın naaşı, inşaatın devam etmesi nedeniyle Üsküdar'daki Mihrimah Sultan Camii haziresine defnedilmiştir (Gündüz, 2009, s. 232). Beşiktaş'ta Barbaros Bulvarı ile Beşiktaş Caddesi'nin birleştiği noktada yer alan külliye, Mimar Sinan tarafından tasarlanmış olup cami, medrese, mektep ve çifte hamamdan oluşmaktadır (Necipoğlu, 2013, s. 557). Külliye, Mimar Sinan'ın İstanbul'da "kapudan paşalar için Galata surlarının dışındaki kıyı şeridinde tasarladığı anıtsal cami külliyelerinin" ilk örneklerinden biri olarak değerlendirilmektedir (Necipoğlu, 2013, s. 557).

Külliye'nin konumu, plan şeması, mimari biçimi, malzeme ve yapım tekniklerine ilişkin tercihler, baninin toplumsal ve siyasal statüsüyle ilişkili olarak şekillenmiştir. İnşaatta ekonomik almalı duvar tekniğinin tercih edilmesi, medrese hücrelerinin kubbesiz tasarlanması ve şadırvan avlusu revaklarını örten

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Samsun Üniversitesi, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Mimarlık Bölümü. ORCID: 0000-0001-7683-4157.

saçakların sade tutulması, külliye'nin mimari programında belirli bir ölçülülüğün benimsendiğini göstermektedir. Necipoğlu, bu tercihlerin Sinan Paşa'nın vezirlere kıyasla daha düşük statüsünün mimari düzeyde ifade edilmesiyle ilişkili olduğunu belirtmektedir (Necipoğlu, 2013, s. 563). Dolayısıyla külliye'de kullanılan yapım teknikleri ve mimari tercihler, yalnızca yapısal gereklilikler çerçevesinde değil, aynı zamanda Osmanlı'nın mimari, siyasi ve toplumsal kültürü bağlamında değerlendirilmelidir. Sinan Paşa Camii'nin, kendisinden önce Kaptan-ı Derya olarak görev yapan Barbaros Hayreddin Paşa'nın türbesinin karşısında konumlandırılması da bu bağlamda önem taşımaktadır. Ayrıca yapı, XVI. yüzyıl Osmanlı yapı tekniklerinde mekânsal geometrinin deneysel bir araç olarak kullanıldığı geçiş niteliğindeki örneklerden biri olarak değerlendirilmektedir (Kuban, 1994, s. 108).

Bu çalışmanın amacı, Klasik Dönem Osmanlı mimarisinin önemli örneklerinden biri olan Sinan Paşa Camii'nde Mimar Sinan tarafından uygulanan yapım tekniklerini incelemek ve bu tekniklerin yapının mimari kuruluşu ile ilişkisini ortaya koymaktır. Çalışmanın kapsamını caminin taşıyıcı sistemi, üst örtüsü, cephe ve pencere düzeni, kullanılan malzemeler, yapım teknikleri ve mimari bezeme unsurları oluşturmaktadır. Bu kapsamda yapı, mevcut mimari veriler ve literatürdeki değerlendirmeler birlikte ele alınarak incelenmiştir. Çalışmada literatür taramasının yanı sıra yapı üzerinde gerçekleştirilen yerinde gözlem, ölçüm ve fotoğraf çalışmaları kullanılmış; elde edilen veriler plan, cephe ve yapı elemanları üzerinden değerlendirilmiştir. Böylece Sinan Paşa Camii'nin yapım tekniklerinin mimari kuruluşla ilişkisi ortaya konulurken, bu tercihlerin dönemin mimari, siyasi ve kültürel bağlamı içerisindeki anlamının değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

2. SİNAN PAŞA KÜLLİYESİNİN GEÇMİŞTEN GÜNÜMÜZE DURUMU

Çok parçalı birimlerden oluşan Sinan Paşa Külliyesi'nden günümüze cami ve medrese ulaşmıştır. Caminin inşa tarihine ilişkin bilgi, avluda bulunan dört sütunlu şadırvanın su haznesindeki kitabede 1555–1556 yılları olarak verilmektedir (Şekil 1). Külliyenin günümüze ulaşmayan birimi olan mektebin ise Hüseyin Ayvansarâyî'nin *Hadîkatü'l-cevâmi* adlı eserinde, 1641–1642 yıllarında Kösem Sultan tarafından yaptırıldığı belirtilmektedir (Ayvansarâyî, 1987; 172). Külliyenin cami ve medrese birimlerinin özgün kentsel doku içerisindeki konumu, 1910 tarihli Alman Mavileri ve 1922 tarihli Pervititch haritalarından izlenebilmektedir (Şekil 1). Pervititch haritasında (1922–1945) cami ve medresenin biçimsel özellikleri daha ayrıntılı biçimde okunabilmekte; medresenin kırma çatısı, caminin kubbesi ve 1940'larda yıkılan müezzin mahfili görülebilmektedir. Alman Mavileri haritasında ise yapıların yer aldığı kentsel dokudan ziyade yolların ön plana çıktığı görülmektedir.



Resim 1. Camii avlusunda yer alan kitabe (Kültür Envanteri, 2025)



Şekil 1. Solda Pervititch haritası (Jacques Pervititch, 1922–1945; SALT arşivi). Sağda Alman Mavileri haritası (Alman Mavileri, 1913–1914; İBB Atatürk Kitaplığı).

1956–1957 yılları arasında Beşiktaş–Tophane yolu genişletme çalışmaları kapsamında, külliye'nin günümüze ulaşmayan bir diğer birimi olan Mimar Sinan Çifte Hamamı yıktırılmıştır (Gündüz, 2009, s. 232–234). Külliye'nin diğer yapılarından oldukça uzakta, Hayrettin İskeleyi Sokak ile Beşiktaş Caddesi'nin kesiştiği noktada yer alan hamamın, Sinan Paşa'nın ölümünden sonra tamamlandığı kabul edilmektedir (Gündüz, 2009, s. 233). Sâî Mustafa Çelebi'nin *Tezkiretü'l-bünyân* adlı eserinde “Beşiktaş'ta Sinan Paşa Hamamı” şeklinde kaydedilen yapı, Beşiktaş deresinin üzerinden geçtiği köprü'nün yakınında konumlanması sebebiyle “Köprü Hamamı” adıyla da anılmıştır (Sâî Mustafa Çelebi, 2003, s. 108). Çifte hamam olarak tasarlanan yapı, kadın ve erkeklere ayrılmış iki bağımsız bölümden oluşmaktadır (Yoldaş, 2020). Erkekler kısmına, yol seviyesinde yer alan, sundurmalı ve iki yanında sütun bulunan bir girişten ulaşılırken kadınlar kısmının girişi yapının güneybatısında yer almaktadır (Yoldaş, 2020). Külliye'nin hamam biriminin yaklaşık konumu Şekil 2'te gösterilmiştir; yapının kadın ve erkek bölümlerinden oluşan plan şeması ise Şekil 3'te görülmektedir.

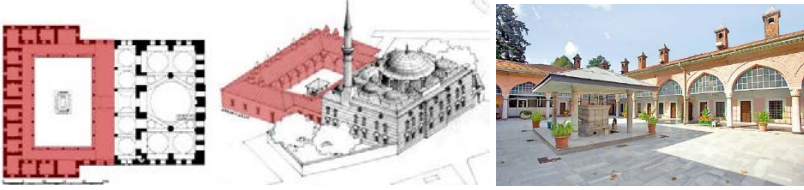


Şekil 2. Sinanpaşa külliyesinin Mimar Sinan çifte hamam yapısının yıkılmadan önce bulunduğu yer.



Şekil 3. Sırasıyla, Sol üst: Hamamı'nın 1910-1934 arasındaki bir fotoğrafı. Sağ üst: Sinan Paşa çifte hamam planı (Yoldaş, 2020).

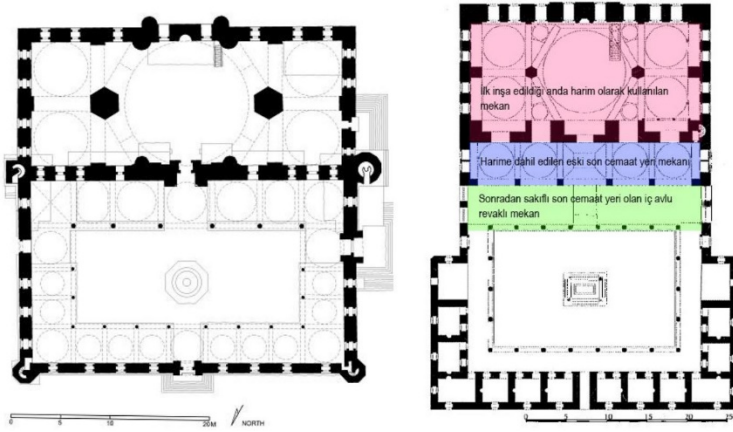
Külliyenin günümüze ulaşan medrese birimi, geçirdiği çeşitli onarımlar sonucunda bazı özgün özelliklerini kaybetmiştir. Mimar Sinan'ın medrese odalarını avlu revaklarının arkasına yerleştirdiği ilk örneklerden biri olan yapı, caminin kuzeyinde U planlı ve dersanesiz olarak tasarlanmıştır. Bu düzenleme, Mimar Sinan'ın Edirnekapı Mihrimah Sultan ve Halep Hüsrev Paşa cami-medreseleriyle benzerlik göstermekte, daha erken bir örneği ise 1492 tarihli İnegöl İshak Paşa Külliyesi'nde görülmektedir (Türkiye Turing ve Otomobil Kurumu, 2015). Toplam 14 odadan oluşan medresenin duvarları tuğla-taş almaşık teknikte inşa edilmiş, iç avluyu çevreleyen ahşap çatılı revakların açıklıkları kaş kemerlerle düzenlenmiştir. Medrese, 1936–1937 yıllarında kuzey girişinde, 1972–1974 yıllarında ise avlu ve odalarında onarımdan geçirilmiştir (Metin, 2010). Bu müdahaleler sonrasında revak açıklıkları demir doğrama ile kapatılmıştır. 2009 yılında kiremit kaplı olduğu görülen üst örtü, 2011 yılındaki restorasyonda kurşunla kaplanmıştır (Gündüz, 2009). Söz konusu müdahaleler, medresenin özgün biçimsel özelliklerinde değişikliklere neden olmuştur.



Şekil 4. Sinanpaşa külliyesinde medrese planı ve cami-medrese ilişkisi (Archnet). Sağda medrese avlusu (Gündüz, 2009).

Avluya kuzeydoğuda karşılıklı iki ve kuzeybatıda bir tane olmak üzere üç giriş bulunur. Medrese odaları, dikdörtgen biçiminde olup, ahşap çatı ile örtülmüştür. Avlu revaklarında kullanılan sütunların kuzeydoğu revaklarına ait köşe kolonlar granit taştan yapılmış avludaki diğer geri kalanlar, marmara mermerinden yapılmış ve bademli sütun başlıklarına sahiptir (Metin, 2010). Avlu revaklarındaki sütunların arasında gergi

demirleri kullanılmıştır. Bununla birlikte medrese odalarının beden duvarları ile avlu revaklarının kemer üzengi noktalarının arasında da gergi demirleri kullanılmıştır. Sinan Paşa külliyesinin ilk inşa edilen birimi olan cami, Mimar Sinan'ın İstanbul'da, Edirne Üç Şerefeli Cami planını boyut ve oran farkları dışında tamamıyla tekrarlandığı eseridir (Şekil. 5). Altıgen baldekenli kubbe plan özelliğine sahip olan caminin son cemaat yeri, Avusturyalı tarihçi Hammer'e göre 1749 yılında daha çok cemaat sığdırmak için harime eklenmiştir (Gündüz, 2009; 232). Bu sırada caminin kuzey duvarı büyük taşıyıcı payeler olacak şekilde bırakılarak yıkılmış, son cemaat yerindeki kemerli açıklıklar örülerek kapatılmıştır. Bu bölüm ortada aynalı tonoz, iki yanda ikişer kubbeli birim ile örtülüdür. Bunun önünde de üzeri meyilli çatı ile örtülü ikinci bir son cemaat yeri vardır.



Şekil 5. Edirne Üç Şerefeli Cami (1437-1447) planı (Arcnet, 2019). Sinan Paşa Cami (1555-1556) planı (Yılmaz, 2010).

Caminin son cemaat yerinde sütunlar arasındaki açıklıklar doldurularak avluya bakan yeni bir duvar oluşturulmuştur. 2002 yılında gerçekleştirilen onarımlar sırasında ortaya çıkarılan sütunlu revaklar, duvar içerisine gömülerek yalnızca yüzeyleri görülebilecek şekilde bırakılmıştır (Şekil.5). Caminin avlusuna bakan ikinci revak sırası ise ahşap bir örtüyle kapatılarak sakıflı son cemaat yeri olarak düzenlenmiştir (Eraslan, 2018).

3. OSMANLI YAPI TEKNİKLERİ BAĞLAMINDA SİNAN PAŞA CAMİSİNİN İNCELENMESİ

Sinan Paşa Camii'nde, Edirne Üç Şerefeli Camii'nde olduğu gibi altıgen baldakenli plan şeması kullanılmış olup bu tercih, Mimar Sinan'ın önceki mimari modelleri yeniden yorumlama yaklaşımıyla ilişkilendirilmektedir. Külliye'nin, denizcilerin piri kabul edilen Barbaros Hayreddin Paşa'nın türbesinin karşısında konumlandırılması da yer seçiminin sembolik niteliğine işaret etmektedir (Necipoğlu, 2013, s. 557–564).Yapı, tarihsel süreç içerisinde çeşitli müdahaleler geçirmiştir. Hammer'e göre 1749 yılında beş birimli son cemaat yeri harime dâhil edilmiş ve kuzey duvarındaki açıklıklar kapatılmıştır (Gündüz, 2009). XIX. yüzyılda yapıya eklenen hünkar dairesi, özgün olmadığı gerekçesiyle 1936–1937 yıllarında yıktırılmıştır (Karakoç, 2015). 17 Ağustos 1999 depremi sonrasında 1999–2003 yılları arasında minare ve kalemşerlerinde onarımlar gerçekleştirilmiş (Resim.2), 2011–2014 yıllarındaki restorasyonda ise hünkar mahfilinin rekonstrüksiyonu yapılmıştır (Sinan Paşa Camii'nde restorasyon soruşturması, 2003).



Resim 2. En soldaki resim, 19. yüzyılda yapılan orjinalinde olmayan Sinan Paşa Cami mahfili (SALT arşivi). Ortadaki resim caminin 1936-37 tarihinde Vakıflar idaresince yıktırıldıktan sonraki hali (Gündüz, 2009). Sağdaki resim, 2011-14 yılları arasında Vakıflar İstanbul 1. Bölge tarafından yapılan hünkar mahfili (Karakoç, 2015).

3.1. Sinan Paşa Camisinde Kullanılan Malzemeler

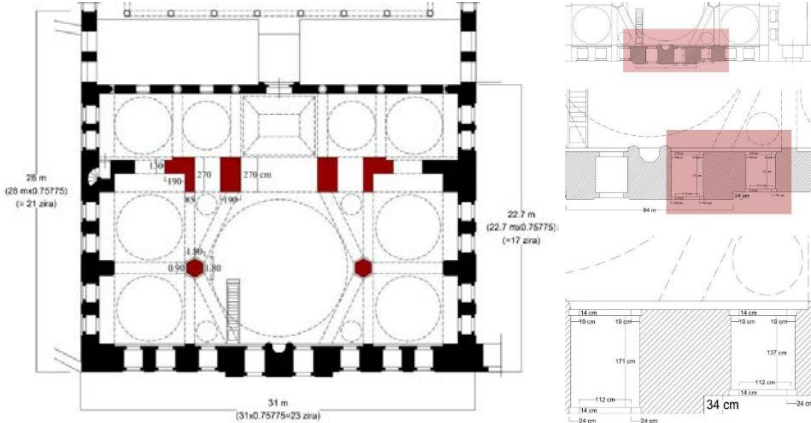
Sinan Paşa Camii'nin duvarlarında küfeki taşı ve tuğla, son cemaat yeri ile avlu sütunlarında ise Marmara mermeri kullanılmıştır (Resim.3). Medrese revaklarında ve sonradan harime dâhil edilen son cemaat yerindeki bazı sütunlarda granit kullanılmış olup, camideki dört granit sütunun devşirme malzeme olması muhtemeldir. XVI. yüzyıl ortalarında Osmanlı anıtsal yapılarında porfir ve granit gibi devşirme sütunların kullanıldığı bilinmektedir (Tanyeli, 2017, s. 45–46). Kemer açıklıklarındaki gergiler demirden, çatı örtüsü ise kurşundan yapılmıştır; sakıflı son cemaat yerinin üst örtüsü ise kurşunla kaplanmadan önce kiremit ile örtülüdür. İstanbul'daki XVI. yüzyıl anıtsal yapılarında kullanılan küfeki taşının, Bakırköy, Yeşilköy, Bahçelievler ve Haznedar çevresindeki devlet taş ocaklarından sağlandığı ve taş boyutlarında belirli bir standartlaşmanın bulunduğu belirtilmektedir (Tanyeli, 2017, s. 60). Mermer malzemenin ise İstanbul'a yakın Marmara Adası'ndaki ocaklardan temin edildiği bilinmektedir. Yapıda kullanılan tuğla da dönemin temel yapı malzemelerinden biri olup, XVI. yüzyılda henüz özel üretim alanına devredilmemiştir. Tuğlaların boyut ve biçimlerinde dönemsel farklılıklar bulunmakla birlikte, XIX. yüzyıla kadar temel üretim özelliklerinin büyük ölçüde korunduğu belirtilmektedir (Tanyeli, 2017, s. 60).



Resim 3. Sinan Paşa Camii'nde duvarda, sütun elemanlarında ve kemer açıklıklarındaki gergilerde kullanılan malzeme ve kaba ölçüleri.

3.2. Caminin Duvar Özellikleri ve İç Mekan Düzeyleme Kotları

Sinan Paşa Camii'nin duvarları bir sıra küfeki taşı ve üç sıra tuğladan oluşan almaşık teknikte inşa edilmiştir. Harim, 22,70 m (17 zira) kısa ve 31 m (21 zira) uzun kenara sahip dikdörtgen bir plana sahiptir. Sakıflı son cemaat yerinin eklenmesiyle yapının kısa kenarı 28 m'ye (21 zira) ulaşmaktadır. Güneydeki mihrap duvarı, ana kubbenin düşey yüklerini taşıyan ayakların bu bölümde yer alması nedeniyle dışa doğru yaklaşık 40 cm kalınlaşmaktadır. Yerinde yapılan ölçümlerde bu duvarın toplam kalınlığı yaklaşık 200 cm, diğer duvarların kalınlığı ise 165 cm olarak belirlenmiştir (Şekil 9). Duvar yüzeyinde ölçülebilen küfeki taşlarının kısa kenarı yaklaşık 29 cm olup uzun kenarlarında değişkenlik görülmektedir. Tuğlaların ise cephede görülen uzun kenarı yaklaşık 24 cm, kısa kenarı 4 cm'dir; derinlikleri duvar yüzeyinden ölçülemediğinden uzunluklarında farklılıklar bulunmaktadır (Şekil 8). Duvarların üst bölümündeki kornişlerde de farklılık görülmektedir. Medrese duvarları kirpi saçaklı kornişlerle sonlandırılırken, cami ve sakıflı son cemaat yerinde sade küfeki taşı silmeler kullanılmıştır (Şekil 10).



Şekil 9. Sinan Paşa Camii planı boyutları ve yerinde yapılan ölçümlere göre duvar ölçüleri

Caminin kotları incelendiğinde, harim döşeme kotu ile Beşiktaş Caddesi arasındaki kot farkının yaklaşık 70 cm olduğu görülmektedir (Resim.4). Ölçümlerde pencere denizlik kotu referans alınmıştır. Harim döşeme kotu ile iç mekândaki pencere denizlik kotu arasında yaklaşık 40 cm, dışarıda ise kaldırım kotu ile denizlik kotu arasında yaklaşık 110 cm fark bulunmaktadır.



Resim 4. Sinan Paşa Camii'nde duvarda, sütun elemanlarında ve kemer açıklıklarındaki gergilerde kullanılan malzeme ve kaba ölçüleri.

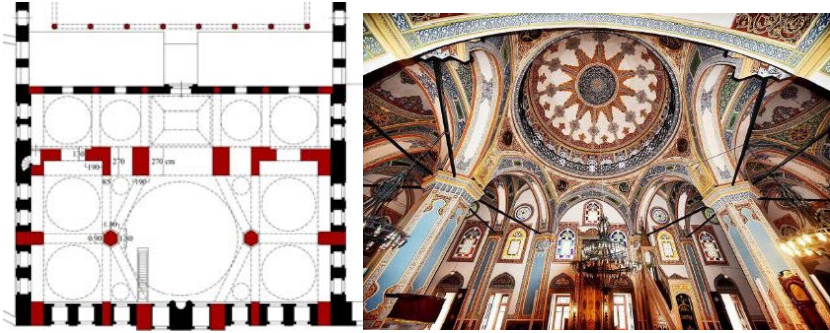
Harim döşeme kotu 0.00 kabul edildiğinde, sonradan harime dâhil edilen son cemaat yeri kotu -15 cm, kapı iç eşik kotu -30 cm, sakıflı son cemaat yeri dış eşik kotu -45 cm ve bu bölümün döşeme kotu -60 cm olarak ölçülmüştür. İç avlu kotu ise -75 cm olup yol kotuyla bağlantı bu şekilde sağlanmaktadır (Şekil 10).



Şekil 10. Camii'de gerçekleştirilen gözlemde kabaca tespit edilen düzeyleme kotları.

3.3. Taşıyıcı Sistem Özellikleri

Camide taşıyıcı ayaklar incelendiğinde, baldakenli kubbeyi taşıyan ayaklardan ikisinin altıgen planlı olduğu görülmektedir. Bu ayaklar doğu ve batı yönlerinde serbest, kuzey ve güney yönlerinde ise duvar içerisinde yer almaktadır. Altıgen planlı ayakların ölçüleri yaklaşık 180×180 cm olup yüzeyleri sıvalıdır. Sıva yüzeylerinde çeşitli kalemişi süslemeler bulunmaktadır. Eski son cemaat yerinin harim mekânına dâhil edilmesiyle birlikte, kuzey duvarında yer alan taşıyıcı payeler de görünür hâle gelmiştir. Bu payelerin ölçüleri yaklaşık 270×190 cm'dir. Kuzey duvarındaki diğer taşıyıcı ayakların ölçüleri belirtilmiş olmakla birlikte, söz konusu payeler arasındaki açıklıklar kemerlerle örülerek kapatılmıştır. Duvar içerisinde kalan diğer taşıyıcı ayakların konumları ise Şekil 6'da gösterilmiştir.



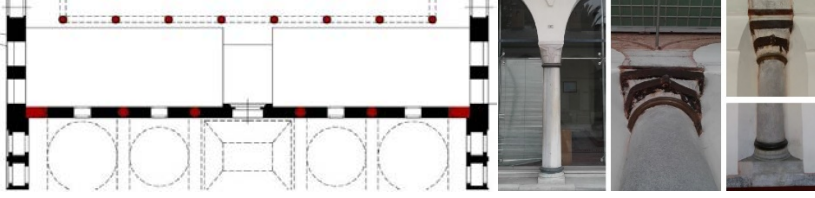
Şekil 11. Sinan Paşa Camii'nde kubbeyi taşıyan altıgen baldaken sistem. Çizim: Yazar. Resim kaynağı: Doğan (2010).

Sinan Paşa Camii'nin minareye çıkış bölümünde, taşıyıcı ayakların yüzeylerinde sıva kaldırılarak malzeme dokusunun ortaya çıkarıldığı görülmektedir. Açılan yüzeyler, ayakların yapımında taş ve tuğla malzemelerin birlikte kullanıldığını göstermektedir. Yaklaşık 2 cm kalınlığındaki sıva tabakasıyla kaplı olan ayak yüzeylerinde kalemişi süslemeler bulunmaktadır. Bunun yanı sıra, aynı yüzeylerde önceki dönemlere ait süsleme katmanlarının izleri de görülebilmektedir.



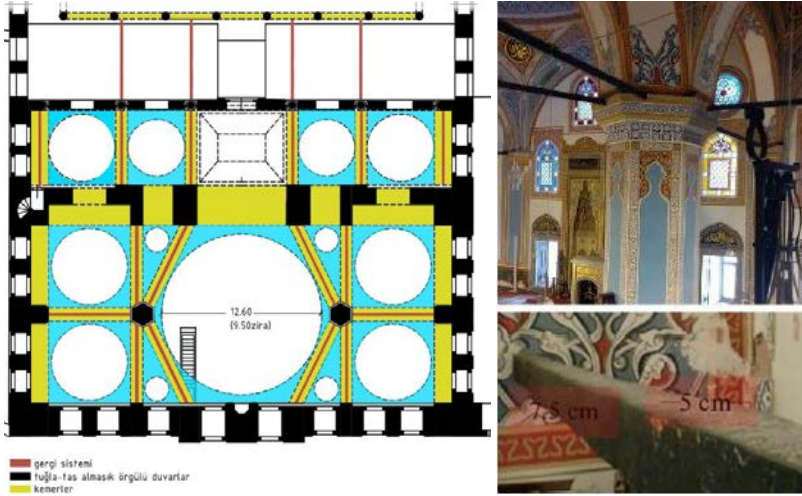
Resim 5. Sinan Paşa Camii, eski son cemaat yerinin harime katılmasıyla birlikte dönüşen ait taşıyıcı ayaklarda tuğla-taş örgü tekniği.

Aşağıda (Resim 5) bazı taşıyıcı ayak yüzeylerinde mukarnaslı destekler bulunmaktadır. Kemerlerin üzengi noktalarında yer alan bu mukarnaslı destekler, baldakenli kubbenin güneydeki mihrap duvarında ve harime dâhil edilen kuzeydeki payelerin yüzeylerinde görülmektedir. Caminin sakıflı son cemaat yerinin iç avluya bakan cephesinde Marmara mermerinden yapılmış sekiz sütun bulunmaktadır. Harime dâhil edilen eski son cemaat yerine ait duvar içerisinde ise ikisi granit, ikisi Marmara mermerinden olmak üzere dört sütun yer almaktadır. Caminin taş kapısının iki yanında da granit taştan yapılmış sütunlar bulunmaktadır. Böylece camide, sakıflı son cemaat yerindeki sütunlarla birlikte toplam on iki sütun bulunmaktadır. Sakıflı son cemaat yerinde kullanılan sütunlarda başlık tipi olarak bademli sütun başlıkları tercih edilmiştir. Harime dâhil edilen eski son cemaat yerinde, duvar içerisinde kalan sütunlarda ise baklavalı sütun başlıkları kullanılmıştır. Bu sütunlarda, sütun gövdesi ile başlık arasındaki bağlantıyı sağlayan metal yüzüğün yanı sıra, sütunların iki farklı noktadan metal kemerlerle birbirine bağlandığı görülmektedir.



Şekil 12. Sakıflı son cemaat yeri ve sonradan harime katılan son cemaat yerine ait dairesel kolonlar kırmızı ile ifade edilmiştir.

Camide, baldakenli kubbeyi taşıyan altıgen planlı ayaklar, kemerler aracılığıyla diğer taşıyıcı ayaklara bağlanmaktadır. Kemerlerle geçilen açıklıkların sarı renkle gösterildiği Şekil 8’de, yan kanatlarla orta sahnın arasında kalan bölümlerde üçgen geçiş alanlarının olduğu görülmektedir. Sonradan harime dâhil edilen eski son cemaat yerinde açığa çıkarılan taşıyıcı ayaklar da kemerler aracılığıyla birbirine bağlanmıştır. Bu ayakların bir kenarının yaklaşık 2 m olması, söz konusu bölümde iç mekânda tonoz etkisinin oluşmasına neden olmaktadır.



Şekil 13. Sinan Paşa Camii planında baldakenli kubbeyi destekleyen kemerler ve gergi demirleri; gergi demirleri kırmızı, pendentifler mavi renkle gösterilmiştir.

Harim mekânında taşıyıcı ayakları birbirine bağlamak amacıyla beşik kemerler kullanılırken, sakıflı son cemaat yerinin iç avluya bakan cephesinde taş kemerler tercih edilmiştir.

Kemerler, çatı yüklerinin oluşturabileceği yatay itkilere karşı gergi demirleriyle birbirine bağlanmıştır. Harim mekânında altıgen planlı ayakları diğer taşıyıcı ayaklara bağlayan kemerlerin tamamında gergi demirlerinin kullanıldığı görülmektedir. Beş birimli eski son cemaat yerinde de gergi demirleri bulunmaktadır. Mekânın sol tarafında yer alan kubbeli birimdeki kemerler arasında bulunan gergi demirlerinin yerinde yapılan ölçümünde kesitlerinin yaklaşık $7,5 \times 5$ cm olduğu belirlenmiştir.

3.4. Üst Örtü Sismtemi

Sinan Paşa Camii'nde kubbeye geçiş pandantiflerle sağlanmıştır. Baldakenli kubbede altı, diğer kubbelerde ise dörder pandantif kullanılmıştır. Yan kanatlar ile orta sahnın arasındaki bölümler kubbeli tonozlarla örtülmüş, küçük kubbelerle geçişte de küçük pandantiflerden yararlanılmıştır. Pandantifler kalemişi bezemelerle süslenmiştir. Baldakenli kubbenin kuşağında on iki pencere ve iç kısmında metal korkuluklu dairesel bir platform bulunmaktadır. Diğer kubbelerin kasnakları daha yüksek ve sağırdır. Beş birimli eski son cemaat yerinin orta biriminde ise aynalı manastır tonozu kullanılmıştır.



Resim 6. Sinan Paşa Camii'de kullanılan kalemişi pandantifler, geçiş kuşakları ve kubbeli tonoz.

Caminin üst örtüsü, merkezde 12,60 m çapındaki baldakenli kubbe ve iki yanında yer alan ikişer kubbeden oluşmaktadır. Yan sahnınlarla orta sahnın arasındaki üçgen planlı

bölümler kubbeli tonozlarla örtülürken, sonradan harime dâhil edilen eski son cemaat yerinin orta biriminde aynalı manastır tonozu, yan birimlerinde ise ikişer kubbe kullanılmıştır. Sakıflı son cemaat yerinin üst örtüsü ahşap taşıyıcı sistemle oluşturulmuştur. Üst örtü, duvar yüzeyleri, pandantifler ve kubbe yüzeylerinden oluşan üç kademeli bir kurguya sahiptir. Kubbeler kurşunla kaplanmış, kubbeli tonozların küçük kubbelerinde kavisli ve kaburgalı yüzeyler oluşturulmuştur. Aynalı manastır tonozu ise dışarıdan farklı formuyla belirgin biçimde görülmektedir.



Şekil 14. Sinan Paşa Camii’de örtü sistemi (Erdoğan, 2016).

3.5. Kapı-Pencere ve İç-Dış Mekan İlişkileri

Sinan Paşa Camii’nin cephe düzeninde pencereler üç sıra hâlinde düzenlenmiştir. Alt sırada teğetli sivri kemerli, düz atkı taşı ve metal şebekeli; orta sırada kaş kemerli ve alçı şebekeli; üst sırada ise çoğunlukla dairesel formu ve alçı şebekeli pencereler kullanılmıştır. İç mekânda alt sıra pencereler mermer söveli ve ahşap kapaklı olup kemer alınlıklarında çintemani bezemeler içerisine alınmış ayetler bulunmaktadır. Orta sıra pencereler revzenli ve bitkisel kalemişi bezemeli, üst sıra pencereler ise dairesel formu, vitraylı ve bitkisel kalemişi bezemelidir. Cephedeki pencere düzeni, iki farklı modülün tekrarıyla oluşturulmuştur (Resim 7). İlk modülde, bir kemer açıklığına karşılık gelen yüzeylerde alt ve orta sırada ikişer, üst sırada bir dairesel pencere yer alırken; ikinci modülde yan sahınlarla orta sahn arasındaki yüzeylerde her sırada birer pencere ve üstte bir dairesel pencere bulunmaktadır.



Resim 7. Sinan Paşa Camii kapı ve orta ve üst sıra pencerelerinin görünümü

Sinan Paşa Camii'nin taç kapısı, eski son cemaat yerinin 1749 yılında harime dâhil edilmesiyle özgün konumunu kaybetmiştir. Mevcut kapı, sonradan ibadet mekânına katılan ve aynalı manastır tonozuyla örtülen birime açılmaktadır. Sivri kemerli ve mermerden sade bir tasarıma sahip olan taç kapının alınlığında kitabe, üzerinde ise kaş kemerli ve alçı şebekeli bir pencere bulunmaktadır (Resim 7). Kitabede, “Bismillahirrahmanirrahimi fi Muharrem el-haram, Subhanellah velhamdu lillahi vela ilahe, Bena haz-el-cami’eş-şerif el merhum Sinan Paşa” ifadesi yer almaktadır (Metin, 2010, s. 28–36). Basık kemerli giriş açıklığı mermer sövelerle çerçevelenmiş, ahşap kapı kanatları ise künde-kârî tekniğinde geometrik bezemelerle süslenmiştir.

3.6. Bezeme Programı, Minare, Müezzin Mahfili, Mihrap, Minber

Sinan Paşa Camii'nin kalemişi bezemeleri kaynaklarda özellikle XIX. yüzyıldaki müdahaleler bağlamında ele alınmaktadır. Bununla birlikte, yapının özgün döneminde de kalemişi bezemelere sahip olduğu, 2002 yılında gerçekleştirilen restorasyon çalışmaları kapsamında yapılan raspalarda XVI. yüzyıla tarihlenen bezeme izlerinin tespit edilmesiyle anlaşılmıştır. Restorasyon kapsamında 2002 yılı sonu itibarıyla

tezyini imalatlara yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar sırasında badana tabakalarının altında iki farklı sıva tabakası ve bu sıvalar üzerinde farklı dönemlere ait kısmi kalemişi bezeme örnekleri tespit edilmiştir. Yapılan incelemelerde elde edilen bulgular şu şekilde değerlendirilmiştir:

Bunlardan, alt katmandaki sıva üzerinde bulunan, XVI. yüzyıl örneklerine benzeyen kubbe göbek yazısı (siyah zemin üzerine beyaz olarak yapılmış Nûr Sûresi'nin 35. ayeti) dışında klasik rûmî bordürü bulunmaktadır. Ayrıca, yalnızca bir örneğinin bırakıldığı rûmî motifli yıldız rozeti ile kubbe pencerelerinden birinin kenarında bırakılan sarma rûmî motifli bordür, ilk dönemin özgün motifleri olarak kabul edilmiştir(Yılmaz, 2010; 107-112).

Kubbe göbeğinde, siyah zemin üzerine beyaz renkte işlenen Nûr Sûresi'nin 35. ayeti ile rûmî bordür, XVI. yüzyıl Klasik Dönemi'ne ait özgün süsleme unsurları olarak değerlendirilmektedir. Pandantif yüzeyleri yoğun kalemişi bezemelerle süslenmiş olup merkezlerinde dairesel formda hat levhaları bulunmaktadır. Kemerlerin alt yüzeyleri ile taşıyıcı ayaklarda ise pandantiflere kıyasla daha sade ve seyrek bitkisel motifli kalemişi bezemeler kullanılmıştır. Caminin minaresi batı cephesinde yer almaktadır (Resim.8). Kaynaklarda, 17 Ağustos 1999 depreminde hasar görmesi nedeniyle onarıldığı belirtilmektedir (Sinan Paşa Camii'nde restorasyon soruşturması, 2003). Minare, küfeki taşından inşa edilmiş olup tek şerefelidir. Çokgen gövdeli minarenin şerefe altında mukarnaslı bir bezeme bulunmaktadır. Şerefe korkuluklarında geometrik ve bitkisel motiflere yer verilmiştir. Minare, sivri külahla sonlandırılmış ve üzeri kurşunla kaplanmıştır. Müezzin mahfili, cami girişinin batısında yer alan ve iki kubbeye örtülü mekâna eklenmiştir. Mermerden yapılmış olan mahfilin korkuluklarında geometrik motifler kullanılmış, taşıyıcılarında ise Bursa tipi kemerler tercih

edilmiştir (Resim.8). Mahfilin yerleştirildiği payelerde mukarnas kavsaralı nişler bulunmaktadır.



Resim 8. Mabedin minaresi, müezzin mahfili, mihrabı ve minberine ait görünüm. Kaynak: Minare fotoğrafı için Erdoğan (2016).

Mihrap, harimin güney duvarında yer almaktadır. Silmeli yüksek bir çerçeve içerisinde iki farklı çerçeve düzenlenmiştir. Alt çerçevede mihrap nişi, üst çerçevede ise ayet yazısı bulunmaktadır. Mihrabın iki yanında sütunçeler yer almakta, çokgen planlı mihrap nişinin üzerinde mukarnaslı kavsara bulunmaktadır. Kavsara tepeliğinin iki yanında rozetlere yer verilmiştir. Yoğun altın yaldız ve kalemişi bezemelerin kullanıldığı mihrapta ağırlıklı olarak bitkisel motifler tercih edilmiştir. Mihrap tepeliği bitkisel motiflerle taçlandırılmış, mihrabın iki yanında ise pencere açıklıkları düzenlenmiştir. Mihrabın ince ve dar bir kesite sahip olması, çevresindeki pencere açıklıklarıyla ilişkili olabilir. Minber mermerden yapılmıştır. Merdiven korkuluğu, iki paralel silme arasında düşey parmaklıklar şeklinde düzenlenmiştir. Sahanlık korkuluğu, geometrik desenlerin rölyef tekniğinde kabartılmasıyla oluşturulmuştur. Kürsü bölümü, kaidesiz bir külahla sonlandırılmış ve sivri kemerlerle biçimlendirilmiştir. Sahanlığın altında silmeli sivri kemerli kabartmalı köşelikler, üst kısmında ise dikdörtgen bir çerçeve bulunmaktadır. Süpürgelik bölümü kemerlerle üç bölüme ayrılmıştır. Aynalık kısmında ise geniş silmeler arasında, altın varakla bezeli kabartmalı üçgen bir çerçeveye yer verilmiştir.

4. SONUÇ

Sinan Paşa Camii, XVI. yüzyıl Osmanlı mimarisinde merkezî kubbe anlayışının farklı bir uygulamasını ortaya koyan önemli yapılardan biridir. Yapının altıgen baldakenli taşıyıcı sistemi, merkezi kubbesi, pandantifleri, kemerleri ve yan mekânların örtü düzeni birlikte değerlendirildiğinde, taşıyıcı sistem ile üst örtünün birbirini tamamlayan bütüncül bir anlayışla ele alındığı görülmektedir. Cephelerde üç sıra hâlinde düzenlenen pencereler ve bunların belirli modüller üzerinden tekrarlanması da yapının mimari düzenindeki sistematik yaklaşımı desteklemektedir. Yapının günümüzdeki durumu yalnızca XVI. yüzyıldaki özgün tasarımını değil, farklı dönemlerde geçirdiği müdahaleleri de yansıtmaktadır. Özellikle 1749 yılında eski son cemaat yerinin harime dâhil edilmesi, yapının plan ve giriş düzeninde önemli değişikliklere neden olmuştur. Bunun yanında farklı dönemlerde gerçekleştirilen onarım ve bezeme müdahaleleri, caminin mimari ve sanatsal karakterinin zaman içerisinde değişmesine yol açmıştır. 2002 yılı restorasyonunda yapılan raspalarda ortaya çıkarılan XVI. yüzyıla ait kalemişi bezeme izleri, yapının özgün süsleme programına ilişkin önemli veriler sunmaktadır. Bu bulgular, sonraki dönemlere ait bezemelerle birlikte değerlendirildiğinde, caminin farklı dönemlerin izlerini taşıyan çok katmanlı bir yapı olduğunu göstermektedir. Sinan Paşa Camii'nin mimari kuruluşu, taşıyıcı ve örtü sistemi, cephe düzeni ve kalemişi bezemeleri ile geçirdiği tarihsel müdahaleler birlikte ele alındığında, yapının özgün karakteri ile sonraki dönemlerde oluşan değişimlerin bir bütün içerisinde değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle yapılacak koruma ve restorasyon çalışmalarında, farklı dönemlere ait mimari ve bezeme unsurlarının belgelenmesi ve korunması, yapının tarihsel ve sanatsal değerlerinin gelecek kuşaklara aktarılması açısından önem taşımaktadır.

KAYNAKÇA

- Ahunbay, Z. (t.y.). Mimar Sinan'ın yapılarında kullanılan yapım teknikleri ve malzeme. İçinde *Mimarbaşı Koca Sinan: Yaşadığı çağ ve eserleri I* (ss. 531–538).
- Archnet. (t.y.). *Sinan Paşa Camii*.
<https://www.archnet.org/sites/2023>
- Alman Mavileri. (2006). *Alman Mavileri, 1: 1913–1914 I. Dünya Savaşı öncesi İstanbul haritaları* (İ. Dağdelen, Yay. Haz.). İstanbul: İstanbul Büyükşehir Belediyesi Kütüphane ve Müzeler Müdürlüğü.
- Ayvansarâyî, H. H. (1987). *Hadîkatü'l-cevâmi: Camilerimiz ansiklopedisi* (İ. Erzi, Haz.). İstanbul: Tercüman.
- Doğan, S. (2010). *Sinan Paşa Camii* [Fotoğraf]. Flickr. Erişim tarihi 29 Ağustos 2026, Flickr – Sinan Paşa Camii fotoğrafı
- Eraslan, A. (2018). Mimar Sinan'ın altıgen baldaken sistemli camilerinde taşıyıcı, örtü ve mekân ilişkisi. *Osmanlı Mirası Araştırmaları Dergisi*, 5, 31–48.
- Erdoğan, C. (2016). Sinanpaşa Camii hava fotoğrafları. *Tarihi Mekanların 3 Boyutlu Modelleri*. Erişim tarihi 29 Ağustos 2026,
<https://3dbesiktas.wordpress.com/2016/10/16/sinanpasa-camii-hava-fotograflari/>
- Gündüz, F. (2009). Sinan Paşa Külliyesi. İçinde *TDV İslâm Ansiklopedisi* (Cilt 37, ss. 232–234). İstanbul: Türkiye Diyanet Vakfı.
- Karakoç, N. (2015). Sinan Paşa Camisi'ne ek bina! *Arkitera Haber*. Erişim tarihi 12 Haziran 2020.
- Kültür Envanteri. (2025). *Sinan Paşa Camii, Beşiktaş*. Kültür Envanteri

- Kuban, D. (1993). Sinan Paşa Külliyesi. *İçinde Düünden bugüne İstanbul ansiklopedisi* (Cilt 7). İstanbul: Türkiye Ekonomik ve Toplumsal Tarih Vakfı.
- Kuran, A. (t.y.). *Mimar Sinan'ın camileri*. Ankara: Vakıflar Genel Müdürlüğü Yayınları.
- Metin, A. B. (2010). *Beşiktaş'ın kentsel tarihi ve barındırdığı mimari eserler* [Yüksek lisans tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi].
- Necipoğlu, G. (2013). *Sinan çağı: Osmanlı İmparatorluğu'nda mimari kültür*. İstanbul: İstanbul Bilgi Üniversitesi Yayınları.
- Pervititch, J. (1922–1945). *İstanbul sigorta haritaları*. İstanbul: SALT Araştırma.
- Sâî Mustafa Çelebi. (2003). *Yapılar kitabı: Tezkiretü'l-Bünyan ve Tezkiretü'l-Ebniye (Mimar Sinan'ın anıları)* (H. Develi, Çevriyazı, eleştirel basım ve notlar; H. Develi & S. Rifat, Günümüz diline aktarım). İstanbul: K Kitaplığı.
- Sinan Paşa Camii'nde restorasyon soruşturması. (2003). *Yapı*. Yapı web sayfası
- Sinanpaşa Külliyesi. (2015). *İçinde Yeni bir turizm rotası: Büyük usta Mimar Sinan* (ss. 292–307). İstanbul: Türkiye Turing ve Otomobil Kurumu.
- Tanyeli, G. (2017). *Hiçbir üstad böyle kâr etmemiştir: Osmanlı inşaat teknolojisi tarihi*. İstanbul: Akın Nalça Kitapları.
- Yılmaz, C. (2010). Sinan Paşa Camii restorasyonunda kalemişi imalatların uygulanma seyri. *Vakıf Restorasyon Yıllığı*, 107–112.

BİNALAR VE YAPIM SEKTÖRÜNDE YAPAY ZEKÂ DESTEKLİ DÖNGÜSEL EKONOMİ UYGULAMALARI

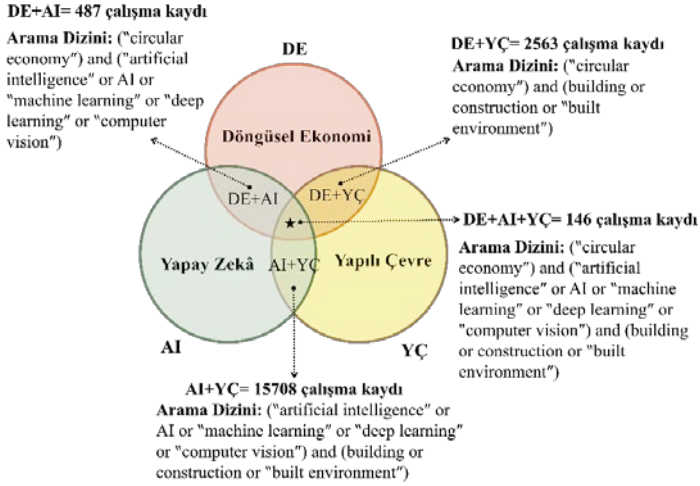
Suna KAYA¹

1. GİRİŞ

Binalar ve yapım sektörünün sürdürülebilirliği açısından sorumlu tüketim kritik bir öneme sahiptir. Kaynakların tükenme riski, hızlı kentleşme ve inşaat hacmindeki artış sektörün sürdürülebilirliğini sürekli olarak sınırlandırmaktadır. Bu dinamikler, binalar ve yapım sektörünü çevre odaklı endüstrilerin temel yönlendiricilerinden biri haline getirmiştir (Oluleye, Chan ve Antwi-Afari, 2023). Sektör küresel ölçekte; yıllık sera gazı emisyonlarının %40'ından (Elghaish, Matarneh, Edwards vd., 2022), ham madde tüketiminin %50'sinden (Kaya, 2025) ve toplam atık üretiminin %40'ından (Chou, Tserng, Weng ve Chang, 2026) sorumludur. Bu doğrultuda; sektörün neden olduğu kaynak tüketimi, atık oluşumu, emisyonlar ve israfi ele alan proaktif çözümlerin geliştirilmesi amacıyla, doğrusal “al-yap-at” modelinden; yapıların elemanlarının, bileşenlerinin ve malzemelerinin daha uzun kullanım ömrüne sahip olduğu döngüsel ekonomi (DE) modeline geçiş önerilmektedir. Araştırmacılar; mimarlık, mühendislik ve yapım disiplinlerinde dijital teknolojilerin benimsenmesinin, bu döngüsel paradigmaya geçişi kolaylaştırabileceğini vurgulamaktadır (Gordon, Batallé, De Wolf vd., 2023; Çetin, De Wolf ve Bocken, 2021).

¹ Dr./Y.Mimar, Suhan Mimarlık, Meram/Konya, ORCID: 0000-0001-8302-0063.

Dijital teknolojiler, döngüsel yapı üretim sürecinde; değer yaratma, optimizasyon, izlenebilirlik, hesap verebilirlik ve karar verme süreçlerini etkinleştiren destekleyici bir rol oynamaktadır (Lindblad, 2026). Mevcut dijital teknolojiler arasında yapım sektörünün DE'ye geçişini teşvik etme potansiyeli en yüksek disiplinin yapay zekâ (AI) olduğu belirtilmektedir. AI, yapılarda döngüsel bir yaşam döngüsü kurgulanmasını kolaylaştırarak rejeneratif ekonomi modeline geçişte katalizör işlevi görebilecek önemli bir teknolojidir (Pathan, Richardson, Galvan vd., 2023; Kanyılmaz, Birhane, Fishwick vd., 2023). Bu bağlamda çalışmada, Şekil 1'de gösterildiği üzere Web of Science veri tabanında DE, AI ve yapılı çevre (YÇ) kesişiminde kapsamlı bir literatür araştırması gerçekleştirilmiştir. Mühendislik, çevre bilimleri ekolojisi, inşaat ve yapı teknolojisi ile mimarlık araştırma alanlarında yürütülen, 146 İngilizce çalışma kaydına ulaşılmış olup çalışmaların 2018-2026 yılları arasında gerçekleştirildiği tespit edilmiştir.



Şekil 1. Döngüsel Ekonomi (DE), Yapay Zekâ (AI) ve Yapılı Çevre (YÇ) arasındaki kesişimlerle ilgili literatür arama sonuçları.

Analiz Web of Science veri tabanında 06.09.2026 tarihinde yapılmıştır.

Araştırmalar, yapılı çevreye yönelik AI destekli DE uygulamalarında; dekonstrüksiyon ve malzemelerin yeniden kullanım planlamasının otomatikleştirilmesi (Gordon vd., 2023), geri kazanım tesislerinde yapım ve yıkım atıklarının otomatik olarak ayrıştırılması (Langley, Lonergan, Huang ve Azghadi, 2025; Dodampegama, Hou, Asadi vd., 2024), bina cephe malzemesi stok kestirimi (Rajaratnam, Stewart, Liu ve Vieira, 2025), HVAC sistemlerine yönelik arıza tespiti ile bakım planlaması (Wang, 2026) ve binalardaki tehlikeli malzemelerin kestirimi (Wu, Sandels, Mjörnell vd., 2022) konularına odaklanmıştır. Bu çalışma; DE, AI ile YÇ kesişimine ilişkin literatüre ve tartışmalara katkı sağlamayı amaçlamaktadır. Bu kapsamda; atık miktarı kestirimi, yapısal sağlık izleme, kestirimci bakım ve yapı malzemesi stok kestirimi uygulamaları irdelenmiştir.

2. DÖNGÜSEL EKONOMİ

Dünya çapında sanayi sektörünün işleyişi son 150 yıl boyunca, doğal kaynaklar ve çevre üzerindeki olumsuz etkisi görmezden gelinerek doğrusal ekonomi modeli ile yürütülmüştür. Doğrusal ekonomi, ham maddelerden malzemelerin üretildiği, tedarik edildiği, kullanıldığı ardından atık olarak bertaraf edildiği, temel motivasyonu kâr elde etmek olan geleneksel üretim ve tüketim modelidir. Bu ekonomik modelde doğal kaynakların tüketimi artarken kullanım ömrü sona eren ürünler depolama sahalarına atılmakta ve atık yığınları oluşmaktadır. Ekonomik, ekolojik ve sosyal boyutta sürdürülemez olan doğrusal ekonomi modeline alternatif ihtiyacı döngüsel ekonominin geliştirilmesine fırsat tanımış ve 1970'lerin sonlarında tartışılmaya başlanmıştır (Milović, Laban, Bulatović vd., 2024; Timm, Maciel ve Passuello, 2023).

DE kavramı; biyomimikri, beşikten beşiğe (Cradle to Cradle, C2C), mavi ekonomi, performans ekonomisi, yeşil büyüme, eko-verimlilik, sürdürülebilirlik, endüstriyel ekoloji gibi doğa temelli kuramlardan beslenerek daha geniş bir içeriği kapsayacak şekilde geliştirilmiştir (Motiei, Iyer-Raniga, Andamon ve Khodabakhshian, 2024). DE'yi 1996 yılında “Kapalı Malzeme Döngüsü” ve “Atık Yönetimi Yasası” ile ulusal mevzuatına entegre eden ilk ülke Almanya olmuştur. Ardından 2009 yılında, “Çin Halk Cumhuriyeti Döngüsel Ekonomi Teşvik Kanunu” yayımlanmış; Avrupa Komisyonu tarafından ise 2015 yılında ilk “Döngüsel Ekonomi Eylem Planı” kabul edilmiştir (Milović vd., 2024). Türkiye’nin “Ulusal Döngüsel Ekonomi Stratejisi ve Eylem Planı (2025-2028)” ise 18 Ekim 2025 tarihinde yayımlanarak yürürlüğe girmiştir.

Ellen Macarthur Vakfı, döngüsel ekonomiyi; “iklim değişikliği, biyoçeşitlilik kaybı, atık ve kirlilik gibi küresel sorunları ele alan bir sistem çözüm çerçevesi” olarak tanımlamaktadır. Esasen DE; atık üretmeyen, doğayı yenileyen ve tasarım temelli üç ilkeye dayanan bir modeldir: atık ve kirliliği henüz tasarım aşamasında yok etmek, ürün ile malzemeleri en yüksek değerinde dolaşımda tutmak ve doğal sistemleri yenilemek (EMF, 2026). DE insan ve doğal sistemler ekseninde (Katipe Arachchige, Perera, Kavirathna vd.,2025; Eberhardt, Birkved ve Birgisdottir, 2022; Çetin vd., 2021);

- yenilenebilir kaynakları kullanarak net pozitif etki oluşturan **döngüyü yenileme** (*regenerating the loop*),
- kaynak verimliliği ve ürünlerin minimum kullanımını sağlayan **döngüyü daraltma** (*narrowing the loop*),
- değer koruyarak uzun süre kullanımı destekleyen **döngüyü yavaşlatma** (*slowing the loop*) ve

- kullanılmayan kaynakların ekonomiye geri kazandırılmasında **döngüyü kapatma** (*closing the loop*) ilkeleri aracılığıyla kaynak tüketimini, atık miktarını ve sera gazı emisyonlarını en aza indiren restoratif ve rejeneratif bir sistemdir.

DE ilkeleri, Şekil 2’de verilen 10R stratejileriyle yapıların tüm yaşam döngüsü aşamalarında uygulanabilmektedir (Jegen, Lederer, Gast ve Faulstich, 2026; Ho, Iyer-Raniga, Sadykova vd., 2024).

DÖNGÜSELLİK DURUMU	KOD	R STRATEJİSİ	AÇIKLAMA
Döngüsel ekonomiyi yansıtmada gücünde artış ↑	R0	Refuse (reddet)	Daha akıllı ürün kullanımı ve üretimi
	R1	Rethink (yeniden düşün)	
	R2	Reduce (azalt)	
	R3	Reuse (yeniden kullan)	Ürünün kullanım ömrünün uzatılması
	R4	Repair (onar)	
	R5	Refurbish (yenile)	
	R6	Remanufacture (yeniden üret)	
	R7	Repurpose (yeniden amaçlandır)	
	R8	Recycle (geri dönüştür)	Malzemelerin faydalı uygulamaları
	R9	Recover (geri kazanım)	

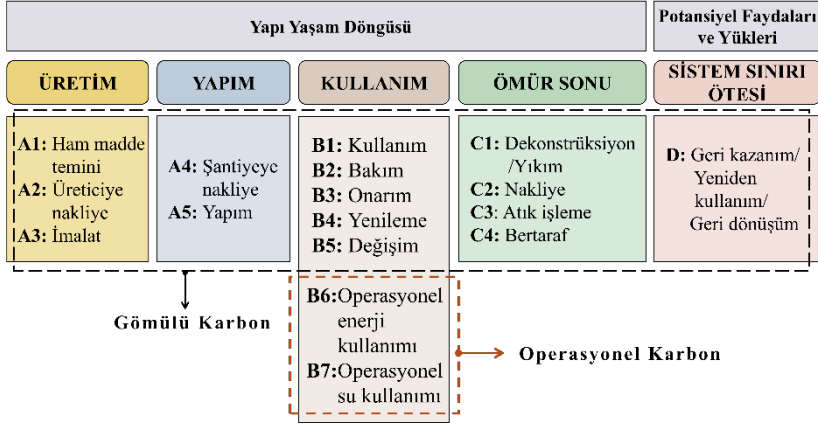
Şekil 2. 10R stratejileri (Bühler, Fendt, Wittenberg ve Hamper, 2024’den uyarlanmıştır).

Binalar ve yapı sektörü atıkları, yüksek oranda yeniden kullanılabilir ve geri dönüştürülebilir malzeme içerdiğinden döngüsel yapı uygulamalarına ihtiyaç duyulmaktadır (Anastasiades, Blom ve Audenaert, 2023). DE yaklaşımının benimsenmesindeki temel amaç; döngüsel bir üretim süreci oluşturularak mevcut yapı, sistem, ürün ve malzemelerin kullanım ömrünü mümkün olduğunca uzatmaktır. Yapıların üretim sürecinde alınan proaktif kararlar, döngüsel bir yaşam döngüsüne geçişi kolaylaştıracaktır.

Yeniden kullanım, yalın (sadelik) tasarım, sökmeye yönelik tasarım ve modüler yapı gibi DE stratejileri döngüsel

yaşam döngüsünü teşvik etmektedir. Bu stratejiler; ham madde çıkarımını azaltırken atık oluşumunu sınırlandırmakta ve proje yaşam döngüsü boyunca dekarbonizasyonu desteklemektedir (da Silva, Borges, Tošić ve Andrade, 2026; Lara, El-Fadel, Rauf ve Khalfan, 2025). Bu noktada DE ilkelerinin entegrasyonunda, yapı yaşam döngüsünün aşamalarında malzemeleri, yapım süreçlerini ve binanın çevresel performansını niceliksel olarak ortaya koyan Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA) öne çıkmaktadır (Yang, Chen, Liu ve Zhang, 2025).

Yapı sistemlerinin nicel olarak çevresel performansını analiz etmek için uygulanan LCA güçlü bir bilimsel metodolojidir. LCA; enerji tüketimi, gömülü enerji ve karbon emisyonları hakkında bilgi sağlamaktadır. Bu bütüncül yaklaşım doğal malzeme tüketimini en aza indirerek DE'yi destekleyen planlama sürecinin anahtarıdır. EN 15978 ve ISO 14040/44 standartlarına uygun bir şekilde gerçekleştirilen ayrıca, döngüselliği artırma potansiyeli sunan yaşam döngüsü değerlendirmesi Şekil 3'de görüldüğü üzere üretim, yapım, kullanım, ömür sonu ile sistem sınırının ötesindeki faydalar ve yükleri göz önünde bulunduran beş aşamayı kapsamaktadır (Benetio, Konstantinou, Torres-Ramo ve Sánchez-Ostiz, 2025; Finamore ve Oltean-Dumbrava, 2025; Norouzi, Haddad, Jiménez vd., 2023; Mazzoli, Corticelli, Dragonetti vd., 2022). DE modeli, yaşam döngüsü değerlendirmesine 'sistem sınırı ve ötesi' aşamasını dahil ederek beşikten beşiğe stratejisini gerçekleştirmeyi amaçlamaktadır (Antwi-Afari, Ng ve Chen, 2023; Fagone, Santamicone ve Villa, 2023).



Şekil 3. Yapı yaşam döngüsü aşamaları (Norouzi vd. (2023)'den uyarlanmıştır).

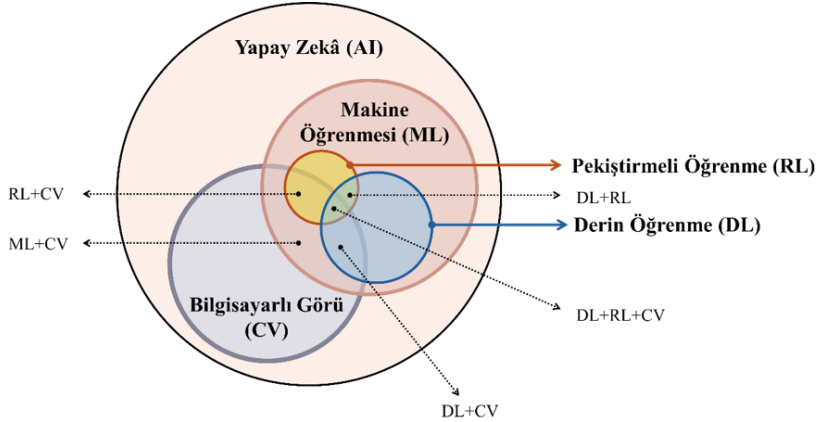
Beşikten beşiğe stratejisi; eleman, bileşen ve sistem ölçeğinde kullanılan malzemelerin sağlık ve güvenlik açısından geri dönüştürülebilir ve yenilenebilir niteliklerini değerlendiren döngüsellik çerçevesidir. Bu yaklaşım, malzemelerin doğal sistemlere ve toplum sağlığına zarar vermediğini taahhüt eder. Ayrıca; sıfır atık, kaliteli malzeme kullanımı ve yaşam döngüsüne odaklanarak, tamamen yeniden kullanılabilir veya geri kazanılabilir ürün ve sistem tasarımı teşvik ederek DE ilkeleriyle bütünleşmektedir (Lau, Chan, Oluleye ve Olawumi, 2025).

3. YAPAY ZEKÂ

Yapay zekâ (AI) birçok farklı alanda kolaylık sağlayan; büyük verilerin analizini yapabilen ve büyük ölçekli istatistiksel modeller oluşturabilen ileri bir teknolojidir (Baduge, Thilakarathna, Perera, 2022). Son yıllarda gelişim göstermiş olsa da temeli 1950'lere dayanmaktadır. Alan Turing 1950 yılında “makinelere düşünebilir mi?” sorusu ile tartışma başlatmış ve yapay zekânın matematiksel olasılığını araştırmıştır. 1956 yılında ise John McCarthy düzenlediği akademik konferansta AI terimini

ortaya koymuştur (Armeni, Raghu ve De Wolf, 2024). Yapay zekâyı Bassir vd. (2023), “çevresini algılayan, anlayan ve hedeflerini gerçekleştirme şansını artırmak için hareket eden zekâ ajanları” ve “insan zekâsını taklit etmeye çalışan makine sistemleri” olarak tanımlamaktadır. Omotayo vd. (2025) ise, “akıl yürütme, bilgi, düşünme, algılama, öğrenme, iletişim kurma, planlama ve insanlara benzer davranışlarla manipüle etme kapasitesine sahip zeki makineler geliştirme bilimi veya teknolojisi” olarak ifade etmektedir.

AI, görselleştirme ve etkileşimli arayüzler aracılığıyla binalar ve yapım sektöründe sonuçları yönlendiren, düzenleyen ve iyileştiren mimar ile mühendislerin ortak yaratım paydaşları olarak hareket etmektedir (De Wolf, Bendiek-Laranjo, Blum vd., 2026). İnsan emeğinin bir ikamesi değil, iş rollerinin değerini daha yüksek seviyeye taşımak için katalizördür. Şekil 4’de yapay zekâya ait alt alanlar görülmektedir. Literatürde en çok ele alınan AI alt alanları; makine öğrenmesi (machine learning, ML) ve bilgisayarlı görü (computer vision, CV).



Şekil 4. Yapay zekâ ve alt alanları (Armeni vd. (2024)’den uyarlanmıştır).

AI alt alanlarına ait algoritmalar; verilerdeki kalıpları otomatik olarak analiz ederek öğrenmekte, bu kalıplardan anlamlı

çıkarımlar elde ederek eylemler gerçekleştirmekte veya öneriler sunmaktadır. Bu bağlamda makine öğrenmesi; karmaşık verilerin işlendiği ve çok katmanlı sinir ağları aracılığıyla görevlerin öğrenilmesini sağlayan derin öğrenmeyi içermektedir. Ayrıca, ödül ve ceza mekanizmalarına dayanarak en ideal çözümleri deneyimsel olarak belirleyen pekiştirmeli öğrenmeyi de kapsamaktadır. Makine öğrenmesi ile bütünleşik bir şekilde çalışan bilgisayarlı görü ise dijital görüntüler, 3B nokta bulutları ve diğer görsel girdilerin işlenmesini ve anlamlandırılmasını temel almaktadır (Armeni vd., 2024).

AI teknolojilerinin gelişimi binalar ve yapım sektöründe veri odaklı karar verme mantığında dönüşüm yapmıştır. AI'nın farklı ve karmaşık verileri tek bir analitik çerçevede entegre edebilme yeteneği en önemli avantajlarından biridir. Söz konusu nitelik, çok sayıda parametrenin entegrasyonunu gerektiren DE bağlamında özellikle kilit rol oynamaktadır. Bu sayede, önemli ölçüde doğru kestirimler yapabildiği gösterilmiştir. Gerçek zamanlı değerlendirme sağlayarak değişen koşullarda faktörlerin risklerini ve etkinliğini belirleyebilmektedir (Linkevičius, Neverauskienė ve Tvaronavičienė, 2026). Bu süreçte doğru algoritmaların seçimi elimizdeki kaliteli verilerin başarılı ve güvenilir çıktılara dönüştürülmesini sağlamaktadır (Zhao, Hao, Gong vd., 2025). Doğru AI algoritmalarının kullanılması bilinçli karar almayı destekler, istenen özelliklerin gerçekleştirilmesini garanti eder ve sürdürülebilir kalkınma amaçlarına ilişkin sonuçların iyileştirilmesini sağlayacak geri bildirim sistemleri oluşturur (Getachew, Taffese, Espinosa-Leal ve Yehualaw, 2025).

AI, veriye dayalı kestirimsel analizler yapabilme, anlamlı bilgiler üreterek nitelikli öneriler sunma, otonom karar alma süreçlerini destekleme ve otomasyon sağlama yetenekleri sayesinde istihdam, konaklama, eğitim, tıp, robotik ve inşaat gibi pek çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır (Cai, Lou ve Lu,

2025; Li ve Azman, 2022). Literatürde; *yapıların farklı yaşam döngüsü aşamalarında* (Rashidian, Hossain, Volz ve Teo, 2025; Çetin vd., 2021), *yaşam döngüsü değerlendirmesinde, çok amaçlı optimizasyonda* (Martínez, Fan ve Miller, 2026; Lu, Zhang, Huang vd., 2025), *atık yönetiminde* (Linkevičius vd., 2026; KC, Senaratne, Perera ve Nanayakkara, 2025; Kroell, Thor, Göbbels vd., 2025; Zhao vd., 2025), *gerçek zamanlı enerji yönetiminde ve binaların çevresel performansının ölçülmesinde* (Płoszaj-Mazurek, Ryńska ve Grochulska-Salak, 2020; D'Amico, Ciulla, Traverso vd., 2019) AI algoritmalarından yararlanan akademik çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmaların varlığı, döngüsel ekonomide AI teknolojilerinin sunduğu potansiyeli ve uygulama imkânlarını açıkça ortaya koymaktadır.

4. YAPAY ZEKÂ DESTEKLİ DÖNGÜSEL EKONOMİ UYGULAMALARI

4.1. Atık Miktarı Kestirimi

Yapım ve yıkım atıkları, kaynak tükenmesi ile çevresel bozulmanın başlıca sebepleri arasında yer almaktadır. Güncel araştırmalar, küresel ölçekte her yıl 11 milyar tondan fazla yapım ve yıkım atığı üretildiğini göstermektedir. Bu miktarın 2100 yılının sonuna kadar üç katına çıkacağı ve toplam atık miktarının %40'ını aşacağı öngörülmektedir (Sun, Tushar, Zhang vd., 2025). Büyük oranda yeniden kullanım ve geri dönüşüm potansiyeline sahip malzemeler içeren bu atıklar, yapı çevrenin doğrusal ekonomiden DE'ye geçişini zorunlu kılmaktadır (Anastasiades vd., 2023). Bu dönüşümün sağlanması ve kaynak geri kazanımının etkinleştirilmesi ise doğru atık miktarının ölçümüne bağlıdır (Sun vd., 2025).

Bu doğrultuda araştırmacılar; makine öğrenmesi, bilgisayarlı görü, Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) ve büyük veri analitiği gibi ileri teknolojilerin atık üretim kestirimindeki rolünü

incelemişlerdir. Söz konusu teknolojiler arasında özellikle makine öğrenmesi; veri toplama, veri işleme ve bilgi oluşturma süreçlerinden yararlanarak karar verme ile tahminleme aşamalarına güçlü bir altyapı sunmaktadır. Bilgisayarlı görü ise, atık bileşenlerini otomatik olarak tespit ederek robotlara veya ilgili ekipmanlara talimatlar vermekte ve böylece atık ayırma süreçlerinin otomasyonuna imkân tanımaktadır (Dong, Yuan, Yang vd., 2025; Gao, Wang ve Xu, 2024; Lu, Long ve Yuan, 2023).

Chen ve arkadaşları, evrişimli sinir ağı (CNN) ile destek vektör makinesi (SVM) modellerini birlikte kullanarak atıkların hem görsel hem fiziksel özelliklerinin değerlendirildiği, inşaat atık bileşimini ölçen otomatik bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Bu yaklaşım, Hong Kong'daki bir atık ayırma tesisinde uygulanmış ve %94'lük doğruluk oranına ulaşılmıştır (Chen, Lu ve Xue, 2021).

Öte yandan yapım ve yıkım atıklarının hatalı sınıflandırılması; verimsiz kaynak kullanımına ve geri dönüşüm imkânlarının değerlendirilememesine sebep olmaktadır. Bu soruna odaklanan Nežerka ve arkadaşları; evrişimli sinir ağı (CNN), gradyan artırma (GB), karar ağaçları ve çok katmanlı algılayıcı (MLP) algoritmalarını sınıflandırıcı olarak kullanan, RGB kamera entegrasyonlu bir prosedür geliştirmiştir. Bu yenilikçi yaklaşım, hız ve doğruluk açısından geleneksel CNN'ye kıyasla daha yüksek performans göstermiştir. Çalışma kapsamında geliştirilen bilgisayarlı görü tabanlı makine öğrenmesi modeli %92,3 doğruluk oranına ulaşmıştır. Önerilen model, yaygın olarak karşılaşılan malzeme parçaları olan gazbeton, asfalt konglomeraları, seramikler (çatı kiremitleri ve tuğlalar) ve beton parçaları üzerinde test edilmiştir (Nežerka, Zbíral ve Trejbal, 2024).

4.2. Yapısal Sağlık İzleme (Structural Health Monitoring, SHM)

En güvenli ve dayanıklı yapılar, bakım ve onarım süreçleri etkin yönetilenlerdir. Bu bağlamda, yapı güvenliğini sağlamak amacıyla erken aşamada hasar tanımlamasını mümkün kılan yapısal sağlık izleme (SHM) öne çıkan güçlü bir disiplindir. Hasar; yapıların mevcut veya gelecekteki performansını olumsuz etkileyen bağlantı, malzeme ve geometrik özelliklerdeki değişimleri kapsamaktadır. Buna karşın normal durum, yapının hasarsız olduğu şartlarda, farklı operasyonel ve çevresel etkenler altında toplanan verileri ifade eder. Literatürde SHM, yapısal değişimleri etkin ve hızlı biçimde tanımlayabilen makine öğrenmesi yöntemleriyle desteklenmektedir. Ayrıca, yapısal hasarları tespit etmek ve karar verme süreçlerini iyileştirmek üzere; bir sensör ağı aracılığıyla sürekli veya periyodik ölçümlerin alınması, nitelik çıkarma ve sınıflandırılması için istatistiksel modellemelerden yararlanılmaktadır (Laflamme, Blasch, Ubertaini vd., 2026; Vrtac, Ocepek, Cesnik vd., 2024; Santos, Figueiredo, Silva vd., 2016). SHM'nin temel amacı, izleme verilerini analiz ederek yapısal sağlık durumunun teşhis edilmesini sağlamaktır (Bao, Sun, Xu vd., 2025).

Hasar tanımlama süreci; hasarın tespiti, lokalizasyonu, türü, şiddeti ve kalan ömür kestirimini kapsamaktadır. Makine öğrenmesi tabanlı SHM sürecinde hasar kestirimi; veri kümesi ön işleme, nitelik çıkarma, boyut indirgeme ve model eğitimi adımlarından oluşmaktadır (Alemu, Lahmer ve Walther, 2024). Makine öğrenmesi, çok boyutlu problemleri çözmede önemli avantajlar sunan yetkin bir araçtır. İlki, büyük ölçekli çok kaynaklı izleme verilerini analiz edebilen gelişmiş algoritmalara sahip olmasıdır. İkincisi, çok boyutlu verilerdeki gizli nitelikleri etkin şekilde ortaya çıkarmasıdır. Son olarak ise karmaşık problemlerde esnek ve güçlü performans gösteren optimizasyon stratejileri sağlamasıdır (Bao vd., 2025).

Ayrıca AI, yapısal yer değiştirme ve yüklerin değerlendirilmesinde görüntü tabanlı ölçüm teknikleriyle önemli bir dönüşüm sağlamıştır. Bu tekniklerde SHM süreçlerinde fiziksel sensörlere ihtiyaç duyulmaksızın yüksek çözünürlüklü görsel verilerden yararlanılmaktadır. Evrişimli sinir ağları (CNN) gibi AI modelleri, görsel verilerin analizini otomatikleştirerek yapısal davranış ve performansın gerçek zamanlı izlenmesine imkân tanımaktadır. Bu yaklaşım, SHM teknolojilerinin kabiliyetlerini artıran, uygun maliyetli ve verimli bir çözüm sunmaktadır (Spencer, Sim, Kim ve Yoon, 2025).

Dhiraj ve arkadaşları (2021), bir sistemdeki hasar boyutunu tespit etmek, lokalize etmek ve nicelleştirmek amacıyla derin evrişimli sinir ağları (DCNN) ile doğrusal regresörlerin birlikte kullanımını önermiştir. Söz konusu çalışmada yazarlar; önerilen yöntemin yapının güvenliği ve sağlamlığı hakkında veriye dayalı içgörüler sağlayacağını vurgulamaktadır. Aynı zamanda bu yaklaşımın, yapıların bakımı ve uzun hizmet ömrü açısından kaynak kullanımını optimize etmesi; karbon ayak izini ve yapım/bakım maliyetlerini azaltması beklenmektedir.

4.3. Kestirimci Bakım (Predictive Maintenance, PdM)

Kestirimci bakım (PdM); sistemlerdeki olası arıza risklerini belirlemeyi ve bu arızalar meydana gelmeden önce gerekli bakım müdahalelerini planlamayı amaçlamaktadır (Agostinelli ve Cumo, 2022). Bu yaklaşım; gerçek zamanlı izleme, veri odaklı analiz ve tahmine dayalı proaktif bir paradigmaya geçişi temsil etmektedir. PdM; planlanmayan duruş sürelerini en aza indirmeyi, ekipman ömrünü uzatmayı, operasyonel verimliliği artırmayı, maliyetleri düşürmeyi ve net sıfır karbon hedeflerine uyumu kolaylaştırmaktadır. (Adhikari, Karunaratne ve Sumanarathna, 2025). Süreç; otomatik veri toplama, veri kümesi temizleme, verilerin analizi, sistem çıktılarını etkileyen parametrelerin belirlenmesi, en uygun

parametre değerlerinin belirlenmesi, arıza tanımlama modellerinin eğitimi, erken arıza kestirimi ve müdahale aşamalarından oluşmaktadır (Agostinelli ve Cumo, 2022). Bu doğrultuda PdM, yaklaşan arızaları öngörmek amacıyla operasyonel verileri değerlendirir.

Yapı güvenliğine, enerji verimliliğine ve ekipman güvenilirliğine katkı sağlayan kestirimci bakım teknikleri arasında titreşim analizi, akustik izleme, yağ analizi ve termal görüntüleme yer almaktadır. Bu kapsamda makine öğrenmesi; verilerin analiz edilmesi, kalıpların tespiti ve kestirime dayalı karar mekanizmalarını geliştirecek algoritmaların eğitilmesi süreçlerini içerir. Literatürde kestirimci bakım modellerinde sıklıkla başvuru makine öğrenmesi algoritmaları; yapay sinir ağı (ANN), destek vektör makinesi (SVM), derin sinir ağı (DNN), karar ağacı (DT), rastgele orman (RF), K-en yakın komşu (KNN) ve XGBoost'dur (Wang, 2026; Adhikari vd., 2025).

Tablo 1. Araştırmalarda kullanılan kestirimci bakıma ilişkin makine öğrenmesi algoritmaları (Adhikari vd., 2025).

Kullanılan Algoritmalar	Kestirimci Bakım Fonksiyonu
SVM, DT, KNN, SARIMA	Hastanelerde HVAC sistemi için kestirimci bakım
DT, RF, KNN, SVM	VRF HVAC sistemleri için kestirimci bakım ve arıza tespiti
ANN, SVM	Binalarda mekanik, elektrik ve tesisat bileşenlerinin kestirimci bakımı
Nesnelerin İnterneti ile entegre edilmiş makine öğrenmesi	Kültürel miras ve akıllı binalar için kestirimci bakım
Derin öğrenme, Nesnelerin İnterneti	Eski binalarda enerji verimliliği ve kestirimci bakım

Hatalı bakım stratejileri; %20 ila %50 arasında enerji israfına yol açmakla birlikte iç mekân hava kalitesi ve kullanıcı konforunu da olumsuz etkilemektedir (Wang, 2026; Zabadi, Zemedkun, Hosamo ve Kraniotis, 2026; Bouabdallaoui, Lafhaj, Yim vd., 2021). Bu durum, kestirimci bakıma duyulan ihtiyacın önemini açıkça ortaya koymaktadır. Tablo 1'de görüldüğü üzere

araştırmalar genellikle; akıllı izleme ve bakım stratejileri aracılığıyla Isıtma, Havalandırma ve İklimlendirme (HVAC) sistemlerinin verimliliğini ve güvenilirliğini artırmaya odaklanmıştır. Zabadi ve arkadaşları (2026); kural tabanlı teşhisleri, rastgele orman, yapay sinir ağı ve gerçek zamanlı dijital ikiz platformu ile entegre ederek hava işleme birimleri için hibrit bir kestirimci bakım çerçevesi geliştirmiş ve bunu test etmişlerdir. Wang (2026) ise, ticari komplekslerin HVAC sistemleri için dijital ikiz teknolojisi ile makine öğrenmesi algoritmalarını entegre eden akıllı, kestirime dayalı bir bakım karar destek çerçevesi önermiştir. Bu kapsamda Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) ve IoT sensörleri; arıza teşhisi için CNN, LSTM ve SVM bütünleştirilmiştir. Bakım kararları ise derin pekiştirme öğrenme yoluyla optimize edilmiştir. Önerilen sistemin; ekipman enerji tüketimini optimize etme, bakım maliyetlerini azaltma, bakım verimliliğini iyileştirme üzerindeki olumlu etkisi kanıtlanmıştır.

4.4. Yapı Malzeme Stokunun Kestirimi

Yapılı çevre, küresel ölçekteki malzeme talebinin yaklaşık yarısını oluşturmaktadır. Hızlı kentleşme ve nüfus artışı, malzemelere olan talebin artmaya devam edeceğini göstermektedir. Söz konusu artan talebin yönetilebilir bir düzeyde tutulması, kaynak tükenmesini önlemede kritik bir role sahiptir (Sprecher, Verhagen, Sauer vd., 2022). Bu bağlamda yapılı çevrenin dinamiklerinin anlaşılması, malzeme stoklarının izlenmesi ve doğru bir şekilde tahmin edilmesi, döngüsel şehir modelinin teşvik edilmesindeki küresel çabaların ayrılmaz bir parçasıdır. Binalarda ve yapım sektöründe kullanılan malzemelerin yoğunluğu, yapılı çevrenin sürdürülebilir dönüşümü için kaynak sağlayan bir ‘kentsel maden’ olarak değerlendirilebilir. Kentsel madencilik; bir yapının yaşam döngüsü sonunda elde edilen malzemelerin yeni projelerde yeniden kullanımını sağlayarak birincil malzemelere olan ihtiyacı azaltmaktadır. Böylece gömülü karbon emisyonları, enerji

tüketimi ve olumsuz çevresel etkiler en aza indirilebilmektedir. Bu yaklaşım aynı zamanda DE ilkelerinin benimsenmesinde ve iklim değişikliğinin olumsuz etkilerinin hafifletilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca mevcut malzemelerin türleri, miktarları ve nitelikleri hakkında bilgi sunarak yeniden kullanım ve geri dönüşüm planlamasını mümkün kılmaktadır (Li, Zhao, Wang vd., 2025).

Binalarda malzeme stoklarının doğru kestirimi, ikincil malzemelerin proje yapım ve tedarik zinciri yönetimine entegrasyonunda kritik öneme sahiptir. Bu süreçte başvuru alan yöntemler; yukarıdan aşağıya, aşağıdan yukarıya ve uzaktan algılama tabanlı yaklaşımlar olmak üzere üç kategoride toplanmıştır.

- ***Yukarıdan aşağıya yaklaşım***, bina veya hedef nesnenin kütle stokunu temsil etmek amacıyla, sisteme giren toplam malzeme miktarı ile sistemden çıkan malzeme miktarı arasındaki fark bulunarak hesaplama yapılmaktadır (Dai, Gillott, Jurczyk vd., 2025).
- ***Aşağıdan yukarıya yaklaşım***, malzeme stoklarını ölçen ve akış davranışını tanımlayan katsayı temelli bir yöntemdir. Bu yaklaşımda ilk olarak stoklar, kullanım alanlarına göre farklı bölümlere (binalar, altyapı/hizmet alanları vb.) ayrılır. Ardından bu bölümlerin boyutunu tanımlayan fiziksel parametreler (taban alanı, yükseklik vb.) malzeme yoğunluk katsayıları gibi bileşim göstergeleri ile çarpılarak toplam malzeme miktarı hesaplanır. Aşağıdan yukarıya modeller yüksek düzeyde ayrıntı ve mekânsal çözünürlük sağlar; bu sayede genellikle yukarıdan aşağıya modellere kıyasla daha doğru tahminlerle sonuçlanmaktadır (Xiong, Krych, Escamilla vd., 2026).

- ***Uzaktan algılama tabanlı yöntemler***, kütle stokunu tahmin etmek amacıyla uydu görüntülerinden elde edilen verilerden, özellikle de gece ışığı görüntülerinden yararlanan tekniklerdir (Dai vd., 2025).

Gelişmiş kestirim kabiliyeti sayesinde makine öğrenmesi, yapı malzemesi stoklarının tahmini için güncel ve etkin bir yaklaşım olarak kabul edilmektedir. Makine öğrenmesi yöntemleriyle malzeme stoklarının kestiriminde ön koşul, büyük bir veri kümesinin mevcudiyetidir. Söz konusu veri kümesi; bina yaşı, taban alanı ve toplam yapı inşaat alanı gibi sürekli değişkenlerin yanı sıra şantiye konumu/bölge, bina türü ve malzeme türü gibi kategorik değişkenleri de içermektedir. Bu veriler, algoritmaların eğitilmesi ve doğrulanması aşamalarında kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalarda; yapı malzemesi stokunun kestirimi amacıyla yapay sinir ağları, lojistik regresyon, destek vektör makineleri ve karar ağaçları gibi yöntemlere başvurulmuştur (Li vd., 2025).

Dai ve arkadaşları (2025)'de, Birleşik Krallık'ın Sheffield şehrinde tuğla, beton, harç ve taş malzemelere uygulanan makine öğrenmesi ile morfolojik özellikleri kullanarak malzeme yoğunluğunu karakterize eden, geometri tabanlı bir Malzeme Yoğunluğu (GIMI) yöntemi geliştirmişlerdir. Bu yaklaşım, aşağıdan yukarıya bina kütle muhasebesini iyileştirerek DE uygulamalarını ve düşük karbonlu bina sektörünü desteklemektedir. Li ve arkadaşları (2025) ise, kentsel ölçekte DE'yi desteklemek amacıyla yapı malzemesi stoku kestirimi yapan otonom ve aşağıdan yukarıya bir yaklaşım sunmuştur. Söz konusu süreçte 3D nokta bulutu rekonstrüksiyonu, BIM verileri ve çok katmanlı algılayıcı (MLP) makine öğrenmesi modelleri entegre edilmiştir. BIM verileriyle eğitilen MLP modelleri beton için %91,00, çelik için %87,60 tahmin doğruluğuna ulaşmıştır. Bu yöntem; kaynak yönetimi, yıkım kararları, malzemenin

yeniden kullanımı ve DE süreçleri için yüksek doğrulukta veri sağlamaktadır.

5. SONUÇ

Bu çalışmada; binalar ve yapım sektörüne ilişkin AI destekli döngüsel ekonomi uygulamaları; atık miktarı kestirimi, kestirimci bakım (PdM), yapısal sağlık izleme (SHM) ve yapı malzeme stokunun kestirimi başlıkları altında irdelenmiştir. Dijital ve veri odaklı AI teknolojilerinin, döngüsel bir yapı çevredek potansiyel rolleri araştırılmıştır. Bu kapsamda, AI modellerinin kullanıldığı DE uygulamalarını tespit etmek amacıyla literatürün sistematik bir incelemesi gerçekleştirilmiştir. İnceleme sonuçları; yapı malzemelerinin, bileşenlerinin ve elemanlarının döngüsellik kestirimini yapmaya ve süreçleri optimize etmeye uygun yapay zekâ modellerinin bulunduğunu ortaya koymuştur.

Binalar ve yapım sektörü; doğal kaynakların aşırı tüketimine ve sürdürülemez atık yönetimine yol açan geleneksel “al-yap-at” modelinden döngüsel ekonomi modeline geçişte kilit bir role sahiptir. Elde edilen bulgular, DE ve AI entegrasyonunun yapı çevrenin sürdürülebilirlik düzeyini önemli ölçüde artırdığını ve söz konusu uygulamaların, yapıların farklı yaşam döngüsü aşamalarına birbirini tamamlayıcı nitelikte hizmet ettiğini göstermektedir. Bu kapsamda öne çıkan temel noktalar şu şekildedir:

- **Atık miktarı kestirimi ve sınıflandırma:** Küresel ölçekte hızla artan yapım ve yıkım atıklarının geri kazanımı için doğru atık miktarı kestirimi ve sınıflandırma kritik önem taşımaktadır. Makine öğrenmesi, bilgisayarlı görü ve hibrit algoritma (CNN, SVM, GB,MLP) tabanlı otomasyon çözümleri, %92-94 gibi yüksek doğruluk

oranlarıyla hem atık miktarı tahminini hem de ayırma süreçlerini verimli şekilde desteklemektedir.

- **Yapısal sağlık izleme:** SHM disiplini, erken aşamada hasar tespitine imkân tanıyarak yapı güvenliğini artırmaktadır. İlgili araştırmaların, afetlere dirençli yapılar inşa etmeye ve hizmet ömrünü uzatmaya odaklandığı görülmektedir. Gerçek zamanlı izlemeyi mümkün kılan görüntü tabanlı SHM uygulamalarında en sık kullanılan algoritma evrişimli sinir ağları (CNN)'dır.
- **Kestirimci bakım:** Sistemlerdeki arıza risklerini belirleyerek henüz arıza gerçekleşmeden bakım müdahalelerini planlamayı sağlar. Bu yaklaşım; yapı güvenliğini artırmayı, ekipman ömrünü uzatmayı ve enerji verimliliğini sağlamayı amaçlamaktadır. Kestirimci bakım modellerinde sıklıkla başvuru alan makine öğrenmesi algoritmaları; yapay sinir ağı (ANN), destek vektör makinesi (SVM), derin sinir ağı (DNN), karar ağacı (DT), rastgele orman (RF), K-en yakın komşu (KNN) ve XGBoost'tur.
- **Yapı malzeme stokunun kestirimi:** Küresel malzeme talebinin yarısını oluşturan yapılar çevrede kaynak tüketimini azaltmak, kentsel madencilikle döngüsel ekonomiyi desteklemek ve ikincil malzemeleri tedarik zincirine doğru entegre edebilmek için hayati önem taşır. Bu kestirimler; yukarıdan aşağıya, aşağıdan yukarıya ve uzaktan algılama tabanlı olmak üzere üç temel yaklaşımla gerçekleştirilir. Yapı malzemesi stokunun kestiriminde; yapay sinir ağları, lojistik regresyon, destek vektör makineleri ve karar ağaçları gibi yöntemlerde kullanılmaktadır.

KAYNAKÇA

- Adhikari, A., Karunaratne, T., & Sumanarathna, N. (2025). Machine learning techniques for predictive maintenance of building services: a comprehensive review and reseach outlook. *Facilities*, 43(11/12), 803-817. doi:10.1108/F-02-2025-0032
- Agostinelli, S., & Cumo, F. (2022). Machine learning approach for predictive maintenance in an advanced building management system. *Energy Production and Management in the 21st Century V*, 255. doi:10.2495/EPM220111
- Alemu, Y. L., Lahmer, T., & Walther, C. (2024). Damage Detection with Data-Driven Machine Learning Models on an Experimental Structure. *Eng*, 5, 629-656. doi:10.3390/eng5020036
- Anastasiades, K., Blom, J., & Audenaert, A. (2023). Circular construction indicator: Assessing circularity in the design, construction, and end-of-life phase. *Recycling*, 8(2), 29. doi:10.3390/recycling8020029
- Antwi-Afari, P., Ng, S. T., & Chen, J. (2023). Determining the optimal partition system of a modular building from a circular economy perspective: A multicriteria decision-making process. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 185, 113601. doi:10.1016/j.rser.2023.113601
- Armeni, I., Raghu, D., & De Wolf, C. (2024). Artificial Intelligence for Predicting Reuse Patterns. In C. De Wolf, S. Çetin & N. Bocken (Eds.), *A Circular Built Environment in the Digital Age*. (57-78). Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-031-39675-5_4

- Baduge, S. K., Thilakarathna, S., Perera, J. S., Arashpour, M., Sharafi, P., Teodosio, B., ... & Mendis, P. (2022). Artificial intelligence and smart vision for building and construction 4.0: Machine and deep learning methods and applications. *Automation in Construction*, 141, 104440. doi:10.1016/j.autcon.2022.104440
- Bao, Y., Sun, H., Xu, Y., Guan, X., Pan, Q., & Liu, D. (2025). Recent advances in structural health diagnosis: a machine learning perspective. *Advances in Bridge Engineering*, 6(7). doi:10.1186/s43251-024-00155-z
- Bassir, D., Lodge, H., Chang, H., Majak, J., & Chen, G. (2023). Application of artificial intelligence and machine learning for BIM: review. *International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization*, 14, 5. doi:10.1051/smdo/2023005
- Benetio, L., Konstantinou, T., Torres-Ramo, J., & Sánchez-Ostiz, A. (2025). Towards decarbonisation in the built environment: a comparative analysis of conventional vs. industrialised façades in nearly zero-energy building renovations. *Energy & Buildings*, 342, 115885. doi:10.1016/j.enbuild.2025.115885
- Bouabdallaoui, Y., Lafhaj, Z., Yim, P., Ducoulombier, L., & Bennadji, B. (2021). Predictive maintenance in building facilities: a machine learning-based approach. *sensors*, 21, 1044. doi:10.3390/s21041044
- Bühler, L., Fendt, D., Wittenberg, T., & Hamper, A. (2024). Smart circular economy in healthcare—An introduction to the 9R framework: Digital technologies enabling circular economy in healthcare. *Current Directions in Biomedical Engineering*, 10(4), 127-130. doi:10.1515/cdbme-2024-2031

- Cai, G., Lou, Y., & Lu, F. (2025). AI enhancing prefabricated aesthetics and low carbon coupled with 3D printing in chain hotel buildings from multidimensional neural networks. *Scientific Reports*, 15(1), 13229. doi:10.1038/s41598-025-97858-8
- Chen, J., Lu, W., & Xue, F. (2021). “Looking beneath the surface”: A visual-physical feature hybrid approach for unattended gauging of construction waste composition. *Journal of Environmental Management*, 286, 112233. doi:10.1016/j.jenvman.2021.112233
- Chou, C. M., Tserng, H. P., Weng, C. H., & Chang, Y. T. (2026). Sustainable social housing in Taiwan: integrating circular economy principles into architectural design and building construction. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 1-22. doi:10.1080/13467581.2026.2620921
- Çetin, S., De Wolf, C., & Bocken, N. (2021). Circular Digital Built Environment: An Emerging Framework. *Sustainability*, 13(11), 6348. doi:10.3390/su13116348
- da Silva, S. R., Borges, P. M., Tošić, N., & Andrade, J. J. D. O. (2026). Advances in circular valorization of construction and demolition waste (CDW) toward low-carbon and resilient construction: A Comprehensive review. *Sustainability*, 18(6), 2759. doi:10.3390/su18062759
- Dai, M., Gillott, C., Jurczyk, J., Sun, K., Li, X., Liu, G., & Tingley, D. D. (2025). Geometry-informed material intensity reveals considerable intra-archetype material variability of UK housing. *Resources, Conservation & Recycling*, 221, 108392. doi:10.1016/j.resconrec.2025.108392
- D’Amico, A., Ciulla, G., Traverso, M., Brano, V. L., & Palumbo, E. (2019). Artificial Neural Networks to assess energy and

- environmental performance of buildings: An Italian case study. *Journal of Cleaner Production*, 239, 117993. doi:10.1016/j.jclepro.2019.117993
- De Wolf, C., Bendiek-Laranjo, A., Blum, C., Costalonga, V., Durand-Maniclas, O., Karsan, Z., ... & Windapo, B. (2026). Ten questions concerning digital transformation for a circular built environment. *Building and Environment*, 114361. doi:10.1016/j.buildenv.2026.114361
- Dhiraj, Agarwal, A., Agrawal, A., Meruane, V., & Sangwan, K. S. (2021). Development of a Machine Learning based model for Damage Detection, Localization and Quantification to extend Structure Life. *28th CIRP Conference on Life Cycle Engineering*, 199-204. doi:10.1016/j.procir.2021.01.030
- Dodampegama, S., Hou, L., Asadi, E., Zhang, G., & Setunge, S. (2024). Revolutionizing construction and demolition waste sorting: Insights from artificial intelligence and robotic applications. *Resources, Conservation & Recycling*, 202, 107375. doi:10.1016/j.resconrec.2023.107375
- Dong, Z., Yuan, L., Yang, B., Xue, F., & Lu, W. (2025). Benchmarking computer vision models for automated construction waste sorting. *Resources, Conservation & Recycling*, 213, 108026. doi:10.1016/j.resconrec.2024.108026
- Eberhardt, L. C. M., Birkved, M., & Birgisdottir, H. (2022). Building design and construction strategies for a circular economy. *Architectural Engineering and Design Management*, 18(2), 93-113. doi:10.1080/17452007.2020.1781588

- Elghaish, F., Matarneh, S.T., Edwards, D. J., Rahimian, F. P., El-Gohary, H., & Ejohwomu, O. (2022). Applications of Industry 4.0 digital technologies towards a construction circular economy: gap analysis and conceptual framework. *Construction Innovation*, 22(3), 647-670. doi:10.1108/CI-03-2022-0062
- EMF. (2026). <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/glossary> (erişim tarihi: 22.07.2026)
- Fagone, C., Santamicone, M., & Villa, V. (2023). Architecture engineering and construction industrial framework for circular economy: Development of a circular construction site methodology. *Sustainability*, 15(3), 1813. doi:10.3390/su15031813
- Finamore, M., & Oltean-Dumbrava, C. (2025). Emerging trends in the circular economy: Multidimensional perspective in the building sector. *Circular Economy and Sustainability*, 5(4), 3017-3052. doi:10.1007/s43615-024-00485-0
- Gao, Y., Wang, J. & Xu, X. (2024). Machine learning in construction and demolition waste management: Progress, challenges, and future directions. *Automation in Construction*, 162, 105380. doi:10.1016/j.autcon.2024.105380
- Getachew, E. M., Taffese, W. Z., Espinosa-Leal, L., & Yehualaw, M. D. (2025). Machine learning applications in sustainable construction materials: A scientometrics review of global trends, themes, and future directions. *Sustainability*, 17(18), 8453. doi:10.3390/su17188453
- Gordon, M., Batallé, A., De Wolf, C., Sollazzo, A., Dubor, A., & Wang, T. (2023). Automating building element detection

- for deconstruction planning and material reuse: A case study. *Automation in Construction*, 146, 104697. doi:10.1016/j.autcon.2022.104697
- Ho, O., Iyer-Raniga, U., Sadykova, C., Balasooriya, M., Sylva, K., Dissanayaka, M., ... & Sivapalan, S. (2024). A conceptual model for integrating circular economy in the built environment: An analysis of literature and local-based case studies. *Journal of cleaner production*, 449, 141516. doi:10.1016/j.jclepro.2024.141516
- Jegen, P., Lederer, J., Gast, L., & Faulstich, M. (2026). Assessing the impact of implementing circular economy strategies in the construction industry: A case study in the Ruhr Area in Germany. *Waste Management*, 219, 115579. doi:10.1016/j.wasman.2026.115579
- Kanyılmaz, A., Birhane, M. Fishwick, R., & Del Castillo, C. (2023). Reuse of steel in the construction industry: challenges and opportunities. *International Journal of Steel Structures*, 23(5), 1399-1416. doi:10.1007/s13296-023-00778-4
- Katipe Arachchige, T. V. S., Perera, B. A. K. S., Kavirathna, A. S., & Wijayarathna Mudiyansele Don, Y. S. (2025). Integration of circular economy principles during the pre-construction stage to enhance the sustainability of MEP works. *Construction Innovation*. doi: 10.1108/CI-12-2024-0413
- Kaya, S. (2025). Döngüsel Ekonomi ve Salutogenez Yaklaşımları Bağlamında Rejeneratif Bina Değerlendirme Modeli (Publication No: 958256) Doctoral dissertation, Mimar Sinan Fine Arts University. National Thesis Center <https://tez.yok.gov.tr>

- KC, A., Senaratne, S., Perera, S., & Nanayakkara, S. (2025). Review of current digital technologies for material passports to enhance circularity towards net zero. *Built Environment Project and Asset Management*, 15(5), 1055-1072. doi:10.1108/BEPAM-03-2024-0085
- Kroell, N., Thor, E., Göbbels, L., Schoenfelder, P., & Chen, X. (2025). Deep learning-based prediction of particle size distributions in construction and demolition waste recycling using convolutional neural networks on 3D laser triangulation data. *Construction and Building Materials*, 466, 140214. doi:10.1016/j.conbuildmat.2025.140214
- Laflamme, S., Blasch, E., Ubertini, F., Liu, Z., Wertz, J., Knott, C., ..., & Mohammadi, J. (2026). Roadmap: Integrating artificial intelligence in structural health monitoring systems. *Measurement Science and Technology*, 37, 103001. doi:10.1088/1361-6501/ae3abb
- Langley, A., Lonergan, M., Huang, T., & Azghadi, M. R. (2025). Analyzing mixed construction and demolition waste in material recovery facilities: Evolution, challenges, and applications of computer vision and deep learning. *Resources, Conservation & Recycling*, 217, 108218. doi:10.1016/j.resconrec. 2025.108218
- Lara, J. C. F., El-Fadel, M., Rauf, A., & Khalfan, M. M. A. (2025). Pathways toward Net-zero emissions in the construction industry: A framework integrating circular economy and industry 4.0 innovations. *Building and Environment*, 285, 113652. doi: 10.1016/j.buildenv.2025.113652
- Lau, E. K., Chan, D. W., Oluleye, B. I., & Olawumi, T. O. (2025). Towards circular buildings in Hong Kong: A new integrated technology–material–design (TMD) circularity assessment framework. *Buildings*, 15(5), 814. doi:10.3390/buildings15050814

- Lindblad, F. (2026). Digital circularity in construction: a systematic review and conceptual framework with a timber focus. *International Journal of Sustainable Engineering*, 19(1), 2619254. doi:10.1080/19397038.2026.2619254
- Li, D., & Azman, N. H. N. (2022). The impact of artificial intelligence (AI) on the low-carbon economy: A prospective study on the long-term rental housing market in Guangxi, China. *Chinese Journal of Urban and Environmental Studies*, 10(04), 2250024. doi:10.1142/S2345748122500245
- Li, Q., Zhao, B., Wang, X., Yang, G., Chang, Y., Chen, X., & Chen, B. M. (2025). Autonomous building material stock estimation using 3D modeling and multilayer perceptron. *Sustainable Cities and Society*, 130, 106522. doi:10.1016/j.scs.2025.106522
- Linkevičius, D., Neverauskienė, L. O., & Tvaronavičienė, M. (2026). AI-Driven Valuation of Circular Economy Investments: Implications for Sustainable Real Estate and Resource Management. *Sustainability*, 18(6), 3046. doi:10.3390/su18063046
- Lu, Y., Zhang, Y., Huang, Z., Cheng, B., Wang, C., Sun, Y., ... & Li, J. (2025). A literature review of sustainable building research: Bibliometric analysis from 2015-2025. *Buildings*, 15(19), 3609. doi:10.3390/buildings15193609
- Lu, W., Long, W., & Yuan, L. (2023). A machine learning regression approach for pre-renovation construction waste auditing. *Journal of Cleaner Production*, 397, 136596. doi:10.1016/j.jclepro.2023.136596
- Martínez, A., Fan, J., & Miller, S. A. (2026). Machine learning in life cycle assessment and low carbon material discovery:

- Challenges and pathways forward for the construction industry. *Resources, Conservation and Recycling*, 224, 108567. doi:10.1016/j.resconrec.2025.108567
- Mazzoli, C., Corticelli, R., Dragonetti, L., Ferrante, A., Van Oorschot, J., & Ritzen, M. (2022). Assessing and developing circular deep renovation interventions towards decarbonisation: the Italian pilot case of “Corte Palazzo” in Argelato. *Sustainability*, 14(20), 13150. doi:10.3390/su142013150
- Milović, T., Laban, M., Bulatović, V., Starčev-Ćurčin, A., Draganić, S., & Bukvić, O. (2024). Circular Economy as a New Concept for Sustainable Building Development in Serbia. In V. Ungureanu, L. Bragança, C. Baniotopoulos & K. M. Abdalla (Eds.), *4th International Conference “Coordinating Engineering for Sustainability and Resilience” & Midterm Conference of CircularB “Implementation of Circular Economy in the Built Environment”*. (501-510). Springer. doi: 10.1007/978-3-031-57800-7_46
- Motiei, M., Iyer-Raniga, U., Andamon, M. M., & Khodabakhshian, A. (2024). Advancing circular buildings: A review of building strategies for AEC stakeholders. *Buildings*, 14(9), 2594. doi:10.3390/buildings14092594
- Nežerka, V., Zbírál, T., & Trejbal, J. (2024). Machine-learning-assisted classification of construction and demolition waste fragments using computer vision: Convolution versus extraction of selected features. *Expert Systems With Applications*, 238, 121568. doi:10.1016/j.eswa.2023.121568
- Norouzi, M., Haddad, A. N., Jiménez, L., Hoseinzadeh, S., & Boer, D. (2023). Carbon footprint of low-energy buildings

in the United Kingdom: Effects of mitigating technological pathways and decarbonization strategies. *Science of The Total Environment*, 882, 163490. doi:10.1016/j.scitotenv.2023.163490

Oluleye, B. I., Chan, D. W. M., Antwi-Afari, P. (2023). Adopting Artificial Intelligence for enhancing the implementation of systematic circularity in the construction industry: A critical review. *Sustainable Production and Consumption*, 35, 509-524. doi:10.1016/j.spc.2022.12.002

Omotayo, T., Tanyer, A. M., Deng, J., Kaima, A., Akponeware, A., Pekerikli, M. K., ... & Ogunnusi, M. (2025). Advancing AI-powered BIM for circularity in construction in the UK and Türkiye: state-of-the-art review and capability maturity modelling. *Buildings*, 15(8), 1224. doi:10.3390/buildings15081224

Pathan, M. S., Richardson, E., Galvan, E., & Mooney, P. (2023). The role of artificial intelligence within circular economy activities-A view from Ireland. *Sustainability*, 15(12), 9451. doi: 10.3390/su15129451

Płoszaj-Mazurek, M., Ryńska, E., & Grochulska-Salak, M. (2020). Methods to optimize carbon footprint of buildings in regenerative architectural design with the use of machine learning, convolutional neural network, and parametric design. *Energies*, 13(20), 5289. doi:10.3390/en13205289

Rajaratnam, D., Stewart, R. A., Liu, T., & Vieira, A. S. (2025). A novel computer vision-based approach for autonomous building facade material stock estimation. *Resources, Conservation & Recycling*, 219, 108311. doi: 10.1016/j.resconrec.2025.108311

- Rashidian, S., Hossain, T., Volz, K., & Teo, M. (2025). Enabling circularity in construction: A technology-phase alignment of construction 4.0 and circular economy principles. *Sustainable Production and Consumption*, 60, 245-259. doi:10.1016/j.spc.2025.10.004
- Santos, A., Figueiredo, E., Silva, M. F. M., Sales, C. S., Costa, J. C. W. A. (2016). Machine learning algorithms for damage detection: Kernel-based approaches. *Journal of Sound and Vibration*, 363, 584-599. doi:10.1016/j.jsv.2015.11.008
- Spencer, B. F., Sim, S. H., Kim, R. E., & Yoon, H. (2025). Advances in artificial intelligence for structural health monitoring: A comprehensive review. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 29, 100203. doi:10.1016/j.kscej.2025.100203
- Sprecher, B., Verhagen, T. J., Sauer, M. L., Baars, M., Heintz, J., & Fishman, T. (2022). Material intensity database for the Dutch building stock: Towards Big Data in material stock analysis. *Journal of Industrial Ecology*, 26, 272-280. doi:10.1111/jiec.13143
- Sun, W., Tushar, Q., Zhang, G., Song, A., Hou, L., Zhang, J. & Wang, S. (2025). An Analytical Review of Construction and Demolition Waste Management and Quantification Methods Using a Science Mapping Approach. *Recycling*, 10(3), 115. doi:10.3390/recycling10030115
- Timm, J. F. G., Maciel, V. G., & Passuello, A. (2023). Towards sustainable construction: a systematic review of circular economy strategies and ecodesign in the built environment. *Buildings*, 13(8), 2059. doi: 10.3390/buildings13082059

- Vrtac, T., Ocepek, D., Cesnik, M., Cepon, G., & Boltežar, M. (2024). A hybrid modeling strategy for training data generation in machine learning-based structural health monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 207, 110937. doi:10.1016/j.ymssp.2023.110937
- Wang, R. (2026). A data-driven predictive maintenance framework for smart buildings: Integrating digital twin and machine learning in HVAC systems. *Journal of Building Engineering*, 120, 115416. doi: 10.1016/j.job.2026.115416
- Wu, P. Y., Sandels, C., Mjörnell, K., Mangold, M., & Johansson, T. (2022). Predicting the presence of hazardous materials in buildings using machine learning. *Building and Environment*, 213, 108894. doi: 10.1016/j.buildenv.2022.108894
- Xiong, S., Krych, K., Escamilla, E. Z., & Habert, G. (2026). Beyond Building Structure: Estimating the Material Stock of Mechanical, Electrical and Plumbing Systems. *Sustainability*, 18(4), 2093. doi: 10.3390/su18042093
- Yang, Y., Chen, C., Liu, X., & Zhang, Z. (2025). Integration of lean construction and BIM in sustainable built environment: a review and future research directions. *Buildings*, 15(14), 2411. doi: 10.3390/buildings15142411
- Zabadi, H. R. Y., Zemedkun, F. A., Hosamo, H., & Kraniotis, D. (2026). Integration of digital twins and machine learning for predictive maintenance using APAR method rules in non-residential buildings. *Frontiers in Built Environment*, 11, 1734945. doi:10.3389/fbuil.2025.1734945
- Zhao, W., Hao, J. L., Gong, G., Fischer, T., & Liu, Y. (2025). Applying digital technologies in construction waste management for facilitating sustainability. *Journal of*

Environmental Management, 373, 123560.
doi:10.1016/j.jenvman.2024.123560

ÇİFT CİDARLI CEPHE SİSTEMLERİNİN PERFORMANS DEĞERLENDİRİLMESİNDE KULLANILAN SİMÜLASYON ARAÇLARI

Resul ÖZLÜK¹

Mehmet TOSUN²

Ahmet Selim ALBAYRAK³

Mustafa Serhan ÜNLÜTÜRK⁴

1. GİRİŞ

Binalarda enerji tasarrufunu sağlamaya yönelik küresel hedefler sürdürülebilir bina cephelerinin rolünü vurgulamaktadır. Bu bağlamda, çift katmanlı (cidarlı) cepheler (DSF), enerji verimliliğini artırmak ve aynı zamanda iç mekân termal konforunu iyileştirmek için kullanılması gereken önemli pasif bina teknolojileridir. Çift cidarlı cephe sistemleri, modern ve yüksek binalarda ısıl tampon alanı, doğal havalandırma ve güneş radyasyonu blokajını kullanarak enerji tasarrufu sağlamak için yaygın olarak kullanılan cephe sistemleri arasında yer almaktadır (GhaffarianHoseini et al., 2016). Genel olarak sistem, merkezi bir boşluğa sahip iki cam yüzeye sahiptir. Bu cepheler, yaz aylarında dış taraftaki camdan güneş ışımasını alır ve bina cephesiyle oluşturduğu boşluk ile akan havanın sıcaklığını değiştirir.

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Balıkesir Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, ORCID: 0000-0001-8309-2980.

² Lisans Öğrencisi, Balıkesir Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, ORCID: 0009-0006-5238-7077.

³ Lisans Öğrencisi, Balıkesir Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, ORCID: 0009-0005-7226-6590.

⁴ Dr. Öğr. Üyesi, Balıkesir Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, ORCID: 0000-0001-8368-4169.

Böylelikle, yaz aylarında dışarıdan içeriye iletilen dış cephe yükünü azaltabilir ve kış aylarında iç ve dış ortamlar için bir tampon alan görevi görerek bina kabuğunda ısı kayıplarını önlemede rol alabilir (Sung & Kim, 2019).

Çift cidarlı cephelerin performansının değerlendirilmesine yönelik yapılan çalışmalar genellikle test ve simülasyon araçlarını kullanmaktadır. Yoon ve ark. (2019), yüksek kata sahip apartman dairelerinde düşük performansa sahip eski balkon pencerelerinin yerine çift cidarlı cephe sistemini kullanarak ısı performansını değerlendirmiştir. Çalışmada, tasarım parametreleri olarak farklı katlardaki sıcaklık, rüzgâr hızı ve basınç farkları seçilmiştir. Farklı kat seviyelerinde kurulan çift cidarlı cephe sisteminin performanslarını karşılaştırmak için simülasyon modelleri geliştirilmiştir. Önerilen sistemin kurulumuyla yaklaşık %30 ile en iyi ısıtma enerjisi tasarrufunun sağlandığı görülmektedir. Barbosa ve ark. (2019), Çift cidarlı cephelerin boşluğuna mekanik havalandırmanın dahil edilmesinin ve fotovoltaiik sistemlerden elektrik üretilmesinin ısı ve enerji açısından değerlendirmektedir. Çalışmada, yöntem olarak hesaplamalı simülasyonlar kullanılmış ve cephe sisteminin performansı değerlendirilmiştir. Sonuçlar, ılıman iklim bölgesinde PV'den üretilen elektrik yaklaşık %15 olduğu analiz edilmiştir. El Ahmar ve ark. (2019), Çift cidarlı cephelerin ısı performansının simülasyonu için EnergyPlus aracı ve OpenFOAM CFD yazılımını kullanmıştır. İki farklı simülasyon yazılımı kullanılarak boşlukta oluşan sıcaklık ve çıkışlardaki hava hacimsel akış hızı karşılaştırılmıştır. Farklı araçlar kullanılarak sonuçların farklılık gösterdiği görülmektedir. Bao ve Xiang, (2026), bina entegre fotovoltaiik sistemlerini (BIPV) çift cidarlı cephe ile entegre ederek bir DSF-BIPV sistemi geliştirmiştir. Çalışma vakası olarak modüler bir ofis ünitesi seçilmiştir. Önerilen sistemler yaklaşık 94'lük bir renk oluşturma indeksi ile ofis ortamına uygun iç mekân ışık kalitesi gereksinimlerini

karşılamaktadır. Ayrıca yapılan parametrik simülasyonların sonuçları, geleneksel cam cepheye kıyasla net satın alınan elektrik tüketiminde yaklaşık %31,4 bir azalma sağladığını göstermektedir. (Haidar, Kravchenko, & Ferrantelli, 2026), bir ofis mekânında DSF sisteminin detaylı simülasyon modellerini yapmıştır. Çalışma farklı faz değiştiren malzeme (PCM) türlerini ve cepheye ait havalandırma senaryolarını analiz etmektedir. Farklı PCM türleri ve farklı havalandırma senaryolarına yönelik yapılan simülasyon sonuçları, boşlukta bulunan hava sıcaklığının gün boyunca %15 ile %24 oranında düştüğünü doğrulamaktadır. Ayrıca önerilen sistem, boşluğun sabah ve gece donmasını önleyerek iç mekandaki ısı ortamının kontrolünde önemli bir görev almaktadır. Haidar ve ark. (2026), konut binalarında DSF performansını optimize etmek için farklı yapay zekâ algoritmalarını bina enerji simülasyonu (BES) ile entegre etmiştir. Çalışmada, DSF sistemlerine yönelik senaryoları simüle etmek için EnergyPlus aracı ve DesignBuilder programı kullanılmıştır. Isıtma yüklerini, soğutma yüklerini ve çevresel etkileri tahmin etmek için XGBoost regresyon modeli vekil model olarak kullanılmıştır. Vekil model optimizasyon algoritması için amaç fonksiyonu olarak kullanılmıştır. Yüksek güvenilirliğe sahip modeller kullanılarak oluşturulan optimum çözümler, mevcut kullanılan cephelere kıyasla %35,7-42,3 oranında enerji tüketiminde azalma ve buna karşılık %58,1-78,9 oranında ısı konfor iyileştirmeleri göstermiştir. Shi ve ark. (2025), deneysel ve simülasyon yaklaşımlarını kullanarak çok bölümlü DSF sisteminin performansını değerlendirmiştir. Çalışma, DSF sisteminin iç mekân gün ışığı ve ısı performansı üzerindeki etkilerine yönelik senaryolar geliştirmiş ve sistemin yıllık görsel-ısı konfor ve enerji performansı üzerinde iyileştirmeler yaptığı incelenmiştir.

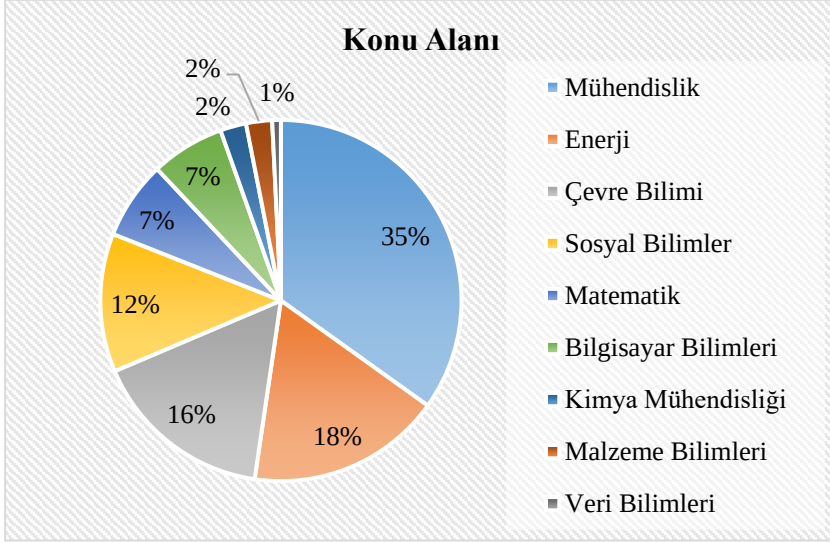
Genel olarak literatür incelendiğinde, çift katmanlı cepheler etkili bir bina sistemi olarak kullanılmaktadır. DSF

sistemlerinin gerçek bir binada uygulanması, performanslarının tahmin edilmesine büyük ölçüde bağlıdır. Bu durum, çift cıdarlı cephe sistemlerinin bir binaya entegre edildiğinde performanslarını tahmin etmek için kullanılacak simülasyon araçlarının önemini doğrulamaktadır (Catto Lucchino, Goia, Lobaccaro, & Chaudhary, 2019). Çalışmalarda, bina enerji simülasyon araçları ve yapay zekâ (optimizasyon, makine öğrenmesi, derin öğrenme vb. gibi) algoritmalarının kullanılmasıyla çift cıdarlı cephe sistemlerinin uygulanabilirliği ve hesaplama verimliliği sürdürülebilir bina tasarımı için pratik altlıklar oluşturmaktadır. Çalışmanın amacı, çift cıdarlı cephe sistemlerinin performans değerlendirilmesinde kullanılan simülasyon araçlarını ve kullanım alanlarını kapsamlı bir şekilde incelemektir.

2. YÖNTEM

Çift cıdarlı cephe sistemlerinin performansının değerlendirilmesinde kullanılan simülasyon araçlarını tespit etmek ve ilgili çalışmaların geniş bir yelpazesini yakalamak için, iki akademik veri tabanında (Scopus ve Web of Science) aramalar gerçekleştirilmiştir. Anahtar kelimeler, çalışmanın temel amacını göz önünde bulundurarak oluşturulmuştur. Bu terimler, DSF ve bina enerji simülasyon araçları literatürünün geniş yelpazesini kapsayacak şekilde seçildi. Ayrıca, kavramsal çerçeve ile uyumlu olması için temel metodolojik tanımlayıcılarından “Boolean” arama dizeleri kullanılmıştır. Başlık, özet ve anahtar kelimelerde “çift cıdarlı cephe, bina performansı ve simülasyon” terimlerinin birlikte kullanımın İngilizce kullanımları yazılarak arama yapılmıştır. Güncel simülasyon araçlarını bulmak için makale son beş yıl içinde (2021-2024) yayınlanmış olarak incelenmiştir. İncelenen çalışmalar daha çok Mühendislik, Enerji, Çevre Bilimi,

Sosyal Bilimler, Matematik ve Bilgisayar Bilimleri olarak öne çıkmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Çift cidarlı cephe sistemlerinin konu alanlarına göre dağılımı.

2.1. Simülasyon Araçları

Binalar için enerji verimli ve düşük karbonlu çözümlerin erken tasarım aşamasında düşünülmesi, daha sürdürülebilir bir dünya için gereklidir. Bu çözümleri bina bazında oluşturabilmek için karar destek araçlarına ihtiyaç duyulmaktadır (Mazzeo et al., 2020). Bina enerji simülasyon araçları, binaların enerji performansını modellemek ve analiz etmek için tasarlanmış yazılım programlarıdır. Bu araçlar, erken tasarım aşamasında alınan kararların bir binanın enerji tüketimine, ısıl konfora ve genel çevreye etkisini değerlendirmesine yardımcı olur (Hashempour, Taherkhani, & Mahdikhani, 2020; Mazzeo et al., 2020). Bina enerji simülasyon programları, binayı simüle etmek için karmaşık matematiksel modeller ve algoritmalar kullanır. Genel olarak, bina enerji simülasyonu; dinamik simülasyon modelleme yöntemleri (enerji simülasyon programları) ve statik

simülasyon modelleme yöntemleri (matematiksel yöntemler) olarak sınıflandırılabilir (Stevanović, 2013). İlk yöntem, önceden tanımlanmış standart simülasyon algoritmalarını kullanmaktadır. İkinci yöntem; matematiksel modellerin tanımlanmasına izin verir (Del Ama Gonzalo, Moreno Santamaría, & Montero Burgos, 2023; Mazzeo et al., 2020). Mevcut herhangi bir bina enerji modelleme simülasyon aracı; Simülasyon Motoru, Grafiksel Arayüze Sahip Araçlar ve Çevresel Simülasyon Araçları olmak üzere üç farklı bileşenden oluşmaktadır (Barber & Krarti, 2022).

2.2. Simülasyon motoru

Enerji verimli farklı bina tasarımları, parametrik analizler ve optimizasyon amaçlı çözümler gerçekleştirmek için kullanılan bina enerji simülasyon aracının (BEST) çekirdeğini oluşturur. EnergyPlus, DOE-2, TRNSYS, ESP-r, IESVE, DeST, Trane Trace 700 ve Modelica BEST simülasyon motorlarından bazılarıdır (Barber & Krarti, 2022). Bu bina simülasyon motorlarından EnergyPlus ve TRNSYS daha yaygın olarak kullanılmaktadır.

EnergyPlus (EP); binalarda enerji tüketimini, aydınlatmayı, çeşitli enerji yüklerini, su kullanımını vb. modellemek için kullanılan bir bina enerji simülasyon programıdır. ABD Enerji Bakanlığı tarafından geliştirilmiş ve sürekli gelişim gösteren modüler bir yapıya dayalı bina enerji simülasyon programıdır. EnergyPlus simülasyon motoru, simülasyon ayrıntılarını okumak ve yazmak için Ara Veri Formatı (IDF) olarak isimlendirilen metin dosyalarını kullanır. Böylelikle programın geometrik CAD araçlarıyla iyi bir arayüz oluşturması sağlanır (EnergyPlus, 2024). Yazılım açık kaynaklıdır ve Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL), diğer çeşitli DOE ulusal laboratuvarları, diğer kurumlar tarafından sürekli geliştirilmektedir (Magni, Ochs, de Vries, Maccarini, & Sigg, 2021). EnergyPlus, binaların sızdırmazlığını

(Bastos Porsani, Casquero-Modrego, Echeverria Trueba, & Fernández Bandera, 2023; Bastos Porsani & Fernández Bandera, 2023), havalandırmasını (R. Zhang, Lam, Yao, & Zhang, 2013), enerji tüketimini (Fumo, Mago, & Luck, 2010; Yousefi, Jahangiri, Alidadi Shamsabadi, & Raeesi Dehkordi, 2019), termal konforunu (Walther, Delmarre, & Huet, 2022) ve iç ortam kalitesini değerlendirmek için (Chen, Gu, & Zhang, 2015) mimarlar, mühendisler, araştırmacılar ve bina uzmanları tarafından yaygın olarak kullanılır.

TRNSYS ise matematiksel modellerin eklenmesini, mevcut eklenti bileşenleri ve diğer simülasyon programlarıyla arayüz oluşturmayı kolaylaştıran esnek bir enerji simülasyon yazılım paketidir. Özellikle modüler yapısı, programa önemli bir esneklik sağlamakta ve dışardan matematiksel modellerin programa eklenmesini kolaylaştırmaktadır. Program termal ve elektrik enerji sistemlerinin performansını değerlendirmeye odaklanırken, trafik akışı veya biyolojik süreçler gibi diğer dinamik sistemleri modellemek için de kullanılabilir (“TRNSYS,” 2024). BEMS simülasyon motorlarının birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Örneğin TRNSYS'nin en büyük sınırlaması, dosyaların içe ve dışa aktarılması için AutoCad Yazılım aracına bağlanamamasıdır. Bu açıdan EnergyPlus, ESP-r ve IDA ICE daha uygundur.

2.2.1. Grafikselle arayüze sahip araçlar

Bu araçlar veri girişi ve sonuç çıktılarını elde etmeyi kolaylaştıran araçlardır. Hesaplama için farklı programlar kullanılır. Kullanıcıların, binaların enerji performansını analiz ve optimize etmelerine yardımcı olur. Bu araçlar, kullanıcıların bina ile ilgili çeşitli parametreleri girmesine olanak sağlar. Bu araçlar, hesaplama için bir veya birden fazla simülasyon motorunun doğrudan kullanımına izin verebilirler. Trane Trace 3D Plus, IDA ICE, Design Builder, OpenStudio, jEPlus, GenOpt

ve BEOpt yaygın kullanılan grafik arayüz araçlarından bazılarıdır (Barber & Krarti, 2022) .

Design Builder (DB), temel anlamda bina enerji tüketimini dinamik olarak hesaplayan EnergyPlus motorunu kullanan bir simülasyon yazılımıdır. Design Builder, ısı konfor, CFD analizi, HVAC analizi ve gün ışığı analizini yapmak için kullanılabilir. Tamamen modüler bir çözüm olan DesignBuilder, temel bir 3 boyutlu modelleme aracı ve herhangi bir bina için derinlemesine analiz sağlamak üzere birlikte çalışan 11 modülden oluşmaktadır. Her modül, karşılık gelen modülleriyle tam olarak entegre olur (Tablo 1). Ancak karmaşık geometrilere sahip modellerin geliştirilmesi için sınırlı seçenekler sunmaktadır (Del Ama Gonzalo et al., 2023).

TRACE 3D Plus, kullanıcıların doğru ve güvenilir bina enerji modelleri oluşturmaya olanak tanıyan bir bina tasarım ve analiz yazılımıdır. Bu yazılım, EnergyPlus simülasyon motoru ile entegre çalışmaktadır. Trane Trace 3D Plus ve Design Builder araçları, Autodesk gibi yaygın olarak kullanılan yazılımlardan Green Building XML (gbXML) CAD dosyalarını içe aktarabilmeleri özelliği sayesinde bina erken tasarım aşamasında kullanımlarını yaygınlaştırır (“TRACE® 3D Plus,” 2024).

IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE); iç mekân ısı koşullarının yanı sıra tüm binanın enerji tüketiminin incelenmesine yönelik, tüm yıl boyunca ayrıntılı ve dinamik, çok bölgesel bir simülasyon aracıdır (Mazzeo et al., 2020). Yazılımın temel amacı, bir bina tasarımının tüm aşamalarında karar vermede önemli bilgiler sağlayabilmektir. Ayrıca, diğer arayüzlerde olduğu gibi düzgün geometrilere sahip BIM dosyalarını içe aktarabilir. IDA ICE tarafından kullanılan yöntemler, farklı kodlama dillerine uyarlanması ve modelleme özelliğini geliştirebilmesi güncel kalmasını sağlar (Del Ama Gonzalo et al., 2023).

OpenStudio®; EnergyPlus simülasyon motorunu kullanarak bina enerji modellemesini sağlar. Ek olarak, Radiance yazılımını kullanarak gelişmiş gün ışığı analizini destekleyen platformlar arası bir yazılım aracı koleksiyonudur (Barber & Krarti, 2022). EnergyPlus ve Radiance gibi bina simülasyon motorlarına kolay bir arayüz sağlar ve kullanım alanlarını geliştirir. Bununla birlikte bu yazılımlara analiz ve optimizasyon gibi farklı işlevsellikler sağlar (Weaver et al., 2012). DesignBuilder, IES ve eQuest gibi diğer yazılım uygulamaları, sürekli güncel kalabilen bir arayüz sunmayı amaçlar. Ancak bu araçlardan bazıları ticari yazılımlar oldukları için kullanıcılara sınırlı özellikler sunmaktadır. OpenStudio ise açık kaynaklı bir araçtır ve son derece genişletilebilir ve özelleştirilebilir bir yazılım uygulamasıdır (Yu et al., 2013). Ayrıca BIM programları, Rhino/Grasshopper ve Sketchup gibi gelişmiş 3d modellemelerin yapılabildiği programlarla uyumluluğu önemli bir avantaj sağlamaktadır.

jEPlus, parametrik analiz çalışmalarına yardımcı olan ve simülasyonları "paralel" modda gerçekleşmesini sağlayan bir araçtır. Kullanıcıların parametreleri ve değerlerini grafiksel bir kullanıcı arayüzünde tanımlamasını sağlar. Simülasyon sayısının çok fazla olduğu durumlarda simülasyonları manuel olarak ayarlamak çok zaman alıcıdır. Ancak jEPlus çeşitli özellikleriyle, EnergyPlus veya TRNSYS gibi simülasyon motorları için bu süreçleri otomatikleştirmektedir. Böylelikle EnergyPlus ve TRNSYS simülasyon dosyalarını otomatik olarak oluşturur ve çalıştırılmasını sağlar (Y. Zhang & Korolija, 2010).

GenOpt, harici bir simülasyon programı tarafından değerlendirilen bir maliyet fonksiyonunun minimizasyonu için kullanılabilen optimizasyon programıdır. GenOpt ile harici program arasındaki veri alışverişi sadece metin dosyaları ile yapılır. EnergyPlus, DOE-2, SPARK1, BLAST 2, TRNSYS gibi metin tabanlı herhangi bir simülasyon programı veya kullanıcı

tarafından yazılan herhangi bir kod ile kullanılabilir (“GenOpt®,” 2024). Ayrıca GenOpt, binanın enerji performansını (Lu, Tang, Ji, & Tu, 2017; Serbouti, Rattal, Boulal, Harmouchi, & Mouhsen, 2018), maliyetini ve termal konforunu optimize etmek (Asadi, da Silva, Antunes, & Dias, 2012) için kullanılabilir.

BEOpt, konut binalarına özel, parametrik analizler ve optimizasyon için uygun olan bir araçtır. Boyut, mimari, doluluk, konum ve kullanım oranları gibi belirli konut özelliklerine dayalı olarak analizler ve tasarım optimizasyonları yapmaktadır (“Building Energy Optimization (BEopt) Software,” 2024). Yazılım, DOE2, TRNSYS veya EnergyPlus simülasyon araçlarını kullanabilir. Ayrıca program, simülasyon motoru tarafından kullanılan bilgileri girmek için model ekranı, seçenekler ekranı (yalıtım seviyeleri, pencere türleri, vb.) ve site ekranı (konum, hava durumu vb.) olmak üzere üç ana arayüz ekranı içermektedir (Rhodes, Gorman, Upshaw, & Webber, 2015).

2.2.2. Çevresel simülasyon araçları

Simülasyon ortamı, sistem simülasyonuna ayrılmış ve kullanıcı (yani deneyici) ile deneysel olarak incelenecek sistem arasında esnek ve akıllı bir arayüz oluşturmaya özen gösteren bir bilgisayarın programlama ortamı olarak tanımlanır (Sydow Achim, 1988). Simülasyon ortamı olarak adlandırılan bu araçlar genellikle binaların ve sistemlerin enerji ile ilgili yönlerini modellemesi, simüle etmesi ve analiz etmesi gibi çeşitli amaçlara hizmet etmektedir. BEMS simülasyon motorlarının yanı sıra diğer eklentilere, programlara ve veri dosyalarının içe veya dışa aktarımı gibi özelliklere erişmeye olanak sağlar. Ayrıca hem bağımsız yazılım araçlarını hem de BEMS simülasyon motorlarıyla entegrasyon için geliştirilmiş açık kaynaklı yazılımları içerir (Barber & Krarti, 2022). Bu araçlardan yaygın olarak kullanılanlar Şekil 2’de gösterilmiştir.

Ladybug; çevreye duyarlı tasarım ve simülasyonu destekleyen ücretsiz bilgisayar uygulamalarından oluşan bir koleksiyondur. Ladybug farklı amaçlara hizmet eden çeşitli uzantılardan oluşmaktadır. Ladybug, EnergyPlus Hava Durumu dosyalarını (.EPW) Grasshopper'a aktarılmasını ve erken tasarım aşamasında çeşitli iklim grafiklerinin görselleştirilmesini sağlar. Ek olarak güneş radyasyonu çalışmaları, görüntü analizleri, zaman modellemesi gibi erken tasarım kararlarının değerlendirilmesinde rol alır.

Honeybee; erken tasarım aşamasından sonraki süreçlerde gün ışığı ve termodinamik modellemeyi sağlar. Görsel konfor simülasyonlarının sonuçları için Radiance yazılımını kullanırken enerji modelleri için EnergyPlus/OpenStudio yazılımlarını kullanır (Hu, Wang, & Chen, 2020; “Ladybug Tools,” 2024). Ladybug Tools, temelindeki tüm açık kaynak kodlu motorları bir araya getiren tek açık kaynak arayüzüdür. 3B modelleme yazılımı içinde çalışır ve simülasyon motorları arasında veri aktarımına olanak tanır. Böylelikle tüm geometri oluşturma, simülasyon ve görselleştirme işlemleri tek bir arayüz üzerinden gerçekleşir. Bu araç, modüler bileşenlerden oluştuğu için tasarımın farklı aşamalarında esneklik gösterebilir. Dahası, parametrik görsel yazılımlar içinde çalışarak tasarım alanlarının keşfedilmesini, veri görselleştirmelerini ve neredeyse her işletim sisteminde çalışabilmesi bu simülasyon aracını popüler kılmaktadır.

Eppy, EnergyPlus girdi dosyalarını programlı olarak oluşturmaya ve değiştirmeye izin verir. Kullanıcılar için bina enerji modellemesi ve simülasyon sürecini otomatikleştirir. Ek olarak EnergyPlus ile Python arasında yorumlayıcı olarak kullanılabilir (Bui, Nguyen, Ghazlan, Ngo, & Ngo, 2020).

Matlab/Simulink w/MLE+, modelleme, simülasyon ve kontrol için yaygın olarak kullanılmaktadır. MLE+, Simulink modellerinin EnergyPlus simülasyonlarına bağlanmasını sağlar.

Bu entegrasyon, bina aktif kontrollerinin ve enerji sistemlerinin ortak simülasyonunu olanaklı kılar. OpenBuild, Binaların ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme sistemlerine yönelik, Model Tahminli Kontrole önem veren gelişmiş bir araç kutusudur. MATLAB'daki kontrolör tasarımının rahatlığını bina simülasyon yazılımı EnergyPlus'ın simülasyon yetenekleriyle birleştirir (T. Gorecki, A. Qureshi, & N. Jones, 2015).

Spawn of EnergyPlus (SOEP), bina bilgi modellemesi ile farklı problemlere çözüm bulmayı ve iş akışlarını kontrol etmeyi amaçlayan yeni nesil bir araçtır. Spawn, EnergyPlus modüllerini aydınlatma, bina kabuğu ve yükler için yeniden kullanmaktadır. Ancak denklem tabanlı modelleme için Modelicaya entegre şekilde kullanılır (Wetter et al., 2020).

Building Control Virtual Test Bed (BCVTB), HVAC, aydınlatma ve aktif cepheler için kontrol algoritmalarının geliştirilmesine yönelik bir simülasyon ortamı sağlar. BCVTB, bina enerji simülasyon programı EnergyPlus motorunu kullanmaktadır (Haves & Xu, 2007). Simscape Library, Matlab/Simulink ile entegre çalışan fiziksel bir modelleme ve simülasyon aracıdır (Djizi, Zahzouh, & Lakehal, 2022). Simscape kitaplığı, bina sistemleri ve enerji bileşenleri dahil olmak üzere fiziksel sistemleri modellemek ve simüle etmek için kullanılabilir (Barber & Krarti, 2022; Karima & Mimouna, 2023).

3. SONUÇ

Çift cidarlı cepheler, enerji verimliliği, ısı ve görsel konforu sağlamada kullanılan gelişmiş bina cepheleridir. Birden fazla amacı dengelemek için erken tasarım aşamalarında simülasyon araçları, optimizasyon, derin öğrenme ve makine öğrenmesi algoritmaları gibi yapay zekâ destekli yazılımlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışma, çift cidarlı cephe sistemlerinin performans değerlendirilmesinde kullanılan simülasyon

araçlarına odaklanmaktadır. Performans değerlendirilmesinde kullanılan simülasyon araçları mühendislik, enerji, çevre bilimi, sosyal bilimler, matematik ve bilgisayar bilimleri gibi farklı alanlarda kullanılmaktadır. Genel olarak çift cidarlı cephe sistemlerinin performans değerlendirmesinde, EnergyPlus, Radiance, DesignBuilder, OpenStudio, Ladybug araçlarının kullanımı daha yaygındır. Özellikle Ladybug Tools aracı, Rhino/Grasshopper programlarıyla entegre çalışabilmesi, görsel konfor simülasyonlarının sonuçları için Radiance aracı, CFD simülasyonları için Butterfly ve enerji modelleri için EnergyPlus/OpenStudio yazılımlarını sunması güncel literatürde en popüler araç olduğunu göstermektedir. Dahası, kullanılan simülasyon araçlarının birbirlerine göre avantaj ve sınırlılıkları bulunmaktadır. BEOpt, GenOpt, DesignBuilder, OpenStudio, IDA ICE, jEPlus vb. yazılımlar, bina enerji analizi, modelleme ve simülasyon ile ilgili işlevlere sahiptir. Her aracın kendine özgü özellikleri ve olsa da enerji verimliliği ve bina performans analizine odaklanmaları nedeniyle bazı ortak işlevleri paylaşırlar. Bina geometrisi, bina bileşenleri, enerji simülasyonu, optimizasyon, parametrik analizler, diğer simülasyon motorları ile entegre çalışabilme ve kullanıcı dostu arayüze sahip olma gibi özellikler, bu araçlara ait ortak özelliklerdir. Genel olarak bu araçların ve kitaplıkların ortak özellikleri; bina geometrisi oluşturma ve değiştirme, bina bileşenlerini modelleme, enerji simülasyonları için genellikle EnergyPlus ile entegre çalışabilme, enerji sistemlerinin ortak simülasyonu ve simülasyon sonuçlarını görselleştirebilmeleridir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma 2209-A- Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı tarafından desteklenmektedir.

KAYNAKÇA

- Asadi, E., da Silva, M. G., Antunes, C. H., & Dias, L. (2012). A multi-objective optimization model for building retrofit strategies using TRNSYS simulations, GenOpt and MATLAB. *Building and Environment*, 56, 370–378. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.04.005>
- Bao, Y., & Xiang, C. (2026). Prototype development and performance evaluation of DSF-BIPV façades: Power generation and indoor daylighting. *Energy*, 360, 141696. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2026.141696>
- Barber, K. A., & Krarti, M. (2022, May 1). A review of optimization based tools for design and control of building energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 160. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112359>
- Barbosa, S., Carlo, J., & Ip, K. (2019). Energy performance of PV integrated office buildings with fan-assisted double skin façades under tropical climates. *International Journal of Green Energy*, 16(13), 1061–1072. <https://doi.org/10.1080/15435075.2019.1653879>
- Bastos Porsani, G., Casquero-Modrego, N., Echeverria Trueba, J. B., & Fernández Bandera, C. (2023). Empirical evaluation of EnergyPlus infiltration model for a case study in a high-rise residential building. *Energy and Buildings*, 296. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113322>
- Bastos Porsani, G., & Fernández Bandera, C. (2023). A Case Study of Empirical Validation of EnergyPlus Infiltration Models Based on Different Wind Data. *Buildings*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/buildings13020511>
- Bui, D. K., Nguyen, T. N., Ghazlan, A., Ngo, N. T., & Ngo, T. D. (2020). Enhancing building energy efficiency by adaptive

- façade: A computational optimization approach. *Applied Energy*, 265. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114797>
- Building Energy Optimization (BEopt) Software. (2024, January 7). Retrieved January 10, 2024, from <https://www.energy.gov/eere/buildings/building-energy-optimization-beopt-software>
- Catto Lucchino, E., Goia, F., Lobaccaro, G., & Chaudhary, G. (2019). Modelling of double skin facades in whole-building energy simulation tools: A review of current practices and possibilities for future developments. *Building Simulation*, 12(1), 3–27. <https://doi.org/10.1007/s12273-019-0511-y>
- Chen, Y., Gu, L., & Zhang, J. (2015). EnergyPlus and CHAMPS-Multizone co-simulation for energy and indoor air quality analysis. *Building Simulation*, 8(4), 371–380. <https://doi.org/10.1007/s12273-015-0211-1>
- Del Ama Gonzalo, F., Moreno Santamaría, B., & Montero Burgos, M. J. (2023). Assessment of Building Energy Simulation Tools to Predict Heating and Cooling Energy Consumption at Early Design Stages. *Sustainability (Switzerland)*, 15(3). <https://doi.org/10.3390/su15031920>
- Djizi, H., Zahzouh, Z., & Lakehal, A. (2022). Quadcopter Prototype Stability Analysis Using Matlab Simscape Library. *The Scientific Bulletin of Electrical Engineering Faculty*, 22(2), 38–43. <https://doi.org/10.2478/sbeef-2022-0018>
- El Ahmar, S., Battista, F., & Fioravanti, A. (2019). Simulation of the thermal performance of a geometrically complex Double-Skin Facade for hot climates: EnergyPlus vs.

- OpenFOAM. *Building Simulation*, 12(5), 781–795.
<https://doi.org/10.1007/s12273-019-0530-8>
- EnergyPlus. (2024, January 7). Retrieved January 7, 2024, from
<https://energyplus.net/>
- Fumo, N., Mago, P., & Luck, R. (2010). Methodology to estimate building energy consumption using EnergyPlus Benchmark Models. *Energy and Buildings*, 42(12), 2331–2337. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.07.027>
- GenOpt®. (2024, January 7). Retrieved January 10, 2024, from
<https://simulationresearch.lbl.gov/GO/>
- GhaffarianHoseini, A., GhaffarianHoseini, A., Berardi, U., Tookey, J., Li, D. H. W., & Kariminia, S. (2016). Exploring the advantages and challenges of double-skin façades (DSFs). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 1052–1065.
<https://doi.org/10.1016/J.RSER.2016.01.130>
- Haidar, G., Kravchenko, I., & Ferrantelli, A. (2026). Optimizing the thermal performance of double skin Façades in a cold climate with phase change materials and cavity ventilation. *Energy and Buildings*, 358, 117248.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2026.117248>
- Hashempour, N., Taherkhani, R., & Mahdikhani, M. (2020, March 1). Energy performance optimization of existing buildings: A literature review. *Sustainable Cities and Society*, Vol. 54. Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101967>
- Haves, P., & Xu, P. (2007). *THE BUILDING CONTROLS VIRTUAL TEST BED-A SIMULATION ENVIRONMENT FOR DEVELOPING AND TESTING CONTROL ALGORITHMS, STRATEGIES AND SYSTEMS*. Retrieved from <http://www.mathworks.com>

- Hu, J., Wang, Z., & Chen, W. (2020). A Study on Automatic Form Optimization Procedures of Building Performance Design Based on “ladybug+Honeybee.” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 531(1). Institute of Physics Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/531/1/012020>
- Karima, G., & Mimouna, O. (2023). Characterization of the Direct Current Micromotor by Simscape. *Journal of Intelligent Systems and Control*, 2(1), 47–53. <https://doi.org/10.56578/jisc020105>
- Ladybug Tools. (2024, January 7). Retrieved January 10, 2024, from <https://www.ladybug.tools/honeybee.html>
- Lu, S., Tang, X., Ji, L., & Tu, D. (2017). Research on energy-saving optimization for the performance parameters of rural-building shape and envelope by trnsys-genopt in hot summer and cold winter zone of China. *Sustainability (Switzerland)*, 9(2). <https://doi.org/10.3390/su9020294>
- Magni, M., Ochs, F., de Vries, S., MacCarini, A., & Sigg, F. (2021). Detailed cross comparison of building energy simulation tools results using a reference office building as a case study. *Energy and Buildings*, 250. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111260>
- Mazzeo, D., Matera, N., Cornaro, C., Oliveti, G., Romagnoni, P., & De Santoli, L. (2020). EnergyPlus, IDA ICE and TRNSYS predictive simulation accuracy for building thermal behaviour evaluation by using an experimental campaign in solar test boxes with and without a PCM module. *Energy and Buildings*, 212. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109812>
- Rhodes, J. D., Gorman, W. H., Upshaw, C. R., & Webber, M. E. (2015). Using BEopt (EnergyPlus) with energy audits and

- surveys to predict actual residential energy usage. *Energy and Buildings*, 86, 808–816.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.076>
- Serbouti, A., Rattal, M., Boulal, A., Harmouchi, M., & Mouhsen, A. (2018). Application of sensitivity analysis and genopt to optimize the energy performance of a building in Morocco. *International Journal of Engineering and Technology(UAE)*, 7(4), 2068–2074.
<https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.13280>
- Shi, F., Zheng, C., Lin, J., Yang, X., You, Y., Yang, M., & Hong, X. (2025). Energy-saving and visual-thermal performance of multi-sectional DSF system in a typical office room across five climate zones in China. *Building and Environment*, 277, 112945.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.112945>
- Stevanović, S. (2013). Optimization of passive solar design strategies: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 25, pp. 177–196.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.04.028>
- Sung, U.-J., & Kim, S.-H. (2019). A Study on the Improvement of Double-Skin Facade Operation for Reducing Heating Load in Winter. *Sustainability*, 11(22), 6238.
<https://doi.org/10.3390/su11226238>
- Sydow Achim, G. T. S. , V. R. (Ed.). (1988). Systems Analysis and Simulation II. In *Applications Proceedings of the International Symposium held in Berlin*. Berlin: Springer-Verlag.
- T. Gorecki, T., A. Qureshi, F., & N. Jones, C. (2015). OpenBuild : An Integrated Simulation Environment for Building Control. *2015 IEEE Conference on Control Applications*

(CCA) Part of 2015 IEEE Multi-Conference on Systems and Control. Sydney, Australia.

TRACE® 3D Plus. (2024, January 7). Retrieved January 10, 2024, from <https://www.trane.com/commercial/north-america/us/en/products-systems/design-and-analysis-tools/trane-design-tools/trace-3d-plus.html>

TRNSYS. (2024, January 7). Retrieved January 7, 2024, from <https://www.trnsys.com/index.html>

Walther, E., Delmarre, C., & Huet, S. (2022). Simulation of Outdoor Thermal Comfort: A Tweak with EnergyPlus Building Simulation 2021 Conference. *Building Simulation Conference Proceedings*, 1236–1243. International Building Performance Simulation Association.
<https://doi.org/10.26868/25222708.2021.30227>

Weaver, E., Long, N., Fleming, K., Schott, M., Benne, K., & Hale, E. (2012). *Rapid Application Development with OpenStudio: Preprint*. Retrieved from <http://www.osti.gov/bridge>

Wetter, M., Benne, K., Gautier, A., Nouidui, T. S., Ramle, A., Roth, A., ... Winther, C. (2020). *LIFTING THE GARAGE DOOR ON SPAWN, AN OPEN-SOURCE BEM-CONTROLS ENGINE*. Retrieved from <https://obc.lbl.gov>

Yoon, Y. B., Seo, B., Koh, B. B., & Cho, S. (2019). Performance analysis of a double-skin façade system installed at different floor levels of high-rise apartment building. *Journal of Building Engineering*, 26, 100900. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2019.100900>

Yousefi, Y., Jahangiri, M., Alidadi Shamsabadi, A., & Raeesi Dehkordi, A. (2019). Designing a mediator space and the study of its effect on the energy consumption of a

residential building using EnergyPlus software in Savadkuh, Iran. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 17(4), 833–846.
<https://doi.org/10.1108/JEDT-01-2018-0005>

Yu, N., Jiang, Y., Luo, L., Lee, S., Jallow, A., Wu, D., Yen, J. (2013). *Integrating BIMserver and OpenStudio for Energy Efficient Building*.

Zhang, R., Lam, K. P., Yao, S. chune, & Zhang, Y. (2013). Coupled EnergyPlus and computational fluid dynamics simulation for natural ventilation. *Building and Environment*, 68, 100–113.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.04.002>

Zhang, Y., & Korolija, I. (2010). *Performing complex parametric simulations with jEPlus*.

MİMARİ CEPHELERDE MÜDAHALE, HASAR VE BOZULMALARIN İNCELENMESİ: DERGİPARK VERİTABANINDAKİ ULUSAL LİTERATÜR ÜZERİNE SİSTEMATİK BİR DEĞERLENDİRME

Minel KURTULUŞ GENÇAY¹

1. GİRİŞ

Mimari yapıların dış çevreyle doğrudan temas halinde olan cepheleri; çevresel etkenler, malzeme özellikleri, yapım teknikleri, bakım koşulları ve kullanıcı müdahaleleri nedeniyle zaman içerisinde çeşitli hasar ve bozulmalara maruz kalmaktadır. Bu bozulmalar yalnızca cephelerin estetik ve mimari karakterini değil, aynı zamanda yapı elemanlarının fiziksel performansını ve kullanım ömrünü de etkileyebilmektedir. Özellikle tarihi ve kültürel miras niteliğindeki yapılarda, özgün malzemenin ve mimari karakterin korunabilmesi için cephelerdeki bozulmaların doğru biçimde tespit edilmesi ve uygun müdahale kararlarının geliştirilmesi önem taşımaktadır.

Günümüzde cephe hasar ve bozulmalarının belirlenmesinde geleneksel görsel inceleme ve belgeleme yöntemlerinin yanı sıra yersel lazer tarama, termografi, nem ölçümü ve spektrometrik analizler gibi tahribatsız veya az tahribatlı yöntemlerden de yararlanılmaktadır. Bununla birlikte, farklı yapı türleri ve malzemeler üzerine gerçekleştirilen ulusal çalışmaların kapsam, yöntem ve müdahale yaklaşımları açısından

¹ Doktor Öğretim Üyesi, İstanbul Gelişim Üniversitesi, Güzel Sanatlar Fakültesi, İç Mimarlık Bölümü, ORCID: 0000-0003-4623-0613

çeşitlilik göstermesi, mevcut bilgi birikiminin bütüncül biçimde değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, DergiPark Akademik veritabanında yayımlanan ulusal bilimsel makaleler üzerinden mimari cephelerde müdahale, hasar ve bozulma konusundaki mevcut literatürü sistematik bir çerçevede değerlendirmektir. Bu kapsamda cephelerde görülen hasar ve bozulma türleri, bunlara neden olan etkenler, kullanılan tespit ve analiz yöntemleri ile önerilen müdahale ve koruma yaklaşımları incelenerek ulusal literatürdeki temel eğilimlerin ve araştırma boşluklarının ortaya konulması amaçlanmaktadır.

2. ÇALIŞMANIN YÖNTEMİ

Bu çalışma, mimari cephelerde müdahale, hasar ve bozulma konusundaki ulusal araştırmaların sistematik biçimde değerlendirilmesine dayanan bir literatür araştırması olarak tasarlanmıştır. Araştırmanın veri kaynağını DergiPark Akademik veritabanında yayımlanan bilimsel makaleler oluşturmaktadır. Literatür tarama sürecinde “cephe”, “cephe hasarı”, “cephe bozulması”, “cephe müdahalesi”, “cephe malzemesi”, “cephe koruma” ve “cephe onarımı” gibi anahtar kavramlardan yararlanılmıştır.

Çalışma kapsamında mimari cephelerde hasar, bozulma, müdahale, koruma, onarım veya bunların tespit ve değerlendirilmesine doğrudan odaklanan ve tam metnine erişilebilen bilimsel makaleler değerlendirmeye alınmıştır. Konuyla doğrudan ilişkili olmayan çalışmalar ile tez, kitap, bildiri ve benzeri yayın türleri kapsam dışında bırakılmıştır. Tarama ve seçim süreci sonucunda belirlenen 20 makale; yayın yılı, yapı türü, cephe ve malzeme özellikleri, hasar ve bozulma türleri, bozulmaya neden olan etkenler, tespit yöntemleri ve müdahale yaklaşımları açısından içerik analizi yoluyla incelenmiştir.

Elde edilen veriler ortak temalar altında sınıflandırılarak karşılaştırılmış ve ulusal literatürdeki araştırma eğilimleri ile öne çıkan yöntem ve yaklaşımlar belirlenmiştir. Böylece farklı yapı ve malzeme gruplarına ilişkin çalışmalar ortak bir değerlendirme çerçevesinde ele alınmıştır.

3. LİTERATÜR TARAMASI

Mimari yapılarda dış ortam koşullarıyla doğrudan temas halinde olan cepheler, hem fiziki bozulmaların en yoğun görüldüğü yapı elemanları hem de koruma müdahalelerinin odak noktasıdır. Ulusal literatürde cephe patolojisi, bozulma türleri, belgeleme teknikleri ve müdahale stratejileri üzerine yapılan araştırmalar; gelişen teknolojik imkânlar, sayısal karar destek modelleri ve alan çalışmaları çerçevesinde geniş bir yelpazede çeşitlenmektedir

3.1. Cephe Bozulmalarının Belgelenmesi ve Teşhisinde Tahribatsız / Sayısal Yöntemler

Cephe koruma ve müdahale süreçlerinin ilk ve en kritik aşamasını nesnel, hassas ve güvenilir teşhis yöntemleri oluşturmaktadır. Bu doğrultuda Karataş, Alptekin ve Yakar (2023), Mardin Mungan Konağı'nın taş cephelerini Yersel Lazer Tarama (TLS) ve 2 boyutlu ortofoto haritalama yöntemiyle incelemişler; nokta bulutları üzerinden taş yüzeylerdeki bitkilenme, kararma, nem, sıva dökülmesi ve aşınmaları milimetrik hassasiyetle dijitalleştirerek tahribatsız bir belgeleme ve teşhis modeli sunmuşlardır

Dijital ve fiziksel ölçüm teknolojilerinin bütünleşmesini destekleyen bir diğer çalışmada Sayın Olgun ve Kuş (2026), İstanbul'daki geleneksel ve tescilli binaların cephelerindeki biyolojik bozulmaları kızılötesi termografi (termal görüntüleme)

ve yüzey nem ölçümü gibi tahribatsız muayene yöntemleriyle araştırmışlardır

Çalışma sonucunda, cephedeki gizli nem anomalileri ile mikroklimsel biyolojik oluşumlar arasındaki doğrudan ilişki ortaya konularak bütünleşik bir koruma yaklaşımının zorunluluğu vurgulanmıştır

Hassas ölçüm tekniklerinin yanı sıra teşhis verilerinin standart bir görsel dile dönüştürülmesi de büyük önem taşımaktadır. Gür ve Acun Özgünler (2017), Galata-Pera bölgesindeki 19. yüzyıl kârgir binalarının cephelerindeki hasar ve bozulmaları analitik rölöve ve kartografik haritalama teknikleriyle inceleyerek 4 aşamalı bir gösterim ve lejant modeli geliştirmişler; restorasyon projelerinde görsel ifadelendirmenin standartlaşmasına katkı sağlamışlardır

Benzer şekilde koruma kimyasallarının teşhis ve denetim boyutunu ele alan Karkaş ve Acun Özgünler (2021), tarihi kârgir yapılarda kullanılan sağlamlaştırıcı ve su itici kimyasal uygulamaların performansını Karsten tüpü, ultrasonik hız ölçümü, renk spektrofotometresi ve temas süngeri gibi laboratuvar ve in-situ tahribatsız/az tahribatlı deney yöntemleriyle analiz etmişler; müdahale öncesi ve sonrası performansı ölçülebilir kılan bir değerlendirme altyapısı kurgulamışlardır

3.2. Kârgir ve Taş Cephelerde Bozulma Mekanizmaları ve Yapısal Etkileşimler

Teşhis tekniklerinin sağladığı veriler, farklı malzeme türlerinin atmosferik ve çevresel koşullar altındaki bozulma davranışlarını anlamayı kolaylaştırmaktadır. Anıtsal ölçekli taş yapılara odaklanan Kar, Dereli ve Yıldız (2024), Afyonkarahisar Gedik Ahmet Paşa (İmaret) Camii cephelerindeki bozulmaları saha gözlemi ve görsel teşhis yöntemiyle sınıflandırmışlar; çevresel atmosferik etkilerin ve su birikimlerinin taş yüzeylerde

kararma, aşınma, çatlama ve derz boşalmalarına yol açtığını belirleyerek koruma müdahalelerini gerekçelendirmişlerdir

Benzer bir malzeme patolojisi incelemesinde Biçen Çelik, Ergin, Dal ve Ay (2024), Mardin medreselerinin taş cephelerindeki bozulmaları görsel analiz ve XRF spektrometresi yöntemiyle incelemişler; kalker (kireç taşı) malzemede kapiler nem, tuz kristalleşmesi, yüzey kaybı ve renk değişimlerinin en yaygın bozulma türleri olduğunu saptayarak kimyasal ve fiziksel koruma önerileri sunmuşlardır

Konut dokusundaki kârgir yapıları inceleyen Erturan ve Eren (2023), Kadıköy Caferağa Mahallesi'ndeki kârgir binaların cephe bozulmalarını saha gözlemleri ve tipolojik sınıflandırma yöntemiyle araştırmışlar; sıva-boya dökülmeleri, aşınma, korozyon lekeleri ve bilinçsiz kullanıcı eklentilerinin (klima dış üniteleri, tabelalar, kablolar) cephe patolojisini tetikleyen ana etkenler olduğunu tespit etmişlerdir

Kentsel ve idari yapılardaki yalıtım ve detay hatalarını değerlendiren Dereli, Tosun ve Koçu (2018), Konya PTT Hizmet Binası'nın cephe kaplama malzemelerindeki hasarları mevsimsel saha gözlemleri ve alan analizleri yoluyla incelemişler; derz boşluklarının yanlış tanzimi ve yağmur suyu uzaklaştırma detaylarındaki hataların kapiler su etkisiyle kalıcı dökülmelere yol açtığını, acil basit onarımların şart olduğunu göstermişlerdir

Tarihi yapılardaki yanlış geçmiş müdahalelerin olumsuz sonuçlarına dikkat çeken Gürel ve Dereli (2023), Konya Hoca Hasan Mescidi cephesindeki taş ve tuğla bozulmalarını saha incelemesi ve arşiv verileri kıyasıyla ele almışlar; geçmiş dönemlerde yapılan çimento esaslı harç/derz uygulamalarının ve beton bentlerin yapıyı tahrip ettiğini, özgün malzemeyle çürütme ve tamamlamanın önemini ortaya koymuşlardır

3.3. Ahşap Mimari Miras, Pencere Sistemleri ve Deprem Davranışı

Kârgir yapılardan ahşap ve karma strüktürlü yapılara geçildiğinde, cephe bozulmalarının yapının doluluk-boşluk oranları ve ahşap elemanların yaşlanmasıyla doğrudan ilişkili olduğu görülmektedir. Okumuş ve Eren (2020), İstanbul Fener ve Balat yerleşimlerindeki 7 konutta bulunan 56 ahşap pencere sistemini görsel inceleme ve yaşam döngüsü aşamaları (tasarım, uygulama, kullanım) analizi yöntemiyle incelemişler; ahşap doğramalardaki boya dökülmesi ve çürümelerin yalnızca estetik kayıp oluşturmadığını, aynı zamanda ciddi ısı köprüleri ve su sızıntılarına yol açtığını saptamışlardır

Ahşap ve karma malzemeli konutlardaki koruma sorunlarını ele alan Doğruer (2021), geleneksel yapılardaki malzeme bozulmalarını görsel analiz ve mevcut durum belgelemesi yöntemiyle araştırmış; ahşap doğrama, cam ve alçı elemanlardaki çatlama, renk değişimi ve dökülmelere karşı özgün malzemeye uygun koruyucu bakım önerileri geliştirmiştir

Geleneksel ahşap konutların bütüncül koruma ve restorasyon boyutunu inceleyen Özkan Önür (2026), Sakarya Taraklı Hasan Kuru Evi'nin ahşap karkas arası kerpiç dolgulu cephesini rölöve, fotoğrafla belgeleme ve konum-bozulma-teşhis-müdahale matrisi yöntemiyle analiz etmiş; niteliksiz dönemsel eklerin kaldırılması, kireç esaslı sıvalarla müdahale edilmesi ve izlenebilir bir karar akışı oluşturulması gerektiğini kanıtlamıştır

Benzer biçimde sivil mimarlık mirasının korunmasında sosyo-ekonomik faktörleri vurgulayan Özer Baş, Gölükcü ve Demir (2025), Kula evlerinin cephe bozulmalarını saha gözlemi, belgeleme ve mülkiyet/kullanım durumu ilişkisel analizi yoluyla incelemişler; yapılardaki terk edilme ve işlevsizliğin fiziki

bozulmaları hızlandığını tespit ederek toplum tabanlı koruma ve işlevsel yeniden kullanım modellerini önermişlerdir

Geleneksel ahşap konutların strüktürel ve cephe güvenliğini deprem odağında değerlendiren Sarıkaya ve Göçer (2024), İstanbul Tarihi Yarımada'daki geleneksel ahşap konutların deprem davranışını ve cephe elemanlarının performansını saha analizi ve strüktürel değerlendirme yöntemiyle incelemişler; ahşap karkas sistemin esnek yapısının deprem yutma kapasitesini artırdığını, ancak bakımsızlık ve niteliksiz cephe müdahalelerinin bu emniyeti zaafa uğratarak risk oluşturduğunu belirlemişlerdir

3.4. Çağdaş/Özel Cephe Sistemleri ve Kullanıcı Müdahaleleri

Geleneksel dokunun yanı sıra modern ve çağdaş cephe sistemlerinde de tasarım ve kullanım kaynaklı bozulma ve uyumsuzluk sorunları yaşanmaktadır. Özmen (2022), Türkiye'deki çubuk alüminyum giydirme cephe sistemlerini analitik süreç ve detay analizi yöntemiyle incelemiş; mimari tasarım ile taşıyıcı sistem entegrasyonu arasında yaşanan detay uyumsuzluklarını, ısı/su yalıtım zafiyetlerini ve uygulama hatalarını ortaya koyarak tasarım-üretim koordinasyonuna yönelik çözüm ilkeleri sunmuştur

Öte yandan modern toplu konut alanlarındaki kullanıcı kaynaklı cephe değişimlerini inceleyen Çakır Uzelli ve Gür (2023), İstanbul Selamsız Ucuz Konutları cephelerindeki bozulma ve müdahaleleri tipolojik analiz ve eleman ölçeğinde sınıflandırma yöntemiyle araştırmışlar; kullanıcılar tarafından yapılan pencere/kapı eklentilerinin, kat ilavelerinin ve çatı değişimlerinin özgün mimari kimliği bozduğunu ve ikincil fiziki kusurları ürettiğini saptamışlardır

Benzer bir niteliksiz müdahale sorununu alan ölçeğinde ele alan Karataş, Alptekin ve Yakar (2023), Mardin Savur Dereiçi

(Killit) Köyü çarşı içi binalarındaki cephe hasarlarını yerinde belgeleme ve sokak silueti analizi yöntemiyle incelemişler; tescilli taş yapılara sonradan eklenen PVC doğramaların, kontrolsüz harç dolgularının ve demir elemanların özgün dokuyu tahrip ettiğini belirleyerek niteliksiz eklerin sökülmesi ve taş temizliği odaklı müdahale kararları geliştirmişlerdir

3.5. Sistematik Durum Değerlendirme, Puanlama ve Müdahale Karar Destek Modelleri

Literatürdeki teşhis ve müdahale çalışmalarının ulaştığı son aşama, öznel değerlendirmeleri nesnel ve denetlenebilir sayısal sistemlere dönüştüren karar destek modellerinin geliştirilmesidir. Öztürk ve Coşgun (2023), yapı cephelerindeki bozulma ve hasarlar için sistemli görsel analiz şeması, puanlamaya dayalı sayısallaştırma (kusur ağırlık puanı, bileşen puanı, cephe durum puanı formülasyonu) ve karar matrisi yöntemini kurgulamışlardır

Geliştirilen bu yöntem, cephe durumunu nicel puanlara dönüştürerek uzmanlara objektif ve izlenebilir bir biçimde önleyici, durum bazlı veya kapsamlı müdahale seviyesini belirleme imkânı sağlamıştır

Müdahale kararlarının parametrik arka planını araştıran Karkaş ve Acun Özgünler (2022) ise tarihi yapılarda yüzey müdahalesi kararlarını etkileyen faktörleri uzman anketi derecelendirmesi ve istatistiksel güvenilirlik (Cronbach Alfa) analizi yöntemiyle incelemişler; sağlamlaştırıcı ve su itici uygulamalarda karar vericilerin en çok önem verdiği performans kriterlerini önceliklendirerek bilimsel bir karar destek altyapısı oluşturmuşlardır

Özetle, ulusal literatürde DergiPark veritabanı ölçeğinde yapılan çalışmalar; cephelerin malzeme türü (taş, kârgir, ahşap, alüminyum), bozulma patolojisi, gelişmiş tahribatsız teşhis teknolojileri (TLS, termografi, XRF) ve sayısallaştırılmış karar

destek sistemleri ekseninde bütüncül bir gelişme gösterdiğini doğrulamaktadır.

4. DERGİPARK LİTERATÜRÜNDE MİMARİ CEPHELERDE MÜDAHALE, HASAR VE BOZULMALAR

4.1. Cephelerde Hasar ve Bozulma Türleri ile Nedenleri

Literatürde cephelerde meydana gelen hasar ve bozulmaların, yapı malzemesi, çevresel koşullar, yapım özellikleri ve kullanım biçimleriyle ilişkili olarak farklılaştığı görülmektedir. Taş ve kârgir yapılara yönelik çalışmalar özellikle nem, su etkisi, atmosferik koşullar, tuzlanma, aşınma, çatlama ve yüzey kayıplarını öne çıkarmaktadır. Dereli, Tosun ve Koçu (2018), cephe kaplama malzemelerindeki bozulmaların yağmur suyu uzaklaştırma ve derz detaylarındaki uygulama sorunlarıyla ilişkisini ortaya koyarken; Erturan ve Eren (2023), kârgir cephelerde sıva ve boya dökülmeleri, aşınma ve korozyon izlerinin yanı sıra kullanıcı kaynaklı eklentilerin de bozulma sürecini etkilediğini belirtmektedir. Benzer biçimde Kar, Dereli ve Yıldız (2024) taş yapılarda kararma, aşınma, çatlama ve derz boşalmalarını; Biçen Çelik vd. (2024) ise kapiler nem, tuz kristalleşmesi, yüzey kaybı ve renk değişimlerini öne çıkan bozulmalar olarak değerlendirmiştir.

Ahşap cephe elemanlarında ise bozulmaların özellikle malzemenin yaşlanması, bakım eksikliği ve çevresel etkilerle ilişkili olduğu görülmektedir. Okumuş ve Eren (2020), geleneksel konutlardaki ahşap pencere sistemlerinde boya dökülmesi ve çürümenin yanı sıra su sızıntısı ve ısı kaybı gibi ikincil performans sorunlarına dikkat çekmektedir. Özkan Önür (2026) ise geleneksel ahşap konutlarda malzeme bozulmalarının yanı sıra niteliksiz dönemsel eklerin cephe bütünlüğü üzerindeki

etkisini ortaya koymaktadır. Özer Baş, Gölükcü ve Demir (2025) tarafından incelenen Kula evlerinde ise fiziksel bozulmaların yapıların kullanım ve mülkiyet durumlarıyla ilişkili olduğu belirtilerek, bozulmanın yalnızca fiziksel çevre koşullarıyla açıklanamayacağı görülmektedir.

Çağdaş cephe sistemlerinde ise bozulma nedenleri daha çok tasarım, detaylandırma ve uygulama süreçleriyle ilişkilendirilmektedir. Saban ve Özmen (2022), çubuk alüminyum giydirme cephelerde mimari tasarım ile taşıyıcı sistem arasındaki uyumsuzlukların yanı sıra ısı ve su yalıtımındaki sorunlara dikkat çekmektedir. Çakır ve Gür (2023) ise toplu konut cephelerinde kullanıcıların gerçekleştirdiği pencere, kapı, çatı ve kat ilavelerinin cephe bütünlüğünü ve mimari karakteri değiştirdiğini ortaya koymaktadır. Bu bulgular birlikte değerlendirildiğinde, cephe bozulmalarının doğal yaşlanma ve çevresel etkenlerin yanı sıra tasarım, uygulama, bakım ve kullanıcı müdahalelerinin birbirini etkilediği çok bileşenli bir süreç olduğu görülmektedir.

4.2. Cephe Hasarlarının Tespit ve Değerlendirme Yöntemleri

İncelenen çalışmalar, cephe hasarlarının belirlenmesinde geleneksel gözlemsel yöntemlerden sayısal ve tahribatsız analiz tekniklerine doğru çeşitlenen bir yöntem yaklaşımı ortaya koymaktadır. Görsel inceleme, fotoğrafla belgeleme, analitik rölöve ve mevcut durum haritalaması özellikle tarihi yapıların mevcut durumunun belirlenmesinde temel yöntemler olarak kullanılmaktadır (Gür, 2017; Doğruer, 2021). Bu yöntemler, bozulmaların konum ve türlerinin belgelenmesinde etkili olmakla birlikte, yüzey altında veya doğrudan gözlemlenemeyen bozulmaların belirlenmesinde sınırlı kalabilmektedir.

Bu sınırlılığı azaltmaya yönelik olarak bazı çalışmalarda tahribatsız ve sayısal tekniklerden yararlanılmıştır. Karataş,

Alptekin ve Yakar (2023), yersel lazer tarama ve ortofoto yöntemleriyle taş cephelerdeki bozulmaları sayısal ortamda belgeleyerek hassas bir teşhis altyapısı oluşturmuştur. Sayın Olğun ve Kuş (2026) ise termografi ve yüzey nem ölçümlerini kullanarak biyolojik bozulmalar ile cephelerdeki nem koşulları arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Biçen Çelik vd. (2024) tarafından kullanılan XRF analizi de taş malzemenin kimyasal özellikleri ve bozulma süreçlerinin değerlendirilmesine katkı sağlamaktadır.

Literatürde yalnızca hasarın belirlenmesine değil, elde edilen verilerin standartlaştırılmasına ve karar süreçlerinde kullanılmasına yönelik yaklaşımlar da dikkat çekmektedir. Karkaş ve Acun Özgünler (2021), farklı deney ve ölçüm tekniklerini kullanarak koruyucu kimyasal uygulamaların performansını değerlendirmiş; Öztürk ve Coşgun (2023) ise cephe durumunun puanlama ve karar matrisi aracılığıyla sayısallaştırılmasını önermiştir. Bu çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, cephe değerlendirmelerinde gözleme dayalı yöntemlerin yerini tamamen sayısal tekniklere bırakmasından ziyade, farklı yöntemlerin birbirini tamamladığı bütünlük bir değerlendirme yaklaşımının gelişmekte olduğu görülmektedir.

4.3. Müdahale, Koruma ve Karar Destek Yaklaşımları

Literatürde önerilen müdahale yaklaşımlarının temel olarak özgün malzemenin korunması, bozulma nedenlerinin ortadan kaldırılması ve niteliksiz müdahalelerin kontrol edilmesi ekseninde şekillendiği görülmektedir. Dereli, Tosun ve Koçu (2018), cephelerde su ve detay kaynaklı sorunların giderilmesine yönelik onarım önerileri geliştirirken; Gürel ve Dereli (2023), özgün malzemeyle uyumsuz geçmiş müdahalelerin yapı üzerindeki olumsuz etkilerine dikkat çekerek özgün malzeme ve tekniklerle gerçekleştirilecek müdahalelerin önemini vurgulamaktadır. Özkan Önür (2026) de tarihi ahşap yapılarda

niteliksiz eklerin kaldırılması ve yapının özgün malzeme özellikleriyle uyumlu müdahalelerin uygulanmasını önermektedir.

Müdahale kararlarının yalnızca hasarın türüne göre değil, yapının mevcut durumu ve müdahale önceliğine göre belirlenmesine yönelik çalışmalar da bulunmaktadır. Karkas ve Acun Özgünler (2022), koruma kararlarını etkileyen farklı parametreleri uzman görüşleri üzerinden değerlendirirken, Öztürk ve Coşgun (2023) cephe durumunun sayısal olarak değerlendirilmesine dayalı bir karar destek modeli geliştirmiştir. Bu yaklaşım, cephelerdeki farklı bozulmaların karşılaştırılmasını ve müdahale düzeylerinin daha sistematik biçimde belirlenmesini mümkün kılmaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, ulusal literatürde cephe müdahalelerinin yalnızca mevcut hasarın giderilmesine odaklanmadığı; teşhis, neden analizi, malzeme uyumluluğu, özgünlüğün korunması ve müdahale önceliğinin birlikte ele alındığı görülmektedir. Bununla birlikte, farklı yapı türleri ve malzeme grupları için geliştirilen yöntemlerin ortak bir değerlendirme sisteminde bütünleştirilmesine yönelik çalışmaların sınırlı olması, gelecekteki araştırmalar açısından önemli bir gelişme alanı oluşturmaktadır.

5. SONUÇ

Bu çalışma, DergiPark Akademik veritabanında yer alan 20 ulusal bilimsel makale üzerinden mimari cephelerde müdahale, hasar ve bozulmalara ilişkin mevcut araştırmaları sistematik bir çerçevede değerlendirmiştir. İncelenen çalışmalar; farklı yapı türleri, malzeme özellikleri, bozulma nedenleri, tespit yöntemleri ve müdahale yaklaşımları açısından çeşitlilik göstermektedir. Bu çeşitlilik, cephelerin fiziksel durumunun yalnızca malzeme veya çevresel koşullar üzerinden değil,

tasarım, yapım, kullanım, bakım ve koruma süreçlerinin birlikte değerlendirilmesiyle anlaşılabilirliğini ortaya koymaktadır.

Literatür incelemesi sonucunda cephelerdeki hasar ve bozulmaların başta nem ve su etkisi, atmosferik koşullar, malzeme yaşlanması, bakım eksikliği ve uygulama hataları olmak üzere farklı etkenlerin birlikte etkisiyle oluştuğu görülmüştür. Bunun yanında, özellikle tarihi ve geleneksel yapılarda özgün malzemeyle uyumsuz onarımlar ve nitelsiz kullanıcı müdahaleleri cephelerin fiziksel ve mimari bütünlüğünü olumsuz etkileyen önemli unsurlar olarak öne çıkmaktadır. Çağdaş cephe sistemlerinde ise tasarım-taşıyıcı sistem uyumsuzluğu, detaylandırma ve yalıtım sorunlarının daha belirgin olduğu görülmektedir. Dolayısıyla cephe bozulmalarının nedenlerinin yapı türü ve malzeme özellikleri dikkate alınarak çok boyutlu biçimde ele alınması gerekmektedir.

Hasarların tespitinde ise görsel inceleme ve mevcut durum belgeleme yöntemlerinin temel yaklaşım olmayı sürdürmekle birlikte, yersel lazer tarama, termografi, yüzey nem ölçümü ve XRF gibi tahribatsız veya az tahribatlı tekniklerin kullanımının giderek önem kazandığı görülmektedir. Bu yöntemler, cephe bozulmalarının daha hassas biçimde belgelenmesine ve gözle doğrudan belirlenemeyen fiziksel veya kimyasal süreçlerin değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte, farklı tekniklerden elde edilen verilerin ortak bir değerlendirme sistemi içerisinde bütünleştirilmesi, mevcut literatürde geliştirilmesi gereken bir alan olarak değerlendirilmektedir.

Müdahale ve koruma yaklaşımları açısından incelenen çalışmalar; bozulma nedenlerinin giderilmesi, özgün malzemenin korunması, uyumsuz geçmiş müdahalelerin kontrol edilmesi ve müdahale kararlarının mevcut durum verilerine dayandırılması gerekliliğini ortaya koymaktadır. Özellikle puanlama, sınıflandırma ve karar matrisi gibi yaklaşımlar, cephe durumunun

nesnel ve izlenebilir biçimde değerlendirilmesine yönelik önemli bir potansiyel taşımaktadır. Ancak bu yöntemlerin farklı yapı türleri ve malzeme grupları arasında ortak bir değerlendirme çerçevesinde bütünleştirilmesine yönelik çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir.

Sonuç olarak, DergiPark literatüründeki çalışmaların cephede araştırmalarını geleneksel gözlemsel değerlendirmelerden sayısal ve tahribatsız teşhis yöntemlerine, buradan da karar destek ve sayısallaştırma yaklaşımlarına doğru genişleyen bir çerçevede geliştirdiği söylenebilir. Bununla birlikte ulusal literatürde farklı bozulma türlerini, nedenlerini, tespit yöntemlerini ve müdahale seçeneklerini aynı sistem içerisinde ilişkilendiren bütüncül modellerin geliştirilmesine ihtiyaç bulunmaktadır. Gelecekte yapılacak araştırmaların; farklı malzeme ve yapı türlerini kapsayan, sayısal belgeleme ve teşhis yöntemlerini karar destek sistemleriyle bütünleştiren ve müdahale önceliklerini nesnel ölçütlerle belirleyebilen yaklaşımlara yönelmesi, mimari cephelerin sürdürülebilir korunması ve uzun dönemli performansının izlenmesi açısından katkı sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- Biçen Çelik, A., Ay, İ., Ergin, Ş., & Dal, M. (2024). Stone deterioratins in Mardin Madrasas: The case of Şehidiye and Kasımiye Madrasas. *Cultural Heritage and Science*, 5(1), 38-51. <https://doi.org/10.58598/cuhes.1441372>
- Çakır, H. Y., & Gür, N. V. (2023). Examination of Interventions and Defects on Façades: The Case of Selamsız Low-Cost Mass Housing in Istanbul, Türkiye. *Journal of Architectural Sciences and Applications*, 8(2), 847-864. <https://doi.org/10.30785/mbud.1325694>
- Dereli, M., Tosun, M., & Koçu, N. (2018). Yapıların cephe kaplama malzemelerinde hasar oluşturan etkilerin tespiti ve çözüm önerileri – konya ptt hizmet binası örneği. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, 6(3), 445-460. <https://doi.org/10.15317/Scitech.2018.144>
- Doğruer, F. S. (2021). Ankara Zincirli Cami: Korunma Sorunları ve Çözüme Yönelik Öneriler. *İDEALKENT*, 12(32), 444-470. <https://doi.org/10.31198/idealkent.851975>
- Erturan, B., & Eren, Ö. (2023). Kagir Binaların Kagir Malzemeli Cephelerinde Ortaya Çıkan Fiziki Bozulmalar ve Nedenlerinin İncelenmesi. *Mimarlık ve Yaşam*, 8(2), 437-469. <https://doi.org/10.26835/my.1195020>
- Gür, H. (2017). Tarihi Kâgır Yapıların Cephelerindeki Hasar ve Bozulmaların Tespiti ve İfadelenilmesi İçin Bir Model Önerisi ve Modelin Galata-Pera Bölgesindeki 19. Yüzyıl Yapılarında Sınanması. *Restorasyon ve Konservasyon Çalışmaları Dergisi*, 1(20), 42-52. <https://izlik.org/JA92XC49KD>
- Gürel, Ş. S., & Dereli, M. (2023). Damage Types and Repair Techniques in Seljuk Period Stone Architectural

- Monuments: Konya Alaaddin Mosque. Selçuklu Medeniyeti Araştırmaları Dergisi, 8, 1-21. <https://doi.org/10.47702/sema.2023.28>
- Gürel, Ş. S., & Dereli, M. (2023). Kültür Mirası Mimari Yapılarda Malzeme Bozulmaları: Hoca Hasan Mescidi. Konya Sanat, 6, 182-194. <https://doi.org/10.51118/konsan.2023.32>
- Kar, B. Ç., Dereli, M., & Yıldız, E. (2024). Anıtsal Taş Yapılarda Meydana Gelen Bozulmalar: Afyonkarahisar Gedik Ahmet Paşa (İmaret) Cami Örneği. PLANARCH - Design and Planning Research, 8(1), 113-126. <https://doi.org/10.54864/planarch.1456579>
- Karataş, L., & Dal, M. (2023). Investigating the Geoenvironmental and Climatic Impacts on the Facades of Historical Houses in Killit (Dereici) Village, Mardin. Journal of Architectural Sciences and Applications, 8(2), 1046-1061. <https://doi.org/10.30785/mbud.1319556>
- Karataş, L., Alptekin, A., & Yakar, M. (2023). Investigating the Material Deteriorations on the Facades of Stone Structures by Terrestrial Laser Scanning Method: Case Study of Mardin Mansion. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 23(3), 700-711. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.1197891>
- Karkas, Z. S., & Acun Özgünler, S. (2021). Tarihi Yapılarda Kagir Yapı Malzemelerinin Koruma Uygulamalarında Kullanılabilecek Bir Yöntem Önerisi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 25(3), 564-577. <https://doi.org/10.19113/sdufenbed.884228>
- Karkas, Z. S., & Acun Özgünler, S. (2022). Koruma Kararlarını Etkileyen Parametrelerin Belirlenmesine Yönelik Bir Anket Çalışması. Journal of Architectural Sciences and

- Applications, 7(1), 364-382.
<https://doi.org/10.30785/mbud.1090550>
- Okumuş, E. M., & Eren, Ö. (2020). Konutlardaki Ahşap Pencerelerde Oluşan Hasarların Tespiti ve İyileştirilmesine Yönelik Öneriler: İstanbul'dan Fener ve Balat Örneği. *Engineering Sciences*, 15(1), 43-68.
<https://izlik.org/JA23AJ24LL>
- Özer Baş, G., Gölükcü, İ., & Demir, İ. (2025). Deterioration in historic residential architecture: The case of Kula Houses. *Erciyes Akademi*, 39(4), 1015-1038.
<https://doi.org/10.48070/erciyesakademi.1746879>
- Özkan Önür, Ö. (2026). Koruma Odaklı Müdahale Önerileri: Taraklı Hasan Kuru Evi Örneği. *Beykent Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19(1), 66-84.
<https://doi.org/10.20854/bujse.1910624>
- Öztürk, S., & Coşgun, N. (2023). Yapı cephelerinde oluşan bozulmaların/hasarların tespiti ve müdahale stratejileri için bir yöntem önerisi. *GRID - Architecture Planning and Design Journal*, 6(2), 647-671.
<https://doi.org/10.37246/grid.1199518>
- Saban, M., & Özmen, C. (2022). Türkiye’de çubuk alüminyum giydirme cephe sistemlerinin tasarım ve uygulama süreçlerinde mimari tasarım – taşıyıcı sistem uyum sorunları. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 37(2), 857-872.
<https://doi.org/10.17341/gazimmfd.922094>
- Sarıkaya, A., & Göçer, C. (2024). İstanbul’da Tarihi Yarımada’daki Geleneksel Ahşap Konutların Deprem Performansının Değerlendirilmesi. *KİÜ Fen, Mühendislik ve Teknoloji Dergisi*, 1(1), 17-32.
<https://izlik.org/JA78FF26EL>

Sayın Olğun, S., & Kus, H. (2026). Cephelerdeki biyolojik bozulmaların tahribatsız yöntemlerle incelenmesi üzerine bir alan çalışması. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 41(2), 1221-1238. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.1843268>

MİMARLIK EĞİTİMİNDE ERİŞİLEBİLİR KONUT TASARIMI

Sebile Merve KORKMAZ¹

1. GİRİŞ

Mimarlık eğitiminde erişilebilirlik konusu, mimarların fiziksel çevreyi herkes için kapsayıcı bir şekillendirme konusundaki etik ve sosyal sorumlulukları sebebiyle son derece önemlidir (Afacan, 2011; Ergenoğlu, 2015; Uyaroğlu, 2023). Duyarlı ve harekete geçmeye istekli mimarlara duyulan ihtiyacın karşılanması, toplumda erişilebilirlik bilincinin oluşmasıyla mümkün olacaktır. Bu bilincin temelini ise mimarlık eğitiminin oluşturduğu bilinen bir gerçektir (Ergenoğlu ve Bayraktaroğlu, 2016).

Bu anlamda, erişilebilirliğin mimarlık eğitimindeki öneminin en temel boyutunun sosyal sorumluluk ve etik bilinci olduğu söylenebilir. Mimarlık eğitimi, öğrencilere tasarımın estetik ve teknik bir uğraş olmasının yanında toplumsal eşitliği sağlayan bir araç olduğunu öğretmektedir (Ergenoğlu, 2015; Ergenoğlu ve Bayraktaroğlu, 2016). Erişilebilirlik, engelli bireye ait bir kusur olmaktan çıkar ve çevresel bir sorun olarak ele alınır (Ergenoğlu, 2015). Bu bakış açısı, mimar adaylarının toplumsal çeşitliliği (yaşlılar, çocuklar, geçici engeli olanlar vb.) tasarım merkezine konumlandırmasına katkı sağlamaktadır (Ergenoğlu, 2015; Hitch vd., 2016; Altay vd., 2016).

Geleneksel eğitimde erişilebilirlik, yasal bir zorunluluk veya teknik standartlar bütünü olarak sunulma eğilimindedir

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Karabük Üniversitesi, Safranbolu Başak Cengiz Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, ORCID: 0000-0002-2790-067X.

(Ergenoğlu ve Bayraktaroğlu, 2016; Scott vd., 2016; Van der Linden, 2016). Ancak etkili bir mimarlık eğitiminde bu kurallar, yaratıcılığı sınırlayan kısıtlamalar olarak değil, inovasyon fırsatları olarak değerlendirir (Ergenoğlu, 2015; Scott vd., 2016; Kasem vd., 2023). Çünkü erişilebilirlik ilkeleri evrensel tasarım yaklaşımları bağlamında tasarım sürecine en başta entegre edildiğinde, ürünler yalnızca engelli bireyler için değil tüm kullanıcılar için daha konforlu hale gelmektedir (Mulligan vd., 2018; Kasem vd., 2023).

Erişilebilirlik üzerine çalışmak öğrencileri, ideal beden tanımlarından uzaklaşarak gerçek kullanıcı deneyimlerini anlamaya yönlendirir (Uyaroğlu, 2023; Kasem vd., 2023). Literatürde, erişilebilirliği öğrenmedeki en etkili yolların deneyimsel öğrenme ve kullanıcı katılımı olduğu görülmektedir (Szewczenko & Widzisz-Pronobis, 2020; Altay vd., 2016; Scott vd., 2016; Fleck, 2015) Öğrencilerin engellerle doğrudan temas kurduğu simülasyonlar empati kurmayı sağlarken, engelli bireylerle doğrudan iletişim kurmak gerçek ihtiyaçların kavranmasına yardımcı olmaktadır. Kapsayıcı tasarım ilkeleriyle paralel ilerleyen bu süreç, öğrencilerin erişilebilirliğe olan bakışını dönüştürmektedir.

Bu çalışmada çıktıları incelenen yaz okulunun stüdyo kurgusu da bu dönüşümü hedeflemiştir. Yaşlanan ve çeşitlenen dünya nüfusu düşünüldüğünde, henüz eğitim seviyesindeyken kazanılan bu farkındalık, profesyonel hayata atılan mezunların daha geniş bir kullanıcı kitlesine hitap edebilecek, sürdürülebilir ve eşitlikçi binalar tasarlamalarının yolunu açacaktır.

2. YÖNTEM

Bu çalışma, Karabük Üniversitesi, Safranbolu Başak Cengiz Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü 2024-2025 Yaz Döneminde Engelliler için Çevre Mekan Tasarımı Stüdyosu dersi

kapsamında üretilen öğrenci projelerinin değerlendirildiği nitel bir stüdyo araştırması olarak kurgulanmıştır.

Stüdyo, önce öğrencilerin evrensel tasarım, kapsayıcı tasarım ve erişilebilirlikle ilgili kavramsal çerçeve, standartlar ve tasarım kuralları konusunda bilgilendirilmesiyle başlamış; ardından öğrenciler engelli bir bireyin ergonomik gereksinimleri ve sirkülasyon engellerini konut işlevi özelinde araştırmıştır. Son aşamada grup olan öğrencilerden, daha önce tasarlamış oldukları bir konutu seçerek tekerlekli sandalye kullanan bir bireyin yaşam senaryosuna göre yeniden dönüştürmeleri beklenmiştir. Bu sıralama kapsayıcı tasarımın tasarım sürecinin başında başlaması gerektiğini vurgulayan deneyimsel öğrenme literatürüyle uyumlu olması bakımından tercih edilmiştir. Bu literatür, kullanıcıyla temas, rol yapma, simülasyon ve geri bildirim döngülerinin öğrencide tutum değişimi ve tasarım farkındalığı ürettiğini göstermektedir (Mulligan et al., 2018; Biswas & Rahman, 2025). Bu anlamda çalışmada, projelerin erişilebilirliğinin yanında, öğrencilerin tasarım etiğini, kullanıcıyı anlama biçimini ve mekânsal karar alma sürecini de değerlendirmek mümkün olmuştur.

Öğrenci grupları tarafından yeniden tasarlanan altı konut projesinin son tasarım ürünleri, tekerlekli sandalye kullanıcılarının mekânsal ve ergonomik gereksinimleri doğrultusunda içerik analizi yöntemiyle değerlendirilmiştir. Projeler aşağıda yer alan yedi temel ölçüt üzerinden analiz edilmiştir:

1. Sirkülasyon ve manevra alanları
2. Kapı ve geçişlerin erişilebilirliği
3. Yaşam alanının düzenlenmesi
4. Mutfak ergonomisi
5. Yatak odasında transfer ve kullanım alanları

6. Banyo erişilebilirliği
7. Mobilya ve donatıların erişilebilirliği
8. Güvenlik ve kullanım kolaylığı

Her ölçüt kapsamında tasarımda ilgili çözümün bulunup bulunmadığı belirlenmiş ve projeler karşılaştırmalı olarak puanlanarak değerlendirilmiştir. Böylece altı proje arasındaki ortak tasarım yaklaşımları, farklılaşan çözüm stratejileri ve en sık kullanılan erişilebilirlik uygulamalarının ortaya konulması amaçlanmıştır. Puanlama işlemi teknik çizimler üzerinden gerçekleştirilmiş, teslimde yer alan iç mekan görselleri ise ölçülebilir ve karşılaştırılabilir veri sunmadıkları için puanlama kapsamı dışında tutulmuştur. Görseller, erişilebilirlik yaklaşımının mutfak, banyo, yaşama ve yatma mekânlarındaki mekânsal karşılığını göstermek amacıyla destekleyici olarak kullanılmıştır.

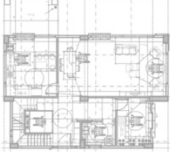
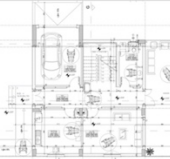
3. BULGULAR

Çalışma kapsamında analiz edilen altı gruba ait toplam 12 kat planı (Tablo 1), kesitler ve görünüşler birlikte değerlendirilerek; erişilebilir konut tasarımı açısından sirkülasyon, kapı/geçişler, yaşam alanı, mutfak, yatak odası, banyo, mobilya/donatı ve güvenlik olmak üzere sekiz kriter üzerinden değerlendirilmiştir. Her kriter için 0-2 puan aralığı kullanılmış ve her kat planı için maksimum 16 puan üzerinden toplam erişilebilirlik skoru oluşturulmuştur (Tablo 2).

Tablo 2 incelendiğinde planlar arasında belirgin farklar bulunmaktadır. 12 planın ortalama puanı 12,1/16 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, incelenen projelerin genel olarak erişilebilirlik açısından belirli tasarım kararlarını içerdiği, ancak kriterlerin tümünde yüksek performans gösteren planların sınırlı olduğunu ifade etmektedir.

En yüksek puanı (15/16) alan G4-Z, G4-1, G6-Z ve G6-1 planları, dolaşım alanlarının sürekliliği, mekanlar arasındaki bağlantıların doğrudan kurulması, yaşam alanlarında gerekli kullanım boşluklarının bırakılması ve mobilyaların kullanıcı hareketini engellemeyecek düzende yerleştirilmesi bakımından öne çıkmaktadır. G5-Z ve G5-1 planları ise 14/16 puan ile ikinci grupta yer almakta; erişilebilir mekan ilişkileri ve mobilyalar arası kullanım alanları olumlu iken bazı kapı geçişlerinde yaklaşım alanlarının sınırlı olduğu görülmektedir.

Tablo 1. Öğrenci grupları tarafından geliştirilen erişilebilir konut tasarımlarına ait kat planları

	Zemin Kat	1. Kat		Zemin Kat	1. Kat
Grup 1			Grup 4		
Grup 2			Grup 5		
Grup 3			Grup 6		

G2-Z planı 13/16 puanla yüksek performans gösterirken, aynı grubun birinci katı 10/16 puanda kalmıştır. Benzer şekilde G3-Z 12/16, G1-Z 11/16 ve G2-1 10/16 puan almıştır. G1-1 ve G3-1 ise 8/16 ile en düşük puanlı planlar olmuştur. Bu planlarda iyileştirme gereksinimi duyan konular, dolaşım sürekliliği, kapı ve geçişler, banyo kullanımı ve mobilya çevresindeki hareket alanları olarak görülmektedir. Bulgular, aynı konut projesinin farklı katlarında erişilebilirlik düzeyinin değiştiğini ve

erişilebilirliğin tüm katlar boyunca süreklilik içinde ele alınması gerektiğini göstermektedir.

Katlar arası puanlar karşılaştırıldığında ise zemin katlar ortalama 12,8/16 puan alırken, birinci katlar 11,7/16 puan almıştır. Bununla birlikte G4 ve G6 gruplarında her iki katın da 15/16 puan alması, erişilebilirlik ilkelerinin katlar arasında sürdürülebildiğini göstermektedir.

Tablo 2. Konut planlarının erişilebilir tasarım kriterleri açısından değerlendirilmesi

Proje/ Grup	Kat	Sirkülasyon	Kapı/ Geçiş	Yaşam Alanı	Mutfak	Yatak Odası	Banyo	Mobilya / Donatı	Güvenlik	Toplam
G1	Z	1	1	2	1	2	1	2	1	11/16
G1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	8/16
G2	Z	2	2	2	2	1	1	2	1	13/16
G2	1	1	1	2	1	1	1	2	1	10/16
G3	Z	2	1	2	1	2	1	2	1	12/16
G3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	8/16
G4	Z	2	2	2	2	2	2	2	1	15/16
G4	1	2	2	2	2	2	2	2	1	15/16
G5	Z	2	1	2	2	2	2	2	1	14/16
G5	1	2	1	2	2	2	2	2	1	14/16
G6	Z	2	2	2	2	2	2	2	1	15/16
G6	1	2	2	2	2	2	2	2	1	15/16

Puanlama sistemi: 0: yetersiz, 1: kısmen uygun, 2: uygun.

Kriterler genel olarak değerlendirildiğinde yaşam alanı ve mobilya/donatı organizasyonu olumlu sonuç verirken, kapı/geçiş ve güvenlik başlıkları daha fazla iyileştirme gerektiren alanlar olarak belirlenmiştir. Özellikle banyolarda manevra alanı, donatılara yaklaşım, kapı açılımı ve kullanıcı donatı arasındaki boşlukların beraber değerlendirilmesi gerektiği görülmektedir.

Son olarak güvenlik kriterinin tüm planlarda 1 puan ile sınırlandırılması ise çizimlerin ıslak hacim tutuma barları, korkuluklar ve benzeri teknik güvenlik koşullarını karşılıyor olması, ancak yangın kaçışı ve yangın dayanımı gibi detayların düşünülmemiş olması nedeniyle ilişkilidir. Bu nedenle güvenlik kriterinin değerlendirilmesi, projelerden doğrulanabilen bilgilerle sınırlı tutulmuştur.

Çalışmada kullanılan üç boyutlu görseller puanlamaya dahil edilmemiş, iç mekanda gerçekleştirilen erişilebilirlik kararlarını açıklayıcı ve teknik çizim analizini destekleyici materyaller olarak değerlendirilmiştir (Şekil 1). Bu görseller, mutfak, banyo, yaşama ve yatma mekânlarında tekerlekli sandalye kullanıcısının erişim, hareket ve kullanım gereksinimlerine yönelik tasarım kararlarını ortaya koymaktadır. Özellikle mutfakta çalışma yüzeyleri ve donatıların tekerlekli sandalye kullanıcısının yaklaşımına göre, banyoda ise tutunma barlarının kullanıcı hareketini desteklemek üzere düzenlendiği görülmektedir.



Şekil 1. Projelerdeki erişilebilirlik kriterlerinin iç mekana yansımaları

4. DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Bu çalışmada, erişilebilir konut tasarımı kapsamında gerçekleştirilen öğrenci gruplarına ait projeler, sekiz tasarım ölçütü üzerinden değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, erişilebilirliğin mekânların fiziksel özelliklerinden bağımsız olarak değerlendirilemeyeceğini; sirkülasyon, mekânlar arası

geçiş, kullanım alanları ve donatı yerleşiminin bir bütün olarak ele alınması gerektiğini ortaya koymuştur.

Erişilebilirlik kararlarının katlar arası süreklilik göstermesi bir gereklilik olarak karşımıza çıkmaktadır. Projeler incelendiğinde, bazılarında zemin ve birinci katlarda benzer düzeyde erişilebilirlik sağlanırken, bazılarında katlar arasında belirgin farklılıklar ortaya çıkmıştır. Ancak erişilebilirliğin yalnızca giriş katında sağlanması yeterli değildir, konutun tüm katları kullanıcı hareketinin devamlılığı açısından birlikte ele alınmalıdır.

Projeler mekan ölçeğinde değerlendirildiğinde ise, özellikle banyo, kapı ve geçişler ile güvenlik konularının daha ayrıntılı tasarım kararları gerektirdiği belirlenmiştir. Küçük ve işlevsel açıdan yoğun mekânlarda kullanıcının mekâna yaklaşımı, dönüş ve transfer olanakları ile donatılar arasındaki ilişkilerin belirleyici olduğu görülmektedir. Buna karşılık yaşam alanları ile mobilya ve donatıların yerleşimi, öğrencilerin erişilebilirlik ilkelerini tasarıma aktarmada daha görünür biçimde ele aldıkları alanlar olmuştur.

Bu sonuçlar, projelerin analizinde uygulanan değerlendirme yaklaşımının, öğrenci tasarımlarındaki erişilebilirlik kararlarının sistematik olarak incelenmesine imkan sağladığını göstermektedir. Aynı zamanda değerlendirme, erişilebilirlik kavramının teknik bir gereklilik olmanın yanında, mekânsal organizasyon ve kullanıcı hareketliliğini doğrudan etkileyen bir tasarım problemi olarak ele alınmasının önemini ortaya koymaktadır.

Çalışmanın değerlendirme sürecindeki veriler üzerinden yüzey özellikleri, uygulama detayları ile kullanım sırasında ortaya çıkabilecek güvenlik sorunları bütünüyle doğrulanamamaktadır. Üç boyutlu iç mekân görselleri ise puanlamaya dâhil edilmemiş, öğrencilerin erişilebilirlik

yaklaşımını gösteren destekleyici görsel materyaller olarak kullanılmıştır. Gelecek çalışmalarda plan analizinin yerinde ölçüm, gözlem ve kullanıcı deneyimleriyle desteklenmesi, tasarımların erişilebilirlik performansının daha kapsamlı biçimde değerlendirilmesine olanak sağlayacaktır.

Sonuç olarak çalışma, erişilebilir konut tasarımının bir mekânın ya da tek bir tasarım kriterinin çözümünden ziyade, konutun tamamında kesintisiz kullanım ve hareket olanağı sağlayan bütüncül bir tasarım yaklaşımı gerektirdiğini ortaya koymaktadır. Mimarlık eğitiminde tasarım sürecinin erken aşamalarına dahil edilecek bu tür bir yaklaşımın, öğrencilerin erişilebilirliği sonradan eklenen teknik bir düzenleme yerine tasarımın temel bileşenlerinden biri olarak kavramalarına önemli bir katkısının olacağı düşünülmektedir. Böylece erişilebilirlik konusunda eğitim sürecinde geliştirilen farkındalığın, öğrencilerin ilerleyen mesleki yaşamlarında daha çeşitli kullanıcı gruplarını gözeterek tasarım kararlarına zemin oluşturması mümkün olabilir.

KAYNAKÇA

- Afacan, Y. (2011). Teaching universal design: an empirical research in interior architecture. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 15, 3185-3192.
- Altay, B., Ballice, G., Bengisu, E., Alkan-Korkmaz, S., & Paykoç, E. (2016). Embracing student experience in inclusive design education through learner-centred instruction. *International Journal of Inclusive Education*, 20(11), 1123-1141.
- Biswas, S., & Rahman, A. A. (2025). Learning Inclusive Design in the Studio: Residence for Clients with Disabilities. *Journal of Design Studio*, 7(2), 359-372.
- Ergenoğlu, A. S. (2015). Universal design teaching in architectural education. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 174, 1397-1403.
- Ergenoğlu, A. S., & Bayraktaroglu, B. (2016). INTEGRATING INCLUSIVE DESIGN' AWARENESS INTO ARCHITECTURE EDUCATION. In *EDULEARN16 Proceedings* (pp. 3789-3794). IATED.
- Fleck, J. (2015). Inclusive Design—A lasting Paralympic Legacy? Embedding inclusive design knowledge and skills into architectural education. *Charrette*, 2(1), 92-105.
- Hitch, D., Dell, K., & Larkin, H. (2016). Does universal design education impact on the attitudes of architecture students towards people with disability?. *JACCES: Journal of accessibility and design for all*, 6(1), 26-48.
- Kasem, M., Clark, S., & Sakellariou, D. (2023). Designing for Disabled People: Exploring inclusive design in architectural education. *Charrette*, 9(1), 255-270.

- Mulligan, K., Calder, A., & Mulligan, H. (2018). Inclusive design in architectural practice: Experiential learning of disability in architectural education. *Disability and health journal*, 11(2), 237-242.
- Scott, I., McLachlan, F., & Brookfield, K. (2018). Inclusive design and pedagogy: An outline of three innovations. *Built Environment*, 44(1), 9-22.
- Szewczenko, A., & Widzisz-Pronobis, S. (2020, December). Implementing inclusive design in architectural education and design practice. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 960, No. 2, p. 022015). IOP Publishing.
- Uyaroğlu, İ. D. (2023). Embedding Inclusive Design Knowledge into the Learning Process in Architectural Education. *Gazi University Journal of Science Part B: Art Humanities Design and Planning*, 11(1), 169-180.
- Van der Linden, V., Dong, H., & Heylighen, A. (2016). From accessibility to experience: Opportunities for inclusive design in architectural practice. *NA*, 28(2).

OPTİMİZASYONUN MİMARLIKTAKİ EPISTEMOLOJİK KONUMU: TARİHSEL DÖNÜŞÜM VE ÇOK BOYUTLU SINIFLANDIRMA

Hasan TAŞTAN¹

1. GİRİŞ

Mimarlık, çok sayıda tasarım gerekliliğinin (strüktürel güvenlik, enerji verimliliği, maliyet, kullanıcı konforu, mekânsal işlevsellik, estetik değer vb.) çoğu zaman birbiriyle çelişen taleplerini aynı anda karşılamayı gerektiren bir tasarım etkinliğidir. Tam da bu nedenle, bu gereklilikler arasında en uygun dengeyi bulma çabası, yani optimizasyon, mimarlık pratiğinin ve kuramının önemli bir parçasıdır. Geleneksel olarak sezgisel ve deneyime dayalı yürütülen bu gereklilikler arası uzlaşma arayışı, 20. yüzyılın ikinci yarısından itibaren bilimsel yöntemlerle ve özellikle sayısal hesaplama araçlarıyla yeniden tanımlanmaya başlamıştır. Günümüzde ise performansa dayalı simülasyonlar ve yapay zekâ yöntemleri aracılığıyla optimizasyon, mimari üretimin hem düşünsel hem de uygulamaya dönük boyutlarını dönüştüren merkezî bir kavram hâline gelmiştir.

Optimizasyonun mimarlık için taşıdığı önem birkaç düzlemde ele alınabilir. İlk olarak, sürdürülebilirlik ve kaynak verimliliği gibi küresel öncelikler, enerji, malzeme ve arazi kullanımı gibi birden fazla performans ölçütünün birlikte değerlendirilmesini gerekli kılmakta; bu durum çok amaçlı

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, ORCID: 0000-0001-6231-4388.

eniyileme yöntemlerinin önemini artırmaktadır (Hensel, Menges ve Weinstock, 2013; Kolarevic ve Malkawi, 2005) . İkinci olarak, mimari tasarım süreci giderek daha fazla disiplini ve aktörü bir araya getirmekte; farklı uzmanlık alanlarının talep ve kısıtlarının eş zamanlı olarak karşılanabilmesi için karar destek sistemlerine ve optimizasyon tabanlı uzlaşma araçlarına ihtiyaç duyulmaktadır (H H Achten, 2002; Şenyapıh ve Özgüç, 1994). Üçüncü olarak, dijital teknolojilerin gelişimi, daha önce yalnızca nicel verilerle sınırlı olan optimizasyon modellerine nitel ölçütlerin de (mekânsal deneyim, kültürel uygunluk, sosyal etkileşim gibi) dâhil edilebilmesini mümkün kılmakta ve böylece optimizasyon kavramını mimarlığın özgün bilgi yapısıyla uyumlu hâle getirmektedir (Grobman, Yezioro ve Capeluto, 2009; Radford ve Gero, 1987). Son olarak, optimizasyon, bilimsel bilgi ile tasarım bilgisi arasındaki ilişkiyi somutlaştıran bir kesişim noktasıdır; çünkü bilim, olguları açıklamak ve sınamak için sistematik bilgi üretirken; tasarım, bu bilgiyle birlikte değer ve kısıtları değerlendirerek en uygun çözümü arar (Cross, 2001; Farrell ve Hooker, 2014). Optimizasyon ise bu iki bilgi biçiminin etkileşime girdiği alanlardan birini oluşturur.

Bu çalışma, optimizasyon kavramını, mimarlığın bilimle kurduğu epistemolojik ilişkinin dönüşümü içerisinde, özellikle dijital temsil ve iletişim araçları bağlamında irdelemeyi amaçlamaktadır. Çalışma boyunca, optimizasyonun farklı tasarım metodolojisi nesillerinde nasıl tanımlandığı, hangi tür optimizasyon yaklaşımlarının ortaya çıktığı ve güncel bilgisayar-güdümlü yöntemlerin bu yaklaşımları nasıl dönüştürdüğü sistematik biçimde ortaya konmaktadır.

2. TEORİK ARKA PLAN

Mimarlık, akademik bir disiplin statüsü kazandığından bu yana epistemolojik düzeyde bina (ürün), tasarım süreci ve projenin aktörleri olmak üzere üç kurucu unsur etrafında şekillenmiştir (Bousbaci ve Findeli, 2005). 1960'lı yıllardan itibaren mimarlığın bilimsel üretim araçlarıyla kurduğu ilişkinin derinleşmesi, mimarlık epistemolojisinin de bilimsel bir rasyonellik zemininde tartışılmasına yol açmıştır. Bu ilişki, yalnızca bilimsel bilginin tasarıma aktarıldığı tek yönlü bir süreç değil, tasarımın kendi özgün problem çözme yöntemleriyle bilime geri besleme sağladığı çift yönlü bir etkileşimdir. Bu etkileşim alanının odağında yer alan optimizasyon kavramı, özünde belirli kısıtlar altında "en uygun" çözüme ulaşma arayışıdır. Mimarlıkta optimizasyon, bilimin nesnel ve tanımlayıcı (descriptive) modelleriyle tasarımın değere dayalı ve kuralcı (normative) tercihlerinin kesişiminde beslenir. Bilimsel yöntemler ve simülasyon araçları optimizasyon sürecine doğrulanabilir sayısal veriler sunarken; tasarım bilgisi hangi ölçütlerin eniyileneceğini, bu ölçütlerin göreceli ağırlıklarını ve "en iyi"nin ne anlama geldiğini belirleyen normatif kararları sağlar. Dolayısıyla optimizasyon, bilim ile tasarım arasındaki hem gerilimli hem de birbirini tamamlayan ilişkiyi somutlaştıran temel bir epistemolojik arakesittir (Şekil 1).



Şekil 1. Bilimsel bilgi ve mimari tasarım bilgisi arakesitinde optimizasyon

Optimizasyon kavramının mimarlık düşüncesindeki anlamı, tarihsel süreçte tasarım metodolojisi kuşaklarının geçirdiği paradigma değişimlerine paralel olarak dönüşmüştür (Şekil 2). 1960'lı yıllarda modern mimarlığın üretim mekanizmalarına paralel olarak gelişen birinci nesil tasarım metotları, dönemin pozitivist bilim anlayışını ve analiz-sentez şemasını temel almıştır (Rittel ve Webber, 1973). Birinci nesil yaklaşım içerisinde optimizasyon, matematiksel programlama veya sezgisel yöntemlerle tek bir amaç fonksiyonuna odaklanan, matematiksel olarak iyi tanımlanmış optimizasyon problemlerinin çözülmesi olarak kurgulanmıştır. Bu dönemde optimizasyon, mimari problemi alt bileşenlerine ayıran ve nicel olarak ölçülebilen değişkenleri işleyen katı bir hesaplama işlemidir. Ancak bu indirgemeci yapı, mimarlığın sosyal, kültürel ve bağlamsal boyutlarını hesap dışı bıraktığı için eleştirilmiş; yalnızca "iyi tanımlanmış" nicel problemlere yanıt verebilmiş, mimarlığın özünü oluşturan karmaşık yapıyı karşılamakta yetersiz kalmıştır (Özten, 2014).

1970'li yıllarda ortaya çıkan ikinci nesil tasarım metodolojileri ise, birinci neslin pozitivist ve katı matematiksel optimizasyon anlayışına bilinçli bir tepki olarak doğmuştur (Cross, 2007). Rittel ve Webber'in (1973) kötü yapıli problemler (wicked problems) kavramı çerçevesinde, mimari tasarım problemlerinin kesin bir tanımının ve tek bir optimal çözümünün olamayacağı vurgulanmıştır. İkinci nesil, odağını nicel/algoritmik eniyilemeden, tüm aktörlerin sürece dahil olduğu müzakereci ve katılımcı bir zemine kaydırmıştır. Bu dönemde Rittel tarafından geliştirilen konuya dayalı bilgi sistemi gibi araçlar (Rittel ve Webber, 1973), bilgisayarı tek başına çözüm üreten bir optimizasyon makinesi olarak değil, farklı paydaşların fikir yürüttüğü ve uzlaştığı bir iletişim platformu olarak konumlandırmıştır (Mccall, 1991). Bu çalışma açısından ikinci nesil, optimizasyon kavramının yalnızca teknik ve matematiksel

anlamıyla değil, daha geniş bir epistemolojik çerçevede ele alınmasını gerektirmektedir. Bu bağlamda optimizasyon, sayısal bir amaç fonksiyonunun çözümünden çok, çok aktörlü bir karar alma sürecinde çelişen beklentiler arasında kabul edilebilir ve bağlama uygun bir uzlaşının aranması biçiminde yeniden yorumlanabilir.

İki neslin ardından, post-pozitivist bilim anlayışının etkisiyle mimarlık metodolojisinde daha esnek, konjektürel ve evrimsel yaklaşımlar güç kazanmıştır (Özten, 2014). Bu dönüşüm içerisinde özellikle Popper'ın bilim felsefesinde ortaya koyduğu yanlışlanabilirlik ilkesi, tasarımı katı ve sıralı bir analiz-sentez modelinden çıkarıp konjektür/analiz (varsayım/sınama) düşüncesine taşımıştır (Bamford, 2002). Brawne (1995), Popper'ın bilimsel keşif mantığını mimarlığa uyarlayarak; tasarımcının öncelikle bir hipotez (geçici tasarım çözümü) ürettiğini, ardından bu hipotezi titizlikle sınyarak ve eleterek en iyi desteklenmiş çözüme ulaştığını belirtir.

Bilgisayar teknolojilerinin ve parametrik medyanın gelişimi, tasarım metodolojisinde Oxman (2008) ve Kotnik'in (2010) vurguladığı köklü bir dönüşümü beraberinde getirmiştir. Carrara, Kalay ve Novernbri (1994) mimari tasarım sürecini hedeflerin tanımlanması, alternatiflerin üretimi ve performans değerlendirmesi olarak üç adıma ayırır. Günümüz dijital metodolojilerinde bu adımlar, analiz-sentez şemasının ötesine geçerek performans tabanlı jeneratif bir modele evrilmiştir. Post-pozitivist yaklaşımlarla kesişen ve dijital hesaplama olanaklarıyla güçlenen bu yeni optimizasyon anlayışının, birinci neslin indirgemeci yaklaşımından iki temel farkı bulunmaktadır. Birincisi, optimizasyonun tasarımın sonunda yapılan ikincil bir denetim veya tek bir formülü çözüme işlemi değil, sürecin başından itibaren formu biçimlendiren bütüncül ve jeneratif bir arayış olmasıdır (Oxman, 2008). İkincisi ise, gelişmiş hesaplama güçleri sayesinde yalnızca strüktür veya iklim gibi nicel verilerin

değil, mekânsal deneyim ve kullanıcı davranışları gibi nitel parametrelerin de kodlanarak çok amaçlı eniyileme (multi-objective optimization) süreçlerine dahil edilebilmesidir (Zboinska, 2015).



Şekil 2. Tarihsel süreçte tasarım paradigmaları ve optimizasyon anlayışının dönüşümü

Sonuç olarak, optimizasyonun epistemolojik evrimi, mimarlığın bilimle kurduğu bağın niteliğini de yansıtmaktadır. Birinci neslin katı nicel optimizasyonundan ikinci neslin müzakereci uzlaşısına, oradan da günümüzün performans tabanlı algoritmik sistemlerine uzanan bu süreçte optimizasyon; nesnel veriler ile öznel normların kesiştiği dinamik bir zemin haline gelmiştir. Ancak nitel parametrelerin sayısal modellere dönüştürülerek optimizasyona katılması, beraberinde bir anlam indirgemesi (reductionism) riskini de getirmektedir. Bu nedenle, güncel optimizasyon modellerinde hangi ölçütlerin yer alacağı ve en uygunun nasıl tanımlanacağı kararı, tarafsız bir algoritma çıktısı değil; her zaman tarihsel, etik ve bağlamsal bir tasarım tercihi olarak kalmaya devam etmektedir.

3. MİMARLIKTAKİ OPTİMİZASYON TÜRLERİNE SİSTEMATİK BİR BAKIŞ

Günümüzde mimarlıkta optimizasyon biçimleri tek bir yöntem ya da algoritma ile sınırlı değildir. Optimizasyon; performans alanı, arama stratejisi, tasarım evresi, tasarım düşüncesindeki rolü, ontolojik ölçeği, insan-makine etkileşim biçimi ve hesaplama mantığı bakımından çok boyutlu bir kavramdır. Bu bölümde, güncel dijital mimarlık pratiğinde ve

literatüründe öne çıkan optimizasyon biçimleri yedi ana eksen etrafında sınıflandırılmaktadır (Şekil 3).



Şekil 3. Mimarlıkta optimizasyonun yedi eksenli sınıflandırması

Şekil 3. Yedi eksenli optimizasyon taksonomisi

3.1. Performans Alanına Göre Optimizasyon Türleri

Optimizasyonun temel boyutlarından biri, hangi performans ölçütünün ya da ölçütler kümesinin eniyileneceğidir. Henri H Achten'ın (2009) deneysel tasarım yöntemlerine ilişkin kapsamlı derlemesi de temel alınarak, mimarlıkta kullanılan başlıca simülasyon biçimleri fizik simülasyonları, davranışsal simülasyonlar, dinamikler ve fabrikasyon simülasyonları olmak üzere dört kategoride ele alınabilir. Bu simülasyon türleri, ilgili performans alanlarının sayısal olarak değerlendirilmesine hizmet eder; tek başlarına tanımlayıcı nitelik taşıyan bu modeller, bir

optimizasyon döngüsüne bağlandıklarında kuralcı karar süreçlerine girdi sağlar.

Fiziksel/çevresel optimizasyon: Doğal olayların fiziksel modellerine dayalı simülasyonları kullanır. Radyasyon analizi doğal ışık dağılımını hesaplarken; hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) akışkan ve gaz davranışını benzetir; sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ise yapı elemanlarını küçük parçalara bölerek gerilme ve yer değiştirmeleri hesaplar. Güncel araştırmalar bu simülasyonları enerji tüketimi, güneş ışığı faktörü, strüktürel ağırlık, deprem dayanımı ve termal konfor gibi nicel hedeflerin optimizasyonunda kullanmaya devam etmektedir (Chew, Wong, Tang, Yip ve Maul, 2024; Khan, Chang ve Chang, 2025; Zhang ve Zhang, 2025).

Davranışsal / mekânsal optimizasyon: Davranışsal simülasyonlar kategorisi, insan davranışına ve mekânsal bilişe dayalı modelleri kapsar. Bu çerçevede mekân dizimi modelleri kentsel hareket örüntülerini; erişim grafikleri mahremiyet derecelerini; isovist modeller bakış açılarını ve açıklık hissini; kullanıcı simülasyonları ise ofis binalarındaki günlük kullanım örüntülerini analiz eder. Güncel literatür bu kategoriyi ajan tabanlı tahliye modelleri ve pekiştirmeli öğrenme tabanlı kullanıcı davranışı tahminleriyle genişletmekte; optimizasyon hedeflerini dolaşım verimliliği, sosyal etkileşim, mahremiyet ve kullanıcı deneyimi gibi nitel ağırlıklı ölçütleri içerecek biçimde çeşitlendirmektedir (Jang, Roh ve Lee, 2025; Khan ve diğerleri, 2025; Zhang ve Zhang, 2025).

Morfolojik/dinamik form optimizasyonu: Dinamikler kategorisi, animasyon tekniklerine ve fizik tabanlı form bulma yöntemlerine dayanır. Henri H Achten'ın (2009) örneklediği üzere, iskelet-deri sistemleri yüzey deformasyonlarını doğallaştırırken; CADenary gibi araçlar zincir modelleri (catenary) ile etkileşimli olarak yük taşıyan formlar üretir. Güncel

literatürde sonlu elemanlar yöntemiyle çalışan topoloji optimizasyonlarıyla genişlemiştir. Bu modeller, gerilim alanlarına göre biçimlenen matematiksel ve strüktürel bir form türetme yapısı sunar (Jang ve diğerleri, 2025).

Üretim ve fabrikasyon optimizasyonu: Fabrikasyon kategorisi, tasarımın fiziksel olarak gerçekleştirilmesine odaklanır. Dijital tasarımdan fiziksel model üreten freze makinelerini ve değişen matkap açılarıyla oluşturulan açıklıklı beton duvar örneğini bu kategoride ele alır. Güncel araştırmalar bu çerçeveyi CNC takım yolu eniyilemesi, eklemeli imalat (3B baskı) rota optimizasyonu ve prefabrike modül montaj sıralamaları gibi uygulamalarla genişletmekte; malzeme fire miktarı, üretim süresi, lojistik ve maliyet gibi ölçütlerin optimizasyonuna odaklanmaktadır (Chew ve diğerleri, 2024; Khan ve diğerleri, 2025; Zhang ve Zhang, 2025).

Bu dört alt alan birbirinden ayrı değildir; günümüzün optimizasyon yaklaşımları enerji, yapısal ağırlık, maliyet ve kullanıcı konforu gibi farklı performans alanlarını eş zamanlı olarak ele alan bütünleşik modeller kurabilmektedir. Bu noktada tek amaçlı ve çok amaçlı optimizasyon ayrımı da önem kazanmaktadır. Ancak amaç sayısı, bu çalışmada bağımsız bir sınıflandırma eksenini olarak değil, yedi eksenin farklı bileşimlerine eşlik edebilen kesişen bir özellik olarak ele alınmaktadır. Tek amaçlı optimizasyon yalnızca bir performans ölçütüne odaklanırken; çok amaçlı optimizasyon, birbiriyle çelişebilen birden fazla ölçütü aynı anda eniyileyerek uzlaşılı çözümlerini araştırır. Henri H Achten'ın (2009) performansı ayrı bir simülasyon kategorisi olarak değil; fiziksel, davranışsal ve dinamik simülasyonları kapsayan bütünleşik bir değerlendirme biçimi olarak konumlandırması, bu çok boyutlu ve bütünleşik değerlendirme anlayışıyla kuramsal açıdan uyum göstermektedir.

3.2. Arama Stratejisine ve Algoritmaya Göre Optimizasyon Türleri

Optimizasyonun ikinci temel boyutu, en uygun çözümün hangi algoritmik mantıkla arandığıdır. Mimari tasarım problemleri, çok sayıda olası çözümün bir arada bulunduğu geniş bir tasarım uzayı tanımlar. Arama stratejisi, bu uzayın hangi kurallarla tarandığını, hangi çözümlerin elendiğini ve hangi alternatiflerin bir sonraki aşamaya taşındığını belirler. Bu nedenle aynı performans hedefi (örneğin enerji tüketimi, strüktürel dayanım, maliyet veya kullanıcı konforu) farklı algoritmalarla optimize edildiğinde farklı sonuçlar, farklı hesaplama süreleri ve farklı şeffaflık düzeyleri ortaya çıkabilir. Mimarlık literatüründe öne çıkan başlıca arama stratejileri altı alt başlıkta sınıflandırılabilir

Gradyan Tabanlı Optimizasyon: Bu optimizasyon biçimi, amaç fonksiyonunun türev bilgisini kullanarak belirli bir başlangıç çözümünden adım adım iyileştirme yapar. Başka bir deyişle, sistemin hangi yönde daha iyi sonuç verdiğini hesaplayarak o yönde ilerler. Özellikle malzeme dağılımının belirlendiği topoloji optimizasyonunda gradyan bilgisinden yararlanan yoğunluk tabanlı yaklaşımlar yaygın olarak kullanılmaktadır. Katı izotropik malzeme ile cezalandırma (solid isotropic material with penalization–SIMP), bu kapsamda kullanılan başlıca malzeme parametrisasyonu yaklaşımlarından biridir. Bu yöntemler, strüktürel yükler altında hangi bölgelerde malzeme kalması, hangi bölgelerde boşluk oluşması gerektiğini hesaplar (Jang ve diğerleri, 2025). Gradyan tabanlı yöntemler başlangıç noktasına duyarlıdır ve her zaman global en iyi çözüme ulaşamayabilir; yerel bir optimumda takılı kalma riski bulunur.

Evrimsel ve meta-sezgisel optimizasyon: Evrimsel ve meta-sezgisel optimizasyon yöntemleri, doğal seçim, sürü davranışı veya olasılıksal arama gibi biyolojik ve istatistiksel

metaforlardan esinlenir. Genetik algoritmalar (genetic algorithm-GA), baskın olmayan sıralama genetik algoritması II (non-dominated sorting genetic algorithm II – NSGA-II), parçacık sürüsü optimizasyonu (particle swarm optimization-PSO) bu gruba girer. Bu yöntemler türev bilgisine ihtiyaç duymaz; geniş, çok modlu ve birbiriyle çelişebilen hedeflerin bulunduğu tasarım problemlerinde etkilidir. Mimarlıkta özellikle enerji, maliyet ve günışığı konforu gibi birden fazla ölçütün eş zamanlı optimize edildiği çok amaçlı optimizasyon süreçlerinde kullanılır (Chew ve diğerleri, 2024; Zhang ve Zhang, 2025). Grasshopper tabanlı Galapagos ve Wallacei gibi araçlar bu mantıkla çalışır. Çok amaçlı evrimsel yöntemler, özellikle NSGA-II gibi algoritmalar, Pareto cephesi üzerinden birbiriyle çelişen hedefler arasındaki uzlaşma çözümlerini araştırır.

Vekil model destekli optimizasyon araması: Vekil model destekli optimizasyon, hesaplama maliyeti yüksek performans değerlendirmelerini her iterasyonda doğrudan çalıştırmak yerine, bu değerlendirmelerin sonuçlarını yaklaşık olarak tahmin eden hızlı modelleri optimizasyon döngüsüne dâhil eder. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (computational fluid dynamics- CFD) veya sonlu elemanlar yöntemi (finite element method- FEM) gibi ağır analizlerin yerine; yapay sinir ağı (artificial neural network- ANN), evrişimli sinir ağı (convolutional neural network – CNN) veya aşırı gradyan artırma (extreme gradient boosting – XGBoost) gibi modeller eğitilerek saniyeler içinde performans tahmini yapılabilir (Jang ve diğerleri, 2025; Khan ve diğerleri, 2025). Bu yaklaşım, optimizasyon döngüsünü büyük ölçüde hızlandırır ve özellikle erken tasarım evresinde çok sayıda alternatifin değerlendirilmesine olanak tanır. Bununla birlikte vekil modelin doğruluğu, eğitim verisinin kapsamına ve kalitesine bağlıdır; yanlış eğitilmiş bir model optimizasyon sürecini yanlış yönlendirebilir.

Pekiştirmeli öğrenme (reinforcement learning - RL): Pekiştirmeli öğrenmede bir ajan, deneme-yanılma yoluyla ve aldığı ödül veya cezalara göre arama uzayını tarar. Bu yöntem özellikle sıralı karar problemlerinde etkilidir: kat planı sentezi, kentsel kütle yerleşimi ve mekânsal alan tahsisi gibi problemlerde ajan, her adımda bir karar verir ve nihai performansı buna göre şekillendirir. Epsilon-greedy gibi stokastik keşif parametreleri sayesinde sistem, bilinen iyi çözümlerin dışına çıkarak alışılmadık mekânsal çözümleri de deneyebilir (Jang ve diğerleri, 2025; Pacheco, Marques ve Rocha, 2026).

Stokastik örnekleme ve olasılıksal kataloglama: Stokastik örnekleme ve olasılıksal kataloglama yöntemleri, tasarım uzayını rastgele veya olasılıksal biçimde tarar. Monte carlo yöntemleri ve latin hiperküüp örnekleme bu grubun tipik örnekleridir. Özellikle modüler veya ayırık yapı sistemlerinde ortaya çıkan kombinatorial olasılık patlamasını süzmek ve en uygun kombinasyonları kataloglamak için kullanılır (Demirbaş ve Bayram, 2024). Bu yaklaşım, tüm olasılıkları tek tek denemek yerine temsil edici bir örnek kümesi üzerinden karar vermeyi amaçlar. Önceden belirlenmiş tek bir arama yönüne bağımlılığı azaltarak tasarım uzayının daha geniş biçimde örneklenmesine olanak sağlayabilir; ancak kesin en iyi çözümü garanti etmez ve yeterli örnek sayısına ulaşılmasını gerektirir.

Derin üretken yapay zekâ ve gizil uzay gezinmesi: Derin üretken yapay zekâ yöntemleri; çekışmeli üretken ağı (generative adversarial network–GAN), difüzyon modelleri (stable diffusion, Midjourney), dönüştürücüler (transformer) ve büyük dil modeli (large language model – LLM) aracılığıyla eğitim verisinden öğrenilen istatistiksel korelasyonlar üzerinden yeni tasarım varyasyonları üretir. Bu modeller, mimarilerine bağlı olarak farklı temsil ve olasılık uzaylarında çalışarak hedeflenen tasarım ve performans koşullarına yanıt veren alternatifler oluşturabilir; özellikle çekışmeli üretken ağı ve difüzyon tabanlı modellerde

gizil veya temsil uzayları, tasarım varyasyonlarının üretilmesinde önemli rol oynar (Khan ve diğerleri, 2025; Meira-Rodríguez ve López-Chao, 2026). Estetik ve niteliksel ölçütlerin öne çıktığı tasarım problemlerinde yaratıcı varyasyon üretme kapasitesi yüksektir. Buna karşın derin üretken modeller büyük ölçüde kara kutu karakteri taşır; kararların gerekçeleri çoğu zaman opaktır, veri önyargıları taşıyabilir ve üretilen sonuçların mutlaka eleştirel biçimde doğrulanması gerekir.

3.3. Tasarım Sürecindeki Konumuna Göre Optimizasyon

Optimizasyon, tasarım sürecinin yalnızca belirli bir anında devreye giren sabit bir işlem değildir; projenin hangi evresinde kullanıldığına bağlı olarak farklı işlevler ve sorumluluklar üstlenebilir.

Kavramsal/ form bulma optimizasyonu: Erken tasarım aşamasında kütle yerleşimi, topoğrafya uyumu, çevreye duyarlı biçimlenme ve topoloji optimizasyonu ile formun ana strüktürü ve kentsel ilişkileri keşfedilir (Jang ve diğerleri, 2025). Bu evrede optimizasyon, tasarım uzayının sınırlarını genişleten bir keşif aracı olarak işlev görür.

Detaylandırma/parametrik optimizasyon: Tasarım geliştirme evresinde belirli bir tipoloji içinde pencere/duvar oranı (wwr), gölgeleme elemanı boyutları, cephe modülasyonu ve strüktürel kesitler enerji, güneşliği ve maliyet amaç fonksiyonlarına göre eniyilenir (Zhang ve Zhang, 2025). Bu evrede optimizasyon, belirli bir çözüm ailesi içinde en yüksek performansı yakalamaya yönelik bir iyileştirme aracı olarak çalışır.

Operasyonel/süreç optimizasyonu: İmalat ve inşaat dokümantasyonu evresinde yapı bilgi modelleme entegrasyonu ile şantiye lojistiği, iş programı, malzeme tedarik zinciri, modüler prefabrikasyon ve yapının yaşam döngüsü

karbon/maliyet analizi optimize edilir (Chew ve diğerleri, 2024; Khan ve diğerleri, 2025). Bu evrede optimizasyon, tasarımın fiziksel gerçekleşmesinin verimliliğini ve sürdürülebilirliğini güvence altına alan bir yönetim aracına dönüşür.

3.4. Tasarım Düşüncesindeki Rolüne Göre Optimizasyon

Bu eksen, optimizasyonun tasarım bilişi içerisinde üstlendiği işlevsel rolü tanımlar. Aynı performans alanı ve aynı arama stratejisi, tasarım sürecinin farklı anlarında farklı roller üstlenebilir; bu nedenle bu sınıflandırma, Bölüm 3.3'teki evre temelli ayırmadan bağımsız olarak, optimizasyonun tasarım düşüncesine nasıl eklemlendiğine odaklanır. Gero ve Kannengiesser'in (2014) tasarım bilişi modeli ile Cross'un (2001) tasarımcıca bilme biçimleri (designerly ways of knowing) kavramı bu ayırımın kuramsal zeminini oluşturmaktadır.

İyileştirici (düzeltici) optimizasyon: Tasarımın ana formu, tipolojisi ve mekânsal kurgusu mimar tarafından önceden belirlenmiştir. Optimizasyon burada, mevcut tasarımın performansını artırmak için ikincil bir denetim ve ince ayar aracı olarak devreye girer. Örneğin, mimarın belirlediği kütle formu içinde pencere/duvar oranlarının, gölgeleme elemanı boyutlarının veya strüktürel kesitlerin enerji ve günışığı performansına göre iyileştirilmesi bu kategoriye girer (Zhang ve Zhang, 2025). Bu rolde optimizasyon, tasarımın özünü değiştirmeden verimliliği artıran bir perdah işlevi görür.

Üretken (form bulucu) optimizasyon: Başlangıçta nihai form önceden belirlenmiş değildir; optimizasyon algoritması, tanımlı yükler, kısıtlar ve performans hedefleri altında formu doğrudan doğuran temel tasarım motorudur. Topoloji optimizasyonu, strüktürel yükler altında malzeme dağılımını eniyileyerek formu kendiliğinden türetir (Jang ve diğerleri, 2025).

Benzer biçimde, dinamik rahatlatma (dynamic relaxation) ve askı zinciri (catenary) modelleri, yerçekimi gibi fiziksel kuvvetler altında optimal strüktürel geometriyi keşfeder. Bu rolde optimizasyon, mimarın sezgisel form arayışının yerini alan veya onu kökten genişleten bir form yaratıcısı olarak çalışır (Oxman, 2006) .

Keşifsel optimizasyon: Bu rolde optimizasyonun amacı tek bir en iyi çözüme hızla yakınsamak değil; tanımlanan performans ölçütleri ve kısıtlar çerçevesinde tasarım uzayının farklı bölgelerini araştırarak beklenmedik ve alternatif çözüm alanlarını görünür kılmaktır. Rastlantısallık ve stokastik süreçler, keşifsel optimizasyonda sıklıkla kullanılan önemli araçlar arasında yer alır. Demirbaş ve Bayram'ın (2024) stokastik başlatma, olasılıksal kataloglama ve rastlantısal müdahale olarak sınıflandırdığı stratejiler, keşifsel optimizasyonun yöntemsel çerçevesini oluşturur. Difüzyon modellerinde gürültü enjeksiyonuyla kontrollü sapmalar yaratmak veya pekiştirmeli öğrenmede epsilon-greedy keşif parametreleriyle alışılmadık mekânsal çözümlere yönelmek bu rolün tipik örnekleridir (Jang ve diğerleri, 2025; Meira-Rodríguez ve López-Chao, 2026). Dolayısıyla keşifsel optimizasyon, optimizasyonu yalnızca tek bir çözüme yakınsayan bir eniyileme işlemi olarak değil, tasarım uzayını yapılandırılmış biçimde araştıran, ırsamayı ve olasılık alanının genişletilmesini de içeren bir keşif mekanizması olarak yeniden tanımlar (Pacheco ve diğerleri, 2026).

Bu üç rol, optimizasyonun tasarım düşüncesiyle kurduğu ilişkinin farklı biçimlerini temsil eder. İyileştirici rolde optimizasyon tasarıma hizmet eden bir performans değerlendirme ve iyileştirme aracıdır; üretken rolde formun kökenine yerleşen bir yaratıcı aktördür; keşifsel rolde ise tasarım uzayının keşfedilmemiş bölgelerine açılan bir sorgulama enstrümanıdır. Güncel pratikte bu üç rol çoğu zaman iç içe geçer; aynı projede erken evrede üretken optimizasyon formu doğururken, ilerleyen

evrelerde iyileştirici optimizasyon detayları iyileştirir, keşifsel müdahaleler ise ara aşamalarda beklenmedik varyasyonları tetikler.

3.5. Ontolojik Ölçeğe Göre Optimizasyon

Optimizasyonun mekânsal kapsamını ve ele aldığı ontolojik düzeyi tanımlayan bu eksen, bir yapı elemanından kentsel ekolojiye uzanan hiyerarşik bir sınıflandırma sunar. Makki, Showkatbakhsh, Tabony ve Weinstock (2019) evrimsel algoritmaların kentsel morfolojiden yapı ölçeğine uzanan uygulamaları bu ayrımın kuramsal dayanağını oluşturduğunu belirtmektedir.

Mikro-ölçek (detay ve fabrikasyon) optimizasyonu: Tekil yapı elemanları, bağlantı detayları, malzeme dokusu ve fabrikasyon süreçleri düzeyinde çalışır. 3B baskı rota optimizasyonu, CNC frezeleme takım yolu eniyilemesi, panelizasyon ve modül birleşim toleranslarının minimizasyonu bu ölçeğe örnektir (Chew ve diğerleri, 2024; Zhang ve Zhang, 2025). Bu düzeyde optimizasyon, malzeme verimliliği, üretim hızı ve montaj hassasiyeti gibi ölçütlere odaklanır.

Mezo-ölçek (bina ve mekân) optimizasyonu: Bina kütlesi, kat planı topolojisi, sirkülasyon şeması, cephe konfigürasyonu ve strüktürel sistem düzeyinde çalışır. Enerji yükleri altında bina formunun optimize edilmesi, günışığı ve termal konfor için cephe modülasyonunun eniyilenmesi, mekânsal dizilim ve dolaşım verimliliğinin iyileştirilmesi bu ölçeğin tipik uygulamalarıdır (Jang ve diğerleri, 2025; Khan ve diğerleri, 2025). Güncel mimari optimizasyon araştırmalarının önemli bir bölümü bu ölçekte yoğunlaşmaktadır.

Makro-ölçek (kentsel ve ekolojik) optimizasyon: Yapı adası, mahalle veya kent parçası düzeyinde çalışır. Kentsel rüzgâr koridorlarının modellenmesi, arazi kullanımı ve yoğunluk dağılımının eniyilenmesi, kentsel ısı adası etkisinin azaltılması,

güneşlenme potansiyeline göre kütle yerleşimi ve bölgesel enerji ağlarının optimizasyonu bu ölçeğe girer (Makki ve diğerleri, 2019; Zhang ve Zhang, 2025). Makro-ölçek optimizasyon, tekil bina performansının ötesine geçerek yapıyı çevrenin kolektif çevresel ve sosyal performansını hedefler.

Bu üç ontolojik ölçek arasında hem veri çözünürlüğü hem de optimizasyon parametreleri bakımından belirgin farklılıklar vardır. Mikro-ölçekte milimetrik hassasiyet ve malzeme davranışı ön plandayken; mezo-ölçekte mekânsal konfigürasyon ve bina performansı; makro-ölçekte ise kentsel sistemler ve ekolojik etkileşimler belirleyicidir. Bununla birlikte, güncel çok ölçekli optimizasyon yaklaşımları bu üç düzeyi bütünleştirerek, örneğin kentsel mikro-iklim verilerini bina kabuğu optimizasyonuna girdi olarak sunan veya fabrikasyon kısıtlarını erken tasarım evresindeki form bulma sürecine dahil eden iş akışları geliştirmektedir.

3.6. İnsan-Makine Etkileşimi ve Karar Verme Biçimine Göre Optimizasyon

Optimizasyonun epistemolojik konumunu ve mimarın değişen rolünü doğrudan belirleyen bu eksen, tasarımcı ile hesaplamalı sistem arasındaki etkileşimin niteliğine ve nihai kararın nerede verildiğine odaklanır. Aynı arama stratejisi ve aynı performans alanı, farklı etkileşim düzeylerinde kullanılabilir; bu nedenle bu eksen, Bölüm 3.2'deki algoritmik sınıflandırmadan bağımsız bir boyut sunar. Pacheco ve diğerlerinin (2026) ajanlık biçimleri ve Aish, Fisher, Happold ve Joyce'un (2012) gömülü rasyonelite kavramı bu ayrımın kuramsal zeminini oluşturmaktadır.

Manuel (sezgisel) optimizasyon: Tasarımcı, parametreleri tek tek değiştirerek simülasyon sonuçlarını karşılaştırır ve en uygun bulduğu alternatifi sezgisel olarak belirler. Bu süreçte bilgisayar yalnızca tanımlayıcı simülasyonları çalıştıran edilgen

bir araçtır; arama ve karar verme tamamen insan kontrolündedir. Geleneksel varsayımsal senaryo analizi (what-if analizi) ve birinci nesil tasarım metodolojilerinin manuel parametre taraması bu kategoriye girer.

Yarı otomatik (etkileşimli) optimizasyon: Evrimsel çözücüler, parçacık sürüsü optimizasyonu veya üretken modeller, tanımlı hedefler doğrultusunda bir çözüm kümesi (Pareto cephesi veya varyantlar kataloğu) üretir; ancak nihai seçim tasarımcı tarafından yapılır. Tasarımcı; uygunluk fonksiyonunu, kısıtları ve değerlendirme kriterlerini belirleyerek süreci yönlendirir, makine ise bu çerçeve içinde aramayı yürütür. Günümüzde Grasshopper+Galapagos, Dynamo+Refinery veya Wallacei gibi iş akışları bu kategoriye örnek gösterilebilir. Bu etkileşim biçiminde mimar, formu doğrudan çizen değil, tasarım uzayını kürate eden ve alternatifler arasından seçim yapan bir konuma evrilir.

Tam otomatik (gömülü) optimizasyon: İnsan müdahalesi yalnızca başlangıçtaki hedef, kısıt ve ağırlık parametrelerinin kurgulanmasıyla sınırlıdır; sistem, önceden tanımlanan bu tasarım niyeti (veya tasarım kurgusu) içerisinde en yüksek uygunluk skoruna sahip çözümü kapalı bir algoritma döngüsünde belirler. Aish ve diğerlerinin (2012) gömülü rasyonelite (embedded rationality) olarak kavramsallaştırdığı bu düzeyde, performans değerlendirmesi ve form üretimi tek bir algoritmik süreçte bütünleşir. Bu etkileşim biçiminde mimar, seçim yapan bir küratör olmaktan çıkıp, optimizasyon sisteminin parametrelerini ve değer çerçevesini baştan kurgulayan bir sistem kurucusu rolüne geçer.

Bu üç etkileşim düzeyi, optimizasyonun normatif/kuralcı karakterinin farklı tonlarını açığa çıkarır. Manuel optimizasyonda normatif çerçeve her bir karar anında tasarımcı tarafından yeniden üretilir; yarı otomatik optimizasyonda normatif çerçeve

uygunluk fonksiyonuna ve kısıtlara kodlanır, ancak nihai yorum insana aittir; tam otomatik optimizasyonda ise normatif çerçeve bütünüyle algoritmik mantığa tercüme edilir. Bu farklılaşma, mimarın mesleki sorumluluğunun, yaratıcı ajanlığının ve etik konumunun da yeniden tanımlanmasını gerektirir.

3.7. Hesaplama Paradigmasına Göre Optimizasyon

Optimizasyonun son temel boyutu, sistemin performans kararlarını hangi bilgi kaynağına dayanarak ürettiğidir. Başka bir deyişle bu eksen, “en iyi” çözümün fizik yasalarından mı, yoksa verideki istatistiksel örüntülerden mi türetildiğini sorgular. Mimarlıkta optimizasyon uygulamaları bu bakımdan üç ana yaklaşım etrafında sınıflandırılabilir: model odaklı (model-driven), veri odaklı (data-driven) ve bu ikisini farklı biçimlerde birleştiren hibrit fizik–veri odaklı yaklaşımlar. Bu ayrım, yalnızca teknik bir tercih değil; aynı zamanda optimizasyonun şeffaflığı, doğrulanabilirliği ve mimarın süreç üzerindeki denetimi açısından da belirleyici bir epistemolojik konumdur.

Model odaklı optimizasyon: Model odaklı optimizasyon, kararlarını fizik yasalarına, diferansiyel denklemlere ve önceden tanımlanmış kural setlerine dayandırır. Sistem, doğa olaylarını matematiksel olarak modelleyerek çalışır. Örneğin, sonlu elemanlar yöntemi (finite element method–FEM) ile bir yapı elemanındaki gerilmeler; hesaplamalı akışkanlar dinamiği (computational fluid dynamics–CFD) ile rüzgâr akışları hesaplanır. Bu hesaplamalar, dayandıkları fiziksel modeller ve matematiksel ilişkiler açık biçimde tanımlanabildiği için görece izlenebilir ve doğrulanabilir sonuçlar üretir. Mimarlıkta enerji tüketimi, strüktürel dayanım veya termal konfor gibi nicel hedeflerin optimizasyonunda yaygın olarak kullanılır (Chew ve diğerleri, 2024; Zhang ve Zhang, 2025). Karar zincirinin fiziksel modele geri izlenebilmesi önemli bir şeffaflık avantajı sağlar. Bununla birlikte sonuçların güvenilirliği, kullanılan model

varsayımlarına, sınır koşullarına, veri kalitesine ve sayısal çözüm hassasiyetine bağlıdır.

Veri odaklı (istatistiksel) optimizasyon: Veri odaklı optimizasyon, performans ilişkilerini yalnızca önceden tanımlanmış fiziksel denklemlerden türetmek yerine, gözlemsel, deneysel veya simülasyon tabanlı verilerden öğrenilen istatistiksel ya da makine öğrenmesi modellerinden yararlanır. Bu modeller, tasarım değişkenleri ile performans çıktıları arasındaki ilişkileri tahmin ederek optimizasyon aramasını yönlendirebilir. Kullanılan modele bağlı olarak regresyon, sınıflandırma, vekil tahmin veya gizil temsil gibi farklı veri temelli mekanizmalar devreye girebilir. Derin üretken modeller, çekişmeli üretici ağlar (generative adversarial network – GAN) ve difüzyon modelleri bu gruba girer (Jang ve diğerleri, 2025; Khan ve diğerleri, 2025; Meira-Rodríguez ve López-Chao, 2026). Eğitim tamamlandıktan sonra bazı uygulamalarda hızlı performans değerlendirmesi sağlayabilir; büyük ve karmaşık veri kümelerinden örüntüler çıkarabilir. Estetik ve niteliksel ölçütlerle çalışabilir. Bununla birlikte özellikle karmaşık ve derin öğrenme tabanlı modeller kara kutuya yakın bir karakter taşıyabilir; kararların gerekçeleri çoğu zaman opak olabilir, veri önyargıları taşıyabilir ve sonuçların eleştirel biçimde doğrulanması gerekebilir.

Hibrit fizik-veri odaklı optimizasyon: Hibrit yaklaşım, model odaklı ve veri odaklı hesaplamanın güçlü yanlarını aynı sistem içerisinde birleştirmeyi amaçlar. Bu yaklaşımın yaygın uygulamalarından biri, fiziksel simülasyonlardan üretilen verilerle eğitilmiş vekil modellerin kullanılmasıdır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği veya sonlu elemanlar yöntemi gibi hesaplama maliyeti yüksek simülasyonların her iterasyonda yeniden çalıştırılması yerine, bu simülasyonların davranışını yaklaşık olarak öğrenen yapay zekâ modelleri hızlı performans tahminleri üretmek üzere kullanılabilir. Oluşturulan vekil model üzerinden optimizasyon döngüsünün yürütülmesi, fiziksel

modellere dayalı bilgi ile veri odaklı tahmin kapasitesinin bir araya getirilmesini ve hesaplama süresinin önemli ölçüde azaltılmasını sağlar (Jang ve diğerleri, 2025; Khan ve diğerleri, 2025). Bu yaklaşım, özellikle erken tasarım evresinde çok sayıda alternatifin değerlendirilmesine olanak tanıyarak hız ile tahmin doğruluğu arasında işlevsel bir denge kurabilir. Bununla birlikte vekil model, özgün fiziksel simülasyonun birebir karşılığı değildir; ürettiği tahminlerin güvenilirliği eğitim verisinin kapsamına, temsil gücüne ve modelin doğrulanma düzeyine bağlıdır. Bu nedenle yetersiz veya temsil edici olmayan verilerle eğitilmiş bir vekil model, optimizasyon sürecini hatalı yönlendirebilir.

4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışma, optimizasyon kavramını mimarlık ve bilim arasındaki değişen epistemolojik ilişkinin merkezine yerleştirerek, kavramın tarihsel dönüşümünü ve güncel pratikteki çok boyutlu yapısını sistematik biçimde ortaya koymuştur. Birinci nesil tasarım metodolojilerinden post-pozitivist dijital tasarıma uzanan süreçte optimizasyon, indirgemeci tek amaçlı bir matematiksel işlem olmaktan çıkıp; bağlama duyarlı, çok ölçütlü, dinamik ve sürekli güncellenen bir tasarım stratejisine dönüşmüştür. Bu dönüşüm, mimarlığın bilimden yöntem ödünç alan edilgen bir konumdan, kendi özgün bilgi üretim biçimine uygun optimizasyon yaklaşımlarını aktif olarak geliştiren bir disipline evrildiğini göstermektedir.

Çalışmada sunulan yedi eksenli sınıflandırma, mimarlıktaki optimizasyon pratiklerinin yalnızca yöntemsel çeşitliliğini değil, aynı zamanda bu pratiklerin birbirleriyle kurduğu karmaşık ilişki ağlarını da göstermektedir. Eksenler analitik olarak birbirinden ayrıştırılabilir olmakla birlikte, somut optimizasyon uygulamalarında birbirleriyle kesişerek çok

boyutlu profiller oluştururlar. Herhangi bir somut optimizasyon uygulaması, bu yedi eksenin her birinde belirli bir konum olarak çok boyutlu bir profile kavuşur. Bu profiller arasındaki geçişkenlikler ve kesişimler, güncel mimari optimizasyon araştırmalarının temel dinamiklerini anlamak için eleştirel bir zemin sunmaktadır.

Eksenler arasındaki özellikle dikkat çekici ilişkilerden biri, hesaplama paradigması ile insan-makine etkileşimi arasında ortaya çıkmaktadır. Model odaklı optimizasyonlarda kullanılan fiziksel ve matematiksel ilişkilerin açık biçimde tanımlanabilmesi, karar zincirinin görece daha izlenebilir olmasını sağlayabilir. Veri odaklı optimizasyonlarda ise özellikle karmaşık öğrenme modellerinin kullanılması, kararların açıklanabilirliği açısından ek sorunlar yaratabilmektedir. Bu sorunlar tam otomatik etkileşim düzeyinde mesleki denetim, doğrulanabilirlik ve yasal sorumluluk açısından daha belirgin hâle gelir. Açıklanabilir yapay zekâ araçlarının yükselişi, tam da bu ikilemi hafifletmeye yönelik bir müdahale olarak okunabilir (Chew ve diğerleri, 2024) . Benzer bir ikilem, optimizasyonun tasarım düşüncesindeki rolü ile insan-makine etkileşimi arasında da gözlemlenir. Keşifsel optimizasyon, özellikle tasarımcının üretilen alternatifleri yorumladığı yarı otomatik etkileşim biçimleriyle güçlü bir ilişki kurar; çünkü amacı yalnızca tek bir optimum çözüme yakınsamak değil, tasarımcıya yeni olasılık alanları açmaktır. Bununla birlikte keşifsel üretim tam otomatik sistemlerde de gerçekleştirilebilir; buradaki temel fark, ortaya çıkan çeşitliliğin hangi aşamada ve kim tarafından değerlendirildiğidir. Tam otomatik optimizasyon ise özellikle açık biçimde tanımlanmış performans hedeflerinin bulunduğu iyileştirici ve üretken süreçlerde belirginleşmektedir.

Ontolojik ölçek eksenini ise diğer tüm eksenlerle kesişen bir yapı iskelesi işlevi görür. Ontolojik ölçek ile hesaplama paradigması arasında zorunlu ve tek yönlü bir eşleşme

bulunmamakla birlikte, uygulama alanlarına bağlı bazı eğilimler gözlemlenebilir. Mikro-ölçekteki fabrikasyon optimizasyonlarında fiziksel ve geometrik kısıtların açık biçimde modellenebilmesi model odaklı yaklaşımları öne çıkarabilirken; makro-ölçekteki kentsel sistemlerin çok sayıda değişken ve belirsizlik içermesi veri odaklı ve olasılıksal yöntemlerin kullanımını artırabilmektedir. Mezo-ölçek ise model odaklı ve veri odaklı yaklaşımların bir arada kullanılabildiği önemli bir kesişim alanı oluşturmaktadır. Ölçekler arası bu geçişkenlik, optimizasyonun mimarlıktaki en temel açmazlarından birini de somutlaştırır: Bir ölçekte optimal olan çözüm, bir üst veya alt ölçekte optimal olmayabilir. Bu nedenle, çok ölçekli ve bütünleşik optimizasyon iş akışlarının geliştirilmesi, güncel araştırmaların öncelikli gündem maddelerinden biridir (Makki ve diğerleri, 2019).

Optimizasyonun değer yüklü doğası ile hesaplama süreçlerinin tarafsız görünümü arasındaki gerilim, bu çalışmanın bütününe yayılan temel epistemolojik mesele olarak öne çıkmaktadır. Optimizasyon modellerinde hangi ölçütlerin yer alacağı, bu ölçütlere hangi ağırlıkların atanacağı ve en iyinin ne anlama geldiği her zaman kültürel, etik ve politik bir seçimdir (Farrell ve Hooker, 2014). Bu seçim ister manuel ister tam otomatik etkileşim düzeyinde olsun, nihai olarak insan tarafından yapılır. Ancak tam otomatik sistemlerde bu seçim, uygunluk fonksiyonunun ve kısıtların tanımlandığı başlangıç anına sıkıştığı için görünmez hâle gelme riski taşır. Bu nedenle, optimizasyonun kuralcı (prescriptive) karakteri, insanî normatif çerçevenin sayısal bir modele çevrilmesi olarak anlaşılmalı; bilgisayarın kendiliğinden değer ürettiği yanılgısından kaçınılmalıdır (Pacheco ve diğerleri, 2026).

Nitel verinin nicelleştirilerek optimizasyona dâhil edilmesi, bu bağlamda hem bir imkân hem de bir risk olarak değerlendirilmelidir. Mekânsal deneyim, kültürel uygunluk ve

sosyal etkileşim gibi nitel ölçütlerin sayısal vekillerle (proxy) temsil edilmesi, optimizasyonun kapsamını genişletirken aynı zamanda bir anlam indirgemesi tehlikesini de beraberinde getirir (Grobman ve diğerleri, 2009). Bu indirgeme riskine karşı etkili stratejilerden biri, optimizasyonu kapalı bir karar mekanizması olarak değil, tasarımcının eleştirel yargısıyla sürekli etkileşim hâlinde çalışan açık bir keşif ve müzakere aracı olarak konumlandırmaktır.

Mimarın değişen rolü, bu tartışmanın doğal bir uzantısıdır. Çalışmada tanımlanan üç insan-makine etkileşim düzeyi (manuel, yarı otomatik, tam otomatik), mimarın rolünün daralan veya genişleyen bir spektrumunu tarif eder. Ancak bu spektrum, mimarın yetki kaybının bir anlatısı olarak okunmamalıdır. Aksine, yarı otomatik ve tam otomatik sistemlerin yükselişi, mimarın formu doğrudan çizen bir operatör olmaktan çıkıp; performans kriterlerini tanımlayan, tasarım uzayını kürate eden, algoritmik süreçlerin parametrelerini belirleyen ve sonuçları bağlamsal olarak yorumlayan bir sistem kurucusu ve değer çerçevesi tasarımcısı olarak yeniden konumlanmasına yol açmaktadır. Bu yeni konum, mimarın mesleki sorumluluğunu azaltmaz; aksine, kararların alındığı soyutlama düzeyini yükselterek etik ve epistemolojik farkındalığı daha da kritik hâle getirir.

Sonuç olarak, bu çalışma optimizasyonun mimarlıktaki yerini tanımlayan kapsamlı bir kavramsal çerçeve sunmaktadır. Birinci neslin indirgemeci nicelliğinden ikinci neslin müzakereci katılımcılığına, oradan günümüzün performans tabanlı, veri odaklı ve çok ölçekli optimizasyon yaklaşımlarına uzanan tarihsel hat, mimarlığın bilimle kurduğu ilişkinin giderek daha karmaşık, daha çift yönlü ve daha özgün bir nitelik kazandığını göstermektedir. Gelecekteki paradigma değişimleri, örneğin yapay zekânın karar alabilme kapasitesi, kuantum hesaplamanın optimizasyon problemlerine getireceği yeni olanaklar veya

otonom yapı sistemlerinin yaygınlaşması, optimizasyon kavramının yeniden tanımlanmasına yol açabilir. Mimarlık, bu dönüşümler karşısında kendi normatif çerçevesini koruyarak, eleştirel mesafesini yitirmeden ve en önemlisi en iyinin ne olduğuna dair sorgulayıcı tavrını sürdürerek yeni optimizasyon biçimlerini üretmeye devam etmelidir. Aksi takdirde optimizasyon, mimarlığın hizmetinde bir araç olmaktan çıkıp, mimarlığı kendi dar mantığına hapseden bir tahakküm aracına dönüşme riski taşır.

KAYNAKÇA

- Achten, H H. (2002). Requirements for Collaborative Design in Architecture. *6th Design and Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning* içinde (ss. 1-13). Eindhoven.
- Achten, Henri H. (2009). Experimental Design Methods-A Review. *International Journal of Architectural Computing*, 7(4), 506-534.
- Aish, R., Fisher, A., Happold, B. ve Joyce, S. (2012). Progress towards Multi-Criteria Design Optimisation using DesignScript with SMART Form, Robot Structural analysis and Ecotect building performance analysis. *Synthetic Digital Ecologies, ACADIA Conference Proceedings* içinde (ss. 47-56). San Francisco. doi:10.52842/conf.acadia.2012.047
- Bamford, G. (2002). From analysis/synthesis to conjecture/analysis: a review of Karl Popper's influence on design methodology in architecture. *Design Studies*, 22(3), 245-261. doi:10.1016/S0142-694X(01)00037-0
- Bousbaci, R. ve Findeli, A. (2005). More Acting and Less Making: A Place for Ethics in Architecture's Epistemology. *Design Philosophy Papers*, 3(4), 245-264. doi:10.2752/144871305x13966254124996
- Brawne, M. (1995). Research, design and Popper. *Architectural Research Quarterly*, 1(2). doi:10.1017/s1359135500002700
- Carrara, G., Kalay, Y. E. ve Novernbri, G. (1994). Knowledge-based computational support for architectural design. *Automation in Construction*, 3, 157-175. doi:10.1016/0926-5805(94)90017-5

- Chew, Z. X., Wong, J. Y., Tang, Y. H., Yip, C. C. ve Maul, T. (2024). Generative Design in the Built Environment. *Automation in Construction*, 166. doi:10.1016/j.autcon.2024.105638
- Cross, N. (2001). Designerly Ways of Knowing: Design Discipline Versus Design Science. *Designerly Ways of Knowing* içinde (ss. 49-55). Springer. doi:10.1007/978-1-4471-7541-4
- Cross, N. (2007). Forty years of design research. *Design Studies*, 28(1), 1-4. doi:10.1016/j.destud.2006.11.004
- Demirbaş, S. ve Bayram, F. T. (2024). Unraveling Object-Oriented Dynamics in Architectural Form: The Impact of Randomness in Digital Design Processes. *Proceedings of the International Conference of Contemporary Affairs in Architecture and Urbanism-ICCAUA* içinde (C. 7, ss. 202-211). Alanya Üniversitesi. doi:10.38027/iccaua2024en0266
- Farrell, R. ve Hooker, C. (2014). Values and norms between design and science. *Design Issues*, 30(3), 29-38. doi:10.1162/DESI_a_00276
- Gero, J. S. ve Kannengiesser, U. (2014). The function-behaviour-structure ontology of design. *An Anthology of Theories and Models of Design* içinde (ss. 263-283). Springer.
- Grobman, Y. J., Yezioro, A. ve Capeluto, I. G. (2009). Computer-Based Form Generation in Architectural Design-a Critical Review. *International Journal of Architectural Computing*, 7(4). doi:10.1260/1478-0771.7.4.535
- Hensel, M., Menges, A. ve Weinstock, M. (2013). *Emergent technologies and design: towards a biological paradigm for architecture*. Routledge.

- Jang, S., Roh, H. ve Lee, G. (2025). Generative AI in architectural design: Application, data, and evaluation methods. *Automation in Construction*, 174. doi:10.1016/j.autcon.2025.106174
- Khan, A., Chang, S. ve Chang, H. (2025). Generative AI approaches for architectural design automation. *Automation in Construction*, 180. doi:10.1016/j.autcon.2025.106506
- Kolarevic, Branko. ve Malkawi, Ali. (2005). *Performative architecture : beyond instrumentality*. Spon Press.
- Kotnik, T. (2010). Digital Architectural Design as Exploration of Computable Functions. *International Journal of Architectural Computing*, 8(1), 1-16. doi:10.1260/1478-0771.8.1.1
- Makki, M., Showkatbakhsh, M., Tabony, A. ve Weinstock, M. (2019). Evolutionary algorithms for generating urban morphology: Variations and multiple objectives. *International Journal of Architectural Computing*, 17(1), 5-35. doi:10.1177/1478077118777236
- Mccall, R. J. (1991). PHI: a conceptual foundation for design hypermedia. *Design Studies*, 12(1), 30-41. doi:10.1016/0142-694X(91)90006-I
- Meira-Rodríguez, P. ve López-Chao, V. (2026). Human–AI communication parameters for reproducible text-to-image workflows in AEC design across academia and practice. *Automation in Construction*, 182. doi:10.1016/j.autcon.2026.106767
- Oxman, R. (2006). Theory and design in the first digital age. *Design Studies*, 27(3), 229-265. doi:10.1016/j.destud.2005.11.002

- Oxman, R. (2008). Digital architecture as a challenge for design pedagogy: theory, knowledge, models and medium. *Design Studies*, 29(2), 99-120. doi:10.1016/j.destud.2007.12.003
- Özten, Ü. (2014). *Reconsidering Architectural Program Within The Framework Of Conjectures And Refutations: The Design Studies Journal*. Middle East Technical University.
- Pacheco, A. I. L., Marques, I. C. N. da R. ve Rocha, R. J. G. (2026). Digital Paradigms in Architecture: Toward a Layered Computational Ecology from Early Computation to Artificial Intelligence. *Architecture*, 6(2). doi:10.3390/architecture6020089
- Radford, A. D. ve Gero, J. S. (1987). *Design by optimization in architecture, building, and construction*. John Wiley & Sons, Inc.
- Rittel, H. W. J. ve Webber, M. M. (1973). Dilemmas in a General Theory of Planning. *Policy Sciences*, 4, 155-169. doi:10.1007/BF01405730
- Şenyapıh, B. ve Özgüç, B. (1994). Proposal for improving computer aid in architectural design. *Architectural Science Review*, 37(4), 171-179. doi:10.1080/00038628.1994.9697344
- Zboinska, M. A. (2015). Hybrid CAD/E platform supporting exploratory architectural design. *CAD Computer Aided Design*, 59, 64-84. doi:10.1016/j.cad.2014.08.029
- Zhang, H. ve Zhang, R. (2025). Generative artificial intelligence (AI) in built environment design and planning – A state-of-the-art review. *Progress in Engineering Science*, 2(1). doi:10.1016/j.pes.2024.100040

YAPI BİLGİ MODELLEMESİ (BIM) BAĞLAMINDA MİMARİ TASARIM VE PROJE ÜRETİMİ: İDECAD ÜZERİNDEN BİR İNCELEME

Seda ERDOĞAN¹

1. GİRİŞ

Yapı sektöründe dijital teknolojilerin gelişmesi, mimari tasarım ve proje üretim süreçlerinde geometrik verilerin yanı sıra yapı elemanlarına ilişkin bilgilerin de birlikte ele alınmasını gerekli kılmıştır. Bu dönüşüm, tasarım kararları ile proje bilgilerinin aynı dijital ortamda ilişkilendirilebildiği BIM tabanlı çalışma yaklaşımlarının yaygınlaşmasına zemin hazırlamıştır. BIM yaklaşımının mimari tasarım ve proje üretimindeki karşılığı ise kullanılan yazılımın modelleme, proje dokümantasyonu ve veri yönetimine yönelik olanaklarıyla yakından ilişkilidir.

Bu kapsamda çalışmada, BIM tabanlı mimari proje üretimi ideCAD yazılımı üzerinden incelenmektedir.

Bu çalışmanın amacı, ideCAD ortamında oluşturulan bir mimari model üzerinden BIM yaklaşımının mimari modelleme, proje dokümantasyonu ve model verilerinin değerlendirilmesi süreçlerine nasıl yansıdığını ortaya koymaktır.

Çalışmanın uygulama aşamasında, tasarlanan iki katlı bir villa projesi ideCAD ortamında modellenmiştir. Kat, kot ve aks sistemleri tanımlandıktan sonra duvar, döşeme, kapı, pencere, merdiven ve çatı gibi temel mimari elemanlar oluşturulmuş;

¹ Dr. Öğr. Üyesi, İstanbul Galata Üniversitesi, Sanat ve Sosyal Bilimler Fakültesi, İç Mimarlık ve Çevre Tasarımı, ORCID: 0000-0002-9120-1822.

model üzerinden plan, kesit, görünüş ve üç boyutlu görseller elde edilmiştir. Elde edilen bu dokümanlar, model ile proje dokümantasyonu arasındaki ilişki ve model verilerinin proje üretim sürecindeki kullanımı açısından değerlendirilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde BIM kavramı ve BIM'in mimari tasarıma katkıları ele alınmakta; üçüncü bölümde ideCAD'in BIM yaklaşımı, mimari modelleme olanakları ve proje dokümantasyonu süreçleri incelenmektedir. Dördüncü bölümde ise villa projesi üzerinden model oluşturma, proje çıktılarının elde edilmesi ve model verilerinin değerlendirilmesine ilişkin uygulama süreci sunulmaktadır. Çalışma, iki katlı bir villa projesi ve ideCAD yazılımı üzerinden gerçekleştirilen inceleme ile sınırlıdır.

2. YAPI BİLGİ MODELLEMESİ VE MİMARİ TASARIM

2.1. Bim Kavramı

Yapı Bilgi Modellemesi (Building Information Modeling), yapı sektöründe tasarım, proje üretimi ve bilgi yönetimi süreçlerinin sayısal ortamda bütünleşik olarak ele alınmasını sağlayan veri merkezli bir yaklaşımdır. BIM, yalnızca üç boyutlu görsel bir modelleme süreci değil; yapıya ilişkin geometrik ve niteliksel verilerin oluşturulması, ilişkilendirilmesi, paylaşılması ve yapının tüm yaşam döngüsü boyunca yönetilmesini kapsar (Succar, 2009; ISO, 2018).

Geleneksel bilgisayar destekli tasarım (CAD) sistemleri çizgi, yay ve yüzey gibi geometrik bileşenlere dayalı grafik temsil sunarken; BIM yaklaşımında yapı elemanları nesne tabanlı ve parametrik bilgi taşıyıcıları olarak modellenmektedir (Azhar, 2011; Sacks vd., 2018). Örneğin bir duvar, CAD ortamında yalnızca iki boyutlu çizgiler veya bağımsız bir yüzey olarak

temsil edilirken; BIM ortamında boyut, malzeme katmanları, maliyet, performans değerleri ve diğer yapı bileşenleriyle ilişkileri gibi öznetelik verileriyle tanımlanır.

CAD ve BIM arasındaki temel ayrım, mimari bilginin üretilme ve yönetilme biçiminde ortaya çıkmaktadır. CAD ortamında plan, kesit ve görünüşler bağımsız çizimler olarak üretildiği için tasarımıdaki bir değişikliğin tüm paftalara ayrı ayrı işlenmesi gerekir. BIM ortamında ise tüm proje çıktıları ortak bir yapı modelinden dinamik olarak türetilir; model üzerindeki bir revizyon tüm çizimlere eş zamanlı yansyarak bilgi tutarlılığını korur. CAD ağırlıklı olarak grafik temsili hedeflerken, BIM modeli metraj, maliyet analizi, disiplinler arası çakışma tespiti ve şantiye koordinasyonu gibi süreçleri besleyen dinamik bir bilgi kaynağı işlevi görür (Barlish & Sullivan, 2012; Bryde vd., 2013).

CAD ve BIM arasındaki fark yalnızca kullanılan araçlarla sınırlı olmayıp, mimari bilginin üretilme, saklanma ve paylaşılma biçimini de kapsar. CAD tabanlı süreçlerde bilgi ağırlıklı olarak çizim paftalarında tutulduğundan, revizyonlarda aynı bilginin farklı çizimlerde tekrarlanması hata riskini artırabilir.

BIM süreçlerinde ise bilgiler model elemanlarına parametre olarak tanımlanır ve plan, kesit, görünüş ve metraj gibi çıktılar ortak modelden türetilir. Bu yaklaşım bilgi tekrarını azaltırken proje paydaşları için ortak bir veri kaynağı oluşturur. Ayrıca farklı disiplin modellerinin aynı koordinasyon ortamında kontrol edilmesine olanak sağlayarak olası çakışmaların proje aşamasında belirlenmesini kolaylaştırır.

İki yaklaşım arasındaki temel farklar aşağıdaki tabloda özetlenmiştir.

Tablo 1. CAD ve BIM yaklaşımlarının temel özellikler açısından karşılaştırılması

Karşılaştırma ölçütü	CAD	BIM
Temel çalışma birimi	Çizgi, yay, yüzey vb. geometrik nesneler	Bilgi içeren yapı elemanları
Temsil yaklaşımı	Çizim tabanlı	Model tabanlı
Modelleme mantığı	Geometrik çizim	Nesne tabanlı ve parametrik modelleme
Bilgi kapsamı	Ağırlıklı olarak geometrik ve grafik bilgi	Geometrik, niteliksel ve teknik bilgiler
Plan-kesit-görünüş ilişkisi	Çoğunlukla bağımsız çizimler	Ortak modelle ilişkili görünüm
Revizyon yönetimi	Çizimlerin ayrı ayrı kontrol edilmesi gerekebilir	Model ilişkileri üzerinden daha bütünlük yönetim
Veri üretimi	Çizimlerden manuel veya ayrı işlemlerle elde edilebilir	Modeldeki bilgiler üzerinden üretilebilir
Disiplinler arası koordinasyon	Dosya ve çizim paylaşımına dayalı olabilir	Ortak veya ilişkili model verileri üzerinden yürütülebilir
Proje yaşam döngüsü	Çizim ve dokümantasyon ağırlıklı kullanım	Tasarım, yapım ve işletme süreçlerine uzanan bilgi yönetimi
Temel yaklaşım	Geometrinin sayısal olarak temsil edilmesi	Yapının bilgi içeren dijital modelinin oluşturulması

2.2. Bim'in Mimari Tasarıma Katkıları

Geleneksel çizim tabanlı süreçlerde tasarım kararlarının plan, kesit ve görünüşlerde ayrı ayrı ifade edilmesi, bu çıktılar arasındaki tutarlılığın sürekli kontrol edilmesini gerektirir. BIM yaklaşımı ise tasarım kararları ile yapı verilerini ortak bir modelde ilişkilendirerek tasarım, değerlendirme ve dokümantasyon süreçlerini bütünleştirmektedir.

BIM'in mimari tasarıma katkılarından biri, mekânsal kararların üç boyutlu model üzerinden değerlendirilebilmesidir. Kütle, dolaşım, ölçek, oran ve mekânsal organizasyon gibi unsurların farklı açılardan incelenebilmesi, tasarımın mekânsal ve

biçimsel özelliklerinin daha erken aşamalarda değerlendirilmesini desteklemektedir (Kymmell, 2008).

Parametrik ve nesne tabanlı modelleme, tasarım alternatiflerinin geliştirilmesini ve karşılaştırılmasını kolaylaştırmaktadır. Modelde yapılan değişikliklerin ilişkili görünümlere yansıtılması, yinelemeli tasarım sürecini desteklerken plan, kesit ve görünüşler arasındaki tutarlılığın korunmasına ve tekrarlı çizim işlemlerinin azaltılmasına katkı sağlamaktadır.

BIM, mimari tasarımın taşıyıcı sistem, mekanik ve elektrik tesisatı gibi diğer disiplinlerle ilişkisini daha erken aşamada değerlendirmeyi de destekler. Ortak veya koordineli modeller üzerinden yürütülen bilgi paylaşımı, mekânsal ve teknik uyumsuzlukların yapım aşamasından önce tespit edilmesine yardımcı olabilir (Hardin & McCool, 2015). Üç boyutlu modelin işveren ve kullanıcılar için daha anlaşılır bir temsil sunması ise tasarım kararlarının paylaşılmasını ve geri bildirimlerin alınmasını kolaylaştırır.

BIM modeli üzerinden alan, hacim, uzunluk ve adet gibi verilerin elde edilmesi, tasarımın ölçülebilir proje verileriyle birlikte değerlendirilmesini sağlar. Bu olanakların etkin kullanımı ise modelin doğru kurulmasına, bilgilerin düzenli girilmesine ve model çıktılarının kontrol edilmesine bağlıdır.

3. İDECAD İLE BIM TABANLI MİMARİ PROJE ÜRETİMİ

3.1. İdecad'in Bim Yaklaşımı

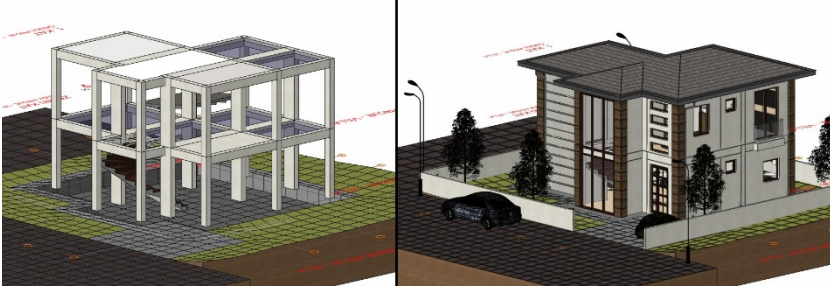
BIM tabanlı mimari proje üretiminde kullanılan yazılımlar, yalnızca üç boyutlu görsel temsil sağlayan araçlar değil; yapı elemanlarına ilişkin geometrik, fiziksel ve işlevsel verilerin oluşturulduğu ve yönetildiği dijital çalışma ortamlarıdır.

BIM'in temel özelliklerinden biri, yapı bileşenlerinin nesne tabanlı ve parametrik bir yapı içerisinde modellenmesidir (Sacks, Eastman, Lee ve Teicholz, 2018).

ideCAD'in BIM yaklaşımı, mimari ve yapısal tasarım süreçlerinin ortak bir proje modeli üzerinden yürütülmesine dayanmaktadır. Yazılımın teknik dokümantasyonunda; mimari ve strüktürel tasarımın aynı yapı bilgi modeli içerisinde oluşturulabildiği ve bu disiplinlere ilişkin verilerin bütünlük bir veri yapısı üzerinden yönetilebildiği vurgulanmaktadır (ideCAD, t.y.). Duvar, döşeme, kolon, giriş, kapı, pencere, merdiven ve çatı gibi yapı bileşenleri, geometrik ve niteliksel özelliklere sahip nesneler olarak modellenmektedir. “One Model” (Tek Model) yaklaşımı ise akslar, katlar, yapı elemanları, üç boyutlu model ve proje dokümantasyonu arasındaki ilişkilerin aynı proje ortamında yönetilmesini sağlamaktadır (ideCAD, t.y.).

Bu yaklaşımın önemli çıktılarından biri, yapı bilgi modeli ile proje dokümantasyonu arasındaki dinamik ilişkidir. ideCAD'in teknik açıklamalarına göre iki ve üç boyutlu görünümlemler ile proje paftaları, sanal yapı modelinden türetilen farklı temsil biçimleridir. Model üzerinde yapılan değişikliklerin ilgili plan, kesit, görünüş ve detaylara yansıtılabilmesi, proje verilerinin güncelliğinin ve tutarlılığının korunmasını desteklemektedir (ideCAD, t.y.). Böylece iki boyutlu paftalar bağımsız çizimler olmaktan çıkarak ortak modelin farklı gösterimleri hâline gelmektedir.

ideCAD'in BIM yaklaşımının bir diğer özelliği, mimari ve yapısal tasarımın ortak proje verileri üzerinden ilişkilendirilebilmesidir. Mimari model ile betonarme ve çelik yapı tasarımının aynı platformda yürütülmesi, taşıyıcı sistemin tasarım kararlarıyla birlikte değerlendirilmesini ve olası çakışmaların erken aşamada belirlenmesini desteklemektedir (ideCAD, t.y.).



Şekil 11. Villa Projesinin ideCAD Ortamındaki Strüktürel (Solda) ve Mimari (Sağda) 3B BIM Modelleri

Bununla birlikte, BIM tabanlı proje üretiminde verimlilik yalnızca yazılım özelliklerine bağlı değildir. Modelin doğru kurgulanması, verilerin sınıflandırılması, ekip içi iletişim ve bilgi yönetimi de sürecin etkinliğini belirlemektedir. Sacks ve arkadaşları (2018), veri yüklü ve parametrik BIM modellerinin geleneksel 2B çizimlere kıyasla erken tasarım aşamalarında daha fazla modelleme disiplini ve emek gerektirebildiğini belirtmektedir. Bu nedenle ideCAD'in BIM yaklaşımı, teknik özelliklerinin yanı sıra veri merkezli bir proje üretim süreci olarak ele alınmalıdır.

Sonuç olarak ideCAD'in BIM yaklaşımı; nesne tabanlı modelleme, ortak proje modeli, mimari ve yapısal tasarımın entegrasyonu ve model ile dokümantasyon arasındaki dinamik ilişki üzerine kuruludur. Bu yapı, tasarım, koordinasyon ve dokümantasyon süreçlerinin aynı dijital ortamda yürütülmesini desteklemektedir.

3.2. Mimari Modelleme ve Yapı Elemanları

BIM tabanlı mimari modellemede yapı elemanları yalnızca geometrik biçimleriyle değil; malzeme, boyut, katman ve diğer elemanlarla ilişkileri gibi özellikleriyle birlikte tanımlanmaktadır. Bu nesne tabanlı yaklaşım, yapı bilgilerinin model içerisinde bütünleşik biçimde yönetilmesine ve farklı proje

çıktılarında kullanılmasına olanak sağlar (Krygiel ve Nies, 2008; Kymmell, 2008).

ideCAD ortamında mimari modelleme, kat, kot ve aks bilgilerinin tanımlanmasıyla başlar. Ardından duvar, döşeme, kapı, pencere ve diğer mimari elemanlar ilgili özellikleriyle birlikte modellenir. Elemanların birbirleriyle ilişkili olarak oluşturulması, geometrik ve niteliksel bilgilerin farklı proje çıktılarında kullanılmasını sağlar.

Model üzerinde yapılan değişiklikler, ortak modelden üretilen plan, kesit ve görünüşlere yansıtılabilir. Üç boyutlu görünüm ise model geometrisinin ve elemanlar arası ilişkilerin kontrolünü kolaylaştırır. Böylece model, yalnızca üç boyutlu bir temsil değil, proje çizimleri ve veri üretiminin temelini oluşturan bütünleşik bir yapı hâline gelir.

3.3. Modelden Çizim ve Proje Dokümantasyonu

BIM tabanlı mimari proje üretiminde modelleme sürecinin ardından, oluşturulan modelin proje çizimlerine ve teknik dokümanlara dönüştürülmesi önemli bir aşamadır. Model, yapının üç boyutlu temsiline yanı sıra geometrik ve niteliksel verileri de içerdiğinden, teknik paftaların temel veri kaynağını oluşturur (Jung ve Joo, 2011).

Bu yaklaşım, geleneksel CAD yöntemlerinden ayrılır. CAD ortamında çizimler çoğunlukla birbirinden bağımsız üretildiğinden revizyonların paftalara ayrıca uygulanması gerekir. BIM sistemlerinde ise farklı görünümle aynı modelden türetildiği için veri ve geometri tutarlılığının korunması kolaylaşır (Miettinen ve Paavola, 2014).

ideCAD ortamında mimari model tamamlandığında duvar, döşeme, kapı, pencere ve merdiven gibi bileşenler, tanımlanan özellikleriyle birlikte pafta görünümüne aktarılır. Plan, kesit ve görünüşler model üzerinden elde edilerek çizgi

kalınlıkları, taramalar, ölçülendirmeler, kotlar ve teknik sembollerle düzenlenir. Böylece farklı çizimler arasında geometrik bütünlük sağlanır ve aynı elemanın yeniden çizilmesine gerek kalmaz.

Bununla birlikte, modelden otomatik çizim elde edilmesi dokümantasyon sürecinin tamamlandığı anlamına gelmez. Üretilen görünümün ölçek, çizgi hiyerarşisi, grafik düzen ve pafta organizasyonu açısından teknik çizim standartlarına uygunluğu kullanıcı tarafından kontrol edilmelidir (Hardin ve McCool, 2015). Modelde yapılan değişikliklerin ilgili görünümlere yansımaları revizyon sürecini kolaylaştırır da, güncellenen paftaların son kontrolünün yapılması gerekir (Volk, Stengel ve Schultmann, 2014).

Modelin farklı disiplinlerle birlikte değerlendirilmesi de dokümantasyon sürecini destekler. Mimari modelin statik ve tesisat projeleriyle birlikte ele alınması, olası uygulama sorunlarının proje aşamasında fark edilmesine katkı sağlar (Becerik-Gerber ve Rice, 2010).

Sonuç olarak ideCAD ortamında modelden çizim üretimi; görünümün model üzerinden elde edilmesi, teknik ve grafik düzenlemelerin yapılması ve revizyonların kontrolünü kapsayan bir süreçtir. Ortak model kullanımı, tasarım ve dokümantasyon arasındaki veri sürekliliğini desteklerken, pafta kalitesinin modeldeki bilgi ve geometrinin doğruluğuna bağlı olmasını beraberinde getirir (Barlish ve Sullivan, 2012; ideCAD, t.y.).

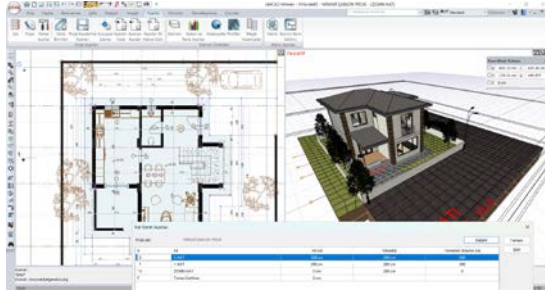
4. ÖRNEK UYGULAMA: VİLLA PROJESİ ÜZERİNDEN BİR İNCELEME

4.1. Projenin Tanımlanması ve Modelin Oluşturulması

Bu çalışmada ele alınan örnek proje, yazar tarafından tasarlanan iki katlı bir villa yapısıdır. Proje, mimari tasarım kararlarının BIM ortamında modellenmesi ve proje dokümantasyonunun üretilmesi amacıyla ideCAD yazılımında oluşturulmuştur. Model; kat organizasyonu, mekânsal kurgu, düşey sirkülasyon, duvar, döşeme, kapı, pencere ve çatı bileşenlerini içerecek şekilde geliştirilmiş; mimari kararların ortak bir dijital model üzerinden plan, kesit, görünüş ve üç boyutlu çıktılarına dönüştürülmesi sağlanmıştır.

Modelleme sürecinin ilk aşamasında, projenin düşey ve yatay referans sistemleri tanımlanmıştır. Bu kapsamda kat ve kot organizasyonu kurgulanmış; taşıyıcı ile bölücü elemanların doğru konumlandırılmasını sağlayan aks sistemi oluşturulmuştur.

Modelleme aşamasında duvar, döşeme, kapı, pencere, merdiven ve çatı gibi yapı elemanları; geometrik özelliklerinin yanı sıra kalınlık, malzeme ve kat ayarları gibi niteliksel verileriyle birlikte modellenmiştir. Elemanlar, birbirleriyle olan ilişkileri ve yapı katlarıyla uyumları gözetilerek parametrik bir sistem içerisinde oluşturulmuştur.



Şekil 2. ideCAD arayüzünde kat genel ayarları

Oluşturulan model, tasarım süreci boyunca eş zamanlı olarak 3B görünüm pencerelerinden denetlenmiş; geometrik çakışmalar ve katlar arası düşey hiyerarşi hataları modelleme aşamasındayken düzeltilmiştir. Böylece elde edilen 3B mimari model, yalnızca görsel bir kütle temsili olmaktan çıkarak; pafta çizimlerinin türetilmesine, metraj raporlarının oluşturmaya ve veri analizlerinin gerçekleştirilmesine altyapı sağlayan bilgi içeren bir dijital model niteliği kazanmıştır (Gu ve London, 2010; Eastman vd., 2011).

4.2. Plan, Kesit, Görünüş ve 3b Çıktıların Elde Edilmesi

BIM tabanlı proje üretiminde modelin tamamlanmasının ardından temel aşamalardan biri, yapı verilerinin farklı ölçek ve bakış açılarını temsil eden proje dokümanlarına aktarılmasıdır. Plan, kesit, görünüş ve üç boyutlu görünüm, birbirinden bağımsız çizilen grafik çıktılar değil, ortak yapı modelinden türetilen dinamik temsillerdir. Bu yaklaşım, yapı bileşenlerinin farklı açılardan incelenmesine, model ve dokümantasyon ilişkisinin korunmasına olanak tanır (Eastman et al., 2011; Sacks vd., 2018).

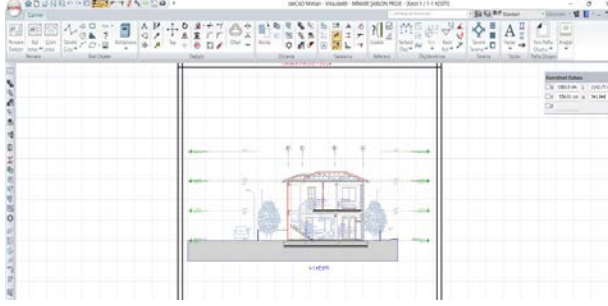
Duvar, döşeme, kapı, pencere, merdiven ve çatı gibi bileşenlerin modele tanımlanmasıyla farklı görünümdeki karşılıkları ortak veri kaynağı üzerinden izlenebilir. Böylece model, plan, kesit, cephe ve paftalama süreçlerinin temel veri kaynağı hâline gelir (Eastman et al., 2011).

“Görünüş”, yapının cephe düzlemindeki ortografik izdüşümünü; “üç boyutlu görünüm” ise perspektif, aksonometrik veya farklı kamera açılarıyla elde edilen hacimsel temsilleri ifade eder. Cephe görünüşleri dış yüzey ve cephe elemanlarının 2B düzlemde okunmasını sağlarken, 3B görünüm, yapının kütle ve mekânsal ilişkilerinin değerlendirilmesine olanak verir (Sacks et al., 2018).

ideCAD’de plan, 3B perspektif ve 3B görünüm alanları aynı modelin farklı açılardan izlenmesini sağlayan çalışma ortamlarıdır; kesit ve görünüşler de model referans alınarak oluşturulur (ideCAD, t.y.). Böylece model, tasarımın yanı sıra proje dokümantasyonunun da temel veri kaynağını oluşturur.

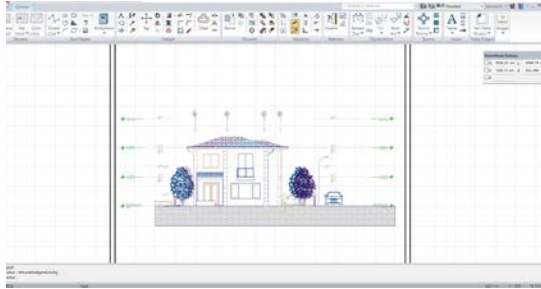
Plan görünümleri, yapının belirli bir yatay kesme düzlemi üzerinden değerlendirilmesini sağlar. Mekân organizasyonu, duvarlar, kapı-pencere boşlukları, dolaşım ve taşıyıcı elemanlar bu düzlem üzerinden incelenir. ideCAD’de plan pencereleri, 2B grafik öğelerin yanı sıra duvar, giriş, döşeme ve mahal gibi yapı bileşenlerinin oluşturulabildiği ve özelliklerinin yönetilebildiği dinamik çalışma alanlarıdır (ideCAD, t.y.). Görünürlük ayarlarıyla mimari ve yapısal elemanlar düzenlenerek aynı model üzerinden farklı çıktılar hazırlanabilir. Planın grafik niteliğinde kesit yüksekliği, görünürlük ayarları, çizgi kalınlıkları, ölçeklendirme ve metin ölçekleri belirleyicidir.

Kesitler, yapının düşey organizasyonunu ve katlar arasındaki mekânsal ilişkileri ortaya koyar. Kat yükseklikleri, döşemeler, merdivenler, çatı ve temel sistemi kesit düzleminde birlikte değerlendirilir. ideCAD’de kesit alındığında (şekil 3), kesit düzlemiyle ilişkili 3B yapı elemanları çizgi ve tarama öğelerine dönüştürülerek teknik çizim ortamına aktarılır (ideCAD, t.y.). Kesilen elemanların daha kalın, arka planda kalanların ise daha ince çizgilerle gösterilmesi, kesitte derinlik ve okunabilirlik sağlar. Renk, çizgi kalınlığı ve tarama gibi grafik özellikleri de düzenlenebilir (ideCAD, t.y.).



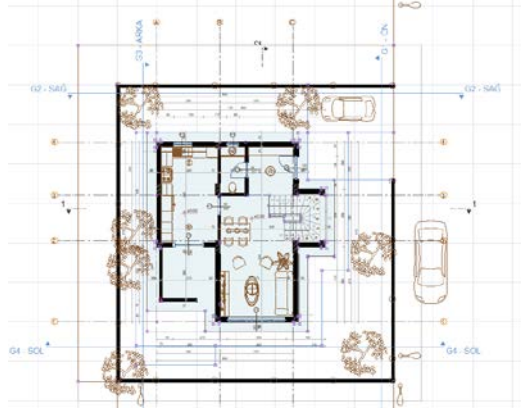
Şekil 3. İdeCAD Programından Alınmış Villa projesi Kesiti

Cephe görünüşleri, yapının dış kabuğunun, mimari karakterinin ve malzeme kullanımının değerlendirilmesini sağlar. Doğrama oranları, kat hizaları, çatı formu ve cephe kaplamaları bu görünüm üzerinden okunabilir. İdeCAD’de görünüş çizgisi ve bakış yönü tanımlanarak modelden otomatik cephe görünüşleri oluşturulabilir ve proje amacına göre düzenlenebilir (İdeCAD, t.y.). Tasarım aşamalarında malzeme, renk ve gölge öne çıkarken, uygulama ve ruhsat paftalarında ölçü, kot, aks ve çizgi netliği daha belirleyicidir.



Şekil 4. İdeCAD Programından Alınmış Villa projesi Görünüşü

Üç boyutlu görünüm, projenin mekânsal bütünlüğünü ve elemanlar arasındaki geometrik ilişkileri değerlendirmeyi kolaylaştırır. Çatı, merdiven ve girintili cephe gibi karmaşık detaylar 3B model üzerinden daha açık incelenebilir.



Şekil 5. İdeCAD Programından Alınmış Zemin kat planı

Şekil 2–5’te aynı modelden elde edilen kesit, cephe görünüşü ve plan çıktıları görülmektedir. Bu yapı, bir duvarın plandaki konumu ile kesitteki yüksekliğinin, cephedeki yüzeyinin ve 3B modeldeki hacimsel karşılığının birlikte kontrol edilmesine olanak tanır. Modelde yapılan değişiklikler ilgili görünümlere yansıtılabilse de ölçülendirme, mahal etiketleri, pafta notları ve başlıkların ayrıca kontrol edilmesi gerekir. Bu nedenle BIM’in koordinasyon avantajı, otomatik güncellemenin yanı sıra görsel ve teknik kontrol süreciyle desteklenmelidir (Eastman et al., 2011; Sacks vd., 2018).

4.3. Model Verilerinin Değerlendirilmesi

BIM tabanlı proje üretiminde model, yalnızca üç boyutlu geometrinin değil, yapı elemanlarına ait geometrik ve geometrik olmayan bilgilerin de birlikte tutulduğu sayısal bir veri kaynağıdır. Bu nedenle model değerlendirmesi, görsel doğruluğun yanı sıra bilgilerin eksiksizliği, doğruluğu, tutarlılığı ve proje gereksinimleriyle uyumunu da kapsamalıdır.

Model bilgi kalitesi, proje sürecinin ilerleyen aşamalarında farklı kullanıcıların model verilerine yeniden başvurması açısından önem taşımaktadır (Zadeh et al., 2017).

Değerlendirmede öncelikle bilgi eksiksizliği ele alınmalıdır. Bir yapı elemanının modele eklenmiş olması, gerekli tüm bilgilerinin tanımlandığı anlamına gelmez. Örneğin bir duvarın modellenmesi; malzeme, kalınlık, katman yapısı, yangın dayanımı veya akustik performans bilgilerinin doğru tanımlandığını garanti etmez. Bu nedenle model kontrolünde elemanların varlığının yanı sıra gerekli bilgi alanlarının yeterliliği de incelenmelidir (Chen ve Yeoh, 2020).

Model verilerinin doğruluğu ve tutarlılığı da temel değerlendirme ölçütlerindendir. Yapı elemanlarına ait bilgilerin birbiriyle çelişmemesi, geometrik ilişkilerin doğru kurulması ve elemanların tanımlanan özellikleriyle uyumlu olması gerekir. Özellikle veri aktarımı ve yazılımlar arası dönüşüm sırasında oluşabilecek bilgi kayıpları ve uyumsuzluklar, modelin sistematik olarak kontrol edilmesini gerekli kılar (Li et al., 2025).

Geometrik doğruluk ile bilgi doğruluğu birlikte değerlendirilmelidir. Model geometrisinin doğru oluşturulması, modelin bütünüyle doğru olduğu anlamına gelmez. Özellikle mevcut yapıların BIM ortamına aktarılmasında model geometrisinin gerçek yapı verileriyle karşılaştırılması gerekebilir. Anil et al. (2013), BIM modeli ile gerçek durumu temsil eden nokta bulutu arasındaki geometrik sapmaların incelenebileceğini ortaya koymuştur. Böylece model, ölçüsel ve mekânsal açıdan da değerlendirilebilir.

Model kalitesinin bir diğer boyutu kullanım amacına uygunluktur. Projenin farklı aşamalarında ihtiyaç duyulan bilgi düzeyi değişebildiğinden, modelin yalnızca doğru bilgi içermesi değil, belirlenen kullanım amacı için yeterli olması da önemlidir (Zadeh et al., 2017). Bu kapsamda BIM modelinin değerlendirilmesi; veri bütünlüğü, bilgi eksiksizliği, geometrik doğruluk, bilgi doğruluğu, tutarlılık ve kullanım amacına uygunluk ölçütleri üzerinden gerçekleştirilebilir. Model

kontrolünün sistematik hâle getirilmesi, özellikle çok sayıda eleman ve farklı disiplin verisi içeren projelerde hata olasılığının azaltılmasına katkı sağlar (Hjelseth, 2015; Li et al., 2025).

ideCAD ortamında oluşturulan mimari modelin değerlendirilmesi, üç boyutlu görünümün yanı sıra yapı elemanlarının geometrik ve tanımlayıcı bilgilerinin kontrolünü de kapsamaktadır. Duvar, döşeme, kapı, pencere, merdiven ve çatı gibi elemanlara ait malzeme, ölçü ve profil gibi bilgilerinin doğruluğu; plan, kesit, görünüş, üç boyutlu sunum ve metraj çıktılarının niteliğini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle BIM modelinin değerlendirilmesi, verilerin eksiksiz, doğru ve tutarlı olmasını sağlayan sürekli bir kontrol ve düzeltme süreci olarak ele alınmalıdır.

Tablo 2. ideCAD ortamında BIM modelinin değerlendirilmesine ilişkin bulgular

Değerlendirme ölçütü	ideCAD uygulamasında gözlenen durum
Geometrik tutarlılık	Plan, kesit, görünüş ve 3B model arasında ilişki kurulmuştur.
Revizyon yönetimi	Model değişiklikleri paftadaki plan gibi ilişkili görünümlere yansımaları sağlanmıştır.
Veri bütünlüğü	Yapı elemanlarına ait ölçü, malzeme ve katman bilgilerinin birlikte tutulması mümkün olmuştur.
Dokümantasyon	Model üzerinden plan, kesit ve görünüşler elde edilmiştir.
Grafik kontrol	Çizgi kalınlığı, ölçeklendirme, tarama ve pafta düzeninin ayrıca kontrol edilmesi gerekmiştir.

5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) yaklaşımının mimari tasarım ve proje üretimindeki kullanımı, ideCAD ortamında oluşturulan iki katlı bir villa projesi üzerinden incelenmiştir. Uygulama sonucunda, ortak bir BIM modeli üzerinden plan, kesit, görünüş ve üç boyutlu çıktıların

üretilebildiği ve mimari kararların farklı proje görünümlerinde birlikte kontrol edilebildiği görülmüştür.

Model üzerinden yapı elemanlarının yatay ve düşey ilişkilerinin izlenebilmesi; kat kotları, duvar-döşeme ilişkileri, merdiven sürekliliği, kapı ve pencere yerleşimleri ile çatı geometrisinin kontrolünü kolaylaştırmaktadır. Ayrıca modelde yapılan değişikliklerin ilişkili proje görünümüne yansıtılması, yeniden çizim gereksinimini azaltarak dokümantasyonun tutarlılığını desteklemektedir.

Bununla birlikte, BIM modelinde geometrik doğruluğun yanı sıra ölçü, malzeme, kot, çizgi kalınlıkları, pafta düzeni ve teknik notların da kullanıcı tarafından denetlenmesi gerekir. Bu doğrultuda ideCAD, çizim üretimini tamamen otomatikleştiren bir araçtan ziyade; tasarım verilerinin ortak bir model üzerinden düzenlenmesini, ilişkilendirilmesini ve denetlenmesini sağlayan bütünleşik bir proje ortamıdır.

Çalışmanın tek bir iki katlı villa projesiyle sınırlı olması, elde edilen sonuçların farklı proje türleri açısından genellenmesini sınırlandırmaktadır. Gelecek çalışmalarda mimari modelin statik ve tesisat modelleriyle koordinasyonu, çakışma denetimi, IFC veri aktarımı, metraj ve maliyet analizleri gibi BIM kullanım alanlarının incelenmesi, konunun daha kapsamlı değerlendirilmesine katkı sağlayabilir.

KAYNAKÇA

- Anil, E. B., Akinci, B., & Huber, D. (2013). Representation and evaluation of the quality of as-is building information models created using registered point clouds. *Advanced Engineering Informatics*, 27(2), 236–249. doi:10.1016/j.aei.2013.01.004
- Azhar, S. (2011). Building information modeling (BIM): Trends, benefits, risks, and challenges for the AEC industry. *Leadership and Management in Engineering*, 11(3), 241–252. doi:10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127
- Barlish, K., & Sullivan, K. (2012). How to measure the benefits of BIM—A case study approach. *Automation in Construction*, 24, 149–159. doi:10.1016/j.autcon.2012.02.008
- Becerik-Gerber, B., & Rice, S. (2010). The perceived value of building information modeling in the U.S. building industry. *Journal of Information Technology in Construction*, 15, 185–201.
- Bryde, D., Broquetas, M., & Volm, J. M. (2013). The project benefits of building information modelling (BIM). *International Journal of Project Management*, 31(7), 971–980. doi:10.1016/j.ijproman.2012.12.001
- Chen, L., & Yeoh, J. K. W. (2020). A framework for assessing the quality of building information models. *Automation in Construction*, 113, 103128. doi:10.1016/j.autcon.2020.103128
- Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2011). *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers, and contractors* (2nd ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.

- Gu, N., & London, K. (2010). Understanding and facilitating BIM adoption in the AEC industry. *Automation in Construction*, 19(8), 988–999. doi:10.1016/j.autcon.2010.09.002
- Hardin, B., & McCool, D. (2015). *BIM and construction management: Proven tools, methods, and workflows* (2nd ed.). Indianapolis, IN: John Wiley & Sons.
- Hjelseth, E. (2015). BIM-based design control: Checking design information using model checking. In *Proceedings of the 32nd International Conference of CIB W78* (pp. 451–458).
- ideCAD. (t.y.). *Building information modeling (BIM) for architectural design*. 26 Eylül 2026 tarihinde <https://idecad.com/architecture-engineering-construction/building-design/bim-for-architectural-design/> adresinden edinilmiştir.
- ideCAD. (t.y.). *ideCAD yardım merkezi: Plan, kesit, görünüş ve üç boyutlu modelleme dokümantasyonu*. 26 Eylül 2026 tarihinde <https://www.idecad.com/help> adresinden edinilmiştir.
- ideCAD. (t.y.). *Yapı bilgi modellemesi (BIM) nedir?* ideYAPI Help Center. 26 Eylül 2026 tarihinde <https://help.idecad.com.tr/ideCAD/yapi-bilgi-modellemesi-bim-nedir> adresinden edinilmiştir.
- International Organization for Standardization. (2018). *ISO 19650-1:2018: Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM)—Information management using building information modelling—Part 1: Concepts and principles*. Geneva, Switzerland: Author.

- Jung, Y., & Joo, M. (2011). Building information modelling (BIM) framework for practical implementation. *Automation in Construction*, 20(2), 126–133. doi:10.1016/j.autcon.2010.09.010
- Krygiel, E., & Nies, B. (2008). *Green BIM: Successful sustainable design with building information modeling*. Indianapolis, IN: Wiley.
- Kymmell, W. (2008). *Building information modeling: Planning and managing construction projects with 4D CAD and simulations*. New York, NY: McGraw-Hill Construction.
- Miettinen, R., & Paavola, S. (2014). Beyond the BIM utopia: Approaches to the development and implementation of building information modeling. *Automation in Construction*, 43, 84–91. doi:10.1016/j.autcon.2014.03.009
- Sacks, R., Eastman, C., Lee, G., & Teicholz, P. (2018). *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers, contractors, and facility managers* (3rd ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Succar, B. (2009). Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders. *Automation in Construction*, 18(3), 357–375. doi:10.1016/j.autcon.2008.10.003
- Volk, R., Stengel, J., & Schultmann, F. (2014). Building information modeling (BIM) for existing buildings—Literature review and future needs. *Automation in Construction*, 38, 109–127. doi:10.1016/j.autcon.2013.10.023
- Zadeh, P. A., Staub-French, S., & Froese, T. M. (2017). A framework for assessing the quality of building

information models. In *Proceedings of the 34th International Conference of CIB W78* (pp. 123–132).

AN ANALYSIS OF LIVESTOCK STRUCTURES IN HOT CLIMATE REGIONS FROM THE PERSPECTIVE OF SUSTAINABLE ARCHITECTURE

Emine SATICI¹

Yahya MELİKOĞLU²

1. INTRODUCTION

Climate change, rising temperatures, and the increased frequency of extreme heat events are having increasingly pronounced effects on animal production systems (Laghari et al., 2024). High ambient temperatures, humidity, solar radiation, and inadequate air movement particularly in hot climate regions can disrupt the thermal balance of animals. This situation can lead to adverse consequences for animal health, welfare, and production performance, manifesting in various ways such as reduced feed intake, increased water consumption, behavioral changes, yield losses, and a decline in reproductive performance (Prates, 2025). Therefore, managing climatic conditions in livestock farming is of critical importance regarding both husbandry practices and the design of animal housing facilities.

Microclimatic variables such as indoor temperature, humidity, air movement, and solar radiation stand out as environmental factors that directly affect animal health and welfare. Livestock structures protect animals from environmental

¹ Research Assistant, Bingöl University, Faculty of Veterinary Medicine, Department of Obstetrics and Gynaecology, ORCID: 0000-0002-7174-3448.

² Assistant Professor, Harran University, Faculty of Fine Arts, Department of Architecture, ORCID: 0000-0002-9815-0925.

influences by serving as an interface between the external environment and the animals. The structure's orientation, positioning, form, roof characteristics, arrangement of openings, material selection, and ventilation system play a decisive role in shaping indoor environmental conditions (Al-Tamimi et al., 2011). Therefore, simply meeting housing and functional requirements is insufficient when designing livestock structures in hot climate regions; maintaining the animals thermal comfort must also be considered a fundamental design criterion.

The sustainable architecture approach aims to ensure that structures adapt to their environmental conditions, utilize resources efficiently, and minimize environmental impacts (Issa & Kiraz, 2025). In instances where passive methods prove insufficient for indoor climate control, active systems such as mechanical ventilation, fans, misting, spraying, and evaporative cooling may be employed (Manshour & Lehmann, 2026). When evaluating sustainable livestock facilities, factors such as animal health, welfare, production performance, and resource utilization must be considered alongside energy efficiency. In this context, a collaborative approach between the disciplines of architecture and veterinary science offers a unique contribution to the development of structures that reduce environmental stress on animals in hot climates while simultaneously lowering energy and resource consumption.

This study addresses the sustainable design of livestock facilities in hot climate regions by examining the relationships between animal thermal comfort and heat stress, passive and active cooling strategies, building form and orientation, ventilation, shading, energy and water management, and animal welfare. The research aims to provide a holistic assessment for livestock facilities that are adaptable to climate change, have reduced environmental impacts, and take into account the physiological needs of the animals.

2. THE EFFECT OF TEMPERATURE FACTOR ON ANIMALS AND LIVESTOCK STRUCTURES

Environmental factors such as high ambient temperatures, solar radiation, relative humidity, and air movement play a significant role in livestock housing. These variables directly influence the animals' physiological responses and the internal conditions of the housing structures. Rising temperatures and the increased frequency of extreme heat events associated with climate change heighten the risk of heat stress in animals, potentially impairing production, reproduction, and health status. Climate, wind speed, precipitation, radiation, relative humidity, and temperature are considered key environmental variables affecting animal production systems (Al-Jashaami et al., 2025).

Rising ambient temperatures make the regulation of heat Exchange both gain and loss increasingly difficult for animals (Yu, 2024). Exceeding thermoneutral limits disrupts the balance between internally generated heat and heat dissipation to the environment, resulting in heat stress (Çıldır & Özmen, 2019). Given the significant differences in heat tolerance among animal species, shelter designs must take into account not only regional climate data but also the physiological characteristics of the species being raised.

The impact of temperature on animals is linked to multifaceted factors influencing thermal load, such as air temperature, solar radiation, humidity, and wind. Particularly in hot and humid environments, high relative humidity can limit heat loss through evaporation. Intense solar radiation in hot-arid regions can also contribute to increased heat loads on building surfaces and the animals themselves. Consequently, even when air temperatures are similar, the environmental control and building design strategies employed in hot-dry climates differ

from those used in hot-humid climates. It is reported that hot-arid regions are characterized by high solar radiation, low humidity, and significant diurnal temperature fluctuations, and that solar control, natural ventilation, and the use of thermal mass constitute the fundamental passive cooling principles under these conditions (Vignola et al., 2019).

The indoor microclimate of livestock structures varies depending on the building's orientation, form, the arrangement of openings, the thermal properties of the roof and walls, and ventilation techniques. In hot climates, appropriate building orientation and effective natural ventilation contribute to reducing heat gain and controlling indoor temperatures (Melikoğlu and Bekleyen, 2021). In the sustainable architecture approach, key principles include climate-responsive design, the reduction of energy and water consumption, the utilization of natural ventilation and lighting, the use of renewable energy, and the selection of appropriate materials (Issa & Kiraz, 2025).

Assessments indicate that the thermal environment to which animals are exposed in hot climate regions is linked to the interaction between the external climate and the building's characteristics. Therefore, factors such as temperature, humidity, radiation, and air movement in livestock facilities must be considered in conjunction with orientation, ventilation, shading, and building envelope properties. This highlights the importance of both reducing the heat load on animals and developing sustainable structures with lower energy consumption.

2.1. Heat Stress and Thermal Comfort in Animals

Thermal comfort refers to environmental conditions under which an animal can maintain its body temperature within physiological limits (Vieira Junior et al., 2019). This balance is achieved by equating metabolic heat production with heat dissipation to the environment. In hot environmental conditions,

animals exhibit physiological responses such as increased respiratory rate, sweating, and peripheral vasodilation to dissipate excess heat (Jongbo et al., 2026). When these mechanisms are inadequate, heat stress occurs; Changes such as a decrease in feed consumption, an increase in rectal temperature and respiratory rate can be observed (Ružić et al., 2023). Prolonged heat stress can have negative effects on growth, milk yield, fertility and general animal welfare (Figure 1).

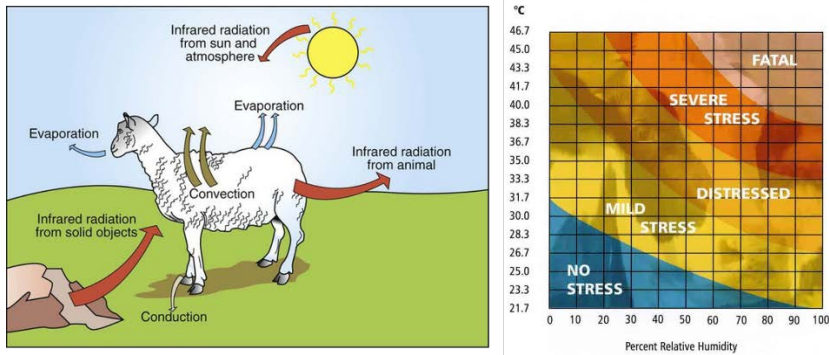


Figure 1. Thermoregulation (Veterian Key, 2026) and heat stress in animals (Martin Lishman, 2026)

The severity of heat stress can vary depending on the animal species, breed, level of productivity, and physiological state. Therefore, ensuring thermal comfort requires both lowering the ambient temperature and establishing appropriate housing conditions that facilitate heat loss from the animal. Consequently, maintaining the thermal comfort of animals in hot climates must be treated as a fundamental design criterion for livestock facilities in order to sustain health and productivity.

3. SUSTAINABLE DESIGN APPROACHES IN LIVESTOCK STRUCTURES

Sustainable design in livestock structures is based on fundamental principles such as adapting to local climatic

conditions, efficiently utilizing natural resources, and reducing energy requirements. These principles are addressed by enabling the structure to respond to environmental conditions through passive means. Consequently, the design process necessitates an integrated approach to building siting, orientation, form, the arrangement of openings, roof and wall specifications, and material selection.

Building orientation is a crucial design decision, particularly regarding the utilization of solar radiation and prevailing winds. In hot climates, orientation must be determined based on local wind and solar exposure conditions to limit solar heat gain and facilitate natural ventilation (Al-Tamimi et al., 2011). Studies have shown that the combined consideration of orientation and natural ventilation in hot climates directly impacts the thermal performance of buildings (Manani et al., 2026; Tamimi et al., 2011).

In hot climates, the roof is among the components of livestock structures most exposed to solar heat load. Key passive design approaches that can contribute to reducing heat transfer to the interior include the use of wide eaves, light-colored or highly reflective roof surfaces, adequate thermal insulation, and where necessary double-layer roofing systems (Figure 2). Within passive cooling strategies, shading, reflective surfaces, and building components with high thermal inertia play a strategic role in controlling solar heat gain (Toroxel & Silva, 2024). Furthermore, the thermal properties of the materials used in the building envelope effectively dampen heat generated during the day and reduce the rate at which it is transferred to the interior.



Figure 2. Example of roof designs in sustainable livestock facilities (Teaching Dairy Barn) (Erdy McHenry Architecture, 2022)

Waste management is one of the strategic parameters for the sustainability of livestock facilities. It is increasingly important to utilize waste as a resource treating manure not merely as waste requiring disposal, but as a valuable input for biogas and energy production. Similarly, separating and reusing sand or organic bedding materials has the potential to reduce both raw material consumption and waste volume. When effectively designed and implemented, these techniques can transform the facility from a simple animal housing unit into a production system where energy, water, and material flows are managed in an integrated manner (Figure 2).

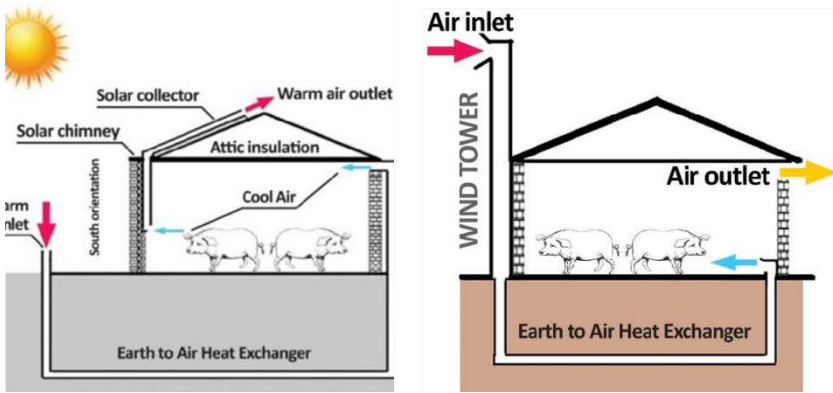


Figure 3. Passive design strategies in livestock structures (Martzopoulou et al., 2020)

Another development in the contemporary approach to sustainable livestock farming is the holistic integration of shelter climate control and energy production. Recent studies in this field highlight the importance of an integrated model for dairy cattle housing design, wherein methane extracted from the environment via the ventilation system is utilized for energy generation. It is projected that the proposed passive strategy can both regulate indoor temperature and humidity and reduce methane emissions (Eldeib et al., 2026). At the design and simulation stages, these and similar approaches demonstrate that livestock facilities could evolve into energy-generating structures through the use of sustainable techniques.

Based on the assessments conducted, design strategies such as natural ventilation, shading, limiting solar heat gain through the building envelope, reusing water and waste materials, converting manure into an energy source, and integrating renewable energy systems where necessary are gaining importance for sustainable livestock structures. Thus, while serving as a shelter that supports animal welfare, the structure also holds the potential to be transformed into an integrated production

infrastructure that manages resource consumption and environmental impacts.

4. ACTIVE SYSTEMS AND RESOURCE MANAGEMENT

In hot periods and conditions where passive design proves insufficient, active systems such as mechanical ventilation, fans, sprinkler systems, and evaporative cooling are utilized in livestock facilities (Figure 4). Particularly in enclosed or semi-open dairy cattle housing, combining shading with mechanical ventilation and water-based cooling practices contributes to reducing the animals' thermal load by enhancing convective and evaporative heat loss. The effectiveness of these systems depends on lowering the ambient temperature and ensuring adequate air velocity and air exchange at the animal level.

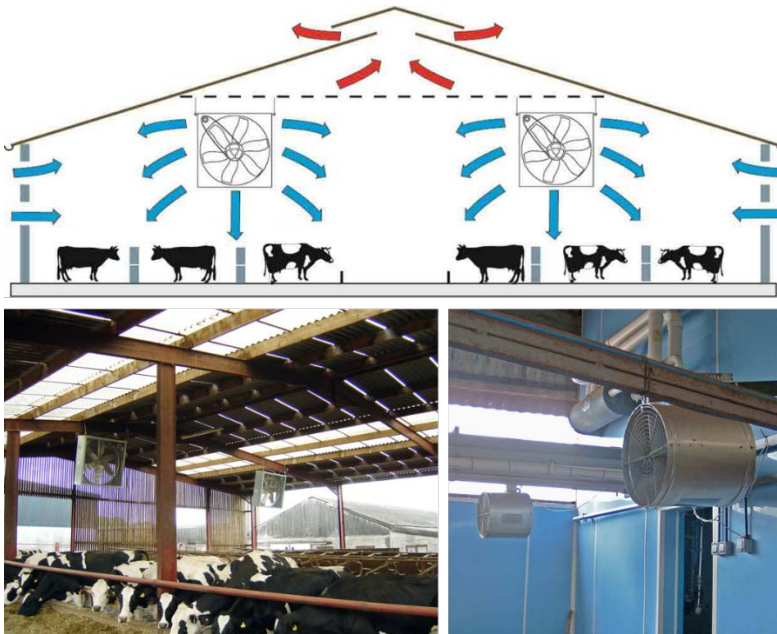


Figure 4. Passive design strategies in livestock structures (Martin Lishman, 2026)

Active climate control systems must be designed by taking into account variables such as air temperature, relative humidity, air movement, and solar radiation. In the dairy cattle housing model developed for hot-arid climates, the aim was for the HVAC system to generate an air velocity of approximately 1-2 m/s at animal level while simultaneously removing heat, humidity, and harmful gases. Practical applications have demonstrated that the model can maintain a temperature of approximately 20°C and an air velocity of 1-2 m/s in the animal zone (Eldeib et al., 2026).

Another factor to consider when designing active cooling systems for hot climate regions is that these systems can lead to significant energy and water consumption. Therefore, in addition to cooling efficiency, the system's operating costs and resource consumption must be taken into account regarding resource management. Access to a continuous supply of clean, cool drinking water is a fundamental requirement for animal thermoregulation (Silva, 2022). However, the water used in sprinkler and evaporative cooling applications must also be managed in a controlled manner.



Figure 5. Active design strategies in livestock structures (Inno+, 2026)

Evaluating active systems in conjunction with the building envelope is also gaining importance for reducing energy consumption. Eldeib et al. (2026) reported that the insulation used in walls and roofs reduced the monthly cooling load by at least

15%. Furthermore, by proposing an integrated system that utilizes collected methane and manure for energy production, the aim was to combine climate control, emission reduction, and energy generation within a single design approach (Eldeib et al., 2026).

Analyses indicate that the sustainable use of active cooling systems requires balancing water and energy consumption with the maintenance of animal comfort. Operating systems such as fans, sprinklers, evaporative cooling, and HVAC units in a controlled manner tailored to climatic conditions is of particular importance. Furthermore, supporting these systems with insulation, sensors, and automation, and integrating them with energy generation from farm waste whenever possible, offers significant potential for sustainable resource management.

5. SUSTAIBALE ARCHITECTURE, ANIMAL WELFARE AND PRODUCTION PERFORMANCE

One of the key indicators of sustainability in livestock facilities is the extent to which the structure supports the animals' natural behaviors and contributes to their long-term health and production performance. Therefore, the design of a sustainable shelter requires a holistic evaluation of factors such as the quality of resting areas, space allocation per animal, flooring characteristics, access to feed and water, circulation areas, and herd density. Research indicates that design decisions for dairy cattle housing are increasingly being shaped by considerations of animal comfort, health, milk quality, reproductive success, and operational efficiency (Popescu et al., 2014).

Resting behavior in animals is one of the most prominent indicators of the relationship between housing design and animal welfare. Cattle spend a significant portion of the day lying down, and unsuitable bedding or stall design can restrict this behavior

(Şahin & Uğurlu, 2016). Stall dimensions, the softness of the lying surface, and the animal's ability to comfortably perform lying and rising movements directly influence resting duration. Indeed, studies have shown that wider stalls can increase the time cows spend lying down, whereas narrow spaces increase inappropriate standing behavior within the stall and cause discomfort to the animals (Tucker et al., 2009).

Animal density and accessibility within the housing facility are among the factors influencing production performance. Excessive competition at feeders, waterers, and resting areas can restrict access to resources, particularly for animals lower in the herd hierarchy. This situation can disrupt resting and feeding behaviors and cause animals to remain standing for longer periods (Durand et al., 2023). Therefore, facility design must consider not only the total area but also the animals' simultaneous and unobstructed access to resources. Lying behavior and stall usage are reported to be important welfare indicators for assessing housing quality.

In sustainable livestock housing, the goal is not to force the animal to adapt to the structure in order to increase production; rather, it is to align the structure with the animal's biological and behavioral needs. Features such as suitable resting areas, safe flooring, adequate individual space, and accessible resources stand out as effective solutions that can help reduce stress and injuries, prevent health issues, and maintain production capacity over the long term. From this perspective, animal welfare and production performance should be viewed as interconnected outcomes of the same decisions within a sustainable design approach.

6. CONCLUSION

This study highlights the need to address factors such as energy efficiency, building design, animals thermal requirements, welfare, production performance, and resource management collectively to ensure the sustainability of livestock facilities in hot climate regions. Studies examined in this context demonstrate that particularly in hot climates decisions regarding building orientation, natural ventilation, roof and building envelope characteristics, and shading directly influence indoor environmental conditions. Consequently, these design decisions play a fundamental role in determining the environmental heat load to which the animals are exposed.

When the passive and active approaches evaluated in this study are considered together, it becomes evident that the optimal solution does not rely on a single cooling method. Prioritizing passive design measures while supplementing them with active systems such as mechanical ventilation, fans, sprinklers, evaporative cooling, and HVAC when necessary offers a more balanced approach. However, the effectiveness of active systems depends on optimizing efficiency and limiting water and energy consumption. Measures such as reducing cooling loads through building envelope improvements, utilizing waste and methane for energy production, and employing automation systems highlight, from a holistic perspective, the potential to simultaneously enhance environmental performance and operational efficiency in livestock facilities.

One of the study's significant findings is that structural sustainability cannot be addressed independently of animal welfare. Adequate resting areas, appropriate stall dimensions, safe and comfortable surfaces, suitable stocking density, and unobstructed access to feed and water emerge as direct design criteria for reducing behavioral stress and maintaining production

capacity. Therefore, a sustainable livestock facility should be viewed as an integrated system that accommodates the animals' physiological and behavioral needs, manages resource use, and supports production continuity.

In conclusion, attention is drawn to the importance of integrating climate-responsive architectural design with veterinary knowledge in the development of future livestock facilities for hot climate regions. This interdisciplinary approach will contribute to the development of livestock structures that are capable of adapting to climate change while establishing a stronger balance between animal welfare, production performance, and resource efficiency.

REFERENCES

- Al-Jashaami, S. H., Almudhafar, S. M., & Almayahi, B. A. (2025). Climatic characteristics affecting the animal production environment in Al-Manathira district. *Multidisciplinary Science Journal*, 7, e2025560. <https://doi.org/10.31893/multiscience.2025560>
- Al-Tamimi, N. A. M., Syed Fadzil, S. F., & Wan Harun, W. M. (2011). The effects of orientation, ventilation, and varied WWR on the thermal performance of residential rooms in the tropics. *Journal of Sustainable Development*, 4(2), 142–149. <https://doi.org/10.5539/jsd.v4n2p142>
- Çıldır, Ö. Ş., & Özmen, Ö. (2019). Sıcak stresi ve termotolerans: Sığırlarda moleküler çalışmalar. *Lalahan Hayvancılık Araştırma Enstitüsü Dergisi*, 59(Ek Sayı), 117–129.
- Durand, M., Dourmad, J.-Y., Julienne, A., Couasnon, M., & Gaillard, C. (2023). Effects of a competitive feeding situation on the behaviour and energy requirements of gestating sows. *Applied Animal Behaviour Science*, 261, 105884. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2023.105884>
- Eldeib, A., Mahmood, F., Luqman, M., & Al-Ansari, T. (2026). Design and analysis of an innovative livestock barn for sustainable dairy farming. *Cleaner Engineering and Technology*, 34, 101302. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2026.101302>
- Erdy McHenry Architecture. (2022). Teaching dairy barn. Retrieved October 4, 2026, from <https://em-arc.com/TEACHING-DAIRY-BARN>
- Inno+. (n.d.). Heat recovery in livestock buildings: Smart energy savings. Retrieved October 4, 2026, from <https://innoplussystems.com/en/heat-recovery-in-livestock-buildings-smart-energy-savings/>

- Issa, N., & Kiraz, A. (2025). Green architecture approach with eco-friendly and sustainable interior design. *Sanat & Tasarım Dergisi*, 15(2), 1526–1544. <https://doi.org/10.20488/sanattasarim.1828187>
- Jongbo, A. O., de Borba, L. P., Pereira, R. M. M., Bello, Q. O., Gregoratto, L. L., de Souza, D. P., Adeyeye, O. A., & Vieira, F. M. C. (2026). Heat stress in livestock under tropical climates: Impacts and mitigation strategies. *Tropical Animal Health and Production*, 58, 65. <https://doi.org/10.1007/s11250-026-04848-7>
- Laghari, S. A., Kalwar, Q., Rahimoon, M. M., Saboor, A., Hussain, F., Muhammad, T., Uddin, I., & Razzaque, A. (2024). Climate change and livestock: Impacts on productivity, reproduction, and adaptive strategies. *Sindh University Research Journal (Science Series)*, 54(2), 29–41. <https://doi.org/10.26692/surj-ss.v56i02.7189>
- Manani, R., Nursaniah, C., & Caisarina, I. (2026). The influence of building orientation on thermal performance in Palapa Village Housing, Lhokseumawe. *International Journal of Architecture, Arts and Applications*, 12(1), 1–16. <https://doi.org/10.11648/j.ijaaa.20261201.11>
- Manshour, S., & Lehmann, S. (2026). A systematic review of passive cooling strategies integrating traditional wisdom and modern innovations for sustainable development in arid urban environments. *Discover Cities*, 3, 42. <https://doi.org/10.1007/s44327-026-00204-4>
- Melikoğlu, Y., & Bekleyen, A. (2021). Şanlıurfa'nın geleneksel rüzgâr yakalayıcıları: Kaybolan bir geleneğin günümüze kadar gelen örnekleri. *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 8(1), 268–286. <https://doi.org/10.31202/ecjse.835131>

- Prates, J. A. M. (2025). Heat stress effects on animal health and performance in monogastric livestock: Physiological responses, molecular mechanisms, and management interventions. *Veterinary Sciences*, 12, 429. <https://doi.org/10.3390/vetsci12050429>
- Ružić, Z., Kanački, Z., Stojanović, S., Kovačević, Z., Knežević, S., Todorović, S., & Paraš, S. (2023). Rectal temperature and respiration rate as indicators of heat stress in broiler chickens subjected to early-age thermal conditioning and vitamin C supplementation. *Turkish Journal of Veterinary and Animal Sciences*, 47(2), 160–166. <https://doi.org/10.55730/1300-0128.4281>
- Silva, L. (2022, August 9). Maintaining clean drinking water for livestock. Clemson University Cooperative Extension Service.
- Şahin, E., & Uğurlu, N. (2016). Dairy cattle behaviour in different housing systems. *Journal of Bahri Dagdas Animal Research*, 5(1), 25–32.
- Toroxel, J. L., & Silva, S. M. (2024). A review of passive solar heating and cooling technologies based on bioclimatic and vernacular architecture. *Energies*, 17(5), 1006. <https://doi.org/10.3390/en17051006>
- Tucker, C. B., Weary, D. M., von Keyserlingk, M. A. G., & Beauchemin, K. A. (2009). Cow comfort in tie-stalls: Increased depth of shavings or straw bedding increases lying time. *Journal of Dairy Science*, 92(6), 2684–2690. <https://doi.org/10.3168/jds.2008-1926>
- Yu, J. (2024). Effects of climate warming on animals and their regulation of temperature. *Transactions on Environment, Energy and Earth Sciences*, 2, 35–38.

- Vieira Junior, N. A., de Aguiar e Silva, M. A., Caramori, P. H., Nitsche, P. R., Corrêa, K. A. B., & Alves, D. S. (2019). Temperature, thermal comfort, and animal ingestion behavior in a silvopastoral system. *Semina: Ciências Agrárias*, 40(1), 403–416. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2019v40n1p403>
- Vignola, G., Kiracofe, R., & Dietrich, U. (2019). Passive strategies for buildings in hot and dry climates: Optimisation of informal apartment blocks in Cairo. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 329, 012009. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/329/1/012009>

KARS İLİNDEKİ RUS DÖNEMİ YAPILARI ÜZERİNE BİR DEĞERLENDİRME

Tümay GÜNEŞ¹

Selim KARTAL²

1. GİRİŞ

Kars ili, tarih öncesi dönemlerden itibaren birçok yerleşime sahne olmuş, erken dönem izleri taşıyan ve farklı uygarlıkların hâkimiyeti altında şekillenmiş çok katmanlı bir sınır kentidir (Kars İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü, 2026). Bu tarihsel birikim kenti siyasal ve kültürel etkileşimlerin kesiştiği bir coğrafya hâline getirerek farklı dönemlerde ve farklı işlevler doğrultusunda şekillenen dini, askeri, sivil, kamusal, ticari ve endüstriyel yapıların bir arada bulunduğu zengin ve çok katmanlı bir mimari mirasın oluşmasına zemin hazırlamıştır. Bu durum özellikle Merkez ve Ani çevresinde farklı dönemlere ve işlevlere ait yapı türlerinin bir arada bulunmasıyla daha belirgin bir nitelik kazanmaktadır. Nitekim Ani Arkeolojik Alanı, Hristiyanlık ve sonrasında İslam dönemlerinde yüzyıllar boyunca inşa edilen dini, sivil ve askeri yapıları bünyesinde barındıran bir Orta çağ kent dokusu karakteriyle 2016 yılında UNESCO Dünya Mirası Listesi'ne dahil edilmiştir (UNESCO, 2026). Bu tarihsel ve mimari çeşitlilik, bölgenin uluslararası ölçekte taşıdığı kültürel miras önemini daha da görünür kılmıştır.

¹ Öğr. Gör. Dr., Sinop Üniversitesi, Boyabat MYO, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, ORCID: 0000-0002-0345-4900.

² Dr. Öğretim Üyesi, Iğdır Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Tasarım Bölümü, ORCID: 0000-0003-4269-0786.

Kars'ın tarihsel gelişiminde 1877–1878 Osmanlı-Rus Savaşı sonrasında başlayan kırk yıllık Rus hâkimiyeti kentin mimari ve kentsel yapısında önemli bir dönüşüm dönemini ifade etmektedir. Bu çalışmanın amacı Kars ili ve ilçelerinde Rus hâkimiyeti döneminde inşa edilen yapıların işlevsel ve mekânsal çeşitliliğini ortaya koymak ve söz konusu yapıların konumlarını, korunmuşluk düzeylerini ve plan şemalarını karşılaştırmalı olarak değerlendirmektir. Bu doğrultuda Kars İl Kültür Envanteri'nde yer alan veriler incelenmiştir (Tarihi Kimliğiyle Kars Kenti: Kars İl Kültür Envanteri Cilt 1-2-3, 2025). İlk aşamada elde edilen veriler sistematik biçimde düzenlenmiş yapılar tipolojik sınıflandırma, yapı türü, ilçe bazındaki dağılım (Merkez ile birlikte Arpaçay, Digor, Kağızman, Sarıkamış, Selim, Susuz ve Akyaka), korunmuşluk düzeyi ve plan şeması ölçütleri doğrultusunda sınıflandırılarak bir veri seti oluşturulmuştur. Son aşamada bu doğrultuda Rus dönemi yapılarının Kars'ın mimari mirası içerisindeki yeri ele alınarak bütüncül bir değerlendirme gerçekleştirilmiştir.

2. TARİHSEL ARKA PLAN: RUS HAKİMİYETİ DÖNEMİNDE KARS

Kars ve çevresi, tarihöncesi dönemlerden başlayarak yerleşim alanı olarak kullanılmış bu süreç içerisinde Hurriler, Urartular, Persler, Sasaniler, Ermeniler, Bagratlılar, Bizans İmparatorluğu, Selçuklular, Moğollar, İlhanlılar, Karakoyunlular, Akkoyunlular, Safaviler ve sonrasında Osmanlı Devleti ev sahipliği yapmıştır. Osmanlı hakimiyetinden itibaren bir sınır şehri olmasından dolayı birçok saldırıya maruz kalmıştır. 93 Harbi olarak bilinen 1877–1878 Osmanlı-Rus Savaşı'nın ardından şehir 1918 yılına kadar yaklaşık kırk yıl sürecek olan Rus hâkimiyeti altına girmiştir (Çinko ve Eres, 2021). 1878 sonrasında Kars ve çevresindeki kentlerin kentsel gelişimini

şekillendiren temel unsur askerî gereksinimler olmuş bu merkezler Rus yönetimi döneminde öncelikle askerî işlevleri doğrultusunda birer garnizon kenti olarak gelişmiştir (Ortaylı 1978). Bu bağlamda Çarlık Rusyası döneminde askerî eyalet (oblast) statüsünde yönetilen Kars'ta, başta ulaşım altyapısı, tarım ve hayvancılık alanlarında gerçekleştirilen çalışmalar kentin zirai ve ticari faaliyetlerinin gelişmesine önemli katkı sağlamıştır (Gündoğdu, 2010). Rus hâkimiyeti döneminde meydana gelen toplumsal ve ekonomik dönüşümlerin yanı sıra, Kars'ın mimari dokusunda da önemli değişimler meydana gelmiştir (Çinko ve Eres, 2021). Bu dönemde Ruslar, topografya, iklim, kültürel yapı ve nüfus gibi yerel veriler doğrultusunda şekillenen geleneksel mimari anlayıştan farklı olarak kendi mimari birikimlerini Kars'ın kentsel dokusuna yansıtan bir yaklaşım benimsemişlerdir (Öztürk, 2024). Kars, geleneksel Osmanlı mahalle dokusunun dışında şekillenen yeni kentsel kimliğiyle Rusya'nın Baltık Denizi kıyısındaki kentlerinin mimari ve mekânsal karakterine yaklaştırılmaya çalışılmıştır. Bu süreçte kiliseler, kamu yapıları, konutlar ve ticari yapılarla farklı bir mimari anlayışın etkisi altına girmiştir (Arslan, 2020).

XIX. yüzyılın ortalarından itibaren etkisini artıran eklektik üslup, farklı dönem ve coğrafyalara ait Batılı, Çin, Hint, Türk ve İslam sanatlarına özgü mimari ve süsleme unsurlarının yeniden yorumlanarak bir arada kullanılmasına dayanan karma bir anlayış olup, İskandinav ülkelerinde gelişen Baltık üslubuna ait özelliklerin de bu senteze dâhil edilmesiyle farklı ve özgün mimari yansımalar ortaya çıkmıştır (Gündoğdu, 2010). Kars'ta görülen mimari üslup, Orta Rusya'da gelişen ve özellikle St. Petersburg, Kiev ve Moskova kentlerinde örneklerine rastlanan mimari anlayışla benzer nitelikler taşımaktadır (Görgülü vd, 2021). Bu benzerlik yalnızca yapıların mimari karakterinde değil kentsel planlama anlayışında da kendini göstermekte Çarlık Rusyası'nın önemli merkezlerinden St. Petersburg'da olduğu gibi

Kars'ta da birbirini dik kesen sokak ve caddelerden oluşan düzenli ızgara planlı bir kent dokusu oluşturulmuştur (Fesci, 2022; Gürallar, 2020). Bu planlama anlayışı yapıların biçimlenişi ve parsel içerisindeki konumlandırılmasına da yansımış Rus döneminde inşa edilen yapılarda ağırlıklı olarak dikdörtgen plan şemaları tercih edilerek yapılar cadde ve sokaklara paralel biçimde yerleştirilmiştir. Genellikle tek, iki veya üç katlı olarak tasarlanan ve çoğunlukla bitişik nizamda konumlandırılan yapıların yolların kesişim noktalarında ise her iki sokağa da cephe verecek şekilde düzenlendiği görülmektedir (Türkan ve Durak, 2016). Bu süreçte Anadolu'daki mevcut kentsel yapılanmadan farklı yeni bir imar planı ve şehircilik anlayışı ortaya konulmuştur (Gündoğdu, 2010).

3. KARS İLİNDEKİ RUS DÖNEMİ YAPILARI

Kars ilinde Rus hâkimiyeti döneminde inşa edilen yapıların işlevlerine göre tipolojik sınıflandırması Tablo 1'de sunulmaktadır. Bu sınıflandırma şehir içerisindeki dönemsel mimari yapı çeşitliliğini ortaya koymak amacıyla hazırlanmıştır.

Tablo 1. Kars İli Rus Dönemi Yapılarının Tipolojik Sınıflandırılması

Kars İli Rus Dönemi Yapılarının Tipolojik Sınıflandırılması	Dini Mimari	Kiliseler
		Şapeller
	Kamu Mimarisi	İdari Yapılar
		Eğitim Yapıları
		Kültürel ve Sosyal Yapılar
		Sağlık Yapıları
		Güvenlik Yapıları
	Askeri Mimari	Kışla Yapıları
		Karargâh Yapıları
		Askeri Destek Yapıları
	Ulaşım ve Altyapı Yapıları	Demiryolu Yapıları
		Demiryolu Destek Yapıları
	Sivil Mimari	Köprüler
		Konut Yapıları
		Köşkler
		Konaklama Yapıları
	Ticari ve Endüstriyel Mimari	Endüstri Yapıları
		Ticaret Yapıları
	Kentsel Donatı ve Küçük Ölçekli Yapılar	Çesmeler
		Teknik Yapılar

Kars ilinde Rus hâkimiyeti döneminde inşa edilen dini yapılar sınıflandırılarak yapıların bulundukları ilçeler, korunmuşluk durumları ve plan şemaları Tablo 2’de sunulmaktadır. Bu kapsamda dini yapılar kiliseler ve şapeller olmak üzere iki ana grupta incelenmiştir. Kars kent merkezi ile birlikte Akyaka, Arpaçay, Sarıkamış ve Selim ilçelerinde yer alan bu yapılar, Rus döneminde bölgede kurulan dini ve sosyal yapının mekânsal izlerini yansıtmaktadır. Korunmuşluk durumları değerlendirildiğinde bazı yapıların günümüze iyi durumda veya restore edilmiş olarak ulaştığı, bazılarının ise kısmen korunmuş, bakımsız ya da yıkılmış olduğu anlaşılmaktadır. Özellikle köy yerleşimlerindeki kiliselerin daha düşük korunmuşluk düzeyine sahip olması dikkat çekmektedir. Plan şemaları açısından değerlendirildiğinde, dini yapıların önemli bir bölümünün dikdörtgen planlı ve bazilikal karakterli olduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra tek nefli, üç nefli ve T planlı örnekler de bulunmaktadır. Bu çeşitlilik, Rus döneminde Kars’ta inşa edilen dini yapıların belirli bir tipolojiye bağlı kalmakla birlikte farklı ölçek ve işlevlere göre çeşitlendiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca bazı kilise yapıları zaman içinde camiye dönüştürülmüştür.

Tablo 2. Kars İli Rus Dönemi dini mimarisi

Sınıflandırma	Yapı Adı	Konumu	Korunmuşluk Düzeyi	Plan Şeması
Kilise	Alexander Nevski Rus Ortodoks Kilisesi (Fethiye Camii)	Merkez	İyi durumda	Bazilikal planlı
	Kışla Kilisesi (Kışla Camii)	Merkez	İyi durumda	Bazilikal planlı
	Eski Rus Kilisesi	Merkez	Kötü, bakımsız	Dikdörtgen planlı
	Mezra Köyü Rus Kilisesi	Merkez	Kısmen korunmuş	Bilinmiyor
	Başkaya Köyü Kilisesi	Merkez	Kısmen korunmuş	Bazilikal planlı
	Duraklı Köyü Kilisesi (Duraklı Köyü Camii)	Akyaka	Kısmen korunmuş	Dikdörtgen planlı

	Kuyucuk Köyü Kilisesi (Kuyucuk Köyü Camii)	Arpaçay	İyi durumda	T planlı
	Akçalar Köyü Kilisesi (Akçalar Köyü Camii)	Arpaçay	Kısmen korunmuş	Tek nefli, bazilikal planlı
	Kilise (Kağızman Merkez Camii-Yeni Camii)	Kağızman	İyi durumda	Dikdörtgen planlı, tek nefli
	Gecikmez Köyü Kilisesi (Gecikmez Köyü Camii)	Sarıkamış	Kısmen korunmuş	Dikdörtgen planlı
	Aşağı Sallıpınar Köyü Kilisesi	Sarıkamış	Kötü, bakımsız	Dikdörtgen planlı
	Karakurt Köyü Kilisesi	Sarıkamış	İyi durumda	Dikdörtgen planlı, üç nefli
	Yanık Kilise (Kazım Karabekir Paşa Camii)	Sarıkamış	İyi durumda	Dikdörtgen planlı, tek nefli
	Yenice Köyü Kilisesi (Yenice Köyü Camii)	Selim	Kısmen korunmuş	Dikdörtgen planlı, üç nefli
	Bölükbaşı Köyü Kilisesi (Bölükbaşı Köyü Camii)	Selim	Yıkılmış	Bilinmiyor
	Büyük Oluklu Köyü Kilisesi (Büyük Oluklu Köyü Camii)	Selim	Kısmen korunmuş	Dikdörtgen planlı
	Çıplaklı Köyü Kilisesi (Çıplaklı Köyü Camii)	Selim	Kısmen korunmuş	Dikdörtgen planlı, üç nefli
Şapel	Şapel	Merkez	Çok iyi korunmuş, restore edilmiş	Dikdörtgen planlı
	Rum Şapeli	Merkez	Yıkılmış	Dikdörtgen planlı

Tablo 3'te yer alan kamu yapıları idari, eğitim, kültür-sosyal, sağlık ve güvenlik yapıları olmak üzere farklı alt başlıklar altında sınıflandırılmıştır. Bu durum Rus yönetiminin kentte çok yönlü bir kurumsal yapı oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle idari yapıların merkezde yoğunlaşması, merkeziyetçi yönetim anlayışının mekânsal bir yansıması olarak değerlendirilebilir. Eğitim yapıları, kültürel ve sosyal yapıları ve sağlık yapılarının varlığı, Kars'ın yalnızca askeri ya da idari bir

sınır kenti değil, aynı zamanda sosyal yaşamın organize edildiği bir kentsel merkez olarak planlandığını göstermektedir. Korunmuşluk düzeyleri incelendiğinde ise yapıların önemli bir kısmının günümüze iyi durumda ya da restore edilmiş olarak ulaştığı, ancak bazı yapıların kısmen korunmuş veya bakımsız durumda olduğu görülmektedir. Bu durum, Rus dönemi kamu yapılarının bir kısmının aktif kullanımla yaşatıldığını bir kısmının ise koruma açısından risk altında olduğunu göstermektedir. Plan şemaları incelendiğinde ise ağırlıklı olarak dikdörtgen plan tipinin tercih edildiği, bunun yanında L, U ve nadiren üçgen planlı yapıların bulunduğu görülmektedir.

Tablo 3. Kars İli Rus Dönemi kamu mimarisi

Sınıflandırma	Yapı Adı	Konumu	Korunmuşluk Düzeyi	Plan Şeması
İdari Yapılar	Azerbaycan Başkonsolosluk Binası	Merkez	İyi durumda	L planlı
	Belediye Binası (Kız Lisesi-Rus Karargâh Binası)	Merkez	Çok iyi korunmuş, restore edilmiş	Dikdörtgen planlı
	Defterdarlık Binası	Merkez	Kısmen korunmuş	U planlı
	Defterdarlık Eğitim ve Dinlenme Tesisi Binası (Adliye Binası)	Merkez	Kısmen korunmuş	Dikdörtgen planlı
	Gençlik ve Spor İl Müdürlüğü Binası	Merkez	Kısmen korunmuş	Dikdörtgen planlı
	İl Özel İdare Binası	Merkez	İyi durumda	Dikdörtgen planlı
	Polis Evi Binası	Merkez	Çok iyi korunmuş, restore edilmiş	Dikdörtgen planlı
	Rus Konsolosluk Binası	Merkez	İyi durumda	Dikdörtgen planlı
	Rus Karargâh Binası (Süt Tozu Fabrikası)	Merkez	Kötü, bakımsız	T planlı
	Sanayi ve Ticaret Odası Binası	Merkez	Çok iyi korunmuş, restore edilmiş	Dikdörtgen planlı
	Serhat Kalkınma Ajansı Binası (Eski Ordu Evi Binası)	Merkez	Çok iyi korunmuş, restore edilmiş	Dikdörtgen planlı
	Sosyal Dayanışma ve Yardımlaşma Vakfı Binası	Merkez	Çok iyi korunmuş, restore edilmiş	Üçgen planlı

	(Kurşunlu İlköğretim Okulu)			
	Telgraf ve Telefon Merkezi Binası	Merkez	Kötü, bakımsız	Dikdörtgen planlı
	Vali Konağı	Merkez	İyi durumda	U planlı
Eğitim Yapıları	Fevzi Paşa İlköğretim Okulu Binası	Merkez	İyi durumda	Dikdörtgen planlı
	İlim Yayma Cemiyeti Binası (Eski Öğretmen Evi Binası)	Merkez	İyi durumda	Dikdörtgen planlı
	İsmet Paşa İlköğretim Okulu Binası	Merkez	İyi durumda	U planlı
	KAÜ Devlet Konservatuar Binası I	Merkez	İyi durumda	Dikdörtgen planlı
	KAÜ Devlet Konservatuar Binası II	Merkez	İyi durumda	Dikdörtgen planlı
	KAÜ Devlet Konservatuar Binası III	Merkez	İyi durumda	Dikdörtgen planlı
	KAÜ Devlet Konservatuar Binası IV	Merkez	İyi durumda	Dikdörtgen planlı
	Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi Binası	Merkez	Kısmen korunmuş	L planlı
	30 Ekim Anaokulu Binası	Merkez	İyi durumda	Dikdörtgen planlı
	Şahnalar Köyü Okul Binası (Şehit Mirza Ali Güney İlkokulu)	Akyaka	İyi durumda	Dikdörtgen planlı
	Karaurgan Köyü Okul Binası	Sarıkamış	İyi durumda	Dikdörtgen planlı
	Kurbançayırı Köyü Okul Binası	Sarıkamış	Kötü, bakımsız	Dikdörtgen planlı
Kültürel ve Sosyal Yapılar	Atatürk Çocuk Kütüphanesi	Merkez	İyi durumda	Dikdörtgen planlı
	Opera Binası (Hekim Evi-Doğum Evi, Cheltikov Otel)	Merkez	Çok iyi korunmuş, restore edilmiş	L planlı
	Akyaka Halk Eğitim Merkezi Binası	Akyaka	İyi durumda	Dikdörtgen planlı
	Eski Türk Ocağı Binası	Sarıkamış	Kötü, bakımsız	U planlı
Sağlık Yapıları	İl Sağlık Müdürlüğü Binası	Merkez	Kısmen korunmuş	Dikdörtgen planlı
	Askeri Hastane Binası	Sarıkamış	İyi durumda	Dikdörtgen planlı
	Askeri Hastane Hizmet Binası	Sarıkamış	İyi durumda (3)	U planlı (1)

	(3 bina)			Dikdörtgen planlı (2)
	Susuz Askeri Hastane Binası	Susuz	Kötü, bakımsız	Dikdörtgen planlı
Güvenlik Yapıları	Eski Cezaevi Kompleksi	Merkez	Kötü, bakımsız	Ana bina: U planlı Ek bina: Kare planlı Komutanlık binası: Dikdörtgen planlı
	Kadın Hapishane Binası (Kültür Evi)	Merkez	Kısmen korunmuş	Dikdörtgen planlı

Kars ilinde Rus hâkimiyeti döneminde inşa edilen askeri yapıların kışla yapıları, karargâh yapıları ve askeri destek yapıları olmak üzere üç ana grupta Tablo 4'teki gibi toplandığı görülmektedir. Bu sınıflandırma askeri mimarının yalnızca savunma amaçlı değil aynı zamanda barınma, yönetim ve lojistik ihtiyaçları karşılayacak şekilde kurgulandığını göstermektedir. Bu durum Kars'ın Rus İmparatorluğu açısından bir askeri üs ve sınır garnizonu olarak planlandığını ortaya koymaktadır. Karargâh yapılarının bir kısmının günümüzde farklı işlevlerle kullanılmaya devam etmesi askeri yapıların yeniden işlevlendirilerek kentsel yaşama entegre edildiğini göstermektedir. Askeri destek yapıları ise lojistik organizasyonun önemli bir parçasını oluşturmaktadır. Lojmanlar, ahırlar, depo ve müstemilat yapıları gibi birimler askeri sistemin sadece savaş değil gündelik yaşam boyutunu da kapsadığını ortaya koymaktadır. Korunmuşluk durumları değerlendirildiğinde bazı yapıların günümüze iyi durumda veya restore edilmiş olarak ulaştığı ancak önemli bir kısmının kısmen korunmuş ya da bakımsız olduğu görülmektedir. Plan şemaları incelendiğinde askeri yapılarda dikdörtgen plan tipinin baskın olduğu bununla birlikte U, L ve T planlı örneklerde bulunmaktadır.

Tablo 4. Kars İli Rus Dönemi askeri mimari

Sınıflandırma	Yapı Adı	Konumu	Korunmuşluk Düzeyi	Plan Şeması
Kışla Yapıları	Kışla Binası	Merkez	Yıkılmış	Dikdörtgen planlı
	Kazım Karabekir Paşa Kışlası Karargâh Binası (3 tane)	Merkez	İyi durumda	Dikdörtgen planlı (2) U planlı (1)
	Kazım Karabekir Paşa Kışlası Askeri Bina (5 tane)	Merkez	İyi durumda	Dikdörtgen planlı
	Hafız Hakkı Paşa Kışlası Askeri Bina (4 tane)	Merkez	Kısmen korunmuş	Dikdörtgen planlı
	Mareşal Fevzi Çakmak Paşa Kışlası Askeri Bina (15 tane)	Merkez	İyi durumda (12) Kısmen korunmuş (3)	Dikdörtgen planlı (10) L planlı (2) U planlı (3)
	Gazi Kışlası Askeri Bina (11 tane)	Merkez	İyi durumda	U planlı (2) Kare planlı (1) Dikdörtgen planlı (8)
	Gazi Kışlası Askeri Bina Kalıntıları (2 tane)	Merkez	Yıkılmış	Dikdörtgen planlı
	Kışla Binası	Sarıkamış	Kötü, bakımsız	Dikdörtgen planlı
	Yeniköy Köyü Kışla Binası	Sarıkamış	Kötü, bakımsız	U planlı
Karargâh Yapıları	Gazi Kışlası Karargâh Binası	Merkez	Çok iyi korunmuş, restore edilmiş	Dikdörtgen planlı
	Rus Karargâh Binası	Sarıkamış	Kötü, bakımsız	Dikdörtgen planlı
	Rus Karargâh Binası-I (Cılavuz Köy Enstitüsü Binası)	Susuz	Kısmen korunmuş	Dikdörtgen planlı
	Rus Karargâh Binası-II (Cılavuz Köy Enstitüsü Binası)	Susuz	Çok iyi korunmuş, restore edilmiş	Dikdörtgen planlı
	Rus Karargâh Binası-III (Cılavuz Köy Enstitüsü Binası)	Susuz	Kısmen korunmuş	Dikdörtgen planlı
	Rus Karargâhı İdari Binası	Susuz	Kötü, bakımsız	U planlı
Askeri Destek Yapıları	Rus Karargâhı Lojman Binası (TMO Lojmanı) (5 bina)	Merkez	Kötü, bakımsız	T planlı (1) Dikdörtgen planlı (4)
	Rus Karargâhı Tavla Binası (At Ahır) (Toprak Mahsulleri Ofisi Tahıl Ambarı) (5 bina)	Merkez	İyi durumda	Dikdörtgen planlı

	Hafız Hakkı Paşa Kışlası Lojman Binası (18 tane)	Merkez	İyi durumda	Dikdörtgen planlı
	Hafız Hakkı Paşa Kışlası Nizamiye Binası	Merkez	İyi durumda	Kare planlı
	Jandarma Misafirhane Binası	Merkez	Çok iyi korunmuş, restore edilmiş	Dikdörtgen planlı
	Süvari Ahır (Belediye Temizlik İşleri Müdürlüğü)	Merkez	Kısmen korunmuş	Dikdörtgen planlı
	Rus Karargâhı Müştemilat Binası	Susuz	Kötü, bakımsız	Kare planlı
	Askeri Hastane Lojman Binası (2 bina)	Sarıkamış	İyi durumda	Dikdörtgen planlı
	Askeri Hastane Lojmanları Nizamiye Binası	Sarıkamış	İyi durumda	Dikdörtgen planlı
	Eski Ordu Evi Binası (Fevzi Çakmak İlkokul Binası)	Sarıkamış	İyi durumda	Dikdörtgen planlı
	Rus Askeri Binası (Kazım Karabekir Ortaokul Binası)	Sarıkamış	İyi durumda	Dikdörtgen planlı
	Lojman Binası	Susuz	Kötü, bakımsız	L planlı

Ulaşım ve altyapı yapılarının demiryolu yapıları, demiryolu destek yapıları ve köprüler olmak üzere üç ana grupta Tablo 5’te ele alınmıştır. Bu sınıflandırma ulaşım sisteminin yalnızca hatlardan ibaret olmadığını aynı zamanda onu destekleyen bir altyapıyla birlikte ele alındığını göstermektedir. Demiryolu yapıları kent merkezi ile birlikte Akyaka, Sarıkamış ve Selim gibi farklı yerleşimlerde konumlanmıştır. Demiryolu destek yapıları ise sistemin sürekliliğini sağlayan unsurlar olarak öne çıkmaktadır. Lojmanlar, ambarlar, işçi barakaları, atölyeler ve su kuleleri gibi yapılar, demiryolu işletmesinin yalnızca ulaşım değil, aynı zamanda bakım, barınma ve teknik ihtiyaçları kapsayan bir organizasyon olduğunu göstermektedir. Demir kafes sistemli ve çelik korkuluklu köprülerin dönemin mühendislik anlayışını yansıtan teknik çözümler sunduğu görülmektedir. Korunmuşluk durumları değerlendirildiğinde, bazı yapıların günümüze iyi durumda ya da restore edilmiş olarak ulaştığı buna karşın özellikle kırsal alanlardaki bazı istasyon ve destek

yapılarının bakımsız kaldığı veya yıkıldığı anlaşılmaktadır. Plan şemaları açısından bakıldığında ise yapıların büyük çoğunluğunun dikdörtgen planlı olduğu bunun yanında kare, U ve nadiren sekizgen ya da silindirik planlı örneklerin de bulunduğu görülmektedir. Özellikle su kulelerinde görülen farklı plan tipleri yapıların teknik gereksinimlere bağlı olarak biçimlendiğini ortaya koymaktadır.

Tablo 5. Kars İli Rus Dönemi ulaşım ve altyapı yapıları

Sınıflandırma	Yapı Adı	Konumu	Korunmuşluk Düzeyi	Plan Şeması
Demiryolu Yapıları	TCDD Kars İstasyonu İşletme Binası (Gümrük Binası)	Merkez	İyi durumda	Dikdörtgen planlı
	TCDD Akyaka İstasyon Binası	Akyaka	İyi durumda	Dikdörtgen planlı
	TCDD Sarıkamış Eski İstasyon Binası	Sarıkamış	Kötü, bakımsız	Dikdörtgen planlı
	TCDD Çatak Köyü İstasyon Binası	Sarıkamış	Kötü, bakımsız	L planlı
	TCDD Yeniköy Köyü Eski İstasyon Binası	Sarıkamış	Yıkılmış	Dikdörtgen planlı
	TCDD Selim İstasyon Binası	Selim	Kısmen korunmuş	Dikdörtgen planlı
Demiryolu Destek Yapıları	TCDD Kars İstasyonu Ambar Binaları	Merkez	Kısmen korunmuş	Dikdörtgen planlı
	TCDD Kars İstasyonu İşçi Barakası	Merkez	Kötü, bakımsız	Kare planlı
	TCDD Kars İstasyonu Lojman Binası (12 tane)	Merkez	Kısmen korunmuş (1) Kötü, bakımsız (7) Çok iyi korunmuş, restore edilmiş (4)	Dikdörtgen planlı (11) Kare planlı (1)
	TCDD Kars İstasyonu Su Kulesi	Merkez	İyi durumda	Kare planlı
	TCDD Akyaka İstasyonu Lojman Binası (4 bina)	Akyaka	Kısmen korunmuş 3 Kötü, bakımsız	Kare planlı 1 U planlı 2 Dikdörtgen planlı
	TCDD Akyaka İstasyonu Su Kulesi ve Kazancı Barakası	Akyaka	Kötü, bakımsız	Kare planlı
	TCDD Selim İstasyonu Amele/Çavuş Binası	Selim	Kısmen korunmuş	Dikdörtgen planlı

Demiryolu Destek Yapıları	TCDD Selim İstasyonu Yarı Açık Hangar Binası	Selim	Kısmen korunmuş	Dikdörtgen planlı
	TCDD Selim İstasyonu Umumi Tuvalet Binası	Selim	Kötü, bakımsız	Dikdörtgen planlı
	TCDD Selim İstasyonu Su Kulesi	Selim	İyi durumda	Sekizgen planlı
	TCDD Benliahmet İstasyonu Ambar Binası	Selim	Kısmen korunmuş	Kare planlı
	TCDD Benliahmet İstasyonu Umumi Tuvalet Binası	Selim	Kötü, bakımsız	Dikdörtgen planlı
	TCDD Benliahmet İstasyonu Su Kulesi	Selim	İyi durumda	Sekizgen planlı
	TCDD Benliahmet İstasyonu Lojman Binası (2 bina)	Selim	Kötü, bakımsız	Dikdörtgen planlı
	TCDD Sarıkamış İstasyonu Ambar Binası	Sarıkamış	Kısmen korunmuş	Dikdörtgen planlı
	TCDD Sarıkamış İstasyonu Revizörlük Binaları (Cer Atölyeleri)	Sarıkamış	Kötü, bakımsız	Dikdörtgen planlı
	TCDD Sarıkamış İstasyonu Lokomotif Atölyesi Binası	Sarıkamış	Kötü, bakımsız	Dikdörtgen planlı
	TCDD Sarıkamış İstasyonu Motor Atölyesi Binası	Sarıkamış	Kötü, bakımsız	Dikdörtgen planlı
	TCDD Sarıkamış İstasyonu Su Kulesi	Sarıkamış	Kötü, bakımsız	Silindirik planlı
	TCDD Sarıkamış İstasyonu İşçi Barakası (2 bina)	Sarıkamış	Kısmen korunmuş	Kare planlı
	TCDD Sarıkamış İstasyonu Lojman Binası (5 bina)	Sarıkamış	Kısmen korunmuş (1) Kötü, bakımsız (4)	Dikdörtgen planlı 5
	TCDD Karaorgan Köyü İstasyonu Lokomotif Atölyesi Binası	Sarıkamış	Kötü, bakımsız	Dikdörtgen planlı
	TCDD Yağbasan Köyü İstasyonu Bilet Büfesi	Sarıkamış	Kötü, bakımsız	Dikdörtgen planlı
	Demir Köprü	Merkez	Çok iyi korunmuş, restore edilmiş	Demir kafes biçimli
	Dikme Köyü Demiryolu Köprüsü	Merkez	Çok iyi korunmuş, restore edilmiş	Çelik korkuluklu
	Karacaören Köyü Demiryolu Köprüsü	Merkez	Çok iyi korunmuş, restore edilmiş	Çelik korkuluklu

Köprüler	Şahnalar Köyü Demir Köprü	Akyaka	Çok iyi korunmuş, restore edilmiş	Çelik korkuluklu
	Şahnalar Köyü Demiryolu Köprüsü	Akyaka	Çok iyi korunmuş, restore edilmiş	Çelik korkuluklu
	Çallı Köprüsü (Kötek Köprüsü, Çallıbayan Köprüsü)	Kağızman	Kötü, bakımsız	Demir kafes biçimli
	Köprübaşı Köprüsü	Kağızman	Kötü, bakımsız	Demir kafes biçimli
	Başköy Köprüsü-II	Sarıkamış	İyi durumda	Tek gözlü
	İstasyon Mahallesi Demiryolu Köprüsü	Sarıkamış	Çok iyi korunmuş, restore edilmiş	Çelik korkuluklu
	Kırmızı Köprü	Selim	Yıkılmış	İki ya da üç gözlü
	Aşağı Kotanlı Köyü Demiryolu Köprüsü	Selim	Çok iyi korunmuş, restore edilmiş	Çelik korkuluklu
	Yolgeçmez Köyü Demiryolu Köprüsü	Selim	Çok iyi korunmuş, restore edilmiş	Çelik korkuluklu
	Çamçavuş Köprüsü	Susuz	İyi durumda	Demir kafes biçimli

Kars ilinde Rus hâkimiyeti dönemine ait sivil mimari örneklerinin konut yapıları, köşkler ve konaklama yapıları olmak üzere üç ana başlık altında Tablo 6'daki gibi toplandığı görülmektedir. Konut yapılarının sayıca fazla olması, Rus döneminde Kars'ta gelişkin bir yerleşim dokusunun varlığına işaret etmektedir. Özellikle kent merkezinde yoğunlaşan konutların yanı sıra Akyaka, Arpaçay ve Sarıkamış gibi ilçelerde de örneklerine rastlanması sivil yerleşimin yalnızca merkezle sınırlı kalmayıp çevre yerleşimlere de yayıldığını göstermektedir. Köşkler ve konaklama yapıları ise dönemin sosyal ve ekonomik yapısına dair ipuçları sunmaktadır. Korunmuşluk düzeyleri ele alındığında konutların bir kısmının günümüze iyi durumda ya da restore edilmiş olarak ulaştığı ancak önemli bir bölümünün kısmen korunmuş, bakımsız ya da yıkılmıştır. Plan şemaları açısından değerlendirildiğinde, sivil mimari örneklerinin büyük çoğunluğunun dikdörtgen planlı olduğu bunun yanında sınırlı sayıda L ve kare planlı yapıların da bulunduğu görülmektedir. Bu

durum konut mimarisinde belirli bir plan tipolojisinin yaygın olarak tercih edildiğini göstermektedir.

Tablo 6. Kars İli Rus Dönemi sivil mimari yapıları

Sınıflandırma	Yapı Adı	Konumu	Korunmuşluk Düzeyi	Plan Şeması
Konut Yapıları	Paşa Konağı	Merkez	Kısmen korunmuş	Dikdörtgen planlı
	Konutlar (114 Bina)	Merkez	Kısmen korunmuş (39) İyi durumda (43) Kötü, bakımsız (22) Yıkılmış (2) Çok iyi korunmuş, restore edilmiş (8)	Dikdörtgen planlı (105) L planlı (9)
	Konutlar (10 Bina)	Merkez	Kötü, bakımsız (8) İyi durumda (2)	Dikdörtgen planlı (9) L planlı (1)
	Konutlar (3 bina)	Akyaka	Kötü, bakımsız (1) Kısmen korunmuş (2)	Dikdörtgen planlı (3)
	Konut	Arpaçay	İyi durumda	Dikdörtgen planlı
	Konutlar (8 bina)	Sarıkamış	Kısmen korunmuş (3) Yıkılmış (2) Kötü, bakımsız (2) İyi durumda (1)	Dikdörtgen planlı (7) Kare planlı (1)
Köşkler	Av Köşkü (Katherina Av Köşkü)	Sarıkamış	Kötü, bakımsız	Dikdörtgen planlı
	Çar Köşkü (Katherina Av Köşkü)	Sarıkamış	Kötü, bakımsız	Dikdörtgen planlı
Konaklama Yapıları	Katerina Oteli	Merkez	Çok iyi korunmuş, restore edilmiş	Dikdörtgen planlı

Rus döneminde Kars'taki ekonomik-ticari yapının mekânsal karşılıkları Tablo 7'de yer almaktadır. Bu yapılar incelendiğinde özellikle dükkânların sayıca fazla olması dikkat çekmektedir. Ticari yapıların büyük ölçüde kent merkezinde yoğunlaştığı görülmektedir. Korunmuşluk durumları incelendiğinde endüstri yapılarının büyük ölçüde bakımsız kaldığı veya kısmen korunabildiği dükkânların ise çeşitli korunmuşluk durumlarına sahip olduğu anlaşılmaktadır. Plan şemaları incelendiğinde ise yapıların büyük çoğunluğunun dikdörtgen plan tipinde tasarlandığı görülmektedir.

Tablo 7. Kars İli Rus Dönemi ticari ve endüstriyel mimari

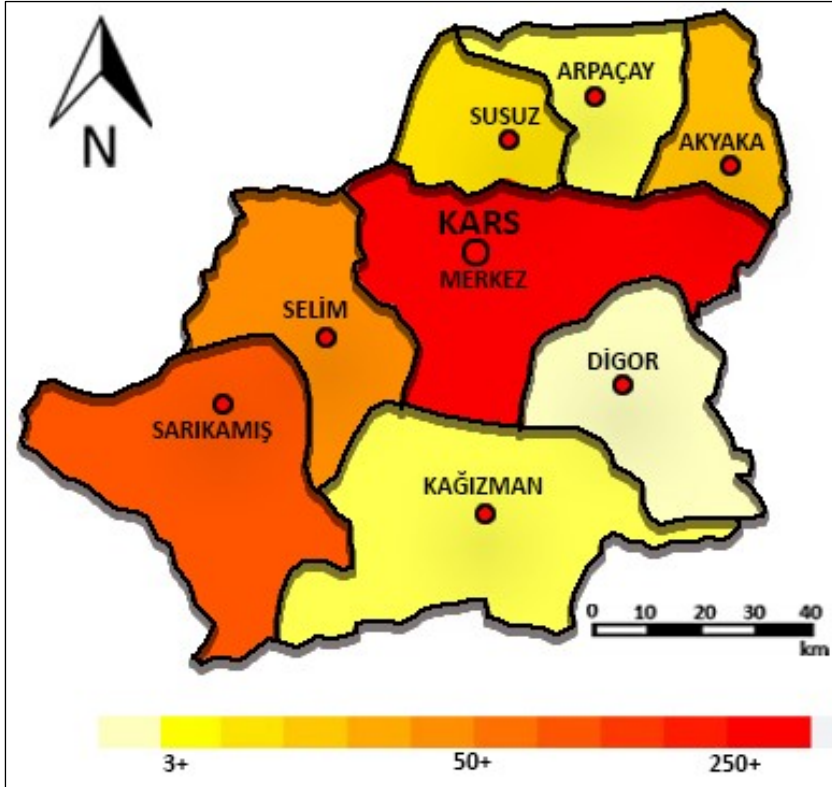
Sınıflandırma	Yapı Adı	Konumu	Korunmuşluk Düzeyi	Plan Şeması
Endüstri Yapıları	Bira Fabrikası (Askeri Hamam)	Merkez	Kötü, bakımsız	Dikdörtgen planlı
	Konserve Fabrikası Binası (Üretim Tesisi, İdari Bina ve Depo)	Merkez	Kısmen korunmuş	Dikdörtgen planlı
	Un Fabrikası Binası	Merkez	Kötü, bakımsız	Dikdörtgen planlı
	Un Fabrikası	Akyaka	Kötü, bakımsız	Dikdörtgen planlı
Ticaret Yapıları	Dükkanlar (31 Bina)	Merkez	Kısmen korunmuş (14) Çok iyi korunmuş, restore edilmiş (3) İyi durumda (9) Kötü, bakımsız (4) Yıkılmış (1)	Dikdörtgen planlı (30) Kare planlı (1)

Kars ilinde Rus hâkimiyeti dönemine ait kentsel donatı ve küçük ölçekli yapıların çeşmeler ve teknik yapılar olmak üzere iki ana başlık altında Tablo 8’deki gibi merkez ilçede toplandığı görülmektedir. Çeşme yapıları çoğunlukla dikdörtgen planlı ve kare planlı olarak tasarlanmıştır. Korunmuşluk durumları incelendiğinde bu yapıların bir kısmının kısmen korunmuş ya da iyi durumda olduğu görülmektedir. Tayyare Kulesi, ilk olarak havaalanı kulesi olarak yapılmış havaalanının kapanmasının ardından su kulesine dönüştürülmüştür. Yapı bakımsız durumdadır ve silindirik planlı olarak tasarlanmıştır.

Tablo 8. Kars İli Rus Dönemi kentsel donatı ve küçük ölçekli yapılar

Sınıflandırma	Yapı Adı	Konumu	Korunmuşluk Düzeyi	Plan Şeması
Çeşmeler	Akbaba Köyü İki Lüleli Çeşme	Merkez	Kısmen korunmuş	Dikdörtgen planlı, sivri kemerli
	Akbaba Köyü Üç Lüleli Çeşme	Merkez	Kısmen korunmuş	Dikdörtgen planlı, yuvarlak kemerli
	Küçük Boğatepe Köyü Çeşmesi	Merkez	İyi durumda	Düz duvarlı
	Mezra Köyü Çeşmesi	Merkez	İyi durumda	Kare planlı, yuvarlak kemerli
Teknik Yapılar	Tayyare Kulesi	Merkez	Kötü, bakımsız	Silindirik planlı

Kars ilinde Rus hâkimiyeti dönemine ait yapıların ilçelere göre yapı yoğunluğu analizi Şekil 1'deki haritada yer almaktadır. Harita incelendiğinde, yapıların çok büyük bir bölümünün Kars Merkez ilçede yoğunlaştığı görülmektedir. Bu yoğunlaşma kentin Rus döneminde idari, askeri ve ekonomik açıdan planlı bir merkez olarak kurgulandığını işaret etmektedir. İkinci derecede yoğunluk alanının ise Sarıkamış ilçesinde olduğu görülmektedir. Sarıkamış'taki bu yoğunlaşma özellikle askeri yapılar ile ulaşım ve altyapı unsurlarının varlığıyla ilişkilidir. Buna karşılık Selim, Akyaka, Susuz, Arpaçay ve Kağızman ilçelerinde yapı yoğunluğunun daha düşük olduğu ve dağılımın daha seyrek bir karakter gösterdiği anlaşılmaktadır.



Şekil 1. Kars İli Rus Dönemi ilçelere göre yapı yoğunluğu analizi

4. SONUÇ

Bu çalışma kapsamında Kars ilinde Rus hâkimiyeti döneminde inşa edilen yapılar dini, kamu, askeri, ulaşım ve altyapı, sivil, ticari-endüstriyel ve kentsel donatı başlıkları altında incelenerek mekânsal dağılım, korunmuşluk düzeyi ve plan şemaları açısından değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular Rus döneminde Kars'ın yalnızca bir sınır kenti olarak değil aynı zamanda askeri, idari ve ekonomik açıdan planlı bir kentsel merkez ve stratejik bir yönetim noktası olarak kurgulandığını göstermektedir.

İlçe bazlı dağılım incelendiğinde yapıların çok büyük bir kısmının Merkez ilçede yoğunlaştığı görülmektedir. Merkez ilçeyi özellikle askeri ve ulaşım yapılarının yoğunluğu ile öne çıkan Sarıkamış takip etmektedir. Diğer ilçelerde Selim, Akyaka, Susuz, Arpaçay ve Kağızman yapı sayısının daha sınırlı olması bu alanların daha çok ikincil yerleşimler olarak işlev gördüğünü düşündürmektedir. Yapı türlerine göre dağılım değerlendirildiğinde sivil mimari (özellikle konutlar) sayıca en büyük grubu oluşturmaktadır. Bu durum, Rus döneminde Kars'ta yalnızca askeri ve idari değil aynı zamanda gelişmiş bir sivil yerleşim dokusunun bulunduğunu göstermektedir. Bununla birlikte kamu yapıları ve askeri yapılar da önemli bir yer tutmaktadır. Ulaşım ve altyapı yapılarının çeşitliliği ise Kars'ın bir sınır kenti olarak stratejik önemine paralel biçimde gelişmiş bir lojistik ağ ile desteklendiğini göstermektedir. Korunmuşluk durumları değerlendirildiğinde kamu yapıları ve bazı anıtsal yapıların büyük ölçüde iyi durumda veya restore edilmiş olarak günümüze ulaştığı buna karşılık özellikle kırsal alanlardaki yapılar ile işlevini yitirmiş endüstriyel ve altyapı yapılarının bakımsızlık veya yıkım nedeniyle daha olumsuz etkilendiği görülmektedir. Bu durum kullanım sürekliliğinin korunmuşluk üzerinde belirleyici bir faktör olduğunu göstermektedir. Rus döneminde inşa edilen yapıların genel olarak Baltık mimari

anlayışı doğrultusunda tasarlandığı görülmektedir. Plan şemaları açısından yapılan değerlendirmelerde ise yapıların büyük çoğunluğunda dikdörtgen plan tipinin baskın olduğu, bunun yanında U, L, T ve daha sınırlı sayıda farklı geometrik plan tiplerinin kullanıldığı tespit edilmiştir. Bu durum Rus döneminde uygulanan mimari anlayışın büyük ölçüde işlevsellik, sadelik ve tekrar eden tipolojilere dayandığını ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak elde edilen bulgular Rus hâkimiyeti döneminde Kars'ın yalnızca askeri bir sınır kenti değil aynı zamanda planlı ve çok işlevli bir kentsel merkez olarak kurgulandığını ortaya koymaktadır. Ancak özellikle kırsal alanlarda ve işlevini yitirmiş yapılarda gözlenen korunma sorunları bu mirasın sürdürülebilirliği açısından bir risk oluşturmaktadır. Bu bağlamda Kars'taki Rus dönemi yapılarına yönelik koruma ve yeniden işlevlendirme stratejilerinin geliştirilmesi kültürel mirasın gelecek kuşaklara aktarılması açısından büyük önem taşımaktadır.

KAYNAKÇA

- Arslan, M. (2020). Kars'ın ahşap destekli köy camileri. Kafkas Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, (26), 577-614.
- Çinko, M. A., ve Eres, Z. (2021). Kars'ta Bir Rus Dönemi Yapısının Cumhuriyet Döneminde Endüstri Yapısına Dönüşümü: Süt Tozu Fabrikası ve Korunmasına Yönelik Öneriler. Tüba-Ked Türkiye Bilimler Akademisi Kültür Envanteri Dergisi, (24), 47-68.
- Fesci, C. (2022). Tarihi Konutlarda Mekânsal Ve İşlevsel Değişim: Kars Rus Konutları. Yüksek lisans tezi, Atılım Üniversitesi.
- Görgülü, L. S., Salman, A., Polat, C. H., & Özen Yavuz, A. (2021). Kentsel bir arayüz olarak Kars'taki Rus dönemi kamu yapıları cephelerinin göstergebilimsel analizi. *İdealkent*, 12(34), 1803–1824. <https://doi.org/10.31198/idealkent.967979>
- Gündoğdu, H. (2010). XIX. yüzyıl Kars yapılarına Baltık Mimari Üslubunun Yansıması. Güzel Sanatlar Enstitüsü Dergisi, (18), 79-99.
- Gürallar, N. (2020). Russian Modernization in East Anatolia: The Case Of Kars. *Muqarnas*, 37 (1), 247-264.
- Kars İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü (2026). “Tarihçe”, <https://kars.ktb.gov.tr/TR-288195/tarihce.html> (Erişim tarihi: 02.03.2026)
- Ortaylı, İ. (1978). Çarlık Rusyası Yönetiminde Kars. İstanbul Üniversitesi Tarih Enstitüsü Dergisi, S. 19, s. 343-362.
- Öztürk, S. V. (2024). Kars Coğrafyasına Yansıyan Rus Mirası: Yapı Tasarımında Uyumlu İttifak. Sanat ve Tasarım Dergisi, (33), 215- 231.

- Tarihi Kimliğiyle Kars Kenti: Kars İl Kültür Envanteri Cilt 1. (2025). <https://www.serka.gov.tr/dokumanflipbook/kars-il-kultur-envanteri-1-cilt/2732> (Erişim tarihi: 10.02.2026)
- Tarihi Kimliğiyle Kars Kenti: Kars İl Kültür Envanteri Cilt 2. (2025). https://www.serka.gov.tr/assets/upload/dosyalar/serkakultur-envanteri_cilt-2.pdf (Erişim tarihi: 10.02.2026)
- Tarihi Kimliğiyle Kars Kenti: Kars İl Kültür Envanteri Cilt 3. (2025). https://www.serka.gov.tr/assets/upload/dosyalar/serkakultur-envanteri_cilt-3.pdf (Erişim tarihi: 10.02.2026)
- Türkan, S. ve Durak, S. (2016). Kars'taki Rus dönemi (1878-1918) yapılarının çatı ve cephe özellikleri. 8. Ulusal Çatı & Cephe Sempozyumu. İstanbul.
- UNESCO (2026). "Archaeological Site of Ani", <https://whc.unesco.org/en/list/1518/> (Erişim tarihi: 02.03.2026)

FARKLI İKLİM KOŞULLARINDA DIŞ DUVAR VE ÇATI U-DEĞERLERİNİN KONUTLARDA ENERJİ TÜKETİMİNE ETKİSİ

Okan ŞİMŞEK¹

1. GİRİŞ

Konut yapılarında kullanım enerjisinin azaltılması, yapı kabuğunun ısısal özellikleri ile yapı kullanım ve iklim koşullarının birlikte değerlendirilmesini gerektirmektedir. Birleşmiş Milletler Çevre Programı'nın yapı ve inşaat sektörüne ilişkin değerlendirmesi, enerji verimliliğinin artırılmasını sektörün dönüşümündeki temel çalışma alanlarından biri olarak ele almaktadır (United Nations Environment Programme [UNEP], 2025). Bu çerçevede dış duvar ve çatı, iç ve dış ortam arasındaki ısı alışverişini etkileyen temel yapı bileşenleridir. Bu bileşenlere ilişkin kararların enerji tüketimi üzerindeki etkisini belirlemek hem yeni konutların tasarımında hem de mevcut yapıların değerlendirilmesinde önem taşımaktadır. Ancak farklı iklimlerde ve farklı yapı kullanım koşullarında aynı yapı kabuğu müdahalesinden aynı düzeyde enerji azalması beklenmesi, literatürdeki bulgularla desteklenmemektedir (Evin & Ucar, 2019; Tunçbilek, Komerska, & Arıcı, 2022).

Opak yapı kabuğunun ısısal performansının değerlendirilmesinde kullanılan U-değeri, bir yapı bileşeninin birim alanından, birim sıcaklık farkı altında gerçekleşen ısı geçişini tanımlamaktadır. U-değerinin azaltılması, aynı sıcaklık farkı altında iletimle gerçekleşen ısı geçişini sınırlandırmaktadır.

¹ Araş. Gör. Dr., Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Mimarlık Bölümü, ORCID: 0000-0003-3500-9438.

Bununla birlikte, bu özellikten hareketle yıllık yapı enerji tüketimindeki değişimin tek başına belirlenmesi mümkün değildir. Yıllık sonuçlar, dış ortam koşullarının zamansal değişimi, iç ısı kazançları, yapı bileşenlerinin ısı depolama özellikleri ve ısıtma-soğutma işletimiyle birlikte oluşmaktadır. Dolayısıyla bileşenin ısısal geçirgenliği ile binanın yıllık tüketimi arasındaki ilişkinin, tanımlı sınır koşulları altında değerlendirilmesi gerekmektedir (Idris & Mae, 2017; Tumm, Chirarattananon, Hien, Chaiwiwatworakul, & Rakkwamsuk, 2013).

Türkiye bağlamında yürütülen araştırmalar, yalıtım kararlarının iklimsel farklılıklar gözetilerek ele alınması gerektiğini göstermektedir. Kürekci (2016), Türkiye'nin 81 il merkezi için ısıtma ve soğutma derece-gün değerlerini kullanarak dış duvarların optimum yalıtım kalınlıklarını incelemiştir. Farklı yakıt ve yalıtım seçeneklerini içeren bu çalışma, iklimin yapı kabuğu kararlarının değerlendirilmesinde belirleyici bir girdi olduğunu ortaya koymaktadır.

Konutların birden fazla yapı kabuğu bileşenini birlikte ele alan çalışmalar, duvar ve çatı değişimlerinin ortak bir çerçevede değerlendirilmesine yönelik önemli bir birikim sunmaktadır. Evin ve Ucar (2019), Türkiye'de dört farklı kentin iklim koşullarında bir konut binasının dış duvar, kolon, döşeme ve çatı yalıtımını ısıtma-soğutma enerji gereksinimleri üzerinden incelemiştir. Aydın ve Biyikoglu (2021) ise beş ve on katlı apartman modellerinde ısıtma ve soğutma gereksinimlerini dikkate alarak yaşam döngüsü maliyetine dayalı yalıtım düzeylerini değerlendirmiştir. İkinci çalışmada iklim bölgelerine göre hesaplanan optimum U-değerleri duvar için 0,30–0,19 W/(m²·K), tavan için 0,24–0,16 W/(m²·K) aralığındadır.

Isısal performansın değerlendirilmesinde yalıtımın uygulandığı yapı bileşeninin özellikleri de önemlidir. Usta ve

Zengin (2021), Türkiye'nin farklı iklim koşullarında aynı üç katlı konut modeli için farklı duvar malzemelerini ve yalıtım kalınlıklarını incelemiştir. Çalışma, yapı kabuğu özelliklerinin iklimle birlikte değerlendirilmesinin gerekliliğine işaret etmektedir.

Yapı kullanım düzenleri, yapı kabuğu müdahalelerinin etkisini değiştiren bir başka etkidir. Tunçbilek ve diğerleri (2022), Ankara ikliminde konut ve ofis kullanımları için kesintili ve sürekli ısıtma-soğutma işletimini karşılaştırmış ve optimum duvar yalıtım kalınlığının yapı kullanım biçimine duyarlı olduğunu belirlemiştir. Bu bulgu, belirli bir iklim için hesaplanan yalıtım düzeyinin kullanım kabullerinden bağımsız biçimde genellenemeyeceğini göstermektedir. Parametrik araştırmalarda ortak bir kullanım çerçevesinin korunması bu nedenle önem taşımaktadır.

Sıcak koşullarda yalıtımın etkisine ilişkin deneysel bulgular, soğutma enerjisinde azalma elde edilebildiğini göstermektedir. Fang, Li, Li, Luo ve Huang (2014), Chongqing'de dış duvar yalıtımlı ve referans deney hacimlerini karşılaştırarak yaz dönemi deney süresince iklimlendirme enerjisinde %23,5'e ulaşan azalma bildirmiştir. Tummı ve diğerleri (2013), Tayland'da konut işlevlerine sahip hacimlerde duvar yalıtımının düzeyini ve konumunu deneysel ve sayısal yöntemlerle değerlendirmiştir. Araştırmada iç yüzeydeki yalıtımın incelenen koşullarda olumlu sonuç vermesi, sıcak iklimlerde yapı kabuğu performansının yalnızca yalıtım miktarına değil, yalıtımın yapı bileşeni içindeki konumuna da bağlı olabileceğini göstermektedir.

Buna karşılık, yalıtımın artırılması her yapı kullanım koşulunda daha düşük soğutma tüketimi anlamına gelmemektedir. Masoso ve Grobler (2008), Botsvana'nın sıcak-kuru koşullarında duvar yalıtımı ile soğutma ayar sıcaklığını

birlikte değiştirdikleri EnergyPlus araştırmasında, bazı durumlarda yalıtım artışının yıllık tüketimi artırabildiğini göstermiştir. Idris ve Mae (2017), farklı iklimler, kullanım profilleri ve duvar katman düzenleri üzerinden bu davranışı daha geniş bir parametrik çerçevede incelemiştir. Bu çalışmalar, ısısal direncin artırılmasının yararını koşulsuz bir yıllık tüketim azalmasıyla eşitlemenin uygun olmadığını göstermektedir.

Çatıya yönelik araştırmalar da müdahalenin etkisinin kullanılan performans göstergesine bağlı olduğunu ortaya koymaktadır. Kitsopoulou ve diğerleri (2024), Atina’da tek katlı bir konutta farklı çatı müdahalelerini ayrı senaryolar olarak değerlendirmiştir. Dıştan çatı yalıtımı, referansa göre ısıtma için elektrik tüketiminde %21,9 ısıtma ve soğutmanın birleşik elektrik tüketiminde %18,4 azalma sağlamıştır.

Axaopoulos, Sakellariou, Panayiotou ve Kalogirou (2025), Atina ve Larnaka için tipik bir konutun dış duvar ve çatı yalıtımını, insanın ısısal konforuna dayalı bir ölçüt kullanarak değerlendirmiştir. Bu yaklaşım, seçilen performans ölçütünün elde edilen tasarım kararını etkilediğini göstermektedir.

Bu çalışmada, dış duvar ve çatı U-değerlerinin konut binalarının enerji performansı üzerindeki etkileri, farklı iklim koşullarını temsil eden Adana, Antalya, İzmir, İstanbul, Ankara, Samsun ve Erzurum için gerçekleştirilen yıllık bina enerji simülasyonlarıyla incelenmiştir. Simülasyonlarda, CanmetENERGY tarafından geliştirilen, OpenStudio altyapısından yararlanan ve enerji hesaplamalarını EnergyPlus hesaplama motoruyla gerçekleştiren BTAP (Building Technology Assessment Platform) kullanılmıştır. Bu platform, bina özelliklerinin parametrik olarak değiştirilmesine ve oluşturulan senaryoların enerji performanslarının karşılaştırılmasına olanak sağlamaktadır. Çalışma kapsamında aynı konut modeli esas alınarak dört farklı dış duvar U-değeri ile

dört farklı çatı U-değerinin tüm kombinasyonları değerlendirilmiştir. Her şehir için 16 olmak üzere toplam 112 senaryo oluşturulmuştur. Duvar ve çatı U-değerleri dışındaki modelleme kabulleri her şehirdeki senaryolar arasında korunmuştur. Çalışmanın amacı, duvar ve çatının ısısal geçirgenliğindeki değişimlerin yıllık toplam enerji tüketimi ile ısıtma ve soğutma amaçlı enerji tüketimleri üzerindeki etkilerini karşılaştırmak ve bu etkilerin iklim koşullarına bağlı olarak nasıl farklılaştığını ortaya koymaktır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, dış duvar ve çatı U-değerlerinin konut binalarının enerji tüketimi üzerindeki etkileri, BTAP (Building Technology Assessment Platform) altyapısıyla oluşturulan ve çalışma kapsamında düzenlenen modellerin EnergyPlus 24.2 hesaplama motoruyla yıllık olarak simüle edilmesiyle incelenmiştir. Referans bina olarak OpenStudio altyapısından yararlanan platformdaki MidriseApartment modeli seçilmiş ve model, doğalgazlı radyatörlerle ısıtılan, bireysel iklimlerle soğutulan bir apartman kullanımına uyarlanmıştır. Çatı pencereleri kaldırılmış ve merkezi hava sistemleri, bu sistemlere bağlı fanlar ve ısı geri kazanımı devre dışı bırakılmıştır.

Modelin toplam kat alanı 3.134,61 m²'dir. Bina geometrisi ve pencere özellikleri bütün senaryolarda korunmuştur. Pencerelerin U-değeri 1,90 W/(m²·K), güneş ısı kazanç katsayısı 0,60 olarak tanımlanmıştır. Aynı şehirdeki senaryolar arasında kullanıcı yoğunluğu, kullanım çizelgeleri, sıcaklık ayarları, havalandırma ve sıcak su kabulleri değiştirilmemiştir. Parametrik değişkenler dış duvar ve çatı U-değerleriyle sınırlandırılmıştır.

Hedef U-değerleri, ilgili yalıtım katmanlarının ısısal iletkenlikleri değiştirilerek oluşturulmuş ve katman kalınlıkları, yoğunlukları ve özgül ısıları korunmuştur. Duvar yapısında

ayarlanan iki yalıtım katmanının iletkenlikleri aynı oranda değiştirilmiş, çatı yapısında ise tek yalıtım katmanının iletkenliği düzenlenmiştir. Böylece farklı ısısal geçirgenlik düzeyleri, geometri ve katmanların birim alan başına ısı kapasitesi korunarak karşılaştırılmıştır. Bu düzenleme, belirli ticari yalıtım ürünlerinin veya uygulama kalınlıklarının karşılaştırılmasını değil, tanımlanan U-değerlerinin parametrik olarak incelenmesini amaçlamaktadır.

Dairelerde kullanıcı yoğunluğu 0,022 kişi/m² olarak kabul edilmiştir. Isıtma ayar sıcaklığı 07.00–24.00 arasında 21 °C, 00.00–07.00 arasında 16 °C ve soğutma ayar sıcaklığı ise aynı zaman aralıklarında sırasıyla 25 °C ve 28 °C olarak tanımlanmıştır. Soğutma sistemlerine Adana, Antalya ve İzmir’de 1 Mayıs–30 Eylül; İstanbul, Ankara, Samsun ve Erzurum’da 1 Haziran–31 Ağustos tarihleri arasında çalışma izni verilmiştir.

Temel havalandırma, yıl boyunca dairelerde 0,30 hava değişimi/saat, koridorlarda 0,10 hava değişimi/saat olarak tanımlanmış ve mevcut hava sızıntısı modeli korunmuştur. Soğutma çalışma izni dışındaki dönemlerde pencere açılması, en fazla pencere alanının %10’u kullanılacak şekilde kademeli olarak kontrol edilmiştir. Kontrolde iç hava sıcaklığının 24 °C’nin üzerinde ve dış havanın iç havadan en az 2 °C daha serin olması koşulları kullanılmıştır. Kullanım sıcak suyu gereksinimi nominal kullanıcı başına 40 L/gün ve 45 °C karışım sıcaklığı olarak kabul edilmiş ve merkezi sıcak su deposunun hedef sıcaklığı 65 °C olarak tanımlanmıştır. Bu değerler ölçülmüş kullanım verileri değil, karşılaştırmalı analiz için benimsenen modelleme kabulleridir.

Dış duvar ve çatı U-değerleri ile senaryo düzeni Tablo 1’de sunulmuştur. Her duvar U-değeri, dört çatı U-değerinin tamamıyla eşleştirilmiş ve her şehir için 16, toplamda 112

senaryo oluşturulmuştur. Seçilen U-değerleri, farklı ısısal geçirgenlik düzeylerini karşılaştırmak amacıyla tanımlanmış araştırma düzeyleridir.

Tablo 1. Parametrik Değişkenler ve Simülasyon Düzeni

Parametre / kapsam	Değerler / açıklama
Dış duvar U-değerleri [$W/(m^2 \cdot K)$]	0,70; 0,50; 0,30; 0,20
Çatı U-değerleri [$W/(m^2 \cdot K)$]	0,50; 0,35; 0,20; 0,10
İklim verisi kullanılan şehirler	Adana, Antalya, İzmir, İstanbul, Ankara, Samsun, Erzurum
Her şehirdeki senaryo sayısı	4 duvar düzeyi $\times$ 4 çatı düzeyi = 16
Toplam simülasyon sayısı	7 şehir $\times$ 16 senaryo = 112

Yıllık enerji tüketimleri, modelin toplam kat alanına bölünerek yıllık enerji kullanım yoğunluğu olarak kWh/m^2 cinsinden ifade edilmiştir. EnergyPlus'ın GJ cinsinden raporladığı değerlerin dönüşümünde $1 \text{ GJ} = 277,7778 \text{ kWh}$ bağıntısı kullanılmıştır. Toplam tüketim, elektrik ve doğalgazın ortak enerji biriminde ifade edilen son kullanım tüketimlerinin toplamını kapsamaktadır. Isıtma ve soğutma göstergeleri sistemlerin enerji tüketimlerini ifade etmekte olup binanın ısısal yükleri veya birincil enerji tüketimi olarak değerlendirilmemiştir. Referansa göre yüzdesel değişim, senaryo tüketimi ile referans tüketimi arasındaki farkın referans tüketimine bölünüp 100 ile çarpılmasıyla hesaplanmıştır. Negatif değerler tüketim azalmasını, pozitif değerler tüketim artışını göstermektedir.

Şehir düzeyindeki ortalama enerji kullanım yoğunlukları, ilgili şehirdeki 16 senaryonun aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Enerji son kullanımlarının genel dağılımı ise her bir kullanım kategorisinin 112 senaryodaki yıllık tüketimleri toplamının, aynı senaryoların yıllık toplam enerji tüketimleri toplamına bölünmesiyle belirlenmiştir. Bu dağılımın şehir ve mevsim ölçeğindeki farklılıklarını örneklemek amacıyla, Erzurum'un referans senaryosunda ocak ayına ait son kullanım tüketimleri ayrıca incelenmiştir. Aylık kullanım payları, ilgili

kategorinin ocak tüketiminin aynı ayın toplam tüketimine oranlanmasıyla hesaplanmıştır.

3. BULGULAR

Her şehir için değerlendirilen 16 senaryonun ortalama yıllık enerji kullanım yoğunlukları Tablo 2’de sunulmuştur. Ortalama toplam enerji kullanım yoğunluğu 60,82–79,82 kWh/m² arasında değişmiştir. En yüksek değer Erzurum’da, en düşük değer İstanbul’da elde edilmiştir. Erzurum’u 67,23 kWh/m² ile Ankara izlerken diğer şehirlerin ortalamaları 62,86–64,16 kWh/m² aralığında kalmıştır. Enerji tüketiminin bileşenleri incelendiğinde, Erzurum’un 25,73 kWh/m² ile en yüksek, Antalya’nın ise 2,25 kWh/m² ile en düşük ortalama ısıtma tüketimine sahip olduğu görülmektedir. Ortalama soğutma tüketimi Adana’da 17,65 kWh/m² ile en yüksek düzeye ulaşmış, Erzurum’da 5,37 kWh/m² ile en düşük düzeyde kalmıştır. Adana, Antalya ve İzmir’de soğutma tüketimi ısıtma tüketiminin üzerinde gerçekleşirken Ankara, Samsun ve Erzurum’da ısıtma tüketimi daha yüksek bulunmuştur. İstanbul’da ise iki bileşen birbirine daha yakın değerler göstermiştir.

Tablo 2. Şehirlere Göre Ortalama Yıllık Enerji Kullanım Yoğunlukları [kWh/m²]

Şehir	Toplam	Isıtma	Soğutma	Sıcak su
Adana	64,16	2,59	17,65	11,43
Antalya	62,86	2,25	16,56	11,71
İzmir	63,45	3,72	15,39	12,04
İstanbul	60,82	7,74	8,68	13,19
Ankara	67,23	13,53	7,72	14,53
Samsun	63,04	11,10	7,02	13,69
Erzurum	79,82	25,73	5,37	17,12

Not: Değerler, her şehirdeki 16 senaryonun aritmetik ortalamasıdır. Isıtma ve sıcak su sütunları ilgili son kullanım kategorilerindeki doğalgaz tüketimini, soğutma sütunu elektrik tüketimini göstermektedir. Toplam tüketim diğer enerji son kullanımlarını da kapsamaktadır. Değerler, ısıtma ve soğutma yüklerini değil, sistemlerin enerji tüketimlerini ifade etmektedir.

Duvar ve çatı U-değerlerinin referans düzeylerinden en düşük düzeylerine indirilmesi, incelenen birleşik senaryolarda bütün şehirlerin toplam enerji tüketimini azaltmıştır. Yalnızca duvar U-değerinin azaltıldığı karşılaştırmada toplam tüketimdeki azalma %3,97–12,96 arasında değişirken, yalnızca çatı U-değerinin azaltılmasıyla %4,70–10,93 arasında azalma elde edilmiştir. Çatı değişimi Adana, Antalya ve İzmir’de ve duvar değişimi ise İstanbul, Ankara, Samsun ve Erzurum’da daha yüksek toplam tüketim azalması sağlamıştır (Tablo 3).

Tablo 3. Duvar ve Çatı U-Değerlerinin Azaltılmasıyla Referansa Göre Enerji Tüketimindeki Değişimler (%)

Şehir	Yalnız duvar: toplam	Yalnız çatı: toplam	Duvar ve çatı: toplam	Duvar ve çatı: ısıtma	Duvar ve çatı: soğutma
Adana	-4,38	-4,72	-8,67	-76,56	-9,63
Antalya	-3,97	-4,70	-8,17	-81,11	-8,63
İzmir	-5,00	-5,33	-9,90	-74,48	-8,62
İstanbul	-7,03	-6,14	-12,80	-62,18	-8,09
Ankara	-9,53	-8,42	-17,49	-59,93	-5,12
Samsun	-7,55	-6,50	-13,71	-53,70	-6,67
Erzurum	-12,96	-10,93	-23,32	-56,00	+1,37
Not: Referans senaryoda duvar/çatı U-değerleri 0,70/0,50 W/(m ² ·K)’dir. Yalnız duvar senaryosunda bu değerler 0,20/0,50; yalnız çatı senaryosunda 0,70/0,10; birleşik senaryoda 0,20/0,10 W/(m ² ·K) olarak tanımlanmıştır. Negatif değerler tüketim azalmasını, pozitif değerler tüketim artışını göstermektedir.					

Duvar ve çatı U-değerlerinin birlikte azaltılmasıyla toplam tüketimde en yüksek azalma Erzurum’da %23,32, en düşük azalma Antalya’da %8,17 olarak belirlenmiştir. Erzurum’da yıllık toplam enerji kullanım yoğunluğu referans senaryodaki 91,56 kWh/m²’den birleşik senaryoda 70,21 kWh/m²’ye düşmüştür. Antalya’da ise aynı karşılaştırmada toplam tüketim 65,92 kWh/m²’den 60,53 kWh/m²’ye gerilemiştir.

Isıtma amaçlı tüketim bütün şehirlerde azalmış ve en yüksek oransal azalma Antalya’da %81,11, en düşük azalma Samsun’da %53,70 olarak gerçekleşmiştir. Bununla birlikte,

yüksek oransal azalma her zaman yüksek mutlak tüketim azalmasına karşılık gelmemiştir. Antalya’da yıllık ısıtma tüketimi referans senaryoda 4,28 kWh/m² iken birleşik senaryoda 0,81 kWh/m²’ye düşmüştür. Erzurum’da ise 37,16 kWh/m²’den 16,35 kWh/m²’ye gerilemiştir. Böylece Antalya’da ısıtma tüketimindeki oransal azalma daha yüksek olmasına rağmen, Erzurum’da birim alan başına daha büyük bir enerji azalması elde edilmiştir.

Birleşik senaryoda soğutma tüketimi altı şehirde %5,12–9,63 arasında azalırken Erzurum’da %1,37 artmıştır. Erzurum’da yıllık soğutma tüketimi referans senaryodaki yaklaşık 5,35 kWh/m²’den birleşik senaryoda 5,43 kWh/m²’ye yükselmiştir. Aynı senaryoda toplam tüketimin %23,32 azalması, ısıtma tüketimindeki düşüşün soğutmadaki küçük artıştan daha büyük olduğunu göstermektedir.

Enerji son kullanımları birlikte incelendiğinde, 112 senaryonun birleştirilmiş yıllık tüketimi içinde en büyük payın %26,45 ile iç ekipmanlara ait olduğu görülmüştür. Bunu %20,31 ile sıcak su, %16,99 ile soğutma ve %16,16 ile iç aydınlatma izlemiştir. Isıtmanın payı %14,45, fanların payı %3,20 ve pompaların payı %2,44’tür.

Aylık dağılımın farklılaşmasına örnek olarak Erzurum’un referans senaryosu incelendiğinde, ocak ayındaki toplam bina enerji tüketiminin 43.928,98 kWh olduğu belirlenmiştir. Bu tüketimin yaklaşık 30.221,67 kWh’ı ısıtmaya aittir ve ısıtmanın ocak ayı toplam tüketimindeki payı %68,80’dir. Aynı ayda sıcak suyun payı %11,53, iç ekipmanların %10,57, iç aydınlatmanın %6,45 ve pompaların %2,65 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, duvar ve çatı U-değerlerinin sırasıyla 0,70 ve 0,50 W/(m²·K) olduğu referans senaryoya aittir. Isıtmanın bu senaryodaki ocak payının, bütün şehir ve senaryoların birleştirilmiş yıllık dağılımından belirgin biçimde farklı olması, enerji kullanım

paylarının değerlendirildiği zaman aralığına ve iklime göre yorumlanması gerektiğini göstermektedir.

4. TARTIŞMA

Bulgular, dış duvar ve çatı U-değerlerindeki aynı değişimin farklı şehirlerde farklı düzeylerde enerji tüketimi azalması sağladığını göstermektedir. Birleşik senaryoda toplam tüketimin Erzurum’da %23,32, Antalya’da ise %8,17 azalması, yapı kabuğu kararlarının iklim koşullarıyla birlikte değerlendirilmesinin önemini ortaya koymaktadır. Evin ve Ucar’ın (2019) Türkiye’nin farklı iklim bölgelerinde yapı kabuğu yalıtımını ısıtma ve soğutma gereksinimleri üzerinden değerlendiren çalışması da bu yaklaşımı desteklemektedir. Bununla birlikte, enerji gereksinimi, sistem enerji tüketimi ve ekonomik performans farklı göstergelerdir. Bu nedenle çalışmaların sonuçları karşılaştırılırken hesaplama yaklaşımı, sistem özellikleri ve tüketim kapsamı dikkate alınmalıdır.

Isıtma tüketimindeki oransal azalmanın toplam tüketime yansımaları, referans ısıtma tüketiminin büyüklüğüne ve diğer son kullanımların payına bağlıdır. Antalya’da daha yüksek yüzdesel ısıtma azalmasına rağmen Erzurum’da birim alan başına daha büyük bir tüketim azalması elde edilmesi bu ayrımı göstermektedir. İç ekipmanlar ve aydınlatma gibi kullanım çizelgeleri korunan bileşenler de toplam tüketimin önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Bu nedenle yapı kabuğu değişimleri değerlendirilirken yüzdesel değişimler, mutlak tüketim farkları ve enerji son kullanım dağılımı birlikte ele alınmalıdır.

Duvar ve çatı değişimlerinin göreceli etkisi şehirler arasında farklılaşmıştır. Yalnız duvar değişimiyle toplam tüketimde %3,97–12,96, yalnız çatı değişimiyle %4,70–10,93 arasında azalma elde edilmiştir. Çatı değişimi Adana, Antalya ve İzmir’de, duvar değişimi ise İstanbul, Ankara, Samsun ve Erzurum’da daha

yüksek toplam tüketim azalması sağlamıştır. Bu sonuç, incelenen modelde tek bir yapı bileşenine bütün şehirler için aynı önceliğin verilemeyeceğini göstermektedir. Ancak duvar ve çatının yüzey alanları, başlangıç U-değerleri ve değişim aralıkları farklıdır. Duvar U-değeri 0,70'ten 0,20 W/(m²·K)'ye, çatı U-değeri ise 0,50'den 0,10 W/(m²·K)'ye düşürülmüştür. Bu nedenle karşılaştırma, eşit büyüklükteki ısı direnç değişimlerinin veya eşit maliyetli müdahalelerin karşılaştırılması olarak değerlendirilmemelidir. Yüzeylerin güneş ışınlamına maruz kalması ve sınır koşulları da farklılaşmakla birlikte, bu etkenlerin ayrı katkıları mevcut analizde nicel olarak ayrıştırılmamıştır.

Soğutma tüketimi birleşik senaryoda altı şehirde %5,12–9,63 azalırken Erzurum'da %1,37 artmıştır. Bu bulgu, U-değerinin azaltılması ile soğutma tüketimi arasında bütün iklimlerde aynı yönde bir ilişki kurulamayacağını göstermektedir. Masoso ve Grobler (2008), sıcak-kuru iklimde duvar yalıtımının etkisinin soğutma ayar sıcaklığına bağlı olarak değişebildiğini ve bazı koşullarda tüketimin artabildiğini bildirmiştir. Bununla birlikte, farklı iklim ve sistem koşullarında elde edilen bu bulgu, Erzurum'daki artışın nedenini doğrudan açıklamamaktadır. Erzurum'da soğutma tüketiminin yaklaşık 5,35 kWh/m²'den 5,43 kWh/m²'ye yükselmesi, mutlak değişimin küçük olduğunu göstermektedir. Bu davranışın açıklanması, saatlik ısı kazançları, iç ortam sıcaklıkları ve sistem çalışmasının birlikte incelenmesini gerektirmektedir.

Kullanılan klima performans eğrilerinin düşük dış sıcaklıklardaki sınırlandırılması, soğutma sonuçlarının yorumlanmasında ayrıca dikkate alınmalıdır. Ana senaryo çalışması öncesinde Erzurum pilotunda gerçekleştirilen duyarlılık testinde, sıcaklık eğrilerinin dış hava sıcaklığı alt sınırının 24 °C'den 0 °C'ye indirilmesi soğutma tüketimini yaklaşık %3,45 azaltmıştır. Bu sonuç, pilot modelin soğutma tüketiminin eğri sınırı kabulüne duyarlı olduğunu göstermektedir.

Ancak söz konusu test, alternatif eğrinin fiziksel geçerliliğini doğrulamamakta ve yeni 112 senaryonun belirsizlik aralığını tanımlamamaktadır. Bu nedenle Erzurum'daki %1,37 düzeyindeki soğutma artışı, genel bir yalıtım etkisi olarak genellenmemelidir.

Çalışmanın sonuçları, uyarlanmış bir konut arketipi ve tanımlanan kullanım kabulleri için geçerlidir. Kullanıcı yoğunluğu, sıcaklık ayarları, havalandırma, sıcak su gereksinimi ve pencere özellikleri aynı şehirdeki senaryolar arasında korunmuş olsa da bu kabuller ölçülmüş bir binanın işletim verilerine dayanmamaktadır. Modelin ölçülmüş enerji tüketimleriyle kalibre edilmemiş olması, sonuçların gerçek konutların mutlak tüketimlerini temsil etme gücünü sınırlandırmaktadır.

Sistemlerin otomatik boyutlandırılması ve U-değerlerinin oluşturulma biçimi de sonuçların kapsamını belirlemektedir. Otomatik boyutlandırılan kapasiteler her senaryonun girdilerine göre hesaplandığından, tüketim farkları sabit kapasiteli bir sistemle gerçekleştirilen yapı kabuğu yenilemesinin sonuçlarıyla doğrudan eş tutulamaz. Benzer şekilde, hedef U-değerleri katman kalınlıkları, yoğunlukları ve özgül ısıları korunarak ısısal iletkenliklerin değiştirilmesiyle elde edilmiştir. Bu yaklaşım, ısısal geçirgenliğin parametrik olarak incelenmesine olanak sağlamakta ve belirli bir yalıtım ürününün, uygulama kalınlığının veya yatırım seçeneğinin performansını doğrudan temsil etmemektedir.

5. SONUÇ

Bu çalışmada, dış duvar ve çatı U-değerlerindeki değişimlerin konut binalarının yıllık enerji tüketimine etkileri, yedi şehrin iklim verileri kullanılarak gerçekleştirilen 112 simülasyon üzerinden değerlendirilmiştir. Duvar U-değerinin

0,70'ten 0,20 W/(m²·K)'ye ve çatı U-değerinin 0,50'den 0,10 W/(m²·K)'ye birlikte düşürülmesi, bütün şehirlerde toplam enerji tüketimini azaltmıştır. Toplam tüketimdeki azalma %8,17–23,32, ısıtma amaçlı tüketimdeki azalma ise %53,70–81,11 arasında değişmiştir. Toplam tüketimde en yüksek azalma Erzurum'da, en düşük azalma Antalya'da elde edilmiştir.

Duvar ve çatı değişimlerinin göreceli etkisi şehirlere göre farklılaşmıştır. Çatı U-değerinin tek başına azaltılması Adana, Antalya ve İzmir'de; duvar U-değerinin tek başına azaltılması ise İstanbul, Ankara, Samsun ve Erzurum'da daha yüksek toplam tüketim azalması sağlamıştır.

Birleşik senaryoda soğutma tüketimi altı şehirde %5,12–9,63 azalırken Erzurum'da %1,37 artmıştır. Dolayısıyla toplam tüketimin azalması, bütün enerji son kullanımlarının aynı yönde değiştiği anlamına gelmemektedir. Yapı kabuğu kararları değerlendirilirken ısıtma, soğutma ve toplam tüketim üzerindeki etkiler birlikte ele alınmalıdır.

Isıtma tüketimindeki yüksek oransal azalmalar, toplam tüketimde aynı büyüklükte azalmalara dönüşmemiştir. İç ekipmanlar, sıcak su ve aydınlatmanın yıllık toplam tüketimde önemli paylara sahip olması, yapı kabuğu değişimlerinin bütün bina tüketimine yansımaları sınırlandırmaktadır. Ayrıca yıllık ve birleştirilmiş tüketim payları, belirli bir şehrin mevsimsel dağılımını doğrudan temsil etmemektedir. Erzurum'un referans senaryosunda ısıtmanın ocak ayı toplam tüketimindeki payının %68,80 olması, değerlendirmelerde iklimin ve zaman aralığının açıkça belirtilmesinin önemini göstermektedir.

Çalışma, dış duvar ve çatı özelliklerinin enerji tüketimine etkilerini farklı iklimlerde ortak bir karşılaştırma düzeni içinde ortaya koymaktadır. Bulgular, yapı kabuğu kararlarının iklim, bina özellikleri ve enerji son kullanım dağılımı birlikte değerlendirilerek alınması gerektiğine işaret etmektedir. Gelecek

çalışmalarda ölçülmüş tüketimlerle kalibrasyon yapılması, farklı konut tiplerinin incelenmesi ve sabit sistem kapasiteleri altında gerçekleştirilecek analizlerle karşılaştırmaların genişletilmesi önerilmektedir.

KAYNAKÇA

- Axaopoulos, P. J., Sakellariou, E. I., Panayiotou, G. P., & Kalogirou, S. (2025). Evaluation of the optimum insulation thickness of building external walls and roof based on human thermal comfort criterion. *Renewable Energy*, 247, 123058. doi:10.1016/j.renene.2025.123058
- Aydin, N., & Biyikoglu, A. (2021). Determination of optimum insulation thickness by life cycle cost analysis for residential buildings in Turkey. *Science and Technology for the Built Environment*, 27(1), 2–13. doi:10.1080/23744731.2020.1776066
- Evin, D., & Ucar, A. (2019). Energy impact and eco-efficiency of the envelope insulation in residential buildings in Turkey. *Applied Thermal Engineering*, 154, 573–584. doi:10.1016/j.applthermaleng.2019.03.102
- Fang, Z., Li, N., Li, B., Luo, G., & Huang, Y. (2014). The effect of building envelope insulation on cooling energy consumption in summer. *Energy and Buildings*, 77, 197–205. doi:10.1016/j.enbuild.2014.03.030
- Idris, Y., & Mae, M. (2017). Anti-insulation mitigation by altering the envelope layers' configuration. *Energy and Buildings*, 141, 186–204. doi:10.1016/j.enbuild.2017.02.025
- Kitsopoulou, A., Pallantzas, D., Sammoutos, C., Lykas, P., Bellos, E., Vrachopoulos, M. G., & Tzivanidis, C. (2024). A comparative investigation of building rooftop retrofit actions using an energy and computer fluid dynamics approach. *Energy and Buildings*, 315, 114326. doi:10.1016/j.enbuild.2024.114326
- Kürekci, N. A. (2016). Determination of optimum insulation thickness for building walls by using heating and cooling

- degree-day values of all Turkey's provincial centers. *Energy and Buildings*, 118, 197–213. doi:10.1016/j.enbuild.2016.03.004
- Masoso, O. T., & Grobler, L. J. (2008). A new and innovative look at anti-insulation behaviour in building energy consumption. *Energy and Buildings*, 40(10), 1889–1894. doi:10.1016/j.enbuild.2008.04.013
- Tummu, P., Chirarattananon, S., Hien, V. D., Chaiwiwatworakul, P., & Rakkwamsuk, P. (2013). Thermal performance of insulated walls enclosing residential spaces in Thailand. *Energy and Buildings*, 61, 323–332. doi:10.1016/j.enbuild.2013.02.035
- Tunçbilek, E., Komerska, A., & Arıcı, M. (2022). Optimisation of wall insulation thickness using energy management strategies: Intermittent versus continuous operation schedule. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 49, 101778. doi:10.1016/j.seta.2021.101778
- United Nations Environment Programme. (2025). *Global status report for buildings and construction 2024/2025: Not just another brick in the wall*. Erişim adresi: <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/47214>
- U.S. Department of Energy. (2024). *Input output reference* (EnergyPlus version 24.2). Erişim adresi: <https://bigladdersoftware.com/epx/docs/24-1/input-output-reference/index.html>
- Usta, P., & Zengin, B. (2021). The energy impact of building materials in residential buildings in Turkey. *Materials*, 14(11), 2793. doi:10.3390/ma14112793

CARPENTER GÖRSEL SANATLAR MERKEZİ BİNASININ LE CORBUSIER’İN İLKELERİ BAĞLAMINDA DEĞERLENDİRİLMESİ

Elif Merve ERTURAN¹

1. GİRİŞ

Mimarlığı yalnızca barınma ihtiyacını karşılayan nesnel bir kabuk değil; ışığın, kütlenin, oranların ve hareketin harmonik birleşimiyle üretilen duyusal ve işlevsel bir mekân deneyimi olarak ele alan İsviçre asıllı Fransız mimar Le Corbusier (1887-1965), kariyeri boyunca geliştirdiği manifestolarla modernist paradigmanın yönünü çizmiştir.

Tüm teorik yaklaşımlarının ve tasarım ilkelerinin somutlaştığı en olgun örneklerden biri, mimarın Kuzey Amerika kıtasındaki tek eseri olma özelliğini taşıyan Carpenter Görsel Sanatlar Merkezi’dir (Carpenter Center for the Visual Arts). Harvard Üniversitesi kampüsünde yükselen bu yapı, Le Corbusier’nin tikel bir mimari kurgunun ötesinde, hayatı boyunca izini sürdüğü formel ve kavramsal arayışların somutlaştığı bir dönüm noktası niteliğindedir.

Bu araştırmanın temel amacı, Le Corbusier’nin Carpenter Görsel Sanatlar Merkezi yapısını yalnızca münferit bir mimari nesne olarak değil; mimarın 50 yıla yayılan teorik birikiminin, malzeme arayışlarının ve kentsel mekan kurgusunun sentetik bir özeti olarak yeniden okumaktır. Çalışma kapsamında; Modern Mimarlığın Beş İlkesi’nin yapıda nasıl biçimlendiği, promenade

¹ Doktor Öğretim Üyesi, Konya Teknik Üniversitesi, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Mimarlık Bölümü, ORCID: 0000-0003-1484-7870.

architecturale kavramının rampa ve mekânsal sirkülasyon üzerinden nasıl kurgulandığı, brüt beton malzemesi ve brise-soleil elemanlarının ışık-gölge oyunlarındaki rolü ile Modulo oran sisteminin mekânsal ölçeğe etkisi detaylıca incelenecektir. Böylelikle çalışma, Le Corbusier'nin Amerika'daki bu tek eserinin, mimarın teorik mirasını modern mimarlığın olgunluk döneminde nasıl temsil ettiğini ve tarihsel çevreye eklemlenme noktasındaki özgün duruşunu ortaya koymayı hedeflemektedir.

Görsel sanatlar merkezi tasarımı; üretim (atölyeler), sergileme (galeri/müze), eğitim ve kamusal etkileşim gibi farklı dinamiklere sahip işlevlerin bir arada kurgulandığı karmaşık bir mimari programdır. Amerika Birleşik Devletleri Boston şehrinde yer alan ve Harvard Üniversitesi için sanatsal bir nokta oluşturan binayı, hem estetik hem işlevsel tasarlanması gerekliliğiyle, Le Corbusier yarım asırlık mimarlık deneyimi sonucunda literatüre kazandırdığı ilkeleriyle harmanlayarak hayata geçirmiştir. Günümüzde de aktif olarak kullanılmakta ve ilgi çekmektedir.

2. MODERN MİMARLIK

Modern mimarlık, 19. yüzyılın sonlarında yaşanan toplumsal, ekonomik ve teknolojik dönüşümlerin etkisiyle ortaya çıkan, 20. yüzyılın ilk yarısında ise belirgin bir düşünsel ve tasarımsal kimlik kazanan mimarlık anlayışıdır. Sanayi Devrimi ile gelişen üretim teknolojileri, kentleşme süreçleri ve değişen toplumsal gereksinimler, mimarlıkta geleneksel tasarım yaklaşımlarının sorgulanmasına neden olmuştur. Özellikle demir, çelik, cam ve betonarme gibi malzemelerin yapı üretiminde yaygınlaşması, mimarlara taşıyıcı sistem, mekânsal düzenleme ve cephe tasarımı bakımından yeni olanaklar sunmuştur (Getty Research Institute, 2020).

Modern mimarlığın temelinde işlevsellik, yalınlık, rasyonellik ve teknolojik olanakların tasarıma yansıtılması

düşüncesi bulunmaktadır. Tarihsel mimari üslupların biçimsel tekrarına ve süslemeci yaklaşımlarına karşı gelişen bu anlayışta, yapının biçiminin kullanım amacı, taşıyıcı sistemi ve mekânsal gereksinimleriyle ilişkilendirilmesi önem kazanmıştır. Bu doğrultuda mimari tasarımda geometrik biçimler, sade yüzeyler, açık plan düzenlemeleri ve yapısal elemanların belirginleştiği çözümler öne çıkmıştır. Bununla birlikte modern mimarlık, yalnızca biçimsel bir değişim olarak değil, değişen yaşam koşullarına uygun yeni mekânsal organizasyonların geliştirilmesini amaçlayan kapsamlı bir dönüşüm olarak değerlendirilmelidir (Colquhoun, 2002).

Modern mimarlığın gelişiminde Walter Gropius, Ludwig Mies van der Rohe ve Le Corbusier gibi mimarlar belirleyici roller üstlenmiştir. Özellikle Bauhaus hareketi, sanat, tasarım ve endüstriyel üretim arasındaki ilişkiyi yeniden ele alarak modern mimarlığın düşünsel temellerinin güçlenmesine katkıda bulunmuştur. Modern mimarlığın uluslararası ölçekte tanınmasında ise 1932 yılında New York Modern Sanat Müzesi'nde düzenlenen Modern Architecture: International Exhibition sergisi önemli bir dönüm noktası olmuştur. Bu süreçte Uluslararası Üslup kavramı, mimarlıkta hacimsel düzenleme, biçimsel süreklilik ve süslemeden arındırılmış tasarım anlayışı üzerinden tanımlanmıştır (Pevsner, 2024).

Bu bağlamda modern mimarlık, mimari biçimin, yapım teknolojisinin ve mekânsal işlevin bütüncül olarak değerlendirildiği bir tasarım yaklaşımını temsil etmektedir.

2.1. Le Corbusier ve mimarlık anlayışı

20. yüzyıl modern mimarlığının öncü isimlerinden biri olan Le Corbusier (1887–1965), geliştirdiği mimari kuramlar, yenilikçi tasarım yaklaşımları ve kent planlama çalışmalarıyla mimarlık disiplininin dönüşümünde önemli rol oynamıştır. Geleneksel mimari anlayışın biçimsel ve yapısal sınırlarını

sorgulayan Le Corbusier, mimarlığı yalnızca fiziksel mekân üretimi olarak değil, toplumsal yaşamın yeniden düzenlenmesine katkı sağlayan bir disiplin olarak değerlendirmiştir. Tasarımlarında işlevsellik, geometrik düzen, teknolojik yenilikler ve insan ölçeği arasında ilişki kurarak modern mimarlığın kuramsal ve uygulamalı gelişimine katkıda bulunmuştur (Frampton, 2007).

Le Corbusier'nin mimarlık alanındaki en önemli katkılarından biri, 1926 yılında geliştirdiği ve 1927 yılında yayımladığı Yeni Bir Mimarlığın Beş Noktası yaklaşımıdır. Pilotiler, serbest plan, serbest cephe, yatay şerit pencereler ve çatı bahçesinden oluşan bu ilkeler, betonarme taşıyıcı sistemin sağladığı olanaklarla mimari mekânın geleneksel sınırlamalarından bağımsızlaşmasını hedeflemiştir. Özellikle taşıyıcı sistem ile bölücü duvarların birbirinden ayrılması, iç mekân organizasyonunda esneklik sağlarken cephe tasarımında da yeni biçimsel olanaklar oluşturmuştur. İlkelerin açıklaları şu şekilde tanımlanabilir;

Pilotis (Taşıyıcı Kolonlar): Yapının zeminden yükseltilmesini gösterir.

Serbest Plan (Free Plan): İç mekandaki esnek düzenlemeyi vurgular.

Serbest Cephe (Free Facade): Taşıyıcı sistemden bağımsız, özgür formları gösterir.

Yatay Bant Pencereler (Ribbon Windows): Panoramik manzara ve doğal ışık alımını açıklar.

Çatı Bahçesi (Roof Garden): Çatının rekreasyon alanı olarak kullanılmasını betimler.

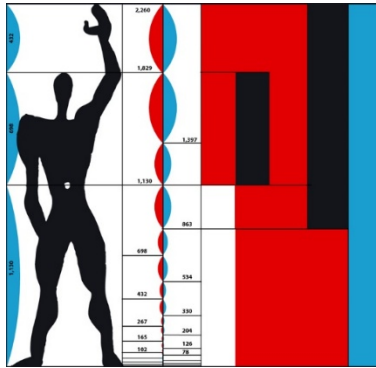
Bu yaklaşımın önemli örneklerinden biri olan Villa Savoye (Şekil 2), söz konusu ilkelerin bütüncül biçimde uygulandığı modern mimarlık yapılarından biri olarak kabul

edilmektedir (Curtis, 1996). Villa Savoye'un inşasıyla Le Corbusier, mimarlık literatürüne 'Promenade Architecturale' adını verdiği 'duygusal bir gezinti' kavramını kazandırmıştır. Bu yaklaşım, mimarlar için bir güzergâh/rota aracılığıyla 'bir hikâye anlatma' ihtiyacı yaratır; burada insan, inşa edilen mekânı deneyimlemek, hissetmek ve yaşamak amacıyla anlatının ana karakterine dönüşür.



Şekil 1. Villa Savoye (yazarın kişisel arşivinden, 2017)

Ayrıca insan bedeninin ölçülerini matematiksel oranlarla ilişkilendiren Modulor sistemiyle mimari tasarımda insan ölçeğine dayalı bir oranlama yaklaşımı geliştirmiştir (Le Corbusier, 1954). Modulor insan ölçeğini matematiğin estetik oranlarıyla (özellikle Altın Oran ve Fibonacci dizisi) birleştiren bir modüler ölçü ve oran sistemidir.



Şekil 2. Modulor Adamı (Sudaş, 2014)

Le Corbusier'nin mimarlığa katkıları, yapıların fiziksel özellikleriyle sınırlı kalmamış, mekânın kullanıcı tarafından algılanma biçimine de odaklanmıştır. Geliştirdiği promenade architecturale (mimari gezinti/yürüyüş) kavramıyla mimari deneyimi hareket, dolaşım ve değişen perspektifler üzerinden ele almıştır (Von Moos, 2009). Rampalar, merdivenler ve farklı kotlar arasındaki ilişkiler aracılığıyla kullanıcıların mekânı durağan bir bütün yerine, zaman içerisinde deneyimlenen dinamik bir düzen olarak algılamasını amaçlamıştır.

Kent planlama alanında ise Ville Radieuse (Işıyan Kent) yaklaşımıyla yüksek yoğunluklu yerleşimler, yeşil alanlar, ulaşım sistemleri ve işlevsel bölgeler arasında rasyonel bir düzen kurulmasını önermiştir. Bununla birlikte bu yaklaşım, modern kentlerin toplumsal çeşitliliği ve geleneksel sokak yaşamıyla kurduğu ilişkiler açısından eleştirilmiştir (Jacobs, 1961).

Le Corbusier'nin uluslararası mimarlık üzerindeki etkisi, yedi ülkede bulunan 17 yapısının 2016 yılında UNESCO Dünya Mirası Listesi'ne alınmasıyla da uluslararası boyuta taşınmıştır (UNESCO World Heritage Centre, 2016).

3. METARYAL VE YÖNTEM

Çalışmada nitel araştırma yöntemleri benimsenecek ve tarihsel-kuramsal analiz metodolojisi izlenecektir. Bu doğrultuda, Sekler ve Curtis'in (1978) arşiv belgelerine dayanan monografik verileri, Boesiger'in (1965) sunduğu orijinal çizim ve belgeler ile harmanlanacaktır. Teorik çerçevenin oluşturulmasında ise Frampton (2001) ve Curtis'in (1986) tektonik ve formel okumaları ile Sorkin (1998) ve Von Moos'un (2009) kentsel sirkülasyon ve mekan kuramı üzerindeki değerlendirmelerinden yararlanılacaktır.

Görsel sanatlar merkezlerinin tasarımı; üretim, sergileme, eğitim ve kamusal etkileşim gibi heterojen işlevlerin mekânsal, teknik ve çevresel kriterler doğrultusunda bütünleştirilmesini gerektiren çok boyutlu bir mimari süreç olarak değerlendirilmektedir. Tasarım sürecinde; kamuya açık galeriler, yarı kamusal atölyeler ve iklimlendirme hassasiyetine sahip depolama/servis hacimleri arasında hiyerarşik ve esnek bir mekânsal bölümleme (zoning) kurgulanmalıdır.

Carpenter Görsel Sanatlar Merkezi (Carpenter Center for the Visual Arts - CCVA), Le Corbusier'nin Kuzey Amerika'da gerçekleştirdiği tek yapıdır ve 1963 yılında Harvard Üniversitesi kampüsünde tamamlanmıştır (Şekil 3). Yapı, mimarın kariyerinin geç dönem ilkelerini, brutalist malzeme kullanımını ve modern mimarlık teorilerini topluca sergileyen sentetik bir eser niteliğindedir. Yapı, ismini merkezin inşasını finanse eden Carpenter Ailesi'nden alır. 1950'lerin sonunda Harvard Üniversitesi görsel sanatlar alanında eğitimi ve üretimi tek bir çatı altında toplayacak modern bir merkez kurmak istediğinde, Carpenter ailesi bu projeyi tamamen finanse etmeyi üstlenmiştir.



Şekil 3. Carpenter Görsel Sanatlar Merkezi genel görünüm
(yazarın kişisel arşivinden, 2024)

Yapının merkezinden geçen ve Quincy Street ile Prescott Street'i birbirine bağlayan devasa beton rampa, mimarideki "promenade" kavramının en belirgin örneklerindendir.

CCVA (Carpenter Center for the Visual Arts), Le Corbusier'nin erken dönem Purist konutlarındaki rasyonel geometri ile geç dönem yapıtlarındaki heykelsi ve plastisitesi yüksek brütalist anlayış arasında köprü kuran kritik bir eşiktir (Curtis, 1986; Frampton, 2001). Yapı, Kuzey Amerika modernizminin gelişimi ve akademideki mekan anlayışının dönüşümü bağlamında da merkezi bir konuma sahiptir.

1963 yılında tamamlanan Carpenter Görsel Sanatlar Merkezi, yalnızca Le Corbusier'nin Amerika Birleşik Devletleri'nde inşa edilmiş tek eseri olması bakımından değil; aynı zamanda mimarın olgunluk döneminde geliştirdiği plastik dil, brüt beton kullanımı ve kentsel ölçekteki mekânsal kurgunun bir arada sergilendiği bir laboratuvar niteliği taşıması açısından da mimarlık tarihçileri ve kuramcıları için eşsiz bir araştırma nesnesidir (Cohen, 2004; Frampton, 2001). Yapı, Harvard Üniversitesi'nin 20. yüzyılın ortalarında görsel sanatlar eğitimi kuramsal ve uygulamalı bir çerçevede tek bir çatı altında toplama vizyonunun fiziki bir ifadesi olarak ortaya çıkmıştır. Ancak bina kurumsal bir eğitim yapısı işlevinin çok ötesine geçerek kentsel doku ile mimari kütle arasındaki sınırları yeniden tanımlama iddiasına erişmiştir (Besset, 1987).

Carpenter Görsel Sanatlar Merkezi'nin doğuşu, Harvard Üniversitesi'nin İkinci Dünya Savaşı sonrası dönemde modern sanat ve tasarım eğitimiyle kurduğu ilişkiyi yeniden yapılandırma arayışına dayanmaktadır (Sekler & Curtis, 1978). Dönemin Dekanı José Luis Sert'in öncülüğünde, üniversite bünyesinde yaratıcı disiplinleri ve görsel süzgeci merkeze alacak radikal bir mekan ihtiyacı doğmuştur. Bu doğrultuda görevlendirilen Le Corbusier, projeyi yalnızca bir derslik ve stüdyo binası olarak ele

almamış; mimari formun bizzat kendisini görsel ve mekânsal eğitimin pedagojik bir aracı haline getirmeyi hedeflemiştir (Sekler & Curtis, 1978; Boesiger, 1965).

Yapının konumlandırıldığı arazi, Harvard kampüsünün tarihi, neoklasik ve Georgian üsluptaki tuğla binalarının yoğun biçimde bulunduğu Quincy Street ile Prescott Street arasında yer almaktadır (Şekil 4). Bu fiziksel çevre, Le Corbusier’ye radikal bir zıtlık oluşturma fırsatı sunmuştur.



Şekil 4. Carpenter Görsel Sanatlar Merkezi’nin Harvard Üniversitesi kampüsünde 3 boyutlu görünüm

Geleneksel kampüs dokusunun masif ve kapalı kütle yapısına tezat oluşturacak şekilde tasarlanan CCVA; cam, ham beton (béton brut) ve dinamik organik hacimlerin bir araya geldiği heykelsi bir jest olarak yükselmiştir (Curtis, 1986). Bu durum, dönemin mimarlık kamuoyunda ve akademi çevrelerinde ciddi tartışmalara yol açmış, yapının geleneksel kampüs ortamında kurduğu sert ve tavizsiz diyalog modernizmin çevreye uyum yeteneği bağlamında sorgulanmıştır (Besset, 1987).

4. BULGULAR

Modern Mimarlığın 5 İlkesinin Geç Dönem Yorumu Le Corbusier'nin 1920'lerde geliştirdiği ilkeler bu yapıda olgunlaşmış haliyle yer alır:

- **Pilotis (Taşıyıcı Kolonlar):** Bina zeminden yükseltilerek açık sirkülasyon alanı yaratılmıştır.
- **Serbest Plan ve Serbest Cephe:** Taşıyıcı sistem dış cepheden bağımsız kılınarak organik, eğrisel formların (organik hacimler) entegrasyonuna izin vermiştir.
- **Brüt Beton (Béton Brut):** Yüzeylerde brüt betonun ham dokusu kullanılmış, brütalizm akımının tipik nitelikleri yansıtılmıştır.
- **Güneş Kırıcılar (Brise-Soleil):** Cephede doğal ışığı kontrol etmek ve derinlik hissi yaratmak için ayarlanmış dik açılı güneş kırıcı elemanlar kullanılmıştır.

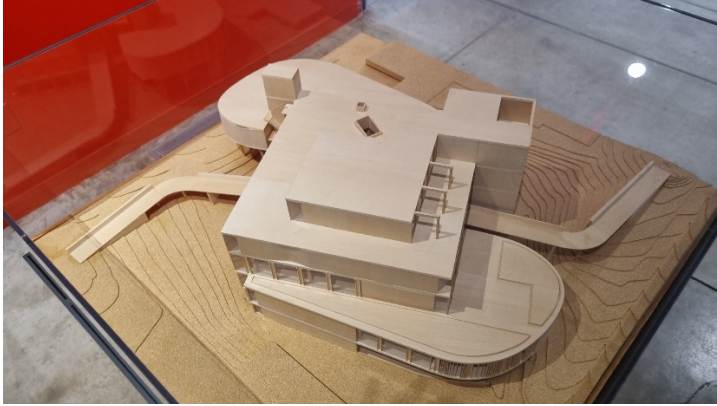
Carpenter Görsel Sanatlar Merkezi'nde bu kavram, yapının merkezinden geçen ve iki sokağı birbirine bağlayan devasa beton rampa aracılığıyla en üst düzey niteliğine kavuşur (Sorkin, 1998). Rampa, mimari kütleyle yalnızca dışarıdan dolaşılabilir bir nesne olmaktan çıkarak, sirkülasyonun kütlenin kalbine sızmasını sağlar.

Kentsel bir kestirme yol (urban shortcut) olarak kavramsallaştırılan bu rampa (Şekil 5), kamusal alan ile özel stüdyo mekanları arasındaki keskin ayrımı ortadan kaldırır. Yoldan geçen bir yaya, rampayı tırmanırken yapının camlı cepheleri aracılığıyla iç mekanda gerçekleşen sanatsal üretim süreçlerine doğrudan tanıklık eder. Böylece Le Corbusier, mimari yürüyüşü yalnızca iç mekan deneyimi olmaktan çıkarıp kentsel ölçekte bir kamusal eyleme dönüştürmüştür (Sorkin, 1998; Von Moos, 2009). Rampa, binayı kesen S biçimli akıcı yapısıyla (Şekil 6) iç ve dış mekan sınırlarını eritirken, yayayı kademeli bir

yükselmeyeyle yapının üçüncü kat düzeyindeki ana sergi ve sirkülasyon alanına taşır (Boesiger, 1965).



Şekil 5. Carpenter Görsel Sanatlar Merkezi'ndeki rampa (yazarın kişisel arşivinden, 2024)



Şekil 6. Yapının merkez içinde yer alan maketi (yazarın kişisel arşivinden, 2024)

Yapının zeminle kurduğu ilişki ise doğrudan mimarın erken dönem ilkelerinden biri olan pilotis (taşıyıcı kolonlar) sistemine dayanır (Cohen, 2004). Bina, yer yer ince kesitli kolonlar üzerinde havaya kaldırılmış; böylece zemin kat seviyesi

zeminle ve çevre peyzajla süreklilik kuran serbest bir dolaşım alanına dönüştürülmüştür (Şekil 7).



Şekil 7. Carpenter Görsel Sanatlar Merkezi'nde taşıyıcı kolonlar (yazarın kişisel arşivinden, 2024)

Bu taşıyıcı yapı, iç mekanda serbest plan uygulamasına imkan tanıyarak organik biçimli kulakçık benzeri (ear-shaped) stüdyo hacimlerinin ana taşıyıcı akslardan bağımsız biçimde kurgulanmasını mümkün kılmıştır (Boesiger, 1965; Sekler & Curtis, 1978). Taşıyıcı sistemin dış duvarlardan ayrılması ise yapıya serbest plan (plan libre) ve serbest cephe (façade libre) esnekliği sağlar. Bu bağımsızlık sayesinde iç mekânda organik stüdyo hacimleri özgürce kurgulanabilmıştır (Şekil 8).



Şekil 8. Merkez içerisinde serbest plan kurgusu (yazarın kişisel arşivinden, 2024)

Le Corbusier'in mimarlık kuramına kazandırdığı 5 ilke ve alan çalışması için seçilen Carpenter Görsel Sanatlar Merkezi'nde uygulanan Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Le Corbusier'in ilkeleri ve Carpenter Görsel Sanatlar Merkezi'nde uygulananı

Le Corbusier'nin 5 İlkesi	Carpenter Görsel Sanatlar Merkezi'nde Uygulanışı
1. Pilotis (Taşıyıcı Kolonlar)	Yapı, zeminden silindirik beton kolonlar üzerine kaldırılmıştır. Bu sayede zemin kat sürekli bir açık dolaşım alanına dönüşmüş, bina altındaki yaya akışı ve peyzaj kesintiye uğramamıştır.
2. Serbest Plan (Free Plan)	Taşıyıcı kolonlar ve dış duvarlar birbirinden tamamen bağımsızdır. İç mekanda yük taşımayan bölme duvarlar serbestçe yerleştirilerek stüdyo ve sergi alanlarında esnek, organik hacimler yaratılmıştır.
3. Serbest Cephe (Free Facade)	Dış cepheler taşıyıcı olma niteliğinden kurtarıldığı için tamamen serbestçe kurgulanmıştır. Cam yüzeyler, eğrisel hatlar ve dikey beton elemanlar taşıyıcı aks sınırlaması olmaksızın cephede yer alabilir.
4. Yatay Bant Pencereler (Ribbon Windows)	Geleneksel dikey pencereler yerine geniş ve kesintisiz cam paneller kullanılmıştır. Derin beton güneş kırıcılar (brise-soleil) ile desteklenen bu camlar, stüdyolara homojen ve bol ışık girmesini sağlar.
5. Çatı Bahçesi (Roof Garden)	Yapının teras ve çatı alanları açık havada heykelsi öğelerin yer aldığı kentsel bir bahçe ve açık sergi alanı olarak kurgulanmış, yapının kapladığı zemin alanı çatı seviyesinde doğaya geri kazandırılmıştır.

5. SONUÇ

Carpenter Center, Le Corbusier'nin 1950'ler sonrasında Hindistan (Chandigarh ve Ahmedabad) projelerinde geliştirdiği brütalist plastik dilin bir devamı ve olgunlaşmış sürümüdür (Curtis, 1986; Frampton, 2001). Yapıda baskın malzeme olarak tercih edilen brüt beton, ahşap kalıp izlerini yüzeyinde saklamaksızın taşıyan dokusal yapısıyla yapının tektonik dürüstlüğünü vurgular (Frampton, 2001). Betonun ham ve masif etkisi, geniş cam yüzeylerin geçirgenliğiyle dengelenmiştir.

Binayı tam ortasından ikiye kesen devasa betondan S-rampa, yoldan geçen yayayı yapının içine çeker, stüdyoların içini gösterir ve binanın diğer tarafındaki sokağa bağlar. Rampa, yoldan geçenlerin yapının stüdyo ve sergi alanlarını dışarıdan gözlemlemesine olanak tanır ve kamusal alan ile iç mekan arasındaki sınırları akışkanlaştırır.

Dış cephede ise derin beton güneş kırıcılar ile desteklenen kesintisiz yatay pencereler yer alır. Bu düzenleme, stüdyolara denetimli ve homojen bir doğal ışık girmesini sağlar. Çatı kotundaki açık sergi ve teras alanı ise çatı bahçesi ilkesini somutlaştırır. Yapı, Le Corbusier'nin yarım asırlık kuramsal birikiminin tek bir eserdeki bütünsel ifadesidir, aynı zamanda Kuzey Amerika'da modernizmin kültürel ve eğitsel yapılara nasıl uygulanabileceğini gösteren özgün bir örnektir.

Bazı olumsuz eleştiriler de alan yapının Boston iklimine uygun olmadığı ve kullanıcı konforunu tam karşılayamadığı söylenmektedir. Rampalı sistem ve asimetrik plan bazı kullanıcılar için karmaşık ve yön bulmayı zorlaştırıcı olabilir. Özellikle ilk kez ziyaret edenler için yapı, soyut bir labirente dönüşebilir.

KAYNAKÇA

- Besset, M. (1987). The Carpenter Center in context: Le Corbusier's late synthesis. *Journal of Architectural Education*, 40(3), 12–19.
- Boesiger, W. (Ed.). (1965). *Le Corbusier: Œuvre complète (Cilt 7, 1957-1965)*. Basel: Birkhäuser.
- Cohen, J.-L. (2004). *Le Corbusier 1887-1965: The lyrical architecture of the machine age*. Köln: Taschen.
- Colquhoun, A. (2002). *Modern architecture*. OUP Oxford.
- Curtis, W. J. R. (1986). *Le Corbusier: Ideas and forms*. Londra: Phaidon Press.
- Curtis, W. J. R. (1996). *Modern architecture since 1900* (3rd ed.). London, England: Phaidon Press.
- Fondation Le Corbusier. (t.y.). Corbusean vocabulary. Erişim adresi: <https://www.fondationlecorbusier.fr/en/thematic-folder/corbusean-vocabulary/>
- Frampton, K. (2001). *Le Corbusier*. Londra: Thames & Hudson.
- Frampton, K. (2007). *Modern architecture: A critical history* (4th ed.). London, England: Thames & Hudson.
- Getty Research Institute. (2020). What is modern architecture, anyway? Erişim adresi: <https://www.getty.edu/news/what-is-modern-architecture-anyway/>
- Jacobs, J. (1961). *The death and life of great American cities*. New York, NY: Random House.
- Le Corbusier. (1927). *Towards a New Architecture*. John Rodker.
- Le Corbusier. (1954). *The Modulor: A harmonious measure to the human scale universally applicable to architecture and mechanics*. Cambridge, MA: Harvard University Press.

- Pevsner, N. (2024). *The sources of modern architecture and design*. Thames & Hudson.
- Rego, E. P. (2015). *O percurso urbano e a "Promenade Architecturale"* (Master's thesis, Universidades Lusiada (Portugal)).
- Sekler, E. F., & Curtis, W. J. R. (1978). *Le Corbusier at work: The genesis of the Carpenter Center for the Visual Arts*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Sorkin, M. (1998). The ramp and the city: Pedestrian promenade in modern architecture. *Harvard Design Magazine*, (6), 22–29.
- Sudaş, İ. (2014). Modern Mimarlığın Başyapıtı “Modulor” Nihayet Türkçe, <https://www.arkitera.com/haber/modern-mimarligin-basyapiti-modulor-nihayet-turkce/> (Erişim tarihi: 07.09.2026)
- The Museum of Modern Art. (1932). Modern architecture: International exhibition. Erişim adresi: <https://www.moma.org/calendar/exhibitions/2044>
- UNESCO World Heritage Centre. (2016). The architectural work of Le Corbusier, an outstanding contribution to the Modern Movement. Erişim adresi: <https://whc.unesco.org/en/list/1321/>
- Von Moos, S. (2009). *Le Corbusier: Elements of a synthesis*. Cambridge, MA: MIT Press.

AN OVERVIEW OF BIM-SUPPORTED DIGITAL TWIN CAPABILITIES IN HEALTHCARE FACILITY MANAGEMENT: CUTTING-EDGE APPROACHES

Fatma Handan SARIGÜL¹

1. INTRODUCTION

Driven by Industry 4.0, the transformative potential of digitization on the construction industry is increasing day by day, as Building Information Modeling (BIM) and BIM-supported digital twin (DT) technologies have emerged in recent years as pivotal capabilities of Construction 4.0 alongside the Internet of Things (IoT), big data, and artificial intelligence (AI). Offering numerous opportunities throughout all phases of construction, technologies significantly improve operational efficiency by driving proactive, data-driven transformations in facility management (FM) (Zhang et al., 2026).

Healthcare facilities represent one of the most intricate and demanding building typologies, requiring rigorous decision-making across all project lifecycles from initial design and construction through to long-term operation, maintenance, process coordination, logistics, and resource allocation. Moreover, the considerable contribution of the healthcare building sector to global greenhouse gas emissions underscores the urgent need for sustainable and innovative construction methodologies (Losito et al., 2025). The evolution toward a

¹ Dr., İstanbul Technical University, Faculty of Architecture, Department of Architecture (Alumna), Ankara Metropolitan Municipality, ORCID: 0000-0003-4305-1820

dynamic DT empowers the Architecture, Engineering, Construction, Operations, and Facility Management (AECO/FM) industry to visualize, track, and refine operational processes and assets, thereby delivering superior analytical support and oversight for FM and maintenance (Harode et al, 2023). By bridging cyber models with physical assets, digital twins (DTs) provide architects, engineers, and hospital administrators with advanced capabilities for real-time monitoring of medical personnel, patients, and workflows, alongside spatial management, predictive maintenance, and enhanced decision-making (Almukhtar et al., 2026). Integrated BIM-IoT-DT enable continuous indoor air quality monitoring and data-driven decision-making in HFM (Zhairy et al., 2026).

This review aims to identify the prospective benefits of integrating BIM-supported DT technology into HFM. Through a systematic database search a total of 15 publications up to October 2026 were identified from Scopus and Web of Science (WoS) after removing overlaps. The review reveals the prominent themes and inter-theme relationships including links, total link strength, and occurrences in research, as well as the research's focal points over the years and the countries where the studies were conducted. Papers includes; operation and maintenance efficiency, literature reviews or case studies, area management and discrete event simulations, air quality monitoring and indoor positioning via sensor technologies, integrated technologies, building management and automation systems, lean management, and information management.

An in-depth synthesis of the retrieved literature (comprising 11 journal articles, three conference papers, and one conference review) demonstrates that integrating BIM-supported DT into HFM optimizes both operational systems such as heating, ventilation, and air conditioning (HVAC), plumbing, and technical maintenance and critical healthcare workflows,

including patient experiences and workforce planning. Moving from static geometry to rich BIM models with semantic data and higher Levels of Detail (LOD) is essential to enable predictive energy management, layout optimization, and real-time indoor air quality monitoring in sensitive environments. Furthermore, integrated BIM-IoT-DT ecosystems empower facility managers with predictive maintenance, fault diagnosis, and advanced scenario analyses to mitigate operational disruptions. The review underscores that successful adoption depends on dynamic alignment between capabilities and technology and coordinated socio-technical interventions to address the operational barriers inherent in healthcare transformation.

This review addresses the scope and general approaches of previous studies in the literature review section. It details the review methodology in the methodology section and performs both bibliometric analysis (co-occurrences, average citations, publication years, and countries) and content analysis in the findings and analysis section. The discussion section evaluates the findings against the existing literature and outlines future research directions. Finally, the review concludes by highlighting key findings and recommendations in the conclusion section.

2. LITERATURE REVIEW

Prior research in HFM underscores the rapid proliferation of digital technologies across designated technology clusters, with BIM emerging as the central paradigm. In this domain, Schmitter & Ashworth (2023) categorized 22 distinct digital tools, emphasizing that BIM, the IoT, AI, Machine Learning (ML), DTs, and Blockchain are the primary technical pillars. Furthermore, in a systematic literature review, Zhang et al. (2026) examined four core digital technologies BIM, IoT, AI, and DT

and highlighted their strategic roles in enhancing operational resilience and efficacy in complex healthcare environments.

Given the data-intensive, multifaceted nature of FM, Congiu et al. (2024) investigated deploying integrated BIM-GIS frameworks to maximize asset management performance in public buildings, empirically demonstrating their approach at the former Macciotta pediatric hospital at the University of Cagliari. Concurrently, to address the friction between static asset representations and Lean principles, Dulanto Cam et al. (2025) conducted a systematic review and identified persistent implementation hurdles driven by interoperability gaps, data management constraints, institutional bottlenecks, and resource shortages. Synthesizing these fragmented empirical findings, Almukhtar et al. (2026) established a robust socio-technical rationale explaining the structural and organizational barriers that hamper BIM-driven DT adoption in public healthcare settings.

While conventional HFM relies on static BIM and traditional monitoring approaches that lack the real-time capabilities essential for proactive operations Demirdöğen et al. (2023), dynamic BIM-DT frameworks actively process real-time data to mitigate indoor environmental risks such as poor air quality that severely compromise patient recovery, infection control, and staff welfare (Zhairy et al., 2026). The growing adoption of the DT Immersive Design Process (DT-IDP) enables more precise modeling of healthcare environments, ultimately improving clinical care quality and patient satisfaction (Losito et al., 2025). While numerous studies have proposed discrete, process-simulation-based enhancements, few dynamically evaluate the built environment's explicit impact on overall process efficiency (Moretti et al., 2025). Integrating these theoretical foundations with empirical evidence from fourteen Italian healthcare facilities, Nuvolari-Duodo et al. (2026) demonstrated how facility digitalization reshapes hospital spatial

layouts while driving operational performance and environmental sustainability.

Various organizations, including ARUP, buildingSMART, DPR-VueOps, and Autodesk, have established distinct frameworks and definitions concerning the maturity levels of digital twins (DTs) (Harode et al., 2023). These institutional classifications are systematically detailed in Table 1. Moreover, this table has the potential to be updated as the DTs' capabilities improve.

Table 1. DT maturity levels. Adapted from Harode et al. (2023).

No	Functionality	DT Maturity level (L)
1	Non-dynamic data repositories enabling basic asset management	L1, L2, L3, L4, L5
2	Real-time sensor data acquisition and processing	L1, L2, L3, L4, L5
3	Receive information from external sources	L2, L3, L4, L5
4	Embedded analytics for decision support and feedback delivery	L2, L3, L4, L5
5	Autonomous learning, predictive modeling, and advanced data analytics	L3, L4, L5
6	Autonomy in a given domain	L3, L4, L5
7	Simulation	L4, L5
8	Full autonomy	L5
9	Interconnected incorporation of lower-level twins	L5

Table 2 shows a clear mismatch between the theoretical promise of dynamic, enterprise-level DTs and the current operational reality in public healthcare, characterized by limited live data updates and fragmented FM involvement. Consequently, successful DT adoption requires bridging this gap through organizationally feasible governance and aligned socio-technical workflows.

Table 2. Assumptions and operational reality for BIM- DTs.
Adapted from Almkhatar et al. (2026).

Dimension	Capital Phase BIM deployment	Theoretical DT vision	Empirical HFM practice
Primary focus	AEC phase coordination	End-to-end performance tuning	Disconnected FM workflows
Temporal dynamics	Fixed, point-in- time deliverable	Live data driven updates	Periodic synchronization
Decision- making hierarchy	Phase-bounded	Organizational ecosystem	Ambiguous asset responsibility
Functional data role	Geometric and attribute archive	Proactive optimization engine	Passive monitoring and descriptive logging
Stakeholder engagement	Retrospective involvement	Early-stage value co-creation	Excluded from delivery stages

3. METHODOLOGY

There are numerous ways to acquire in-depth knowledge in scientific research. One is conducting a systematic literature review to address a well-defined research aim. Systematic literature reviews often include bibliometric analyses. In this process, it is necessary to select appropriate databases and choose software tools for data visualization.

To retrieve the publications analyzed in this review, Scopus and WoS databases were utilized. By employing the search string (healthcare facilit* management) AND ("building information model*"), publications were searched within the Article title, abstract and keywords' category in Scopus and the Topic category in WoS. Searching specifically for building information model* in the search engine and then applying a DT filter was critical to retrieving only BIM-supported DT publications. This methodology effectively prevented the inclusion of clinical or medical healthcare publications outside the construction engineering domain, which typically confused direct searches combining DT and HFM.

general building management, integrating BIM and digital technologies into this specific domain.

In the healthcare context, DT (purple/violet cluster) and "BIM" also stand out as major nodes, forming the field's primary research axes. The thematic clusters and their relationships are explained in detail below:

Red Cluster (BIM and FM): Positioned upper-left, it encompasses BIM, maintenance management, air-conditioning, and big data analytics, highlighting their operational integration.

Green Cluster (Simulation and Process Modeling): Positioned in the upper-right corner, items such as BIM, FM, and discrete event simulation (DES) show that simulation models support workflow and logistics processes in healthcare facilities.

Orange and Blue/Cyan Clusters (Technological Integration): The healthcare facilities-centric orange cluster and its surrounding nodes such as AI, digital technologies, and data integration focus on the integration of smart technologies into healthcare buildings.

Yellow and Purple Clusters (Advanced Technologies and Sustainability): The yellow cluster in the lower-left corner points to cloud computing and digital maturity levels via Azure services and DT levels, while the purple cluster in the lower-right corner represents the environmental sustainability dimension through the concept of climate resilience.

Network visualization tools evaluate items based on occurrences, links, and total link strength. Occurrences indicate the total frequency of a term within the dataset, while links represent the number of connections a given item shares with other items (Jan van Eck & Waltman, 2023). Furthermore, total link strength quantifies the cumulative strength or frequency of these co-occurrence relations across the network.

The VOSviewer cluster analysis in Table 3 reveals the multidimensional structure of digitalization in HFM. Clusters 1 and 7 represent the foundation of traditional and strategic building maintenance and operations, dominated by prominent terms with high link strength and frequency, such as FM, BIM, Hospitals, and Strategic FM. Clusters 2, 3, and 4 symbolize the technical infrastructure that integrates process-oriented simulations, sensor-based data integration, and cloud/hardware architectures through terms including Process DT, DES, IoT, Real-time Monitoring, Azure Services, Energy Efficiency, Climate Resilience, Sustainable Construction, and AI, highlighting the sector's key future development trajectories for AI-assisted, climate-resilient, and sustainable DT applications, and Raspberry Pi 4. Meanwhile, Clusters 5 and 6 focus on Energy Efficiency, Climate Resilience, Sustainable Construction, and AI highlighting the sector's key future development trajectories for AI-assisted, climate-resilient, and sustainable DT applications.

Table 3. Clusters (links, total link strength, and occurrences).

Item	Item
1 Air-conditioning (5, 5, 1) Big data analytics (4, 4, 1) BIM (11,13, 3) Dynamo (4, 4, 1) Facility management (28, 32, 6) Heating-ventilation services (5, 5, 1) Hospitals (5, 5, 1) Maintenance management (5, 5, 1) Nosql database (4, 4, 1)	4 Azure services (6, 6, 1) IoT devices (6, 6, 1) Levels of digital twins (6, 6, 1) Power BI (6, 6, 1) Raspberry Pi 4 (6, 6, 1) System architecture (6, 6, 1)
2 BIM (8, 8, 1) Discrete event simulation (8, 8, 1) Facilities management (8, 8, 1) Histopathology (8, 8, 1) Industry foundation classes (8, 8, 1) Process digital twin (8, 8, 1)	5 Climate resilience (4, 4, 1) Digital twin (20, 22, 4) Energy efficiency (4, 4, 1) Hospital design (4, 4, 1) Sustainable construction (4, 4, 1)
3 Air quality monitoring (7, 7, 1) BIM (7, 7, 1) Data integration (7, 7, 1) Digital twin (dt) (7, 7, 1) Internet of things (IoT) (7, 7, 1) Real-time monitoring (7, 7, 1)	6 Artificial intelligence (6, 6, 1) BIM (6, 6, 1) Digital technologies (6, 6, 1) Internet of things (6, 6, 1)
	7 BIM (4, 4, 1) Healthcare facilities (25, 29, 5) Lean management (4, 4, 1) Strategic FM (4, 4, 1)
	8 Asset management (4, 4, 1) Lean construction (4, 4, 1)

Regarding the chronological trend distribution shown in Figure 2, the overlay visualization underscores a clear thematic shift in recent literature (2023–2026) toward dynamic, real-time automation frameworks, predominantly encompassing digital technologies, BIM, AI, indoor air quality monitoring, lean management, maintenance management, and data integration.

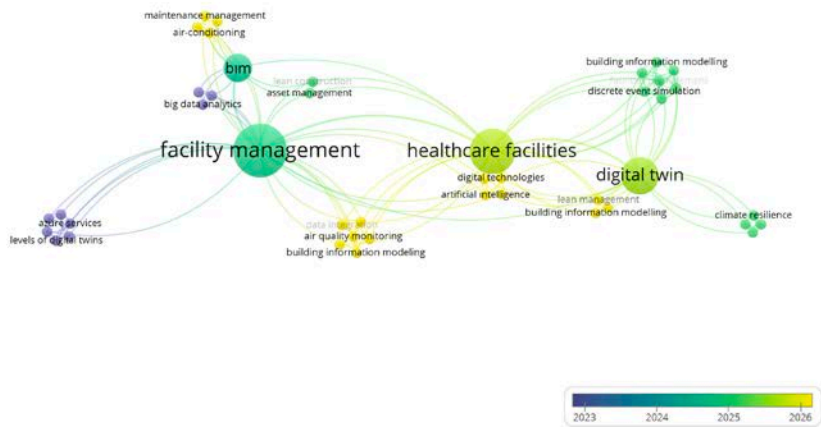


Figure 2. Avg. publication year

The geographical distribution of the authors' institutional affiliations spans China, Malaysia, Pakistan, the United Arab Emirates, Peru, Switzerland, Türkiye, the United Kingdom, Egypt, the United States, India, and Italy. These findings demonstrate that research efforts are not concentrated within a single continent or region, but are rather conducted on a global scale.

As seen in Figure 3, the VOSviewer average citations map demonstrates that foundational data infrastructures in FM, such as BIM, big data analytics, Azure services, and levels of DTs, achieve the highest citation counts (15–20+ citations), establishing the primary knowledge base of the domain. Conversely, emerging domains like AI-driven DTs and climate resilience in facility operations currently have lower average

citations because they were published more recently, which could reflect significant potential for future scientific impact.

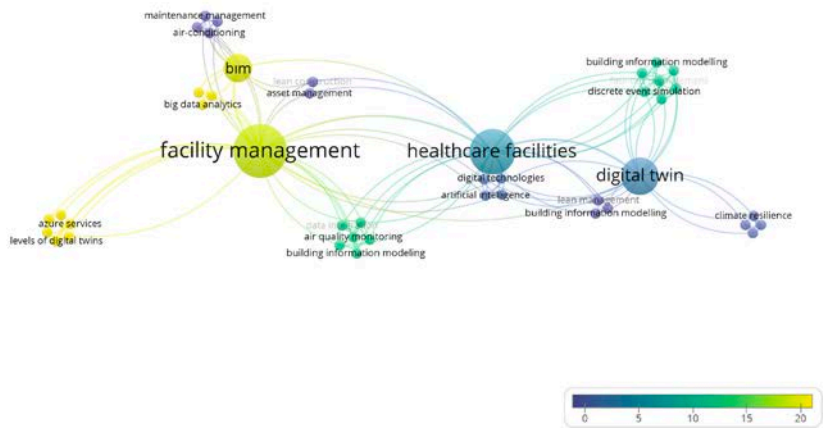


Figure 3. Avg. citation of paper

4.2. Content Analysis of Papers

This section provides a content analysis of the publications retrieved from Scopus that underwent bibliometric analysis. Of the 15 publications, 11 are journal articles, three are conference papers, and one is a review. Table 4 lists the reference, document type, and DT-related key contribution of each publication.

Table 4. Content analysis of papers retrieved from Scopus.

Ref. - Pub. Type	Key Contribution (DT in HFM related)
1- Nuvolari-Duodo et al. (2026)- Article	How the adoption of innovative solutions tailored for clinical and administrative sectors can optimize hospital workflows, enhance managerial efficiency, and foster safer, more functional, and sustainable environments.
Continued	
Ref. - Pub. Type	Key Contribution (DT in HFM related)
2- Zhang et al. (2026)- Review	Offering insights into operational durability, financial performance, and patient safety, the results guide healthcare digital transformation.
3- Khan et al. (2026)- Article	Successful BIM adoption in healthcare environments hinges more on strategic alignment and regulatory frameworks than technical capability alone.

4- Tmmam et al. (2026)- Article	By enabling failure prediction and operational performance monitoring in HFM, DTs can enhance energy efficiency and reduce operational costs.
5- Almkhtar et al. (2026)- Article	Stakeholders should shift from theoretical DT capabilities toward organizationally feasible, economically justified, and sustainable solutions.
6- Jegan et al. (2026)- Article	The HVAC-centric BIM framework supports preventive maintenance, decision-making, and auditing.
7- Mbabu et al. (2026)- Article	DT implementation requires dynamic capability-technology alignment, as 84% of challenges demand socio-technical interventions.
8- Zhairy et al. (2026)- Article	Through real-time tracking and proactive management, the system establishes a scalable, data-driven approach to enhance indoor air quality and operations.
9- Moretti et al. (2025)- Article	An open BIM-DES framework integrating real-time data to mitigate elevator breakdowns and workflow delays.
10- Losito et al. (2025)- Conference Proceedings	It emphasizes the importance of a multidisciplinary approach that integrates advanced technologies such as user-centered design, BIM, and space syntax analysis with energy efficiency enhancement strategies.
11- Dulanto Cam et al. (2025)- Conference Proceedings	Integrating Lean principles into BIM-based asset management significantly improves interoperability, streamlines step-by-step data exchange, and enables prompt, real-time operational decisions.
Continued	
Ref. - Pub. Type	Key Contribution (DT in HFM related)
12- Congiu et al. (2024)- Article	The methodology enables efficient two-way integration by facilitating smooth inter-system data flow.
13- Demirdöğen et al., 2023- Article	Driven by Big Data, BIM, and NoSQL through DSR, the healthcare DT system empowers practitioners to streamline data retrieval and KPI visualization.
14- Harode et al. (2023)- Article	The proposed prototype significantly reduces maintenance response times for operating room air quality issues.
15- Schmitter & Ashworth (2023)- Conference Proceedings	A systematic review of core digital technologies and systems: Categorization of 22 technologies in healthcare FM.

5. DISCUSSION

The in-depth analysis synthesizes 15 primary publications (comprising 11 journal articles, three conference proceedings, and one review published between 2023 and 2026) that explicitly investigate BIM-supported DTs. The bibliometric findings of this review reveal that the integration of DT and BIM in HFM is no longer a localized trend, but has evolved into a global research

vector. However, the limited number of healthcare facilities empirical studies indicates that a unified DT implementation standard in the public healthcare sector has yet to be established.

The empirical insights presented in Table 3 and Figure 1 align with the observations of Losito et al. (2025) who emphasized that despite recent advances in DT-related HFM, current research threads concerning climate resilience, energy efficiency, and hospital design remain largely fragmented. Incorporating DT into an immersive design process for healthcare facilities enables predictive energy management modeling, layout optimization, and the selection of sustainable materials. Leveraging this potential through empirical inquiry is projected to accelerate the proliferation of green, sustainable, and sustainability-certified healthcare infrastructure.

Furthermore, as illustrated by the citation overlay analysis in Figure 3, traditional HFM infrastructures provide a mature baseline characterized by relatively high citation frequencies, whereas AI- and climate resilience-driven DT applications within HFM remain in their infancy. The network map in Section 4.1 demonstrates that BIM and DT paradigms extend beyond static structural representations; rather, they form a multi-layered socio-technical ecosystem centered around maintenance management, AI, DES, and sustainability. Furthermore, the Design Science Research (DSR) methodology which matured in the 2000s is frequently adopted among the reviewed studies (Demirdöğen et al., 2023; Jegan et al., 2026; Mbabu et al., 2026). DSR promises to be particularly valuable for ongoing HFM research by generating actionable artifacts such as workflow schemas, decision-support mechanisms, and systematic evaluation frameworks.

Digital systems play a pivotal role in addressing engineering information management challenges during hospital

operations and maintenance, thereby enhancing overall operational efficiency (Tmmam et al., 2026). To eliminate workflow bottlenecks, Moretti et al. (2025) proposed a data integration framework coupling BIM with DES. This spatially responsive process-DT architecture optimizes critical time factors in healthcare environments by anticipating operational disruptions such as the domino effect of an elevator failure going beyond conventional standalone DES. Such frameworks empower facility managers to conduct scenario analyses and provide operational executives with evidence-based justification for additional capital investments when facing potential operational vulnerabilities.

From a patient-centric perspective, FM frameworks combining integrated BIM, IoT, and DT can deliver real-time, data-driven responses to dynamic indoor environmental parameters (e.g., airflow, humidity, particulate matter, nitrous oxide pressure, carbon dioxide, and temperature). Strengthening infrastructure to enable rapid adoption of continuous microclimate monitoring, particularly in operating rooms, would be highly beneficial for effectively mitigating airborne healthcare-associated infections.

Recent studies confirm that BIM-supported DT technology serves as a cornerstone for smart, sustainable building design and resilient healthcare asset maintenance, effectively curtailing operating expenses, enhancing service delivery quality, and optimizing patient experiences by minimizing system downtime (Dulanto Cam et al., 2025; Tmmam et al., 2026; Zhang et al., 2026). Scholars unanimously agree that integrating BIM-supported DTs into Asset Management yields substantial operational efficiencies, cost reductions, and elevated patient safety standards. Nonetheless, as highlighted by Zhairy et al., (2026), a successful industry-wide transition requires addressing key prerequisites: bolstering internet and cloud infrastructure,

mitigating data security vulnerabilities, and enforcing standardized protocols for data acquisition, storage, visualization, and processing. Moreover, leveraging interoperable digital systems, institutionalizing hospital FM standards with embedded DT integration, and delivering targeted technical training for facility personnel remain paramount.

The current literature underscores that due to the static nature of conventional BIM, it cannot deliver sufficient operational efficiency in HFM when used in isolation, thereby necessitating the adoption of dynamic DTs. Conversely, on a global scale, many countries have not yet achieved the prerequisite BIM maturity levels across the broader AECO-FM industry. While theoretical frameworks in peer-reviewed journal articles and conference proceedings are highly sophisticated, mandatory BIM implementation in several countries including Türkiye, where official mandates were enacted in August 2026 has been introduced only recently. As noted by Zhang et al. (2026), overcoming persistent barriers such as system interoperability, scalability beyond pilot projects, cybersecurity, data privacy, and institutional adoption is paramount prior to full-scale DT deployment. Consequently, prior to widespread DT adoption, it is urgent for academia, local, and central authorities to conduct rigorous evaluations to identify mechanisms that accelerate the BIM transition for both public and private sector stakeholders, subsequently implementing constructive policy steps.

As stressed by Almkhtar et al. (2026), the full operational potential of BIM-supported DTs in public HFM globally remains largely untapped, necessitating substantial developmental steps toward practical deployment. Furthermore, Zhang et al. (2026) noted that holistic investigations detailing both challenges and future trajectories in HFM-DT research remain sparse. The relative scarcity of empirical case studies in indexed databases

(Scopus/WoS) confirms a clear research gap and a fertile opportunity for high-impact contributions. In context-specific applications, integrating DT frameworks into the asset management of newly planned City Hospitals in Türkiye can serve as a benchmark for broader healthcare networks. For existing hospital infrastructure, implementing Scan-to-BIM workflows (via 3D laser scanning or LiDAR) to capture point cloud data enables the reconstruction of as-built BIM models, which could provide the foundation for generating functional DTs tailored to legacy facility operations.

6. CONCLUSION

The significance of this study lies in its systematic synthesis and presentation of modern technologies, emerging approaches, and state-of-the-art capabilities in HFM, derived from a comprehensive review of publications indexed in premier academic databases. Specifically, this review aims to identify the prospective benefits of integrating BIM-supported DT technology into HFM. Using a systematic database search with the specified search strings, we identified 15 publications from Scopus and WoS through October 2026 after removing overlaps.

Healthcare facilities demand efficient operational management that extends beyond routine building systems such as energy, HVAC, plumbing, water, and technical maintenance to directly encompass the enhancement of clinical treatment processes, patient experiences, workforce planning, and patient safety. To achieve sustainable development goals through climate change mitigation and human-centered design, integrating DT technologies and BIM-based frameworks is essential for building resilient, safe, and cost-effective healthcare environments. Through real-time tracking, failure prediction, fault diagnosis, and predictive maintenance, DT-supported systems reduce

workflow delays, optimize operational costs, improve indoor air quality, and enhance financial performance alongside overall institutional sustainability.

Crucially, maximizing efficiency in HFM requires shifting from static geometry to rich BIM models with semantic data and higher Levels of Detail (LOD). However, successful implementation requires shifting focus from the theoretical promises of DT to organizationally feasible, economically justified solutions, recognizing that digital transformation relies on dynamic capability-technology alignment to overcome the operational and organizational challenges that require coordinated socio-technical interventions. Future research should prioritize empirical case studies such as in new City Hospitals to tackle barriers like interoperability and cybersecurity, while exploring Scan-to-BIM workflows for legacy healthcare facilities.

REFERENCES

- Almukhtar, A., Shahzad, M., & Tah, J. H. M. (2026). From BIM to digital twins in public healthcare facility management: bridging the gap between technological potential and operational reality. *Frontiers in Built Environment*, 12. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2026.1828585>
- Congiu, E., Quaquero, E., Rubiu, G., & Vacca, G. (2024). Building Information Modeling and Geographic Information System: Integrated Framework in Support of Facility Management (FM). *Buildings*, 14(3). <https://doi.org/10.3390/buildings14030610>
- Demirdöğen, G., Işık, Z., & Arayıcı, Y. (2023). BIM-based big data analytic system for healthcare facility management. *Journal of Building Engineering*, 64. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105713>
- Dulanto Cam, G. R., Chamochumbi Chvedine, R. A., & Del Savio, A. A. (2025). *Lean Construction for BIM Asset Management in Healthcare Facilities: A Systematic Literature Review*. <https://doi.org/10.24928/2025/0253>
- Harode, A., Thabet, W., & Dongre, P. (2023). A Tool-Based System Architecture for A Digital Twin: A Case Study in a Healthcare Facility. *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, 28, 107–137. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2023.006>
- Jan van Eck, N., & Waltman, L. (2023). *VOSviewer Manual*.
- Jegan, G. S., Rathore, D., Deep, S., & Jha, K. N. (2026). Building information modelling for the repair and maintenance of HVAC systems in healthcare facilities. *Built Environment Project and Asset Management*, 1–18. <https://doi.org/10.1108/BEPAM-05-2025-0137>

- Khan, S., Bhatti, G. A., Khan, M. J., & Nawaz, M. (2026). Evaluating the critical factors of building information modeling implementation using ordinal priority approach and grey relational analysis. *Quality and Quantity*, 60(2), 4577–4594. <https://doi.org/10.1007/s11135-025-02445-8>
- Losito, S., Campagna, L. M., Carlucci, F., & Fiorito, F. (2025). Energy Efficiency in Hospitals: A Review of Design Strategies for Resilience. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 765, 515–529. https://doi.org/10.1007/978-3-032-06978-8_27/SAVE-RESEARCH
- Mbabu, A., Underwood, J., Munir, M., & Wildenauer, A. (2026). A digital twin framework for lean strategic facility management in the UK healthcare built environment. *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, 1–22. <https://doi.org/10.1108/IJBPA-12-2024-0276>
- Moretti, N., Chan, Y. C., Nakaoka, M., Mukherjee, A., Merino, J., & Parlikad, A. K. (2025). Data integration for space-aware Digital Twins of hospital operations. *Automation in Construction*, 176. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106276>
- Nuvolari-Duodo, I., Brambilla, A., Sperati, B., Mangili, S., Dolcini, M., & Capolongo, S. (2026). The Challenge of Digital Innovation for Sustainable Healthcare Infrastructures: Current Practices in the Italian Context. *Sustainability (Switzerland)*, 18(7), 3503. <https://doi.org/10.3390/SU18073503/S1>
- Schmitter, P., & Ashworth, S. (2023). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Digitally Transforming Facility Management in Healthcare: A Systematic Review of Key Digital Technologies and Systems* (T.-S. A. , L. C.

M. , L. S. Klungseth N.J., Ed.).
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/1176/1/012012>

Tmmam, A. A. A., Elhefnawy, M. H., & Marghany, E. A. E. M. (2026). Optimizing the Efficiency of Operations & Maintenance Processes in Hospital Buildings Using Digital Systems & Applications. *Journal of Engineering Sciences*, 54(2), 319–343.
<https://doi.org/10.21608/jesaun.2025.376128.1478>

Zhairy, A. E., Daoud, A. O., & Mohamed, A. G. (2026). Transforming facility management with BIM, IoT, and Digital Twin: a data-driven approach to air quality monitoring. *Architectural Engineering and Design Management*, 22(2), 426–445.
<https://doi.org/10.1080/17452007.2025.2543813>

Zhang, X., Zhang, Y., Peng, Y., Au-Yong, C. P., & Awang, N. A. (2026). Transforming healthcare facility management with digital technologies: A systematic review and future roadmap. In *Advanced Engineering Informatics* (Vol. 71). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2026.104404>

MİMARLIK ALANINDA
GÜNCEL KONULAR VE
AKADEMİK DEĞERLENDİRMELER

yaz
yayınları

YAZ Yayınları
M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar / AFYONKARAHİSAR
Tel : (0 531) 880 92 99
yazyayinlari@gmail.com • www.yazyayinlari.com