

5. ULUSAL YAPI FİZİĞİ VE ÇEVRE KONTROLÜ KONGRESİ

Bildiriler Kitabı

7-8 Mayıs 2026 • İTÜ Mimarlık Fakültesi



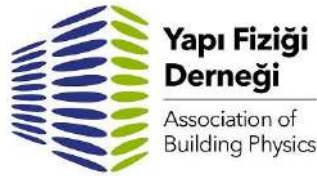
**Yapı Fiziği
Derneği**

Association of
Building Physics

www.yapifizigidernegi.org

5. ULUSAL YAPI FİZİĞİ VE ÇEVRE KONTROLÜ KONGRESİ

07-08 Mayıs 2026
İTÜ Taşkışla, İstanbul



www.yapifizigidernegi.org

5. ULUSAL YAPI FİZİĞİ VE ÇEVRE KONTROLÜ KONGRESİ: BİLDİRİLER KİTABI

7–8 Mayıs 2026 / İstanbul, Türkiye

Editörler: Nuri Serteser, Zehra Aybike Kılıç, Halime Firdevs Taşkın, Mehmet Akif Aydın, Sümeyye Sena Bastem, Yusuf Salih Diken, Eda Köse Murathan, Elif Ranaer Harputluoğlu, Şafak Beşiroğlu

İstanbul, 2026

e-ISBN 978-975-561-777-0

İTÜ Yayınevi. No: 2026.2/14

© İTÜ Yayınevi

Bu kitabın her hakkı saklıdır ve tüm yayın hakları “İTÜ Yayınevi”ne aittir. Bu kitabın tamamı ya da herhangi bir bölümü, yayınevinin izni olmaksızın yayınlanamaz, basılamaz, mikrofilme çekilemez, doğrudan veya dolaylı olarak kullanılamaz. Teksir, fotokopi veya başka teknikle çoğaltılamaz, bilgisayarda veya dizgi makinelerinde işlenebilecek bir ortama aktarılamaz. Kitapta yayınlanan tüm metin ve görsellerin sorumluluğu yazar/yazarlara aittir.

Ulusal Yapı Fiziği ve Çevre Kontrolü Kongresi (5th : 2026 : Istanbul, Turkey) 5. Ulusal Yapı Fiziği ve Çevre Kontrolü Kongresi: Bildiriler Kitabı / editör ekibi: Nuri Serteser, Zehra Aybike Kılıç, Halime Firdevs Taşkın, Mehmet Akif Aydın, Sümeyye Sena Bastem, Yusuf Salih Diken, Eda Köse Murathan, Elif Ranaer Harputluoğlu, Şafak Beşiroğlu. -- İstanbul: İTÜ Yayınevi, 2026. 553 sayfa. -- 1. basım -- (İTÜ Yayınevi. No: 2026.2/14) İllüstrasyonlar içerir. ISBN 978-975-561-777-0 1. Mimarlık -- Kongreler 2. Yapılar -- Kongreler 3. Binalar -- Kongreler TH6014.U58 2026	CIP

İTÜ YAYINEVİ

Sertifika No: 70051

İTÜ Ayazağa Kampüsü, Turgut Özal Yabancı Diller Yüksekokulu

Kongre ve Öğrenci Sosyal Merkezi

34469 Maslak İSTANBUL

0212 285 75 05

www.ituyayinevi.itu.edu.tr / ituyayinevi@itu.edu.tr



5. ULUSAL YAPI FİZİĞİ VE ÇEVRE KONTROLÜ KONGRESİ

Düzenleme Kurulu

Prof. Dr. Gül Koçlar Oral (İTÜ)
Prof. Dr. Alpin Köknel Yener (İTÜ)
Prof. Dr. Gülten Manioğlu (İTÜ)
Doç. Dr. Nuri Serteser (İTÜ)
Doç. Dr. Şule Filiz Akşit (İTÜ)
Doç. Dr. Tarık Serhat Bozkurt (İTÜ)
Doç. Dr. Feride Şener Yılmaz (İTÜ)
Arş. Gör. Dr. Zehra Aybike Kılıç (İTÜ)
Arş. Gör. Mehmet Akif Aydın (İTÜ)
Arş. Gör. Halime Firdevs Taşkın (İTÜ)
Arş. Gör. Sümeyye Sena Bastem (İTÜ)
Arş. Gör. Yusuf Salih Diken (İTÜ)
Arş. Gör. Dr. Eda Köse Murathan (AÇÜ)
Arş. Gör. Elif Ranaer Harputluoğlu (BTÜ)
Yük. Mim. Şafak Beşiroğlu

Sekreteryas

Arş. Gör. Dr. Zehra Aybike Kılıç (İTÜ)
Arş. Gör. Halime Firdevs Taşkın (İTÜ)
Arş. Gör. Mehmet Akif Aydın (İTÜ)
Arş. Gör. Sümeyye Sena Bastem (İTÜ)
Arş. Gör. Yusuf Salih Diken (İTÜ)
Arş. Gör. Dr. Eda Köse Murathan (AÇÜ)
Arş. Gör. Elif Ranaer Harputluoğlu (BTÜ)
Yük. Mim. Şafak Beşiroğlu

Bilim Kurulu

Prof. Dr. A. Nil Türkeri (İTÜ)
Prof. Dr. Alpin Köknel Yener (İTÜ)
Prof. Dr. Aslıhan Ünlü (ÖZÜ)
Prof. Dr. Banu Manav (Kadir Has Üni.)
Prof. Dr. Esmâ Mıhlayanlar (Trakya Üni.)
Prof. Dr. Gül Koçlar Oral (İTÜ)
Prof. Dr. Gülten Manioğlu (İTÜ)
Prof. Dr. Gülay Zorer Gedik (YTÜ)
Prof. Dr. Leyla Tanaçan (İTÜ)
Prof. Dr. Mehmet Şener Küçükdoğu (İTÜ)
Prof. Dr. Mustafa Özgünler (MSGSÜ)
Prof. Dr. Neşe Yüğrük Akdağ (YTÜ)
Prof. Dr. Rana Kutlu (İKÜ)
Prof. Dr. Rengin Ünver (YTÜ)
Prof. Dr. Semiha Kartal (Trakya Üni.)
Prof. Dr. Sevtap Yılmaz (Medipol Üni.)
Prof. Dr. Türkan Göksal Özbalta (Ege Üni.)
Prof. Dr. Vildan Ok (İTÜ)
Prof. Dr. Yusuf Yıldız (Balıkesir Üni.)
Doç. Dr. Feride Şener Yılmaz (İTÜ)
Doç. Dr. Filiz Umaroğulları (Trakya Üni.)
Doç. Dr. Halet Almıla Büyüktaşkın (İTÜ)
Doç. Dr. İlker Karadağ (SAÜ)
Doç. Dr. Mehmet Nuri İlgürel (YTÜ)
Doç. Dr. Neslihan Türkmenoğlu Bayraktar (Kocaeli Üni.)
Doç. Dr. Nuri Serteser (İTÜ)
Doç. Dr. Özlem Sümengen (Erciyes Üni.)
Doç. Dr. Suzi Dilara Mangan (YTÜ)
Doç. Dr. Şule Filiz Akşit (İTÜ)
Doç. Dr. Tarık Serhat Bozkurt (İTÜ)
Doç. Dr. Yiğit Yılmaz (BAUN)
Doç. Dr. Zuhâl Özçetin (Uşak Üni.)
Dr. Öğr. Üyesi Alpay Akgüç (İstanbul Bilgi Üni.)
Dr. Öğr. Üyesi Bilge Şan Özbilen (İKÜ)
Dr. Öğr. Üyesi Gözde Gali Taşçı (İstanbul Beykent Üni.)
Dr. Öğr. Üyesi İdil Erdemir Kocagil (ÖZÜ)
Dr. Neşe Ganiç Sağlam

İÇİNDEKİLER

Eğitim Yapılarında Fiziksel Çevre Koşullarının İncelenmesi: Bir Üniversite Binası Örneği.....1 Elif Kaplan	1
Enerji Etkin Cephelerde Piezoelektrik Rüzgar Enerjisi Hasadı.....11 Bita Akhgar, Aslıhan Ünlü	11
Geleneksel Evlerde Doğal Havalandırma: Sıcak Nemli İklim Bölgesi.....20 Sevra Yılmaz, Şule Filiz Akşit	20
Fiziksel Çevre Koşullarına Dayalı Tasarım: Bir Yapı Dersi Örnekleme.....33 Zelal Çınar, Işıl Ruhi-Sipahioğlu	33
Sıcak İklimlerde Yansıtıcı Çatı Kaplamalarının Isıl Davranışı ve Bina Enerji Performansına Etkileri.....44 Gülşah Nur Özdemir, Burak Barışık, Gülçin Yavaş, Gülden G. Akkurt	44
Tarihi Binalarda Yangın Kompartımanlarının Sürdürülebilirlik ve Dirençlilik Açısından Değerlendirilmesi.....54 Esma Birekul, Nuri Serteser	54
Kıyı Bölgelerinde İklim Değişikliği ve Yapılı Çevrede İklim Dirençliliği Uygulamaları: Alternatif Su Kaynakları Kullanımı.....64 Tuğba Haşal, Nilüfer Taş, Murat Taş	64
Endüstriyel Gürültü Ortamlarındaki Açık Planlı Ofislerin Akustik Performansının İncelenmesi Üzerine Bir Çalışma.....75 Oğuzhan Tutanç, Oya Babacan	75
Konut Cephelelerinin Enerji ve Karbon Performansının BIM Destekli Değerlendirmesi.....84 Hatidza Çapkın, Esra Bostancıoğlu	84
Avlu Plan Şemasına Sahip Binalarda Akustik Performansın Değerlendirilmesi ve İşitsel Ortamın Çözümlemesi.....97 Muammer Yaman, Hilal Parlak Arslan	97
İnsan Sağlığı ve Kültür Varlığı Odaklı Kirletici Emisyon Ölçütlerinin Karşılaştırılması.....107 Musa Ünsal, Nazire Papatya Seçkin Tahtaloğlu, Mehmet Uğuryol	107
Sıcak ve Kurak İklim Geleneksel Mimarisinde Mekansal İç Göçün Enerji Performansına Etkisi.....117 Ruşen Ergün	117
Mantolama Uygulamalarında Balkon Detayının Göz Ardı Edilmesinin Termal Performans Üzerindeki Etkileri.....126 Ruşen Ergün	126
Uluslararası Yeşil Bina Sertifika Sistemleri Üzerine Bir Değerlendirme.....135 Makbule Hande Taş, Özlem Sümengen	135
Binalarda Zamansal Enerji Dayanıklılığı: Pasif Tasarım Stratejilerinin Uzun Dönemli Değerlendirmesi.....145 Gökçe Tomrukçu, Aslıhan Ünlü	145
Seraların Enerji Verimliliği Açısından Değerlendirilmesi.....156 Buğra Çınkır, Şule Filiz Akşit	156

BİM Ortamında Kural Tabanlı Otomatik Yangın Güvenliği Denetimi.....	168
Tuba Tunç Kurt	
Bina Performans Çalışmalarında Test Binalarının Rolünün İncelenmesi.....	179
Simin Pakakar, Suzi Dilara Mangan	
Sürdürülebilir Akustik Malzemelerin Ses Yutma ve Çevresel Performanslarının İncelenmesi: Türkiye Örneği.....	190
Doğukan Danışmaz, Ayşe Bayraktaroğlu, Seda Kulak Dalkılıç	
Mevcut Bina Stokunun Enerji Performansı Açısından Haritalanması: Beşiktaş Örneği.....	200
Beyzanur Baş Kahveci, Suzi Dilara Mangan	
Sağlık Yapılarında Hasta Odalarının Gün Işığı Performansının Farklı Simülasyon Araçları ile Karşılaştırılması.....	210
Sena Gazan, Mustafa Serhan Ünlütürk, Berk Ekici	
Dış Duvar Sistemlerinin Gömülü ve Kullanım Fazı Emisyonlarının EPD Tabanlı Karşılaştırılması.....	220
T. Gülfem Kaya, Ferhan Hasmeden	
BEP-TR ile Enerji Performans Analizi: Erciyes Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Örneği.....	232
Büşra Mete, Halime Kılıç, Melike Kıvanç, Selman Sevindik	
Yapı Fiziği Eğitiminde Yapay Zekâ ile Görsel-Şema Üretimi.....	242
Ayşe Melike Zenbil, Rabia Emir	
İnşaat Sektörünün Döngüsel Dönüşümü: Çok Paydaşlı Döngüsel Ekonomi Çerçevesi.....	252
Hafize Büşra Bostancı, Ali Murat Tanyer	
Ahşap Yapıların İnşa Sürecinde Nem Etkisi ve Nemin Dayanıklılık Üzerine Etkileri.....	262
Mehmet Kara, Zehra Canan Girgin	
Net Sıfır Binalara Geçiş Sürecinde Türkiye ve Avrupa Mevzuatlarının Karşılaştırmalı Analizi.....	273
Selman Sevindik, Dilek Arslan, Şeyma Atik, Zehra Nur Dişçi, Kübra Doğuç	
Farklı Ülke Mevzuatlarında Eğitim Yapılarının Yangın Güvenliği Kriterleri: Karşılaştırmalı Bir İnceleme.....	284
Volkan Öztaş, Hande Apak	
Pasif Yangın Durdurucu Sistemlerin Akustik Performansının Değerlendirilmesi.....	294
Mehmet Okay	
Üç Enerji Standardına Göre Konutların Gerçek ve Hesaplanan Performans Karşılaştırması.....	304
Bilal Gökgün, Mehmet Türkoğlu	
Salonların Çok Amaçlı Kullanımında Tasarım İlkelerinin Geliştirilmesi.....	314
Gülçin Tuba Ertekin, Mehmet Nuri İlgürel	
Güneş Kontrol Elemanlarının Güneş Işığı Performansı ve Enerji Tüketimine Etkisinin İncelenmesi.....	324
Ece Yıldız, Şensin Aydın Yağmur	
Sınıflarda Işığın Görsel Olmayan Etkileri: Fizyolojik, Psikolojik ve Bilişsel Bir Çerçeve.....	336
Elif Demirci, Feride Şener Yılmaz, Valerio Roberto Maria Lo Verso	
Toplanma Amaçlı Binalarda Pasif Yangın Güvenliği Stratejilerinin Mimari Tasarım Bağlamında Değerlendirilmesi.....	348
Zuhal Özçetin, Merve Görkem, Sebahat Gül İlisulu	

Dinamik Cephe Elemanlarının Türkiye'nin Farklı Güneşli Koşullarına Sahip İlleri İçin Yeterli Güneşliliğinin Sağlanması ve Kamaşma Olasılığı Açısından Değerlendirilmesi.....	358
Nurbanu Düzgün Atalay, Şensin Aydın Yağmur	
Açık Ofis Tasarımında Akustik Konfor ve Yangın Güvenliği Performans Etkileşimi.....	372
Nilüfer Kızılkaya, Işın Meriç Nursal	
Uluslararası Standartlar Bağlamında Türkiye'de nSEB Mevzuatı ve Devlet Teşvikleri.....	384
Nagihan Küçükönder, Atacan Akgün, Selman Sevindik	
Baffle Panellerin Ses Yutma Performansının ISO 354'e Göre Ölçüm Yöntemleri Açısından Karşılaştırılması.....	394
Güven Elban, Konca Şaher, Seda Kulak Dalkılıç, Feridun Öziş, Suat Vergili	
Isıl Performans ve Gömülü Enerji İçin Makine Öğrenmesi Tabanlı Hibrit Malzeme Seçim Modeli.....	402
Berfin Yıldız	
Mimari Projelerin Erken Aşamalarında Kullanılacak BIM Tabanlı Çok Katmanlı Yangın Riski Değerlendirme Modeli: Kavramsal Bir Çerçeve.....	411
Şafak Beşiroğlu, Nuri Serteser	
Yapma Çevre Tasarım Yaklaşımlarının Nörobilim Çerçevesinden İncelenmesi.....	423
H. Merve Yanardağ Erdener, Şefik Evren Erdener	
Hasta Odalarında Yapı Elemanı Bitirme Malzemelerinin Uçucu Organik Bileşik Emisyonları Bakımından Değerlendirilmesi.....	435
Hilal Çıkrıklar, Fatih Yazıcıoğlu	
Kampüs Ölçeğinde Biyoklimatik Konfor Koşullarının Değerlendirilmesi: Van YYÜ Örneği.....	446
Nilay Özeler Kanan, Onur Şatır	
Çok İşlevli Esnek Ofis Kurgularında Aydınlatma Tasarımı: BIM Tabanlı Performans Odaklı Yaklaşım.....	458
Sevda Şeko, Feride Şener Yılmaz	
İstanbul'da Yeni Toplu Konutların Konumsal Çeşitliliğine Bağlı Çevresel Etki Yüklerinin Değerlendirilmesi.....	468
İkranur Sena Akkaya, Caner Göçer	
İç Hava Kalitesi Açısından Yeşil Bina Sertifikasyon Sistemlerinin Karşılaştırmalı Analizi.....	480
Dilruba Yurtseven, Şule Filiz Akşit	
Hacim İçerisi Güneşliliği Performansına Camın Işık Geçirimi Çarpanının Etkisi- İstanbul Ofis Yapıları Örneği.....	491
Pınar Aydın, F. Rengin Ünver	
Biyobazlı Yalıtım Malzemelerinde Yangın Emniyeti ve Sürdürülebilirlik.....	503
Gökçe Saadet Arpacı Coşkun, Nuri Serteser	
TS 825 2013-2024 Bina Kabuğu Sınır Değerlerinin Isıtma ve Soğutma Tüketimleri Üzerine Etkisi.....	514
Mehmet Akif Aydın, Gül Koçlar Oral	
Ofis Binaları İçin Cephe Seçeneklerinin Enerji Tüketimi ve Karbon Salımı Açısından İncelenmesi: Antalya Örneği.....	525
Ebru Ünver Karaer, Gül Koçlar Oral	
Ofis Binalarında Radyant Soğutma ile Soğutma Yüklerinin Azaltılmasına Yönelik Bir Çalışma.....	533
Yasemin Kılıçoğlu, Gülten Manioğlu	

SUNUŞ

Yaşam biçimlerimizdeki çeşitlilik arttıkça yaşadığımız binalardan beklentilerimiz de her geçen gün biraz daha değişiyor. Dünün konfor anlayışıyla bugünkü elbette aynı değil. Yıllar önce yapılmış binaların çoğu artık ihtiyaçlarımıza cevap vermekten uzak. Teknoloji isteklerimize hizmet eden vefalı bir hizmetkar gibi, her gün gelişiyor, her gün bize yeni olanaklar sunuyor. Bizler, teknolojinin sunduğu bu imkanlarla bugünün ihtiyaçlarına uygun binalar tasarlamaya devam ediyoruz. Bu konfor gereksinmelerinin çok büyük bir bölümü ise yapı fiziğinin çalışma konuları ile ilişkili.

Pek çok konuda olduğu gibi yapı fiziği çalışma konuları da dünle ayı biçimde ele alınmıyor. Dünyada son elli yıldır yaşanan enerji krizleri ve iklim değişikliği, yapı fiziği konularına bakışı geleneksel yöntemlerden uzaklaştırarak modern yaklaşımlara geçişini hızlandırdı. Yapı fiziği konuları sadece ısı kaybının değil, gün ışığı, akustik, iç hava kalitesi, doğal havalandırma, yangın emniyeti ve su kullanımı gibi parametrelerin bir bütün olarak ele alındığı disiplinlerarası bir mühendislik ve bilim dalına dönüştürdü.

2014 yılından bu yana Yapı Fiziği Derneği tarafından organize edilen Ulusal Yapı Fiziği ve Çevre Kontrolü Kongreleri, ülkemizde yapı fiziğinin bilimsel temellere dayanan bir yapı içinde gelişmesini hedefleyen çalışmalara zemin oluşturmuştur.

Bu yılki Ulusal Yapı Fiziği ve Çevre Kontrolü Kongresi, enerji etkin pasif ve aktif sistemlerden, iklimsel, görsel ve işitsel konfor koşullarına; yaklaşık sıfır enerjili binalar ve sıfır karbon yaklaşımlarından suyun etkin ve verimli kullanımı, yangın emniyeti, bina ve yakın çevresinde rüzgar konforuna kadar geniş bir çerçevede yapı fiziği ve çevre kontrolüne ilişkin güncel konuları kapsamlı bir şekilde ele almaktadır. Bu kapsam yalnızca tasarım ilkeleriyle sınırlı kalmayıp aynı zamanda bina enerji modelleri, performans simülasyonları, dijitalleşme ile yapay zekâ ve makine öğrenmesi temelli çalışmaların yapı fiziği ve çevre kontrolü araştırmalarında ve performans değerlendirmelerinde dönüştürücü rolüne odaklanmaktadır.

Ulusal Kongrenin başta yapı fiziği alanında çalışmalar yapan değerli akademisyenler, profesyonel mimarlar ve uygulamacılar, malzeme, ürün ve sistem üretici ve ithalatçıları ile kıymetli öğrencilerimizin bilgi birikimlerinin artmasına katkı sağlayacağını umuyorum.

Bu kongrenin gerçekleşmesinde katkı sağlayan organizasyon komitesine, kıymetli bilim kurulu üyelerine, bildiri sahiplerine; sponsor olarak ve mesleki bilgilerini paylaşarak desteğini esirgemeyen ülkemizin saygın firmalarından Elmor Tesisat Malzemesi Ticaret A.Ş.'ye, Arçelik Pazarlama A.Ş.'ye ve Geberit Türkiye'ye; dinleyici olarak katılım sağlayan değerli öğrencilerimize, meslek insanlarına ve yapı fiziği konularına ilgi duyan herkese sonsuz teşekkür ederim.

Doç. Dr. Nuri SERTESER
Yapı Fiziği Derneği Başkanı

EĞİTİM YAPILARINDA FİZİKSEL ÇEVRE KOŞULLARININ İNCELENMESİ: BİR ÜNİVERSİTE BİNASI ÖRNEĞİ

Elif Kaplan^{1*}

¹Fenerbahçe Üniversitesi Mimarlık ve Tasarım Fakültesi
Ataşehir, İstanbul, 34758

ÖZET

Eğitim yapıları, okul öncesinden üniversiteye kadar çeşitli yaş gruplarına hizmet eden, öğrenme ve öğretim faaliyetlerinin gerçekleştiği mekânlardır. Bu yapılarda, öğrencinin bilişsel gelişimini desteklemek ve eğitim-öğretim sürecinin maksimum verimlilikle sürdürülebilmesi için bina, yakın çevre ve mekan tasarımının doğru planlanması kadar fiziksel çevre koşullarının da doğru planlanması büyük önem taşımaktadır. Bu koşulların doğru tasarlanması, derslik kullanıcılarının konfor düzeyini artırarak, duyu durumun iyileşmesini ve verimin artmasını sağlamakta, öğrenme süreci üzerinde olumlu etkiler yaratmaktadır. Bu çalışmanın amacı, İstanbul'da bulunan bir üniversite binasının ısısal, görsel ve işitsel konfor parametrelerinin uygunluğu açısından incelenmesi ve mevcut durumun analiz edilmesidir. Bu analiz yapılırken ilgili standart ve yönetmelikler çerçevesinde değerlendirme yapılacak ve simülasyon programlarından faydalanılacaktır. Yapılan inceleme; ısısal konfor parametreleri binanın tüm yapı kabuğu, görsel ve işitsel konfor parametreleri ise yapıda örnek olarak seçilen bir derslik ve öğretim üyesi ofisi üzerinden olacaktır. İnceleme yapılırken kullanılacak simülasyon programları ısısal ve görsel konfor analizi için Design Builder ve Dialux programlarıdır. İşitsel konfor parametrelerinin analizi içinse Insul programından faydalanılacaktır. Çalışma sonuçları, yapının mevcut yapı kabuğundaki opak alan bileşenlerin ısısal konfor koşullarını sağladığını, ancak saydam alan bileşeni olarak kullanılan çift cam malzemenin ısısal, görsel ve işitsel konfor açısından yetersiz olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: Eğitim yapıları, Fizik ortam koşulları, Isısal konfor, Görsel konfor, İşitsel konfor.

ASSESSMENT OF PHYSICAL ENVIRONMENTAL CONDITIONS IN EDUCATIONAL BUILDINGS: A UNIVERSITY BUILDING CASE

ABSTRACT

Educational facilities are spaces where learning and teaching activities take place, serving various age groups from preschool to university. Planning physical environmental conditions in these buildings is just as important as proper planning of the building, its immediate surroundings, and spatial design in order to support students' cognitive development and effective education. This study aims to evaluate the current state and investigate the adequacy of thermal, visual, and auditory comfort factors in a university building located in Istanbul. Simulation programs will be employed, and this analysis will be carried out within the parameters of pertinent regulations and standards. The study will focus on the visual and auditory comfort aspects of a specific classroom and faculty office, as well as the building's overall thermal comfort parameters. Thermal and visual comfort analyses will be conducted using Design Builder and Dialux. Insul will be used to analyze auditory comfort factors. The study's findings demonstrate that while the building shell opaque area components offer thermal comfort, the transparent area component's double-glazed glass is insufficient for thermal, visual, and aural comfort.

Keywords: Educational buildings, Physical environmental conditions, Thermal comfort, Visual comfort, Auditory comfort.

^{1*}Sorumlu yazar e-posta adresi: elif.kaplan@fbu.edu.tr

1. GİRİŞ

Eğitim yapıları, bireylerin çocukluk döneminden yetişkinliğe uzanan eğitim süreçlerinde öğrenme ve öğretim faaliyetlerinin gerçekleştiği temel mekanlardır. Bu mekanlarda öğrencilerin bilişsel gelişiminin desteklenmesi ve eğitim, öğretimin en iyi şekilde sürdürülebilmesi için bina, yakın çevre ve mekan tasarımının doğru planlanması kadar fiziksel çevre koşullarının da doğru planlanması büyük önem taşımaktadır. Aydınlatma, renk, ısı, havalandırma, akustik gibi fiziksel çevre koşullarının doğru planlanması öğrencilerin konfor düzeylerini olumlu yönde etkileyerek, duygu durumun iyileşmesine, verimin artmasına, öğrenme sürecinin iyileşmesine katkı sağlayacaktır. Literatürde fizik ortam konfor koşullarının bir arada öğrenciler üzerindeki etkilerini inceleyen farklı çalışmalar bulunmaktadır [1-4]. Bu çalışmalar aydınlatma, ısı, ses, havalandırma ve renk gibi parametrelerin iyi planlanmasının öğrenme süreci üzerinde önemli etkiler oluşturduğunu vurgulamaktadır. Chiou vd. [5] dersliklerde görsel konfor koşullarının sağlanmasının öğrencilerin derse odaklanması, anlatılanları kavrama ve öğrenme üzerinde olumlu etkileri olduğunu belirtmiştir. Benzer şekilde Samani vd. de [6] görsel konfor koşullarının iyi planlanmasının öğrenme performansını artırıcı etki yaptığını savunmuştur. Yapılan çalışmalar eğitim kurumlarında akustik konfor koşullarının iyileştirilmesinin öğrencinin anlama, odaklanma ve akıl yürütme süreci üzerinde önemli etki yaptığını ve teorik veya uygulamalı bilgilerin öğrenciye en iyi şekilde aktarılmasını sağladığını belirtmiştir [7]. Mercugliano vd. [8] işitsel konfor koşullarının, dersliklerde ve etkili iletişimin öğrenme ve öğretme için kritik olduğu eğitim kurumlarında doğru planlanmasının öğrenciler üzerinde olumlu etkiler yarattığını vurgulamıştır. Fiziksel konfor koşullarının bir diğeri olan ısısal konfor koşullarının da eğitim yapılarında doğru planlanması öğrenme sürecinde önemli etkiler yaratmaktadır [9,10]. Lamberti vd. [9] ısısal konfor koşullarının doğru planlanmasının öğrencilerin üretkenliğini artıracığını belirtmiştir. Gutierrez vd. [11] ısısal konforun öğrenme ve öğrenci refahına elverişli bir ortam sağlamak için önemine vurgu yapmıştır.

Bu çalışmada, İstanbul'da bulunan bir üniversite yapısının fiziksel çevre koşullarının ısısal, görsel ve işitsel konfor parametrelerinin uygunluğu açısından incelenmesi ve mevcut durumun analiz edilmesi amaçlanmaktadır. Bu analiz yapılırken ilgili standart ve yönetmelikler çerçevesinde değerlendirme yapılacak ve ilgili simülasyon programlarından faydalanılacaktır.

2. YÖNTEM

Çalışma kapsamında üniversite binası mevcut durum tespitinde; ısısal konfor için tüm yapı, işitsel ve görsel konfor içinse örnek olarak seçilen derslik ve öğretim üyesi ofisi üzerinden inceleme yapılacaktır. Derslikte 70 öğrenci eğitim almakta, ofiste ise 5 öğretim üyesi bulunmaktadır. Örnek olarak seçilen derslik ve öğretim üyesi ofisi yapı kabuğu saydam alan oranları, yapıda bulunan diğer derslik ve ofislerle benzerlik göstermekte ve yapıda tüm kat planları tekrarlayarak devam etmektedir. ısısal konfor verilerinin analizi için tüm yapı Design Builder programında modellenmiştir. Modellemede döşemede, iç ve dış duvar kesitlerinde, çatı ve temelde kullanılan mevcut malzeme bilgilerine ve kalınlıklarına göre veri girişi gerçekleştirilmiştir. Görsel konfor analizi için Dialux programı kullanılmış, program aracılığıyla 21 Aralık 09.00, 21 Aralık 15.00, 21 Haziran 09.00, 21 Haziran 15.00 gün ve saatleri için günışığı hesaplaması yapılmıştır. Yapı akustiği işitsel konfor parametrelerinin analizi içinse Insul programından faydalanılmıştır. Opak

alan, saydam alan ve kompozit alan ses geçiş kaybı değerleri Insul aracılığıyla hesaplanmış, hacmi etkileyen çevresel gürültü düzeyleri ise bölgenin gürültü haritaları incelenerek belirlenmiştir.

2.1. Üniversite Binası Özellikleri

Üniversite binası, ilçe merkezinde bulunan bir meydan içerisinde yer alan, mimari çizim aşamasında iş merkezi olarak tasarlanmış fakat inşaatı tamamlandıktan sonra eğitim amaçlı olarak kullanılmaya başlanmış bir yapıdır. Yapının inşası 2013 yılında tamamlanmıştır. Üniversite binasının bulunduğu adanın yan tarafında 15000 m²'lik geniş alanlı bir park bulunmaktadır. Beş otopark katı, zemin ve üzeri 15 kattan oluşan binanın toplam inşaat alanı 18310 m²'dir.

2.2. Ölçme, Değerlendirme ve Prosedür

2.2.1. Isısal konfor verileri

Yapı kabuğu alanı prekast cephe kaplaması ve kat boyunca yükselen pencerelerden oluşmaktadır. Yapı kabuğunda opak alan/saydam alan oranı % 60'tır. Binada mevcut yapı kabuğu opak alan kesiti (dıştan içe); prekast cephe kaplama (16 cm), ısı yalıtımı (2 cm), su yalıtımı (0.2 cm) ve alçıpan (1.25 cm) olarak sıralanmaktadır. Binada ara duvarlar 10 cm hava boşluklu alçıpan olarak kurgulanmıştır. Döşemede derslik, öğretim üyesi ofisleri ve sirkülasyon alanlarında PVC esaslı döşeme kaplama malzemesi (0.2 mm), ıslak hacimlerde ise seramik (1 cm) kullanılmıştır. Ana sirkülasyon alanlarında döşemede mermer ve seramik kullanılmıştır. Binada teras çatı bulunmaktadır (%1 eğimli). Teras çatıyı oluşturan katmanlar (dıştan içe); seramik kaplama, su yalıtımı (0.4+0.4 mm), eğim betonu (5 cm), polietilen şilte, ısı yalıtımı (9 cm), buhar kesici ve astar olarak sıralanabilir. Bina otopark zemini kuvarslı şap (7 cm) ile kaplıdır. Binada 120 cm kalınlığında radye temel bulunmaktadır.

Binada yapı kabuğu saydam alanlarda 20 mm hava boşluklu, dış yüzeyi 6 mm kalınlığında fümeye reflekte, iç yüzeyi 6 mm kalınlıkta şeffaf cam olmak üzere temperli çift cam kullanılmıştır. Saydam alana ait güneşliği, ısı geçirgenlik katsayısı ve güneş enerjisi değerlerini içeren performans değerleri Çizelge 1'de yer almaktadır.

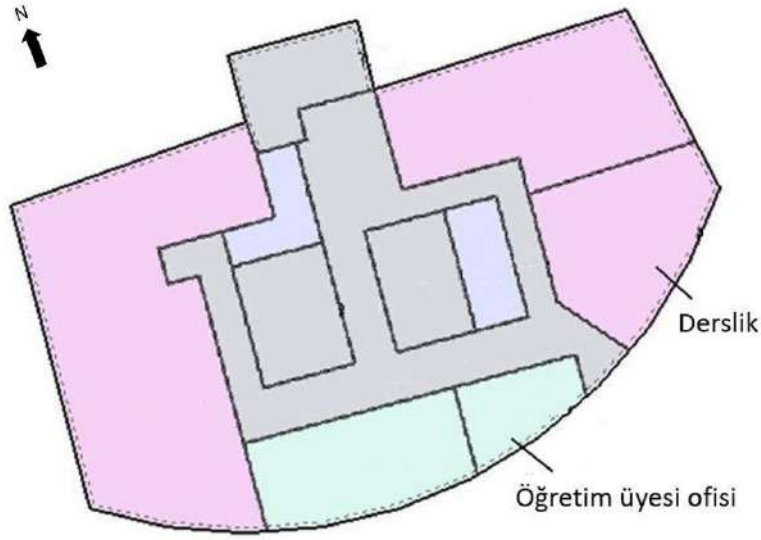
Çizelge 1. Yapı kabuğu saydam alan performans değerleri

Güneşliği değerleri	Güneşliği geçirgenliği	%18
	Güneşliği dışa yansıtma	%10
	Güneşliği içe yansıtma	%34
Isı geçirgenlik katsayısı	U değeri (W/m ² k)	2,7
Güneş enerjisi değerleri	Solar faktör	%31
	UV geçirgenlik	%5

2.2.2. Görsel konfor verileri

Çalışmada binanın mevcut durumunun görsel ve işitsel konfor koşullarının tespitinde derslik ve öğretim üyesi ofisi üzerinden inceleme yapılmıştır. Örnek olarak ele alınan bu alanlar binanın 10. katında olup, yapı kabuğunun eğimli yüzünde, güney ve güneydoğu yönlerindedir. Design Builder simülasyon programında modelleme yapılırken, yapıda her kat planında bulunan mekanlar işlevlerine göre bölgelere ayrılmış ve tanımlanmıştır. Buna göre derslik ve öğretim üyesi ofisinin

kat planındaki yeri **Şekil 1**'de sunulmaktadır. Plan üzerinde derslik alanları pembe, ofis alanları mavi, sirkülasyon alanları ve diğer alanlar gri ile renklendirilerek gösterilmiştir.



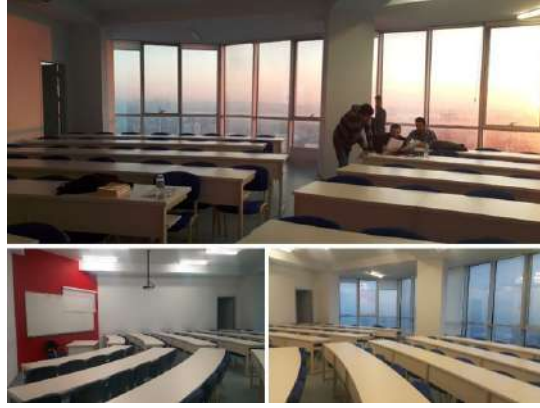
Şekil 1. Derslik ve öğretim üyesi ofisi kat planı yerleşimi

Öğretim üyesi ofisi taban alanı $35,76 \text{ m}^2$, yapı kabuğu alanı ise $30,6 \text{ m}^2$ 'dir. Ofis içinde 2 adet $2,3 \text{ m} \times 3,3 \text{ m}$ ölçülerinde pencere bulunmaktadır. Pencere alanı toplam alanı $15,18 \text{ m}^2$ 'dir. Ofis yapı kabuğunda saydam alanın opak alana oranı % 50'dir (**Şekil 2**). Pencere kenarlarında 5 cm kalınlığında alüminyum doğrama kullanılmıştır. Ofis içinde yapay aydınlatmada 6 adet Pelsan aydınlatma aygıtı kullanılmaktadır. Her bir aydınlatma aygıtı içinde 4 adet Osram L18W/840 lamba bulunmaktadır. Ofis tavan ve duvarları açık gri renkli boya ile kaplı, döşeme ise orta koyulukta gri renkli linolyum ile kaplıdır.



Şekil 2. Öğretim üyesi ofisi görünümü

Dersliğin taban alanı 112 m^2 , yapı kabuğu alanı ise $64,45 \text{ m}^2$ 'dir. Yapı kabuğunda pencerelerin toplam alanı $53,72 \text{ m}^2$ 'dir ve saydam alanın opak alana oranı % 83'tür. Derslik içinde yapay aydınlatma için 12 adet Pelsan aydınlatma aygıtı kullanılmaktadır. Derslikte tavan ve duvarlar açık gri renkli boya, yazı tahtasının bulunduğu duvar ise orta koyulukta kırmızı renkli boya ile kaplıdır. Döşemede orta koyulukta gri renkli linolyum bulunmaktadır (**Şekil 3**).



Şekil 3. Derslik görünümü

2.2.3. İşitsel konfor verileri

Derslik ve öğretim üyesi ofisi için yüzey alanları, malzemeleri ve kullanıcı sayısı değerleri doğrultusunda hacmin toplam yutuculuk değerleri hesaplanmıştır. Derslik hacmi 400 m^3 , öğretim üyesi ofisi hacmi ise $128,71 \text{ m}^3$ 'tür. Toplam yutuculuk (A); hacmin iç yüzeylerinin toplam yutuculuğu (A_y), nesnelerin toplam yutuculuğu (A_b) ve havanın yutuculuğu (A_h) değerlerinin toplanmasıyla elde edilmiştir (Çizelge 2).

Çizelge 2. Öğretim üyesi ofisi ve derslik için hacmin yutuculuğu değerleri

Hacmin yutuculuğu		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Öğretim üyesi ofisi	A_b	3,48	4,44	4,74	5,16	5,22	5,16
	A_h	-	-	-	0,10	3,86	1,13
	A_y	4,33	4,24	5,36	6,79	7,71	10,56
	A	7,81	8,68	10,11	12,06	16,79	16,86
Derslik	A_b	40,60	51,80	55,30	60,20	60,90	60,20
	A_h	-	-	-	0,32	12,00	3,52
	A_y	12,74	10,41	12,37	15,42	16,81	24,29
	A	53,34	62,21	67,68	75,94	89,71	88,01

İşitsel konfor verilerinin değerlendirilmesi için yapı kabuğu opak alan bilgileri doğrultusunda, malzemelerin yoğunluk değerleri kullanılarak tüm frekanslarda (125 Hz-4000 Hz) ses geçiş kaybı hesapları yapılmıştır. Yapıda opak ve saydam alan ses geçiş kaybı değerleri ise Insul programı ile hesaplatılmıştır. Bu doğrultuda elde edilen değerler Çizelge 3'te yer almaktadır. Üniversite binasının bulunduğu bölge gürültü haritası incelenerek hesaplamalarda hacmi etkileyen gürültü düzeyi olarak 'Trafik Gürültüsü' kabul edilmiştir [12]. Hacimde kabul edilebilir gürültü düzeyi olarak öğretim üyesi ofisi için NC 35, derslik için NC 30 eğrileri esas alınmıştır [13].

Çizelge 3. Opak alan ve saydam alan ses geçiş kaybı değerleri

Yapı elemanı ses geçiş kaybı	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
$R_{\text{Opak Alan}}$	42	45	51	57	58	71
$R_{\text{Saydam Alan}}$	22	25	37	44	40	41

Insul programında elde edilen opak ve saydam alan ses geçiş kaybı değerlerine göre kompozit duvar ses geçiş kaybı değeri hesaplatılmıştır. Bu hesaplama Insul programında aşağıda yer alan eşitlik uyarınca yapılmaktadır [14].

$$R'_{tr,s} = L_{eq,1,s} - L_{eq,2} + (10 \log (S/A)) - 3 \text{ dB}$$

Buna göre elde edilen derslik ve öğretim üyesi ofisi için birleşik cidar ses geçiş kaybı değerleri **Çizelge 4**'te sunulmuştur.

Çizelge 4. Derslik ve öğretim üyesi ofisi için birleşik cidar ses geçiş kaybı değerleri

Yapı elemanı ses geçiş kaybı değeri	R _{birleşik cidar}					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Öğretim üyesi ofisi	26	31	41	47	45	46
Derslik	24	28	39	45	43	43

3. BULGULAR

3.1. Isısal konfor verilerinin değerlendirilmesi

Üniversitesi binası bir otopark katı, zemin ve üzeri 15 kat olarak, mevcut opak ve saydam alan bilgileri girilerek Design Duilder programında 154 zone ile modellenmiş ve simülasyon yaptırılmıştır. Binaya ait opak ve saydam alan U değerleri **Çizelge 5**'te yer almaktadır. Isısal konfor verilerinin değerlendirmesinde TS 825 Standardı ile binanın mevcut dış duvar, tavan, zemine oturan taban ve pencere camlarının ısı geçirme katsayısı karşılaştırmaları yapılmıştır. TS 825 Isı Standardına göre yapı İstanbul 3. bölgede yer almaktadır. Buna göre binada dış duvar, tavan ve yapı tabanı ısı geçirme katsayısı bilgileri standartta belirtilen değerlerle uyumludur. Yapının saydam alan ısı geçirme katsayı değeri ise TS 825 Standartlarında sınır olarak gösterilen değer ile uyumlu değildir [15]. Standartta belirtilen ölçütlerle uyumlu olan değerler tablo üzerinde gri ile renklendirilerek gösterilmiştir.

Çizelge 5. TS 825 Standardına göre yapılan karşılaştırmalar

Opak Alan Kesiti	U _D (W/m ² K)	U _T (W/m ² K)	U _t (W/m ² K)	U _p (W/m ² K)
TS 825 (3. Bölge)	0,40	0,30	0,35	1,8
Mevcut durum	0,36	0,25	0,26	2,7

Üniversite binasının enerji tüketim oranları Design Builder ile yapılan simülasyon programı aracılığıyla farklı başlıklar altında incelenmiştir. Buna göre ısıtma, soğutma, elektrik ve toplam enerji tüketimine ilişkin değerler **Çizelge 6**'da sunulmuştur.

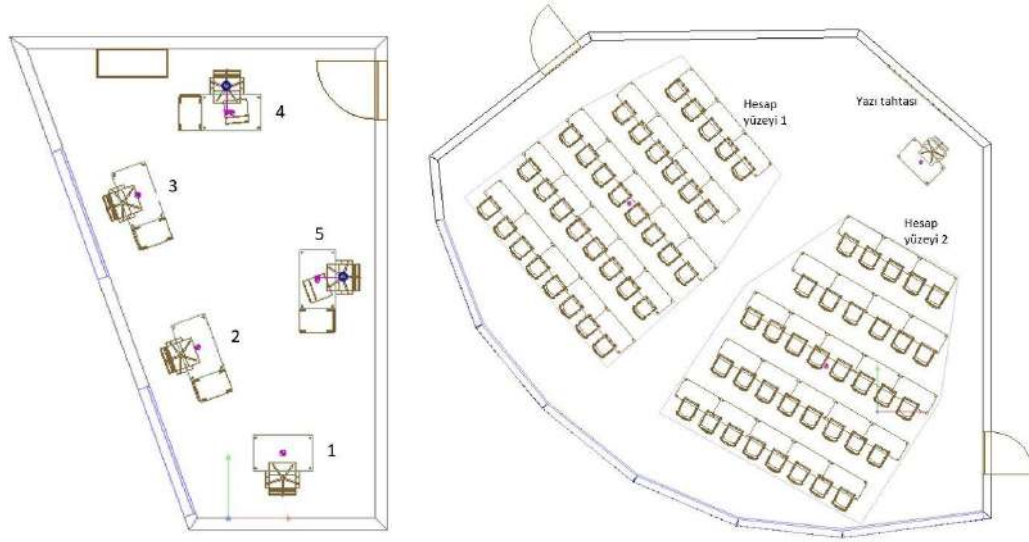
Çizelge 6. Binanın mevcut durumda tüketim giderleri

Mevcut Durum	Tüketim Giderleri
Isıtma	508238,09 kWh
Soğutma	1052523,91 kWh
Elektrik	440746,26 kWh
Toplam enerji	109,31 kWh/m²

Üniversitesi binasının yıllık toplam enerji tüketimi değeri olan 109.31 kW/m² BEP-Tr ulusal hesap modeline göre değerlendirildiğinde, binanın düşük enerjili yapı sınırları içinde yer aldığı görülmektedir.

3.2. Görsel konfor verilerinin değerlendirilmesi

Görsel konfor verilerinin değerlendirilmesi için üniversite binasında örnek olarak seçilen derslik ve öğretim üyesi ofisi Dialux aydınlatma programında mevcut yapı kabuğu, tefriş, yüzey renkleri ve yansıtma çarpanları bilgileri girilerek modellenmiş ve hesaplama yaptırılmıştır. Hesaplama günışığı; 21 Aralık saat 09.00, 21 Aralık saat 15.00, 21 Haziran saat 09.00, 21 Haziran saat 15.00 tarih ve saat bilgileri esas alınmıştır. Öğretim üyesi ofisi ve dersliğin Dialux'te oluşturulan planı **Şekil 4**'te görülmektedir. Ofiste çalışma masalarının üzerinde 0,85 m yükseklikte hesap yüzeyleri oluşturulmuştur (**Çizelge 7**).



Şekil 4. Dialux'te oluşturulan ofis ve derslik planları

Çizelge 7. Ofis için hesaplama sonuçları

	Masa 1		Masa 2		Masa 3		Masa 4		Masa 5	
	$\bar{E}_v, lx$	U_o	$\bar{E}_v, lx$	U_o	$\bar{E}_v, lx$	U_o	$\bar{E}_v, lx$	U_o	$\bar{E}_v, lx$	U_o
21 Aralık, saat 09.00	47	0,71	141	0,89	86	0,88	84	0,88	46	0,71
21 Aralık, saat 15.00	49	0,71	146	0,89	89	0,88	87	0,88	47	0,71
21 Haziran, saat 09.00	926	0,85	6665	0,71	4912	0,23	1165	0,91	899	0,89
21 Haziran, saat 15.00	138	0,72	319	0,90	233	0,93	233	0,91	151	0,73

Derslikte çalışma masalarının üzerinde 0,85 m yükseklikte olacak şekilde iki farklı hesap yüzeyi oluşturulmuştur (**Şekil 4**). Ayrıca derslikte yazı tahtası üzerinde ve öğretmen masası üzerinde de hesap yüzeyleri oluşturulmuştur (**Çizelge 8**).

Çizelge 8. Derslik için hesaplama sonuçları

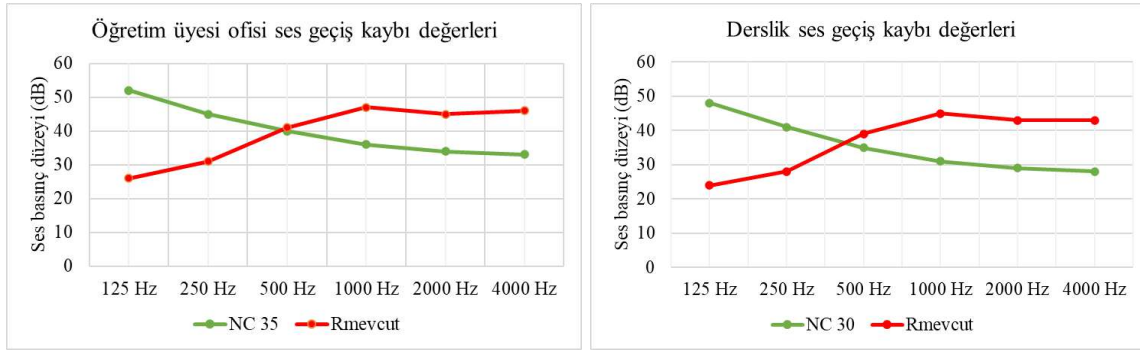
	Hesap yüzeyi 1		Hesap yüzeyi 2		Öğretmen masası		Yazı tahtası	
	$\bar{E}_v$ lx	U_o	$\bar{E}_v$ lx	U_o	$\bar{E}_v$ lx	U_o	$\bar{E}_v$ lx	U_o
21 Aralık, saat 09.00	74	0,54	98	0,45	36	0,99	20	0,94
21 Aralık, saat 15.00	76	0,54	101	0,45	37	0,99	20	0,94
21 Haziran, saat 09.00	2180	0,40	2649	0,36	762	1,00	373	0,95
21 Haziran, saat 15.00	219	0,65	266	0,57	149	0,99	118	0,98

Dialux'te yapılan hesap sonuçlarına göre, öğretim üyesi ofisi ve derslikte görsel konfor koşullarının gerçekleşmediği, her iki mekan içinde yeterli günışığı alımı oluşmadığı görülmektedir (**Çizelge 6-7**). Mevcut durumda yapı kabuğu saydam alanında kullanılan cam türünün günışığı geçirgenliğinin %18 gibi düşük bir değere sahip olması ve saydam alanda kullanılan çift camda dış yüzeyin koyu fümeye renkli cam olması günışığının hacim içine girmesini önemli derecede azaltıcı etki oluşturmaktadır. Öğretim üyesi ofisi ve derslikte göz hizasında oluşan kamaşma değeri standartta belirtilen değerin ($R_{UGL} \leq 19$) altındadır.

BS 12464-1 Avrupa Standardına göre eğitim yapılarında öğretim üyeleri ofislerinde ve dersliklerde sağlanması gereken ortalama aydınlık düzeyi değeri ($\bar{E}_m$) 500 lx, aydınlığın düzgün dağılımı değeri (U_o) ise 0,60'dır. [16]. BS EN 12464-1 Standardı gereğince sağlanması gereken değerler ile öğretim üyesi ofisi çalışma bölgelerinde 21 Aralık saat 09.00, 15.00 ve 21 Haziran saat 15.00'te elde edilen değerler karşılaştırıldığında yeterli aydınlık düzeylerinin oluşmadığı görülmektedir. Bu durumdan farklı olarak, 21 Haziran saat 09.00'da ise çalışma bölgelerindeki aydınlık düzeyleri gerekli olan düzeyin çok üzerindedir. Ofiste 21 Aralık saat 09.00, 15.00 ve 21 Haziran saat 09.00, 15.00'te aydınlığın düzgün dağılımı değerleri standartlarda belirtilen değerler ile uyumludur. BS EN 12464-1 Standardı gereğince sağlanması gereken değerler ile derslik çalışma bölgelerinde 21 Aralık saat 09.00, 15.00 ve 21 Haziran saat 15.00'te elde edilen değerler karşılaştırıldığında yeterli aydınlık düzeylerinin oluşmadığı görülmektedir. 21 Haziran saat 09.00'da ise çalışma bölgelerindeki aydınlık düzeyleri gerekli olan düzeyin çok üzerindedir. Öğrenci masaları üzerinde aydınlığın düzgün dağılımı değerleri ise standartlarda belirtilen değerler ile 21 Haziran saat 15.00'te uyumlu, 21 Aralık saat 09.00, 15.00 ve 21 Haziran saat 09.00'da ise genel olarak uyumsuzdur. Standartta belirtilen aydınlık düzeyi ve aydınlığın düzgün dağılımına ilişkin ölçütlerle uyumlu sonuçlar, Çizelge 6 ve 7'de gri ile renklendirilerek gösterilmiştir.

3.3. İşitsel konfor verilerinin değerlendirilmesi

Üniversite binasının bulunduğu ada kenarında dört şeritli ana yol yer almaktadır. Gürültü haritasından yapılan analiz sonucunda da işitsel konfor hesaplamaları yapılırken hacmi etkileyen gürültü türünün 'Trafik Gürültüsü' olarak kabul edilmesine karar verilmiştir [12]. Hacimde kabul edilebilir gürültü düzeyi olarak ise öğretim üyesi ofisi için NC 35, derslik için NC 30 eğrileri esas alınmıştır [13]. Buna göre öğretim üyesi ofisi ve derslik için yapılan ses geçiş kaybı hesaplamalarına göre 125 Hz ve 250 Hz frekanslarında, binanın yapı kabuğu ses geçiş kaybı değeri (R_{mevcut}) yetersiz kaldığı, diğer frekanslarda ise sorun oluşmadığı görülmektedir (**Şekil 5**).



Şekil 5. Ofis ve derslik için ses geçiş kaybı değerleri

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada İstanbul'da yer alan bir üniversite binası mevcut durumu ısısal, görsel ve işitsel konfor koşulları açısından değerlendirilmiştir. Buna göre üniversite binası; ılıman iklim bölgesinde yer alması ve planı uzun kenarı boyunca güney-güneydoğu yönünde doğru konumlandırılması, 2013 yılında tamamlanmış yeni bir bina olması ve yapı kabuğu opak alan kesitlerinde kullanılan malzemelerin ısı geçirgenlik katsayısı değerlerinin TS 825 standardında belirtilen sınır değerlerle uyumlu olması nedeniyle düşük enerji tüketen yapı sınıfında yer almaktadır. Yalnızca saydam alanda kullanılan koyu füme renkli çift cam ısı geçirme katsayısı değeri TS 825 standardında belirtilen sınır değerin üzerindedir. Benzer şekilde görsel konfor verilerinin değerlendirmelerinde de saydam alanlarda kullanılan çift cam ile mekan içinde yeterli aydınlık seviyesinin sağlanamadığı ve gündüz koşullarında dahi derslik ve ofislerde yapay aydınlatma kullanılması gerekliliği olduğu görülmektedir. Hem derslik hem de ofiste yapı kabuğunda yüksek opak alan/saydam alan oranlarına rağmen, saydam alanlarda kullanılan camın yansıtıcılık değerinin yüksek, günışığı geçirgenlik değerinin düşük olması hacim içinde yeterli aydınlık düzeyi oluşamamasına neden olmaktadır. Ayrıca füme renkli camın dış görüşü değiştirmesi de mekanı kullanan kişiler açısından olumsuz olarak değerlendirilmektedir. İşitsel konfor verileri değerlendirmelerinde de yapı kabuğunda saydam alanlarda kullanılan çift camın derslik ve ofis için ses geçiş kaybı değerlerini sağlayamadığı görülmektedir.

Eğitim yapıları, kullanım yoğunluklarının yüksek olması nedeniyle önemli düzeyde enerji tüketimine sahip yapı grupları arasında yer almaktadır. Bu nedenle bu yapılarda ısısal konfor koşullarının oluşturulması ve yapı kabuğunda standartlarda belirtilen değerlerle uyumlu malzemelerin seçilmesi önemlidir. İncelenen yapıda saydam alanda kullanılan cam malzeme yerine ısı geçirgenlik katsayısı daha düşük ve günışığı geçirgenliği daha yüksek olan bir cam kullanılması binada ısısal ve görsel konfor koşullarının iyileşmesini sağlayacak, tüketilen toplam enerji miktarının azaltılmasını mümkün kılacaktır. Ayrıca cam malzemenin ses geçiş kaybı değerinin artması da işitsel konfor koşullarının iyileşmesini sağlayacaktır. Eğitim yapıları gibi kullanım alanı yoğun ve enerji tüketimi yüksek yapılarda, malzeme seçim sürecinde tüketim giderleri ve enerji performansı ölçütlerinin esas alınması, uzun vadede işletme maliyetlerinin aşağı çekilmesinde ve sürdürülebilirliğin sağlanmasında önemli katkı sunmaktadır [17]. Yapılarda ısısal, görsel ve işitsel konfor koşullarının her birinin eş zamanlı olarak en üst düzeyde sağlanması her zaman mümkün olmamakla birlikte, bu parametrelerin doğru ve dengeli bir biçimde düzenlenmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

1. Hygge, S., & Knez, I. (2001). Effects of noise, heat and indoor lighting on cognitive performance and self-reported affect. *Journal of environmental psychology*, 21(3), 291-299.
2. Buratti, C., Belloni, E., Merli, F., & Ricciardi, P. (2018). A new index combining thermal, acoustic, and visual comfort of moderate environments in temperate climates. *Building and Environment*, 139, 27-37.
3. Ricciardi, P., & Buratti, C. (2018). Environmental quality of university classrooms: Subjective and objective evaluation of the thermal, acoustic, and lighting comfort conditions. *Building and Environment*, 127, 23-36.
4. Krüger, E. L., & Zannin, P. H. (2004). Acoustic, thermal and luminous comfort in classrooms. *Building and Environment*, 39(9), 1055-1063.
5. Chiou, Y. S., Saputro, S., & Sari, D. P. (2020). Visual comfort in modern university classrooms. *Sustainability*, 12(9), 3930.
6. Samani, S. A., & Samani, S. A. (2012). The impact of indoor lighting on students' learning performance in learning environments: A knowledge internalization perspective. *International Journal of Business and Social Science*, 3(24), 127-136.
7. Mealings, K. (2023). The effect of classroom acoustic treatment on listening, learning, and well-being: A scoping review. *Acoustics Australia*, 51(2), 279-291.
8. Mercugliano, A., Corbani, A., Bigozzi, L., Vettori, G., & Incognito, O. (2025). The Effects of Classroom Acoustic Quality on Student Perception and Well-being: A Systematic Review across Educational Levels. *Frontiers in Psychology*, 16, 1586997.
9. Lamberti, G., Salvadori, G., Leccese, F., Fantozzi, F., & Bluysen, P. M. (2021). Advancement on thermal comfort in educational buildings: Current issues and way forward. *Sustainability*, 13(18), 10315.
10. Zomorodian, Z. S., Tahsildoost, M., & Hafezi, M. (2016). Thermal comfort in educational buildings: A review article. *Renewable and sustainable energy reviews*, 59, 895-906.
11. Gutierrez, J. H. A., Torres, C. E. G., Mejia, C. A. O., & Gastelo, S. X. F. (2024). Improving thermal comfort in educational environments: an innovative approach. *Land and Architecture*, (3), 1.
12. İstanbul Büyükşehir Belediyesi. (t.y.). *İstanbul gürültü haritaları 2024*. <https://cevre.ibb.istanbul/cevre-koruma-sube-mudurlugu/istanbul-gurultu-haritalari-2024/>
13. T. D. Rossing, *The Science of Sound*. Addison-Wesley Publishing Company, 1990. Accessed: Jan. 9, 2024. [Online]. Available: https://books.google.com.tr/books/about/The_Science_of_Sound.html?id=M9xQAAAAMAAJ&redir_esc=y
14. International Organization for Standardization. (2019). *ISO 12354-3:2019 Building acoustics—Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements—Part 3: Airborne sound insulation against outdoor sound*. ISO.
15. Türk Standardları Enstitüsü. (2024). *TS 825:2024 Binalarda ısı yalıtım kuralları*. TSE.
16. European Committee for Standardization. (2019). *Light and lighting – Lighting of work places – Part 1: Indoor work places (EN 12464-1)*. Brussels, Belgium: CEN.
17. Nasr, Y., El Zakhem, H., Hamami, A. E. A., El Bachawati, M., & Belarbi, R. (2023). Comprehensive Review of Innovative Materials for Sustainable Buildings' Energy Performance. *Energies*, 16(21), 7440. <https://doi.org/10.3390/en16217440>.

ENERJİ ETKİN CEPHELERDE PIEZOELEKTRİK RÜZGAR ENERJİSİ HASADI

Bitir Akhgar ^{1*}

Aslıhan Ünlü ²

^{1,2} Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Mimarlık Bölümü,
Özyegin Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

ÖZET

Bu çalışmada, yüksek katlı binaların cephe sistemlerine entegre edilen piezoelektrik enerji hasadı sistemlerinin rüzgâr kaynaklı titreşimler yoluyla enerji üretim potansiyelini değerlendirmeye yönelik güncel bir metodoloji sunulmaktadır. Önerilen yaklaşım, sayısal simülasyonlar ile laboratuvar ortamında gerçekleştirilen deneysel çalışmaların birbirini beslediği çok aşamalı bir değerlendirme sürecine dayanmaktadır. Çalışmanın ilk aşamasında, referans bir yüksek yapıda hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) simülasyonları gerçekleştirilerek cephe yüzeyindeki rüzgâr davranışı, hız dağılımları ve türbülans etkileri analiz edilmiştir. Elde edilen CFD sonuçları, ilgili standartlar ve teorik hesaplamalar kullanılarak doğrulanmıştır. Doğrulan veriler, ikinci aşamada Simulink ortamına aktarılmış ve piezoelektrik devre özellikleri dikkate alınarak elektriksel çıktılarının hesaplanması sağlanmıştır. Sonuçların güvenilirliği laboratuvar deneyleri ile sayısal simülasyonlar arasında kurulan sürekli geri besleme mekanizması ile sağlanmıştır. Bu bağlamda, önerilen metodolojinin gelecekte yapılacak çalışmalarda tam ölçekli ve gerçek koşullara daha yakın enerji hasadı değerlendirmeleri için etkili bir yol haritası sunacağı öngörülmektedir.

Anahtar kelimeler: Akıllı cephe sistemleri, Piezoelektrik Teknolojisi, Rüzgar Enerji Hasadı, Enerji Verimliliği.

PIEZOELECTRIC WIND ENERGY HARVESTING IN ENERGY-GENERATING FACADES

ABSTRACT

Buildings in urban environments account for approximately 36% of global energy consumption and nearly 40% of energy-related CO₂ emissions, emphasizing their critical role in environmental sustainability (IEA, 2023). In this context, energy-efficient design strategies are gaining increasing importance, particularly those integrating renewable energy systems into building envelopes. This paper presents a recent methodology developed to evaluate the energy harvesting potential of façade-integrated piezoelectric systems in high-rise buildings. In the first phase, urban wind behavior is analyzed using Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations. The obtained results are subsequently validated through relevant standards and calculation-based procedures. Following validation, wind-induced vibration data are implemented as input parameters in a MATLAB Simulink based simulation framework to assess the energy harvesting performance of the proposed system for a reference high-rise building located in Çekmeköy, İstanbul. The energy harvesting results obtained from the Simulink simulations are derived based on the specifications of the piezoelectric electrical circuit and demonstrate that system performance can be optimized through iterative interaction between laboratory experiments and numerical simulations. The findings indicate that increasing feedback between experimental testing and simulation phases leads to more realistic and reliable performance predictions, providing a pathway for future studies targeting façade-integrated piezoelectric energy harvesting system.

Keywords: Smart Facade Systems, Piezoelectric Technology, Wind Energy Harvesting, Energy Efficiency

^{1*}Sorumlu yazar e-posta adresi: bitir.akhgar@ozu.edu.tr.

1. GİRİŞ

Binalar, kentsel çevrelerdeki en büyük enerji tüketicileri arasındadır ve küresel enerji tüketiminin yaklaşık %36'sı ile enerji kaynaklı CO₂ emisyonlarının yaklaşık %40'ını oluşturmaktadır [1]. Bu enerjinin önemli bir bölümü, işletme saatleri boyunca ısıtma, soğutma, aydınlatma ve bina hizmetleri için harcanmaktadır. Binaların yalnızca merkezi enerji sistemlerine bağımlı olması, pasif enerji tüketicileri olarak çevresel baskıyı artırmakta ve kentsel dayanıklılığı azaltmaktadır. Bu çerçevede, enerji etkin bina tasarım yaklaşımları, giderek artan ölçüde enerji verimliliği uygulamaları ve akıllı kontrol mekanizmalarını yenilenebilir enerji üretim stratejilerini ile bütünleşik kullanma yollarını aramaktadır. Binalarda güneş ve jeotermal teknolojileri yaygın olarak benimsenmesine karşın, rüzgâr enerjisinden yeterli ölçüde yararlanılmamaktadır. Gelişmekte olan alternatif teknolojiler arasında piezoelektrik sistemler, çevresel mekanik titreşimleri elektrik enerjisine dönüştürme yetenekleri sayesinde belirgin bir fayda sunma potansiyeline sahiptir. Literatürde, kentsel ortamda tipik uyarım koşullarında piezoelektrik sistemlerin 10–100 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ aralığında güç yoğunluklarına ulaşabildiği rapor edilmektedir [2]. Düşük genlikli ve yüksek frekanslı titreşimleri dönüştürebilme özellikleri, bu malzemeleri özellikle bina kabuklarında rüzgâr kaynaklı titreşim hareketlerinden enerji hasadı amaçlı kullanılabileceğini göstermektedir [3]. Binalarda rüzgâr enerjisi hasadı üzerine yapılan çalışmalar, ağırlıklı olarak çatı veya bina arası köprülere entegre edilen türbin tabanlı sistemlere odaklanmıştır [4]. Ancak bu tür sistemler çoğu zaman aerodinamik verimsizlikler, gürültü, yapısal yorulma ve özellikle yüksek katlı binalardaki sınırlı mimari uygulanabilirlik gibi sorunlara yanıt aramaktadır. Piezoelektrik enerji hasadı sistemleri sessiz çalışmakta, az yer kaplamakta ve cephe yüzeylerine homojen olarak dağıtılabilmek olanaklarına rağmen piezoelektrik sistemlerin cephe ölçeğinde kullanımı henüz konusu henüz yeterince araştırılmamıştır.

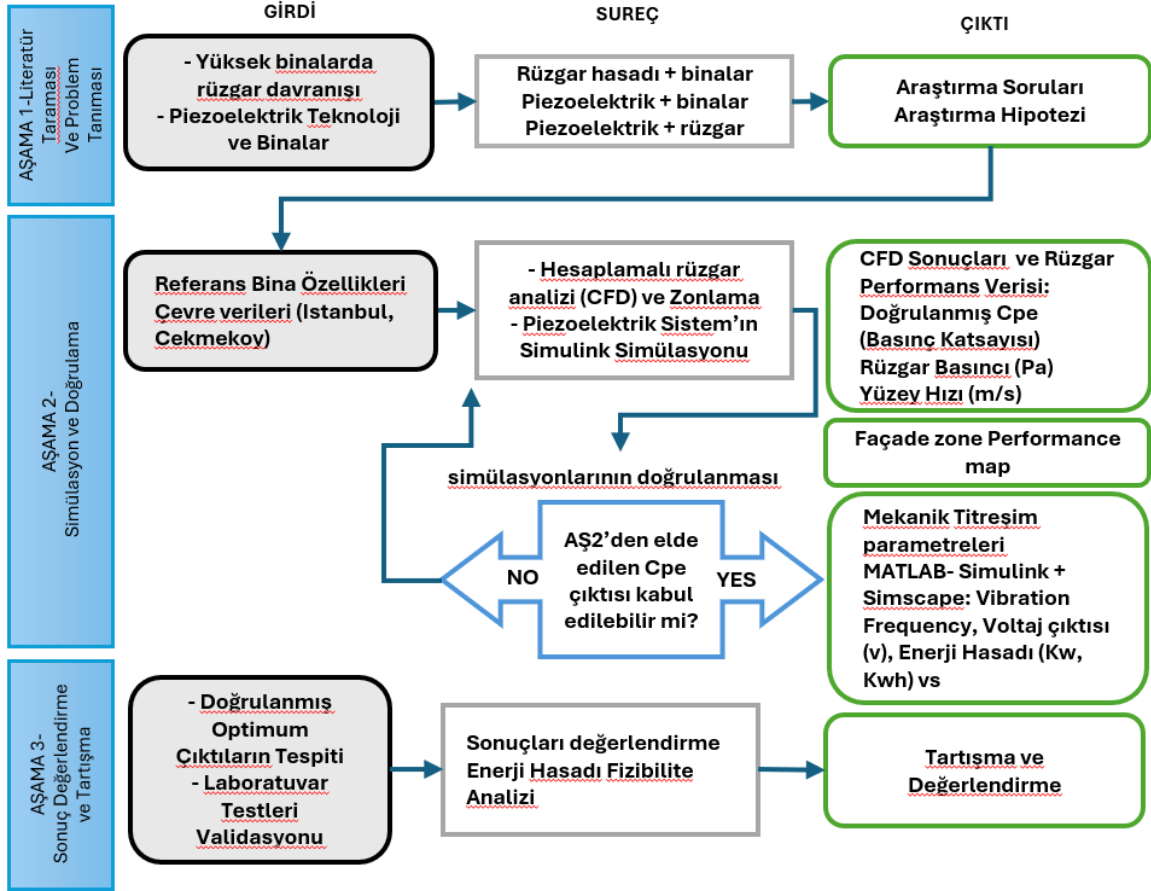
Bu çalışma, piezoelektrik enerji hasadı sistemlerinin yüksek katlı binaların cam giydirme cephe panellerine entegrasyonunun değerlendirilmesi için bir yöntem önermektedir. Çalışma kapsamında oluşturulan kavramsal model, kentsel rüzgâr davranışı, cephe basınç dağılımı, mekanik titreşim tepkisi ve elektriksel enerji üretimi süreçlerini birbirine bağlayan çok aşamalı analitik bir yaklaşımın geliştirilmesi ve doğrulanmasına odaklanmaktadır. Bu kapsamda araştırma aşağıdaki sorular etrafında yapılandırılmıştır:

- Yüksek katlı binaların cephelerinde rüzgâr kaynaklı basınç ve hız dağılımları nicel olarak nasıl belirlenebilir ve piezoelektrik sistemler için mekanik titreşim girdilerine nasıl dönüştürülebilir?
- Cephe ölçeğinde köşe, kenar, merkez bölgeleri rüzgâr uyarımı ve enerji hasadı potansiyelini nasıl etkilemektedir?
- Cephe ölçeğinde enerji çıktısını tahmin edebilmek için mekanik titreşim karakteristikleri, piezoelektrik elektriksel modelleme ile nasıl ilişkilendirilebilir?

2. METODOLOJİ

Çalışma kapsamında sunulan yöntem hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD), yönetmelik tabanlı rüzgâr yükü hesapları ve piezoelektrik sistem simülasyonlarını entegre ederek çok ölçekli doğrulamaya olanak tanımakta; bina fiziği, makine mühendisliği ve enerji sistemleri araştırmaları arasında bir köprü kurmaktadır [14]. Araştırmanın yönteminin akış şeması Şekil 1'de

gösterilmektedir. Bu çalışma, araştırma soruları ile ilişkili olarak iklimsel veri analizi, hesaplamalı rüzgâr simülasyonları, mekanik titreşim modellemesi ve elektriksel enerji hasadı değerlendirilmesini bir araya getiren simülasyon odaklı ve çok aşamalı bir yöntem aracılığıyla, cephe ölçeğinde piezoelektrik rüzgâr enerjisi üretiminin uygulanabilirliğini araştırmaktadır (Şekil 1). Önerilen yaklaşım, yüksek katlı binaların cephelerine entegre titreşim temelli enerji hasadı sistemlerini (piezoelektrik sistemler) çevresel rüzgâr davranışından devre düzeyindeki enerji çıktısına kadar kapsamlı bir şekilde değerlendirmek üzere tasarlanmıştır.



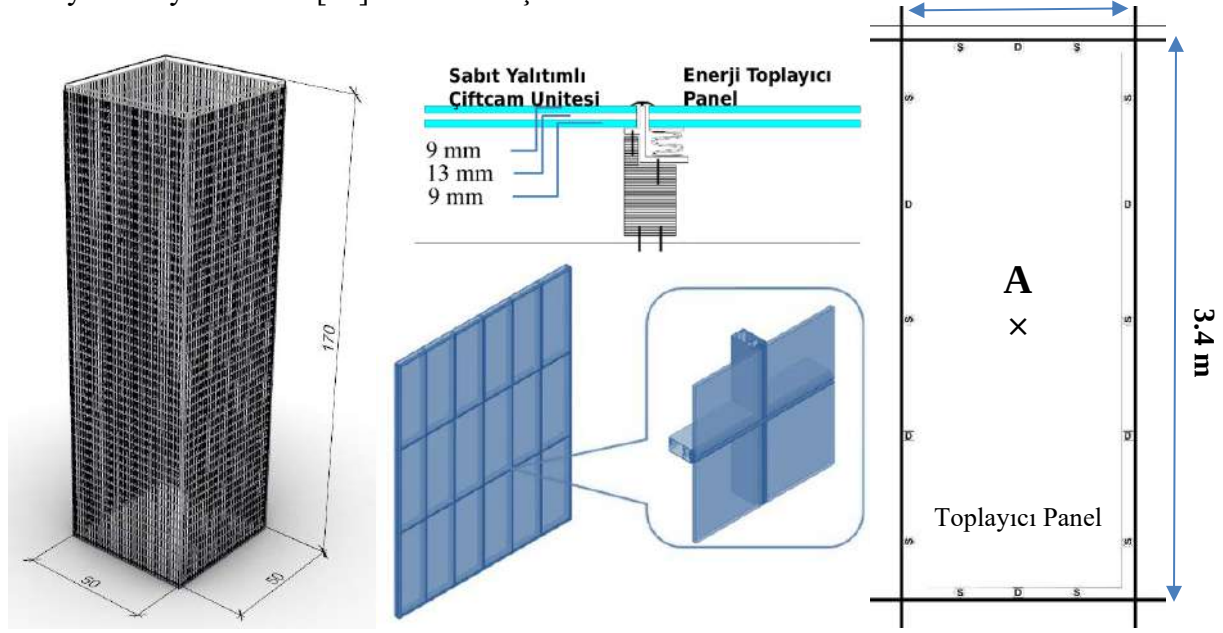
Şekil 1. Yöntem Akış Şeması

2.1 Referans Bina ve İklimsel Veri

Hesaplamalarda kullanılan İstanbul'da bulunan referans bina 170 metre yükseklikte, 50 katlı, 46,2 m × 46,2 m boyutlarında kare taban alanlı bir ofis binasıdır. Binanın kat yükseklikleri 3,4 m olup, dört cephesi de benzer özelliktedir. Bina kabuğu, 1,4 m × 3,4 m boyutlarında panel giydirmeye cephe sisteminden oluşmaktadır (Şekil 2). Cephe panelinin yalıtımlı cam ünitesi 9 mm olan iki cam tabakası arası 13 mm hava boşluğundan oluşmaktadır.

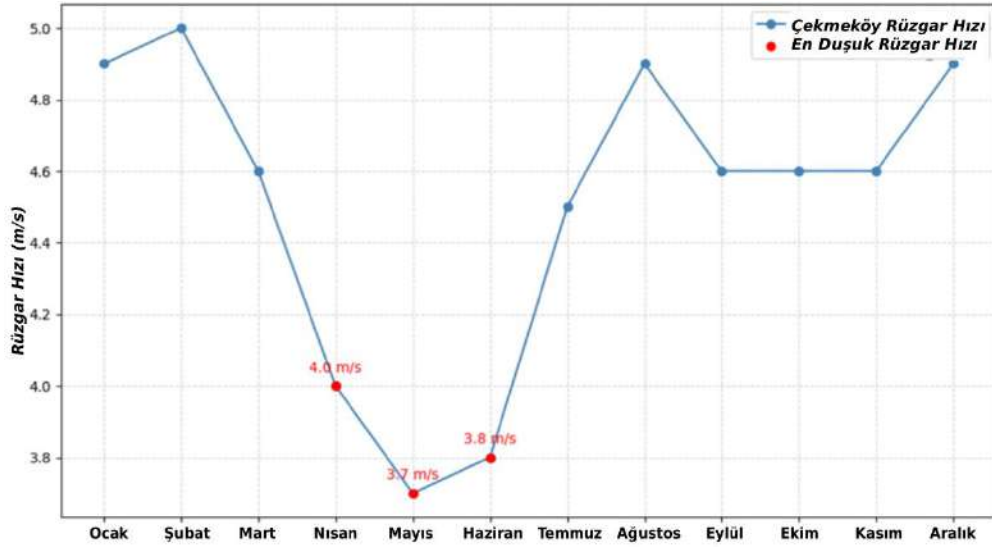
Rüzgâr karakteristikleri, İstanbul'un Çekmeköy ilçesine ait gerçek meteorolojik veriler kullanılarak analiz edilmiştir. Şekil 3'te gösterildiği üzere, Çekmeköy bölgesinde rüzgâr hızları 3,7–5,0 m/s aralığında olup, bu durum bölgenin referans konum olarak seçilmesini desteklemektedir. Bina modeli, cephe-rüzgâr etkileşimlerinin kontrollü bir şekilde

değerlendirilebilmesi için çevresinde kentsel engeller olmaksızın simüle edilmiştir. Çekmeköy rüzgâr gülü verilerine dayanarak, rüzgârı karşılayan baskın cephe yönü kuzey doğu doğrultusunda hizalanmıştır [13]. İklim veri setleri İstanbul İklim Eylem Planı'ndan [12] ve İstanbul Meteoroloji İstasyonu kayıtlarından [13] elde edilmiştir.



Şekil 2. Referans binanın geometrik özellikleri ve cephe konfigürasyonu

* A : Hesaplamalarda Kabul edilen Basınç Noktası



Şekil 3. Çekmeköy'de Ölçülen Aylık Rüzgar Hızı

3. SAYISAL ANALİZ VE DOĞRULAMA

Referans yüksek yapının cephesindeki rüzgâr kaynaklı basınç davranışı, Eddy3D (OpenFOAM tabanlı çözücü) kullanılarak yürütülen durağan (steady-state) CFD simülasyonları ile analiz

edilmiştir. Bu aşamanın temel amacı, basınç katsayısı (C_{pe}) dağılımlarının cephe titreşim ve performans değerlendirmelerinde kullanılmadan önce doğruluğunun sağlanmasıdır. Rüzgâr alan cephede, yükseklik, panelin cephedeki konumu ve cephe kenarlarına olan mesafenin rüzgâr enerjisi hasadına etkisini anlayabilmek için piezoelektrik entegre edilmiş panellerin bina cephesindeki yerleşimi için sekiz temsil noktası (P1–P8) belirlenmiştir (Şekil 4). Giydirme cephe üzerinde oluşan rüzgâr basıncı etkileri farklı yüksekliklerdeki köşe ve merkezi bölgelerdeki paneller üzerinde değerlendirilmiştir.

Basınç katsayısı C_{pe} , cephe rüzgâr mühendisliği uygulamalarında yaygın olarak kullanılan, basınç katsayısı (C_p) ile maruz kalma katsayısının (C_e) birleşik etkisi olarak tanımlanmaktadır (1):

$$C_p = \frac{Q - Q_{ref}}{0.5 \rho V_{ref}^2} \quad (1)$$

Burada Q yüzey basıncını, Q_{ref} referans basıncını, ρ hava yoğunluğunu ve V_{ref} ise referans rüzgâr hızını ifade etmektedir.

Eddy3D simülasyonlarının durağan (steady-state) koşullara dayandığı göz önünde bulundurularak rüzgâr darbe katsayısı (C_g) doğrudan hesaplamaya dâhil edilmemiştir. Bunun yerine doğrulama süreci, CFD ile elde edilen C_{pe} değerlerinin hesaplama temelli katsayılarla karşılaştırılmasına odaklanılmıştır (2):

$$K_{calc} = C_p \cdot C_e \quad (2)$$

C_p değerleri, bina cephesinin merkez bölgelerinde daha yüksek, kenarlara yaklaştıkça daha düşük olacak şekilde cephe zonlamasına göre seçilmiştir ve C_e , standart maruz kalma formülasyonları doğrultusunda yüksekliğin bir fonksiyonu olarak hesaplanmıştır. Simüle edilen ve hesaplama yoluyla elde edilen katsayıların karşılaştırılması güçlü bir uyum göstermiş; mutlak farklar tüm senaryolarda 0.1'in altında kalmıştır. Bu tolerans düzeyi, CFD çıktılarının sonraki cephe performans analizleri için güvenilirliğini doğrulamaktadır.

Doğrulama aşamasının ardından, CFD çıktıları cephe yüzeylerindeki rüzgâr hızını ve buna karşılık gelen dinamik basınçları türetmek için kullanılmıştır. İstanbul, Çekmeköy için referans rüzgâr basıncı değerleri, Türkiye Cumhuriyeti Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü tarafından sağlanan bölgesel meteorolojik verilere dayanarak TS 498:2021 standardı kullanılarak belirlenmiştir ve z yüksekliğindeki dinamik basınç, Eurocode EN 1991-1-4'e göre hesaplanmıştır (3):

$$Q_z = 0.5 \rho V_{mz}^2 (1 + 7I_v) \quad (3)$$

Burada I_v türbülans şiddetini göstermektedir. Ardından, her bir cephe senaryosu için yüzey rüzgâr hızı doğrulanmış basınç katsayıları kullanılarak türetilmiştir.

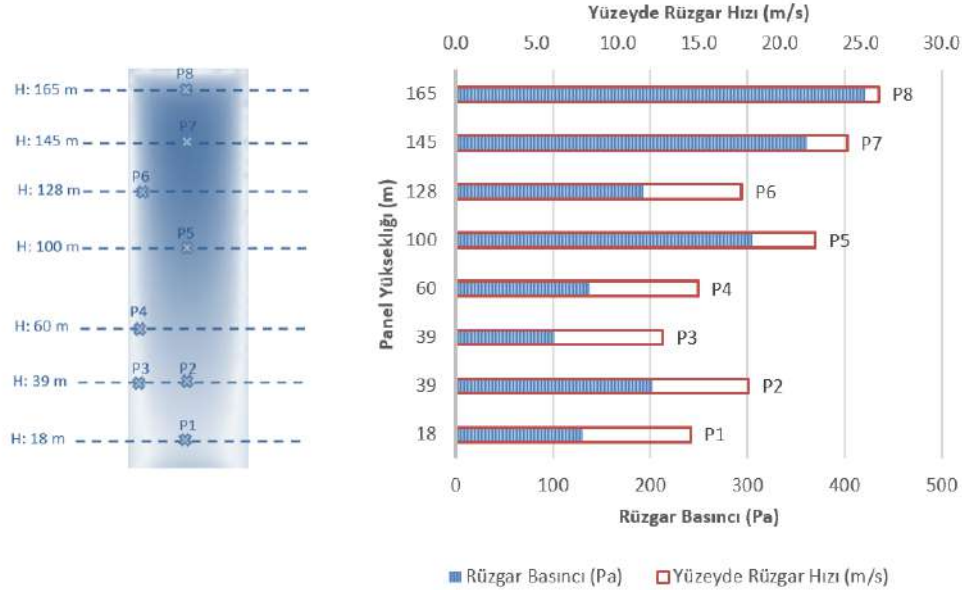
Cephe paneli titreşim frekansları, prCEN/TS 19100-2 standardında tanımlanan izin verilebilir yer değiştirme limitleri kullanılarak tahmin edilmiştir. Standart daha büyük kullanılabilirlik (serviceability) yer değiştirmelerine izin vermesine rağmen, pratik giydirme cephe tasarım kısıtlarını yansıtmak ve yapısal güvenliği sağlamak amacıyla 0,02 m sabit ve ihtiyatlı bir yer değiştirme değeri benimsenmiştir. Titreşim frekansı aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

$$f = \frac{V_s}{2\pi D} \quad (4)$$

Bu formülasyon, rüzgâr kaynaklı yüzey hızı ile cephenin dinamik tepkisi arasında doğrudan bir ilişki kurarak, farklı rüzgâr koşulları altında cephe titreşim karakteristiklerinin değerlendirilmesine temel oluşturmaktadır.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

CFD sonuçları, cephe boyunca basınç katsayılarında belirgin bir mekânsal gradyan bulunduğunu göstermektedir. Bina cephesinde merkezde konumlanmış panellerde, özellikle üst kotlarda, kenar ve köşe bölgelerine kıyasla daha yüksek C_{pe} değerleri hesaplanmıştır. Bu durum, rüzgâr akışının merkezde yoğunlaşması ve cephe kenarlarından uzaklaştıkça cephedeki basınç dağılımının azalması ile ilişkilidir. Cephedeki rüzgâr etkisi sadece yükseklik değil aynı zamanda panelin cephe üzerindeki konumu ile de değişiklik göstermektedir. Örneğin, cephenin alt kotlarında ve merkezinde konumlanmış olan panelin (P2) yüzeyinde hesaplanan rüzgâr basıncı ve rüzgâr hızı yüksek kotlardaki köşe panellere (P4, P6) göre daha yüksek değerlerde hesaplanmış olup enerji hasadı potansiyelinin yüksek olduğunu göstermektedir (Şekil 4).



Şekil 4. Cephe Yüzeyinde Rüzgâr Hızı (V_s) ve Rüzgâr Basıncı Analizi

Hesaplanan titreşim frekansları, Çizelge 1’de sunulduğu üzere, cephenin merkez bölgelerinin alt kotlarında (P1) yaklaşık 100 Hz civarından başlayarak üst kotlarda (P8) 200 Hz’in üzerine çıkmaktadır. Mevsimsel değişimler gözlenmiş olup, bölgesel rüzgâr örüntüleriyle uyumlu şekilde kış ve yaz sonlarında daha yüksek frekansların ortaya çıktığı gözlenmiştir (Şekil 3). Daha yüksek rüzgâr hızlarının daha düşük frekanslı hareketlere yol açtığı yönündeki yaygın varsayımların aksine, elde edilen sonuçlar titreşim frekansının esas olarak cephe rijitliği ve yer değiştirme sınırları

tarafından belirlendiğini göstermektedir. Artan rüzgâr hızı çoğunlukla titreşim genliğini etkilerken, frekans üzerinde sınırlı düzeyde etkilemektedir.

Çizelge 1. Cephe Sistemi Üzerindeki Senaryo Noktaları

Senaryo	Yükseklik (m)	Bulunduğu Bölge	Cpe Basınç Katsayısı	Yüzeydeki Hız (Vs) (m/s)	Dinamik Basınç (Qs) (Pa)	Titreşim Frekansı Genlik:0.02m (Hz)
P1	18	Merkez	0.6	14.49	129.72	115.36
P2	39	Merkez	0.8	18.08	201.89	143.92
P3	39	Koşe	0.4	12.78	100.95	101.76
P4	60	Koşe	0.5	14.92	137.54	118.78
P5	100	Merkez	1	22.20	298.27	176.79
P6	128	Koşe	0.6	17.63	192.05	140.36
P7	145	Merkez	1.1	24.17	353.41	192.44
P8	165	Merkez	1.25	26.10	412.11	207.81

Simulink simülasyonlarıyla elde edilen enerji hasadı performansı, seçilen piezoelektrik elemanın türüne ve elektromekanik özelliklerine yüksek derecede bağlıdır. Bu çalışmada, cepheye entegre piezoelektrik sistemin üst sınır enerji üretim potansiyelini değerlendirebilmek amacıyla sayısal model idealize edilmiş, yüksek eşleşme katsayısına sahip bir piezoelektrik konfigürasyonun kullanıldığı varsayılmaktadır. Piezoelektrik gerinim katsayısı- d_{31} (strain coefficient), elastik modül, kapasite ve iç direnç gibi temel parametreler, üretici veri sayfaları ve yüksek performanslı piezoelektrik (PZT) tabanlı elemanlara ilişkin literatürde bildirilen değerler esas alınarak tanımlanmıştır.

Simülasyon çıktılarının doğruluğunun değerlendirilmesi önem taşımakta olup PVDF tabanlı esnek elemanlar ve düşük eşleşme katsayısına sahip seramik yamalar dâhil olmak üzere alternatif piezoelektrik konfigürasyonlar hem sayısal hem de deneysel olarak test edilmeleri gerçekçi analizler için gereklidir. Ön bulgular, esnek piezoelektrik elemanların, daha düşük elektromekanik eşleşme ve daha yüksek mekanik sönümleme nedeniyle, rijit PZT yığınlarına kıyasla daha düşük gerilim ve güç çıktıları ürettiğini göstermektedir. Bu nedenle, bu bölümdeki rapor edilen mutlak enerji değerleri iyimser tahminler olarak yorumlanmalı; seçilen piezoelektrik malzeme ve devre konfigürasyonuna bağlı olarak, deneysel olarak doğrulanmalarının önemine işaret etmektedir. Bu karşılaştırma, cephe ölçeğinde enerji hasadı değerlendirmelerine malzeme seçimi ve deneysel kalibrasyonun entegre edilmesi gerekliliğini vurgulamaktadır.

Simülasyon sonuçları önemli bir enerji hasadı potansiyeline işaret etse de, kontrollü uyarım koşulları altında gerçekleştirilen başlangıç düzeyindeki elektrik laboratuvar testleri, idealize edilmiş sayısal modele kıyasla daha düşük seviyelerde sonuçlanmıştır. Özellikle, laboratuvar ölçeğindeki piezoelektrik elemanlardan ölçülen gerilim ve akım çıktılarının, karşılık gelen Simulink öngörülerinden yaklaşık %35–45 oranında daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bu fark, büyük ölçüde ideal olmayan sınır koşullarına, malzeme kusurlarına, ilave mekanik sönümlemeye ve başlangıç simülasyon modelinde tam olarak temsil edilmeyen elektriksel kayıplara bağlı olduğu öngörülmektedir. Bu farkı gidermek amacıyla, deneysel ölçümlerin sönüm katsayıları, yük direnci

ve piezoelektrik eşleşme katsayıları gibi simülasyon parametrelerini güncellemek için kullanıldığı bir kalibrasyon süreci benimsenmiştir. Laboratuvar testleri ile sayısal simülasyonlar arasında paralel biçimde yürütülen bu “geri-ileri beslemeli” yöntem, modelin aşamalı olarak iyileştirilmesine olanak tanımakta ve daha gerçekçi ile daha güvenilir enerji hasadı tahminleri üretmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada sunulan sonuçlar sistem performansının üst sınır değerlendirmesini temsil etmekte olup, gelecekte deneysel olarak doğrulanmış cephe-entegre enerji hasadı çalışmalarına referans bir çerçeve sağlamaktadır.

Parametrik analiz (Çizelge 2), elde edilen enerji miktarının hem mekanik hem de elektriksel sistem konfigürasyonlarına oldukça duyarlı olduğunu göstermektedir. Özellikle piezoelektrik malzeme seçimi, rezonans ayarı, sönüm oranı ve panel başına aktif eleman sayısı enerji verimi üzerinde en güçlü etkiye sahip parametrelerdir. Optimize edilmiş konfigürasyonlar, doğrulanmış ayarlarla karşılaştırıldığında üç katına kadar daha yüksek enerji çıktıları üretebilmektedir. Bu nedenle, simülasyona dayalı olarak rapor edilen enerji değerleri üst sınır tahminleri olarak yorumlanmalı; gerçekçi performansın ise malzeme seçimi, üretim kalitesi ve montaj koşullarına bağlı olarak alt-orta aralığında gerçekleşmesi beklenmelidir.

Çizelge 2. Piezoelektrik Cephe Enerji Hasadı Performansını Etkileyen Parametrik Değişkenler

Parametre Kategorisi	Değişken Kriteri	Düşük / Koruyucu Ayar	Temel Simülasyon	Optimize / Üst Sınır	Çıktı (kWh/day)
Piezoelektrik Tipi	Malzeme Bileşimi	PVDF (esnek)	PZT-5A seramik	PZT stack	0.02-0.05
Bağlaşım Katsayısı	Elektromekanik bağlaşım	-20 pC/N	-175 pC/N	-320 pC/N	0.01-0.06
P-Element Geometrisi	Uzunluk × genişlik × kalınlık	40×20×0.3 mm	60×30×0.5 mm	80×40×1.0 mm	0.015-0.08
Element Kütlesi	Etkili titreşen kütle	8 g	20 g	45 g	0.01- 0.04
Yapısal Rijitlik (k)	Yay sabiti	800 N/m	1500 N/m	Rezonansa ayarlanmış	0.02-0.07
Sönüm Oranı (ζ)	Mekanik sönümleme	0.25	0.15	0.05	0.01-0.06
Panel Başına Element Sayısı	Adet	2 eleman	8 eleman	12 eleman	0.02-0.10
Elektriksel Bağlantı Tipi	Bağlantı düzeni	Seri	Hibrit	Paralel	0.015-0.05
Elektriksel Yük Direnci	Devre ayarı	Sabit (10 k Ω)	Ayarlanabilir	MPPT-tabanlı	0.01-0.04
Cephe Konum Katsayısı	Basınç katsayısı (C_{pe})	0.6 (kenar/koşe)	1.0 (orta bölge)	1.25 (optimum bölge)	0.03-0.12
Rüzgâr Uyarım Profili	Girdi değişkenliği	Sabit rüzgar	Dalgalı rüzgâr hamleleri	Türbülanslı kentsel akış	0.02-0.08

Bina fiziki açısından bakıldığında, elde edilen sonuçlar rüzgâr-cephe etkileşiminin cephe zonlamasına son derece duyarlı olduğunu göstermektedir. Özellikle üst kotlardaki merkez cephe bölgeleri, daha kararlı basınç dağılımlarına ve daha tutarlı titreşim davranışına sahipken; köşe bölgeleri ise emme (suction) etkilerine ve dalgalı aerodinamik yüklere maruz kalmaktadır. Bu bulgular, yüksek katlı bina tasarımında yalnızca yükseklik temelli varsayımlara dayanmak yerine cepheye özgü rüzgâr analizlerinin gerekliliğini vurgulamaktadır. Doğrulanmış CFD çerçevesi, rüzgâr yükleri altında cephe performansının değerlendirilmesi için güvenilir bir temel sunmaktadır.

KAYNAKLAR

1. International Energy Agency (IEA). (2023). Global Status Report for Buildings and Construction.
2. Priya, S., & Inman, D. J. (Eds.). (2009). *Energy Harvesting Technologies*. Springer Science+Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-76464-1>.
3. Wang, J., Qin, X., Liu, Z., Ding, G., & Cai, G. (2021). Experimental study on fatigue degradation of piezoelectric energy harvesters under equivalent traffic load conditions. *International Journal of Fatigue*, 150, 106320. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatig>.
4. Su, B., Guo, T., & Alam, M. M. (2025). A review of wind energy harvesting technology: Civil engineering resource, theory, optimization, and application. *Applied Energy*, 389, 125771. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125771>.
5. LouvreClad. (2024). Wind pressure effects on façade elements for high-rise buildings and multi-level carparks. Retrieved from <https://www.louvreclad.com/app/uploads/2024/07/Wind-Pressure-Effects-on-Facade-Elements-for-High-Rise-Buildings-and-Multi-Level-Carparks.pdf>
6. Li, Z.; Chen, X.; Huang, G.; Kareem, A.; Zhou, X. (2023) Alongwind and crosswind response of friction-pendulum base-isolated high-rise buildings. *Engineering Structures*, 293, 116564. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116564>
7. Wang, Q., & Zhang, B. (2023). Wind-induced responses and wind loads on a super high-rise building with various cross-sections and high side ratio—A case study. *Buildings*, 13(2), 485. <https://doi.org/10.3390/buildings13020485>
8. Vassilopoulou, I., Petrini, F., & Gantes, C. J. (2017). Nonlinear dynamic behaviour of cable nets subjected to wind loading. *Structures*, 10, 170–183. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2017.02.003>
9. Exactus Engineering. (2023). Wind load calculation and analysis for safe structural design. Retrieved from <https://www.exactusengineering.com/resources/wind-load-calculation-analysis>
10. Conroy, G. C., & Sideris, P. (2021). Exploring energy harvesting and vibration mitigation in tall buildings accounting for wind and seismic loads. *Engineering Structures*, 247, 113126. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113126>
11. Structville. (2018). How to apply wind load on high-rise buildings. Retrieved from <https://structville.com/2018/05/how-to-apply-wind-load-on-high-rise-structures.html>
12. Chang, P. C., Flatau, A., & Liu, S. C. (2003). Review paper: Health monitoring of civil infrastructure. *Structural Health Monitoring*, 2(3), 257–267. <https://doi.org/10.1177/1475921703036169>
13. WeatherSpark. (n.d.). Comparison of the average weather in Levent, Çekmeköy, and Şile. Retrieved [Access Date], from <https://weatherspark.com/compare/y/100243~96075~96072/Comparison-of-the-Average-Weather-in-Levent-%C3%87ekmek%C3%B6y-and-%C5%9Eile>
14. Wang, Q., & Zhang, B. (2023). Wind-induced responses and wind loads on a super high-rise building with various cross-sections and high side ratio—A case study. *Buildings*, 13(2), 485. <https://doi.org/10.3390/buildings13020485>
15. Qvist, J. R. K., & Christensen, E. D. (2023). Development and implementation of a Direct Surface Description method for free surface flows in OpenFOAM. *Coastal Engineering*, 179, Article 104227. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2022.104227>
16. Iranian National Building Code (INBC), Part 6: Design loads for buildings, Ministry of Housing and Urban Development, Tehran, Iran; 2013. sjce.journals.sharif.edu
17. Akhgar, B., Ünlü, A., & Uğurlu, B. (2025). Wind vibrations to wattage: The potential of piezoelectric facades in energy-conscious building. In *Proceedings of the 4th International Civil Engineering & Architecture Conference (ICEARC 2025)*, 17–19 May 2025, Trabzon, Türkiye. https://doi.org/10.31462/icearc2025_a_aen_528

GELENEKSEL EVLERDE DOĞAL HAVALANDIRMA: SICAK NEMLİ İKLİM BÖLGESİ

Sevra Yılmaz¹

Şule Filiz Akşit²

^{1,2} İTÜ Mimarlık Fakültesi, Taşkışla Kampüsü, Şişli, İstanbul, 34367

ÖZET

İnsanlar, zamanlarının büyük bir kısmını evlerinde geçirdikleri için buradaki hava kalitesi doğrudan sağlıklarını etkilemektedir. Bu çalışmada, geleneksel evlerdeki doğal havalandırma durumunu incelemek için yerinde ölçümler yapılmıştır. Tasarım öğeleri incelenerek evlerdeki doğal havalandırmanın iç hava kalitesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında, Türkiye’de sıcak nemli iklim koşullarına sahip Adana ilindeki geleneksel evlerin plan tipleri belirlenerek evlerdeki tasarım stratejileri incelenmiş ve saha ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümler çok fonksiyonlu Testo 440 ölçüm cihazı ile yapılmış ve iç rüzgar hızı, iç hava sıcaklığı, iç hava bağıl nemlilik ve iç hava CO₂ seviyesi ölçülmüştür. Adana merkezde Tepebağ bölgesinde iki farklı evde 25.06.2025 - 08.07.2025 tarihleri arasında üç farklı oda doğal havalandırma açısından incelenmek üzere ölçümler yapılmıştır. Birinci ev olan Şakir Efendi Konağı’nda iki odada kapı ve pencere açık, sadece pencere açık olmak üzere dörder gün toplam sekiz gün ölçüm yapılmıştır. İkinci Tepebağ Evi’nde de aynı şartlarda toplam dört gün ölçüm gerçekleştirilmiştir. Evler arasındaki dış hava rüzgar hızı, dış hava sıcaklığı ve dış hava bağıl nemliliği dikkate alınarak, tasarımdan kaynaklı oluşan iç hava koşullarındaki farklılıkların sebepleri incelenmiştir. Yerinde yapılan ölçümler, tasarımın ve uygulamanın etkinliğini belirlemek ve optimize etmek için kritik bir adımdır. Bu çalışma yerel kültürün korunması ile enerji verimliliğinin artırılmasına yönelik önemli katkılar sağlayıcı amaçlamaktadır.

Anahtar kelimeler: Geleneksel evler, Doğal havalandırma, Sıcak nemli iklim.

NATURAL VENTILATION IN TRADITIONAL HOUSES: HOT-HUMID CLIMATE REGION

ABSTRACT

Given that individuals spend a significant portion of their time indoors, indoor air quality (IAQ) directly impacts human health. This study utilizes in-situ measurements to evaluate the natural ventilation performance of traditional houses. By analyzing specific design elements, the relationship between natural ventilation and air quality was assessed. In the first phase, the plan typologies of traditional houses in Adana, Türkiye, a region defined by its hot-humid climate were identified, and their design strategies were examined through field measurements. These measurements were carried out using a multifunctional Testo 440 instrument to record indoor air velocity, temperature, relative humidity, and CO₂ concentration. In the Tepebağ district of central Adana, measurements were conducted in three different rooms located in two separate houses between 25 June 2025 and 8 July 2025 in order to evaluate natural ventilation performance. In the first house, Şakir Efendi House, measurements were conducted in two rooms under two distinct conditions, both door and window open, and window open only for four days each, totaling eight days. In the second house in Tepebağ, measurements were conducted under the same conditions for a total of four days. Accounting for outdoor wind speed, temperature, and relative humidity, the study examined how architectural design influences differences in indoor air conditions. In-situ measurements constitute a critical step in determining and optimizing the effectiveness of design and implementation. This study aims to make an important contribution to both the preservation of local culture and the improvement of energy efficiency.

Keywords: Traditional houses, Natural ventilation, Hot-humid climate.

¹* Sorumlu yazar e-posta adresi: ¹yilmazse23@itu.edu.tr

1. GİRİŞ

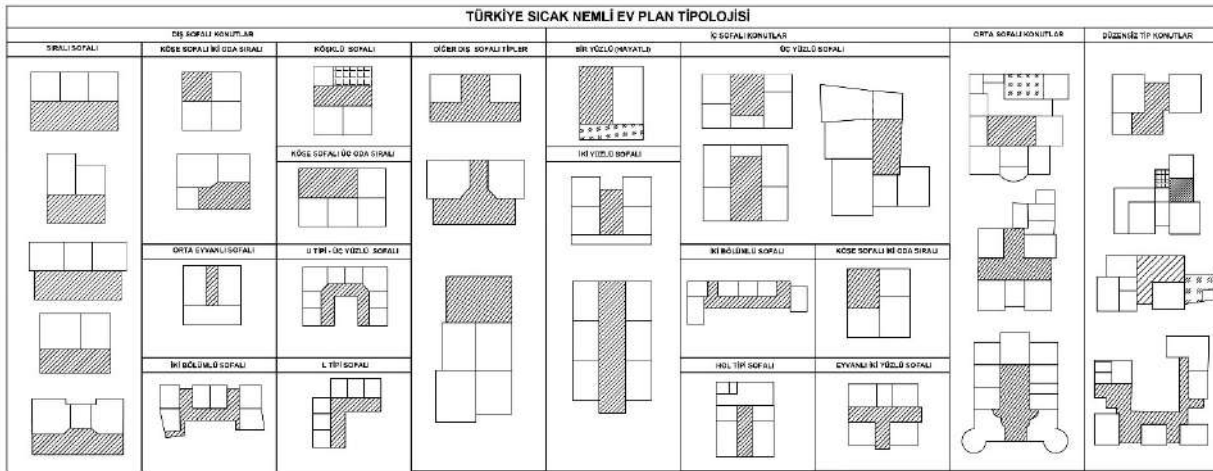
İklim krizi ve mimarlık arasındaki ilişki, günümüzde çevresel sürdürülebilirlik, enerji verimliliği, karbon emisyonları ve doğal kaynakların korunması gibi birçok açıdan büyük bir öneme sahiptir. Küresel karbon emisyonlarının yaklaşık %39'unu inşaat sektörü oluşturmaktadır [1]. Bununla birlikte, sürdürülebilir mimarlık uygulamaları ve enerji verimliliği, konutların enerji tüketimini azaltmada kritik bir rol oynamaktadır. Türkiye'deki konutlarda enerji tüketiminin büyük bir kısmı ısıtma ve soğutma enerjisi için harcanmaktadır. Bu nedenle, binalarda tasarım aşamasındaki müdahaleler ile ısıtma ve soğutma yüklerinin azaltılmasına yönelik çalışmaların yapılması ve maliyeti düşük pasif sistemlerin kullanılması önemlidir. Pasif ısıtma ve soğutma stratejileri, konutlarda enerji verimliliğini artıran önemli unsurlardır. Soğutma öncelikli yerlerde doğal havalandırmanın sağlanabildiği konutlarda iç hava kalitesi artmakta ve soğutma yükü de azalmaktadır. Doğal havalandırmada, binaların iklimlendirilmesi için dış hava akımından yararlanılmaktadır. Bu sayede, soğutma için kullanılan elektrik enerjisi miktarı azalmakta, fosil yakıtlara dayalı enerji üretimi azalmakta ve karbon salımı düşmektedir. Binaların doğal yollarla havalandırılması, yapay havalandırma sistemlerinin ve klimaların kullanımını minimize etmektedir. Bu, doğrudan enerji tüketiminin ve dolayısıyla karbon salımının azalmasına neden olur. Zhong vd., sıcak nemli bölgelerde geleneksel konutların havalandırma performansını inceleyerek bazı stratejilerin belirlendiği bir çalışma gerçekleştirmişlerdir [2]. Deevia vd., Kalmár ve Özdamar'ın çalışmalarında, bu çalışmada da kullanılan Testo cihazları dünyanın farklı yerlerinde ölçüm yapılarak sıcaklık, nem, partikül madde, CO₂ seviyesi, türbülans seviyesi, rüzgar hızı ve güneş ışıınımı gibi farklı çevresel parametreleri incelemiş ve hava kalitesine etkilerini gözlemlemişlerdir [3,4,5]. Özkan'ın çalışmasında ise ölçüm yoluyla iç hava kalitesi incelenmiş ve doğal havalandırmaya etkisi araştırılmıştır. Ayrıca Yuyucu, Bay ve Kalmár'ın yapmış olduğu farklı çalışmalarda doğal havalandırmanın bina içindeki etkisi incelenmiştir [6,7,4]. Peizhea vd., Lollini vd., gibi birçok araştırmacının yaptıkları çalışmalarda ise bu parametreler simülasyon programları ile de değerlendirilmiştir [8,9].

Doğal havalandırma stratejileri, enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik açısından önemli bir potansiyele sahiptir. Bu çalışmada, Türkiye'nin sıcak nemli iklim bölgesinde yer alan geleneksel evlerde kullanılan doğal havalandırma stratejilerinin yerinde ölçümler yoluyla belirlenmesi ve bu doğrultuda enerji verimliliği ile iç mekân konforunun artırılmasına yönelik değerlendirmeler yapılması amaçlanmıştır. Geleneksel evlerde kullanılan doğal havalandırma teknikleri; iç hava kalitesi, enerji tüketimi ve çevresel uyum açısından incelenmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda, günümüze ulaşan geleneksel evlerde doğal havalandırmaya yönelik kullanılan stratejilerin etkileri ortaya konmuştur. Enerji tüketiminin hızla arttığı ve çevresel sürdürülebilirliğin giderek daha fazla önem kazandığı günümüzde, binalarda enerji etkinliğinin sağlanması ve iç mekân konfor koşullarının korunması önemli bir sorun haline gelmektedir. Bu nedenle geleneksel evler, yüzyıllar içinde çevresel koşullara uyum sağlayacak biçimde gelişmiş binalar olarak öne çıkmaktadır. Çalışma kapsamında, bu binaların çevreye duyarlı tasarım anlayışı çerçevesinde hem yeterli hem de yetersiz kaldığı yönler de değerlendirilmiştir. Bununla birlikte, artan küresel ısınma ile soğutmanın istendiği dönemde daha da ağırlaşan hava sıcaklığı koşullarının bu binalar üzerindeki etkisi incelenmiş ve elde edilen veriler doğrultusunda sonuç değerlendirmeleri yapılmıştır.

2. SICAK NEMLİ İKLİM BÖLGESİNDEKİ GELENEKSEL EVLER

Geleneksel ev, bulunduğu coğrafyanın iklim koşulları, topoğrafyası, yerel malzeme olanakları ve toplumsal yaşam biçimi doğrultusunda biçimlenmiş, zaman içinde deneyimle gelişmiş konut tipidir. Bu yapılar, yalnızca barınma ihtiyacını karşılayan fiziksel mekânlar değil, aynı zamanda ait oldukları toplumun kültürel birikimini ve yaşam alışkanlıklarını yansıtan mimari ürünlerdir.

Sıcak nemli iklim bölgesinde nemlilik oranı çok yüksek olduğu için nemi dağıtmak üzere iç hava hareketlerini artıracak şekilde tasarımlar yapılmalı ve uygulanmalıdır. Türkiye’de de buna uygun bazı stratejilerin kullanıldığı geleneksel ev örnekleri vardır. Antalya Kaleiçi, Adana Tepebağ gibi farklı yerlerde iklimle uyumlu yapılaşmalar bulunmaktadır. Yaz sıcaklarından korunmak için iç avlulu evler, gölge sağlayan cumbalar, kerpiç dolgulu çıkmalar, ahşap panjurlar, konsol, balkon, açık renk badanalı duvarlar, dar sokaklar, taş duvarlar ve taş zemin gibi nemi dağıtmak üzere iç hava hareketlerini artıracak bazı tasarım stratejileri bulunmaktadır. Adana’da yüksek tavan kotuna sahip evlerde, üst kot ile alt kotta hava sirkülasyonu sağlaması için oda içerisinde farklı pencere açıklıkları kullanılmıştır. Bazı evlerde yarı açık mekanlar oluşturulmuş, bazı evlerde de karşılıklı duvarlarda hakim rüzgar doğrultusunda açıklıkları bulunan tek sıra odaların dizildiği planlar kullanılmıştır. Kalın duvarlar, sınırlı ve kontrollü açıklıklar, gölgeli geçiş mekânları ve yarı açık alanlar sayesinde güneş ışıınımı, sıcak hava ve parlama etkisi azaltılmakta; buna karşılık hava hareketi ve gece serinliği mümkün olduğunca iç mekâna alınmaktadır. Yapı malzemesi olarak ahşap olan evlerde Selçuklu tuğlaları, kerpiç dolgu gibi malzemeler kullanılmıştır. Evlerin bir bölümünde giriş katı kiler, depo, odunluk ve ahır gibi işlevlere ayrılırken, diğerlerinde giriş doğrudan iç sofaya bağlanmaktadır. Yerel malzeme kullanımı ile gelişen bu mimari anlayış, yüksek sıcaklık, yoğun güneşlenme ve dönemsel hava hareketleri karşısında mekânsal ve yapısal uyum geliştirmiştir. Bu kapsamda Türkiye’deki sıcak nemli iklime sahip olan Adana, Antalya, İzmir ve Mersin’deki geleneksel evlerin plan tipleri incelenmiştir. Plan tipleri, sofalı ve sofasız olarak ayrılmaktadır. Bu çalışmada sadece sofalı plan tipleri ele alınmıştır. Sofalı plan tipleri dış sofalı, iç sofalı, orta sofalı ve düzensiz sofalı plan tipleri olarak gruplanmaktadır. Bu plan tipleri farklı kaynaklardan yararlanılarak [10,11,12,13,14] hazırlanmış ve Şekil 1’de görülmektedir. Ayrıca sıcak nemli bölgelerdeki bazı geleneksel ev fotoğrafları ise Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 1: Türkiye sıcak nemli ev plan tipolojisi



Şekil 2: Türkiye sıcak nemli ev örnekleri (yazar)

3. DOĞAL HAVALANDIRMA

Konutlarda doğal havalandırma, iç mekan hava kalitesini artırmak, enerji verimliliğini sağlamak ve insanların yaşam konforunu desteklemek için önemlidir. Doğal havalandırma, iç mekanlardaki kirli hava, nem, karbondioksit (CO_2) ve diğer kirlleticilerin dışarı atılmasını sağlamaktadır. Bu özellikle kapalı alanlarda uzun süre kalan insanlar için sağlık açısından önemli bir faktördür. Sıcak havalarda, havalandırmanın doğru şekilde sağlanması, iç mekan sıcaklıklarının düşürülmesine yardımcı olmakta, ısıtmanın istendiği dönemde, pencere ve diğer açık alanlardan gelen serin hava, odaların sıcaklık seviyelerinin dengelenmesine katkı sağlamaktadır [15]. Doğal havalandırmanın bir diğer önemli faydası, iç mekanlardaki psikolojik etkisidir. Doğal ışık ve taze hava, bireylerin ruh sağlığı üzerinde olumlu etkiler yapmaktadır [16]. Doğal havalandırmada etkili olan değişkenler aşağıdaki gibidir.

- **Rüzgara İlişkin Değişkenler**

Doğal havalandırma sistemlerinde etkili olan rüzgar, ortamın hava sirkülasyonunu ve iç mekanın havalandırılmasını doğrudan etkileyen önemli bir faktördür. Rüzgarın yönü, hızı, esme sayısı ve

karakteri, havalandırma performansını belirleyen başlıca özellikleridir. Esme sayısı fazla olan yön, hakim rüzgar yönü olarak adlandırılmaktadır.

- **Binaya İlişkin Değişkenler**

Binaya ilişkin değişkenler, binanın konumu, yönlendiriliş durumu, biçimi ve binadaki açıklıklar olarak ele alınabilir. Binanın konumuna göre hava basıncı farkından yararlanılarak doğal havalandırma gerçekleştirilmektedir. Rüzgar, bir binaya çarptığında, rüzgarın estiği cephede pozitif basınç bölgesi ve rüzgarın arkasındaki cephede ise negatif basınç bölgesi oluşmaktadır. Binanın etrafında oluşan basınç farkı, iç mekanla dış ortam arasında hava akışını artıran negatif basınç alanları oluşturmakta ve hava, yüksek basınçlı cepheden düşük basınçlı cepheye doğru hareket etmektedir. Hava akımının yönü ve binanın yerleşimi, hava hareketini ve basınç dağılımını etkilemektedir [17]. Binanın ve hacmin yönlendiriliş durumu, rüzgar yöne göre değişen bir iklim elemanı olduğu için, rüzgarın cepheyi etkilemesi ve iç ortamda oluşan doğal havalandırma açısından farklılıklar oluşturmaktadır. Binanın biçimi, dış hava akımının bina etrafında oluşturduğu basınç bölgelerini ve bu basınçların seviyelerini etkiler. Binanın geniş cephesi rüzgar akımına dik şekilde düzenlenirse, bu cephede pozitif basınç ile güçlü bir itme etkisi, karşı cephede ise negatif basınç ile güçlü bir emme etkisi meydana gelir. Bina biçimi, binalar arasındaki mesafeler, bina yüksekliği ve cephe detayları, örneğin açıklıklar veya balkonlar, rüzgar enerjisinin emilmesine veya yönlendirilmesine neden olabilir. Binada açıklıkların boyutu, konumu, sayısı ve açıklıklardaki doğramanın niteliği doğal havalandırmanın etkinliğini değiştiren faktörlerdir. Mekanın derinliğine bağlı olarak tek ya da karşılıklı açıklıklar düzenlenmektedir. Havanın uygun hızda, yön değiştirerek mekânın tümünde sürekli devindiği örnekler havalandırma açısından olumludur. Havalandırmanın etkinliği açısından temiz havanın mekâna girdiği giriş açıklığı boyutu, kirli havanın mekândan uzaklaştırıldığı çıkış açıklığından küçük olmalıdır [18]. Kısa ve geniş pencereler, kare veya dar ve uzun pencerelere göre daha iyi hava akımı sağlamaktadır. Geleneksel evlere baktığımızda bahsedilen doğal havalandırma yöntemlerinin bir kısmının uygulandığı görülmektedir.

4. GELENEKSEL EVLERİN DOĞAL HAVALANDIRMA AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ: SICAK NEMLİ İKLİM BÖLGESİ

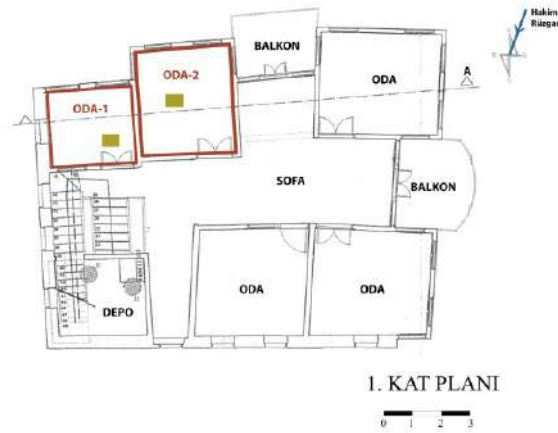
Bu çalışmada, Türkiye'nin sıcak nemli iklim bölgesinde yer alan Adana ili ele alınmıştır. Adana'da hakim rüzgar yönü kuzey ile kuzeydoğu yönleri arasındadır. Bu ilde bulunan geleneksel evlerden Şakir Efendi Konağı ve Tepebağ Evi, doğal havalandırma açısından yerinde ölçümler yapılarak değerlendirilmiştir. Değerlendirmeler yapılırken enerji verimliliği ile iç mekân konforunun artırılmasına yönelik önerilerde bulunulmuştur.

4.1 Ölçümlerin Yapılması

Çalışma kapsamında Adana'da yer alan Şakir Efendi Konağı'nın iki odasında ve Tepebağ Evi'nin bir odasında yapılan ölçümlerde TESTO 440 cihazı kullanılmıştır. Bu cihazla iç rüzgâr hızı, CO₂ seviyesi, iç hava sıcaklığı ve iç havanın bağıl nemlilik değeri ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümler; kapı ve pencerenin açık olduğu ve sadece pencerenin açık olduğu 2 farklı durumda yapılmıştır.

- Adana-Şakir Efendi Konağı

Şakir Efendi Konağı'nda Oda 1'e ait iç rüzgâr hızı, CO₂ seviyesi, iç hava sıcaklığı ve iç havanın bağıl nemlilik ölçümleri 03.07.2025 ve 04.07.2025 tarihlerinde; Oda 2'ye ait aynı parametrelere ilişkin ölçümler ise 27.06.2025 ve 28.06.2025 tarihlerinde, 09.00-21.00 saatleri arasında kapı ve pencerenin açık olduğu koşulda gerçekleştirilmiştir. Kapının kapalı, pencerelerin açık olduğu ikinci ölçümler ise Oda 1'de 25.06.2025 ve 26.06.2025 tarihlerinde, Oda 2'de ise 05.07.2025 ve 06.07.2025 tarihlerinde yine 09.00-21.00 saatleri arasında yapılmıştır. Oda 1'in kuzey ve batı cepheleri bulunmakla birlikte, ölçüm süresince sadece batı cephesindeki pencere açıklığı kullanılmıştır. Oda 2'de kuzey cephede bulunan dört pencereyi şahnişin bulunmakla beraber, ölçüm süresince kuzey cephesindeki iki pencere açıklığı kullanılmıştır. Oda 1 ve Oda 2'de farklı yöne bakan pencerelerin açık tutulması ile farklı yöne bakan hacimlerin karşılaştırılması hedeflenmiştir. Şakir Efendi Konağı'nın ölçüm yapılan kat planı ve eve ait fotoğraflar Şekil 3'te görülmektedir.



(a)



(b)



(c)



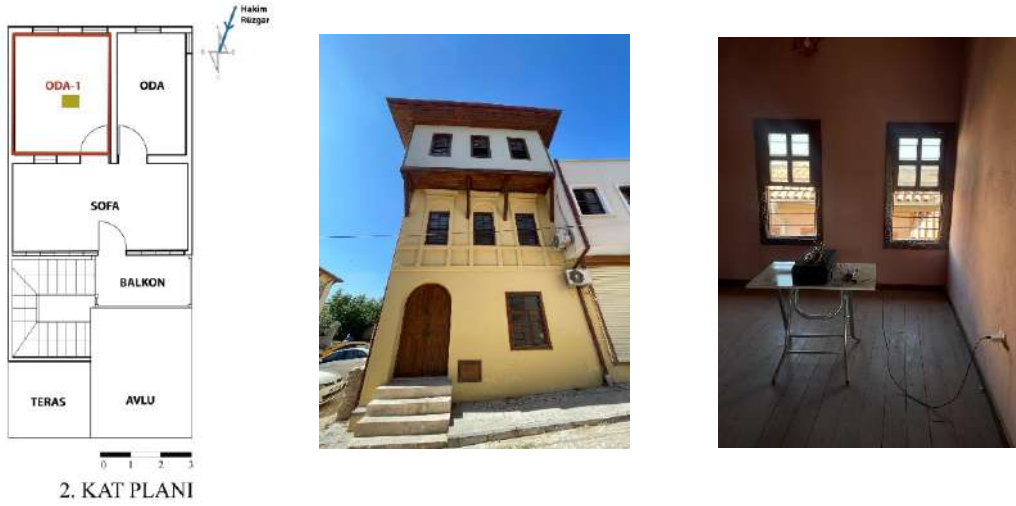
(d)

Şekil 3: Şakir Efendi Konağı: (a) 1. Kat planı, (b) Kuzey cephesi, (c) Oda 1 iç mekan görüntüsü, (d) Oda 2 iç mekan görüntüsü

- Adana-Tepebağ Evi

Tepebağ Evi'nde iç rüzgâr hızı, CO₂ seviyesi, iç hava sıcaklığı ve iç havanın bağıl nemlilik ölçümleri 01.07.2025 ve 02.07.2025 tarihlerinde, 09.00-21.00 saatleri arasında kapı ve pencerenin

açık olduğu koşulda gerçekleştirilmiştir. Aynı parametrelerde ikinci ölçümler ise 07.07.2025 ve 08.07.2025 tarihlerinde, 09.00-21.00 saatleri arasında kapının kapalı, pencerenin açık olduğu



durumda yapılmıştır. Tepebağ Evi'ne ait plan ve fotoğraflar Şekil 4'te görülmektedir.

(a) (b) (c)
Şekil 4: Tepebağ Evi: (a) 2. Kat planı, (b) Kuzey cephesi, (c) Ölçüm yapılan odanın iç mekan görüntüsü

4.2 Ölçüm Sonuçları ve Değerlendirmesi

Şakir Efendi Konağı'nın iki odasında ve Tepebağ Evi'nin bir odasında yapılan iç rüzgâr hızı, CO₂ seviyesi, iç hava sıcaklığı ve iç havanın bağıl nemlilik değeri ölçümleri, kapı ve pencerenin açık olduğu ve sadece pencerenin açık olduğu 2 farklı durum için yapılmıştır.

4.2.1. Kapı ve Pencerenin Açık Olduğu Ölçüm Sonuçları

Şakir Efendi Konağı'nın iki odasında ve Tepebağ Evi'nin bir odasında kapı ve pencerenin açık olduğu zamanlarda yapılan ve Şekil 5'de görülen ölçüm sonuçları aşağıdaki gibidir:

İç rüzgâr hızı, ölçüm yapılan 3 odada da gün boyunca değişken bir seyir göstermiştir. Şakir Efendi Konağı Oda 1'de iç rüzgâr hızı her iki günde de düşük düzeylerde kalmış, artışlar daha çok öğle ve öğleden sonra saatlerinde (12.00-18.00) görülmüştür. Şakir Efendi Konağı Oda 2'de de benzer şekilde genel olarak düşük değerler izlenmiş; ancak 1. günde akşamüstü saatlerinde (17.30-18.30) kısa süreli daha belirgin bir yükselme kaydedilmiştir. Tepebağ Evi'nde ise diğer iki örneğe kıyasla daha yüksek iç rüzgâr hızı değerleri elde edilmiş, özellikle öğle ve öğleden sonra saatlerinde (12.00-17.00) artış eğilimi belirginleşmiş, akşam saatlerinde (17.00-21.00) ise yeniden azalma gözlenmiştir.

CO₂ seviyeleri üç örnekte de genel olarak birbirine yakın ve sınırlı değişim gösteren bir aralıkta seyretmiştir. Şakir Efendi Konağı Oda 1'de 1. gün boyunca görece dengeli bir seyir izlenirken, 2. günde akşamüstü saatlerinde (17.30-18.30) belirgin bir artış görülmüş, ardından yeniden düşüş gerçekleşmiştir. Şakir Efendi Konağı Oda 2'de 1. günde öğleden sonra saatlerinde (16.00-17.00) kısa süreli bir yükselme izlenmiş, 2. günde ise CO₂ seviyesi gün boyunca daha stabil devam

etmiştir. Tepebağ Evi'nde ise 2. gün sabah saatlerinde (09.00-11.00) kısa süreli bir artış gözlenmekle birlikte, günün geri kalanında CO₂ değerlerinde fazla bir değişim görülmemiştir. Şakir Efendi Konağı Oda 1'de sıcaklık her iki günde de sabah saatlerinde (09.00-11.00) daha düşük başlamış, öğle saatlerinden itibaren (12.00-18.00) batı cephesindeki pencere nedeniyle artış eğilimi göstermiş ve akşam saatlerine doğru (18.00-21.00) yeniden azalmıştır. Oda 2'de ise iki günde de sıcaklık değerlerinin gün boyunca birbirine yakın aralıklarda seyrettiği görülmüştür. Tepebağ Evi'nde de benzer şekilde sıcaklığın gün içinde sınırlı değişimler gösterdiği ve değerlerin genel olarak birbirine yakın bir aralıkta kaldığı belirlenmiştir.

İç havanın bağıl nemliliği üç örnekte de gün içinde değişkenlik göstermekle birlikte, genel olarak gün sonuna doğru artış eğilimi sergilemiştir. Şakir Efendi Konağı Oda 1'de en düşük değerler sabah saatlerinde (09.00) ölçülmüş, bağıl nem gün ilerledikçe artarak en yüksek düzeyine gün sonunda (19.00-21.00) ulaşmıştır. Oda 2'de ise öğleden sonra saatlerinde (16.00-18.00) bağıl nemde azalma gözlenmiştir. Tepebağ Evi'nde 1. günde sabah saatlerinden itibaren (09.00-12.00) dalgalı bir seyir izlenmiş, akşam saatlerine doğru (17.00-21.00) belirgin artış görülmüştür. 2. günde de sabah ve öğle saatlerinde (09.00-13.00) dalgalanmalar izlenmiş, akşam saatlerine doğru (19.00-21.00) artış daha belirgin hale gelmiştir.

4.2.2. Sadece Pencerenin Açık Olduğu Ölçüm Sonuçları

Şakir Efendi Konağı'nın iki odasında ve Tepebağ Evi'nin bir odasında sadece pencerenin açık olduğu zamanlarda yapılan ve Şekil 6'da görülen ölçüm sonuçları aşağıdaki gibidir:

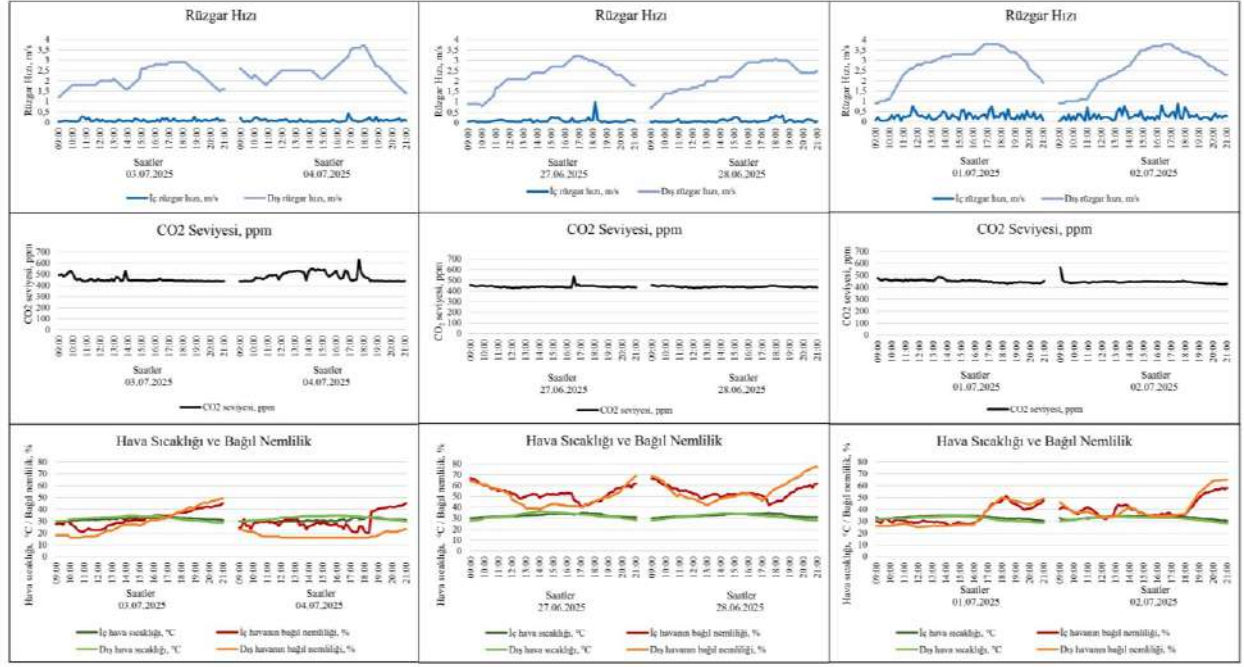
İç rüzgâr hızı tüm örneklerde genel olarak gün içinde sınırlı değişimler göstermiştir. Şakir Efendi Konağı Oda 1'de kısa süreli artışlar öğleden sonra (14.00-15.00) ve akşamüstü (18.30-20.00) saatlerinde görülürken, Oda 2'de sabah saatlerinde (09.00-12.00) düşük kalmış, öğle ve öğleden sonra (12.00-17.00) artış göstermiş, akşam saatlerinde (17.00-21.00) yeniden azalma eğilimine girmiştir. Tepebağ Evi'nde de öğle ve öğleden sonra (12.00-17.00) daha hareketli, akşam saatlerinde (17.00-21.00) ise düşük değerlere yaklaşan bir seyir gözlenmiştir.

CO₂ seviyeleri Şakir Efendi Konağı Oda 1'de 1. günde sabah ve öğle saatlerinde (09.00-13.00) artış göstermiş, bu saatlerden sonra azalma eğilimine girmiştir; 2. günde ise daha stabil bir seyir izlenmiştir. Oda 2'de iki gün boyunca görece dengeli kalmış, sabah saatlerinde (09.00-10.00) daha düşük seviyelerde başlayarak öğle ve öğleden sonra saatlerinde hafif artış göstermiş, akşam saatlerine doğru ise küçük dalgalanmalarla benzer düzeylerde devam etmiştir. Tepebağ Evi'nde de iki gün boyunca CO₂ seviyelerinin sınırlı değişim gösterdiği görülmüştür.

Şakir Efendi Konağı Oda 1'de sıcaklık öğleden sonra saatlerinde (15.00-18.00) daha düşük seyrederken, akşam saatlerinde (18.00-21.00) batı cephesindeki pencere nedeniyle artış eğilimi göstermiştir. Oda 2'de 1. günde sıcaklık öğleden sonra saatlerinde (13.00-17.00) en yüksek düzeylerine ulaşmış, akşam saatlerine doğru (18.00-19.00) ise yataya yakın bir seyir izlemiştir; 2. günde daha sınırlı dalgalanmalar gözlenmiştir. Tepebağ Evi'nde ise her iki günde de sıcaklık değerleri dar bir aralıkta değişmiştir.

İç havanın bağıl nemliliğinde, Şakir Efendi Konağı Oda 1'de öğleden sonra saatlerinde (14.00-17.00) artış gözlenmiştir. Oda 2'de 1. günde, sıcaklık artışına ters yönlü olarak gün ortasında azalmış, akşam saatlerinde yeniden yükselmiştir; 2. günde ise özellikle akşam saatlerine doğru (20.00-21.00) belirgin bir artış görülmüştür. Tepebağ Evi'nde sabah saatlerinde (09.00-12.00) daha

yüksek başlayan bağıl nem gün ortasına doğru azalmış, akşam saatlerinde (17.00-21.00) yeniden yükselmiştir.

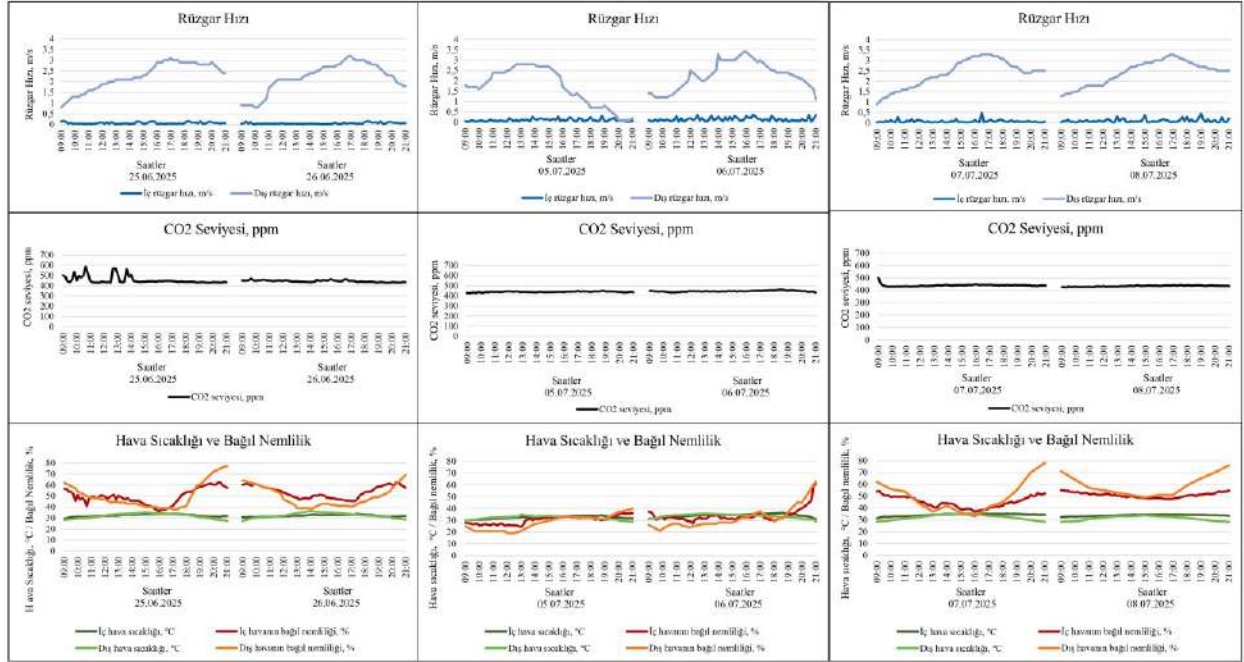


Şakir Efendi Konağı, Oda-1 kapı ve pencere açık ölçüm sonuçları

Şakir Efendi Konağı, Oda-2 kapı ve pencere açık ölçüm sonuçları

Tepebağ Evi kapı ve pencere açık ölçüm sonuçları

Şekil 5: Şakir Efendi Konağı Oda1, Oda2 ve Tepebağ Evi kapı ve pencere açık ölçüm sonuçları



Şakir Efendi Konağı, Oda-1 sadece pencere açık ölçüm sonuçları

Şakir Efendi Konağı, Oda-2 sadece pencere açık ölçüm sonuçları

Tepebağ Evi sadece pencere açık ölçüm sonuçları

Şekil 6: Şakir Efendi Konağı Oda1, Oda2 ve Tepebağ Evi sadece pencere açık ölçüm sonuçları

4.2.3. Tüm Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirmesi

Ölçüm yapılan iki evdeki üç odadaki ölçümler değerlendirildiğinde, doğal havalandırma performansının yalnızca dış iklim verilerine değil, aynı zamanda açıklık düzeni, mekânsal kurgu ve bina kabuğunun özelliklerine bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Tüm örneklerde kapı ve pencerenin birlikte açık olduğu durumda hava hareketinin güçlendiği, CO₂ seviyesinin daha dengeli kaldığı ve iç ortam nem dağılımının daha kontrollü gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Yalnızca pencerenin açık olduğu durumda hava akımı daha sınırlı ve kesintili hale gelmiş, iç ortam koşulları, dış rüzgâr ve nem değişimlerine daha duyarlı bir karakter göstermiştir. Bu durum, karşılıklı açıklıklarla sağlanan çapraz havalandırmanın, tek açıklığa dayalı havalandırmaya kıyasla daha etkili olduğunu açık biçimde ortaya koymaktadır.

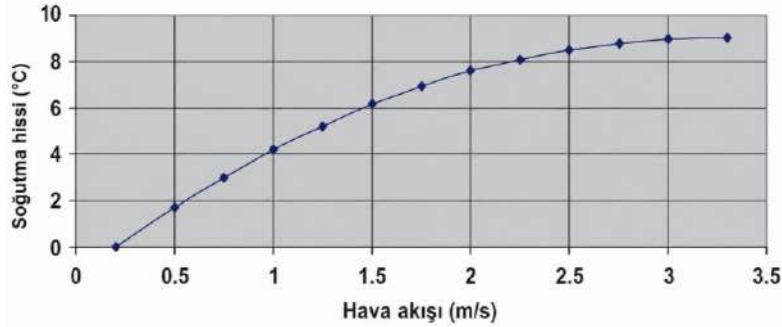
Şakir Efendi Konağı'nın Oda 1 ve Oda 2 sonuçları birlikte incelendiğinde, açıklıkların eş zamanlı kullanımının iç hava kalitesini koruma açısından olumlu sonuç verdiği, ancak sıcak nemli iklim koşullarında ısı konforunun yalnızca doğal havalandırma ile tam olarak sağlanamadığı görülmektedir. ASHRAE Standard 62.1-2010'a göre, iç ortam CO₂ seviyesinin dış ortam CO₂ seviyesinin yaklaşık 700 ppm üzerinde olmaması, havalandırma yeterliliğinin değerlendirilmesinde kullanılan bir göstergedir [19]. EN 16798-1 standardında ise CO₂ seviyesi, dış ortam CO₂ seviyesi üzerine eklenen fark değerleri üzerinden sınıflandırılmakta; dış ortam +800 ppm değeri esas alınmaktadır [20]. Dolayısıyla CO₂ değerlerinin her iki odada da kabul edilebilir sınırların altında kalması, doğal hava değişiminin iç hava kalitesi açısından yeterli olduğunu göstermektedir.

Hacim içindeki hava hareketinin kullanıcı tarafından algılanma düzeyi, rüzgâr hızına bağlı olarak değişmektedir. İç rüzgâr hızının 0,1 m/s'nin altında kalan mekanlar havasız olarak değerlendirilmektedir. 0,2 m/s'nin altında rüzgâr hızı olması hava akımının kullanıcı tarafından çoğunlukla fark edilmemesine neden olmaktadır. Buna karşılık 0,2–0,5 m/s aralığındaki rüzgâr hızı konforlu kabul edilmekte; 0,5–1,0 m/s aralığında ise hava akımı belirgin biçimde hissedilmekle birlikte genel olarak olumlu/hoş bir etki yaratmaktadır. Ancak bu düzeyde kullanıcıda sürekli bir hava hareketi farkındalığı oluşabilmektedir. Rüzgâr hızının 1,0–1,5 m/s aralığına ulaşması durumunda mekân cereyanlı olarak tanımlanmakta; değer yükseldikçe bu etki hafif cereyandan rahatsız edici düzeye doğru artmaktadır. 1,5 m/s'nin üzerindeki rüzgâr hızları ise konfor açısından olumsuz değerlendirilmektedir [21,22]. Buna bağlı olarak, Şakir Efendi Konağı Oda 1'de yapılan ölçümlerde iç rüzgâr hızının ortalama 0,1–0,2 m/s aralığında olduğu ve hava akımının kullanıcı tarafından çoğunlukla fark edilmediği, zaman zaman ise 0,5 m/s'ye yükselerek konforlu kabul edilebileceği görülmektedir. Oda 2'de iç rüzgâr hızı Oda 1'e göre daha yüksek dalgalanmalar göstermiştir. Gün içinde 0,1–0,2 m/s aralığında değerler ölçülmekle birlikte, rüzgâr hızının zaman zaman 0,5–1,0 m/s aralığına yükseldiği ve genel olarak olumlu/hoş bir etki yarattığı belirlenmiştir. Bu durum, Oda 2'de kullanılan kuzey cephesi açıklığının, Oda 1'de kullanılan batı cephesi açıklığına göre doğal havalandırma açısından daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bunun sebebi de hakim rüzgâr yönünün kuzey-kuzey doğu arasında olması ile açıklanabilir.

Tepebağ Evi'nde ise gün içinde ortalama iç rüzgâr hızının 0,3 m/s olarak ölçüldüğü ve konforlu kabul edilebileceği, bununla birlikte değerlerin sık sık 0,5–1,0 m/s aralığına yükseldiği ve genel olarak olumlu/hoş bir etki yarattığı görülmüştür. Tepebağ Evi'nde iç avlu, açık sofa, kapalı sofa ve ardışık mekânsal geçişlerin oluşturduğu kurgu, diğer örneklerle kıyasla doğal havalandırma açısından daha avantajlı bir yapı ortaya koymaktadır. Kapı ve pencerenin birlikte açık olduğu

durumda hava akımının daha yönlenmiş ve süreklilik gösteren bir karakter kazanması, bu mekânsal organizasyonun havalandırma performansına olumlu katkısını göstermektedir. Ayrıca iç hava sıcaklığının gün boyunca dar aralıklarda seyretmesi, avlu-sofa sisteminin birlikte çalışarak iç ortamda tampon bir etki oluşturduğunu göstermektedir.

İç mekândaki hava hareketi, kullanıcıların sıcaklık algısını etkileyen önemli bir değişkendir. Mekânın hava sıcaklığı aynı kalsa bile hava hızındaki artış, insan vücudu çevresindeki durgun hava tabakasını azaltarak ısı kaybını hızlandırmakta ve kullanıcının ortamı daha serin hissetmesine katkı sağlamaktadır. Bu etki, hava hareketine bağlı serinletici etki olarak değerlendirilebilir. Özellikle sıcak iklim koşullarında hava akışının artırılması, ortam sıcaklığını doğrudan düşürme de hissedilen konfor düzeyini iyileştirebilmektedir. Yapılan ölçümlere göre Oda 1’de 2°C, Oda 2’de 3°C, Tepebağ Evi’nde ise 4°C’ye kadar gün içinde hissedilen sıcaklığın düştüğü görülmüştür. Hava akış hızına bağlı olarak ortaya çıkan soğuma hissindeki değişim Şekil 7’de gösterilmektedir.



Şekil 7: Hava akış hızının soğuma hissi üzerindeki etkisi (Aynsley, R. Su, B. 2005) [23]

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada incelenen örnekler, geleneksel evlerde iklime uyumlu olarak geliştirilen tasarım kararlarının iç hava kalitesinin desteklenmesinde önemli bir rol oynadığını ancak doğal havalandırmanın yüksek sıcaklık koşullarında tek başına her zaman yeterli ısı konfor sağlamadığını göstermiştir. Bu çerçevede tasarım pratiği açısından geleneksel evlerden elde edilen verilerin, günümüz konut üretiminde doğrudan kopyalanacak biçimsel öğeler olarak değil, iklime duyarlı tasarım ilkeleri olarak ele alınması önerilmektedir. Açıklıkların karşılıklı yerleşimi, hakim rüzgar yönüne yerleştirilen açıklıklar, hava akımını yönlendiren ara mekânlar, gölgeleme sağlayan yarı açık alanlar ve ısı dalgalanmaları azaltan mekânsal tampon bölgeler, çağdaş yapılara uyarlanabilecek temel stratejiler arasında değerlendirilebilir. Böylece hem geleneksel mimari mirastan yararlanmak hem de enerji etkin ve çevresel açıdan daha duyarlı konut çözümleri geliştirmek mümkün olabilmektedir. Bundan sonraki çalışmalarda farklı plan tiplerinde uzun süreli ölçümler yapılarak doğal havalandırma açısından değerlendirme yapmak yararlı olacaktır. Özellikle soğutma yüklerinin azaltılması, enerji korunumu açısından büyük önem taşımaktadır.

KAYNAKLAR

1. Shao, L., Niu, J., & Li, D. (2012). "The Impact of Natural Ventilation on Energy Efficiency in Buildings." *Energy and Buildings*, 49, 123-134.
2. Zhong, W., Pan, Y., Xiao, W., & Zhang, T. (2023). Identifying bioclimatic techniques for sustainable low-rise high-density residential units: Comparative analysis on the ventilation performance of vernacular dwellings in China. *Journal of Building Engineering*, 80, 108008.
3. Deevia, B. Chundelib, F.A. (2020). Quantitative outdoor thermal comfort assessment of street: A case in a warm and humid climate of India. *Urban Climate* Volume 34, December 2020, 100718
4. Kalmár, F. (2016). Summer operative temperatures in free running existing buildings with high glazed ratio of the facades. *Journal of Building Engineering* Volume 6, June 2016, Pages 236-242.
5. Özdamar, M. (2017). Ofis yapılarında iç mekân konforunun değerlendirilmesi. Yüksek lisans tezi, Trakya Üniversitesi.
6. Yuyucu, İ. (2016). Bilgisayar analiz yöntemleriyle, yapılarda doğal havalandırma sistemlerinin örnekler üzerinden incelenmesi. (Yüksek lisans tezi). Beykent Üniversitesi.
7. Bay, E. (2020). The spatial block: natural ventilation in hot and dry climates of Turkey. (Yüksek lisans tezi). Illinois Institute of Technology.
8. Peizhea, T. Liangb, L. Liguoa, Z. Boyuana, Z. (2015). Field Measurement & Research on Natural Ventilation Performance of the New East-Main Building of China Academy of Building Research (CABR). *Procedia Engineering* Volume 146, 2016, Pages 257-265.
9. Belleri, A. Lollini, R. Dutton, S.M. (2014). Natural ventilation design: An analysis of predicted and measured performance. *Building and Environment* Volume 81, November 2014, Pages 123-138.
10. Eldem, Sedat Hakkı (1964). Türk Evi Plan Tipleri, İTÜ Mimarlık Fakültesi Baskı Atölyesi, <https://archive.org/details/ELDEMSHTrkEviPlanTipleri>.
11. Çıkış, Ş. (2009). 'Modern konut' olarak XIX. yüzyıl İzmir konutu: Biçimsel ve kavramsal ortaklıklar. *METU Journal of the Faculty of Architecture*, 26(2), 211–233.
12. Açık Güneş, G. (2010). *Mersin Levanten yapıları üzerine bir inceleme* [Yüksek lisans tezi]. Çukurova Üniversitesi.
13. Aktuna, M. (2007). *Geleneksel mimaride binaların sürdürülebilir tasarım kriterleri bağlamında değerlendirilmesi: Antalya Kaleiçi evleri örneği* [Yüksek lisans tezi]. Yıldız Teknik Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü.
14. Payaslı Oğuz, G., & Aksulu, I. (2007). Adana Tepebağ'daki tarihi yerleşim dokusunun incelenmesi, koruma sorunları ve öneriler. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22(2), 207–216.
15. Aksamija, A. (2013). "Natural Ventilation in Sustainable Architecture." Springer.
16. Fisk, W. J. (2000). "Health Effects of Indoor Air Quality in Residential and Office Buildings." *Journal of the Air & Waste Management Association*, 50(4), 428-442.
17. Chand, I., Bhargava, P. K., & Krishak, N. L. V. (1998). Effect of balconies on ventilation inducing aeromotive force on low-rise buildings. *Building and Environment*, 33(5), 385-396.
18. Zorer, G. (2009). *Yapıda soğutma sistemleri*. (Yayımlanmamış ders notları). Yıldız Teknik Üniversitesi, . Mimarlık Bölümü, Yapı Fiziği Bilim Dalı.

19. TSI Incorporated. (2011). Indoor air quality handbook: A practical guide to indoor air quality investigations.
20. European Committee for Standardization. (2019). EN 16798-1: Energy performance of buildings—Ventilation for buildings—Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. CEN.
21. Olgyay, V. (1963). Design with Climate-Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism. New Jersey: Princeton University Press.
22. Acarı, H. (2024). Sıcak nemli iklim bölgelerinde hacim ölçeğinde doğal havalandırma etkinliğinin değerlendirilmesi. (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi. Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
23. Aynsley, R. and Su, B. (2005) “Insulation of Roofs in Warm Climates”, 2005 CIB W92/W107 International Symposium, February 7th – 10th; 2005 – Las Vegas, NV USA.
24. World Green Building Council. (2019). Global Status Report 2018: Towards a Zero-Emission, Efficient, and Resilient Buildings and Construction Sector. World Green Building Council.
25. ASHRAE 55-81. (1981) Thermal Environmental Conditions For Human Occupancy, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta.

FİZİKSEL ÇEVRE KOŞULLARINA DAYALI TASARIM: BİR YAPI DERSİ ÖRNEKLEMİ

Zelal Çınar^{1*}

Işıl Ruhi-Sipahioğlu²

^{1,2} TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Söğütözü Cad. No:43, Söğütözü, Ankara, 06510

ÖZET

Mimarlık eğitiminde teknik bilginin tasarım sürecine entegrasyonu, sürdürülebilir yapılar için kritik bir gereklilik olarak değerlendirilmektedir. Ancak, yapı fiziği konularının tasarım stüdyolarından bağımsız "teorik paketler" şeklinde sunulması, teknik veri ile uygulama yetkinliği arasında pedagojik bir boşluk yaratmaktadır. Bu çalışma, bir mimarlık bölümünde yürütülen yapı teknolojileri dersinin üç yıllık (2023-2026) gelişimini ve performansa dayalı pedagojik modelini kapsamlı bir vaka çalışması olarak sunmaktadır. Araştırma, 55 öğrencinin tasarım çıktıları ve amaçlı örneklem yöntemiyle seçilen 9 karakteristik projeyi boyamsal bir yaklaşımla derinlemesine incelemektedir. Dersin ve öğrencilerin dönem projesi kapsamında izlediği yöntem; uygulama dersi akış sürecine paralel olarak iklim, ısı ve ışık olmak üzere üç ana tematik fazdan oluşmaktadır. Öğrenciler bu yinelenmeli süreçte; bölgesel iklim verilerini, ısı konfor parametrelerini ve gün ışığı analizlerini tasarımın ana "biçim vericisi" olarak kullanmaktadır. Bu yaklaşım, başlangıçtaki sezgisel kütle kararlarının rasyonel bir morfolojik dönüşüme tabi tutulmasını sağlamaktadır. Bulgular, simülasyon çıktıları tasarımın rasyonel gerekçesi haline getirilmesinin, kütle morfolojisinde anlamlı değişimler yarattığını ve enerji etkin çözümleri kanıta dayalı hale getirdiğini ortaya koymaktadır. Bu süreç odaklı model, mimarlık eğitiminde kuramsal bilgi ile tasarım sentezi arasındaki bağı güçlendirmeye yönelik, stüdyo ile bütünleşik bir pedagojik çerçeve olarak önerilmektedir.

Anahtar kelimeler: Performatif tasarım, Yapı teknolojileri eğitimi, Pasif tasarım stratejileri, Vaka çalışması.

ENVIRONMENTAL PERFORMANCE-BASED DESIGN: A CASE STUDY OF A BUILDING TECHNOLOGY COURSE

ABSTRACT

The integration of technical knowledge into the architectural design process is considered a critical requirement for sustainable built environments. However, presenting building physics as theoretical modules isolated from design studios creates a pedagogical gap between technical data and application. This study presents the three-year evolution (2023-2026) and performance-based pedagogical model of a building technology course as a structured case study. The research examines the design outputs of 55 students, focusing on 9 representative projects through a longitudinal approach. The methodology followed by the course and the students' term projects consists of three main thematic phases in parallel with the course flow: Climate, Heat, and Light. In this iterative process, students utilize regional climate data, thermal comfort parameters, and daylighting analyses as the primary "form-giver" for their designs. This approach ensures that initial intuitive massing decisions undergo a rational morphological transformation. Findings demonstrate that internalizing simulation outputs as the rational basis for design decisions leads to significant morphological changes and evidence-based energy-efficient solutions. This process-oriented model is proposed as an integrated pedagogical framework to strengthen the link between theoretical knowledge and architectural synthesis, encouraging studio-integrated learning in architectural education.

Keywords: Performative design, Building technologies education, passive design strategies, case study.

^{1*}Sorumlu yazar e-posta adresi: zcinar@etu.edu.tr.

1. GİRİŞ

Küresel ölçekte artan enerji tüketimi, doğal kaynakların hızla tükenmesi ve yapı sektörünün karbon ayak izi üzerindeki belirleyici etkisi, sürdürülebilirlik kavramını mimarlık disiplininin merkezine yerleştirmiştir. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) verilerine göre, binaların işletimi küresel nihai enerji tüketiminin %30'undan ve enerji kaynaklı küresel emisyonların %26'sından (bunun %8'i doğrudan, %18'i ise elektrik ve ısı üretiminden kaynaklanan dolaylı emisyonlardır) sorumludur.^[1] Bu bağlamda tasarımcının erken aşamalarda aldığı kararlar arazi analizi, yönelim, form ve kabuk stratejileri bir yapının ömrü boyunca enerji performansını belirleyen kritik eşiklerdir. Dolayısıyla günümüzde mimari tasarım süreçlerinin yalnızca estetik ve işlevsel ölçütlerle değil, enerji performansı ve çevresel etkiler bağlamında bütüncül olarak değerlendirilmesi gerekmektedir.

Ancak bu gereksinime rağmen, mimarlık eğitiminde sürdürülebilirlik ve yapı fiziği bilgisinin tasarım sürecine entegrasyonu parçalı bir yapı göstermektedir. Geleneksel eğitim yaklaşımı estetik ve programatik kaygılara odaklanırken, çevresel performans dersleri çoğunlukla stüdyolardan bağımsız teorik paketler olarak konumlandırılmaktadır. Bu durum, tasarım sürecinin doğrusal algılanmasına ve performans değerlendirmelerinin biçimsel kararlar alındıktan sonra gerçekleştirilen bir kontrol aşaması olarak görülmesine yol açmaktadır. Türkiye bağlamındaki literatür, uluslararası bilgi üretimi ile müfredat entegrasyonu arasında belirgin bir yapısal gecikmeye işaret etmektedir [2]. Sürdürülebilirlik temalı derslerin büyük ölçüde seçmeli statüde yer alması, öğrenciler arasında bilgi eşitsizlikleri yaratmakta; [3] teknik altyapı eksikliği ve stüdyo kopukluğu, sürdürülebilirliğin performatif bir tasarım girdisi yerine yüzeysel bir kavramsal çerçeve olarak kalmasına neden olmaktadır.

Bu çalışma, literatürde tanımlanan bu yapısal ve pedagojik boşluklara yanıt olarak, enerji verilerinin tasarım sürecinin en erken aşamalarından itibaren üretken bir girdi olarak ele alındığı lisans düzeyinde bir performansa dayalı tasarım dersi modeli önermektedir. TOBB ETÜ Mimarlık Bölümü'nde yürütülen Yapı Teknolojileri VI dersi üzerinden geliştirilen bu model, sürdürülebilirliği zorunlu müfredat yapısı içinde, araçtan bağımsız ve simülasyon destekli bir süreç olarak ele almaktadır. Amaç, dijital simülasyon araçları ve iklim verileri aracılığıyla öğrencilerin fiziksel çevreyi soyut kavramlar yerine ölçülebilir ve değerlendirilebilir bir sistem olarak kavramalarını sağlamaktır.

Bu doğrultuda çalışma şu temel soruya odaklanmaktadır: Yapı fiziği verileri tasarım sürecinin sonunda bir denetleyici olarak değil, en başında biçim verici bir girdi olarak konumlandırıldığında, öğrencilerin kütle morfolojisi ve malzeme kararları üzerindeki tasarım yaklaşımları nasıl dönüşmektedir?

2. MİMARLIK EĞİTİMİNDE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK VE PERFORMANS TEMELLİ TASARIM

Sürdürülebilirlik söyleminin mimarlık disiplindeki merkezi konumuna rağmen, eğitim pratiklerinde çevresel verinin tasarım sürecine entegrasyonu hala parçalı ve gecikmeli bir yapı göstermektedir. Yapı fiziği ve enerji performansı çoğu zaman tasarımın erken evrelerinde üretken girdiler olarak değil, süreç tamamlandıktan sonra devreye giren değerlendirme araçları olarak ele alınmaktadır. Oysa bir yapının enerji kimliği; kütle organizasyonu, yönelim ve kabuk kararları gibi

erken tasarım aşamalarında belirlenmekte, bu aşamadaki tercihler binanın uzun vadeli çevresel performansını doğrudan etkilemektedir. Hesaplamalı tasarım ve simülasyon araçları, çevresel veriler ile mekânsal kararlar arasında yinelemeli geri bildirim ilişkileri kurarak performansa dayalı tasarım için önemli olanaklar sunmaktadır.

Buna karşın mevcut eğitim sisteminde bu araçlar çoğunlukla stüdyo kültüründen yalıtılmış teknik dersler şeklinde sunulmakta; bu durum öğrencilerin teknik bilgiyi içselleştirilmiş bir tasarım refleksine dönüştürmesini zorlaştırmaktadır. Türkiye ve uluslararası literatür, sürdürülebilirlik alanındaki hızlı bilgi üretimi ile müfredat entegrasyonu arasında belirgin bir yapısal gecikmeye işaret etmektedir [2]. Türkiye bağlamında yapılan çalışmalar, yapı fiziği ve sürdürülebilirlik derslerinin büyük ölçüde stüdyolardan kopuk ve teorik kaldığını; sürdürülebilirlik temalı derslerin çoğunlukla seçmeli statüde yer almasının öğrenciler arasında bilgi eşitsizliklerine yol açtığını göstermektedir [3–6]. Deneysel stüdyo girişimleri umut verici olsa da süreklilik ve ders statüsü gibi yapısal sınırlamalarla karşılaşmakta; teknik altyapı eksikliği ise sürdürülebilirlik kavramlarının performatif tasarım girdileri yerine yüzeysel biçimsel yorumlara indirgenmesine neden olmaktadır [7].

Simülasyon destekli kanıt temelli tasarım yaklaşımları bu sorunlara önemli bir çözüm potansiyeli sunsa da, literatür bu yöntemlerin eğitim süreçlerine sistematik ve yapılandırılmış biçimde entegrasyonunda hala boşluklar bulunduğunu vurgulamaktadır.^[8] Bu bağlamda mevcut çalışmalar çoğunlukla teorik model önerileri üretmekte; zorunlu müfredat içinde sürekliliği olan, stüdyo ile bütünleşik ders uygulamaları sınırlı kalmaktadır. Bu çalışmada sunulan ders modeli, sürdürülebilirliği seçmeli ve parçalı bir içerik olmaktan çıkarak zorunlu müfredat yapısı içinde, süreç odaklı ve simülasyon destekli bir pedagojik çerçeve önermekte ve literatürde tanımlanan bu yapısal ve pedagojik boşluklara bütüncül bir yanıt geliştirmeyi amaçlamaktadır.

3. METODOLOJİ VE ARAŞTIRMA TASARIMI

Bu araştırma, Yapı Teknolojileri VI dersinin üç yıllık (2023-2026) sürecindeki çıktıları kapsayan boylamsal bir vaka çalışmasıdır. Çalışmanın ana eksenini, çevresel verilerin tasarımda bir kontrol mekanizması olmaktan çıkıp biçim verici bir girdiye dönüştüğü **performatif tasarım** eğitim modelinin etkinliğini belgelemektir. Yöntem, pedagojik uygulama süreci ve verilerin analizi olmak üzere iki ana kısımdan oluşmaktadır. Aynı zamanda dersi veren öğretim üyelerinin de süreçle ilgili gözlemleri de çalışmada yer almaktadır.

3.1. Ders Modelinin Kurgusu

Çalışmaya konu olan ders, dönem boyunca (12 hafta) haftalık toplam 6 saat (2 saat teorik + 4 saat uygulama) olarak kurgulanmış olup 4 AKTS kredisine sahiptir. Dersin temel kazanımları; termal konfor ve pasif iklimlendirme sistemlerini tasarımlarda değerlendirebilme (beceri), görsel konfor parametrelerini enerji etkin tasarım ilkelerine göre anlatabilme (bilgi) ve bu parametreleri dijital simülasyon araçlarıyla ölçebilme (yetkinlik) olarak tanımlanmıştır.

3.2. Uygulama Protokolü: Yinelemeli Süreç ve Tematik Akış

Dönem projesi, öğrencilerin seçtikleri bölgede iklim şartlarının analizini, çevresel faktörlerin ve olası senaryoların simülasyonunu, tasarım ve strüktürel kararların optimizasyonunu içerir. Performansa dayalı bu çalışmalar, tasarım alanının kavranmasını, çevresel veriye dair potansiyellerin keşfedilmesini ve olasılıkların değerlendirilmesini amaçlar. Öğrencilerden bu ders kapsamında Türkiye’deki 6 iklim bölgesinden² birinde yaklaşık 250 metrekare hacimde bir kütle tasarımları beklenmektedir. Tasarım yeri, programı, yapı kabuğu, malzeme ve strüktürel sistem seçimi serbest bırakılmıştır. Kolektif öğrenmeyi desteklemek amacıyla dönem projesi grup çalışması (2-3 kişilik takımlar) üzerinden yürütülmektedir. Uygulama ders akış sürecine paralel bir biçimde iklim, ısı ve ışık olmak üzere üç ana tema etrafında ilerlemektedir.

Ders, süreç odaklı öğrenmeyi temel alan deneysel bir pedagojik model olarak kurgulanmıştır. Öğrencilerden güneşlenme, enerji performansı göstergeleri ve iklimsel parametreler gibi çevresel verileri aktif tasarım girdileri olarak ele almaları beklenmiştir. Ders kapsamında herhangi bir dijital araç zorunlu tutulmamış; bunun yerine araçtan bağımsız bir yaklaşım benimsenerek öğrencilerin kendi tasarım stratejilerine ve teknik becerilerine uygun simülasyon ve modelleme araçlarını seçmelerine olanak tanınmıştır.

İklimsel Başlangıç: Süreç, seçilen bölgenin Climate Consultant 6.0 [9] aracılığıyla bölgeye ait konum ve hava durumu verileri, güneş ışıınımı ve rüzgar yönleri detaylı bir şekilde analiz edilmektedir. Bu aşamadaki veriler, yönlenme ve kütle formu kararları için temel girdi olarak kullanılır. Yazılım tarafından sunulan “Tasarım Rehberi” önerileri, öneri yapının kütle formu, arazi yerleşimi ve yönlenme kararları için temel tasarım girdilerini oluşturabilir.

Teknik Bileşen Analizi: İkinci aşamada öğrenciler, önerdikleri yapı kabuğu bileşenleri için TS 825 standartlarına uygun yapı kabuğu bileşenlerini, ısı geçirgenlik katsayısı (U değeri) hesaplamaları yapılarak, malzeme seçimlerinin teknik performans kriterlerini karşılaması sağlanmaktadır. Bu süreç, öğrencinin yapı bileşenlerini sadece estetik değil, ısı performans açısından da değerlendirme yetkinliğini geliştirmeyi hedefler.

Performansa Dayalı Tasarım Geliştirme: Dersin üçüncü haftasından itibaren başlayan yoğun tasarım süreci, haftalık olarak düzenlenen sunumlar ve kritik seansları ile desteklenmektedir. Öğrenciler tasarımlarını iklim analizlerinden gelen veriler ışığında ve öğretim üyeleri eşliğinde yenilemektedirler. Sürecin en sonunda gruplardan tasarımın analiz öncesindeki ilk hali ile çevresel analizler (güneş, rüzgâr, nem) neticesinde önerilerini içeren önerilerinin gelişimlerini olarak sunmaları beklenmektedir. Performansın değerlendirilmesi amacıyla Autodesk Revit üzerinden karbon analizi veya Rhinoceros 3D/ Honeybee araç seti kullanılarak yıllık enerji kullanım yoğunluğu (kWh/m²yıl) hesaplamaları gerçekleştirilmektedir. Bu metodolojik yaklaşım, teknik verilerin tasarımın nihai biçimlenmesindeki rolünü grafikler, metinler ve teknik diyagramlarla kanıtlayan bütüncül bir öğrenme deneyimi sunmayı hedefler. Burada hedeflenen çevresel veri ile tasarım kararlarının çeliştiği durumların da tartışılmasının yanı sıra tasarlanan kütlenin çevresine olan fiziksel etkisinin de tespit edilmesidir.

² 23-24 ve 24-25 dönemlerinde, TS825 (2008) Standardının belirlediği 4 iklim bölgesinden seçim yapılmıştır.

3.3. Örneklem Seçimi ve Analiz Aracı

Araştırma evreni, üç akademik dönem boyunca dersi alan toplam 55 öğrenci grubunun projelerinden oluşmaktadır (**Çizelge 1**). Ancak çalışmanın kapsamı, iklimsel verinin morfolojik dönüşüm üzerindeki etkisini derinlemesine incelemek amacıyla *amaçlı örneklem* yöntemiyle belirlenen 9 proje ile sınırlandırılmıştır. Örneklem seçiminde şu kriterler esas alınmıştır:

1. İklimsel Çeşitlilik: TS 825 Standardına göre farklı derece-gün bölgelerini (1., 2. ve 3. Bölgeler) temsil etmesi,
2. Veri-Form İlişkisi: Simülasyon verilerinin kütle formunda radikal bir değişikliğe yol açtığı en net örnekler olması.

Çalışma, yalnızca nihai tasarım ürünlerine değil, aynı zamanda dönem boyunca öğrencilerin veri analizleri ile karar verme süreçlerinin evrimine odaklanmaktadır. Seçilen 9 proje, araştırma kapsamında geliştirilen *matris* (Bkz. Bulgular, **Çizelge 2**) üzerinden analiz edilmiştir. Bu analitik araç, tasarım sürecini üç aşamalı bir izlek üzerinden okumaktadır: (1) Başlangıç Sezgisi: Analiz öncesi benimsenen konvansiyonel form ve yerleşim kabulü; (2) Biçim Verici Veri: Sezgiyi kıran ve değişimi zorlayan simülasyon çıktısı; (3) Morfolojik Müdahale ve Performans: Veriye dayalı nihai form ve elde edilen somut kazanım.

Çizelge 1. Üç yıl boyunca dersi alan öğrenci sayıları ve kullanılan yazılımlar

Dönem	Kayıtlı Öğrenci Sayısı	Çalışma Grubu Sayısı	Kullanılan Yazılımlar
2023-2024 Güz	44	21	Climate Consultant, Ladybug Tools
2024-2025 Güz	40	20	Revit Insight, Ladybug Tools, Climate Studio
2025-2026 Güz	26	14	Ladybug Tools,, Revit, Forma, Climate Studio

Bu süreç odaklı değerlendirme, performansa dayalı tasarım düşüncesinin mimarlık eğitiminde nasıl içselleştirildiğine dair daha derin bir kavrayış sağlamayı amaçlamaktadır.

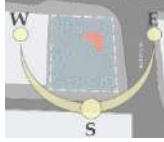
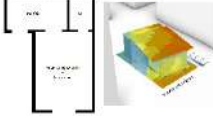
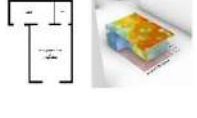
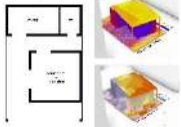
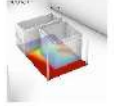
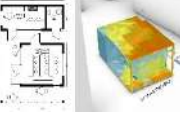
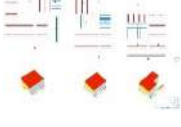
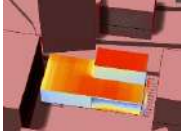
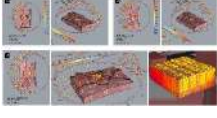
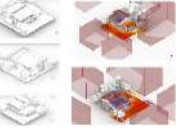
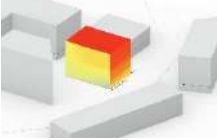
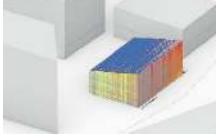
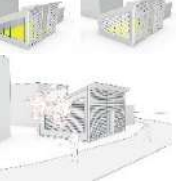
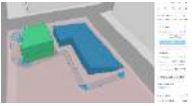
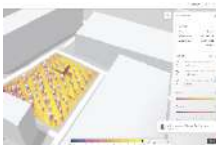
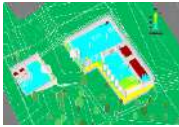
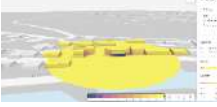
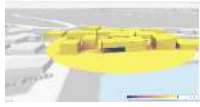
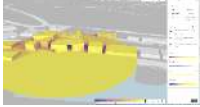
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Araştırma kapsamında incelenen projelerin, iklimsel bağlamın gereklilikleri ile simülasyon verilerinin oluşturduğu morfolojik dönüşüm süreci ve elde edilen performans hedeflerine dayalı gerekçeleri **Çizelge 2**'de özetlenmiştir.

Çizelge 2. TS 825 İklim Bölgelerine Göre Morfolojik Dönüşüm ve Performans Analizi (2023-2026)

Proje Kodu	Bağlam/ İklim Bölgesi/ Program	Başlangıçtaki Sezgisel Kabul	Biçim Verici Etkenler	Nihai Morfolojik Müdahale	Performans Hedefleri ve Rasyonel Gerekeçe
P-1 (23-24)	Ankara (3. Bölge) - Kütüphane	L Şema, Fonksiyonel Zonlama	Direct Sun Hours, Incident Radiation	Kütlenin koridorla parçalanması, güney saçaklarının forma bütünleşik eklenmesi.	%100 Konfor Saati (ASHRAE 55), U: 0,47 W/m²K optimizasyonu.
P-2 (23-24)	İzmir (1. Bölge) – Kitapçı ve kafe	Sınır odaklı konvansiyonel kütle	Wind Wheel (GB-KD), Radiation	Kütle ortasında rüzgâr koridoru açılması, çatının aerodinamik bükülmesi.	Doğu cephesinin sağlaştırılması, %100 Konfor Saati hedefi.
P-3 (24-25)	Ankara (3. Bölge) - Çiçekci	Kompakt Kütle (Ofis G, Depo K)	Incident Radiation, Rüzgar Güllü	Kütlenin ışık için kademeli parçalanması, girişin rüzgârdan korunarak döndürülmesi.	Isıtma yüklerinde %40 iyileşme, kamaşma riskinin minimizasyonu.
P-4 (24-25)	Fethiye (1. Bölge) - Restoran	Gölge amaçlı kompakt kütle	Wind Wheel, Radiation	Kütlenin yarılarak rüzgar boşluğu oluşturulması, aerodinamik çatı kurgusu.	İç mekân ve teras aşırı ısınmasının önlenmesi, tekstil saçak entegrasyonu.
P-5 (24-25)	Ankara/Ayaş (3. Bölge) - Kütüphane	Basit Dikdörtgen Prizma	Direct Sun Hours (Batı Kamaşma Riski)	"Yontma" stratejisi, çatı eğiminin %30'dan %40'a artırılması.	Avg. DF'nin %15,85'ten %10,88'e çekilerek görsel konforun sağlanması.
P-6 (24-25)	Ankara (3. Bölge) - Kütüphane	Batı yönelimli geniş cephe	Incident Radiation (Kış güneşi eksikliği)	Kütlenin ikiye ayrılarak iç avlu türetilmesi, çatı eğiminin optimizasyonu.	Kamaşma riskinin önlenmesi, Avg. DF'nin ideal seviyeye (%10) oturtulması.
P-7 (25-26)	Denizli (2. Bölge) - Anaokulu	Toprağa gömülü kütle	Sun Hours (Yetersiz gün ışığı)	Kütlenin kuzeye taşınması, L formuna dönüştürülmesi ve ışık tüpleri eklenmesi.	%30 Pasif soğutma kazancı, malzeme optimizasyonu.
P-8 (25-26)	İzmir/Çeşme (1. Bölge)	Masif Dikdörtgen Blok	Insight 360, Rüzgar Akışı	Kütlenin parçalanarak "Venturi" etkili açık rüzgar koridoru oluşturulması.	Soğutma yükünün düşürülmesi, Enerji Kullanım Yoğunluğu optimizasyonu.
P-9 (25-26)	Eskişehir (3. Bölge)	Arazi sınırını izleyen kompakt blok	UTCI (Mikroklima), Gömülü enerji, sun hours (solar radiation)	Avlulu tipolojiye geçiş, hibrit betondan kütsel ahşaba dönüşüm.	Karbon ayak izinde %23'lük iyileşme.

Çizelge 3. Projelerin dönem boyunca geçirdiği aşamalardan kronolojik kesitler (2023-2026)

Proje Kodu	Aşama 1 örnek	Aşama 2 örnek	Aşama 3 örnek	Aşama örnek n	Son Öneri
P-1 (23-24)					
P-2 (23-24)					
P-3 (24-25)					
P-4 (24-25)					
P-5 (24-25)					
P-6 (24-25)					
P-7 (25-26)					
P-8 (25-26)					

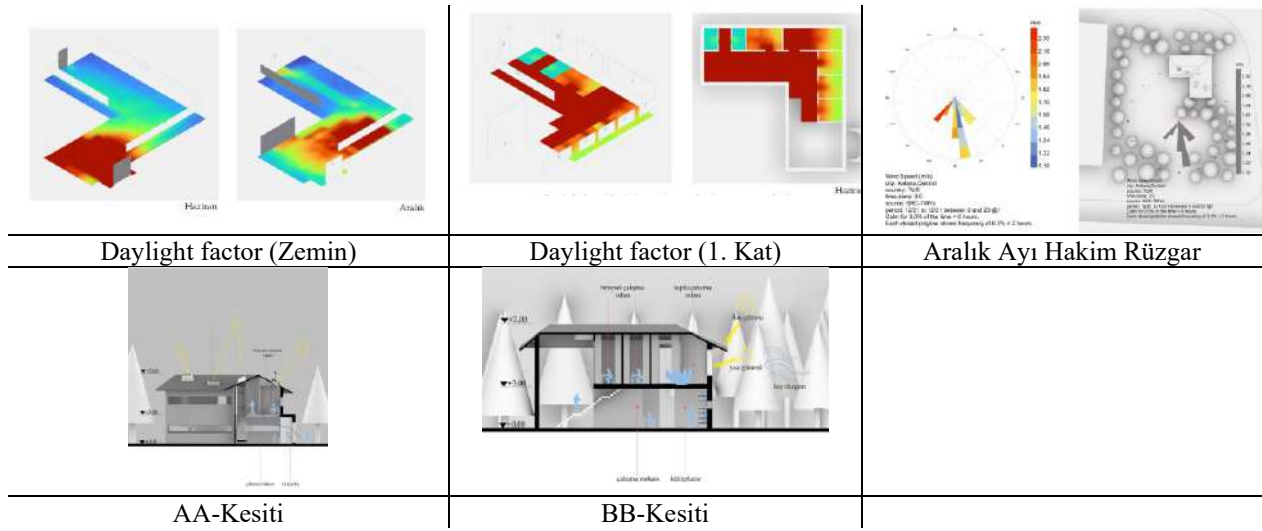
P-9 (25- 26)					

4.1. İklimsel Verinin Biçim Verme Rolü ve Çevreye Etkisi

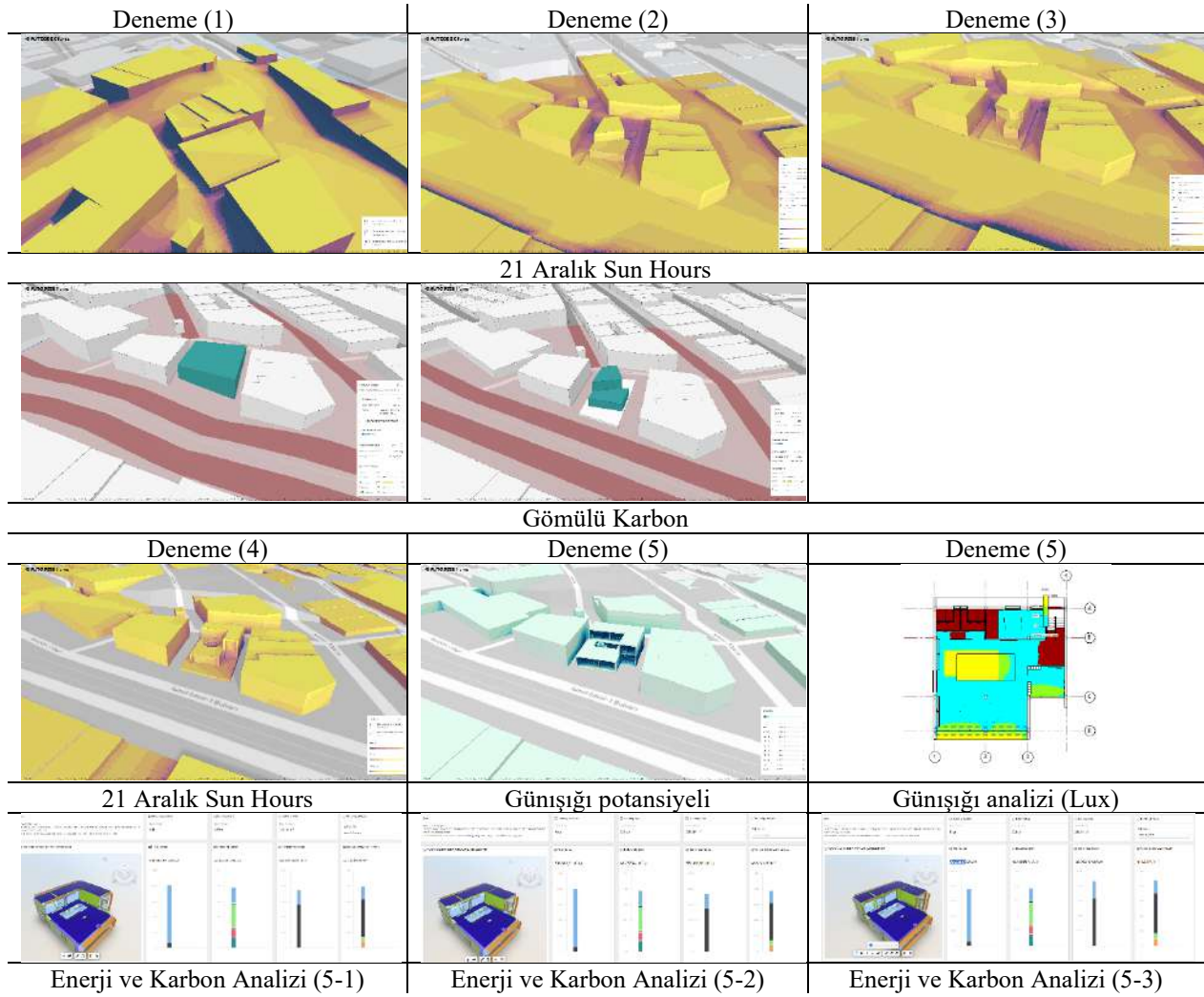
Projelerin morfolojik evrimi incelendiğinde, TS 825 iklim bölgelerinin gereklilikleri doğrultusunda simülasyon verilerinin tasarımcıyı iki temel stratejiye yönlendirdiği görülmektedir: 3. Bölge (Ankara, Eskişehir) için Güneş Odaklı *Yontma* ve 1. Bölge (Fethiye) için Rüzgâr Odaklı Parçalama.

Isıtma yükünün baskın olduğu 3. Derece Gün Bölgesi projelerinde (P-1, P-3, P-5, P-6, P-9), başlangıçtaki masif prizmatik kütleler, *Direct Sun Hours* ve *Incident Radiation* analizlerinin biçim verme etkisiyle dönüştürülmüştür. Özellikle P-5 ve P-6 kodlu projelerde, batı cephesindeki kamaşma riski ve yetersiz kış güneşi verisi, kütlenin eğimli yüzeylerle yontulmasına ve çatı eğimlerinin simülasyon verisi doğrultusunda %30'dan %40'a çıkarılmasına neden olmuştur. **2. Derece Gün Bölgesi** olan Denizli'de (P-7) ise başlangıçtaki toprağa gömülme sezgisi, gün ışığı analizlerindeki yetersizlik kanıtıyla çürütülmüş; veri, kütleyi arazinin kuzeyine taşıyan ve ışık tüpleriyle delik deşik eden yeni bir form üretiminde en etkin rolü oynamıştır.

Öneriler (1)	Öneriler (2)	Öneriler (3)
CLIMATE CONSULTANT ÖNERİSİ BİZİM ÖNERİMİZ TROMBE DUVAR	CLIMATE CONSULTANT ÖNERİSİ BİZİM ÖNERİMİZ CATENA KONTROLÜ (SEKİLER AR)	CLIMATE CONSULTANT ÖNERİSİ BİZİM ÖNERİMİZ
Climate consultant aracılığı ile belirlenen öneriler		
CLIMATE CONSULTANT ÖNERİSİ BİZİM ÖNERİMİZ	CLIMATE CONSULTANT ÖNERİSİ BİZİM ÖNERİMİZ	
Climate consultant aracılığı ile belirlenen öneriler		
Deneme (1)	Deneme (2)	Deneme (3)
RADIATION ANALİZ-İk Tasarım		
Solar radiation		
Sun Hours		



Şekil 1. P-1 no'lu projenin sürecine dair görseller



Şekil 2. P-9 no'lu projenin sürecine dair görseller

4.2. Rüzgâr ve Termal Konforun Biçim Verme Rolü (1. Bölge)

Soğutma ihtiyacının kritik olduğu 1. Derece Gün Bölgesi projelerinde (P-2, P-4, P-8), hâkim rüzgâr verisi tasarımın ana kurucu ögesi haline gelmiştir. İzmir ve Fethiye bağlamında geliştirilen bu projelerde, başlangıçta arazinin sınırlarına oturan konvansiyonel bloklar, *Wind Wheel* ve *Insight 360* analizlerinin ortaya koyduğu doğal havalandırma potansiyeli doğrultusunda radikal bir **dönüşüm** geçirmiştir. P-2 ve P-8 projelerinde, kütleler Venturi etkisi yaratacak şekilde ikiye bölünmüş ve aralarında serinletici rüzgâr koridorları oluşturulmuştur. Bu müdahale, sadece bir form arayışı değil, mekanik soğutma yükünü pasif yöntemlerle düşürmeyi hedefleyen teknik bir optimizasyondur. P-2 ve P-4 örneklerinde çatı kotlarının rüzgâr aerodinamiğine göre (kuzeydoğuda yükseltip güneybatıda alçaltılarak) bükülmesi, verinin estetik kaygılardan bağımsız olarak formu belirlediğini kanıtlamaktadır.

4.3. Performans Hedeflerinin Rasyonel Gerekçeye Dönüşümü

Çalışmanın önemli bulgularından biri, öğrencilerin analiz verilerini sadece bir görselleştirme aracı olarak değil, malzeme ve cephe kararlarının rasyonel gerekçesi olarak kullanmalarınıdır. *Point-in-Time Illuminance* verileri, P-1, P-3 ve P-4 projelerinde doğu ve batı cephelerinin sağırlaştırılması veya optimize edilmiş güneş kırıcılarla donatılması kararının temel dayanağı olmuştur. Bu performatif entegrasyon, P-1 ve P-2 projelerinde ASHRAE 55 standartlarına göre **%100 konfor saati** hedefine ulaşılmasıyla; P-3 projesinde ise ısıtma yüklerinde **%40'lık somut bir iyileşme** ile sonuçlanmıştır. P-9 projesinde (Şekil 1) *Gömülü Karbon* analizlerinin sürece dahil edilmesi, tasarım kararını sadece formla sınırlı tutmamış; yapısal sistemin hibrit betondan kütsel ahşaba dönüştürülmesini sağlayarak karbon ayak izinde rasyonel bir düşüş (%23) sağlamıştır.

4. SONUÇLAR

Yapı Teknolojileri VI dersi kapsamında yürütülen bu çalışma, mimarlık eğitiminde teknik bilgi ile tasarım stüdyosu pratiği arasındaki geleneksel kopukluğu gidermeye yönelik performansa dayalı bir pedagojik model sunmaktadır. Üç yıllık bir süreçte 55'ten fazla öğrenci grubunun katılımıyla gerçekleştirilen bu uygulama, teknik yapı fiziği verilerinin tasarımın ilerleyen aşamalarında birer "kontrol mekanizması" olmaktan çıkarılıp, tasarımın başlangıcından itibaren ana şekillendirici girdilere dönüştürülebileceğini kanıtlamıştır.

Elde edilen bulgular, öğrencilerin başlangıç aşamasındaki sezgisel kütle kararlarının, iklimsel analizler ve simülasyon çıktıları doğrultusunda rasyonel ve performatif bir kimlik kazandığını göstermektedir. İklim verilerinin analiziyle başlayan süreçte öğrencilerin yönelme, kütle formu ve açıklık stratejilerini çevresel verilere göre optimize ettikleri; aynı zamanda TS 825 standartları çerçevesinde gerçekleştirdikleri bileşen hesaplamalarıyla malzeme seçimlerini teknik birer karara dönüştürdükleri saptanmıştır. Bu yinelemeli süreç, mimari tasarımın sadece estetik bir arayış değil, aynı zamanda fiziksel çevre koşullarıyla uyumlu, enerji etkin ve ölçülebilir bir problem çözme süreci olduğunu öğrencilere deneyimletmiştir.

Dijital simülasyon araçlarının (Rhino 3D-Ladybug/Honeybee, Autodesk Revit Insight vb.) sürece entegrasyonu, öğrencilerin teknik verileri somutlaştırmasına ve tasarımlarının çevresel etkilerini (karbon analizi, enerji kullanım yoğunluğu) sayısal olarak takip edebilmelerine olanak

sağlamıştır. Öğrenci geri bildirimleri, bu yöntemin ders yükünü ve zorluk derecesini artırmasına rağmen, mesleki gelişim ve tasarım becerilerinin pekişmesi noktasında yüksek düzeyde bir kazanım algısı oluşturduğunu doğrulamaktadır. Özellikle grup çalışması dinamiği, karmaşık teknik süreçlerin yönetiminde akran öğrenmesini teşvik ederek pedagojik verimliliği artırmıştır.

Sonuç olarak, mimarlık eğitiminde yapı teknolojileri derslerinin stüdyo temelli öğrenme yöntemleriyle bütünleştirilmesi, geleceğin mimarlarının iklim krizi ve sürdürülebilirlik gibi küresel sorunlara bilimsel veriler ışığında yenilikçi çözümler geliştirmeleri için kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada sunulan model, teknik donanımın tasarımın ayrılmaz bir parçası haline getirildiği bütüncül bir eğitim yaklaşımının, öğrencilerin tasarımcı kimliklerini daha bilinçli ve sorumlu bir zemine taşıdığını ortaya koymaktadır.

TEŞEKKÜR

2023-2024, 2024-2025, 2025-2026 akademik yılları güz döneminde Yapı Teknolojiler VI dersini alan tüm öğrencilerimize katkıları için çok teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

1. International Energy Agency. (2024). Buildings. IEA. Buildings. <https://www.iea.org/energy-system/buildings#programmes>
2. Özgenç, Ö. (2021). Mapping the Interaction between Research and Education Fields of Sustainability in Architecture: A Retrospective Timeline [Master Thesis]. TOBB University of Economics and Technology.
3. Şahin, M., & Kömürlü, R. (2025). Türkiye’de Mimarlık Eğitiminde Sürdürülebilirliğin Yeri. Kent Akademisi, 18(4), 2322–2362. <https://doi.org/10.35674/kent.1532171>
4. Balçık, S., & Yamaçlı, R. (2023). Sürdürülebilir Kalkınma Sürecinde Mimari Tasarım Eğitimi. Online Journal of Art and Design, 11(4), 215–232.
5. Arat, Y., & Uysal, M. (2016). Ekoloji ve Sürdürülebilirlik Kavramlarına İlişkin Dersler Açısından Mimarlık Eğitim Programlarının İrdelenmesi. Online Journal of Art and Design, 4(2), 12–34.
6. Çalığışu, A. N. (2019). Sustainability in architectural education: The impact of education on perceptions of sustainability [Master Thesis]. Middle East Technical University.
7. İmert, H., & Fitoz, İ. (2025). SÜRDÜRÜLEBİLİR VE EKOLOJİK MEKÂN TASARIMI BİLİNCİNİN GELİŞTİRİLMESİNE YÖNELİK BİR STÜDYO DENEYİMİ. Sanat ve Tasarım Dergisi, 15(1), 587–607. <https://doi.org/10.20488/sanattasarim.1718038>
8. Mohamed, K. E. (2024). LİSANS TASARIM STÜDYOSUNDA ENERJİ VERİMLİ BİNA TASARIMI: ALTI ADIMLI YAPILANDIRILMIŞ DENEYSEL METOT. Akdeniz University Journal of the Faculty of Architecture, 3(2), 189–211.
9. Liggett, R., & Milne, M. (2020). Climate Consultant [Computer software]. UCLA Energy Design Tools Group.

SICAK İKLİMLERDE YANSITICI ÇATI KAPLAMALARININ ISIL DAVRANIŞI VE BİNA ENERJİ PERFORMANSINA ETKİLERİ

Gülşah Nur Özdemir^{1*}, Burak Barışık², Gülçin Yavaş¹, Gülten G. Akkurt²

¹İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Enerji Mühendisliği Y. Lisans Programı

²İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü
35430 İzmir, Türkiye

ÖZET

Çatılar, güneş radyasyonuna direkt ve sürekli maruz kalan yapı elemanlarıdır. Bu durum, özellikle sıcak iklim bölgelerinde yaz aylarında yadsınamayacak düzeyde ısı kazancına sebep olmaktadır. Güneş radyasyonunun artması ve güneşlenme sürelerinin uzunluğu, iç ortam sıcaklıklarının yükselmesine ve dolayısıyla soğutma için gerekli olan enerji tüketiminin artmasına yol açmaktadır. Bu nedenle, bina kabuklarında yüksek yansıtıcılığa sahip malzemelerin kullanılması, bir pasif soğutma stratejisi olarak önemli olmaktadır. Bu çalışmanın amacı, yansıtıcı kaplamalı kiremitlerin ısı davranışlarını sıcak iklim koşullarında analiz etmek ve bina enerji performansına etkisini incelemektir. Çalışma kapsamında, İYTE ESE Laboratuvar Binası çatısına kurulan deneysel çatıda yansıtıcı kaplamalı kiremitler ve endüstriyel kiremitler kullanılarak yüzey sıcaklıkları ölçülmektedir. Bu sistemde bir meteoroloji istasyonu aracılığıyla hava sıcaklığı ve dış ortam parametreleri kaydedilmektedir. Bu sistemden alınan ölçümlerden elde edilen veriler, oluşturulan bina enerji modeli ile yansıtıcı kiremitlerin bina enerji performansına etkisini ölçmek üzere değerlendirilmiştir. Çalışma, sürdürülebilir yapı fiziği yaklaşımları doğrultusunda değişen iklim koşullarına uygun ve enerji etkin yapı tasarımı hedeflerine yönelik önemli bulgular sunmaktadır.

Anahtar kelimeler: Pasif soğutma, bina enerji modellemesi, yansıtıcı çatı kiremitleri.

THERMAL BEHAVIOUR AND EFFECTS OF REFLECTIVE ROOF TILE COATINGS ON BUILDING ENERGY PERFORMANCE IN HOT CLIMATES

ABSTRACT

Roofs are building elements that are directly and continuously exposed to solar radiation. This situation causes a significant level of heat gain, especially in hot climate regions during the summer months. Increased solar radiation and longer sunshine periods lead to higher indoor temperatures and consequently to increased energy consumption for cooling. Therefore, the use of highly reflective materials in building envelopes is important as a passive cooling strategy. The aim of this study is to analyze the thermal behavior of reflective coated roof tiles under hot climate conditions and to examine their effect on building energy performance. Within the scope of the study, surface temperatures are measured using reflective coated tiles and industrial tiles on an experimental roof installed on the roof of the İYTE ESE Laboratory Building. In this system, air temperature and outdoor environmental parameters are recorded by a meteorological station. The data obtained from the measurements taken from this system were evaluated to measure the effect of reflective tiles on building energy performance using the building energy model created. The study presents important findings in line with sustainable building physics approaches, targeting energy-efficient building design suitable for changing climate conditions.

Keywords: Passive cooling, building energy modelling, reflective roof tiles.

^{1*} e-posta adresi: gulsahozdemir@iyte.edu.tr

1. GİRİŞ

Günümüzde küresel iklim değişikliği ve buna bağlı olarak artan hava sıcaklıkları, binalarda ısıl konforun sağlanmasını ve soğutma ihtiyacının karşılanmasını zorlaştırmaktadır. Literatüre göre, küresel ısınma nedeniyle sadece Akdeniz iklimi gibi sıcak iklim bölgelerinde değil soğuk iklim bölgelerinde de bina soğutma taleplerinin artacağı öngörülmektedir [1, 2, 3, 4]. Bu nedenle değişen iklim koşulları altında binalarda ısıl konforun sağlanması ve bina enerji performansının artırılması için, tasarım aşamasında yeni stratejilerin geliştirilmesini gerektirmektedir [1]. Bina kabuğu, dış ortam ile iç ortam arasındaki ısı alışverişi mekanizmasının gerçekleştiği temel yapıdır. Bina kabuğu elemanları arasında çatılar, gün boyunca güneş radyasyonuna en dik açıyla ve en uzun süre maruz kalan yüzeylerdir. Bu nedenle çatılar, bina kabuğunun enerji performansı için kritik öneme sahiptir. Çatı yüzeyi tarafından absorbe edilen güneş enerjisi, iletim yoluyla iç mekana aktarılarak iç ortam sıcaklığının artmasına neden olur. Ayrıca, geleneksel, koyu renkli ve düşük yansıtıcılığa sahip çatı malzemeleri, absorbe ettikleri enerjiyi dış ortama tekrar yayarak kentsel ısı adası (UHI) etkisinin oluşmasına neden olur [5]. Bu olumsuzluklarla mücadelede aktif iklimlendirme sistemlerine olan bağımlılığı ve dolayısıyla elektrik tüketimini azaltmak amacıyla, pasif soğutma stratejileri ön plana çıkmaktadır. Bu stratejiler arasında en etkili ve uygulanabilir yöntemlerden biri yüksek yansıtıcılığa sahip malzemelerin kullanılmasıdır [6]. Yansıtıcılığı yüksek malzemeler, güneşten gelen radyasyonun büyük bir kısmını yansıtarak çatı yüzeyinin ısınmasını engellemekte ve böylece binaya giren ısı akısını azaltmaktadır. Literatürde, yansıtıcı kaplamaların çatı yüzey sıcaklığını önemli ölçüde düşürdüğü ve buna bağlı olarak soğutma yükünde %36'ya kadar azalma sağladığı gösterilmektedir [7, 8]. Yansıtıcı malzemelerin, bina kabuğu enerji performansına etkisi yerel iklim koşullarına, malzeme yapısına ve uygulama yöntemine göre değişkenlik göstermektedir. Malzeme düzeyindeki gelişmelerin bina bütününe olan etkisi, büyük ölçüde sayısal simülasyonlar aracılığıyla analiz edilmektedir. Yalıtım kalınlığı, pencere-duvar oranı, yönelim gibi farklı pasif tasarım stratejilerinin yansıtıcı çatılarla entegre edildiği çok amaçlı optimizasyon çalışmaları, soğutma enerjisi tüketiminin önemli ölçüde azaltılabileceğini göstermektedir [6]. Ancak bu sayısal modellerin, özellikle yerel iklim dinamiklerini barındıran bölgelerde doğruluğunu artırmak için sahada ölçülmüş gerçek zamanlı deneysel verilerle kalibre edilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Yansıtıcı çatıların kullanımı, yalnızca tekil bina ölçeğinde enerji tasarrufu sağlamakla kalmaz, aynı zamanda geniş bir kentsel ve mimari etki yaratır. Mimari ölçekte bu kaplamalar, mekanik soğutma sistemlerine olan bağımlılığı azaltarak ilk yatırım maliyetlerini düşürmekte ve iç ortamda daha düşük bir sıcaklık sağlayarak kullanıcı ısıl konforunu artırmaktadır [6]. Kent ölçeğinde ise yansıtıcı çatılar, geleneksel koyu renkli çatılardan kaynaklanan UHI etkisini azaltmada en uygulanabilir yöntemlerden biridir [5]. Yüksek albedolu yüzeylerin kent genelinde yaygınlaştırılması, kentsel ısınmayı yavaşlatarak sürdürülebilir enerji ve iklim eylem planları hedefleri doğrultusunda şehirlerin karbon ayak izinin düşürülmesine stratejik bir katkı sunmaktadır. Mevcut literatür yansıtıcı malzemelerin potansiyelini açıkça ortaya koysa da, sıcak iklim bölgelerinde deneysel verilerle desteklenen çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmanın temel amacı, yansıtıcı kaplamalı çatı kiremitlerinin ısıl davranışlarını deneysel olarak analiz etmek ve bu verilerin bina enerji performansı üzerindeki etkilerini simülasyon araçları ile incelemektir. Bu kapsamda, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü (İYTE) Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü Laboratuvar Binası (ESE Lab.) çatısında bir deney düzeneği kurulmuştur. Bu deney düzeneği ile yansıtıcı kaplamalı ve endüstriyel kiremitlerin yüzey sıcaklıkları eş zamanlı olarak ölçülmüştür. Elde edilen veriler, bina çatısında bulunan Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü Meteoroloji İstasyonu'ndan (ESEMİ) alınan dış ortam parametreleri ile ilişkilendirilmiştir. Küçük bir konut binası modellenmiş ve binanın çatısı her iki kiremit türü için simüle edilmiştir. Simülasyon sunucunda çatıdan olan

ısıtma/soğutma enerji tüketim değerleri karşılaştırılmıştır. Bu çalışma, sürdürülebilir yapı fiziği ilkeleri doğrultusunda, enerji etkin yapı tasarımı ve iklim değişikliğine dirençli kentler için uygulama temelli veriler sunmayı hedeflemektedir.

2. YÖNTEM

2.1. Çalışma Alanı ve İklim Özellikleri

Akdeniz iklimi, uzun, sıcak ve kurak yaz mevsimi, yüksek ve uzun süreli güneş radyasyonu ve diğer iklim koşullarına göre nispeten ılıman kışlar ile bilinir [8]. Çalışma alanı, İzmir'in kıyı şeridinde bulunan İYTE kampüsü içerisinde yer alan ESE Lab.'dır. Bina, 56,8 m×18,4 m plan boyutlarına ve 10 m yüksekliğe sahip olup çatı eğimi 8°'dir. Akdeniz iklim koşullarının yoğun etkisine maruz kalan bina, sıcak iklim koşullarında yansıtıcı kiremitlerin ısı davranışını değerlendirmek için uygun bir ortam sağlamaktadır.

2.2. Yansıtıcı Kaplamalı Kiremit Üretimi, Test Sisteminin Geliştirilmesi ve Modelleme

Bu çalışmada yansıtıcı kaplamaların geliştirilmesi yaklaşımı çatı kiremiti bağlamında ele alınmakla beraber, deneysel uygulamalarda yer karoları altlık olarak kullanılmıştır. Geleneksel çatı kiremitlerinin çoğunlukla safsızlık oranı yüksek toprak esaslı bileşenlerden üretilmesi, kimyasal kompozisyonlarının, termal ve fiziksel özelliklerinin yeterince kontrol edilememesi sebebiyle yer karosu hammaddesi tercih edilmiştir. Böylece, deneysel sürecin tekrarı ve kontrol edilebilirliği artırılmıştır. Çalışma üç aşamadan oluşmaktadır. i) yansıtıcı kaplamalarının geliştirilmesi ve kiremit yüzeylerine uygulanması, ii) deneysel çatı sisteminin kurulması, yüzey sıcaklık ve meteorolojik ölçümlerin toplanması, iii) modelleme ve simülasyonlar.

i) Yansıtıcı kaplamalarının geliştirilmesi ve kiremit yüzeylerine uygulanması: Çalışmanın ilk aşamasında, yerel bir üreticiden temin edilen kiremit hammaddesi, kalıplara dökülerek şekillendirilmiştir. Ardından, yansıtıcı sır formülasyonları, güneş spektrumunun yakın Yakın İnfrared (NIR) (700-2100 nm) bölgesinin yansıtma performansını arttırmak amacıyla geliştirilmeye başlanmıştır [7]. Yansıtıcı sır formülasyonları, ticari olarak temin edilen fritler ve laboratuvar ortamında seçilmiş pigment oksitleri bir araya getirerek üretilmiştir. Bazı numunelerde homojenlik ve yansıtıcılık performansını arttırmak için engobe (astar) tabakası da uygulanmıştır. Çalışma kapsamında farklı frit ve pigment türleri yansıtıcılık ölçümleriyle karşılaştırılmıştır. Ölçümler, Perkin Elmer Lambda 950 spektrofotometresi kullanılarak yapılmıştır.

ii) Deneysel çatı sisteminin kurulması, yüzey sıcaklık ve meteorolojik ölçümlerin toplanması: ESE Lab. çatısına 2 adet 1 m²'lik deneysel çatı sistemi kurulmuştur. Bu deneysel çatılardan birine yansıtıcı kaplamalı kiremitler, diğerine ise yansıtıcı kaplamalı kiremitler ile aynı ölçülerde kesilmiş endüstriyel kiremitler yerleştirilmiştir. Bu iki düzeneğin ortasına kurulan ESEMİ ve bir veri kaydedici bulunmaktadır. Veri kaydediciye 5 adet yüzey sıcaklığı sensörü bağlanmıştır. Her düzeneğten bir kiremitin alt ve üst yüzeyine bağlanmış birer sensör, mevcut çatı sisteminin yüzeyinde bir sensör bulunmaktadır. Veri kaydedici, her 10 dakikada bir ölçümleri toplayarak depolamaktadır. Ölçüm cihaz ve sensörlerinin teknik özellikleri **Çizelge 1'de** verilmiştir. Toplanan verilerin saatlik ortalamaları alınmış, her iki kiremitin üst ve alt yüzey sıcaklıkları farkı için Eylül-Ekim 2025 aylarında toplanan ilk ölçümler **Eşitlik 1'e** göre analiz edilmiştir.

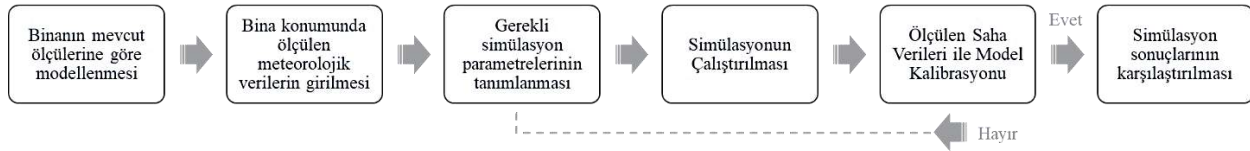
$$\Delta T = T_{\text{end.}} - T_{\text{yans.}} \quad (1)$$

end.; endüstriyel kiremit, yans.; yansıtıcı kaplamalı kiremit

Çizelge 1. Ölçüm cihazlarının teknik özellikleri.

Cihaz	Parametre	Ölçüm Aralığı (°C)	Çözünürlük (°C)	Doğruluk	Kalibrasyon
Graphtec GL240 veri kaydedici ve K-tipi sıcaklık sensörleri	Yüzey sıcaklığı	(-20)-100	0.1	-	Kalibrasyon, (-20)-100°C arasında 7 farklı sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. sapmalar: 0.2-0.8°C; belirsizlik: 0.07-0.17°C
WatchDog 3000 meteoroloji istasyonu	Hava sıcaklığı	(-40)-125	-	±0.3°C	Üretici teknik özellikleri

iii) Modelleme ve simülasyonlar: 50 m² büyüklüğünde bir konut binası, dinamik bir bina enerji performans analiz yazılımı olan DesignBuilder [9] kullanılarak modellenmiştir. DesignBuilder yazılımı, binaların enerji performansını iyileştirmeye yönelik olarak ön tasarım aşamalarında kullanılmakta ve kullanıcılara karar destek amacıyla bilgi sağlamaktadır [10]. Bina modelleme aşamaları, **Şekil 1**'deki akış diyagramında verilmiştir.



Şekil 1. Modelleme akış diyagramı.

Şekil 1'e göre bina verilerine göre oluşturulan modele, binanın bulunduğu lokasyonda ölçülen meteorolojik verilerin girilmesi ile model doğruluğu artmaktadır. Yerel verilerin kullanımı ile modellemenin tamamlanması sonrası bina içi ve dışında yapılan uzun süreli ölçümler kullanılarak model kalibre edilmelidir. Sonrasında modelde kullanılan parametreler için simülasyonlar gerçekleştirilir.

Model kalibrasyonu için binadan alınan ölçümler ile model sonuçları, Ortalama Sapma Hatası (MBE) (**Eşitlik 2**) ve Kök Ortalama Kare Hatası (CV(RMSE)) (**Eşitlik 3**) kullanılarak istatistiksel olarak analiz edilir [11]. ASHRAE Guideline 14'e göre, MBE and RMSE sırasıyla $< \pm 10\%$ and $< 30\%$ ise model kalibre edilmiştir [12]. Kalibre edilen model kullanılarak yansıtıcı kaplamalı ve endüstriyel kiremitler için simülasyonlar gerçekleştirilir.

$$MBE (\%) = \frac{100}{x_{av}} \sum \frac{(x_s - x_m)}{N} \quad (2)$$

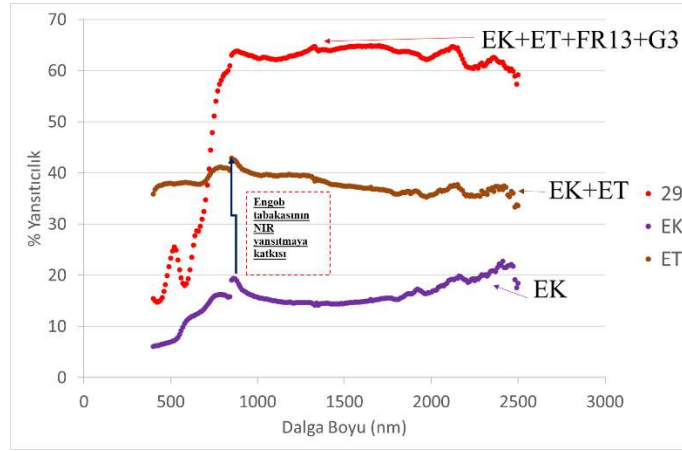
$$CV(RMSE)(\%) = \frac{100}{x_{av}} \sqrt{\frac{1}{N} \sum (x_s - x_m)^2} \quad (3)$$

x_s ; modelden elde edilen değişken değerleri, x_m ; sahada ölçülen değişken değerleri, x_{av} ; N adet ölçülmüş değişken değerinin ortalaması.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

3.1. Yansıtıcı Kaplamaların Geliştirilmesi ve Kiremit Yüzeylerine Uygulanması

Laboratuvar ölçeğinde hazırlanan numunelerin spektrofotometre ölçüm sonuçları **Şekil 2**'de verilmiştir. **Şekil 2**'den de görüldüğü gibi endüstriyel kiremit üzerinde engob katmanı ve G3 no'lu pigment uygulanmış 29 numaralı numune, NIR bölgesinde %65 ile en yüksek yansıtıcılık performansını göstermiştir. Bu numune **Şekil 3**'te verilmiştir. Krom oksit içeriği nedeniyle yeşil renkli olan bu numune, aynı zamanda estetik kaygılardan dolayı çatılarda genellikle kullanılmayan beyaz yüzeylere (maksimum yansıtma katsayısı $\geq$ %85) alternatif yüzeyler elde etmenin mümkün olduğunu ortaya koymaktadır. Deneysel çatıda test edilmek üzere bu numune, 13x7 cm ölçülerinde 118 adet üretilmiştir.



Şekil 2. Çeşitli kaplamaların spektrofotometre grafiği.

(EK: endüstriyel kiremit; ET: engob tabakası; FR: frit; G3, G1, R3, Y3: pigmentler).



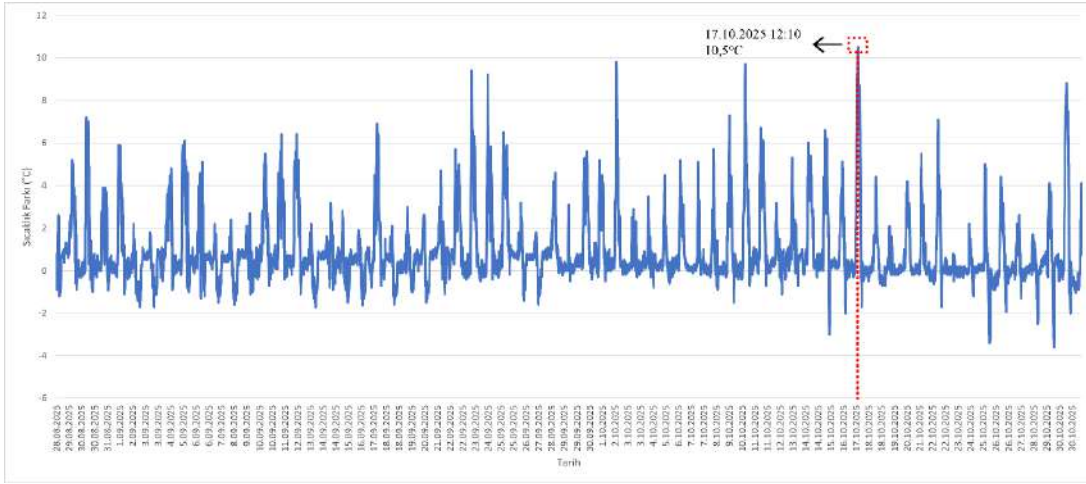
Şekil 3. Spektrofotometre ölçümlerinde en iyi sonucu veren numune 29.

3.2. Deneysel Çatı Sisteminin Kurulması, Yüzey Sıcaklık ve Meteorolojik Verilerin Toplanması

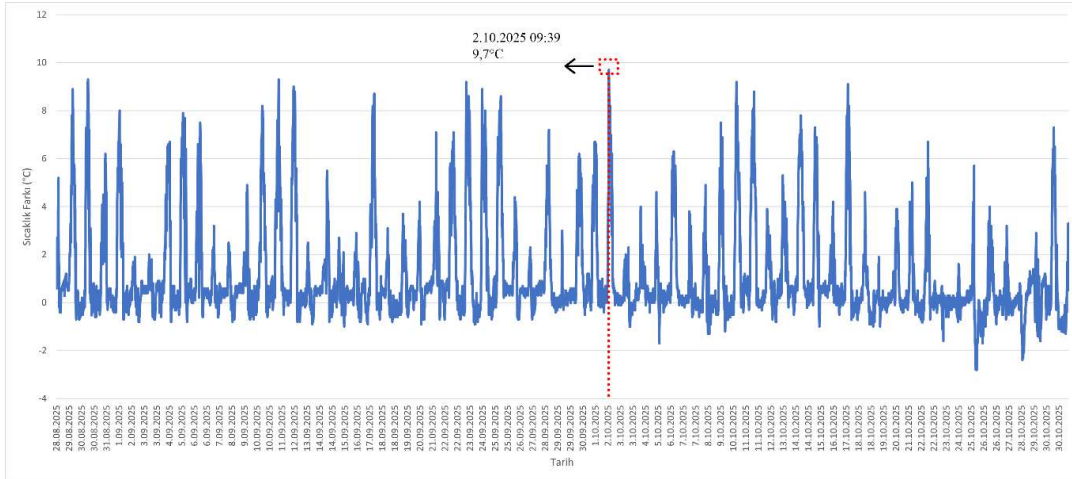
Şekil 4'te ESE Lab. çatısına kurulan 1 m²'lik 2 adet deneysel çatı gösterilmiştir. Deneysel çatılara yerleştirilen endüstriyel ve sırlı kiremitlerin performansı Eylül-Ekim 2025 aylarında toplanan ilk ölçümler için analiz edilmiştir. **Şekil 5**, izleme dönemi boyunca kiremitlerin üst yüzeyleri, **Şekil 6** ise alt yüzeyleri arasındaki saatlik ortalama sıcaklık farkını göstermektedir. **Şekil 5**'den görüldüğü gibi üst yüzey sıcaklıklarında, özellikle gündüz saatlerinde daha yüksek sıcaklıklar gözlenmiş olup, her iki kiremit arasındaki en yüksek sıcaklık farkı öğle saatlerinde 10,5°C'dir. **Şekil 6**'ya göre ise alt yüzeylerdeki en yüksek sıcaklık farkı sabah saatlerinde olup, 9,7°C olarak belirlenmiştir.



Şekil 4. Deneysel çatı sistemi (endüstriyel-solda ve yansıtıcı kaplamalı-sağda kiremitler olmak üzere).



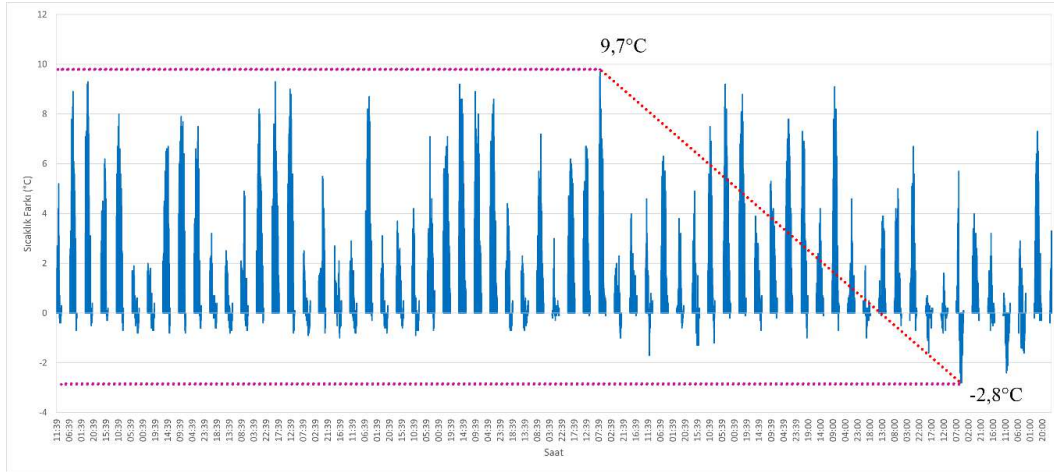
Şekil 5. Kiremit üst yüzeyleri arası sıcaklık farkı ($\Delta T = T_{\text{end.}} - T_{\text{yans.}}$).



Şekil 6. Kiremit alt yüzeyleri arası sıcaklık farkı ($\Delta T = T_{\text{end.}} - T_{\text{yans.}}$).

Gözlemlenen sıcaklık farklarının zamana bağlı değişimini detaylı olarak görebilmek amacıyla, veriler gece ve gündüz olarak alt yüzeylerde incelenmiştir. Şekil 5 ve 6, sırasıyla gündüz ve gece saatleri için sıcaklık farklarını göstermektedir.

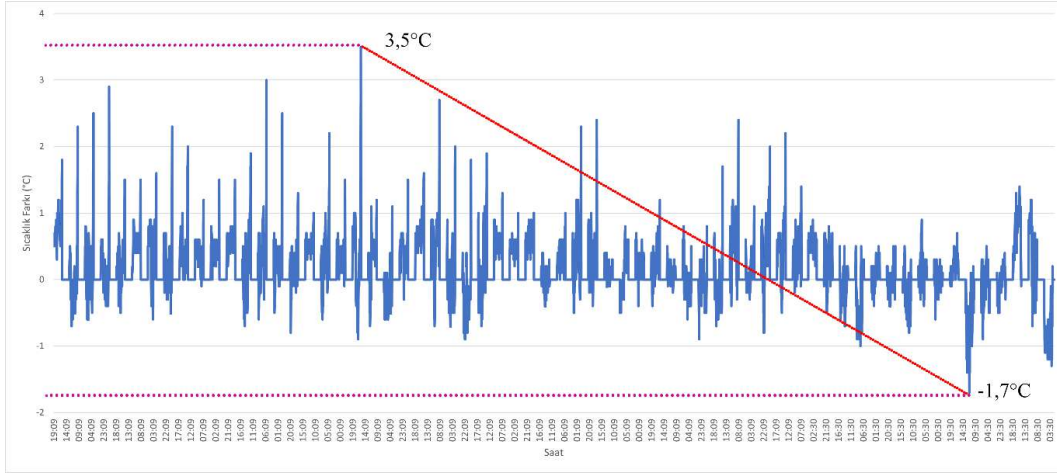
Endüstriyel ve yansıtıcı kaplamalı kiremitlerin alt yüzeyleri arasında ölçülen sıcaklık farkının gece ve gündüz saatlerinde kaydedilen değerleri, yansıtıcı kaplamaların performansının güneş radyasyonuna maruz kalma yüküyle güçlü bir şekilde bağlantılı olduğunu göstermektedir. En iyi sonuçlar, hava sıcaklıklarının nispeten yüksek olduğu dönemlerde, yani yaklaşık 25°C ile 30°C arasında değiştiği gündüz koşullarına karşılık gelen dönemlerde gözlemlenmiştir. Bu sıcaklık aralığında, ölçülen yüzey sıcaklığı farkları önemli ölçüde artmıştır. Deneysel ölçümler, gündüz periyodunda üst yüzey sıcaklık farkının yaklaşık (-3,6)°C ile 10,5°C arasında, alt yüzey sıcaklık farkının ise (-2,8)°C ile 9,7°C arasında değiştiğini göstermiştir. Bu periyotta sıcaklık farklarının büyük bir kısmı 2-8°C arasında değişmektedir. **Şekil 5** incelendiğinde, sıcaklık farklarının gün içerisindeki değişiminin öğle saatlerine yakın periyotlarda maksimum değerlere ulaştığı görülmektedir. Böylece, yansıtıcı kaplamanın en belirgin ısı etkisini, hava sıcaklıklarının yüksek olduğu gündüz saatlerinde yarattığını söylemek mümkün olacaktır. Bununla birlikte, nadir de olsa gündüz periyodunda sıcaklık farkının 0°C'nin altına düştüğü durumlar da oluşmuştur. Ancak **Şekil 5**'teki tüm veriler dikkate alındığında, genel eğilimin bahsedilen kontrast ile karakterize olduğu ortaya koyulmuştur. Buna karşılık **Şekil 8**'e bakıldığında, gece ölçümlerinde sıcaklık farklarının önemli ölçüde azaldığı ve dar bir aralıkta değişim gösterdiği gözlemlenmektedir. Gece ölçümlerinde yoğun olarak, sıcaklık farkları (-1)-1°C arasında değişmektedir. Genel olarak alt yüzey sıcaklık farkı değerleri (-1,7)°C ile 3,5°C arasında kalmıştır. Bu periyotta değerlerin sıfırın altında seyretmesi, güneş radyasyonunun ortadan kalkması ile açıklanabilir. Malzemenin gün boyunca depoladığı ısıнын atmosfere geri yayılması ile sıcaklık farkları azalmıştır. Bu belirgin fark, yansıtıcı kaplamanın güneş radyasyonu kaynaklı ısı yüküne, çatılar odağında bir termal bariyer oluşturduğunu açıkça göstermektedir.



Şekil 7. Gündüz saatlerinde kiremit alt yüzeylerindeki sıcaklık farkı.

Ekim ayının ikinci yarısı boyunca alınan ölçümlerde ise, yüzey sıcaklıkları farkları düşük seviyelerde kalmıştır. Gündüz saatlerinde önceki ayda alınan ölçümlere nazaran belirgin farklar ortaya çıkmamıştır. Özellikle sabahın erken saatlerinde ve öğleden sonra geç saatlerde geçiş dönemlerinde zaman zaman negatif sıcaklık farkları gözlemlenmiştir. Ancak sistemin ısı davranışının genel analize etkisine bakılacak olursa, düşük güneş radyasyonu alınan dönemlerde yansıtıcı kaplamaların sıcak iklim bölgelerinde istenmeyen bir ısı davranışa sebep olmadığı ortaya konmuştur. Ayrıca bu bulgular, yansıtıcı kaplamanın sadece yüzey sıcaklıklarını azaltmakla kalmayıp, çatıdan iç mekana olan ısı transferinin azalmasına da katkı sağladığını doğrulamaktadır.

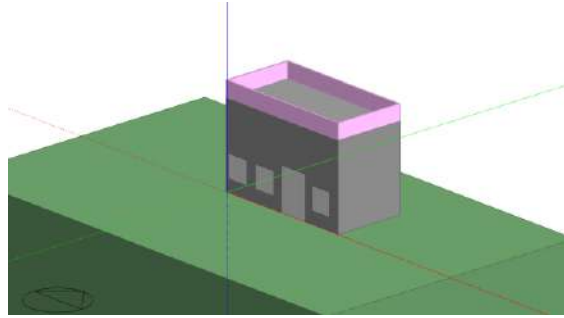
Böylece, yansıtıcı kaplamalı kiremitlerin, sürdürülebilir ve enerji dostu yapı kabuğu tasarımında etkili bir çözüm olabileceği ortaya konmuştur.



Şekil 8. Gece saatlerinde kiremit alt yüzeylerindeki sıcaklık farkı.

3.3. Modelleme ve Simülasyonlar

Çalışılan konuta ait planlar, bina ısıtma/soğutma sistemleri, kullanıcı bilgileri ve tüm enerji tüketim kalemleri bilgileri toplanarak DesignBuilder yazılımına aktarılmış ve binanın detaylı dinamik enerji modeli oluşturulmuştur. Modelde kullanılan meteorolojik veriler, deneysel çatıda bulunan ESEMİ'den alınmıştır. Model, bina içinde çeşitli noktalardan toplanan 10 aylık sıcaklık verileri ile kalibre edilmiştir. **Eşitlik 2** ve **3**'e göre yapılan MBE ve RMSE değerleri sırasıyla %6,35 ve %9,24 olarak hesaplanmıştır. ASHRAE Guideline 14'e göre, MBE and RMSE sırasıyla $\leq \pm 10\%$ and $< 30\%$ ise model kalibre edilmiş olduğundan model kalibre olmuş ve simülasyonlar için hazır hale gelmiştir. Binanın DesignBuilder modeli **Şekil 9**'da gösterilmiştir.



Şekil 9. Konut binasının DesignBuilder modeli.

Kalibre edilen model, bina çatısının (teras çatı) endüstriyel ve yansıtıcı kaplamalı kiremit ile kaplandığı iki senaryo için simüle edilmiş, aylık enerji ihtiyacı performansı **Çizelge 2**'de karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma, yansıtıcı kaplamalı kiremitlerin yıl boyunca binanın soğutma enerjisi ihtiyacına katkısı ile ısıtma enerjisi ihtiyacına olan etkisini ortaya koymaktır.

Çizelge 2. Endüstriyel ve yansıtıcı kaplamalı kiremitlerin aylık enerji ihtiyacı (kWh).

Ay	E _{yans.} (kWh)	E _{end.} (kWh)	E _{yans.} -E _{end.} (kWh)	Etki
Ocak	-97,14*	-89,41	-7,73	Isıtma enerjisi ihtiyacında artış
Şubat	-107,04	-95,60	-11,44	Isıtma enerjisi ihtiyacında artış
Mart	-94,38	-74,15	-20,23	Isıtma enerjisi ihtiyacında artış
Nisan	-84,81	-56,15	-28,66	Isıtma enerjisi ihtiyacında artış
Mayıs	-35,36	4,97	-40,33	Geçiş (soğutmadan ısıtmaya)
Haziran	9,20*	53,20	-44	Soğutma enerjisi ihtiyacında azalma
Temmuz	19,15	61,80	-42,65	Soğutma enerjisi ihtiyacında azalma
Ağustos	7,12	47,91	-40,79	Soğutma enerjisi ihtiyacında azalma
Eylül	-26,10	4,84	-30,94	Geçiş (soğutmadan ısıtmaya)
Ekim	-103,93	-87,63	-16,3	Isıtma enerjisi ihtiyacında artış
Kasım	-98,59	-89,55	-9,04	Isıtma enerjisi ihtiyacında artış
Aralık	-99,66	-93,28	-6,38	Isıtma enerjisi ihtiyacında artış

*Negatif değerler ısıtma ihtiyacı, pozitif değerler soğutma ihtiyacı

Çizelge 2, yansıtıcı kaplamalı kiremitlerin yaz aylarında yüksek düzeyde soğutma enerjisi tasarrufu sağlarken (%69-85), kış aylarında sınırlı bir ısıtma enerjisi artışı (%7-27) sağladığını göstermektedir. En güçlü etki %85 ile Ağustos ayındadır. Mayıs ve Eylül gibi geçiş aylarında ise sistemin soğutma rejiminden ısıtma rejimine kayması, performans değerlendirmesinde yalnızca büyüklüğün değil, enerji ihtiyacının yönünün de dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. Bu aylarda soğutma enerjisi ihtiyacı ısıtma enerjisi ihtiyacına dönüşerek İzmir gibi sıcak iklim bölgelerinde soğutma yüklerine önemli bir katkı sağlar. Yıllık net performans değerlendirildiğinde, yansıtıcı kaplamalı kiremitler, endüstriyel kiremitlere göre daha düşük enerji ihtiyaçları ile bina üzerinde pozitif bir etkiye sahiptir.

3.4. Ölçüm ve Modelleme Sonuçlarının Karşılaştırılması

Test çatısı ölçümleri, endüstriyel ve yansıtıcı kaplamalı kiremitler arasında oluşan sıcaklık farklarının güneş yükünün yüksek olduğu dönemlerde ve özellikle gündüz saatlerinde belirginleştiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, gece saatlerinde ve nispeten soğuk hava koşullarında ise farkların sınırlı olduğu gözlemlenmiştir. Modelleme ile elde edilen sonuçlar, bu sonuçları takiben aynı yaklaşımı tutarlı olarak desteklemektedir. Simülasyonlar, yansıtıcı kaplamalı kiremit kullanılan çatı senaryosu için güneş ışığına daha çok maruz kalınan dönemlerde, ısı kazançlarının ve böylece soğutma enerjisi ihtiyacının endüstriyel kiremit kullanılan senaryoya kıyasla daha düşük olduğunu göstermiştir. Her iki yaklaşım da yansıtıcı kaplamalı çatı senaryosunun yüksek güneş yükü koşullarında pozitif bir etki sağladığı, pik soğutma yükünü azaltarak HVAC sistem kapasitesinin, dolayısı ile UHI etkisinin azalmasına katkıda bulunup ısı konforu artırdığı yönünde örtüşen sonuçlar vermiştir. Bu sonuçlar; Akdeniz iklim bölgeleri, tropik iklimler, çöl iklimleri gibi bina soğutma yüklerinin yüksek olduğu bölgelerde yer alan binalar için geçerlidir. Soğuk iklim bölgelerinde ise yansıtıcı kaplamalı kiremit uygulamaları, güneş kazançlarının azalmasına bağlı olarak ısıtma yüklerini artırabileceğinden, bu tür sistemlerin yüksek ısı yalıtımı ile birlikte ve tercihen orta düzey yansıtıcılık sağlayacak şekilde optimize edilmesi önerilmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada sunulan araştırma, 2023IYTE-2-0021 numaralı İYTE-AÜDP Projesi kapsamında finansal olarak desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

1. Berardi, U., & Jafarpur, P. (2020). Assessing the impact of climate change on building heating and cooling energy demand in Canada. **Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 121*, 109681. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109681>
2. Pérez-Andreu, V., Aparicio-Fernández, C., Martínez-Ibernón, A., & Vivancos, J. L. (2018). Impact of climate change on heating and cooling energy demand in a residential building in a Mediterranean climate. **Energy*, 165*, 63–74. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.015>
3. Xu, P., Huang, Y. J., Miller, N., Schlegel, N., & Shen, P. (2012). Impacts of climate change on building heating and cooling energy patterns in California. **Energy*, 44*(1), 792–804. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.05.013>
4. Bamdad, K. (2023). Cool roofs: A climate change mitigation and adaptation strategy for residential buildings. **Building and Environment*, 236*, 110271. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110271>
5. Santamouris, M. (2014). Cooling the cities—A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. **Solar Energy*, 103*, 682–703. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.003>
6. Yuan, J., Jiao, Z., Chai, J., Farnham, C., & Emura, K. (2024). Reflective coatings: Enhancing building performance and sustainability. **Nano-Structures & Nano-Objects*, 39*, 101296. <https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2024.101296>
7. Ashhar, M. Z. M., & Haw, L. C. (2022). Recent research and development on the use of reflective technology in buildings—A review. **Journal of Building Engineering*, 45*, 103552. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103552>
8. Verma, R., & Rakshit, D. (2023). Comparison of reflective coating with other passive strategies: A climate-based design and optimization study of building envelope. **Energy and Buildings*, 287*, 112973. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112973>
9. DesignBuilder Software Ltd. (2019). **DesignBuilder software**. <https://designbuilder.co.uk/>
10. Abdullah, I. A., Salisu, A. S., & Dalhatu, A. (2025). Empirical validation of DesignBuilder software for simulating environmental parameters in a classroom environment. **Lagos State University (LASU) Postgraduate School Journal*, 1*(2), 47–49. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14776279>
11. Evseev, E. G., & Kudish, A. I. (2009). The assessment of different models to predict the global solar radiation on a surface tilted to the south. **Solar Energy*, 83*(3), 377–388. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.08.010>
12. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2002). **ASHRAE Guideline 14: Measurement of energy and demand savings**. ASHRAE.

TARİHİ BİNALARDA YANGIN KOMPARTİMANLARININ SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ve DİRENÇLİLİK AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

Esmâ Birekul¹
Nuri Serteser²
^{1,2} İTÜ Mimarlık Fakültesi,
Taşkışla Kampüsü, Şişli, İstanbul, 34367

ÖZET

Yangın emniyeti tasarımı, tarihi binalarda özel yaklaşımlar içermelidir. Tasarım aşamasında yapılacak müdahaleler binanın özgünlüğü üzerinde, bütünlüğünün devamı açısından önemli rol oynamaktadır. Öte yandan tarihi binaların varlığının devam ettirilebilmesi için sürdürülebilirlik ve dirençlilik koşullarının sağlanmasına temel koşullar arasındadır. Yangın emniyetli bina tasarımı çerçevesinde en çok müdahale gerektiren pasif önlemlerden biri olan yangın kompartımanları tarihi binaların bu özelliklerinin devamlılığını sağlayacak en etkili faktörler arasındadır. Farklı ülkelerde yangın kompartımanlarının tarihi binalarda uygulanması ile ilgili çeşitli düzenlemeler yer almaktadır. Bu çalışma kapsamında, tarihi binalarda yangın emniyetine yönelik uygulamalar bakımından en gelişmiş ülkelerden biri olan İngiltere'deki zorunlu ve zorunlu olmayan yangın emniyeti düzenlemelerinde kompartıman oluşturulmasıyla ilgili koşullar sürdürülebilirlik ve dirençlilik perspektifinde incelenmiş ve uygulama açısından olumlu ve olumsuz yönleri vurgulanmıştır.

Anahtar kelimeler: Tarihi binalar, yangın kompartımanları, pasif yangın önlemleri, sürdürülebilirlik, dirençlilik.

EVALUATION OF FIRE COMPARTMENTS IN HISTORIC BUILDINGS IN TERMS OF SUSTAINABILITY AND RESILIENCE ACCORDING TO UK FIRE REGULATIONS

ABSTRACT

Fire safety design in historic buildings requires special approaches. Interventions made during the design phase play a significant role in maintaining the building's originality and integrity. Furthermore, ensuring sustainability and resilience is fundamental to the continued existence of historic buildings. Fire compartments, one of the most crucial passive measures requiring intervention within the framework of fire-safe building design, are among the most effective factors in ensuring the continuity of these features in historic buildings, and their implementation must be carried out meticulously. Various regulations exist in different countries regarding the application of fire compartments in historic buildings. This study examines the legally mandatory and non-mandatory fire safety regulations in the UK, one of the most advanced countries in terms of fire safety practices in historic buildings. The regulations that incorporate the compartment approach from a sustainability and resilience perspective are evaluated, and the positive and negative aspects of its application are highlighted.

Keywords: Historic buildings, fire compartments, passive fire prevention measures, sustainability, resilience.

¹* esma.birekul@gmail.com

1. GİRİŞ

Tarihi binaların büyük bölümü inşa edildikleri zamanın yapı teknolojisini ve malzeme karakteristiklerini yansıtır. Yapıldıkları çağda binanın kullanım biçimi ve maruz kaldıkları yapısal tehlikeler günümüz koşullarından büyük oranda farklılık arz etse de yangın gibi felaketler yüzyıllardır binaları tehdit etmeye devam etmektedir. Kültür varlığı olarak günümüze dek gelebilen tarihi binaları gelecek nesillere aktarmak bizler için bir sorumluluk olmakla birlikte bu binaları nasıl koruyacağımız konusunda bilgi, teknoloji ve korumaya ilişkin yasal yaptırımlar üretmek de aynı sorumluluğun bir paçasıdır. Sebebi ne olursa olsun yangın gibi felaketler tarihi binaların büyük oranda zarar görmesine ya da tümden yok olmasına neden olan en büyük nedenlerden biridir. Özellikle tarihi binalar “sürdürülebilirlik” ve “dirençlilik” özelliklerini yitirmemelidir. Yangın, binaya zarar vererek bu iki kavramın kısmen ya da tamamen uygulanamamasına neden olmaktadır.

Tarihi binaları yangının meydana getirebileceği bu tür olumsuz etkilerden korumak için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Yangın kompartımanları, yangını belirli bir süre boyunca bulunduğu hacim içinde hapsederek bina içinde yayılmasını sınırlandırmak amacıyla yangına dayanıklı yapı elemanlarıyla oluşturulan bölümlerdir. Özellikle belirli alansal büyüklüğün aşılması durumunda ya da yangın tehlikesi bakımından riskli bölgelerde yatay ve/veya düşey yönde yangın kompartımanları oluşturularak, meydana gelebilecek hasarın lokalize edilmesi sağlanabilir. Bu yönüyle kompartımanlara ayırma, binanın tamamen zarar görmesini engelleyerek dirençliliğin artırılmasına katkı sağladığı gibi binanın tarihi özelliklerinin yok olmasına engel olarak sürdürülebilirliğine de destek olmaktadır.

Ancak tarihi binalarda yangın kompartımanlarının oluşturulması, bazı durumlarda mevcut nitelikli eserde özgün mimari karakterinin bozulması anlamına da gelebilmektedir. Bu sebeple yangın kompartımanı bileşeni haline getirilmesi gereken orijinal yapıya ait kapı, pencere, duvar, döşeme ve diğer yapı elemanlarının yangına dayanıklı hale getirilmesi veya değiştirilmesinin bir denge içinde yapılması gerekmektedir. Bu denge ihtiyacı özellikle tarihi binalarda yangın emniyetiyle ilgili detaylı yasal düzenlemelerin bulunduğu İngiltere’de uygulanan performans temelli yaklaşımlarda daha belirgin şekilde kendini göstermekte ve bina özelinde değerlendirilmesi gereken bir strateji olarak ele alınmaktadır.

Bu çalışmada İngiltere’deki yangın emniyeti düzenlemelerinin, tarihi binalardaki yangın kompartımanlarının sürdürülebilirlik ve dirençlilik üzerindeki etkileri incelenmektedir.

2. YANGIN EMNİYETİNDE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK VE DİRENÇLİLİK

Tarihi binalarda “sürdürülebilirlik”, minimum müdahale ve özgünlüğün korunması ilkeleri ile tanımlanmakta olup kültürel mirasın korunması, sürdürülebilirliğin temel bileşenlerinden biridir [1, 2]. “Dirençlilik” ise bir sistemin tehlikelere karşı direnme, etkileri absorbe etme ve toparlanma kapasitesi olarak tanımlanmakta ve yangın emniyeti açısından binaların tamamen kaybını önlemeye yönelik stratejilerle ilişkilendirilmektedir [3, 4]. Bu bağlamda performans temelli yaklaşımlar, yangının kontrol altına alınmasını hedeflemekte ve yapılacak müdahalelerin tarihi binaların karakterine zarar vermeden uygulanması gerektiği vurgulamaktadır [5]. Şekil 1’de yangın emniyetinde sürdürülebilirlik ve dirençlilik ilişkisi görülmektedir.



Şekil 1. Yangın Emniyetinde Sürdürülebilirlik ve Dirençlilik İlişkisi

Yangın emniyetinde sürdürülebilirlik ve dirençlilik kavramları, tarihi binalarda birbirini tamamlayan ancak zaman zaman çelişen iki temel yaklaşım olarak değerlendirilmektedir [4]. Bu nedenle yangın emniyetli bina tasarımında her iki kavram arasında dengeli bir çözüm geliştirilmesi gerekmektedir.

3. İNGİLTERE’DE TARİHİ BİNALARDA YANGIN EMNİYETİ DÜZENLEMELERİ VE YANGIN KOMPARTİMANLARI

Binlerce yıllık geçmişi ile İngiltere’nin, dünya genelinde tarihi binalarda yangın emniyeti konusu incelendiğinde alınan önlemler bakımında en gelişmiş ülkelerden birisi olduğu görülmektedir. Ülkenin uyguladığı zorunlu düzenlemelerde tarihi binalar özelinde bir doküman bulunmamasına rağmen, birçok kurumun yayınladığı kılavuz not ve teknik rehber gibi zorunlu olmayan düzenlemeler ile risk temelli bir yaklaşım sergilendiği anlaşılmaktadır.

Bu kapsamda İngiltere’de tarihi binalarda yangın emniyetini sağlayan zorunlu düzenlemeler ile zorunlu olmayan düzenlemelerin kompartıman konusundaki yaklaşımları incelenerek aşağıda **Çizelge 1**’de sınıflandırılmıştır.

Çizelge 1. İngiltere’deki tarihi binalarda yangın emniyeti ile ilgili zorunlu ve zorunlu olmayan düzenlemeler

KATEGORİ	DOKÜMAN	TÜR	KAPSAM	KOMPARTİMAN YAKLAŞIMI	İÇERİK
ZORUNLU DÜZENLEMELER	The Regulatory Reform (Fire Safety) Order (RRO) 2005 [6].	Yönetmelik	Tüm Binalar	Yok	Risk Temelli Yaklaşım
	The Regulatory Reform (Fire Safety) Order (RRO) 2005): Guidance No:1 Enforcement [7].	Rehber	Uygulama ve Denetim	Yok	Uygulama Notları
	The Regulatory Reform (Fire Safety) Order (RRO) 2007): Summary of Responses [8].	Rapor	Geri Bildirim	Yok	Politika Geliştirme
	Approved Document B (Fire Safety), Volume 1-Volume 2 (HM Government) [9].	Yönetmelik Kılavuzu	Tüm Binalar	Var	Risk Temelli Yaklaşım
	Fire Safety Act 2021 [10].	Yönetmelik	Mevcut Binalar	Yok	RRO’yu destekleme

Çizelge 1(Devam). İngiltere’deki tarihi binalarda yangın emniyeti ile ilgili zorunlu ve zorunlu olmayan düzenlemeler

ZORUNLU OLMAYAN DÜZENLEMELER	Protection of Heritage Buildings and Structures (IRMP Steering Group Integrated Risk Management Planning: Policy Guidance-August 2008) [11].	Politika Rehberi	Risk Yönetimi (Tarihi Binalar)	Kavramsal	Risk temelli yaklaşım
	Vacant Historic Buildings Guidelines on Managing Risks (Historic England) [12].	Rehber	Boş Binalar (Tarihi Binalar)	Sınırlı	Risk azaltma
	Vacant Historic Buildings- An owner’s guide to temporary uses, maintenance and mothballing (English Heritage) [13].	Rehber	Koruma ve Kullanım (Tarihi Binalar)	Sınırlı	Geçici Koruma
	CFPA-E Guideline No 30:2021 F (Basic Principles of Fire Safety of Historic Buildings) [14].	Teknik Rehber	Tarihi Binalar	Var	Performans bazlı öneriler
	Fire Safety for Traditional Church Buildings of Small and Medium Size (Historic England) [15].	Rehber	Kilise Binaları	Var	Performans bazlı öneriler
	BS 9999:2017 – Fire safety in the design, management and use of buildings [16].	Teknik Rehber	Tüm Binalar	Var	Risk Temelli Yaklaşım
	Fire Safety Guidance Note: Heritage and Buildings of Special Interest GN 80 (Londra) [17].	Rehber	Tarihi Binalar	Var	Performans bazlı öneriler

Çizelge 1’deki dokümanlar incelendiğinde, İngiltere’de yangın emniyetine ilişkin zorunlu düzenlemelerde tarihi binalar özelinde kompartımanla ilgili maddelere ayrıntılı yer verilmediği, buna karşın teknik rehberler gibi zorunlu olmayan dokümanlarda kompartıman uygulamalarının daha büyük oranda işlendiği tespit edilmiştir.

Approved Document B (Fire Safety) ise Building Regulations (2010) kapsamında tanımlanan yangın emniyeti gerekliliklerinin sağlanmasına yönelik rehber niteliğinde bir dokümandır. İçerisinde, tarihi ve mimari değeri yüksek binalar için bu kılavuzun çok kısıtlayıcı olabileceği, yangın emniyeti önlemlerinin bina özelinde risk değerlendirmesi ile uygulanması gerektiği belirtilmektedir [9]. Benzer biçimde BS 9999:2017, tarihi binalara özel hazırlanmış bir standart olmamakla birlikte mevcut binalarda yangın emniyetinin tasarım, kullanım ve yönetim süreçleri boyunca risk temelli olarak değerlendirilmesine olanak tanıyan teknik bir rehberdir. Bu iki dokümanda da kompartıman oluşturulmasına ilişkin hükümler, tarihi binalarda doğrudan standart çözümler olarak değil binanın özgün nitelikleri ve içerdiği yangın risklerine göre uyarlanabilecek önlemler olarak ele alınmaktadır [16].

İngiltere’deki yangın emniyeti ile ilgili zorunlu ve zorunlu olmayan düzenlemeler incelendiğinde, kompartıman uygulamalarının tarihi binalar için katı ve tek tip bir zorunluluk olmadığı; yangın ve duman yayılımını sınırlandırmaya yönelik önemli bir strateji olarak değerlendirildiği görülmektedir. Bu yaklaşımda kararlar, binanın kullanım biçimi, mevcut fiziksel koşulları, yangın riski ve tarihi doku üzerindeki etkileri dikkate alınarak bina özelinde belirlenmektedir. Müdahalelerin minimum düzeyde tutulması ve koruma ilkeleriyle uyumlu biçimde uygulanması gerektiği vurgulanmaktadır [5]. Bu durum, İngiltere’de yangın emniyeti stratejisinin esnek ve

sistematik bir şekilde uygulandığını göstermektedir. Buna göre kompartıman yaklaşımı içeren rehber dokümanlarda yer alan temel ilkeler aşağıda **Çizelge 2**'de özetlenmiştir.

Çizelge 2. İngiltere'deki tarihi binalarda yangın emniyeti ile ilgili zorunlu olmayan düzenlemelerde yangın kompartımanı hakkındaki içerikler

KATEGORİ	DOKÜMAN	KOMPARTIMAN İÇERİKLERİ
ZORUNLU OLMAYAN DÜZENLEMELER	Vacant Historic Buildings Guidelines on Managing Risks (Historic England) [12].	- Kompartıman duvarları - Yangın yükünün azaltılması - Kompartımanların zarar görmesi hali
	Vacant Historic Buildings- An owner's guide to temporary uses, maintenance and mothballing (English Heritage) [13].	- Kompartımanların zarar görmesi hali - Yangın kapıları
	CFPA-E Guideline No 30:2021 F (Basic Principles of Fire Safety of Historic Buildings) [14].	- Kompartımandaki açıklıkların kapatılması - Kapı tertibatlarının yangına dayanımı - Risk değerlendirmesi
	Fire Safety for Traditional Church Buildings of Small and Medium Size (Historic England) [15].	- Kompartımanı oluşturulan alanlar ve yangına dayanım süresi - Boşluk ve kanalların kapatılması için gerekli malzemeler - Kompartımanlardaki çıkış yollarının belirtilmesi
	Fire Safety Guidance Note: Heritage and Buildings of Special Interest GN 80 (Londra) [17].	- Tesisatların geçtiği deliklerin kapatılması, yangın durdurucuların kullanımı - Çatı boşluklarının kompartımanlara ayrılması - Döşemenin yangına dayanıklılığını artırma yöntemleri

Çizelge 2'de, tarihi binalarda yangın kompartımanına ilişkin içeriklerin farklı düzenlemelerde çeşitlilik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu durum uygulayıcıların kuralcı yaklaşımlar yerine, bina özelinde gerçekleştirilen risk değerlendirmesine dayalı bütüncül ve performans temelli çözümler benimsemelerini gerektirmektedir.

4. İNGİLTERE'DE TARİHİ BİNALARDA YANGIN KOMPARTIMANLARININ SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ve DİRENÇLİLİK AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

İngiltere'de tarihi binalara yönelik yangın emniyeti yaklaşımı, kompartımanlara ayırmayı katı bir zorunluluk olarak değil, bina özelinde değerlendirilen risk temelli bir strateji olarak ele almaktadır [5]. Bu yaklaşım, yangın emniyeti ile koruma ilkeleri arasında denge kurulmasına olanak tanımaktadır.

Sürdürülebilirlik açısından, binaların özgün malzeme, mekansal kurgu ve mimari karakterlerinin korunması esastır [5]. Ancak kompartıman uygulamaları, yangına dayanıklı yapı elemanlarının eklenmesini, mevcut elemanların yangına dayanıklı elemanlar ile değiştirilmesini veya yangına dayanımının artırılmasını gerektirdiğinden, özgünlük ve mekansal bütünlük açısından tarihi binaları olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle İngiltere'de teknik rehberler, kompartımanlara ayırmanın minimum müdahale içerecek şekilde ve bina özelinde değerlendirilmesini önermektedir [5, 18].

Dirençlilik açısından ise kompartımanlara ayırma, yangının yayılımını sınırlandırarak hasarın belirli bir alanda tutulmasını ve yapısal kaybı önlemeyi amaçlamaktadır [5]. Bu durum özellikle yangına karşı hassas olan tarihi binalarda yapı sürekliliğinin korunmasına önemli katkı sağlamaktadır [18]. Kompartımanlara ayırma, tarihi binalarda hem dirençliliği arttıran hem de sürdürülebilirlik açısından sınırlayıcı etkiler barındıran bir müdahale biçimidir. İngiltere’de tarihi binalarında yangın kompartımanı yaklaşımı içeren dokümanlarda yer alan maddelerin sürdürülebilirlik ve dirençlilik açısından değerlendirilmesi **Çizelge 3**’ de görülmektedir.

Çizelge 3. Kompartıman yaklaşımına sahip dokümanların sürdürülebilirlik ve dirençlilik açısından değerlendirilmesi

DOKÜMAN	KOMPARTIMAN YAKLAŞIMI	SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK	DİRENÇLİLİK
Vacant Historic Buildings Guidelines on Managing Risks (Historic England) [12].	Yapının kullanım durumuna göre önlem sunar.	Minimum müdahale yaklaşımı.	Yangın riskini azaltır.
Vacant Historic Buildings- An owner’s guide to temporary uses, maintenance and mothballing (English Heritage) [13].	Kullanılmayan yapılar için sınırlı müdahale.	Yapıyı korumaya yöneliktir.	Yangın riskini kontrol altında tutar.
CFPA-E Guideline No 30:2021 F (Basic Principles of Fire Safety of Historic Buildings) [14].	Açık ve uygulanabilir kompartıman önerileri.	Koruma ile uyumlu esnek çözümler.	Yangın yayılımını sınırlar.
Fire Safety for Traditional Church Buildings of Small and Medium Size (Historic England) [15].	Geleneksel kiliselere özel kompartıman çözümleri.	Özgünlüğü korumaya dikkat eder.	Yapı hasarını sınırlar.
Fire Safety Guidance Note: Heritage and Buildings of Special Interest GN 80 (Londra) [17].	Dengeli ve kontrollü kompartıman yaklaşımı.	Minimum müdahale vurgusu.	Yapı sürekliliğini destekler.

Çizelge 3 incelendiğinde, İngiltere’deki risk temelli yaklaşımın kompartımanlara ayırma konusunda süreklilik ve dirençlilik kavramları açısından dengeli bir çözüm geliştirilmesine olanak sağladığı anlaşılmaktadır.

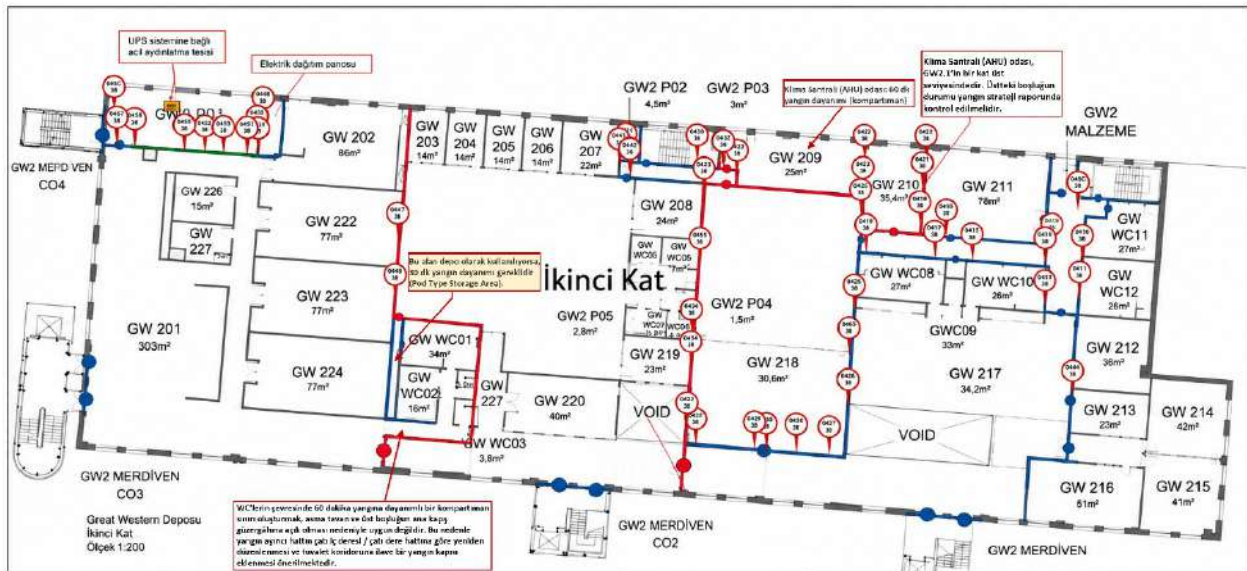
5. NEW WAREHOUSE ÖRNEĞİNDE YANGIN KOMPARTIMANI UYGULAMALARI ve SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK–DİRENÇLİLİK AÇISINDAN DEĞERLENDİRME

Manchester Science and Industry Museum yerleşkesinde bulunan New Warehouse, koruma statüsüne sahip tarihi bir endüstriyel bina (Şekil 2). Binaya yönelik yangın emniyeti müdahaleleri, Listed Building Consent (tescilli yapı izni) süreci kapsamında değerlendirilmiş; bu süreçte hem yangın emniyeti gereklilikleri hem de müdahalelerin tarihi dokuya etkisi ile yangın kompartımanı ve kapı inceleme raporlarına yanıt olarak geliştirildiği, özellikle kapılar, servis geçişleri, duvar/döşeme boşlukları ve mekansal ayırışma üzerinden kurgulandığı belirtilmektedir [19, 20].



Şekil 2. New Warehouse, Science and Industry Museum, Manchester yerleşkesi [20].

Belgede en açık biçimde tanımlanan uygulama, mevcut boru hatlarının yoğun olduğu bir bölümde oluşturulan 30 dakikalık yangına dayanıklı “pod tipi” depolama alanıdır. Belgede “pod type storage area” olarak ifade edilen bu çözüm, mevcut mekanın tamamını yangına dayanıklı bir kompartıman olarak düzenlemek yerine, mekan içinde daha sınırlı bir ikincil kompartıman hacmi oluşturulmasını ifade etmektedir [20] (**Şekil 3**). Bu hacim, yangına dayanıklı bölme, yangına dayanıklı tavan, yeni yangın kapısı ve yeni taşıyıcı dikmelerle oluşturulmuştur. Kompartıman elemanlarının mevcut yapı elemanlarıyla birleşim noktalarında ve tesisat geçişlerinde is, yangın ve duman geçişini engellemek amacıyla ısıyla genleşen yangın durdurucu mastik uygulanmıştır [20]. Bu çözüm, çok sayıdaki mevcut boru hattı nedeniyle klasik yangın bölmesi oluşturmanın güç olduğu noktada, tarihi dokuya en az zarar veren yöntem olarak değerlendirilmiştir [19, 20].



Şekil 3. New Warehouse ikinci kat yangın kompartımanı uygulamaları ve “pod tipi” depolama alanı ile ilişkilendirilen 30 dk. yangına dayanıklı depo bölümü. [20].

New Warehouse örneğinde kompartıman yaklaşımı, İngiltere’de bina yangın emniyeti ve tarihi bina koruma süreçlerinin kesişiminde değerlendirilmelidir. Bina ölçeğinde temel teknik çerçeve, “Building Regulations 2010” kapsamında yayımlanan “Approved Document B, Volume 2- Buildings other than dwellings” ile ilişkilidir. Bu rehber, konut dışı binalarda yangın emniyeti, kaçış yolları ve bina içi yangın yayılımının sınırlandırılması, yapısal yangın dayanımı, itfaiye erişimi ve kompartıman sürekliliği gibi başlıkları kapsar [9]. Ayrıca “Regulatory Reform (Fire Safety) Order 2005”, İngiltere ve Galler’de konut dışı binalarda yangın risk değerlendirmesi yapılmasını ve uygun yangın önlemlerinin sürdürülmesini zorunlu kılan temel düzenlemedir [6]. “BS 9999:2017”, binalarda yangın emniyetinin tasarım, yönetim ve kullanım süreçleri boyunca ele alınmasına yönelik risk temelli teknik rehberlik sunar (British Standards Institution, 2017). Tarihi bina özelinde Historic England’ın koruma yaklaşımı, yangın emniyeti önlemlerinin özgün dokuya zarar vermeden, minimum müdahale ve geri alınabilirlik ilkeleriyle ele alınmasını desteklemektedir. Bu nedenle New Warehouse örneği, Approved B Document B’nin bina içi yangın yayılımını sınırlandırma ve kompartıman sürekliliği ilkeleri, Fire Safety Order’ın risk yönetimi yaklaşımı, BS 9999’un tasarım-yönetim-kullanım bütünlüğü ve Listed Building Constant sürecinin koruma ilkeleri birlikte okunarak değerlendirilmelidir. Bu çerçevede, New Warehouse’da belirlenen yangın kompartımanı uygulamalarının teknik özeti **Çizelge 4**’te verilmiştir.

Çizelge 4. New Warehouse yangın kompartımanı uygulamalarının teknik özeti

KOMPARTIMAN UYGULAMASI	YÖNETMELİK / TEKNİK REHBER BAĞLAMI	MALZEME / UYGULAMA DETAYI	DAYANIM SÜRESİ
Pod Tipi Yangına Dayanımlı Depolama Hacmi	Approved Document B’deki bina içi yangın yayılımını sınırlandırma ve kompartıman sürekliliği ilkeleri; Listed Building Consent kapsamında tarihi doku etkisi	Yangına dayanıklı bölme, yangına dayanıklı tavan, yeni yangın kapısı, yeni taşıyıcı dikmeler ve ısıyla genleşen yangın durdurucu mastik	30 dk.
Servis Geçişleri, Kablo/Boru Açıklıkları ve Boşluklar	Approved Document B’nin servis geçişlerinde yangın durdurma ilkesi; proje özelindeki <i>Compartmentation Methodologies</i>	Yangın durdurucu kaplamalı levha, ısıyla genleşen mastik, RWA taş yünü yalıtım, PE (polietilen) dolgu fitili ve yangın durdurucu boru kılıfı uygulamaları	30–60 dk.
Kablo Tavaları ve Duvar/Döşeme Açıklıkları	BS 9999’un risk temelli yangın emniyeti yaklaşımı; Approved Document B’nin bina içi yangın yayılımını sınırlama ilkesi	Kablo tavalarının geçici sökümü, yangın durdurucu levha ve genleşen sızdırmazlık uygulaması, ardından yeniden montaj	60 dk. ; bazı detaylarda 60–120 dk.
Kiriş-Duvar Birleşimleri, Erişim Kapakları ve Geri Alınabilir Ayırıcılar	Historic England’ın minimum müdahale ve özgün dokuya uyum yaklaşımı; Fire Safety Order 2005’in risk azaltma çerçevesi	Yangın durdurucu dolgu, genleşen mastik, yangına dayanımlı erişim paneli, yangın perdesi ve yangına dayanımlı alçı levha kaplama	Genellikle 30–60 dk. ; bazı elemanlarda süre belirtilmemiştir

Sürdürülebilirlik açısından New Warehouse örneğinde yangın emniyeti müdahalelerinin mevcut tarihi binayı yıkmadan veya özgün dokuyu ortadan kaldırmadan gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir [19]. Bu doğrultuda kompartıman uygulamaları, binanın özgün mekânsal bütünlüğünü bozacak kapsamlı müdahaleler yerine, riskli noktalarda sınırlı çözümlerle ele alınmıştır. El yapımı tuğla, kireç esaslı harç, el aletleriyle çalışma, harç derzlerinden sabitleme, yangın perdesi ve geri alınabilir kaplama çözümleri, müdahalelerin koruma ilkeleriyle uyumlu olduğunu göstermektedir [1, 19]. Ayrıca 30 dakikalık ikincil depolama kompartımanı ve servis geçişlerindeki yangın durdurucu uygulamalar, mevcut yapı elemanlarını koruyarak yangın emniyetini artırmıştır [20]. Bu yönüyle

uygulama, tarihi dokunun korunması ile yangın emniyeti arasında minimum müdahaleye dayalı bir denge kurmaktadır.

Dirençlilik açısından ise New Warehouse örneği, yangın kompartımanının yalnızca yangına dayanıklı kapı veya bölme duvar eklenmesiyle sınırlı olmadığını göstermektedir. Servis geçişleri, kablo tavaları, boru hatları, kiriş-duvar birleşimleri, erişim kapakları ve duvar/döşeme boşlukları da kompartıman sürekliliğinin parçası olarak ele alınmıştır [20]. Bu bütüncül yaklaşım, yangın ve duman yayılımını sınırlandırarak tahliye ve müdahale süresini artırır; aynı zamanda binanın kullanım sürekliliğini ve afet sonrası korunabilirliğini güçlendirir [5, 20]. Bu nedenle New Warehouse örneği, tarihi binalarda yangın emniyeti, sürdürülebilir koruma ve dirençlilik kavramlarını değerlendirilebileceği güçlü bir uygulama örneği olarak ele alınabilir.

6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada İngiltere’de tarihi binalara yönelik yangın emniyeti düzenlemeleri çerçevesinde yangın kompartımanlarının sürdürülebilirlik ve dirençlilik üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. İnceleme sonucunda, İngiltere’de benimsenen yaklaşımın katı ve kuralcı uygulamalardan ziyade, bina özelinde değerlendirmeye olanak tanıyan performans temelli bir sistem olduğu görülmektedir. Bu durum, tarihi binaların korunması ile yangın emniyeti gereklilikleri arasında daha dengeli çözümler geliştirilmesine imkan sağlamaktadır.

Kompartıman uygulamaları, yapı elemanlarında fiziksel müdahale gerektirmesi nedeniyle tarihi binaların özgün mimari karakteri, malzeme özellikleri ve mekansal bütünlüğü üzerindeki olumsuz etkisinden kaynaklı, sürdürülebilirlik ilkeleriyle çelişen bir müdahale biçimi olarak değerlendirilmektedir. Bu bağlamda İngiltere’deki düzenlemelerde yer alan kompartıman uygulamaları, binaya özgü koşulları dikkate almanın yanı sıra yangın emniyeti ile koruma ilkeleri arasında dengeli bir ilişki kurulmasına olanak sağlamaktadır.

Tarihi binalarda yangın kompartımanları tek başına bir çözüm olarak değil, sürdürülebilirlik ve dirençlilik kavramları birlikte ele alınarak bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmelidir. Bu amaçla tarihi binaların yangın emniyetinde, müdahalelerin minimum düzeyde tutulduğu ancak yapının sürekliliğini sağlayacak ölçüde etkili olduğu dengeli çözümler temel bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır.

KAYNAKLAR

1. Historic England. (2025). Building regulations, approved documents and historic buildings. Historic England.
2. RIBA. (2019). Conservation, modernisation and adaptation of existing buildings. Royal Institute of British Architects.
3. United Nations Office for Disaster Risk Reduction. (2017). The Sendai Framework terminology on disaster risk reduction: Resilience. UNDRR.
4. Historic Environment Scotland. (2023). Managing change in the historic environment: Fire and historic buildings. Historic Environment Scotland.

5. London Fire Brigade. (2025). Historic buildings and buildings of special interest: Fire safety guidance note GN80. London Fire Brigade.
6. The Regulatory Reform (Fire Safety) Order 2005, SI 2005/1541. (UK).
7. Department for Communities and Local Government. (2007). Regulatory Reform (Fire Safety) Order 2005: Guidance note No. 1: Enforcement. HM Government.
8. Home Office. (2021). The Regulatory Reform (Fire Safety) Order 2005: Summary of responses. HM Government.
9. Department for Levelling Up, Housing and Communities. (2025). Approved Document B: Fire safety, Volume 2: Buildings other than dwellings: 2019 edition incorporating 2020, 2022 and 2025 amendments. HM Government.
10. Fire Safety Act 2021, c. 24. (UK).
11. Department for Communities and Local Government. (2008). Protection of heritage buildings and structures: Integrated risk management planning (IRMP) policy guidance. HM Government.
12. Historic England. (2018). Vacant historic buildings: Guidelines on managing risks. Historic England.
13. English Heritage. (2011). Vacant historic buildings: An owner's guide to temporary uses, maintenance and mothballing. English Heritage.
14. CFPA Europe. (2021). CFPA-E guideline No. 30:2021 F: Basic principles of fire safety of historic buildings. Confederation of Fire Protection Associations Europe.
15. Historic England. (2017). Fire safety for traditional church buildings of small and medium size. Historic England.
16. British Standards Institution. (2017). BS 9999:2017: Fire safety in the design, management and use of buildings: Code of practice. BSI Standards Limited.
17. London Fire Brigade. (2025). Historic buildings and buildings of special interest: Fire safety guidance note GN80 (Rev. 7, 20 June 2025). London Fire Commissioner.
18. Kincaid, S. (2018). The upgrading of fire safety in historic buildings. *Historic Environment: Policy & Practice*, 9(1), 3–20.
19. Atelier Heritage. (2023). Heritage statement: Science and Industry Museum, New Warehouse (Revision B). Prepared for Trustees of the Science Museum.
20. Atelier MB. (2023). Science and Industry Museum – Fire strategy remediation works: Compartmentation methodologies, New Warehouse. Manchester City Council Planning Documents.

KIYI BÖLGELERİNDE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ VE YAPILI ÇEVREDE İKLİM DİRENÇLİLİĞİ UYGULAMALARI: ALTERNATİF SU KAYNAKLARI KULLANIMI

Tuğba HAŞAL ^{1*}

Nilüfer TAŞ ²

Murat TAŞ ³

¹ Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mimarlık Anabilim Dalı Doktora Programı,

Bursa Uludağ Üniversitesi Görükle Kampüsü, Nilüfer, Bursa, 16059

^{2,3} Bursa Uludağ Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Mimarlık Bölümü,
Bursa Uludağ Üniversitesi Görükle Kampüsü, Nilüfer, Bursa, 16059

ÖZET

İklim değişikliğine bağlı risklerin artmasına karşın, kıyı bölgelerinde yapıli çevrenin gelişimi deniz seviyesi yükselmesi riskine, fırtınalara, kıyı erozyonuna ve taşkın riski yüksek olan alçak kotlu yerleşim alanlarında sürmektedir. Bu durum, kıyı yapı çevresinde iklim dirençliliğini artırmaya yönelik uyum stratejilerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu çalışma, yağmur suyu, gri su, deniz suyu ve arıtılmış atık su gibi alternatif su kaynaklarının bina ölçeğinde kullanımı inceleyerek, bu sistemlerin kıyı bölgelerindeki uygulanabilirliğini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Farklı ülkelerdeki bina ölçeği uygulamalar incelenerek konu pekiştirilmiştir. Bulgular, alternatif su sistemlerinin su güvenliğine ve iklim değişikliğine uyum kapasitesine önemli katkılar sağladığını göstermektedir. Bununla birlikte, teknik kapasite sınırlılıkları, mevzuat eksiklikleri ve toplumsal kabul düzeyinin yetersizliği yaygınlaşmanın önündeki temel engellerdir. Bu nedenle, etkin uygulama için bütüncül yönetim yaklaşımlarının, doğa temelli çözümlerle entegrasyonun ve yerel düzenlemelerin güçlendirilmesi gerekmektedir.

Anahtar kelimeler: Kıyı Bölgeleri, İklim Değişikliği, Dirençlilik, Alternatif Su Kaynakları, Yapılı Çevre.

CLIMATE CHANGE IN COASTAL REGIONS AND CLIMATE RESILIENCE APPLICATIONS IN THE BUILT ENVIRONMENT: USE OF ALTERNATIVE WATER SOURCES

ABSTRACT

Despite increasing climate change-related risks, the development of the built environment in coastal regions continues in low-lying areas that are highly exposed to sea level rise, storms, coastal erosion, and flood hazards. This situation necessitates the development of adaptation strategies to enhance climate resilience in coastal settlements. This study aims to evaluate the applicability of building-scale alternative water systems—such as rainwater harvesting, greywater reuse, seawater use and treated wastewater—in coastal regions. Building-scale applications from different countries are comparatively analyzed. The findings indicate that alternative water systems contribute significantly to water security and strengthen adaptive capacity to climate change. However, technical capacity constraints, regulatory deficiencies, and low levels of social acceptance emerge as the main barriers to widespread implementation. Therefore, the effective and sustainable adoption of alternative water resources in coastal areas requires an integrated governance approach, strengthened local regulatory frameworks, and enhanced integration with nature-based solutions.

Keywords: Coastal Regions, Climate Change, Resilience, Alternative Water Sources.

^{1*} 512412004@ogr.uludag.edu.tr, tgb_sahin@hotmail.com

1. GİRİŞ

Küresel iklim değişikliğinin tatlı su kaynakları üzerindeki olumsuz etkileri, Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerde çarpık kentleşme örüntüleri ve altyapı yetersizlikleriyle birleşerek belirgin ve kırılğan bir nitelik kazanmaktadır [1]. Bu durum, kıyı bölgelerinde yağış rejimindeki düzensizlikler, artan kuraklık sıklığı ve deniz seviyesi yükselmesine bağlı tuzluluk girişleri, mevcut su kaynakları üzerinde artan riskler oluşturmaktadır [2]. Bu nedenle, yağmur suyu, gri su, deniz suyu, ileri arıtılmış atık su gibi alternatif su kaynaklarının bina ölçeğinden başlayarak kentsel su yönetimine entegre edilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu uygulamalara örnek olarak, deniz suyunun tuvalet sifonlarında kullanımı Hong Kong’da 1960’lı yıllardan bu yana merkezi bir altyapı sistemi kapsamında uygulanmakta olup, 2015 yılı itibarıyla kentsel nüfusun yaklaşık %85’ine hizmet vermektedir [3]. Benzer biçimde, Avustralya, Japonya, Çin, Singapur ve Malezya gibi hem kıyı hem de su stresi yaşayan ülkelerde merkezi ve yerinde atık su geri kazanım sistemleri yaygın olarak uygulanmaktadır [4, 5].

Türkiye’nin yarı kurak iklim kuşağında yer alması, su kaynaklarının sürekliliği açısından risk oluştururken; kıyı bölgelerine sahip olunması, deniz suyu ve diğer alternatif su kaynaklarının geliştirilmesi ve kullanımı açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır. Araştırmanın temel amacı, iklim değişikliğinin su kaynakları üzerindeki etkilerini kıyı bölgeleri özelinde yapıyı çevrede sürdürülebilir çözüm önerilerinin yapılmasıdır. Bu bağlamda önerilen alternatif su kaynaklarından olan yağmur suyu [6], gri su [7], deniz suyu [8], arıtılmış siyah suyun binalarda kullanımı [9, 10], bina ve yakın çevresinde bina formlarının tasarıma etkilerinin araştırılarak uygun mimari tasarımların uygulanması [11], kolonlar üzerinde yükseltilmiş bina tipolojileri [12, 13], imar planlarında risk temelli bölgeleme düzenlemeleri [14], eko-mühendislik (doğal habitatların yapısal karmaşıklığını taklit eden) [15] ve doğa temelli çözümlerinin eklenmesi [16] ve kullanıcı odaklı yaklaşımları yapıyı çevrede bütüncül bir yaklaşımla ele alarak ortaya konulması amaçlanmaktadır. Bu yaklaşımın, mimari tasarımcılara, uygulama sürecindeki aktörlere ve karar vericilere yol gösterici bir çerçeve oluşturması, aynı zamanda gelecekteki araştırmalara teorik ve uygulamalı bir altlık sağlaması hedeflenmektedir.

Son yıllardaki literatür, alternatif su sistemlerinin yalnızca mühendislik çözümleri olarak ele alınmasının yeterli olmadığını; ekonomik uygulanabilirlik, çevresel etkiler ve toplumsal kabul gibi boyutları içeren çok disiplinli bir değerlendirme çerçevesine ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir [17]. Özellikle kıyı bölgelerinde kamu kurumları, altyapı işletmecileri, yerel yönetimler, sivil toplum kuruluşları ve kullanıcıları kapsayan çok aktörlü bir yönetim yapısının tesis edilmesini gerektirmektedir [8]. Bu kapsamda, performans dayalı kalite basamaklarıyla sürekli iyileştirilen sistemlerin geliştirilmesini ve bu sürecin sektörler arası bürokratik engellerin azaltıldığı, sektörler arası iş birliğini teşvik eden bütüncül yasal ve düzenleyici çerçeveler aracılığıyla bina ölçeğinden yapıyı çevre ölçeğine entegre edilebilmektedir [18].

Bu çalışma, kıyı bölgelerinde su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi ile yapıyı çevrede uygulanabilecek iklim uyum stratejileri arasındaki ilişkiyi ortaya koymayı amaçlamadığından bu kapsamda, uygulanabilir alternatif su kaynakları ve uyum yaklaşımlarına ilişkin kuramsal ve uygulamalı incelemelere yer vermektedir. Ayrıca, bina ölçeğinde entegre yönetim stratejileri üzerinden uygulanmış uluslararası örnekler incelenerek konu somutlaştırılmıştır.

2. İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN KIYI BÖLGELERİNDE YAPILI ÇEVRE ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ VE ALTERNATİF SU KAYNAKLARI KULLANIMI

İklim değışikliğı, kıyı bölgelerini etkileyen önemli bir çevresel tehdittir. Kıyı bölgelerindeki yapıli çevredeki ekosistemler, insan faaliyetleri ve iklim değışikliğı ile birleşen karmaşık dinamiklere sahiptir. Bu bağlamda, iklim değışikliğinin kıyı bölgelerinde yer alan yapıli çevre üzerinde çeşitli etkileri bulunmaktadır.

2.1 Kıyı Bölgelerinde İklim Değışikliğı Etkileri

Literatürde, kıyı bölgelerinde meydana gelen fırtına ve sel olaylarını ele alan çok sayıda çalışma bulunmaktadır [19]. Bu bölgelerin deniz seviyesi yükselmesine karşı yüksek düzeyde savunmasız olduğu [20], rüzgâr rejimleri, dalga enerjisi ve fırtına kabarmaları gibi kıyı tehlikelerinin yanı sıra kuraklık, sıcak hava dalgaları, toprak kaymaları ve su baskınları gibi iklimsel risklerin de kıyı sistemlerini çok boyutlu biçimde etkilediğı vurgulanmaktadır [21]. İklim değışikliğıne bağlı mevsimsel ve uzun vadeli değışimler, kıyı dinamiklerini bölgesel farklılıklar gösterecek şekilde yeniden yapılandırarak sel ve kıyı erozyonu gibi yerel etkilerin şiddetini ve dağılımını belirlemektedir [22].

İklimle bağıli risklerin, sel, kuraklık ve düzensiz yerleşimler gibi çoklu tehlikelere yatkın bölgelerde daha belirgin hâle gelmesi, bölgesel farklılıkları dikkate alan bütüncül değerlendirme modellerinin geliştirilmesini gerekli kılmaktadır. Özellikle kıyı bölgelerinde düzensiz yerleşim, yüksek yapı yoğunluğu ve geçirimsiz yüzeylerin artışı bu etkileri artırmaktadır [23]. Şiddetli yağışlar ile deniz seviyesi yükselmesinin bileşik baskısı altında kalan kentsel drenaj ve kanalizasyon sistemlerinin bu çoklu etkilere karşı yetersiz kaldığı ortaya konmaktadır [21, 24].

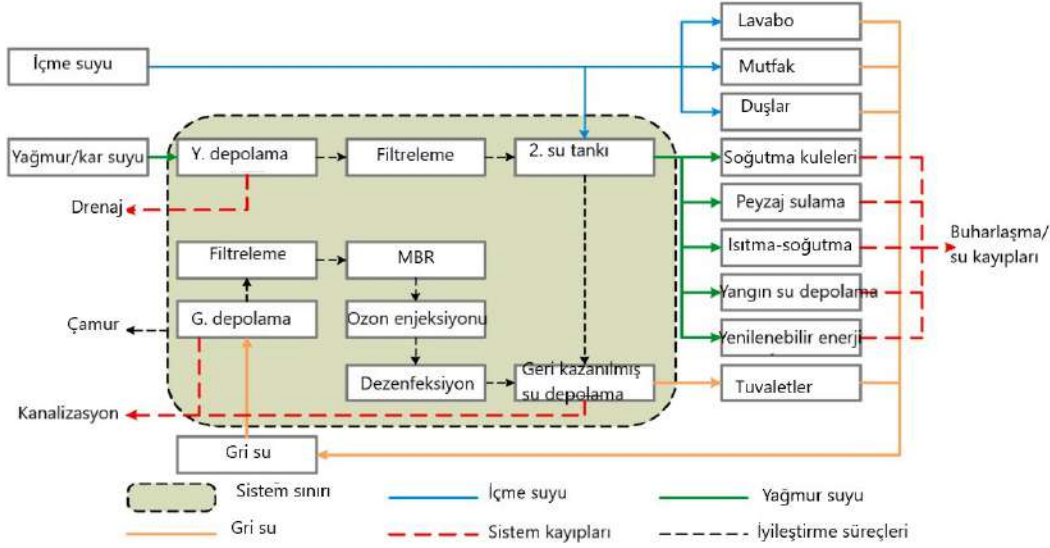
2.2 Kıyı Bölgeleri Yapılı Çevrede Alternatif Su Kaynakları Kullanımı

İklim değışikliğı ve çeşitli afetler nedeniyle kıyı bölgelerde yapıli çevrede deniz suyu, arıtılmış atıksu, yağmur suyu ve fırtına suyu gibi alternatif kaynaklara yönelim oluşmaktadır. Yapılı çevrede kullanılabilecek alternatif su kaynaklarına aşağıda yer verilmektedir.

* **Yağmursuyu hasat sistemleri:** Yağmur suyu hasat sistemleri; yağışın yakalanması (genellikle çatı yüzeyleri), iletimi, depolanması, arıtılması ve içme suyu kalitesi gerektirmeyen kullanımlarda yeniden değerlendirilmesi esasına dayanmaktadır [6]. Toplanan suyun kalitesini ve/veya miktarını; yerel yağış düzeni, toplama yüzeyinin boyutu, yüzeyin malzemeleri ve bunların drenaj karakteristikleri, boru sistemlerinin boyutlandırılması ve malzemesi, hava kirliliğı seviyeleri ve toplama yüzeyinin kirliliğı, mevcut sistemi kirletme riski sistemi etkilemektedir [25].

* **Gri-su toplama sistemleri:** WC ve pisuardan gelen atık sular hariç evsel atık sular olarak tanımlanmaktadır. Gri su sistemi dört ana işlevsel unsurdan oluşmaktadır: Toplama, arıtma, depolama ve dağıtım [26]. Gri suyun hacmi ve bileşimi kullanım amacına ve kaynağına bağıli olarak değıştiğinden, bina türlerine (konut, sağlık, eğitim, ticaret vb.) bağıli farklı arıtma düzeylerini gerektirmektedir [7]. Bu durumda gri su sistemlerinin ölçek, teknik karmaşıklık ve tasarım özellikleri çeşitlenmektedir.

***Yağmur suyu ve gri suyun birlikte kurgulandığı hibrit sistemler:** Yağmur suyu alt sistemi; yağmur suyu depolama tankları, ön arıtma amacıyla kullanılan filtreleme üniteleri, filtrelenmiş yağmur suyunun depolanmasına yönelik ara (arka) su tankları ile bu sistemlere entegre pompalar ve sıhhi tesisat bileşenlerinden oluşmaktadır [27]. Binalarda yağmur suyu ve gri suyun birlikte tasarlandığı sistemler, artan filtreleme maliyetlerine rağmen şebeke suyunda daha fazla tasarruf sağlandığı görülmektedir [5]. Şekil 1’de binalarda kullanılan hibrit sistemler ve son kullanım alanları yer almaktadır.



Şekil 1. Binalarda kullanılan hibrit sistemler [28]

***Deniz suyu arıtma sistemleri:** Arıtılmış deniz suyu kullanımında yüksek maliyetli olan tuzdan arındırma teknolojilerinde son yıllarda önemli teknik ve ekonomik iyileşme gösterilmiştir [8]. Diğer alternatif su kaynaklarına kıyasla, mikrobiyal kaynaklı akut hastalık risklerinin daha düşük olduğu belirtilmektedir [29]. Deniz suyu, öncelikle kaba partiküllerin uzaklaştırılması için süzgeçlerden geçirilmekte ve sodyum hipoklorit gibi kimyasallarla dezenfekte edilmektedir. Ardından, arıtılmış suyun kalitesi renk, bulanıklık ve koku gibi parametreler açısından ilgili standartlara uygun hâle getirilerek kullanım sağlanmaktadır [3]. Liu vd. [4] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, arıtılmış deniz suyunun kıyı bölgelerinde kullanımının, kıydan yaklaşık 90 km uzaklıktaki alanlarda dahi uygulanabilir bir alternatif oluşturduğunu olduğu ortaya konulmaktadır.

***Blackwater (siyah su) arıtma sistemleri:** Arıtılmış kanalizasyon suyu, tüm kirleticilerin ve askıda katı maddelerin giderildiği evsel, kentsel veya bazı endüstriyel atık suları içermektedir [30]. Çok bariyerli ön arıtma, biyolojik arıtma, mikrofiltrasyon/ultrafiltrasyon, ters ozmoz (RO) ve ultraviyole dezenfeksiyon gibi ardışık ve çok bariyerli bir arıtma zincirine dayanmaktadır [29, 31].

Bunun bir örneği, Singapur’da uygulanan NEWater Projesi, kentsel ölçekte ileri düzey su geri kazanımına yönelik bir modeldir. Proje kapsamında, kentsel atıksu arıtma tesislerinden elde edilen ikincil arıtılmış atık sular; mikrofiltrasyon membranları ve ters ozmoz proseslerinden oluşan arıtma zinciriyle ileri düzeyde arıtılarak içme suyu kalitesine ulaştırılmaktadır [9, 10]. Singapur’daki dört NEWater tesisinin Singapur’un su ihtiyacının 2060 yılına kadar %55’e çıkması

beklenmektedir [32]. **Çizelge 1'**de kıyı bölgelerinde alternatif su kaynakları ve yapıli çevrede uygulama alanları gösterilmektedir.

Çizelge 1. Kıyı Bölgelerinde Alternatif Su Kaynakları ve Yapılı Çevrede Uygulama Alanları

Alternatif Su Kaynağı	Yapılı Çevrede Kullanım Alanları	Referans
Yağmursuyu hasadı (çatı ve drenaj)	Peyzaj sulama alanları Sihhi tesisat sistemleri (tuvalet) Çeşitli temizlik (araç, temizlik, çamaşır mak.) Bina ısıtma-soğutma sistemleri Yangın depo suyu Beton üretimi Yapılı çevrede toz kontrolü	[5] [6] [27] [33] [34] [35] [36] [37]
Gri su	Peyzaj sulama alanları Sihhi tesisat sistemleri (tuvalet) Araç temizliği Çeşitli temizlik Bina ısıtma-soğutma sistemleri Sondaj faaliyetleri/ toz kontrolü/şantiye	[5] [7] [27] [35]
Deniz suyu ve acı su arıtımı	Peyzaj sulama alanları Sihhi tesisat sistemleri (tuvalet) Soğutma sistemleri Çeşitli temizlik Beton üretimi ve şantiye alanlarında kullanımı Deniz suyu ısı pompası Endüstriyel soğutma	[8] [37] [38]
Blackwater arıtımı (Araba yıkama servis suyu, kanalizasyon, endüstriyel su, vb.)	Beton üretimi Peyzaj sulama alanları Sihhi tesisat sistemleri (tuvalet) Çeşitli temizlik (araç, temizlik, çamaşır mak.) Bina ısıtma-soğutma sistemleri Yangın depo suyu	[9] [10] [32] [38]

Farklı kullanım amaçları, suyun değişken saflık düzeylerinde olmasını gerektirmekte; alternatif su kaynakları ise içerdiği fiziksel, kimyasal ve biyolojik kirleticiler nedeniyle doğrudan kullanıma uygun olmayıp, test, arıtma ve filtrasyon süreçleriyle ikincil suya dönüştürülmelidir [38]. Su tüketiminin zamansal ve mekânsal analizleri, verimsiz kullanımın belirlenmesi, sulama programlarının optimize edilmesi ve hedefe yönelik müdahalelerin geliştirilmesini sağlamaktadır [35]. Alternatif su sistemlerinin performansı bina türüne göre değişmektedir. Yapılan çalışmalarda konutlarda verimlilik çoğu senaryoda %67'nin üzerine çıkarken, çok konutlu ve hizmet binalarında ise bu oranın kullanım profili ve son kullanım türlerine bağlı olarak geniş bir aralıkta (%12,9–%93,6) değiştiği ortaya koyulmuştur [27]. Mimari ölçekten kentsel ölçeğe geçişte, yüksek yoğunluklu yapılaşma hidrolojik döngüleri olumsuz etkilerken, mimari tasarımla bütünleşik sistemler daha etkili sonuçlar vermektedir. Düşük ve orta yoğunluklu, yeşil sürekliliği koruyan tipolojiler doğal süreçlere daha yakın performans sergilerken; geçirimsiz yüzeyleri artıran yoğun yapılaşma altyapı baskısını ve iklim risklerini artırmaktadır [39]. Bu kapsamda, alternatif su sistemlerinin seçim ve boyutlandırılmasında bina işlevine özgü parametreleri dikkate alan karar destek modellerinin geliştirilmesi gerektiği değerlendirilmektedir.

2.3 Küresel Ölçekte Kıyı Bölgelerinde Yapılı Çevrede Alternatif Su Kaynaklarının Kullanımına İlişkin Uygulama Örnekleri

Kıyı bölgeleri, deniz seviyelerinde artışın yanı sıra su kaynaklarının kirlenmesine bağlı su kıtlığı potansiyeline açıktır. Küresel ölçekte kıyı bölgelerinde bina ve yakın çevrelerinde uygulanan başarılı örnekler **Çizelge 2'**de verilmektedir.

Çizelge 2. Kıyı Bölgelerinde Alternatif Su Kaynakları ve Yapılı Çevrede Uygulama Alanları

NO	Proje/Bina Tipleri	Alternatif Su Yönetimi Stratejileri	Notlar	Ref.
1	The Solaire Konut Binası- Battery Park City, NY/ABD (2003) 27 katlı konut binası (293 daire)	Alternatif Su Kaynakları -Blackwater -Gri su -Yağmursuyu Arit. Sis. Kap.: 25.000 Galon/Gün Son Kullanım Alanları -Tuvalet Sifonu -Soğutma Kulesi -Peyzaj Sulama(çatı bahçesi ve parselin bitişiğindeki parkın sulanması)	Deniz seviyesine yakın dolgu bir arazidedir. Olası su baskınlarına karşı mekanik ekipman yükseltilmiş kotlara alınmış ve bodrum katındaki arıtma tesisinin su baskınından etkilenmemesi için ilave önlemler uygulanmıştır. Tesis içi sistem, biyolojik katı atıkların kanalizasyona boşaltılabilmesi için kamu altyapısına bağlıdır.	[40]
2	Yüzen çiftlik- Rotterdam/ Hollanda (2019) Süt üretim çiftliği	Alternatif Su Kaynakları -Blackwater -Yağmursuyu Son Kullanım Alanları -Temizlik -Gübre yapımı -İçme suyu	İneklerin gübresi (dışkı ve idrar karışımı) ahır zemininde otomatik sıyrıcılar ile toplanarak gübreye dönüştürülmektedir.	[41]
3	Mazda Stadyumu (beyzbol), Hiroshima/Japonya (2019)	Alternatif Su Kaynakları -Yağmursuyu(çatı ve teras) 1,630,000 Gallon/Yıl Son Kullanım Alanları -Tuvalet Sifonu -Peyzaj Sulama -Sel önleme	128 dönümlük bir drenaj alanı yönetilmektedir. Deponun %7'si (264.000 galon) yeniden kullanım için ayrılmıştır.Kalan 3,5 milyon galonluk depolama, yer altı geçitleri bulunan parselin yakınındaki Hiroshima İstasyonu'nun su basmasını engellemektedir.	[40]
4	New School, NY/ABD (2014) 16 katlı Üniversite Binası	Alternatif Su Kaynakları -Blackwater -Gri su -Yağmursuyu Arit. Sis. Kap.: 40.000 Galon/Gün Son Kullanım Alanları -Tuvalet Sifonu -Soğutma Kulesi -Peyzaj Sulama(çatı bahçesi) -Çamaşırhane	Fazla ham atık su ve artık biyolojik katı maddeler şehir kanalizasyon sistemine boşaltılır. Su depolama tanklarındaki otomatik içme suyu doldurma vanaları, kesintisiz su teminini sağlamaktadır. Yerinde sistem, biyolojik katı atıkların şehir kanalizasyonuna boşaltılmasını sağlayan kamu altyapısı ile desteklenmektedir.	[40]
5	Marina Bay Sands/Singapur (2011) otel, kongre-fuar merkezi, alışveriş alanı, iki tiyatro,	Alternatif Su Kaynakları -Klima yoğunlaşma suyu -Yağmursuyu Son Kullanım Alanları -Peyzaj sulama -Soğutma sistemleri	Üç otel kulesindeki 3.000 klima ünitelerinden su toplanarak dönüştürülen su peyzaj sulamasında kullanılmaktadır. Art-Science müzesinin çatısı lotus çiçeği formunda yağmur suyunu merkeze yönlendiren bir havza gibi çalışmaktadır. Kompleks genelinde su; göletler, kanallar	[42]

Çizelge 2. Kıyı Bölgelerinde Alternatif Su Kaynakları ve Yapılı Çevrede Uygulama Alanları (devamı)

NO	Proje/Bina Tipleri	Alternatif Su Yönetimi Stratejileri	Notlar	Ref.
5	ArtScience Müzesi ve iki yüzen çelik-cam pavyon 55 katlı üç blok	Alternatif Su Kaynakları -Klima yoğuşma suyu -Yağmursuyu Son Kullanım Alanları -Peyzaj sulama -Soğutma sistemleri	ve iç havuzlar aracılığıyla binanın bir parçası olarak ele alınmış; yağmur suyu yönetimiyle hem taşkın kontrolü hem de mikroiklim düzenleme işlevi görmektedir.	[42]
6	Dockside Green Victoria,British Columbia/Kanada (2011)Konut/Ofis/Ticari /Atölye	Alternatif Su Kaynakları -Blackwater -Yağmursuyu Son Kullanım Alanları -Peyzaj sulama -Tuvalet Sifonu -Yapay gölet	Evlerden çıkan su yerinde atıksu arıtımı(MBR+UV)+geri kazanılmış su peyzaj ve sifonlarda kullanılmaktadır. Hafif eğimli yürüyüş yolları doğal bitki örtüsü ve su öğeleri ile tasarıma dahil edilmiştir.	[43]
7	Bullitt Center, Seattle/ABD	Alternatif Su Kaynakları -Blackwater -Kompost Tuvalet Son Kullanım Alanları -Sıhhi Tesisat -İçme Suyu	Binada kullanılan sistemlerin (250 yıllık bina ömrü hesaplanmış) ilk yatırım maliyeti ve kullanım süreçlerindeki bakım maliyetleri gibi zorluklarla karşılaşmıştır.	[35]

Çizelge 2'de yer alan uluslararası örnekler, kıyı bölgelerinde alternatif su sistemlerinin bina ve yerleşke ölçeğinde entegre biçimde uygulanabilmektedir. Konut ölçeğinde uygulanan örnekler (The Solaire, Dockside Green), yerinde atık su geri kazanım sistemlerinin yüksek kapasiteli arıtma altyapılarıyla siyah su, gri su ve yağmur suyunu entegre ederek (tuvalet sifonları, soğutma kuleleri, peyzaj sulama ve çamaşırhane vb) bina içi su döngüsünü büyük ölçüde sağlamaktadır. Bununla birlikte, kıyı ve taşkın riski yüksek alanlarda yer alan bu yapıların tasarımında, su yönetimi ile birlikte afet risklerine karşı fiziksel önlemler de geliştirilmiştir. Örneğin, The Solaire binasında mekanik ekipmanların yükseltilmiş kotlara alınması ve arıtma tesislerinin su baskınından korunması, iklim uyumlu mimari tasarım ile altyapı entegrasyonunun birlikte ele alınarak su verimliliğini yanı sıra bu sistemlerin sürekliliğini sağlamaktadır.

Büyük ölçekli kamusal ve karma kullanımlı yapılarda ise, yağmur suyu ve yoğuşma suyu sistemlerinin mekânsal tasarım ile bütünleşik biçimde kurgulanmaktadır. Marina Bay Sands örneğinde, klima yoğuşma suyu ve yağmur suyu birlikte değerlendirilerek peyzaj sulama ve soğutma sistemlerinde kullanılmaktadır. Yapı formu (lotus formundaki çatı) yağmur suyunu toplayan aktif bir eleman olarak işlev görmektedir. Benzer şekilde, Mazda Stadyumu'nda geliştirilen geniş ölçekli yağmur suyu toplama ve depolama sistemleri, yeniden kullanım ve taşkın kontrolü sağlayan çift işlevli olarak tasarlanmıştır. Yerleşke ölçeğinde Dockside Green projesi, merkezi olmayan (decentralized) su yönetimi yaklaşımını benimseyerek MBR ve UV sistemleriyle arıtılan atık suyun peyzaj, tuvalet ve yapay su öğelerinde yeniden kullanımını sağlamaktadır. Bu bütünleşik sistem, su yönetimini kentsel tasarımın bileşenine dönüştürmektedir.

Rotterdam Yüzen Çiftlik örneği, su ve atık yönetimi kapsamında hayvansal atıkların gübreye dönüştürülmesi ve suyun yeniden kullanımı ile kapalı çevrim sistemlerine yönelik bir örnektir. Bullitt Center ise kompost tuvalet ve yerinde su yönetimi uygulamalarıyla su döngüsünü minimize

eden ileri teknik çözümler sunmakla birlikte, yüksek ilk yatırım ve bakım maliyetleri nedeniyle sınırlı kalmaktadır. Bulgular, alternatif su kaynaklarının farklı ölçeklerde entegre edilebildiğini ve sistem performansının teknik altyapı, mimari entegrasyon, mevzuat uyumu ve kullanıcı kabulü gibi çok boyutlu faktörlere bağlı olduğunu göstermektedir. Kıyı bölgelerinde erişimin kolay olmasına rağmen, yüksek ilk yatırım maliyetleri bina ölçeğinde sınırlayıcıdır. Bununla birlikte, azalan su tüketimi ve işletme giderleri sayesinde sistemlerin uzun vadede olumlu geri dönüş sağladığı belirlenmiştir.

3. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Küresel iklim değişikliğinin hidrolojik etkileri; deniz seviyesi yükselmesi, taşkınlar, kıyı erozyonu, tuzluluk girişleri ve kuraklık gibi çoklu riskler üzerinden kıyı bölgelerinde belirginleşmekte; çarpık kentleşme ve altyapı yetersizlikleri bu kırılganlığı artırmaktadır. Bu kapsamda elde edilen bulgular aşağıda özetlenmektedir:

* Kıyı bölgelerinde yapı tasarımı; zemin kotu, taşıyıcı sistem, malzeme seçimi ve erişim kararları üzerinden kırılganlık göstergeleri bağlamında ele alınmalı; yalnızca mühendislik temelli kıyı yapıları yerine taşkın alan yönetimi, mavi-yeşil altyapı ve yapı tipolojilerinin entegre edildiği bütüncül çözümler geliştirilmelidir. Bu süreçte, yüksek mekânsal çözünürlüklü analitik araçların kentsel tasarım rehberleri ve imar planlarıyla bütünleştirilerek planlama ve uygulama süreçlerine dâhil edilmesi gerekmektedir.

* Kıyı bölgelerinde iklim uyumu, mimari tasarım ve mekânsal yoğunluk kararlarıyla birlikte değerlendirilmelidir. Düşük ve orta yoğunluklu, geçirgen yüzeyleri destekleyen yerleşimlerin hidrolojik süreçleri olumlu etkilediği; buna karşılık yüksek yoğunluklu ve geçirimsiz yapılaşmanın altyapı baskısını artırdığı belirlenmiştir. İklim duyarlı çatı ve kütle kurguları, mimari tasarımla şekillenmektedir. Örneğin, ılıman-nemli iklimlerde eğimli çatılı ve düşeyde gelişen bina formlarının sınırlı arsa koşullarında daha uygun çözümler sunarken sıcak-kuru iklimlerde düz çatılı, yatayda gelişen ve avlulu yapı tipolojileri oluşmaktadır.

*Kıyı bölgelerinde alternatif su kaynaklarının en etkin ve verimli olanının belirlenmesi (deniz suyu, yağmur suyu, gri su vb. sistemlerin tekil ya da bütünleşik çözümleri) kentsel metabolizmalara (örneğin, tuvalet sifonları ve bölgesel soğutma) dahil edilmesi, su-enerji-karbon faydaları elde ederek sürdürülebilirlik ve direnci kolaylaştırmanın potansiyel bir çözümüdür. Konum analizi, kentsel mekansal analiz, bina optimizasyon sistemlerinin kullanımı, veri analitiği temelli yaklaşımlar aracılığıyla su tüketiminin zamansal ve mekânsal örüntülerinin ayrıntılı biçimde analiz edilmesine olanak tanıyarak aşırı su kullanımının belirlenmesi sistemin verimliliğini artıracaktır.

*Kıyı bölgelerinde bu sistemlerin etkin uygulanabilmesi, kamu kurumları, yerel yönetimler, altyapı işletmecileri, sivil toplum ve kullanıcıları kapsayan çok paydaşlı yönetim yapılarının geliştirilmesini gerektirmektedir. Sektörler arası iş birliğini destekleyen ve bürokratik engelleri azaltan bütüncül yasal çerçeveler, alternatif su sistemlerinin yapıları çevreye entegrasyonunu güçlendirmektedir.

4. KAYNAKLAR

1. Haşal, T., Taş, N., Taş, M. (2025). “Küresel İklim Değişikliğinin Su Kaynakları Üzerindeki Etkileri ve Sürdürülebilir Kalkınma için Binalarda Yenilikçi Su Yönetimi Çözümleri: Türkiye ve Dünyadan Uygulama Örnekleri”, Global Sustainability and Development Congress, 15-16 Ekim 2025, Kayseri, Türkiye.
2. Giupponi, C.; Gain, A.K.(2017). Integrated Water Resources Management (IWRM) for Climate Change Adaptation. *Reg. Environ. Change*, 17, 1865–1867.
3. WSD (Water Supplies Department The Government of the Hong Kong Special Administrative Region), (2025). Seawater for Flushing, <https://www.wsd.gov.hk/en/core-businesses/water-resources/seawater-for-flushing/index.html>.
4. Liu, X., Iqbal, A., Dai, J., & Chen, G. (2021). Economic and environmental sustainability of the optimal water resources application for coastal and inland regions. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126247>.
5. Leong, J., Chong, M., Poh, P., Vieritz, A., Talei, A., & Chow, M. (2018). Quantification of mains water savings from decentralised rainwater, greywater, and hybrid rainwater-greywater systems in tropical climatic conditions. *Journal of Cleaner Production*, 176, 946-958. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.020>.
6. Teston, A., Scolaro, T., Maykot, J., & Ghisi, E. (2022). Comprehensive Environmental Assessment of Rainwater Harvesting Systems: A Literature Review. *Water*. <https://doi.org/10.3390/w14172716>.
7. Orel, V., Vovk, L., Femiak, V., & Balinska, I. (2024). The potential of alternative water sources for potable water savings in Ukraine's residential areas. *Problems of Water supply, Sewerage and Hydraulic*. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2024.48.43-50>.
8. Zhang, Z., Sato, Y., Dai, J., Chui, H., Daigger, G., Loosdrecht, M., & Chen, G. (2023). Flushing Toilets and Cooling Spaces with Seawater Improve Water-Energy Securities and Achieve Carbon Mitigations in Coastal Cities.. *Environmental science & technology*. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c07352>.
9. Lefebvre, O. (2017). Beyond NEWater: An insight into Singapore's water reuse prospects. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2, 26-31. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.12.001>.
10. Lee, H., & Tan, T. (2016). Singapore’s experience with reclaimed water: NEWater. *International Journal of Water Resources Development*, 32, 611 - 621. <https://doi.org/10.1080/07900627.2015.1120188>.
11. Şahin, N. İ., & Manioğlu, G. (2019). Water Conservation Through Rainwater Harvesting Using Different Building Forms in Different Climatic Regions. *Sustainable Cities and Society*, 44, 367-377. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.10.010>.
12. Hasanpour, A., & Istrati, D. (2022). Reducing Extreme Flooding Loads on Essential Facilities via Elevated Structures. *Lifelines 2022*. <https://doi.org/10.1061/9780784484432.068>.
13. Choorapulakkal, A., Madandola, M., Al-Kandari, A., Furlan, R., Bayram, G., & Mohamed, H. (2024). The Resilience of the Built Environment to Flooding: The Case of Alappuzha District in the South Indian State of Kerala. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su16125142>.
14. Kautsary, J., & Rahman, B. (2024). Evaluation Of Zoning Regulations in Coastal Areas for Disaster Risk Reduction of Climate Change. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1321. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1321/1/012004>.
15. Mayer-Pinto, M., Johnston, E., Bugnot, A., Glasby, T., Airolidi, L., Mitchell, A., & Dafforn, K. (2017). Building 'Blue': An Eco-Engineering Framework for Foreshore Developments. *Journal of Environmental Management*, 189, 109-114 . <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.12.039>.

16. Kuwae, T., & Crooks, S. (2021). Linking Climate Change Mitigation And Adaptation Through Coastal Green-Gray Infrastructure: A Perspective. *Coastal Engineering Journal*, 63, 188 - 199. <https://doi.org/10.1080/21664250.2021.1935581>.
17. Lindner, A., & Stamm, J. (2025). Integrating Climate Change Adaptation and Water Resource Management: A Critical Overview. *Standards*. <https://doi.org/10.3390/standards5010004>.
18. Swarnokar, S., Mou, S., Sharmi, S., Iftikhar, A., & Jesmin, S. (2025). Climate-induced risks, adaptation, and mitigation responses: a comparative study on climate-stressed coastal communities. *Frontiers in Climate*. <https://doi.org/10.3389/fclim.2025.1553579>.
19. Neumann, J., Price, J., Chinowsky, P., Wright, L., Ludwig, L., Streeter, R., Jones, R., Smith, J., Perkins, W., Jantarasami, L., & Martinich, J. (2015). Climate change risks to US infrastructure: impacts on roads, bridges, coastal development, and urban drainage. *Climatic Change*, 131, 97-109. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-1037-4>.
20. Almeida, B., & Mostafavi, A. (2016). Resilience of Infrastructure Systems to Sea-Level Rise in Coastal Areas: Impacts, Adaptation Measures, and Implementation Challenges. *Sustainability*, 8, 1115. <https://doi.org/10.3390/su8111115>.
21. Griggs, G., & Reguero, B. (2021). Coastal Adaptation to Climate Change and Sea-Level Rise. *Water*. <https://doi.org/10.3390/w13162151>.
22. Forzieri, G., Feyen, L., Russo, S., Voudoukas, M., Alfieri, L., Outten, S., Migliavacca, M., Bianchi, A., Rojas, R., & Cid, A. (2016). Multi-hazard assessment in Europe under climate change. *Climatic Change*, 137, 105-119. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1661-x>.
23. Dimuna, K., Ekhaese, E., & Ndimako, O. (2024). Climate change impact on the architecture and built environment dwellers' well-being in Niger Delta Region: a systematic review. *Frontiers in Climate*. <https://doi.org/10.3389/fclim.2024.1498938>.
24. Wang, X., Xu, L., Cui, S., & Wang, C. (2020). Reflections on coastal inundation, climate change impact, and adaptation in built environment: progresses and constraints. *Advances in Climate Change Research*. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2020.11.010>.
25. TSE (2018). TS EN 16941-1: Yerinde İçilemez Su Sistemleri - Bölüm 1: Yağmur Suyu Kullanımı için Sistemler Standardı. Ankara, Türk Standartları Enstitüsü.
26. TSE (2021). TS EN 16941-2: Yerinde İçilemez Su Sistemleri - Bölüm 2: Arıtılmış Gri Suyun (Lavabo Atık Suyu) Kullanımına Yönelik Sistemler. Ankara, Türk Standartları Enstitüsü.
27. Ferreira, A., Santos, C., Imteaz, M., & Matos, C. (2023). Hybrid Decentralized Systems of Non-potable Water Supply: Performance and Effectiveness Analysis. *Water Resources Management*, 1-23. <https://doi.org/10.1007/s11269-023-03531-y>.
28. Chen, W., Gao, W., Jiang, J., Wei, X., & Wang, R. (2021). Feasibility analysis of decentralized hybrid rainwater-graywater systems in a public building in Japan. *Sustainable Cities and Society*, 69, 102870. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102870>.
29. Quon, H., & Jiang, S. (2023). Decision making for implementing non-traditional water sources: a review of challenges and potential solutions. *npj Clean Water*, 6, 1-14. <https://doi.org/10.1038/s41545-023-00273-7>.
30. Demirbas, A.; Edris, G.; Alalayah, W.M. (2017). Sludge production from municipal wastewater treatment in sewage treatment plant. *Energy Sources Part A Recovery Util. Environ. Eff.*, 39, 999–1006.
31. PUB (Singapur Ulusal Su Ajansı), (2025). <https://www.pub.gov.sg/Public/WaterLoop/OurWaterStory/NEWater>.

32. Ghernaout, D., Elboughdiri, N., & Alghamdi, A. (2019). Direct Potable Reuse: The Singapore NEWater Project as a Role Model. OALib. <https://doi.org/10.4236/oalib.1105980>.
33. Carollo, M., Butera, I., & Revelli, R. (2022). Water savings and urban storm water management: Evaluation of the potentiality of rainwater harvesting systems from the building to the city scale. PLOS ONE, 17. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0278107>.
34. Chen, W., Gao, W., Wei, X., Jiang, J., Wang, R., & Fang, X. (2022). Dimensionless parameter method for evaluating decentralized water reuse systems in buildings. Sustainable Cities and Society. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103391>.
35. Gil-Ozoudeh, I., Iwuanyanwu, O., Okwandu, A., & Ike, C. (2023). Water conservation strategies in green buildings: Innovations and best practices. Engineering Science & Technology Journal. <https://doi.org/10.51594/estj.v4i6.1525>.
36. Naserisafavi, N., Yaghoubi, E., & Sharma, A. (2022). Alternative water supply systems to achieve the net zero water use goal in high-density mixed-use buildings. Sustainable Cities and Society. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103414>.
37. Raju, V., Puttaswamaiah, S., & Singh, A. (2025). Towards a sustainable built environment: evaluating alternative water sources for concrete production. Smart and Sustainable Built Environment. <https://doi.org/10.1108/sasbe-09-2024-0401>.
38. Yousuf, S., Shafigh, P., Muda, Z., Katman, H., & Latif, A. (2023). Alternatives for Fresh Water in Cement-Based Materials: A Review. *Water*. <https://doi.org/10.3390/w15152828>.
39. Moravej, M., Renouf, M. A., Kenway, S. J., & Urich, C. (2022). What is the role of architectural design and on-site water servicing technologies in infill housing water performance? *Water Research*, 213, 118109. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118109>
40. SFPUC (San Francisco Public Utilities Commission), (2022). Innovative Water Reuse and Resource Recovery Projects <https://www.sfpuc.gov/sites/default/files/documents/CaseStudiesInnovativeWaterReuse2022.pdf#:~:text=Inspired%20by%20New%20York%E2%80%99s%20first,water%20and%20sewer%20rates%2C%20and>.
41. GCA (Global Center on Adaptation) (2025). This Dutch city has opened the world's first floating farm. <https://gca.org/this-dutch-city-has-opened-the-worlds-first-floating-farm/#:~:text=methods%20which%20are%20supported%20by,clearing%20the%20floor%20of%20manure>
42. Szolomicki, J., & Golasz-Szolomicka, H. (2020). The Marina Bay Sands Complex in Singapore: A Modern Marvel of Structure and Technology. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 960. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/960/2/022051>.
43. Dockside Green .<https://www.docksidegreen.com/sustainability/>.

ENDÜSTRİYEL GÜRÜLTÜ ORTAMLARINDAKİ AÇIK PLANLI OFİSLERİN AKUSTİK PERFORMANSININ İNCELENMESİ ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA

Oğuzhan Tutanc^{1*}

Oya Babacan²

¹İTÜ Mimarlık Fakültesi Taşkışla, Taksim, İstanbul, 34437

²Antalya Bilim Üniversitesi, Güzel Sanatlar ve Mimarlık Fakültesi, Döşemealtı, Antalya, 07190

ÖZET

Gemi inşa sektörü, üretim süreçlerinde oluşan yüksek gürültü seviyeleri nedeniyle işitsel konforun en zorlu biçimde etkilendiği endüstriyel alanlardan biridir. Tersanelerde yürütülen gemi inşa faaliyetlerinde kaynak, montaj, bükme ve boyama gibi üretim süreçleri yüksek düzeyli gürültü oluşturarak çalışma alanlarında istenmeyen ses maruziyetine yol açmaktadır. Bu gürültü, özellikle üretim hangarlarının içinde veya bitişiğinde konumlanan açık planlı ofislerde akustik konfor açısından önemli sorunlar yaratmaktadır. Çalışma kapsamında, Antalya Serbest Bölgesi'nde bulunan ve tekne üretim malzemeleri bakımından farklılık gösteren iki tersanede konumlandırılmış açık planlı ofislerin akustik konfor koşulları incelenmiştir. Çalışmada, ölçüm ve simülasyon yöntemlerinin birlikte kullanıldığı bileşik bir yaklaşım benimsenmiştir. Bu süreçte üretim alanlarındaki gürültü kaynaklarının ses düzeyleri ile ofis içi arka plan gürültüsünün ses azaltım indeksleri (Rw) hesaplanarak ofis içi gürültü maruziyet düzeyleri ortaya konmuştur. Sonuçlar, Binaların Gürültüye Karşı Korunması Hakkındaki Yönetmelik'te belirtilen performans sınıflarıyla karşılaştırılmış ve üretim alanlarıyla ilişkili ofislerde gürültü düzeylerinin yönetmelik sınırlarını aştığı belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Açık planlı ofis, Gürültü kontrolü, Mimari akustik, Tersane akustiği, Tersane yapısı.

A STUDY ON EXAMINING THE ACOUSTIC PERFORMANCE OF OPEN-PLAN OFFICES IN INDUSTRIAL NOISE ENVIRONMENTS

ABSTRACT

The shipbuilding industry presents significant challenges for auditory comfort due to high noise levels generated during production processes. Activities such as welding, assembly, bending, and painting create excessive noise, leading to unwanted sound exposure in workspaces. This issue particularly affects open-plan offices located within or adjacent to production hangars. This study investigates the acoustic comfort conditions of open-plan offices in two shipyards in the Antalya Free Zone, differentiated by their production materials. A hybrid methodology combining in-situ measurements and simulations was employed. Noise source levels in production areas and background noise in offices were determined through field measurements, and the data were integrated into a simulation environment. Furthermore, the Sound Reduction Indices (Rw) of the office building elements were calculated to determine indoor noise exposure levels. The results were compared with the performance classes specified in the 'Regulation on Protection of Buildings from Noise.' The findings revealed that noise levels in offices associated with production areas exceeded the regulatory limits.

Keywords: Architectural acoustics, Noise control, Open plan office, Shipyard acoustics, Shipyard structures.

^{1*} e-posta adresi: tutanc25@itu.edu.tr

1. GİRİŞ

Gürültü, günümüzde fiziksel ve psikolojik sağlığı olumsuz etkileyen en önemli çevresel faktörlerden biri olarak kabul edilmektedir. Özellikle çalışma ortamlarında yüksek düzeyli ve süreklilik gösteren gürültü maruziyeti; dikkat dağınıklığı, iletişim problemleri ve iş verimliliğinde azalma gibi sonuçlara yol açmakta, bu durum çalışma ortamlarının konfor koşullarını doğrudan etkilemektedir [1].

Tarihsel süreçte, hücre planlı ofislerin yerini; alanın verimli kullanılmasına imkân sağlaması ve birimler arası iletişimi arttırması gibi nedenlerle açık planlı ofislerin aldığı görülmektedir. Buna karşın açık planlı ofisler, sınırlı fiziksel ayrımlar ve ortak hacim kullanımı nedeniyle gürültüye karşı yüksek duyarlılığa sahip mekânlar olarak tanımlanmaktadır. Özellikle arka plan gürültüsünün yüksek olduğu endüstriyel alanlarda, bu durum akustik konforun sağlanmasını önemli ölçüde güçleştirmektedir [2], [3], [4], [5]. Nitekim kaynak, montaj, bükme ve boyama gibi yüksek ses gücüne sahip üretim faaliyetlerinin yürütüldüğü tersaneler, endüstriyel gürültü maruziyetinin en yoğun yaşandığı alanlar olarak, açık planlı ofisler için en zorlu akustik ortamları oluşturmaktadır. Bu nedenle, söz konusu ofislerin yalnızca iç mekân düzenlemeleriyle değil, aynı zamanda çevresel gürültü kaynakları ve ayırıcı yapı elemanlarının özellikleriyle birlikte bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmesi gerekmektedir [6], [7], [8].

Literatür araştırması sonucunda, açık planlı ofislerdeki akustik konfor koşullarının değerlendirildiği birçok çalışma tespit edilmiştir. Ancak, üretim gürültüsünün yönetmelik sınır değerlerinin üzerinde olduğu tersane yapılarına odaklanan araştırmaların sayıca az olduğu görülmektedir. Özellikle yüksek gürültü üreten endüstriyel üretim alanları içerisinde veya bitişğinde konumlanan açık planlı ofislerin akustik performansının bütüncül bir yaklaşımla ele alındığı çalışmaların ise literatürde önemli bir boşluk teşkil ettiği anlaşılmaktadır. Oysa bu tür mekânlarda, üretim gürültüsünün ofis içi ses basınç düzeylerine etkisi; ofis-hangar ilişkisi, kaynak-alıcı mesafesi, ofis bölücü yapı elemanlarının ses yalıtım özellikleri ve kullanılan malzemeler gibi çok sayıda fiziksel parametreye bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

Çalışmanın amacı, yüksek gürültü düzeyine sahip endüstriyel yapıların karakteristik bir örneği olan tersaneler içerisinde konumlandırılan açık planlı ofislerin akustik performansının incelenmesidir. Bu doğrultuda çalışma, üretim faaliyetlerinden kaynaklanan gürültünün ofis ortamına etkisini ve ofis içerisindeki toplam gürültü maruziyet düzeylerini, ofis-hangar ilişkisi ve bölücü yapı elemanlarının ses azaltım performansı bağlamında ortaya koymayı hedeflemektedir. Bu kapsamda, Antalya Serbest Bölgesi'nde yer alan iki farklı tersane içerisinde bulunan açık planlı ofisler ele alınmıştır. Tersanelerin üretim alanlarından kaynaklanan gürültü düzeyleri ve ofis içi arka plan gürültüleri ölçüm yöntemiyle belirlenmiş ve elde edilen veriler simülasyon ortamına aktarılmıştır. Ofisi hangar ortamından ayıran bölücü yapı elemanlarının ses azaltım indeksleri ($Rw+C_{tr}$) hesaplanarak, ofis içi gürültü maruziyet düzeyleri ortaya konmuş ve sonuçlar Binaların Gürültüye Karşı Korunması Hakkındaki Yönetmelik'te belirtilen sınır değerlerle karşılaştırılmıştır.

2. ÇALIŞMA ALANI VE YÖNTEM

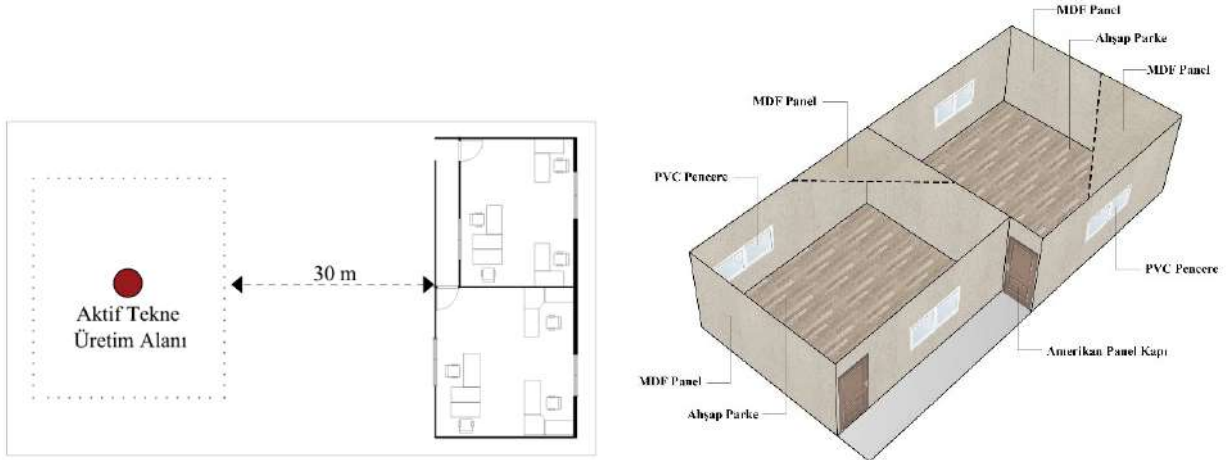
Bu bölümde, ilk olarak çalışmaya konu olan tersane yapıları ve açık planlı ofislerin mekânsal ve yapısal özellikleri tanıtılmaktadır. Ardından tersane üretim gürültüsünün ofis iç mekânlarına

etkisini değerlendirmek amacıyla uygulanan ölçüm ve simülasyon temelli bileşik yöntem açıklanmaktadır. Çalışma kapsamında izlenen yöntemsel yaklaşım; alan tanımı, gürültü ölçümleri, akustik modelleme ve elde edilen bulguların ilgili mevzuat çerçevesinde değerlendirilmesi aşamalarından oluşmaktadır.

2.1. Alan Tanıtımı

Çalışma, Antalya Serbest Bölgesi'nde yer alan ve aktif tekne üretiminin gerçekleştirildiği iki tersane yapısında konumlandırılmış açık planlı ofisler üzerinde yürütülmüştür. Çalışma kapsamında incelenen tersaneler, üretim süreçlerinde kullanılan malzeme türleri, üretim alanı-ofis mesafesi ve ofis bölücü duvar elemanlarının yapısal özellikleri bakımından farklılık göstermeleri nedeniyle tercih edilmiştir. Bu doğrultuda, üretim gürültüsünün açık planlı ofislerin akustik performansı üzerindeki etkisinin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Firmalar tarafından isim kullanım izni verilmediği için çalışma devamında yapılar; Tersane 1 (TRS 1) ve Tersane 2 (TRS 2) şeklinde isimlendirilmiştir.

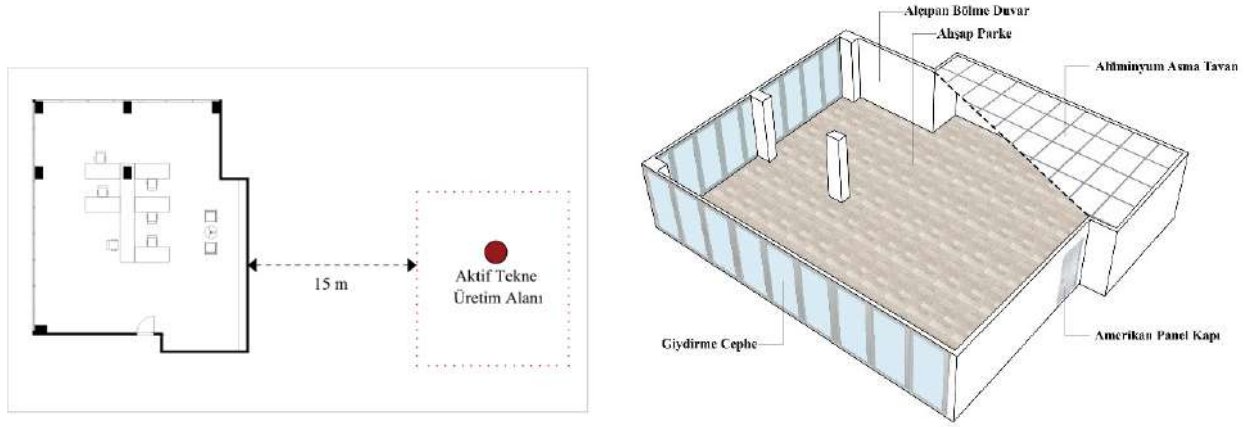
TRS 1 yapısında, çelik-alüminyum ve kompozit tekne üretimi yapılan bir hangar ve bu hangarın iç hacminde konumlandırılmış açık planlı ofis birimleri bulunmaktadır. Tersanede yürütülen çelik ve alüminyum işçiliğine dayalı üretim süreçleri; kesme, kaynak, taşlama ve montaj aşamalarındaki yüksek düzeyli ve darbeli gürültü karakteriyle tanımlanmaktadır. Bu hangar içerisinde yer alan açık planlı ofisin boyutları 6.15 m x 5.70 m olup, toplam alanı yaklaşık 36 m²'dir. Kat yüksekliği 2.80 m olan ofisin toplam hacmi ise 100.8 m³'tür. **Şekil 1**'de görüldüğü üzere, ofis cephesi tekne üretiminin gerçekleştirildiği alanla doğrudan ilişkilidir ve bu alana olan uzaklığı 30 m'dir. Ofisi üretim ortamından ayıran yapı bileşenleri, MDF panel duvarlar ve PVC doğramalı çift camlı pencere sistemlerinden oluşmaktadır.



Şekil 1. TRS 1 açık planlı ofis yapısının konumu ve yapı malzemeleri

TRS 2'de ise yalnızca kompozit tekne üretimi yapılan bir hangar ve bu hangarla doğrudan bağlantısı olan ve bitişik konumda bulunan bir açık planlı ofis yapısı yer almaktadır. Söz konusu yapıda yürütülen kompozit üretim süreci, çelik işçiliğindeki darbeli seslerin aksine, zımparalama,

kesim ve laminasyon işlemlerinin yoğun olduğu ve süreklilik arz eden gürültü yapısıyla diğer tersaneden ayrılmaktadır. Bu hangar içerisinde konumlanan ve ölçüleri 12.10 m x 11.10 m olan açık planlı ofisin toplam alanı 134 m²'dir. Hangar yapısının 2. katında konumlanan ofisin kat yüksekliği 2.73 m olup, hacmi yaklaşık 366 m³'tür. Açık planlı ofisin üretim alanıyla ilişkili cephesinin aktif tekne üretim alanına olan mesafesi 15 m'dir (Şekil 2). Ofisi üretim alanından ayıran yapı elemanları, alçıpan duvar sistemleri ve giydirme cephe bileşenlerinden oluşmaktadır. Hacmin tavanında ise grid düzene sahip alüminyum asma tavan bulunmaktadır.



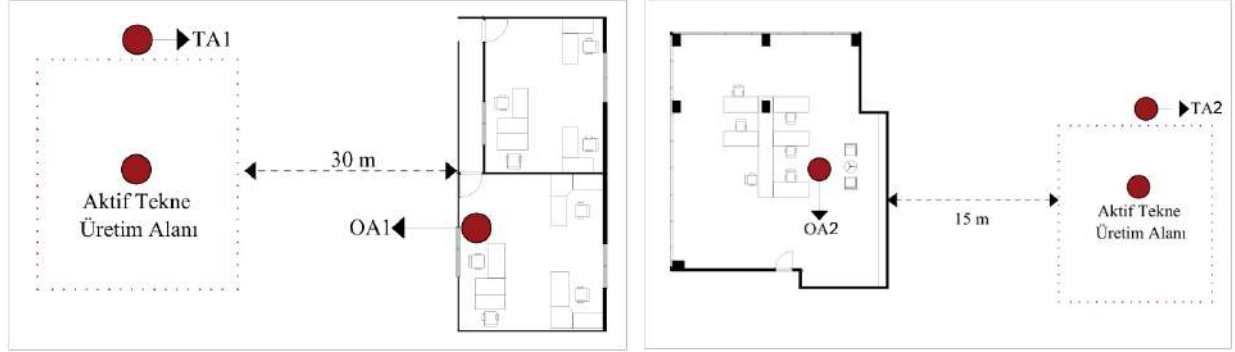
Şekil 2. TRS 2 açık planlı ofis yapısının konumu ve yapı malzemeleri

2.2. Yöntem

Çalışma kurgusu, saha ölçümleri, ayırıcı elemanların simülasyon destekli ses azaltım analizleri ve toplam gürültü düzeyinin hesaplanması olmak üzere üç aşamalı bir yöntemle gerçekleştirilmiştir. Tersane ortamlarında aktif üretim süreçleri ve ofis içi rutin faaliyetler eş zamanlı yürütülmektedir. Üretim faaliyeti aktifken ofis içinden doğrudan ölçüm yapılması; endüstriyel kaynaklı gürültünün ofis içine sızan miktarını, ofisin kendi iç gürültüsünden (konuşma, ofis cihazları vb.) ayırt etmeyi imkânsız kılmaktadır. Çalışmanın amacı, bölücü yapı elemanlarının mevzuat kapsamında tekil laboratuvar performansını test etmek değil; üretim gürültüsünün mesafeye bağlı yayılımını ve iç mekân toplam maruziyetine olan hava doğuşlu net katkısını tespit etmektir. Bu nedenle, gürültü kaynaklarının birbirine karışmasını önlemek amacıyla; dışarıdan sızan endüstriyel gürültü ile ofis arka plan gürültüsünün ayrı ayrı belirlenip logaritmik olarak sonradan birleştirildiği bu analitik yöntem (ölçüm + simülasyon) tercih edilmiştir.

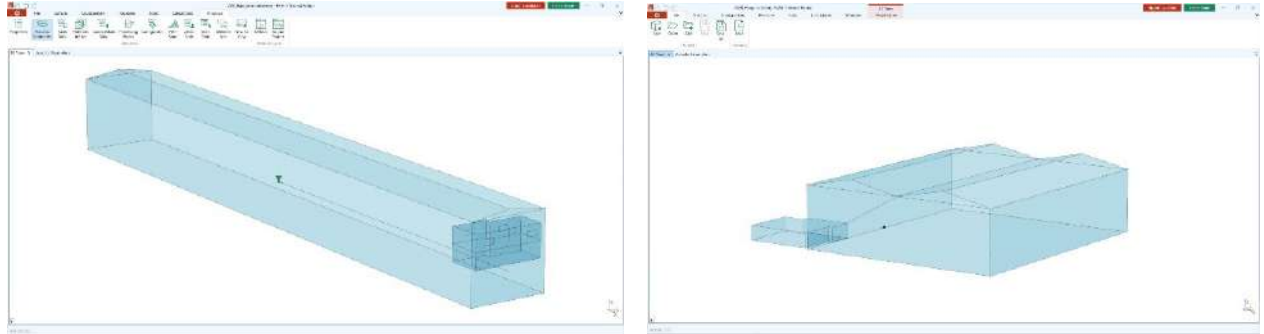
İlk aşamada, tersanelerde aktif tekne üretimi gerçekleştirilen alanlardaki kaynak gürültüsü ve ofis iç mekânlarındaki arka plan gürültüsü belirlenmiştir. Ölçümler, üretim faaliyetlerinin gerçekleştirildiği kapalı hangar ve ofis hacimlerinde yapılmış olup; dış hava koşullarından (rüzgar, yağış vb.) kaynaklanabilecek akustik bozucu etkiler yapının fiziksel özellikleri gereği elimine edilmiştir. Saha çalışmaları sırasında kapalı ortam sıcaklığı ortalama 25°C ve bağıl nem oranı %60 seviyelerinde ölçülmüştür. Tüm gürültü düzeylerinin tespitinde, insan kulağının frekans duyarlılığını temsil eden A-ağırlıklı (dBA) standart filtreye sahip UNI-T UT353 BT desibelmetre kullanılmıştır. Üretim alanlarındaki kaynak gürültüsü, ilgili kaynağa 2 metre mesafeden alınan 5'er dakikalık ölçüm verilerinin enerji ortalamaları (A-ağırlıklı eşdeğer gürültü düzeyi, LAeq)

hesaplanarak tespit edilmiştir. Saha ölçümleri; çelik, alüminyum ve kompozit malzeme işlenen TRS 1’de kesme ve kaynak, sadece kompozit malzeme kullanılan TRS 2’de ise montaj ve yüzey işlemlerinin yapıldığı en yoğun çalışma saatlerinde gerçekleştirilmiştir. **Şekil 3**’te, aktif tekne üretiminin gerçekleştirildiği alana en yakın noktada yer alan gürültü ölçüm noktaları (TA) ile ofis mekânlarında üretim alanına en yakın yüzeyde konumlandırılan iç gürültü ölçüm noktaları (OA) gösterilmektedir. Ofis içi ölçümler (OA), üretim faaliyetinin durduğu ancak ofis içi çalışma rutinlerinin (konuşma, klavye kullanımı vb.) devam ettiği zaman dilimlerinde yapılarak arka plan gürültüsü verisi elde edilmiştir.



Şekil 3. TRS 1 ve TRS 2 yapılarındaki alıcı noktaları

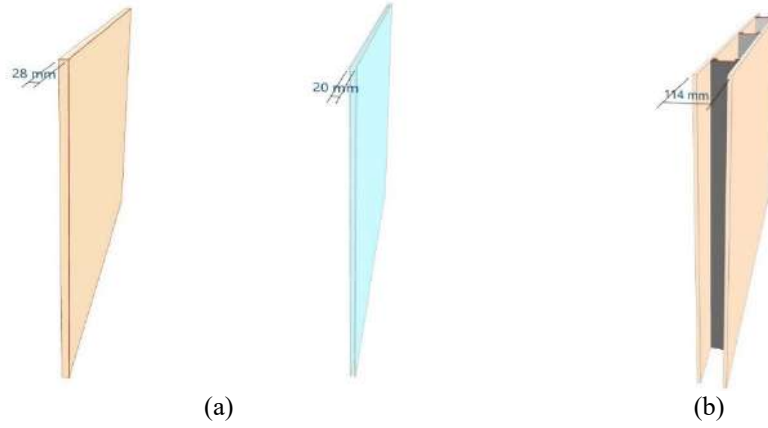
İkinci aşamada; üretim kaynaklı gürültünün ofis cephelerine ulaşan ses düzeylerini belirlemek amacıyla, her iki tersane yapısı ve ofis kütleleri EASE 5 yazılımında modellenmiş ve yüzey malzemeleri mevcut yapıya uygun olarak yazılım kütüphanesinden tanımlanmıştır (**Şekil 4**). Sahada ölçülen üretim gürültüsünü temsil etmesi amacıyla model içerisine, çok yönlü (omnidirectional) bir ses kaynağı yerleştirilmiş ve simülasyon yapılarak ofis cephe yüzeylerine ulaşan ses basınç düzeyleri tespit edilmiştir.



Şekil 4. TRS 1 ve TRS 2 yapılarının ve açık planlı ofislerin EASE 5 programındaki görselleri

Açık planlı ofislerin, üretim alanına en yakın yapı elemanlarındaki ağırlıklı ses azaltım indeks değerlerinin (R_w) tespiti için Insul 10 yazılımı kullanılmıştır. Tersane gürültüsünün düşük frekanslı karakteristiği dikkate alınarak, programda oluşturulan duvar ve pencere yapı elemanları için standart ağırlıklı ses azaltım indeksine (R_w) ek olarak, spektrum adaptasyon terimi (C_{tr}) de hesaba

katılmış ve R_w+C_{tr} değerleri hesaplanmıştır (**Şekil 5**). Kaynağa en yakın kompozit yüzeyin toplam iletim faktörünün hesaplanmasında ISO 12354-1 standardı esas alınmıştır [9].



Şekil 5. a) TRS 1 ofisinin MDF panel duvar malzemesi ve çift camlı pencere görseli b) TRS 2 ofisinin alçıpan duvar malzemesi görseli

Son aşamada ise simülasyonla elde edilen tersaneden açık planlı ofislere geçen üretim gürültüsü ile ofislerde ölçülen ofis içi arka plan gürültüsü, logaritmik toplama yöntemi kullanılarak birleştirilmiştir [10]. Böylece, üretim gürültüsü ve ofis içi faaliyetlerin oluşturduğu ofislerdeki toplam A-ağırlıklı (dBA) ses basınç düzeyi maruziyeti elde edilmiş ve sonuçlar Binaların Gürültüye Karşı Korunması Hakkında Yönetmelik sınır değerleri ile karşılaştırılmıştır.

3. BULGULAR

Çalışmanın bu bölümünde, üretim malzemesi ve ofis konumu bakımından farklılık gösteren TRS 1 ve TRS 2 yapılarının akustik performansları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Bulgular, kaynak (üretim alanı) gürültü düzeyleri, ayırıcı yapı elemanı performansı ve ofis içi maruziyet düzeyleri olmak üzere üç şekilde incelenmiştir.

İlk olarak, tersanelerdeki üretim faaliyetleri sırasında kaynağa en yakın noktada (TA) yapılan ölçüm sonucunda elde edilen A-ağırlıklı gürültü düzeyleri **Çizelge 1**'de verilmiştir.

Çizelge 1. TRS 1 ve TRS 2 üretim alanı kaynak özellikleri ve gürültü düzeyleri

Tersane	Üretim Malzemesi	Üretim Faaliyeti	Kaynak Gürültü Düzeyi
TRS 1	Çelik / Alüminyum / Kompozit	Kesme, Kaynak, Bükme	95.8 dBA
TRS 2	Kompozit	Montaj, Zımpara, Laminasyon	85.7 dBA

Çizelge 1 incelendiğinde, çelik, alüminyum ve kompozit malzemenin her üçünün de kullanılarak üretim yapılan TRS 1'deki gürültü düzeyinin, sadece kompozit malzeme kullanılarak üretim yapılan TRS 2'ye göre 10.1 dBA daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, çelik işleme faaliyetlerinin (kesme, kaynak vb.) kompozit malzeme işlemlerine kıyasla çok daha yüksek ses enerjisi açığa çıkarmasından kaynaklanmaktadır.

İkinci aşamada; saha ölçümleriyle belirlenen kaynak ses gücü düzeyleri, EASE 5 simülasyon programına tanımlanmıştır. Bu modelleme sonucunda elde edilen 1/3 oktav bantlarındaki değerlere standart A-ağırlıklandırma düzeltmeleri uygulanmış ve frekansların logaritmik toplamı alınmıştır. Yapılan hesaplamalarla, TRS 1 ve TRS 2 açık planlı ofislerinin kaynağa en yakın ayırıcı elemanına ulaşan toplam A-ağırlıklı ses basınç düzeyleri sırasıyla 88.3 dBA ve 90.4 dBA olarak tespit edilmiştir. Bu toplam maruziyet değerlerini oluşturan 1/3 oktav bantlarındaki A-ağırlıklı ses basınç düzeyleri **Çizelge 2**'de sunulmaktadır.

Çizelge 2. TRS 1 ve TRS 2 ofislerinin yüzeyine ulaşan 1/3 oktav bantlarında A-ağırlıklı SPL değerleri düzeyleri

Frekans	TRS 1	TRS 2	A-Ağırlık Düzeltmesi (dB)	TRS 1	TRS 2
	Toplam SPL (dB)	Toplam SPL (dB)		Toplam SPL (dBA)	Toplam SPL (dBA)
125 Hz	76.30	80.58	-16.1	60.20	64.48
250 Hz	75.39	80.25	-8.6	66.79	71.65
500 Hz	78.70	82.08	-3.2	75.50	78.88
1000 Hz	81.12	83.68	0	81.12	83.68
2000 Hz	83.34	85.01	+1.2	84.54	86.21
4000 Hz	81.35	83.13	+1.0	82.35	84.13
8000 Hz	78.16	80.35	-1.1	77.06	79.25

Elde edilen verilere göre, TRS 2'de ölçülen kaynak gürültüsü (85.7 dBA), TRS 1'e (95.8 dBA) kıyasla daha düşük olmasına rağmen; ofisin üretim alanına çok yakın konumlanması (15 m) nedeniyle ofis cephesine ulaşan gürültü düzeyi (90.4 dBA), TRS 1'in cephe yüzeyine ulaşan değerden (88.3 dBA) daha yüksek çıkmıştır. Bu durum, TRS 2 açık planlı ofisinin ayırıcı yapı elemanının daha yüksek ses basınç düzeylerine maruz kaldığını ortaya koymaktadır.

Çalışmanın üçüncü ve son aşamada ise, ayırıcı yapı elemanı performansı ve ofis içi gürültü maruziyeti sonuçları değerlendirilmiştir. Insul 10 programı kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlar neticesinde, açık planlı ofislerin üretim alanına en yakın yüzey bileşenlerinin ses azaltım değerleri hesaplanmıştır. Tersanelerde yürütülen üretim faaliyetlerinin düşük frekanslı karakteristiği göz önüne alınarak, yapı elemanlarının performans değerlendirmesinde standart ağırlıklı ses azaltım indeksine (R_w) ek olarak, düşük frekanslı gürültüler için spektrum adaptasyon terimi (C_{tr}) de hesaba katılmıştır. Buna göre hesaplanan kompozit değerler **Çizelge 3**'te yer almaktadır.

Çizelge 3. Açık planlı ofislerin yapı bileşenleri ve ses azaltım indeks (R_w) değerleri

Tersane	Duvar Kesiti	Ortalama R_w+C_{tr} Değeri
TRS 1	MDF Panel + PVC Pencere	21.3 dB
TRS 2	Alçıpan Duvar	28.0 dB

Sonuçlar, her iki tersanedeki açık planlı ofislerin ayırıcı yapı elemanı ses azaltım performansları arasında belirgin farklılıklar bulunduğunu göstermektedir. TRS 1'de yer alan ofis ayırıcı yapı elemanının MDF panellerden oluşması, R_w+C_{tr} değerinin 21.3 dB gibi kritik bir seviyede kalmasına neden olmuştur. Buna karşın, TRS 2 ofisinin üretim alanına en yakın yapı elemanının

TRS 1'e kıyasla daha nitelikli katmana sahip olması, R_w değerinin 28.0 dB seviyesine ulaşmasını sağlamıştır. Bu durum TRS 2 ofis yapısına geçen gürültü düzeyini TRS 1'e kıyasla önemli ölçüde sınırlandırmıştır.

Ölçüm ve simülasyonlar sonucunda elde edilen açık planlı ofis içi toplam gürültü düzeyleri **Çizelge 4**'te sunulmuş ve Binaların Gürültüye Karşı Korunması Hakkındaki Yönetmelikte yer alan sınır değerlerle kıyaslanarak akustik performans sınıfları belirlenmiştir.

Çizelge 4. Ofis içi gürültü düzeyleri ve akustik konfor değerlendirmesi

Tersane	Kaynağa Olan Mesafe	Kaynak Gürültü Düzeyi	Ofis İçi Arka Plan Gürültüsü	Üretimden Ofise Ulaşan Gürültü Düzeyi	Toplam Ofis Gürültü Düzeyi	B.G.K.K.H Yönetmelik Değerleri						Sonuç
						A	B	C	D	E	F	
TRS 1	30 m	95.8 dBA	45.2 dBA	67.0 dBA	67.0 dBA	36	40	44	48	52	56	F
TRS 2	15 m	85.7 dBA	42.4 dBA	62.4 dBA	62.4 dBA							F

Çizelgeden de görüldüğü üzere; TRS 1 ve TRS 2 yapılarında yer alan açık planlı ofislerin, Binaların Gürültüye Karşı Korunması Hakkında Yönetmelik'te tanımlanan akustik performans sınıfları içerisinde en düşük kategori olan F sınıfında yer aldığı belirlenmiştir.

Bulgular, TRS 2 açık planlı ofisindeki toplam gürültü düzeyinin (62.4 dBA), gürültü kaynağına daha yakın mesafede (15 m) konumlanmasına rağmen, üretim alanına daha uzak mesafede bulunan TRS 1 ofisine (30 m) kıyasla (67.0 dBA) 4.6 dBA daha düşük olduğunu göstermektedir. Bu durumun temel nedenleri, TRS 2 yapısında kompozit tekne üretimden kaynaklı üretim gürültüsünün görece daha düşük olması ve TRS 1'e kıyasla ses yalıtım performansı daha yüksek ayırıcı yapı elemanına sahip olmasıdır.

Sonuç olarak, her iki tersanedeki açık planlı ofislerin akustik performanslarının, Binaların Gürültüye Karşı Korunması Hakkında Yönetmelik'te tanımlanan sınır değerler açısından yeterli olmadığı görülmektedir.

3. TARTIŞMA VE SONUÇ

Çalışma kapsamında, Antalya Serbest Bölgesi'nde bulunan ve tekne üretimi gerçekleştiren tersaneler arasından, üretimde kullanılan malzeme türü ve açık planlı ofislerin üretim hangarlarıyla mekânsal ilişkisi dikkate alınarak seçilen iki farklı açık planlı ofisin akustik konfor düzeyleri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, akustik konforun sağlanmasında kaynak özellikleri, konum ve ayırıcı yapı elemanı performansının birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Sonuçlar, tekne üretiminde çelik, alüminyum ve kompozit malzemelerin bir arada kullanıldığı TRS 1'deki kaynak gürültüsü düzeyinin, üretimde yalnızca kompozit malzeme kullanılan TRS 2'ye göre yaklaşık 10 dBA daha yüksek olduğunu göstermiştir. Kaynaklardaki ses gücü düzeyleri arasındaki bu farkın; çelik, alüminyum ve kompozit tekne üretiminde yoğun olarak başvuru alan kesme,

kaynak, taşlama ve montaj işlemlerinin, kalıplama ve laminasyon esaslı kompozit üretim sürecine göre çok daha yüksek ses gücü açığa çıkarmasından kaynaklandığı anlaşılmaktadır.

Çalışmada elde edilen en kritik bulgu, açık planlı ofislerin cephesine etki eden ses basınç düzeyi ile ayırıcı eleman yalıtım performansı arasındaki belirleyici ilişkidir. TRS 2 hangarındaki kaynak gürültüsü daha düşük olmasına rağmen, açık planlı ofisin üretim alanına yakın konumlanması nedeniyle, TRS 1 açık planlı ofisine kıyasla daha yüksek bir ses basınç düzeyine maruz kaldığı tespit edilmiştir. Buna karşın TRS 2 ofisinin sahip olduğu ayırıcı yapı elemanı sayesinde, iç mekâna sızan gürültünün TRS 1'e kıyasla daha fazla sınırlandığı görülmüştür. Bu durum, gürültü kontrolünde yalnızca mesafenin değil, ayırıcı yapı elemanı özelliklerinin de belirleyici bir rol oynadığını göstermektedir. Elde edilen sonuçlardan hareketle, tersane ve benzeri endüstriyel yapılarda bulunan açık planlı ofislerdeki işitsel konforun iyileştirilmesine yönelik çözüm önerileri aşağıda maddeler halinde sunulmuştur:

- Üretim alanlarında kullanılan ve gürültüye neden olan ekipmanların düzenli bakım ve kontrol süreçleri sağlanmalı, gerekli durumlarda susturucu ve titreşim sönümleyici sistemler kullanılarak gürültü oluşumu kaynağında sınırlandırılmalıdır. Bununla birlikte, tersanelerde ağır tonajlı malzemelerin taşınması ve montajı, zemin kaynaklı güçlü titreşimler yaratmaktadır. Ofis kütleleri doğrudan hangar zeminine oturtulmak yerine, yüzer döşeme detayları ile ana strüktürden koparılmalıdır. Bu yaklaşım, yapısal gürültü iletimini önemli ölçüde engelleyecektir.
- Açık planlı ofis alanları ile üretim alanları arasındaki mesafe, atmosferik özelliklerin etkisi dikkate alınarak optimize edilmelidir. Hangarlardaki ofis giriş kapılarının doğrudan kaynağın bulunduğu üretim sahasına açılması, her kullanımda ciddi bir ses sızıntısına neden olmaktadır. Bu durumun önüne geçmek için, üretim alanı ile ofis arasında ses yutucu panellerle kaplanmış bir akustik tampon bölge kurgulanmalı; giriş-çıkışlarda ofis ve tampon bölge kapılarının eş zamanlı açılmasını önleyen bir sirkülasyon şeması oluşturulmalıdır.
- Bulgular, çelik ve alüminyum tekne üretim sürecinin, kompozit üretime kıyasla çok daha yüksek düzeyli ve darbeli gürültü karakterine sahip olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, çelik ve alüminyum tekne üretimi yapılan hangarlardaki ofislerin ayırıcı yapı elemanlarında; tek katmanlı hafif elemanlar yerine, yoğunluğu artırılmış çok katmanlı bileşenler tercih edilmelidir. Bu bileşenlerin katmanları arasında gözenekli ses yutucu yalıtım malzemeleri kullanılmalıdır. Tersane ofislerinde üretimi denetleme zorunluluğu nedeniyle şeffaf yüzeylere ihtiyaç duyulmaktadır ancak bu yüzeyler akustik açıdan zayıf noktalar oluşturmaktadır. Bu bağlamda, söz konusu yüzeylerde lamine edilmiş akustik özellikli cam üniteleri kullanılmalıdır.
- Açık planlı ofislere iletilen gürültünün mekân içerisindeki yayılımını ve yankılanma süresini kontrol altına almak amacıyla, tavan ve duvar yüzeylerinde ses yutucu özelliklere sahip uygun akustik malzemeler kullanılmalıdır. Buna ek olarak, ofislerdeki konuşma gizliliğini arttırmak ve mahremiyeti sağlamak için akustik maskeleme sistemleri uygulanmalı, çalışma istasyonları arasında akustik separatörlere yer verilmelidir.

Bu araştırma, tersanelerdeki işitsel konfor koşullarını yapı fiziği ve mimari akustik bağlamında çok boyutlu olarak ele alan kapsamlı bir çalışmanın öncü bulgularını sunmaktadır. Çalışma kapsamında geliştirilen öneriler, hangarların tasarım ve yapım süreçlerinden başlayarak, ofis iç mekân

organizasyonu sürecine kadar bütüncül bir yaklaşımla ele alınmalıdır. Araştırma, bu yönüyle tasarımcılar ve uygulayıcılar için yol gösterici bir nitelik taşımaktadır. Ayrıca elde edilen bulgular, yalnızca tersane yapılarında değil, üretim alanları içerisinde konumlandırılan tüm endüstriyel ofislerde benzer işitsel sorunların ortaya çıkabileceğini göstermektedir. Gelecek çalışmalarda, yapı dışı çevre gürültüsünün de analizlere dahil edilmesi ve farklı yapı malzemesi detayları ile çalışmanın kapsamının genişletilmesi önerilmektedir.

TEŞEKKÜR

Tersanelerdeki veri toplama sürecinde yardımlarını esirgemeyen Engin BABACAN'a ve tüm tersane çalışanlarına; simülasyon aşamasında program desteği sağlayan sayın Dr. Öğr. Üyesi Mine AŞÇIGİL DİNÇER'e ve Subera Arge Danışmanlık firmasına; program için teknik destek sağlayan Türker Orbay BARAN'a teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

1. Gürtürk, S. Ö. (2020). *Açık planlı bürolarda işitsel konforun tasarım parametresi olarak alınmasına yönelik bir yaklaşım* [Doktora tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi]. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>.
2. Çete, N. (2004). *Çalışma ortamlarında verimliliğin artırılmasının büro mekânlarıyla ilişkilendirilmesi* [Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi]. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>.
3. Bertazzoni, R. V. (2018). *Investigation of a new simulation procedure for speech intelligibility in open-plan offices* [Master's thesis, Chalmers University of Technology]. <https://odr.chalmers.se/home>
4. Şahin, B. D. (2019). *Açık planlı ofis yapılarında akustik konfor koşullarının incelenmesi: İzmir'de bir ofis yapısı örneği* [Yüksek lisans tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi]. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>.
5. Indrani, H. C., Ekasiwi, S. N. N. ve Arifianto, D. (2023). Indoor soundscape model: Assessing contextual factors in open-plan offices on university campuses in Surabaya, Indonesia. *Building and Environment*, 237, 110267. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110267>
6. Bhumika, N., Prabhu, G. V., Ferreira, A. M. ve Kulkarni, M. K. (2013). Noise. Induced Hearing Loss Still a Problem in Shipbuilders: A Cross. Sectional Study in Goa, India. *Annals of medical and health sciences research*, 3(1), 1-6. <https://doi.org/10.4103/2141-9248.109453>
7. Kurt, R. E., McKenna, S. A., Günbeyaz, S. A. ve Turan, O. (2017). Investigation of occupational noise exposure in a ship recycling yard. *Ocean Engineering*, 137, 440-449. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.03.040>
8. Azkeskin, D. (2021). *Gemi inşaatı sektöründe gürültü maruziyetinin değerlendirilmesi* [Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi]. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>.
9. Türk Standardları Enstitüsü. (2019). *TS EN ISO 12354-1 Bina akustiği – Binaların akustik performansının elemanların performansından tayini-Bölüm 1: Odalar arasında hava ile yayılan sesin yalıtımı*. Türk Standardları Enstitüsü. <https://intweb.tse.org.tr/>
10. Hansen, C. H. (2001). Fundamentals of acoustics. Occupational Exposure to Noise: Evaluation, *Prevention and Control*. World Health Organization, 1(3), 23-52.

KONUT CEPHELERİNİN ENERJİ VE KARBON PERFORMANSININ BIM DESTEKLİ DEĞERLENDİRMESİ

Hatidza Çapkın^{1*}

Esra Bostancıoğlu²

^{1,2} İstanbul Kültür Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, E5 Karayolu üzeri, Bakırköy, 34158, İstanbul.

ÖZET

İklim değişikliği giderek şiddetlenmiş ve yapı sektöründe karbonsuzlaşma, etkilerini azaltmada kritik bir strateji haline gelmişti. WorldGBC'nin Bringing Embodied Carbon Upfront girişimi ve Türkiye Bina Sektörü Karbonsuzlaşma Yol Haritası doğrultusunda, 2030 yılına kadar yeni binalarda gömülü karbonun en az %40 azaltılması ve işletme karbonunda net sıfır hedeflenmiş. 2053'te ise gömülü ve işletme kaynaklı emisyonların tamamen ortadan kaldırılması amaçlanmıştı. Yapı sektörü, Türkiye'nin nihai enerji kullanımının %31'inden ve sera gazı emisyonlarının %30'undan sorumlu olduğundan kritik bir rol üstlenmişti. Bu hedeflere ulaşmak, malzeme performansı ve enerji verimliliğini proje başından entegre eden yaşam döngüsü değerlendirmesi temelli tasarım yaklaşımlarını gerektirmiştir. Bu çalışma, farklı konut cephe alternatiflerinin gömülü ve işletme enerjisi üzerindeki etkilerini inceleyerek toplam karbon emisyonlarına katkılarını nicel olarak ortaya koymuştur. İstanbul Bakırköy'deki kentsel dönüşüm kapsamında, temsili çok katlı bir konut Autodesk Revit ile modellenmiş ve enerji performansı Insight simülasyonlarıyla değerlendirilmiştir. Birden fazla cephe konfigürasyonu karşılaştırılarak gömülü enerji, işletme enerjisi ve CO₂ emisyonlarındaki farklılıklar nicel olarak ortaya konmuştur. Bulgular, Türkiye'nin karbonsuzlaşma yol haritasıyla uyumlu düşük karbon ve enerji verimli cephe çözümlerinin belirlenmesine katkı sağlamıştır.

Anahtar kelimeler: Bina Bilgi Modellemesi (BIM), Gömülü enerji, İşletme enerjisi, Karbon salınımı, Konut cepheleri.

BIM-SUPPORTED EVALUATION OF THE ENERGY AND CARBON PERFORMANCE OF RESIDENTIAL BUILDING FACADES

ABSTRACT

Climate change intensified globally, making decarbonization in the building sector a critical mitigation strategy. In line with initiatives such as WorldGBC's Bringing Embodied Carbon Upfront and the Turkish Building Sector Decarbonization Roadmap, the study aimed to reduce embodied carbon in new buildings by at least 40% by 2030 and achieve net-zero operating carbon, with full elimination of both embodied and operating emissions planned by 2053. The building sector played a critical role, accounting for 31% of Turkey's final energy use and 30% of national greenhouse gas emissions. Achieving these targets required lifecycle assessment-based design approaches integrating material performance and energy efficiency from project inception. This study quantitatively assessed the contribution of different residential facade alternatives to total carbon emissions by evaluating their embodied and operating energy. Analyses were conducted for Istanbul's Bakırköy district, where urban transformation was intensive. A representative multi-story residential building was modeled in Autodesk Revit, and energy performance was evaluated using Insight simulations. Material data reflecting locally available products were obtained from the Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change catalog. Comparative analyses of multiple facade configurations revealed differences in embodied energy, operating energy demand, and CO₂ emissions. The findings contributed to identifying facade solutions aligned with Turkey's decarbonization roadmap, supporting the design of low-carbon, energy-efficient buildings through informed lifecycle assessment.

Keywords: Building Information Modeling (BIM), Embodied energy, Operational energy, Carbon footprint, Residential facades.

^{1*} h.capkın@iku.edu.tr

1. GİRİŞ

Bina sektörünün, küresel enerji kullanımı ve sera gazı emisyonları üzerinde önemli etkisi bulunmaktadır. Bu durumun bir sonucu olarak, uluslararası ve ulusal gündemler, tüm bina yaşam döngüsü boyunca enerji etkilerinin azaltılması gerekliliğini giderek daha fazla vurgulamaktadır. Küresel girişimler, uzun vadeli karbonsuzlaşma hedeflerine ulaşmak için hem işletme enerjisinin hem de gömülü enerjinin ele alınması gerektiğinin altını çizmektedir. Dünya Yeşil Bina Konseyi, 2030 yılına kadar yeni binalarda net-sıfır işletme karbonu ve gömülü karbonda %40 azalma çağrısında bulunarak, 2050 yılına kadar tüm yaşam döngüsü boyunca net-sıfır karbon hedefine doğru ilerlemektedir [1]. Paralel olarak Türkiye, 2030 yılına kadar sera gazı emisyonlarını %41 oranında azaltmayı ve 2053 yılına kadar net-sıfır emisyonu ulaşmayı taahhüt etmiştir. Bu hedefler, ulusal enerji talebindeki önemli payı nedeniyle bina sektörünü öncelikli bir alan olarak tanımlamaktadır [2]. Türkiye'deki bina stokunun yaklaşık %85'ini oluşturmaları sebebiyle konut binaları bu bağlamda özellikle büyük önem taşımaktadır [3]. İstanbul gibi büyük metropol alanlar, mevcut konut binalarının yenilenmesiyle sonuçlanan hızlı bir kentsel dönüşüm sürecinden geçmektedir. Bu süreç, sismik güvenliği artırmayı ve işletme enerjisi tüketimini azaltmayı hedeflerken, aynı zamanda malzeme kullanımını ve inşaat faaliyetlerini de artırmaktadır. Bu durum, malzeme üretimi ve inşaat ile ilişkili olan ilk gömülü enerji ile binanın ömrü boyunca bakım, onarım ve değişim ile ilgili olan tekrarlanan gömülü enerji konusunda endişeleri beraberinde getirmektedir [4]. Buna karşılık işletme enerjisi, binaların kullanım aşamasında öncelikle ısıtma, soğutma, aydınlatma, havalandırma, kullanım sıcak suyu ve cihazlar için tüketilen enerjiyi ifade etmektedir. [4-6]. Bu iki bileşenin yaşam döngüsü enerji analizi yoluyla birlikte değerlendirilmesi, binaların uzun vadeli çevresel performansını anlamak için önemlidir [4],[7].

Tarihsel olarak işletme enerjisi, binaların toplam yaşam döngüsü enerjisinin en büyük payını temsil etmiştir. Bu nedenle, düzenlemeler ve tasarım stratejileri büyük ölçüde daha iyi yalıtım, verimli HVAC sistemleri ve gelişmiş teknolojiler aracılığıyla enerji verimliliğini artırmaya odaklanmıştır [7]. İşletme enerjisi talebi iklim koşullarına, konfor beklentilerine ve bina kullanım modellerine bağlı olarak değişmektedir. Ancak, işletme enerjisindeki iyileştirilme uygulamalarıyla işletme enerjisi talebi azaldıkça, gömülü enerjinin göreceli önemi artmaktadır.

Güncel çalışmalar, cephe tasarımı ve malzeme seçiminin hem gömülü hem de işletme enerjisini şekillendirmede kritik bir rol oynadığını göstermektedir. Avrupa ülkelerinde yapılan araştırmalar, yalıtım odaklı stratejilerin, işletme enerjisini azaltırken gömülü enerjiyi önemli ölçüde artırdığını göstermektedir [9,10]. Diğer çalışmalar, yalnızca yalıtıma dayalı yaklaşımların orantısız gömüllü enerji yüklerine yol açabileceğini vurgulamakta ve alternatif olarak biyo-tabanlı malzemeleri önermektedir [11,12]. Daha sıcak ve soğutma odaklı iklimlerde ise farklı örüntüler ortaya çıkmaktadır. Mısır ve Hindistan'daki araştırmalar, hafif ve entegre cephe sistemlerinin hem gömülü hem de işletme enerjisini azaltabileceğini göstermektedir [13,14]. Öte yandan, sıcak iklimlerde yapılan çalışmalar, duvar malzemesinden ziyade pencere-duvar oranının ve cam tasarımının etkisini vurgulamaktadır [15,16].

Türkiye'de yürütülen çalışmalar da gömülü ve işletme enerjisi arasında belirgin karşılımlar (trade-offs) olduğunu ortaya koymaktadır. Net-sıfır enerji bina gereksinimlerini karşılamak üzere tasarlanan cepheler, önemli ölçüde işletme enerji tasarrufu sağlarken gömüllü enerji'yi artırma eğilimindedir ve sonuçta genel yaşam döngüsü faydaları sağlamaktadır [17]. Farklı iklim

koşullarında cephe ve yenileme değerlendirmesi için yaşam döngüsü enerji analizinin değerini vurgulayan bölgesel çalışmalarda da benzer bulgular rapor edilmiştir [3, 18-20].

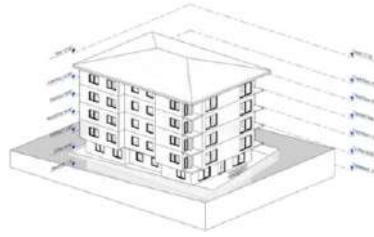
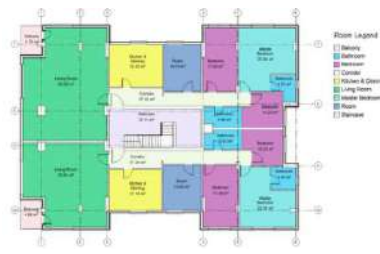
Kapsamlı uluslararası araştırmalara rağmen, İstanbul'un yerel bağlamında konut cephe sistemlerinin karşılaştırmalı yaşam döngüsü enerji değerlendirmeleri sınırlı kalmıştır. Bu boşluk, yerel iklim, malzeme ve inşaat koşulları altında gömülü ve işletme enerjisini dengeleyen cephe çözümlerinin belirlenmesini zorlaştırmaktadır. Bu ihtiyacı gidermek amacıyla sunulan bu çalışma, İstanbul'daki yaygın konut cephe alternatiflerinin yaşam döngüsü enerji performansını değerlendirmektedir. BIM (Yapı Bilgi Modelleme) destekli bir iş akışı kullanan çalışma, dengeli bir yaşam döngüsü performansı sağlayan cephe sistemlerini belirlemek için hem gömülü hem de işletme enerjisini analiz etmektedir. Bulgular, Türkiye'nin devam eden kentsel dönüşüm sürecinde enerji bilincine sahip karar verme süreçlerini desteklemeyi ve konut bina sektöründeki uzun vadeli enerji etkilerinin azaltılmasına katkıda bulunmayı amaçlamaktadır.

2. YÖNTEM

Kentsel dönüşüm kapsamında yenilenen konut binalarında, cephe bileşenlerine ilişkin kararların gömülü enerji, işletme enerjisi talebi ve CO₂ emisyonları üzerindeki etkileri belirlenebilmek amacıyla BIM yöntemlerinden yararlanılmıştır. Seçilen mevcut çok katlı bir konut yapısı Autodesk Revit ortamında modellenmiş ve enerji performansı Insight simülasyonlarıyla değerlendirilmiştir. Birden fazla cephe konfigürasyonunun gömülü enerji, işletme enerjisi talebi ve CO₂ emisyonları hesaplanmış ve karşılaştırmalı analizler nicel olarak ortaya konmuştur. Çalışmada, ISO 14040 ve ISO 14044 standartlarına uygun bir Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD) çerçevesi kullanarak, alternatif konut cephelerinin işletme enerjisi, gömülü enerji ve karbon etkilerini değerlendirilecektir [21]. YDD, binaların yaşam döngüleri boyunca çevresel etkilerini değerlendirmek için yaygın olarak uygulanan bir yöntemdir [22], [4]. Bu çalışmadaki değerlendirme; ISO 14040 ve ISO 14044 standartlarındaki YDD çerçevesindeki A1–A3 (üretim aşaması) ve—B6 (İşletme enerjisi kullanımı)nı kapsayacaktır. Veri belirsizliği ve çalışma hedefleriyle olan sınırlı ilgileri nedeniyle diğer aşamalar kapsam dışı bırakılmıştır. Konut YDD literatürüyle uyumlu olarak, binanın hizmet ömrü 50 yıl olarak kabul edilmiştir.

2.1. Vaka Çalışması Binası

Çalışmada, İstanbul'da kentsel dönüşüm çalışmalarının yoğun bir şekilde sürdüğü, yaşlı ve emekli dolayısıyla dar gelirli nüfusun ağırlıklı olduğu Bakırköy ilçesi vaka çalışması için seçilmiştir. Bakırköy ilçesinde yer alan mevcut bir konut binası, vaka binası olarak belirlenmiştir (**Şekil 1**). **Şekil 1**'de vaka binasının özellikleri görülmektedir. Bina, yaklaşık 1.968 m² brüt kat alanına sahip, her katta iki daire bulunan, beş katlı (zemin kat artı dört normal kat) ayrınk nizamli bir yapıdır. Binanın taşıyıcı sistemi betonarme iskelet, çatısı ise yalıtımlı ahşap eğimli çatıdır. Isıtma sistemi olarak bireysel ısıtma sistemlerinden kombi ve yakıt olarak doğalgaz kullanılmaktadır. Cephe tasarımının etkisini ortaya koyabilmek için senaryolar belirlenirken yalnızca dış duvar bileşenleri değiştirilmiştir. Bina kabuğunu oluşturan pencere ve çatı bileşenleri gerek alan gerekse özellikler açısından sabit tutulmuştur.



Parametre	Değer
Konum	Bakırköy, İstanbul (İklim Bölgesi II)
Kat sayısı	1+4 (zemin kat + 4 normal kat)
Daire sayısı	10
Kat başına daire sayısı	2
Toplam net alan (m ²) (zemin üstü)	1960 m ²
Kat alanı / kat başına	412 m ²
Kat yüksekliği	3.2 m
Dış duvar alanı	1188 m ²
Gövde duvar alanı	1121 m ²
Taşıyıcı eleman alanı (betonarme)	67 m ²
Dış duvar alanı / kat alanı	2.88
Çatı alanı	420
Pencere türleri	Çift camlı pencereler (U _f = 2.70);
Pencere alanı	235.5 m ²
Pencere alanı oranı (WWR)	19.9 %
Isıtma	Doğal gaz
Kullanım ömrü	50 years
Kullanım	Sürekli kullanım (24 saat / 7 gün)

Şekil 1. Vaka binasının kat planı ve 3B görüntü (sol) ve bina özellikleri (sağ)

2.2. Cephe Alternatiflerinin Belirlenmesi

Cephe alternatifleri; Türkiye'deki yaygın konut inşaat uygulamaları temel alınarak, cephe katmanları arasında hava boşluğu bulunma durumu esas alınarak iki ana tipoloji altında sınıflandırılmıştır: (1) Havalandırmasız cepheler ve (2) Havalandırılabilir cepheler. Cephe katmanlarının belirlenmesinde TS 825, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı birim fiyat kataloğu, yerel üretici verileri ve ilgili literatür esas alınmıştır. Konut gibi uzun süreli kullanılan binalarda daha uygun bir sistem olduğu ve buhar difüzyonu sonucu yoğuşma olasılığının az olması nedeniyle; Türkiye’de dıştan yalıtım uygulamaları tercih edilmektedir. Cephe konfigürasyonları belirlenirken, her iki tipolojide de yalıtım malzemesinin duvar gövdesinin dış tarafına yerleştirileceği kabul edilmiştir. Havalandırılabilir cepheler için, yaygın cephe sistemi kılavuzlarına dayanarak 5 cm’lik bir hava boşluğu varsayılmıştır. Malzemelerin hammadde kökenlerinin farklı olması (XPS - plastik, taş yünü – mineral bazlı) ve kullanım yoğunluğunun yüksek olması nedeniyle, ekstrüde polistiren köpük (XPS) ve taş yünü cephe alternatiflerinde ısı yalıtım malzemeleri olarak seçilmiştir. Uygun maliyetleri ve kullanım yoğunlukları nedenleriyle, boya, kompakt laminat (HPL) ve alüminyum kompozit paneller (ACM) de cephe kaplama malzemeleri olarak belirlenmiştir. Tüm bu kabuller doğrultusunda, altı havalandırmasız ve 12 havalandırılabilir olmak üzere toplam 18 farklı cephe konfigürasyonu üzerinden hesaplamalar ve analizler gerçekleştirilecektir. 18 farklı cephe konfigürasyonu **Çizelge 1**’de görülmektedir.

Çizelge 1. Cephe konfigürasyonları

	Cephe	1.Cephe Kaplaması	2.Hava Boşluğu	3.İsı Yalıtım Malzemesi	4.Duvar Gövdesi	5.İç Kaplama
Havalandırmasız	C1	Çimento Sıva+Boya	-	XPS	15 cm gazbeton	Sıva+Boya
	C2	Çimento Sıva+Boya	-	XPS	19 cm gazbeton	Sıva+Boya
	C3	Çimento Sıva+Boya	-	XPS	15 cm bims blok	Sıva+Boya
	C4	Çimento Sıva+Boya	-	XPS	19 cm bims blok	Sıva+Boya
	C5	Çimento Sıva+Boya	-	XPS	13.5 cm tuğla	Sıva+Boya
	C6	Çimento Sıva+Boya	-	XPS	19 cm tuğla	Sıva+Boya
Havalandırılabilir	V1	Alüminyum Kompozit	5 cm	Taşıyıcı	15 cm gazbeton	Sıva+Boya
	V2	Kompakt Laminat	5 cm	Taşıyıcı	15 cm gazbeton	Sıva+Boya
	V3	Alüminyum Kompozit	5 cm	Taşıyıcı	19 cm gazbeton	Sıva+Boya
	V4	Kompakt Laminat	5 cm	Taşıyıcı	19 cm gazbeton	Sıva+Boya
	V5	Alüminyum Kompozit	5 cm	Taşıyıcı	15 cm bims blok	Sıva+Boya
	V6	Kompakt Laminat	5 cm	Taşıyıcı	15 cm bims blok	Sıva+Boya
	V7	Alüminyum Kompozit	5 cm	Taşıyıcı	19 cm bims blok	Sıva+Boya
	V8	Kompakt Laminat	5 cm	Taşıyıcı	19 cm bims blok	Sıva+Boya
	V9	Alüminyum Kompozit	5 cm	Taşıyıcı	13.5 cm tuğla	Sıva+Boya
	V10	Kompakt Laminat	5 cm	Taşıyıcı	13.5 cm tuğla	Sıva+Boya
	V11	Alüminyum Kompozit	5 cm	Taşıyıcı	19 cm tuğla	Sıva+Boya
	V12	Kompakt Laminat	5 cm	Taşıyıcı	19 cm tuğla	Sıva+Boya

2.3. BIM Tabanlı Modelleme Prosedürü

Modelleme, veri çıkarma ve enerji analizi için temel platform olarak BIM kullanılmıştır. Vaka binası ve cephe alternatifleri, geometrik verilerin ve malzeme verilerinin entegre bir şekilde yönetilmesine olanak tanıyan Autodesk Revit yazılımında modellenmiştir [23]. Cephe alternatifleri; paylaşılan parametreler (shared parameters) ve standartlaştırılmış bir isimlendirme kuralı kullanılarak Revit duvar tipleri olarak parametrik bir biçimde tanımlanmıştır. Bu yaklaşım; tüm senaryolarda tutarlı malzeme listeleri (scheduling), metraj alımı (quantity take-off) ve TS 825 uygunluk kontrollerinin yapılmasını sağlamıştır. Isıl ve fiziksel özelliklerin doğru bir şekilde atanmasını garanti altına almak amacıyla özelleştirilmiş bir malzeme kütüphanesi oluşturulmuştur.

2.4. Yaşam Döngüsü Enerjisi

İşletme enerjisi performansı, hesaplama motoru olarak EnergyPlus kullanan bulut tabanlı simülasyon platformu Autodesk Insight ile değerlendirilmiştir. BIM tabanlı enerji simülasyonu, tüm bina enerji performansının özdeş sınır koşulları altında standartlaştırılmış ve tekrarlanabilir bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanır [24],[25],[27]. Simülasyonlarda; bina geometrisi, cephe ısı özellikleri, iklim verileri, kullanım programları (occupancy schedules) ve HVAC sistemi karakteristikleri dikkate alınmıştır. Yıllık işletme enerjisi talebi hesaplanmış ve aşağıdaki formül kullanılarak bina hizmet ömrü boyunca tahmin edilmiştir.

$$OE = E_{OA} \times L_b \quad (1)$$

Burada OE yaşam boyu işletme enerjisini, E_{OA} yıllık işletme enerjisini ve L_b ise bina ömrünü temsil etmektedir. Toplam Yaşam Döngüsü Enerjisi bu şekilde hesaplanmıştır:

$$YDE = EE \text{ (Gömüllü Enerjisi)} + OE \text{ (İşletme Enerjisi)} \quad (2)$$

2.5. Gömülü Enerji ve Gömülü Karbon Hesaplaması

Gömülü enerji ve gömülü karbon, geometrik temsil ile çevresel değerlendirme arasındaki tutarlılığı sağlamak amacıyla doğrudan BIM modelinden çekilen malzeme miktarlarına dayalı olarak hesaplanmıştır. Analiz, beşikten kapıya (A1–A3) aşamasıyla sınırlandırılmıştır. Türkiye'ye özgü ürüne özel Çevresel Ürün Beyanlarının (EPD) sınırlı sayıda olması nedeniyle; gömülü enerji ve karbon katsayıları, bina YDD çalışmalarında yaygın olarak kullanılan Inventory of Carbon and Energy (ICE) veri tabanından [26] temin edilmiştir. Ek değerler, ilgili literatürle çapraz kontrole tabi tutulmuştur (**Çizelge 2**).

Çizelge 2. Gömülü Enerji ve Karbon ile İlgili Veriler.

Malzeme Adı	Gömülü Enerji Katsayısı (MJ/kg)	GWP (kg CO ₂ e/kg)
Alçı sıva	1.80	0.12
Yatay delikli tuğla	3.0	0.24
Gazbeton	1.0	0.30
Bims blok	0.9	0.35
Ekstrüde Polistiren (XPS)	95.0	2.5
Taşyünü	16.8	1.05
Çimento sıva	1.5	0.20
Kompakt Laminat (HPL)	85	3.0
Alüminyum Kompozit	155	10.0

Bu çalışmada yapı malzemeleri için literatürde yaygın olarak kabul edilen tahmini (referans) hizmet ömrü değerleri kullanılmıştır. Gömülü enerji formül kullanılarak hesaplanmıştır.

$$EE = \sum(Quantity_{kg} \times EE_{factor}) \quad (3)$$

Gömülü karbon, küresel ısınma potansiyeli (GWP) faktörleri formül kullanılarak hesaplanmıştır:

$$EC = \sum(Quantity_{kg} \times GWP_{factor}) \quad (4)$$

2.6. Senaryo Karşılaştırması ve Veri Görselleştirme

Tüm cephe alternatifleri, bina hizmet ömrü boyunca işletme enerjisi, gömülü enerji ve gömülü karbonun doğrudan karşılaştırılabilmesini sağlamak amacıyla özdeş koşullar altında değerlendirilmiştir. Birleştirilen sonuçlar, başlangıçtaki malzeme etkileri ile uzun vadeli işletme performansı arasındaki karşılımları (trade-offs) vurgulamaktadır. Autodesk Insight'ın sınırlı doğrudan veri aktarım yetenekleri nedeniyle, simülasyon çıktıları Power BI kullanılarak sonradan işlenmiş (post-processed) ve görselleştirilmiştir; bu durum, cephe senaryoları arasında karşılaştırmalı analiz yapılmasına olanak tanımıştır. İstanbul Bakırköy'de kentsel dönüşümle yenilenen vaka binası, farklı cephe konfigürasyonlarına göre modellenmiş; gömülü enerji, relatif gömülü enerji, işletme enerjisi, relatif işletme enerjisi, yaşam döngüsü enerjisi, relatif yaşam döngüsü enerjisi, gömülü karbon, relatif gömülü karbon, işletme karbonu, relatif işletme karbonu, yaşam döngüsü karbon salınımı ve relatif yaşam döngüsü karbon salınımı değerleri hesaplanmış ve değerlendirilmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

İstanbul Bakırköy'de kentsel dönüşümle yenilenen vaka binası, farklı cephe konfigürasyonlarına göre modellenmiş ve gömülü enerji, işletme enerjisi, toplam yaşam döngüsü enerjisi ile gömülü karbon, işletme karbonu ile yaşam döngüsü karbon salınımı değerleri belirlenmiş ve değerlendirilmiştir. Karşılaştırmayı kolaylaştırmak amacıyla, her bir göstergenin relatif değerleri de sunulmuştur. Relatif değerler, ilgili göstergenin minimum değeri 100 olarak alınarak, her alternatifin değeri minimum değere bölünüp 100 ile çarpılarak hesaplanmıştır.

3.1 Konfigürasyonların Enerji Performansı

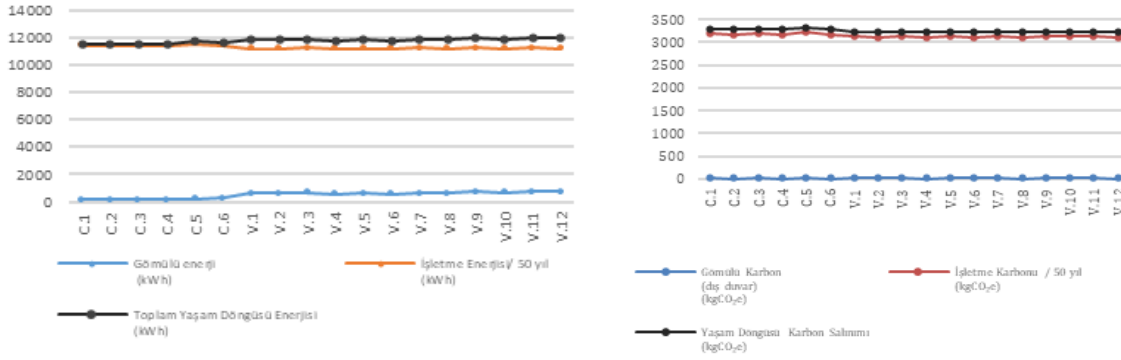
Relatif gömülü enerji değerleri, cephe tipolojileri arasında belirgin bir ayrışma olduğunu ortaya koymaktadır (**Çizelge 3**). Havalandırmasız duvar sistemleri (C.1–C.6), havalandırmalı cephelere kıyasla önemli ölçüde daha düşük relatif gömülü enerji değerleri sergilemekte olup, bu grubun alternatifleri %100–%192 aralığında yer almaktadır. En düşük gömülü enerji değeri %100 relatif değer ile C.3 alternatifinde gözlemlenirken, C.1 (%106), C.4 (%107) ve C.2 (%114) alternatifleri benzer düzeylerde performans göstermektedir. Buna karşılık, havalandırmasız duvarlar arasında en yüksek gömülü enerji değeri %192 ile C.6 alternatifinde, ardından %158 ile C.5 alternatifinde ortaya çıkmıştır. Bu sonuçlar, özellikle artan malzeme yoğunluğu ve kalınlığının gömülü enerji performansını olumsuz etkilediğini göstermektedir.

Çizelge 3. Cephe konfigrasyonlarının gömülü, işletme ve yaşam döngüsü enerjisi analizi

	Cephe	Gömülü Enerji (kWh)	Relatif Gömülü Enerjisi (%)	İşletme Enerjisi (kWh)	Relatif İşletme Enerjisi (%)	Yaşam Döngüsü Enerjisi (kWh)	Relatif Yaşam Döngüsü Enerjisi
Havalandırmasız	C1	136 567	106	11 451 111	102.1	11 587 678	100.3
	C2	147 127	114	11 419 027	101.8	11 566 154	100.1
	C3	129 043	100	11 451 111	102.1	11 580 154	100.2
	C4	137 596	107	11 419 027	101.8	11 556 623	100.0
	C5	203 887	158	11 551 666	103.0	11 755 553	101.7
	C6	247 447	192	11 419 027	101.8	11 666 474	101.0
Havalandırmalı	V1	640 735	497	11 236 527	100.2	11 877 262	102.8
	V2	616 993	478	11 218 888	100.0	11 835 881	102.4
	V3	649 895	504	11 267 361	100.4	11 917 256	103.1
	V4	565 091	438	11 227 916	100.1	11 793 007	102.0
	V5	631 811	490	11 236 527	100.2	11 868 338	102.7
	V6	547 007	424	11 218 888	100.0	11 765 895	101.8
	V7	640 365	496	11 267 361	100.4	11 907 726	103.0
	V8	618 022	479	11 227 916	100.1	11 845 938	102.5
	V9	706 655	548	11 243 472	100.2	11 950 127	103.4
	V10	684 313	530	11 237 638	100.2	11 921 951	103.2
	V11	750 215	581	11 267 361	100.4	12 017 576	104.0
	V12	727 873	564	11 227 916	100.1	11 955 789	103.5

Havalandırmalı cephe sistemleri (V.1–V.12) ise gömülü enerji açısından belirgin biçimde daha yüksek relatif değerlere sahiptir ve %424–%581 aralığında yoğunlaşmaktadır. Bu grupta en düşük relatif gömülü enerji değeri %424 ile V.6 alternatifinde, ardından %438 ile V.4 alternatifinde gözlemlenmiştir. Buna karşılık, en yüksek gömülü enerji değeri %581 ile V.11 alternatifinde, onu %564 ile V.12 ve %548 ile V.9 alternatifleri takip etmektedir. Bu durum, havalandırmalı cephelerde kullanılan ikincil kaplama katmanları ve taşıyıcı alt sistemlerin, başlangıçtaki gömülü enerji yükünü önemli ölçüde artırdığını açıkça ortaya koymaktadır.

İşletme enerjisi açısından değerlendirildiğinde, alternatifler arasındaki relatif farkların sınırlı olduğu, ancak tipolojiler arasında tutarlı bir eğilim bulunduğu görülmektedir (**Şekil 2**). Havalandırmasız duvar sistemleri %101,8–%103,0 aralığında relatif işletme enerji değerleri sergilerken, havalandırmalı cepheler %100,0–%100,4 aralığında daha düşük relatif işletme enerjisi değerlerine sahiptir. En düşük relatif işletme enerji değeri %100,0 ile V.2 ve V.6 alternatiflerinde gözlemlenirken, en yüksek değer %103,0 ile C.5 alternatifinde ortaya çıkmıştır. Bu sonuçlar, havalandırmalı cephe sistemlerinin, havalandırmasız duvarlara kıyasla daha düşük işletme enerjisi gereksinimi ile daha avantajlı bir kullanım performansı sunduğunu göstermektedir. Yaşam döngüsü enerjisi (YDE) sonuçları, işletme enerjisinin toplam enerji performansı üzerindeki belirleyici rolünü doğrulamaktadır. Havalandırmasız duvar sistemleri %100,0–%101,7 aralığında relatif YDE değerleri sergilerken, havalandırmalı cephe sistemleri %101,8–%104,0 aralığında daha yüksek relatif yaşam döngüsü enerjisi değerlerine sahiptir. En düşük relatif yaşam döngüsü enerjisi değeri %100,0 ile C.4 alternatifinde gözlemlenirken, onu %100,1 ile C.2 ve %100,2 ile C.3 alternatifleri takip etmektedir. Buna karşılık, en yüksek relatif yaşam döngüsü enerjisi değeri %104,0 ile V.11 alternatifinde ortaya çıkmıştır.



Şekil 2. Toplam yaşam döngüsü enerjisinde gömülü ve işletme enerjisi bileşenlerinin dağılımı (sol) ve toplam yaşam döngüsü karbon salınının GK ve İK bileşenlerine göre dağılımı (sağ).

Bu bulgular, başlangıçtaki gömülü enerji yükü ile işletme enerjisi performansı arasındaki açık karşılımları (trade-offs) ortaya koymaktadır. Örneğin, gömülü enerji açısından en iyi performansı gösteren C.3 alternatifi (%100), işletme enerjisi açısından daha yüksek relatif değerlere (%102,1) sahipken; gömülü enerji değeri yaklaşık dört kat daha yüksek olan V.6 alternatifi (%424), işletme enerjisinde en düşük relatif değeri (%100,0) sergilemektedir. Ancak yaşam döngüsü enerjisi açısından değerlendirildiğinde, havalandırmalı cephelerin yüksek gömülü enerji yükü nedeniyle toplam yaşam döngüsü performansında havalandırmasız duvar sistemlerine kıyasla daha dezavantajlı bir konumda olduğu görülmektedir.

3.2 Konfigürasyonların Karbon Performansı ve Toplam Yaşam Döngüsü Etkileri

Relatif gömülü karbon değerleri incelendiğinde, tüm alternatiflerin %100,0–%101,3 aralığında konumlandığı ve tipolojiler arasında son derece sınırlı bir farklılaşma bulunduğu görülmektedir (**Çizelge 4**). Bu durum, cephe konfigürasyonlarının gömülü karbon performansı açısından düşük duyarlılığa sahip olduğunu göstermektedir. Havalandırmasız sistemlerde en yüksek relatif gömülü karbon değeri %101,3 ile C.5 alternatifinde gözlemlenirken, C.2, C.4 ve C.6 alternatifleri %100,0 relatif değer ile en düşük düzeyde yer almaktadır. Havalandırmalı sistemlerde ise değerler %100,0–%100,7 aralığında değişmekte olup, V.1 ve V.5 alternatifleri %100,7 ile bu grup içerisindeki en yüksek gömülü karbon değerine sahiptir. Bununla birlikte, gruplar arası farkların %1–%1,3 düzeyinde kalması, gömülü karbonun cephe tipolojisine bağlı olarak belirgin biçimde değişmediğini ortaya koymaktadır.

Çizelge 4. Cephe konfigürasyonlarının karbon performansı

	Cephe	Gömülü Karbon (kgCO2e)	Relatif Gömülü Karbonu	İşletme Karbonu (kgCO2e)	Relatif İşletme Karbonu	Yaşam Döngüsü Karbon Salınımı (kgCO2e)	Relatif Yaşam Döngüsü Karbon Salınımı
Havalandırmasız	C1	36 542	100.2	3 188 394	102.3	3 295 511	102.2
	C2	36 480	100.0	3 178 862	102.0	3 284 141	101.9
	C3	36 542	100.2	3 188 394	102.3	3 293 833	102.2
	C4	36 480	100.0	3 178 862	102.0	3 284 141	101.9
	C5	36 955	101.3	3 218 688	103.3	3 326 564	103.2
	C6	36 480	100.0	3 178 862	102.0	3 285 829	101.9

Çizelge 4 (Devam). Cephe konfigrasyonlarının karbon performansı

Havalandırma	V1	36 743	100.7	3 121 626	100.1	3 228 228	100.1
	V2	36 533	100.1	3 117 352	100.0	3 223 876	100.0
	V3	36 576	100.3	3 131 004	100.4	3 237 551	100.4
	V4	36 480	100.0	3 120 251	100.1	3 226 716	100.1
	V5	36 743	100.7	3 121 626	100.1	3 228 228	100.1
	V6	36 533	100.1	3 117 352	100.0	3 223 876	100.0
	V7	36 576	100.3	3 131 004	100.4	3 237 551	100.4
	V8	36 480	100.0	3 120 251	100.1	3 226 716	100.1
	V9	36 588	100.3	3 123 790	100.2	3 230 299	100.2
	V10	36 652	100.5	3 122 306	100.2	3 228 965	100.2
	V11	36 576	100.3	3 131 004	100.4	3 237 551	100.4
	V12	36 480	100.0	3 120 251	100.1	3 226 716	100.1

Buna karşılık, işletme karbonu (İK) sonuçları daha belirgin bir ayrışmaya işaret etmektedir. Havalandırmasız cephe sistemlerinde relatif işletme karbonu değerleri %102,0–%103,3 aralığında değişirken, havalandırma sistemlerinde bu aralık %100,0–%100,4 düzeyindedir. En yüksek relatif işletme karbonu değeri %103,3 ile C.5 alternatifinde gözlemlenmiştir. Buna karşın en düşük değer %100,0 ile V.2 ve V.6 alternatiflerinde elde edilmiştir. Bu bulgu, havalandırma cephelerin kullanım aşamasında karbon salınımını azaltma potansiyelinin daha yüksek olduğunu göstermektedir. Yaşam döngüsü karbon salınımı sonuçları, toplam çevresel etkinin büyük ölçüde işletme aşaması tarafından belirlendiğini doğrulamaktadır. Havalandırmasız cepheler %101,9–%103,2 aralığında relatif yaşam döngüsü karbon değerlerine sahipken, havalandırma sistemler %100,0–%100,4 aralığında daha düşük değerler sergilemektedir. En olumsuz toplam karbon performansı %103,2 ile C.5 alternatifinde ortaya çıkarken, en düşük relatif yaşam döngüsü karbon değeri %100,0 ile V.2 ve V.6 alternatiflerinde gözlemlenmiştir.

Bu sonuçlar, gömülü karbon değerleri arasındaki sınırlı farklara karşın, yaşam döngüsü boyunca işletme karbonunun belirleyici rol oynadığını açık biçimde ortaya koymaktadır. Havalandırma cephe sistemleri, başlangıçta benzer düzeyde gömülü karbon yüküne sahip olmalarına rağmen, işletme aşamasındaki daha düşük karbon salınımları sayesinde toplam yaşam döngüsü performansında daha avantajlı bir konuma ulaşmaktadır. Dolayısıyla, cephe tasarımında çevresel değerlendirmelerin yalnızca başlangıç aşamasındaki malzeme temelli emisyonlara değil, kullanım sürecindeki performansa da bütüncül olarak odaklanması gerekmektedir.

3.3 Genel Değerlendirme

Cephe alternatiflerinin yaşam döngüsü enerji ve karbon performansları birlikte değerlendirildiğinde, havalandırmasız ve havalandırma sistemler arasında belirgin bir performans farklılaşması olduğu görülmektedir. Havalandırmasız cepheler, gömülü enerji ve gömülü karbon açısından daha düşük relatif değerlere (%100–%192 ve %100,0–%101,3) sahip olarak başlangıç aşamasında daha düşük çevresel yük oluşturmaktadır. Buna karşılık, bu sistemlerin relatif işletme enerjisi (%101,8–%103,0) ve işletme karbonu (%102,0–%103,3) değerlerinin daha yüksek olması, kullanım aşamasında daha olumsuz bir performansa işaret etmektedir. Havalandırma cepheler ise daha yüksek gömülü enerji değerlerine (%424–%581) sahip olmalarına rağmen, daha düşük relatif işletme enerjisi (%100,0–%100,4) ve işletme karbonu (%100,0–%100,4) değerleri ile kullanım aşamasında daha avantajlı bir performans sergilemektedir. Bu durum, havalandırma sistemlerinin geliştirilmiş ısı performans sayesinde işletme aşamasındaki çevresel etkileri azaltabildiğini

göstermektedir. Alternatifler arasında C.3, en düşük gömülü enerji değerine (%100) sahip olmasına rağmen, toplam yaşam döngüsü performansı açısından en avantajlı çözüm değildir. Buna karşılık, V.2 ve V.6 alternatifleri, en düşük işletme enerjisi, işletme karbonu ve yaşam döngüsü karbon salınımı değerleri (%100,0) ile en dengeli çevresel performansı sunmaktadır. Genel olarak, sonuçlar cephe sistemlerinin çevresel performansının yalnızca gömülü etkilerle değil, işletme aşamasındaki performansla birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ve havalandırmalı cephelerin yaşam döngüsü karbon performansı açısından daha avantajlı çözümler sunduğunu ortaya koymaktadır.

4. SONUÇ

Bu çalışma, alternatif dış duvar cephe sistemlerinin yaşam döngüsü enerjisi ve yaşam döngüsü karbon salınımını, bina kullanım ömrü boyunca karşılaştırarak değerlendirmiştir. Elde edilen bulgular, tüm cephe alternatifleri için yaşam döngüsü etkilerinde işletme enerjisinin baskın olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, cephe tipolojisinin gömülü ve işletme enerjisi arasındaki denge üzerinde belirleyici bir etkisi bulunmaktadır. Havalandırmasız duvar sistemleri gömülü enerjiyi en aza indirirken, havalandırmalı cepheler başlangıçta malzemeye bağlı enerji gereksinimini önemli ölçüde artırmakta; ancak buna karşın işletme enerjisini ve toplam yaşam döngüsü karbon salınımını tutarlı biçimde azaltmaktadır. Gelecek araştırmaların, Türkiye bağlamında yaşam döngüsü değerlendirmelerinin doğruluğunu ve bağlamsal geçerliliğini artırmaya odaklanması gerekmektedir. Bu kapsamda, ulusal ve yerel düzeyde gömülü enerji ve karbon veritabanlarının geliştirilmesi, ölçülmüş veya kalibre edilmiş veriler kullanılarak işletme enerjisi değerlerinin iyileştirilmesi ve farklı bina katmanları için değişken hizmet ömürlerinin katmanlı bir yaşam döngüsü yaklaşımıyla dikkate alınması önerilmektedir. Ayrıca, değerlendirmenin cephe sistemlerinden tüm bina ölçeğine genişletilmesi ve gerçek yapım ve kullanım koşullarını daha iyi yansıtan verilerin kullanılması, daha güvenilir sonuçlara ulaşılmasına katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

1. World Green Building Council. (2019). *Bringing embodied carbon upfront: Coordinated action for the building and construction sector to tackle embodied carbon* (M. Adams, C. Collin, V. Burrows, & S. Richardson, Authors). World Green Building Council. <https://worldgbc.org/article/bringing-embodied-carbon-upfront/>.
2. Republic of Türkiye Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change. (2023). *Türkiye building sector decarbonization roadmap: Extended summary*. <https://wrisehirler.org/sites/default/files/Turkiye%20Building%20Sector%20Decarbonization%20Roadmap...pdf>
3. Atmaca, A., & Atmaca, N. (2022). Carbon footprint assessment of residential buildings, a review and a case study in Turkey. *Journal of Cleaner Production*, 340, 130691
4. Ramesh, T., Prakash, R., & Shukla, K. K. (2010). Life cycle energy analysis of buildings: An overview. *Energy and buildings*, 42(10), 1592-1600

5. Venkatraj, V., Dixit, M. K., Yan, W., & Lavy, S. (2020). Evaluating the impact of operating energy reduction measures on embodied energy. *Energy & Buildings*, 226, 110340
6. Azari, R. (2019). *Life cycle energy consumption of buildings: Embodied + operational*. In W. Y. Tam & N. L. Le (Eds.), *Sustainable Construction Technologies: Life-Cycle Assessment* (pp. 123–144). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811749-1.00004-3>
7. Jafari, M., Khoshand, A., Sadeghi, N., & Mirzanagh, P. A. (2024). A comparative LCA of external wall assemblies in context of Iranian market: considering embodied and operational energy through BIM application. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(5), 7364-7379.
8. Lechner, N. (2014). *Heating, cooling, lighting: Sustainable design methods for architects*. John Wiley & sons.
9. Li, X., & Densley Tingley, D. (2023). A whole life, national approach to optimize the thickness of wall insulation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 174, 113137. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113137>
10. Priore, Y. D., Jusselme, T., Frossard, M., Lasvaux, S., Zwicky, D., & Habert, G. (2026). What really matters when benchmarking carbon mitigation measures against carbon budget-aligned targets for buildings? *Energy & Buildings*, 350, 116664. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116664>
11. Almeida, M., Ascione, F., Iovane, T., Mastellone, M., & Mateus, R. (2024). Impact of life cycle assessment analysis on energy efficiency projects in Mediterranean residential buildings. *Energy*, 295, 130994.
12. Bertini, A., Al-Obaidy, M., Dasse, M., Amaripadath, D., Gobbo, E., & Attia, S. (2025). Parametrization of variables affecting the whole life carbon performance of nearly zero energy residential building renovation. *Building and Environment*, 278, 113013
13. Mohamed, N. A., El-Dash, K. M., Attia, T. M., & Abdel-Monem, M. (2024). Analysis of alternative building envelope solutions to improve energy efficiency. *Innovative Infrastructure Solutions*, 9(3), 251. <https://doi.org/10.1007/s41062-024-01550-1>
14. Garg, R. B., & Singh, G. (2025). Decarbonizing residential buildings through envelope optimization. *AIP Advances*, 15(8), 085209. <https://doi.org/10.1063/5.0283968>
15. Hamida, A., Alsudairi, A., Alshaibani, K., & Alshamrani, O. (2022). Parametric study of the impact of building envelope systems on embodied and operational carbon of residential buildings. *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, 40(5), 753-774.
16. Mowafy, N., El Zayat, M., & Marzouk, M. (2023). Parametric BIM-based life cycle assessment framework for optimal sustainable design. *Journal of Building Engineering*, 75, 106898.
17. Kayaçetin, N. C., & Hozatlı, B. (2024). Whole life carbon assessment of representative building typologies for nearly zero energy building definitions. *Journal of Building Engineering*, 95, 110214. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110214>
18. Mangan, S. D., & Oral, G. K. (2016). Assessment of residential building performances for the different climate zones of Turkey in terms of life cycle energy and cost efficiency. *Energy and Buildings*, 110, 362-376

19. Keles, C., & Yazicioglu, F. (2023). Analyzing the environmental sustainability of primary schools' facades within the scope of life cycle assessment in Turkey and recommendations for improvement. *Smart and Sustainable Built Environment*, 12(2), 298-324
20. Atmaca, A., & Atmaca, N. (2015). Life cycle energy (LCEA) and carbon dioxide emissions (LCCO2A) assessment of two residential buildings in Gaziantep, Turkey. *Energy and Buildings*, 102, 417-431.
21. International Organization for Standardization. (2006). *ISO 14040:2006 – Environmental management: Life cycle assessment – Principles and framework* (ISO Standard No. 37456). ISO. <https://www.iso.org/standard/37456.html>
22. Omrany, H., Soebarto, V., Sharifi, E., & Soltani, A. (2020). Application of life cycle energy assessment in residential buildings: A critical review of recent trends. *Sustainability*, 12(1), 351.
23. Sacks, R., Eastman, C., Lee, G., & Teicholz, P. (2018). *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, designers, engineers, contractors, and facility managers*. John Wiley & Sons.
24. Nizam, R. S., Zhang, C., & Tian, L. (2018). A BIM based tool for assessing embodied energy for buildings. *Energy and Buildings*, 170, 1-14.
25. Lu, Y., Wu, Z., Chang, R., & Li, Y. (2017). Building Information Modeling (BIM) for green buildings: A critical review and future directions. *Automation in construction*, 83, 134-148.
26. Hammond, G. P., & Jones, C. I. (2011). *Inventory of Carbon & Energy (ICE) Version 2.0*. University of Bath.
27. Chen, Z., Hammad, A. W. A., Kamardeen, I., & Akbarnezhad, A. (2020). Optimising Embodied Energy and Thermal Performance of Thermal Insulation in Building Envelopes via an Automated Building Information Modelling (BIM) Tool. *Buildings*, 10(218).

AVLU PLAN ŞEMASINA SAHİP BİNALARDA AKUSTİK PERFORMANSIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE İŞİTSEL ORTAMIN ÇÖZÜMLENMESİ

Muammer Yaman^{1*}

Hilal Parlak Arslan²

^{1,2} Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Samsun, Türkiye, 55100

ÖZET

Avlu, tarih boyunca farklı kültürlerde sosyal, iklimsel ve mekânsal bir düzenleyici unsur olarak mimari tasarımlarda önemli bir rol üstlenmiştir. Günümüzde ise avlu, enerji etkin bina tasarımı kapsamında mikroiklim oluşturma, doğal havalandırma, gün ışığı kontrolü ve ısı konforu yanı sıra akustik performans açısından da bütüncül bir yaklaşımla ele alınmaktadır. Bu çalışma, avlu mimarisinin akustik potansiyelini ve iç mekân akustik konforu üzerindeki etkilerini simülasyon tabanlı bir yöntemle incelemektedir. Araştırmada, tasarım aşamasında bulunan avluya sahip bir konut binası örnek olarak seçilmiş; örneklem üzerinde akustik incelemeler yürütülmüştür. Çalışmanın metodolojisi, avlunun akustik davranışını belirlemek amacıyla geometrik tabanlı akustik simülasyon yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen detaylı analizlere dayanmaktadır. Farklı senaryolar aracılığıyla avlu içi akustik konforun yapısal ve konfigürasyonel parametrelere olan hassasiyeti değerlendirilmiştir. İncelenen temel değişkenler arasında duvar, cephe ve avlu döşemesi veya örtüsünde kullanılan malzemeler, cephe açıklık oranları yer almaktadır. Elde edilen bulgular, erken sönümleme süresi (EDT), reverberasyon süresi, ses basınç düzeyi dağılımı ve konuşma iletim indeksi (STI) gibi objektif akustik ölçütler üzerinden analiz edilmiştir. Sonuçlar, avlu geometrisi ve yapısal elemanların iç ortam akustik konfor üzerindeki belirleyici etkilerini ortaya koymakta ve avlu tasarımının enerji etkinliğinin yanı sıra akustik performans açısından bir konut projesi özelinde optimize edilebileceğine dair çıkarımlar sunmaktadır.

Anahtar kelimeler: Avlu, Avlu plan tipleri, Akustik performans, İşitsel ortam, Ses yayılımı.

EVALUATION OF ACOUSTIC PERFORMANCE IN BUILDINGS WITH COURTYARD PLAN TYPES AND ANALYSIS OF THE AUDITORY ENVIRONMENT

ABSTRACT

Courtyards have played an important role in architectural design throughout history as a social, climatic, and spatial regulatory element in different cultures. Today, courtyards are approached holistically in energy-efficient building design in terms of creating microclimates, natural ventilation, daylight control, thermal comfort, and acoustic performance. This study examines the acoustic potential of courtyard architecture and its effects on indoor acoustic comfort using a simulation-based method. A residential building with a courtyard in the design phase was selected as a case study, and acoustic investigations were conducted on the case study. The methodology of the study is based on detailed analyses performed using geometric-based acoustic simulation software to determine the acoustic behavior of the courtyard. The sensitivity of the acoustic comfort inside the courtyard to structural and configurational parameters was evaluated through different scenarios. The main variables examined include the materials used for the walls, facades, and courtyard flooring or covering, the facade opening ratios. The findings were analyzed using objective acoustic criteria such as early decay time (EDT), reverberation time, sound pressure level distribution, and speech transmission index (STI). The results reveal the decisive effects of courtyard geometry and structural elements on indoor acoustic comfort and provide insights into how courtyard design can be optimized in terms of acoustic performance, in addition to energy efficiency, for a specific residential project.

Keywords: Courtyard, Courtyard plan types, Acoustic performance, Acoustic environment, Sound propagation.

^{1*} muammer.yaman@omu.edu.tr. (Sorumlu yazar)

² hilal.parlak@omu.edu.tr

1. GİRİŞ

Mimari tasarımda mekânın niteliği, yalnızca fiziksel sınırları ve işlevsel organizasyonu ile değil, kullanıcıların mekânı algılama biçimini belirleyen çevresel konfor bileşenleriyle de tanımlanmaktadır. Isıl, görsel ve işitsel konfor koşulları, yapı performansının değerlendirilmesinde birbirini tamamlayan temel fiziksel çevre parametreleri olarak değerlendirilmektedir. Bu bağlamda avlu, tarih boyunca farklı kültürlerde sosyal yaşamı destekleyen, iklimsel koşullara uyum sağlayan ve mekânsal organizasyonu düzenleyen temel bir mimari unsur olarak öne çıkmıştır. Geleneksel mimaride avlu, iç mekânlar arasında bir geçiş ve toplanma alanı olmasının yanı sıra, doğal havalandırma, gün ışığı kontrolü ve mikroiklim oluşturma gibi çevresel işlevleriyle bütüncül bir tasarım bileşeni olarak değerlendirilmiştir [1-3].

Avlu kavramının tarihsel gelişimi, Antik Mezopotamya ve Akdeniz uygarlıklarından başlayarak İslam mimarisine kadar uzanmaktadır. Roma döneminde atriumlu konutlar, Orta Doğu ve Anadolu coğrafyasında iç avlulu konut ve eğitim yapıları, avlunun hem sosyal hem de iklimsel bir düzenleyici olarak kullanıldığını göstermektedir. Bu yapılarda avlu, içe dönük plan organizasyonunun merkezinde yer alarak mahremiyet, güvenlik ve çevresel konfor gereksinimlerini karşılamıştır. Tarihsel süreçte avlu, yalnızca bir açık alan değil; mekânsal hiyerarşiyi tanımlayan ve çevresel koşulları yönlendiren aktif bir mimari eleman olarak biçimlenmiştir [4-5]. Avlu plan şemaları, avlunun yapı içindeki konumuna ve çevresindeki mekânlarla kurduğu ilişkiye bağlı olarak farklılaşmaktadır. Merkezi avlulu plan şemalarında avlu, yapının çekirdeğini oluştururken; yan avlulu ve çoklu avlulu planlarda mekânsal organizasyonu destekleyen ikincil bir unsur olarak konumlanmaktadır. Avlu tipleri; tamamen çevrili iç avlular, yarı açık avlular ve geçiş avlular gibi farklı biçimlerde sınıflandırılmakta; bu tipler yapı ölçeği, işlev ve çevresel bağlama göre değişken mekânsal ve çevresel sonuçlar üretmektedir. Avlunun geometrisi, oranları ve açıklık düzeni, mekânsal algının yanı sıra çevresel, ısı, havalandırma, yoğunlaşma ve akustik performansı da doğrudan etkilemektedir [6-8]. Avlu tiplerinin mekânsal gereksinimleri; dolaşım/sirkülasyon, görüş ilişkileri, kullanım yoğunluğu ve kullanıcı davranışlarıyla doğrudan ilişkilidir. Avlu boyutları, yüksekliği ve çevreleyen hacimlerle olan ilişkisi, mekânsal bütünlüğü ve iç mekân konforunu belirlemektedir. Avluya açılan cephelerin oranı ve açıklıkların konumu, iç mekânlara iletilen ışık, hava ve ses miktarını doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle avlu, tasarım sürecinde yalnızca boşluk olarak değil, çok boyutlu performans kriterleriyle ele alınması gereken aktif bir tasarım bileşeni olarak değerlendirilmelidir.

Günümüz mimarlık pratiğinde avlu, farklı iklim bölgelerinde enerji etkin bina tasarımı ve sürdürülebilirlik yaklaşımları kapsamında yeniden ele alınmaktadır. Avlular, pasif tasarım stratejileri aracılığıyla doğal havalandırmayı desteklemekte, gün ışığının kontrollü biçimde iç mekânlara ulaşmasını sağlamakta ve mikroiklim oluşturarak ısı konforu iyileştirmektedir. Yapılan çalışmalar, avlu geometrisi ve cephe açıklıklarının enerji tüketimi üzerinde belirleyici etkileri olduğunu ortaya koymaktadır [9-11]. Bununla birlikte, bu çevresel kazanımların akustik performansla birlikte ele alınmaması durumunda, iç mekân konforu açısından olumsuz sonuçlar ortaya çıkabilmektedir. Avlu planlı yapıların avantajları arasında sosyal etkileşimi artırması, doğal ışık ve havalandırma sağlama ve mekânsal hiyerarşi oluşturma yer alırken; dezavantajları arasında yansıtıcı yüzeylerin kontrolsüz kullanımı, uygun olmayan oranlar ve açıklık düzenleri nedeniyle ortaya çıkan gürültü birikimi ve yankı-eko problemleri görülebilmektedir [12-13]. Bu durum, avlu tasarımının yalnızca enerji ve mekânsal konfor açısından değil, aynı zamanda akustik performans açısından da değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır.

Avlularda akustik araştırmalar, hem çevresel akustik hem de hacim akustiği bağlamında ele alınmaktadır [14-15]. Avlu duvarlarının/cephelerinin yansıtma özellikleri, zemin ve duvar kaplama malzemeleri ve açıklık oranları; ses basınç düzeyi dağılımı, yankılanma karakteri ve konuşma anlaşılabilirliği üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Erken dönem çalışmalar, avlu geometrisinin ses alanı üzerindeki etkisini deneysel ve analitik yöntemlerle ortaya koymuştur. Daha güncel araştırmalar ise simülasyon tabanlı yaklaşımlar aracılığıyla avlu içi akustik konforun işlev gereklerine uygun olarak tasarım aşamasında öngörülebileceğini ve optimize edilebileceğini göstermektedir [16-17].

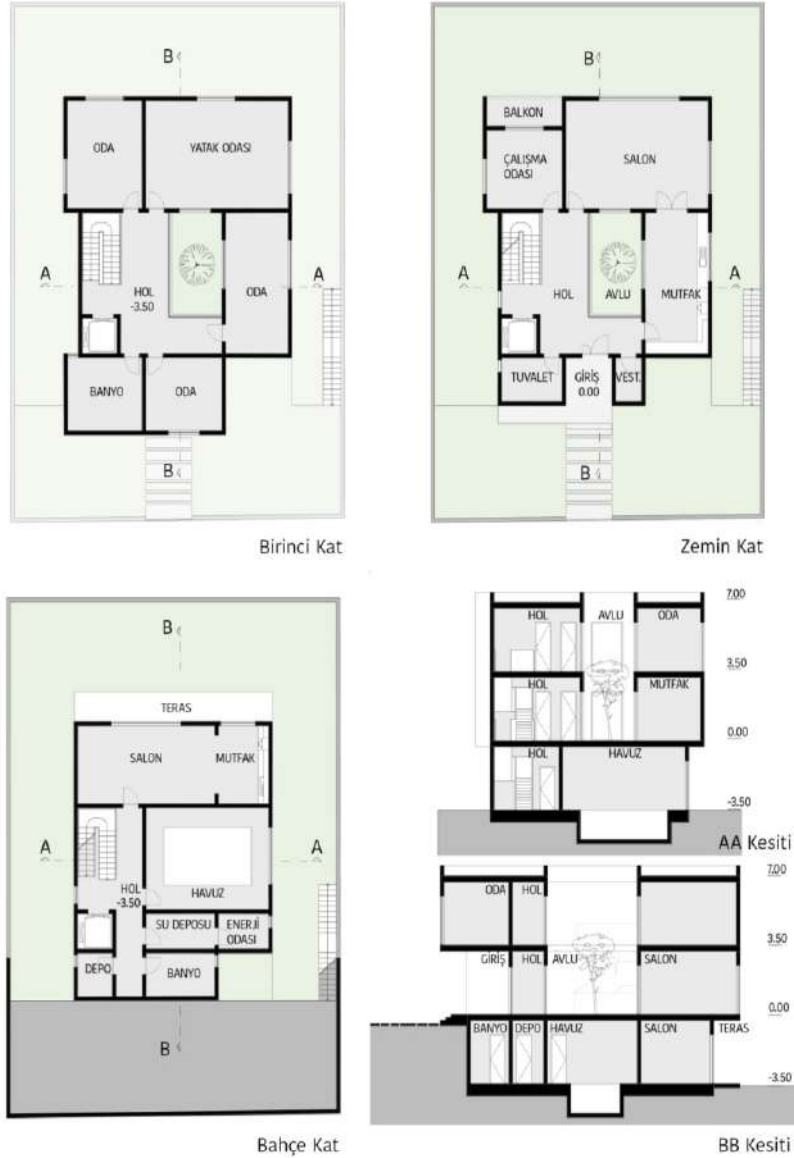
Bu alışma, avlu plan şemasına sahip bir konut yapısı özelinde, avlu mimarisinin akustik potansiyelini simülasyon tabanlı bir yaklaşımla incelemeyi amaçlamaktadır. Araştırma, avlu ve bileşenlerinin oluşturduğu akustik ortama odaklanmaktadır; çevresel akustik kapsamında değerlendirmeler araştırmanın kapsamı dışındadır. Geometrik tabanlı akustik simülasyonlar aracılığıyla, avlu içi akustik konforun yapısal ve konfigürasyonel parametrelere olan hassasiyeti değerlendirilmekte; elde edilen bulgular erken sönümlenme süresi (EDT), reverberasyon süresi, ses basınç düzeyi dağılımı ve konuşma iletim indeksi (STI) gibi objektif akustik ölçütler üzerinden analiz edilmektedir. Böylece avlu tasarımının enerji etkinliğinin yanı sıra akustik performans açısından da nasıl optimize edilebileceğine ilişkin bilimsel temelli çıkarımlar sunulmaktadır.

2. ÇALIşMANIN YÖNTEMİ

Bu alışma, avlu plan şemasına sahip konut yapılarında akustik performansın değerlendirilmesi ve avlunun i mekân işitsel ortam üzerindeki etkilerinin ortaya konulması amacıyla, alan çalışması ve akustik simülasyonlar olmak üzere iki ana yöntem üzerine kurgulanmıştır. Yöntemsel yaklaşım, nicel verilere dayalı objektif akustik parametrelerin analiz edilmesini ve tasarım kararlarının akustik konfor üzerindeki etkilerinin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesini hedeflemektedir.

3.1. Alan alışması

Araştırma kapsamında, tasarım aşamasında bulunan ve merkezi avlu plan şemasına sahip bir konut yapısı örneklem olarak seçilmiştir. Yapı, avlunun çevresinde konumlanan yaşam birimleri, farklı cephe açıklık oranları ve değişken yüksekliklere sahip duvar yüzeyleri ile akustik açıdan incelenmeye elverişli bir konut tipolojisi sunmaktadır. Alan alışması sürecinde, yapının mimari projeleri (plan, kesit ve görünüşler) detaylı olarak incelenmiş; avlu geometrisi, hacimsel oranlar, yüzey alanları ve yapı elemanlarının mekânsal ilişkileri belirlenmiştir. Alan alışması olarak kullanılan konut projesi bahçe katı, zemin kat ve birinci kat planlarından oluşmaktadır. Bahçe kat planında teknik hacimler, havuz ve ortak kullanım mekânları (mutfak ve salon) yer almaktadır. Zemin kat planında giriş, ortak kullanım mekânları (mutfak ve salon) ve çalışma odası yer almaktadır. Birinci kat planında ise yatak odaları ve teras bulunmaktadır. Avlu (3 m * 5.2 m) zemin katta yer almaktadır ve iki kat yüksekliğinde (zemin ve birinci kat) devam etmektedir (**şekil 1**). Projenin tasarımında topoğrafya verileri ve bahçe kullanım kararları etkili olmuştur.



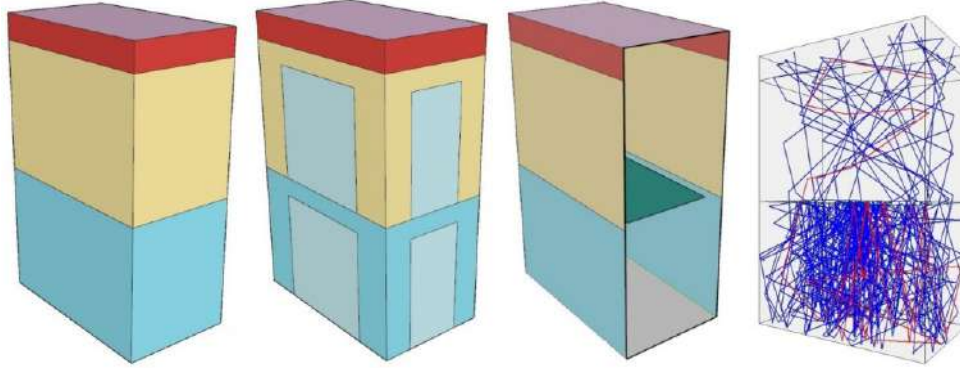
Şekil 1: Alan çalışmasına yönelik incelenen konut projesinin kat planları ve kesitleri

Araştırmada, avlunun duvar, zemin ve örtü elemanlarında kullanılan malzemeler, fiziksel özelliklerine (yüzey dokusu, sertlik, yansıtıcılık) ve ses yutuculuk özelliklerine göre simülasyon programında yer alan malzemeler ile eşleştirilmiştir. Ayrıca avluya açılan cephelerdeki açıklık oranları, şeffaflık konumları ile mekânsal süreklilik ilişkileri değerlendirilmiş; avlunun kullanımı ve akustik ilişkileri, tasarım geliştirme süreçlerinde tartışılmıştır. Alan çalışması, simülasyon aşamasında kullanılacak geometrik ve malzeme verilerinin doğrulanması ve modelin gerçeğe en yakın şekilde oluşturulması açısından temel veri kaynağını oluşturmuştur.

3.2. Akustik Simülasyonlar

Çalışmanın ikinci aşamasında, avlunun akustik davranışını analiz etmek amacıyla geometrik tabanlı akustik simülasyon yazılımı kullanılmıştır. Alan çalışması sırasında elde edilen mimari

tasarım kararları ve alternatif malzeme verileri doğrultusunda, yapı avlusu üç boyutlu olarak modellenmiştir. Alan çalışmasında kullanılan konut avlusunun üç boyutlu akustik modeli SketchUp bilgisayar programında oluşturulmuştur. Akustik modelde, karmaşık ve detaylı oda yüzeyleri, bir dizi düzlemsel çokgen yüzey bileşenine indirgenmiştir. Yüzey malzemesi tanımları (katmanlar), yüzey malzemesi özelliklerine göre akustik model içinde detaylandırılmıştır. Sesin hareket edebileceği ve yayılabileceği avludaki tüm alanlar/hacimler, avlunun bir bileşeni olarak modele (katmanlar) aktarılmıştır. Model daha sonra ODEON (v14) yazılımında akustik simülasyonlarla analiz edilmiştir (**Şekil 2**).



Şekil 2: Avluya yönelik akustik modeller A2, B2, C2 senaryoları ve C2 ışın diyagramı (Çizelge: 1)

Avlu kullanımı dikkate alınarak avlu içerisinde merkezi noktada küresel-noktasal (omni-directional) ses kaynağı (ses gücü düzeyi 75 dBA) tanımlanmıştır. Kaynak yüksekliği, insan konuşma düzeyini temsil edecek şekilde ~1.5 m olarak belirlenmiştir. Alıcı noktaları, avlu içinde ve avluya açılan mekânlarda homojen dağılım gösterecek biçimde (duvarlardan en az 1.5 m uzaklıkta 4 alıcı noktası) konumlandırılmıştır. Simülasyon modeli içerisinde avlu hacmi, çevreleyen cepheler ve avlu zemini ile gerçekleşen akustik etkileşimler bütüncül olarak ele alınmıştır. Avluya sahip yapıların akustik performansını etkileyen başlıca parametreler; yüzey malzemelerinin akustik özellikleri, cephe açıklık oranları, avlu geometrisi ve üst örtü durumu olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışma kapsamında, avlunun işitsel ortam üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak değerlendirebilmek amacıyla, bu parametreler kontrollü biçimde değiştirilerek farklı simülasyon senaryoları oluşturulmuştur. Senaryolar, tekil değişken yaklaşımı (bağımsız değişkenler) ve kombinasyonlu varyasyonlar esas alınarak kurgulanmıştır. Senaryo A grubunda avluyu çevreleyen düşey ve yatay yüzeylerin ses yutuculuk özelliklerinin iç ortam akustik parametrelerine etkisi incelenmiştir. Senaryo B grubunda avluya açılan mekânlar ile avlu arasındaki akustik etkileşimin açıklık oranları üzerinden değerlendirilmesi yapılmıştır. Senaryo C grubunda avlunun açık, yarı kapalı ve tam kapalı olma durumlarının akustik davranışı üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Akustik simülasyonlar kapsamında tüm senaryolarda avlu tavan yüzeyi, Odeon malzeme kütüphanesinde tanımlı %100 yutucu özellikteki yüzey (Odeon Kodu: 1) olarak kabul edilmiştir. A senaryolarında, yüzey yutuculuğunun etkisini ayırıştırabilmek amacıyla, A2 ve A3 senaryolarında yalnızca ilgili bileşenlerde (duvar veya zemin) kısmi yutucu malzeme tanımlaması yapılmış; diğer tüm bileşenler, tamamen sert ve yansıtıcı yüzeylerden oluşan A1 senaryosundaki malzeme özellikleriyle korunmuştur. B senaryolarında ise avlu zemin ve duvar yüzeyleri kısmi yutucu olarak tanımlanmış, cephe açıklıkları avlu çeperlerine dengeli biçimde dağıtılarak açıklık oranının akustik performans üzerindeki etkisi izole edilmeye

çalışılmıştır. C senaryolarında üst örtü elemanı, cam veya polikarbonat levha gibi yüksek yansıtıcılığa sahip malzemelerle temsil edilmiş; bu senaryolarda zemin ve duvar bileşenleri sabit tutulmak üzere kısmi yutucu özellikte tanımlanarak, üst örtü konfigürasyonunun akustik davranış üzerindeki göreceli etkisi değerlendirilmiştir (**Çizelge 1**).

Çizelge 1: Akustik simülasyonlarda kullanılacak alternatif senaryolar

Alternatif Senaryolar		Parametre	Tanım	Ses Yutuculuk Katsayısı (Orta Frekanslar)				Odeon Kodu
				500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	
A	A1	Duvar Zemin	Sert ve yansıtıcı yüzeyler	0.03 0.02	0.03 0.02	0.04 0.02	0,07 0.02	4002 100
	A2	Duvar	Kısmi yutucu yüzeyler (%50)	0.40	0.60	0.50	0.60	106
	A3	Zemin	Kısmi yutucu yüzeyler (%50)	0.40	0.60	0.50	0.60	106
	A4	Duvar - Zemin	Yüksek yutucu yüzeyler	0.77	0.74	0.65	0.81	5100
B	B1	Cephe Açıklık Oranı - Diğer	Düşük (%20-30)	0.02 0.40	0.02 0.60	0.02 0.50	0.02 0.60	10000 106
	B2	Cephe Açıklık Oranı - Diğer	Orta (50)	0.02 0.40	0.02 0.60	0.02 0.50	0.02 0.60	10000 106
	B3	Cephe Açıklık Oranı - Diğer	Yüksek (%70-80)	0.02 0.40	0.02 0.60	0.02 0.50	0.02 0.60	10000 106
C	C1	Üst Örtü Yok	Açık Avlu	0.40	0.60	0.50	0.60	106
	C2	Üst Örtü - Diğer	Yarı Kapalı Avlu (h: 3,5 m)	0.02 0.40	0.02 0.60	0.02 0.50	0.02 0.60	10000 106
	C3	Üst Örtü - Diğer	Yarı Kapalı Avlu (h: 7 m)	0.02 0.40	0.02 0.60	0.02 0.50	0.02 0.60	10000 106
	C4	Üst Örtü - Diğer	Kapalı Avlu	0.02 0.40	0.02 0.60	0.02 0.50	0.02 0.60	10000 106

3. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Çalışmada, bir konut avlusunun akustik performansı, duvar ve zemin yüzeylerinin farklı yutuculuk özelliklerine sahip olduğu (A senaryoları) dört senaryo üzerinden değerlendirme yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, yüzey malzemesi dağılımının reverberasyon süresi kontrolü ve konuşma anlaşılabilirliği üzerinde belirleyici olduğunu göstermektedir. Tamamen sert ve yansıtıcı yüzeylerden oluşan A1 senaryosunda, özellikle düşük ve orta frekans bantlarında yüksek EDT ve T30 değerleri elde edilmiştir. Bu durum, avlu içerisinde yankılanmanın baskın hale gelmesine ve konuşma anlaşılabilirliğinin sınırlandırılmasına neden olmuş, STI değerinin 0.60 seviyesinde kalmasıyla bu etki doğrulanmıştır. Duvar yüzeylerinin %50 oranında yutucu malzemelerle kaplandığı A2 senaryosunda, tüm frekans bantlarında EDT ve T30 değerlerinin belirgin biçimde azaldığı, SPL değerlerinin yaklaşık 4-5 dB düştüğü ve STI değerinin 0.92'ye yükseldiği görülmüştür. Bu sonuçlar, konut avlularında düşey yüzeylerin akustik performans üzerinde belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır. Zemin yüzeylerinin kısmi yutucu hale getirildiği A3 senaryosunda ise A1'e kıyasla sınırlı bir iyileşme sağlanmış; reverberasyon süreleri ve konuşma anlaşılabilirliği büyük ölçüde benzer kalmıştır (A1 ile karşılaştırıldığında). Bu bulgu, zeminin tek

başına yutucu olarak ele alınmasının yeterli olmadığını göstermektedir. Duvar ve zemin yüzeylerinin yüksek yutuculuğa sahip olduğu A4 senaryosu, en düşük EDT ve T30 değerleri ile en yüksek STI değerini (0.99) sunmuştur. Ancak bu durum, konut avlusunun doğal akustik karakterinin aşırı sönümlenmesi riskini de beraberinde getirmiştir (**Çizelge 2**).

Elde edilen bulgular, konut avlularında akustik konforun sağlanmasında yüzey malzemesi dağılımının temel bir tasarım girdisi olduğunu ortaya koymaktadır. Sonuçlar, reverberasyon süresi, ses basınç seviyesi ve konuşmanın anlaşılabilirliği üzerinde özellikle duvar yüzeylerinin, zemin yüzeylerine kıyasla çok daha belirleyici bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Bu bağlamda, yalnızca zemin yüzeylerinin yutucu hale getirilmesi avlu akustiğini iyileştirmek için yeterli değildir. Duvar yüzeylerinde kısmi yutucu malzeme kullanımının, yankılanmayı etkin biçimde kontrol ederken konuşma anlaşılabilirliğini artırdığı ve mekânın açık ve sosyal karakterini koruduğu görülmektedir. Buna karşılık, tüm yüzeylerin yüksek yutuculuğa sahip olduğu durumlarda teknik olarak üstün akustik performans elde edilmesine rağmen, avlunun doğal ses alanının aşırı sönümlendiği ve mekânsal canlılığın azalabileceği değerlendirilmektedir. Bu nedenle, konut avlularının akustik tasarımında, özellikle düşey yüzeylerde (cephelerde) kontrollü yutuculuk sağlayan, seçici ve dengeli yaklaşımlar sürdürülebilir ve uygulanabilir bir tasarım stratejisi olarak öne çıkmaktadır.

Çizelge 2: A senaryolarında yüzey yutuculuklarının akustik performansa etkisi

Senaryolar	Kullanılan Malzemeler	EDT (s) 500 - 4000 Hz	T30 (s) 500 - 4000 Hz	SPL (dB) 500 - 4000 Hz	STI
A1	Sert ve yansıtıcı yüzeyler	1.21 - 1.78	1.61 - 2.02	68.1 - 69.2	0.60
A2	Yutucu yüzeyler - Duvarlar	0.07 - 0.13	0.12 - 0.22	63.6 - 64.8	0.92
A3	Yutucu yüzeyler - Zemin	1.13 - 1.61	1.38 - 1.79	67.4 - 68.6	0.62
A4	Yüksek yutucu yüzeyler	0.02 - 0.05	0.06 - 0.10	61.7 - 62.5	0.99

Cephe açıklık oranının avlu akustiğine etkisini inceleyen B senaryoları, açıklık oranı arttıkça reverberasyon süresi ve ses basınç seviyelerinin belirgin biçimde yükseldiğini göstermektedir. Düşük cephe açıklık oranına sahip B1 senaryosunda, tüm frekans bantlarında en düşük EDT ve T30 değerleri elde edilmiş, buna paralel olarak SPL değerleri sınırlı kalmış ve yüksek bir konuşma anlaşılabilirliği (STI: 0.88) sağlanmıştır. Bu durum, daha kapalı cephe karakterinin ses enerjisinin avlu içerisinde kontrol altında tutulmasına katkı sağladığını ortaya koymaktadır. Orta düzeyde cephe açıklık oranına sahip B2 senaryosunda EDT, T30 ve SPL değerlerinde artış gözlenmiş, STI değeri ise 0.83 seviyesine gerilemiştir. Yüksek cephe açıklık oranını temsil eden B3 senaryosunda ise reverberasyon süreleri ve ses basınç seviyeleri en yüksek değerlere ulaşırken, STI değeri 0.78'e düşmüştür (**Çizelge 3**). Bu sonuçlar, cephe açıklıklarının artmasıyla birlikte sesin avlu içerisinde daha düzensiz yayıldığını ve konuşma anlaşılabilirliğinin olumsuz etkilendiğini göstermektedir. Genel olarak bulgular, konut avlularında cephe açıklık oranının yalnızca görsel ve işlevsel değil, aynı zamanda kritik bir akustik tasarım parametresi olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle yüksek cephe açıklık oranlarının, yeterli yutucu yüzeylerle desteklenmediği durumlarda akustik konforu olumsuz etkileyebileceği değerlendirilmekte; bu nedenle cephe geçirgenliğinin kontrollü ve dengeli biçimde ele alınması önerilmektedir.

Çizelge 3: B senaryolarında cephe açıklık oranlarının akustik performansa etkisi

Senaryolar	Cephe Açıklık Oranı	EDT (s) 500 - 4000 Hz	T30 (s) 500 - 4000 Hz	SPL (dB) 500 - 4000 Hz	STI
B1	Düşük (%20-30)	0.12 - 0.18	0.20 - 0.30	64.1 - 65.1	0.88
B2	Orta (%50)	0.19 - 0.29	0.36 - 0.49	64.9 - 65.8	0.83
B3	Yüksek (%70-80)	0.32 - 0.48	0.43 - 0.58	65.9 - 66.9	0.78

C senaryolarında elde edilen EDT, T30, SPL ve STI sonuçları, farklı üst örtü konfigürasyonları arasında görece sınırlı farklılıklar bulunduğunu göstermektedir. Açık, yarı kapalı ve kapalı avlu durumları arasında reverberasyon süreleri ve ses basınç seviyelerinde yalnızca küçük değişimler gözlenmiş, konuşmanın anlaşılabilirliği değerleri ise tüm senaryolarda yüksek seviyelerde kalmıştır (**Çizelge 4**). Bu durum, incelenen avlu geometrisi ve yüzey özellikleri bağlamında, üst örtü kullanımının akustik performans üzerinde ikincil bir etkiye sahip olduğunu düşündürmektedir. Buna karşın, üst örtünün tamamen kapalı hale geldiği durumda reverberasyon sürelerinde sınırlı bir artış ve STI değerlerinde kademeli bir azalma eğilimi gözlenmiş olup, bu etkinin tasarım sürecinde destekleyici önlemlerle kontrol edilebileceği değerlendirilmektedir.

Çizelge 4: C senaryolarında üst örtü konfigürasyonlarının akustik performansa etkisi

Senaryolar	Üst Örtü Durumu	EDT (s) 500 - 4000 Hz	T30 (s) 500 - 4000 Hz	SPL (dB) 500 - 4000 Hz	STI
C1	Açık Avlu	0.05 - 0.13	0.13 - 0.21	62.3 - 63.4	0.92
C2	Yarı Kapalı Avlu (3.5 m)	0.12 - 0.21	0.13 - 0.23	63.4 - 65.2	0.88
C3	Yarı Kapalı Avlu (7 m)	0.09 - 0.23	0.18 - 0.29	62.8 - 64.4	0.87
C4	Kapalı Avlu	0.10 - 0.26	0.20 - 0.32	62.9 - 64.5	0.85

Araştırma kapsamında yapılan değerlendirme, tasarım aşamasında olan konut projesinin avlusuna ait sayısal akustik simülasyon sonuçlarıyla doğrudan ilişkilidir. Alan çalışması kapsamında elde edilen veriler, duvar yüzeylerinde kısmi yutuculuk sağlanan senaryolarda EDT ve T30 değerlerinin yaklaşık %60-90 oranında azaldığını, buna karşılık yalnızca zemin müdahalelerinin benzer ölçekte bir iyileşme üretmediğini göstermektedir. Benzer biçimde, cephe açıklık oranının %20-30 aralığında tutulduğu durumda STI değerlerinin 0.88 - 0.92 aralığında seyrettiği, açıklık oranının %70-80 seviyelerine çıkmasıyla bu değer 0.78'e kadar düştüğü belirlenmiştir. Üst örtü senaryolarında ise açık ve kapalı avlu durumları arasında EDT ve T30 değerlerindeki farkların 0.05 - 0.15 s aralığında kaldığı görülmüş, bu da üst örtü konfigürasyonunun, incelenen avlu özelinde, yüzey yutuculuğu ve cephe geçirgenliğine kıyasla ikincil bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bu bağlamda sunulan bulgular, tartışılan tasarım yaklaşımlarının soyut ve nitel varsayımlar değil, doğrudan alan çalışmasına dayalı ölçülebilir sonuçlarla desteklendiğini göstermektedir.

4. SONUÇ

Bu çalışma, avlu plan şemasına sahip bir konut yapısında akustik performansın, tasarım aşamasında simülasyon tabanlı yöntemlerle değerlendirilebileceğini ve optimize edilebileceğini ortaya

koymaktadır. Alan çalışması kapsamında incelenen konut projesine ait geometrik ve malzeme verileri kullanılarak oluşturulan akustik model üzerinden gerçekleştirilen senaryo analizleri, avlu bileşenlerinin işitsel ortam üzerindeki etkilerini sayısal olarak görünür kılmıştır.

Araştırmanın sonucunda elde edilen bulgular, avlu akustiğinde yüzey yutuculuk özelliklerinin belirleyici bir tasarım girdisi olduğunu göstermektedir. Duvar yüzeylerinde kısmi yutuculuk sağlanan senaryolarda, EDT ve T30 değerlerinin yaklaşık %60-90 oranında azaldığı, ses basınç düzeylerinin 4-6 dB düştüğü ve konuşma anlaşılabilirliğinin $STI \approx 0.90$ ve üzeri değerlere ulaştığı belirlenmiştir. Buna karşılık yalnızca zemin yüzeylerine yapılan akustik müdahalelerin, avlu içi yankılanma kontrolü ve konuşma anlaşılabilirliği açısından sınırlı etki yarattığı görülmüştür. Tüm yüzeylerin yüksek yutuculuğa sahip olduğu durumlarda ise teknik olarak üstün akustik performans elde edilmekle birlikte, avlunun doğal ve sosyal akustik karakterinin aşırı sönümlenebileceği değerlendirilmiştir. Cephe açıklık oranına ilişkin senaryolar, açıklık oranı arttıkça reverberasyon sürelerinin ve ses basınç düzeylerinin yükseldiğini, buna paralel olarak STI değerlerinin 0.88'den 0.78 seviyelerine kadar düştüğünü ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, cephe açıklıklarının yalnızca görsel, mekânsal ve enerji etkinliği açısından değil, aynı zamanda kritik bir akustik tasarım parametresi olarak ele alınması gerektiğini göstermektedir. Üst örtü konfigürasyonlarının değerlendirildiği senaryolarda ise açık, yarı kapalı ve kapalı avlu durumları arasında akustik parametreler açısından görece sınırlı farklar tespit edilmiş; incelenen örneklem özelinde üst örtünün, yüzey yutuculuğu ve cephe geçirgenliğine kıyasla ikincil bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

Sonuç olarak bu çalışma, avlu tasarımının enerji etkinliği, doğal havalandırma ve gün ışığı gibi çevresel kazanımların yanı sıra, akustik performans açısından da bütüncül biçimde ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. Alan çalışmasına dayalı simülasyon sonuçları, akustik tasarım kararlarının erken tasarım aşamasında alınmasının, hem işitsel konforun sağlanması hem de mekânsal kalitenin artırılması açısından kritik olduğunu göstermektedir. Bu bağlamda, elde edilen bulguların mimarlar ve tasarımcılar için, konut avlularının sürdürülebilir ve kullanıcı odaklı biçimde tasarlanmasına yönelik bilimsel temelli bir referans oluşturduğu değerlendirilmektedir. Gelecek çalışmalarda, farklı avlu geometrileri, değişken iklim koşulları ve kullanıcı yoğunlukları dikkate alınarak, akustik performans ile enerji etkinliği ve termal konfor arasındaki etkileşimin bütünleşik simülasyon ve alan ölçümleriyle birlikte değerlendirilmesi önerilmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada incelenen yapının mimari projesi, bildirinin yazarlarından Hilal Parlak Arslan tarafından hazırlanmıştır. Konut projesi tasarım aşamasındadır ve gelişime açıktır.

KAYNAKLAR

1. Abass, F., Ismail, L. H., & Solla, M. (2016). A review of courtyard house: History, evolution, forms, and functions. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(4), 2553-2563.
2. Kalfaoğlu Hatipoğlu, H., & Mohammad, S. (2021). Courtyard in contemporary multi-unit housing: Residential quality with sustainability and sense of community. *Idealkent*, 12(33), 802-826. <https://doi.org/10.31198/idealkent.972718>

3. Xu, Z., Zheng, X., & Li, X. (2025). Optimal design strategy of traditional courtyard based on performance and data-driven method-A case study of Yanshen ancient town, China. *Frontiers of Architectural Research*, 14(5), 1168-1195. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2025.01.004>
4. Edwards, B., Sibley, M., Hakmi, M., & Land, P. (2006). *Courtyard housing: Past, present and future*. Taylor & Francis.
5. Zhang, D. (2020). *Courtyard housing around the world: A cross-cultural analysis and contemporary relevance*. International Conference on Contemporary Affairs in Architecture and Urbanism (ICCAUA-2020), AHEP University, Alanya, Türkiye.
6. Meir, I. A., Pearlmutter, D., & Etzion, Y. (1995). On the microclimatic behavior of two semi-enclosed attached courtyards in a hot dry region. *Building and Environment*, 30(4), 563-572. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(95\)00018-2](https://doi.org/10.1016/0360-1323(95)00018-2)
7. Gamage, W., Lau, S., Qin, H., & Gou, Z. (2017). Effectiveness of air-well type courtyards on moderating thermal environments in tropical Chinese Shophouse. *Architectural Science Review*, 60(6), 493-506. <https://doi.org/10.1080/00038628.2017.1383230>
8. Martinelli, L., & Matzarakis, A. (2017). Influence of height/width proportions on the thermal comfort of courtyard typology for Italian climate zones. *Sustainable Cities and Society*, 29, 97-106. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.12.004>
9. Muhaisen, A. S., & Gadi, M. B. (2006). Effect of courtyard proportions on solar heat gain and energy requirement in the temperate climate of Rome. *Building and Environment*, 41(3), 245-253. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.01.031>
10. He, C., Tian, W., & Shao, Z. (2022). Impacts of courtyard envelope design on energy performance in the hot summer-cold winter region of China. *Buildings*, 12(2), 173. <https://doi.org/10.3390/buildings12020173>
11. Zhu, Y., Zhang, A., Bart, D., Yao, W., Zeng, N., Zhou, Y., & Gao, W. (2025). Research on the traditional courtyard typology and wind environment comfort - A case study of Qingshan Fishing Village in Qingdao, China. *Sustainable Cities and Society*, 130, 106511.
12. Ettouney, S. M., & Fricke, F. R. (1973). Courtyard acoustics. *Applied Acoustics*, 6(2), 119-132. [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(73\)90021-2](https://doi.org/10.1016/0003-682X(73)90021-2)
13. Lombardi, I., Iannace, G., & Trematerra, A. (2018). *The acoustic of a courtyard*. 47th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Inter.Noise 2018, Chicago, Illinois, USA.
14. Gidlöf-Gunnarsson, A., & Öhrström, E. (2010). Attractive “quiet” courtyards: a potential modifier of urban residents’ responses to road traffic noise?. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 7(9), 3359-3375. <https://doi.org/10.3390/ijerph7093359>
15. Zhang, D., Kong, C., Zhang, M., & Meng, Q. (2020). Courtyard sound field characteristics by bell sounds in Han Chinese Buddhist Temples. *Applied Sciences*, 10(4), 1279. <https://doi.org/10.3390/app10041279>
16. Eggenschwiler, K., Jansohn, T., Blau, M., & Schäffer, B. (2024). Effects of sound absorbing facades on the acoustical quality in different simulated inner courtyard situations. *Acta Acustica*, 8, 76. <https://doi.org/10.1051/aacus/2024053>
17. Kim, M. J., Yang, H. S., & Kang, J. (2014). A case study on controlling sound fields in a courtyard by landscape designs. *Landscape and Urban Planning*, 123, 10-20. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.12.001>

İNSAN SAĞLIĞI VE KÜLTÜR VARLIĞI ODAKLI KİRLETİCİ EMİSYON ÖLÇÜTLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Musa Ünsal ¹

Nazire Papatya Seçkin Tahtalıoğlu ²

Mehmet Uğuryol ³

^{1,3} Yıldız Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Kültür Varlıklarını Koruma ve Onarım Bölümü, İstanbul, 34349

² Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, İstanbul, 34427

ÖZET

İnsan sağlığı ile kültür varlıklarının korunması için geliştirilen kirleticici emisyon ölçütleri, büyük oranda aynı kirleticici türlerine odaklansalar da dayandıkları değerlendirme çerçevesi bakımından farklılaşmaktadır. Çalışma, belge incelemesine dayalı karşılaştırmalı bir literatür değerlendirmesi niteliğindedir. Bu kapsamda insan sağlığı alanında dış ve iç ortam hava kalitesi kılavuzları, kirleticilere ilişkin sınır ve hedef değerler ile ulusal ve uluslararası düzenlemeler değerlendirilmiştir. Kültür varlıkları alanında ise müze ortamındaki kirleticiler, malzeme bozunması, önleyici koruma ve risk değerlendirmesi literatürü incelenmiştir. Karşılaştırma, korunan unsur, dayanak oluşturan kanıt türü, maruziyet süresi, eşik yaklaşımı ve uygulama kararları olmak üzere beş ölçüt üzerinden yürütülmüştür. Bulgular, aynı kirleticici türleri her iki alanda da önem taşısa da karar eşiklerinin korunan unsurun niteliğine göre farklılaştığını göstermektedir. İnsan sağlığı ölçütleri epidemiyolojik ve toksikolojik kanıtlarla toplum düzeyinde riskin azaltılmasına yönelirken, kültür varlıkları ölçütleri malzeme duyarlılığı, kümülatif bozunma ve geri döndürülemezlik riskine odaklanmaktadır. Sonuç olarak çalışma, sağlık temelli eşiklerin müze ortamlarında tek başına yeterli olmadığını, koleksiyon duyarlılığına dayalı ikinci bir koruma bakış açısının gerekli olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: Kirleticiler, Kültür Varlıkları, Koruma, Emisyon, İnsan Sağlığı

COMPARISON OF POLLUTANT EMISSION CRITERIA FOCUSED ON HUMAN HEALTH AND CULTURAL HERITAGE

ABSTRACT

Although the pollutant emission criteria developed for the protection of human health and the conservation of cultural heritage largely focus on the same types of pollutants, they differ in terms of the evaluation frameworks on which they are based. This study is a comparative literature review based on document analysis. In this context, in the field of human health, outdoor and indoor air quality guidelines, limit and target values for pollutants, and national and international regulations were evaluated. In the field of cultural heritage, the literature on pollutants in museum environments, material degradation, preventive conservation and risk assessment was examined. The comparison was carried out using five criteria: protected element, type of supporting evidence, exposure duration, threshold approach, and implementation decisions. The findings show that although the same types of pollutants are important in both areas, the decision thresholds differ according to the nature of the protected element. While human health criteria focus on risk reduction at the community level with epidemiological and toxicological evidence, cultural heritage criteria focus on material sensitivity, cumulative degradation, and irreversibility risk. In conclusion, the study reveals that health-based thresholds alone are insufficient in museum environments and that a second approach of conservation based on collection sensitivity is necessary.

Keywords: Pollutants, Cultural Heritage, Conservation, Emission, Human Health

¹ munsal@yildiz.edu.tr, ² papatya.seckin@msgsu.edu.tr, ³ fuguryol@yildiz.edu.tr

1. GİRİŞ

Kültür varlıkları, çevresel etmenlerin etkisi altında zaman içinde mekanik, kimyasal ve biyolojik değişimlere uğramakta; bu değişimler bozulma/bozunma kapsamında incelenmektedir. Bozunma süreçleri, eserlerin organik, inorganik ya da karma yapılarında geri döndürülemez hasarlara yol açabilmektedir. Önleyici koruma disiplini, bu değişimleri yavaşlatmak ya da mümkün olduğunca engellemek amacıyla sıcaklık, bağıl nem, görünür ve morötesi ışınım ile kirleticiler gibi çevresel değişkenlerin denetimini kapsamaktadır [1]. Malzemenin yapısal kusurları, üretim tekniklerindeki yetersizlikler, uygun olmayan sergileme ve depolama koşulları ile hatalı koruma ve onarım müdahaleleri de bozunma sürecine eşlik ettiğinden, çevrenin denetimi koruma alanındaki en temel müdahale araçlarından biri hâline gelmektedir. Denetimin etkili olabilmesi ise mevcut durumun doğru analiz edilmesine ve etmenlerin tekil ya da sinerjik etkilerinin gerçekçi biçimde değerlendirilmesine bağlıdır. Kirleticiler; kaynakları, kimyasal yapıları, fiziksel hâlleri, derişimleri, ortamın hava değişim oranı ve malzemenin kimyasal yatkınlığına bağlı olarak kültür varlıklarının mevcut kondisyonunun korunmasını etkilerken [2], aynı zamanda aynı ortamda bulunan personel ve ziyaretçiler için de kısa ve uzun vadeli sağlık riskleri oluşturmaktadır [3].

Müze ortamlarında kirletici denetimi iki ayrı koruma amacıyla doğrudan ilişkilidir: personel ve ziyaretçi sağlığının korunması ve koleksiyonlarda ortaya çıkabilecek bozulmaların önlenmesi. İnsan sağlığına yönelik ölçütler, kirleticilerin fizyolojik etkilerini toplum ölçeğinde değerlendiren epidemiyolojik (toplum düzeyinde hastalık dağılımına ilişkin) ve toksikolojik (bir maddenin canlı üzerindeki zararlı etkilerine ilişkin) kanıtlara dayanmaktadır [3, 4]. Kültür varlıklarının korunmasına yönelik ölçütler ise malzeme türü, kimyasal yatkınlık, maruziyet süresi ve bozulmanın geri döndürülemez niteliğini esas almaktadır [5]. Bu nedenle aynı kirletici türü için insan sağlığı odaklı değerlendirmeler ile kültür varlıklarının korunmasına yönelik yaklaşımlar arasında önemli farklılıklar ortaya çıkabilmektedir.

2. YÖNTEM

Araştırma, belge incelemesine dayalı karşılaştırmalı bir literatür değerlendirmesi niteliğindedir. Bu kapsamda, insan sağlığı alanında dış ve iç ortam hava kalitesine ilişkin kılavuzlar, kirleticiler için tanımlanan sınır ve hedef değerler ile ulusal ve uluslararası düzeyde yürürlükte olan hava kalitesi düzenlemeleri incelenmiştir. Kültür varlıklarının korunması alanında ise müze ortamındaki kirleticiler, malzeme bozunması, önleyici koruma ve risk değerlendirmesi konularına odaklanan temel literatür değerlendirmeye alınmıştır.

Karşılaştırma, beş temel ölçüt üzerinden yapılmıştır. Bu kapsamda, korunan unsurun insan sağlığı mı yoksa malzeme bütünlüğü mü olduğu değerlendirilmiştir. Ardından dayanak oluşturan kanıt türünün epidemiyolojik ve toksikolojik verilerden mi, yoksa malzeme bozunması ile koruma gözlemlerinden mi türetildiği incelenmiştir. Kısa, orta ve uzun süreli ortalamaların maruziyet açısından nasıl tanımlandığı da karşılaştırmaların bir başka boyutunu oluşturmuştur. Bunun yanında, eşik yaklaşımında bağlayıcı sınır değer, rehber değer ya da risk temelli aralık önerilerinden hangisinin benimsendiği ele alınmıştır. Son olarak, bu yaklaşımların izleme, filtrasyon, havalandırma ve kaynak denetimi bakımından ne tür uygulama kararları ürettiği

değerlendirilmiştir. Bu çerçevede, kirletici türleri benzerlik gösterebilse de karar eşiklerinin neden farklılaştığı açıklanmaya çalışılmıştır.

3. İNSAN SAĞLIĞI ODAKLI KİRLETİCİ ÖLÇÜTLERİ

İnsan sağlığı odaklı kirletici ölçütleri, kirleticilere bağlı hastalık ve ölüm risklerini azaltmayı amaçlayan rehber ve sınır değerler bütünüdür. Bu ölçütler, kirletici emisyonu yapmayan ürünlerin geliştirilmesi, iç mekânlarda ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme (HVAC) sistemlerinin kurulumu ve işletimi ile maruziyete bağlı sağlık etkilerinin değerlendirilmesi açısından karar süreçlerini desteklemektedir. Bu alanda korunan unsur doğrudan insan sağlığıdır. Dayanak oluşturan kanıt türü ise büyük ölçüde epidemiyolojik ve toksikolojik verilerdir [3, 4, 6]. Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ), yasal bağlayıcılığı olan mevzuatlar üretmekten çok sağlık temelli bilimsel kanıtlara dayanan kılavuzlar geliştiren temel uluslararası başvuru kurumudur. DSÖ, dış ortam hava kalitesini “Küresel Hava Kalitesi Kılavuzu” [6] kapsamında partikül madde (PM_{2,5} ve PM₁₀), azot dioksit (NO₂), kükürt dioksit (SO₂), karbon monoksit (CO) ve ozon (O₃) gibi kirleticiler üzerinden ele almakta; iç mekân hava kalitesini ise “Seçili Kirleticiler” [3] kılavuzu aracılığıyla değerlendirmektedir. Bu kılavuzda formaldehit, karbon monoksit, azot dioksit, polisiklik aromatik hidrokarbonlar, trikloroetilen, tetrakloroetilen, benzen, naftalin ve radon gibi kirleticiler, maruziyet süresi ve sağlık etkileri temelinde tartışılmaktadır [5]. Kılavuzların kapsamlarındaki bu ayırım, iç ve dış ortam kirleticilerinin tek bir normatif çerçevede değil, kaynakları ve etki mekanizmaları farklılaştığı için ayrı rehberler üzerinden değerlendirildiğini göstermektedir.

İnsan sağlığı alanında eşiklerin tanımlanmasında maruziyet süresi temel belirleyicilerden biridir. Kısa, orta ve uzun süreli ortalamalar, kirleticinin etki mekanizmasına göre farklılaştırılmaktadır. DSÖ’nün dış ortam hava kalitesi kılavuzları bu yaklaşımın açık örneğini oluşturmaktadır. 2005 tarihli kılavuzda PM_{2,5} için yıllık ortalama 10 µg/m³ ve 24 saatlik ortalama 25 µg/m³ rehber değerleri önerilmiş; 2021 güncellemesinde ise daha düşük derişimlerde dahi iskemik kalp hastalığı, inme, KOAH, akciğer kanseri, alt solunum yolu enfeksiyonları ve genel ölüm riskinin arttığını gösteren kanıtlar doğrultusunda bu değerler sırasıyla 5 µg/m³ ve 15 µg/m³ düzeyine düşürülmüştür [4, 6]. Benzer biçimde PM₁₀ için 2005’te yıllık 20 µg/m³ ve 24 saatlik 50 µg/m³ olan değerler, 2021’de 15 µg/m³ ve 45 µg/m³ olarak revize edilmiştir. Her iki kılavuzda da partikül madde (PM) için tam anlamıyla güvenli bir eşik değerin tanımlanamadığı, derişim azaldıkça riskin düştüğü ancak bütünüyle ortadan kalkmadığı vurgulanmıştır [4, 6].

Gaz fazındaki kirleticiler için belirlenen değerlendirme ölçütlerinde de benzer bir temkinli yaklaşımın güçlendiği görülmektedir. Ozonun solunum yollarında inflamasyona yol açabildiği, kısa süreli maruziyetlerin solunum fonksiyonlarında azalma ve astım semptomlarında artış ile ilişkilendirildiği belirtilmektedir [6]. Bu nedenle 2005’teki 8 saatlik 100 µg/m³ rehber değeri korunurken, 2021 kılavuzunda pik sezon ortalaması (en yüksek emisyon dönemi boyunca günlük maksimum 8 saatlik ortalamaların mevsimsel ortalaması) için 60 µg/m³ düzeyinde ek bir kısıt tanımlanmıştır [6]. Azot dioksit için 2005’te yıllık 40 µg/m³ olan değerin, özellikle alandaki bilimsel kanıtların güçlenmesiyle 2021’de 10 µg/m³’e düşürülmesi sağlık alanında maruziyet süreci ile etki türü arasındaki ilişkinin karar eşiklerini doğrudan belirlediğini göstermektedir. 2021 kılavuzu kükürt dioksit için günlük maruziyetin değerlendirilmesinde 24 saatlik 40 µg/m³ değerini esas almakta, buna ek olarak çok kısa süreli azami maruziyetler için 10 dakikalık 500 µg/m³ değeri korunmaktadır. Ayrıca 2021 kılavuzunda karbon monoksit için 24 saatlik 4 mg/m³ değerinin

tanımlanması, bu gazın solunum ve dolaşım sistemlerine etkilerinin de dikkate alındığını ortaya koymaktadır [4, 6].

İnsan sağlığı odaklı ölçütlerde eşik yaklaşımı her zaman aynı hukuki statüye sahip değildir. DSÖ'nün önerdiği değerler rehber niteliğindedir; bunların bağlayıcı hâle gelmesi bölgesel veya ulusal mevzuatlara aktarılmasına bağlıdır. Avrupa Birliği, özellikle dış ortam hava kalitesine ilişkin değerleri DSÖ kılavuzlarıyla daha uyumlu hâle getirmeye çalışmış ve Dış Ortam Hava Kalitesi Direktifi çerçevesinde uyum yükümlülüğü oluşturmuştur [7]. ABD'de Çevre Koruma Ajansı (EPA) dış ortam hava kalitesi için bağlayıcı standartlar tanımlarken, iç mekân hava kalitesinde daha çok rehberlik, önleme ve risk eksenli bir yaklaşım benimsemiştir [8]. Türkiye'de ise dış ortam hava kalitesi, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı bünyesinde hazırlanan Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği kapsamında izleme, değerlendirme ve raporlama temelli idari-teknik bir çerçevede ele alınmış; buna karşılık iç mekân hava kalitesi kılavuzları mevzuat düzeyinde zorunlu kılınmamıştır [9]. ABD örneğinde iç mekân kirleticilerine ilişkin düzenlemeler, bütüncül bir iç hava kalitesi standardından çok radon, kurşun, asbest ve kompozit ahşap ürünlerden salınan formaldehit gibi belirli kirleticilere odaklanan ayrı programlar üzerinden geliştirilmiştir.

İç mekân hava kalitesi bağlamında insan sağlığı odaklı yaklaşım yalnızca toksik etkilerle sınırlı değildir; kabul edilebilirlik ve kullanıcı deneyimi de değerlendirme çerçevesine dâhil edilmektedir. Bu durum ısı konfor alanında PMV-PPD (Predicted Mean Vote, Öngörülen Ortalama Oy - Predicted Percentage of Dissatisfied, Öngörülen Memnun Olmayan Kişi Yüzdesi) modelleriyle belirginleşmiştir. Söz konusu modeller, hava sıcaklığı, ortalama ışımsal sıcaklık, hava hızı ve bağıl nem gibi çevresel değişkenleri, metabolik hız ve giysi yalıtımı gibi bireysel parametrelerle birlikte değerlendirilerek kullanıcıların ortalama ısı algısını ve beklenen memnuniyetsizlik oranını öngörmektedir [10]. Bu yaklaşım, mekanik olarak iklimlendirilen iç mekânlarda Amerikan Isıtma, Soğutma ve İklimlendirme Mühendisleri Derneği (ASHRAE) Standard 55 kapsamında temel değerlendirme yöntemleri arasında yer almaktadır [11]. Kirletici denetimine yönelik değerlendirmeler, algılanan hava kalitesi, koku, tahriş ve genel kabul edilebilirlik gibi kullanıcı deneyimiyle ilişkili ölçütleri de dikkate almaktadır. Ancak ısı konfordaki PMV-PPD gibi, farklı değişkenleri tek çerçevede birleştirip memnuniyetsizliği öngören yaygın kabul görmüş tek bir model, kirletici kaynaklı iç hava kalitesi alanında aynı ölçüde yerleşmiş değildir.

Uygulama kararları açısından bakıldığında, insan sağlığı odaklı ölçütler izleme, havalandırma, filtrasyon ve kaynak denetimi kararlarını doğrudan etkilemektedir. İç mekândaki kirletici ölçümleri; sağlık risk değerlendirmesi yapmak, iç ve dış kaynak etkilerini ayırt etmek, zamansal ve mekânsal eğilimleri izlemek ve risk önlemlerini gerekçelendirmek açısından kritik önemdedir.

3. KÜLTÜR VARLIKLARI ODAKLI KİRLETİCİ ÖLÇÜTLERİ

Kültür varlıkları odaklı kirletici ölçütlerinde korunan unsur, nesnenin malzeme bütünlüğü ve yüzey kararlılığıdır. Bu nedenle değerlendirme, kirleticilerin metal, taş, cam, deri, kâğıt ve tekstil gibi çeşitli malzemelerde yol açtığı kimyasal ve fiziksel bozunma süreçlerine odaklanmaktadır. Bu alanda dayanak oluşturan kanıt türü, esas olarak malzeme-kirletici etkileşimleri, bozunma gözlemleri, laboratuvar ve saha verileri ile önleyici koruma uygulamalarından türetilmektedir.

Kirletici gazlar ve partikül maddeler kültür varlıklarında yüzeysel kirlenmeye yol açmakla birlikte malzemenin kimyasal ve fiziksel bütünlüğünü tehdit eden süreçleri de tetiklemektedir. Kükürt dioksit gibi gazların, uygun çevresel koşullarda nesne yüzeyindeki nemde çözünerek asidik film tabakaları oluşturduğu bilinmektedir. Bunun metal eserlerde elektrokimyasal korozyonu başlattığı ya da hızlandığı, kalsiyum karbonat kökenli taş ve harçlarda kimyasal ayrışmaya ve yüzey bozulmalarına yol açtığı, organik kökenli malzemelerde ise selüloz ve protein esaslı yapılarda hidrolitik ve oksidatif bozunmayı artırarak zincir kırılmaları, yapısal zayıflama ve renk değişimleri oluşturduğu bilinmektedir [1, 5]. Ozon ise özellikle ışık varlığında boyar maddelerde solmaya, vernik ve reçine esaslı katmanlarda sararma ve gevrekleşme gibi geri dönüşü olmayan değişimlere neden olmaktadır [1]. İnce ve ultra ince partikül maddeler de, malzeme yüzeylerine nüfuz etme eğilimleri ve farklı reaktivitedeki bileşenleri içeriyor olmaları nedeniyle kültür varlıkları açısından önem arz etmektedir. Küçük boyutları gözenekli yüzeylere daha kolay tutunmalarına, yüzeylerde birikmeleri temizlenmesi güç ve geri döndürülmesi zor katmanların oluşumuna ayrıca bozunma ile sonuçlanan kimyasal etkileşimlere neden olabilmektedir [2, 12].

Kültür varlıkları alanında maruziyetin değerlendirilmesi, yalnızca anlık konsantrasyona değil, derişim ile sürenin birlikte ele alındığı kümülatif etki esasına dayanmaktadır. Kirletici derişimleri gravimetrik ($\mu\text{g}/\text{m}^3$, mg/m^3) ya da hacimsel (trilyonda birim, ppt; milyarda birim, ppb; milyonda birim, ppm) birimlerle ifade edilmekte ve sıcaklık ile basınç bilindiğinde birimler birbirine dönüştürülebilmektedir [5]. Söz konusu birimler kullanılarak ifade edilen olumsuz etkinin gözlenmediği en yüksek doz (NOAEL), olumsuz etkinin gözlendiği en düşük doz (LOAEL) kavramları kirletici izleme ve denetim programı öncesinde koleksiyon risk değerlendirmesi için önemli bilgiler sağlayabilmektedir. Bununla birlikte literatürde, koleksiyonlar için evrensel ve mutlak bir “güvenli eşik” tanımlanamayacağı özellikle vurgulanmaktadır [13]. Bazı malzemeler insan sağlığı çalışmalarında dikkate alınan düzeylerden çok daha düşük derişimlerde görünür bozunma tepkisi verebilmektedir. Örneğin gümüşün ppt düzeyindeki hidrojen sülfür (H_2S) varlığında dahi kararabildiği, buna karşılık doğal kaynaklardan gelen atmosferik hidrojen sülfür seviyelerinin 0,1-0,3 ppb aralığında tahmin edildiği belirtilmektedir [14]. LOAEL değeri gümüş için hidrojen sülfüre bağlı olarak bir başka çalışmada $3,85 \mu\text{g} \times \text{yıl}/\text{m}^3$ ya da yaklaşık $2,5 \text{ ppb} \times \text{yıl}$ düzeyinde tanımlanmaktadır [15]. Kanada Konservasyon Enstitüsü ilk kararına görünümünün en erken on yıl sonra ortaya çıkmasını hedeflediği daha korumacı bir senaryoda hidrojen sülfür derişiminin $0,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ’ün altında tutulmasını önermektedir. Bakır aynı kirleticiye karşı gümüşten yaklaşık on kat daha az hassas tepki göstermektedir. Bir diğer hassas metal türü olan kurşun içinse $430 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ’ün üzerindeki asetik aside seviyeleri bozunma riski barındırmaktadır [13].

Bu çerçevede kültür varlıkları alanındaki eşik yaklaşımı, bağlayıcı ve evrensel sınır değerlerden çok rehber niteliğinde, malzeme duyarlılığına ve bağlama göre değişen risk temelli aralıklara dayanmaktadır. 1970’lerden itibaren Avrupa’da (özellikle İngiltere) ve ABD’de arşiv ve kütüphaneler için geliştirilen ilk sistematik standartlar daha nicel ve normatif bir çizgi izlemiştir. İngiltere’de BS 5454 (1977) arşiv belgelerinin depolanması ve sergilenmesine ilişkin ilk nicel kirletici önerilerini sunmuş; kükürt dioksit derişimi $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ile sınırlandırılmıştır. Meşe ağacından yapılmış mobilyalar ile taze boyalı yüzeylerin emisyon kaynağı olabileceği belirtilmiş, vitrinlerde kontrollü havalandırma açıklıklarının bırakılması ve toz filtrelerinin kullanımı önerilmiştir [16]. 1989 güncellemesinde kükürt dioksitin ve azot oksitlerin $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ’ü aşması durumunda HVAC sistemlerinde gaz filtreleme ünitelerinin kullanımı öngörülmüştür [16]. ABD’de de süreç benzer bir paralellikte ilerlemiştir. 1981 yılında Ulusal Arşivler ve Kayıtlar İdaresi (NARA), arşiv depolama alanlarının hava kalitesi gereksinimlerine yönelik 12 maddelik bir tavsiye metni

yayımlamıştır [17]. 1983 yılında Ulusal Standartlar Bürosu tarafından düzenlenen ve ASHRAE temsilcilerinin de katıldığı çalıştayda kirletici-malzeme ilişkileri ele alınmıştır. Bu süreçte kükürt dioksit, azot oksitler, ozon ve toplam partikül madde için azami seviyeler önerilmiştir. 1986'da ABD Ulusal Araştırma Konseyi, kükürt dioksit için önceki sınırları korurken, ozon için önerilen seviyeyi düşürmüştür; azot dioksit ve nitrik asit için ise nicel eşik tanımlamaksızın "mevcut en iyi teknolojinin" kullanımını önermiştir. Ancak, doğrudan okuma yapan monitörlerin ozon, kükürt dioksit ve azot dioksit için algılama sınırlarının o dönemde 4–6 µg/m³ düzeyinde olması, giderek katılacak bu önerilere pratikte uyulmasını zorlaştırmıştır [18].

2000'li yıllardan sonra ise yaklaşım belirgin biçimde risk temelli yönetim çerçevesine kaymıştır. Kanada Konservasyon Enstitüsü tarafından uyarlanan NOAEL ve LOAEL kavramları, toksikolojiden referansla kültür varlıklarında belirli bir kirletici derişiminin belirli bir sürede ve belirli koşullarda kritik hasar oluşturma potansiyelini öngörmek için kullanılmıştır [18]. Bu dönüşüm özellikle PAS 198 ile belirginleşmiştir. PAS 198, kirleticiler de dâhil olmak üzere çevresel risklerin yönetiminde sabit ve evrensel eşik değerlere dayalı bir anlayıştan ziyade; malzeme duyarlılığı, maruziyet süresi ve çevresel koşulları esas alan risk temelli bir yaklaşımı benimsemiştir. Bu nedenle tüm durumlar ve tüm malzemeler için geçerli, evrensel olarak zararsız kabul edilebilecek nicel kirletici eşiklerinin tanımlanmasının güç olduğunu belirtmiştir [19]. Bu yaklaşım, PD 5454 (2012) [20] ile uyumlu biçimde bağlayıcı sınırların kaldırılmasını ve yönlendirici önerilerin korunmasını beraberinde getirmiştir. Güncel çerçevede, BS 5454 ile başlayan ve PD 5454 ile devam eden düzenleme süreci [16, 20]; sabit sınır değerler yerine izleme, risk analizi ve karar süreçlerini ön plana çıkaran bir yaklaşıma evrilmiştir. Bu eğilim uluslararası düzeyde ISO 11799 gibi belgelerde de görülmekte [21]; pasif çevresel denge, bina kabuğu performansı ve bağlama duyarlı tasarım ilkeleri, aktif filtreleme sistemlerine kıyasla önceliklendirilmektedir [18].

Bu yaklaşım, uygulama kararlarını izleme, filtrasyon, havalandırma ve kaynak denetimi ekseninde şekillendirmektedir. Kirletici denetiminin temel amacı, hava kirleticilerinin korunacak nesnelere doğru kütle akışını önlemek ya da sınırlandırmaktır; bu amaçla dış hava kirleticilerinin bina içine girmeden filtrelenmesi, iç mekânda oluşan kirleticilerin havalandırma ile seyreltilmesi, bina kabuğunun hava geçirmezliğinin artırılması ve kirletici yayan iç kaynakların sınırlandırılması başlıca stratejiler olarak benimsenmektedir [22]. Vaka çalışmaları, kirleticilerin çoğunlukla serbest hava hareketiyle iç mekâna girdiğini, dış kaynaklı kirleticilerin tahliyesinde pasif önlemlerin çoğu durumda yeterli olabildiğini ancak kentsel kirliliğin yüksek olduğu alanlarda aktif filtrelemenin de gerekli olabildiğini göstermektedir. Düşük hava değişim oranları dış ortam kaynaklı kirletici girişini sınırlasa da, personel ve ziyaretçi bulunan alanlarda konfor gereksinimleriyle çelişebildiğinden daha çok müze depoları gibi alanlarda uygulanabilir olmaktadır; vitrinler ise dış kirleticilere karşı koruyucu bir bariyer oluştururken iç hacimde açığa çıkan kirleticilerin birikmesine de yol açabilmektedir [5, 22]. Ahşap esaslı ürünler, yapıştırıcılar, kaplamalar, vitrin içi donatılar ve bazı sergileme malzemeleri doğrudan kirletici kaynağı olabildiği için doğru malzeme seçimi güvenli koleksiyon çevresi oluşturmanın temel önleyici adımlarından biri olarak kabul edilmektedir. Ancak yeni malzemelerin piyasaya çıkması, mevcut malzemelerin bileşimlerinin üreticiler tarafından zaman içinde değiştirilmesi ve çoğunun kritik kirleticiler açısından test edilmemiş olması nedeniyle önceki araştırmacıların tecrübelerine, karar destek kaynaklarına ve çevrim içi malzeme değerlendirme veri tabanlarına ihtiyaç duyulmaktadır [23].

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

İnsan sağlığı ve kültür varlıklarının korunması alanlarında kirletici denetimi, büyük ölçüde aynı kirletici grupları etrafında şekillenmektedir. Partikül madde, ozon, azot dioksit, kükürt dioksit, formaldehit ve bazı organik asitler her iki alanda da başlıca risk unsurları arasında yer almaktadır. Bununla birlikte, bu benzerlik değerlendirme ölçütlerinin aynı esaslara göre oluşturulduğu anlamına gelmemektedir. İnsan sağlığı açısından ikincil görülen bazı bileşikler, örneğin asetik asit, kültür varlıkları üzerinde belgelenmiş önemli olumsuz etkilere sahip olabilmektedir [14]. Bu nedenle insan sağlığı için kabul edilebilir görülen bir iç ortamın, hassas koleksiyonlar açısından güvenli olduğu her durumda varsayılmaz. Karşılaştırma, korunan unsur, dayanak oluşturan kanıt türü, maruziyetin zaman ölçeği, eşik yaklaşımının niteliği ve uygulama kararları bakımından belirgin bir ayrışma olduğunu göstermektedir. İnsan sağlığı alanında temel hedef, nüfus düzeyinde hastalık ve ölüm riskini azaltmaktır; kültür varlıkları alanında ise amaç, tekil nesnelerde geri döndürülemez malzeme kaybını ve estetik bozulmayı önlemektir. Bu nedenle karar eşikleri kirleticinin kendisinden çok korunan unsurun niteliğine göre değişmektedir. Çizelge 1’de, DSÖ’nün “Küresel Hava Kalitesi Kılavuzu” [6] ile “İç Hava Kalitesi Kılavuzu: Seçili Kirleticiler” [3] başlıklı belgeleri insan sağlığı alanındaki güncel rehber değerleri temsil etmektedir. Kültür varlıkları alanında ise Thomson [1] ve Grzywacz [5] gibi araştırmacıların yayınları malzemeye özgü bozunma eşiklerini ve koruma odaklı ölçütleri sistematik biçimde derleyen temel kaynaklar olarak esas alınmaktadır.

Çizelge 1. İnsan sağlığı ve kültür varlıkları için başlıca hava kirleticilerin karşılaştırılması

Kirletici	İnsan Sağlığı Odaklı Kirletici Ölçütleri	Kültür Varlığı Odaklı Kirletici Ölçütleri
SO ₂	40 µg/m ³ (24 saat) [6]	<10 µg/m ³ [1]; Hassas nesneler: <0,1–1,1 µg/m ³ [5]*
O ₃	100 µg/m ³ (8 saat azami); 60 µg/m ³ (pik sezon) [6]	0–2 µg/m ³ [1]; Hassas nesneler: <0,1 µg/m ³ [5]*
NO ₂	10 µg/m ³ (yıllık), 25 µg/m ³ (24 saat) [6]; 40 µg/m ³ (yıllık), 200 µg/m ³ (1 saat) [3]	<10 µg/m ³ [1]; Hassas nesneler: <0,1–5 µg/m ³ [5]*
CH ₂ O	100 µg/m ³ (30 dk) [3]	Hassas nesneler: <0,1–6 µg/m ³ ; Genel koleksiyon: 13–25 µg/m ³ [5]*
H ₂ S	—	Hassas nesneler: <0,01 µg/m ³ ; Genel koleksiyon: <0,1 µg/m ³ [5]*
CH ₃ COOH	—	Hassas nesneler: <12 µg/m ³ ; Genel koleksiyon: 100–697 µg/m ³ [5]*
CH ₂ O ₂	—	Hassas nesneler: <9,6 µg/m ³ ; Genel koleksiyon: 9,6–38 µg/m ³ [5]*
PM _{2,5}	5 µg/m ³ (yıllık); 15 µg/m ³ (24 saat) [6]	—
PM ₁₀	15 µg/m ³ (yıllık); 45 µg/m ³ (24 saat) [6]	—

*Özgün birimler milyarda birim (ppb) cinsinden verilmiş olup, standart sıcaklık ve basınç koşulları varsayımı altında µg/m³ birimine dönüştürülmüştür.

İki alan arasındaki bir başka temel fark, hassasiyetin nasıl tanımlandığı ile ilgilidir. İnsan sağlığı alanında çocuklar, yaşlılar, gebeler ve eşlik eden hastalığı bulunan bireyler gibi duyarlı gruplar özel önem taşımakta ancak DSÖ rehberleri çoğu durumda her alt grup için ayrı sayısal sınırlar koymak yerine, bu grupları da koruyacak bütüncül değerler önermektedir [3, 4, 6]. Kültür varlıkları alanında ise benzer işlev, hassas malzeme grupları üzerinden kurulmaktadır. Gümüşün indirgenmiş kükürt bileşiklerine, kurşunun organik asitlere, bazı organik boyar maddelerin ozona, kâğıdın ise asidik

kirleticilere karşı daha hassas olduğu bilinmektedir [2]. Dolayısıyla insan sağlığındaki “duyarlı alt grup” kavramı ile kültür varlıklarındaki “hassas malzeme grubu” kavramı işlevsel açıdan benzer bir rol oynasa da dayandıkları hassasiyet yaklaşımı farklıdır.

Maruziyetin zaman ölçeği de iki alanı birbirinden ayırmaktadır. İnsan sağlığı alanında 10 dakikalık, 1 saatlik, 8 saatlik, 24 saatlik ve yıllık ortalamalar, akut ve kronik etkileri birlikte değerlendirmeye imkân tanımaktadır [3, 4, 6]. Kültür varlıkları alanında ise hasar çoğu zaman düşük derişimlerde fakat uzun süreli birikim sonucunda ortaya çıktığı için kümülatif maruziyet yaklaşımı daha açıklayıcı olmaktadır [18, 19]. Bu durum, iki alanın aynı ölçüm verisini farklı zaman kurguları içinde yorumladığını göstermektedir. Başka bir deyişle, insan sağlığı açısından anlam taşıyan kısa süreli ortalamalar, kültür varlıklarında malzeme bozunma süreçlerini açıklamada tek başına yeterli bir çerçeve sunmamaktadır. Benzer şekilde, koruma alanında benimsenen uzun dönemli performans hedefleri de insan sağlığı eşiklerine karşılık gelen ölçütler olarak kabul edilmemektedir.

Eşik yaklaşımının hukuki ve kurumsal niteliği de farklıdır. İnsan sağlığı alanında DSÖ değerleri rehber niteliğinde olmakla birlikte Avrupa Birliği’nde bağlayıcı sınırlara dönüştürülebilmektedir [7]. ABD’de ise dış ortam havası açısından kirletici eşikleri, Ulusal Ortam Hava Kalitesi Standartları kapsamında hukukî tanımlanıp uygulanmaktadır [8]. Buna karşılık iç ortam havası için federal ölçekte aynı derecede bütüncül ve bağlayıcı bir standart sistemi bulunmamaktadır. Türkiye’de DSÖ değerleri dış ortam yönetmeliklerinde dikkate alınmaktadır [9]. Kültür varlıkları alanında ise BS 5454 gibi erken dönem standartlarda daha normatif sınırlar bulunmasına rağmen, güncel yaklaşım sabit ve evrensel limitlerden giderek uzaklaşmıştır [16]. PAS 198 [19], PD 5454 [20], ve ISO 11799 [21] gibi belgelerde risk temelli, bağlama duyarlı ve malzeme merkezli yorum öne çıkmıştır [18]. Bu dönüşüm, sayısal verilerin terk edildiği anlamına gelmemekte; tersine, sayıların artık tek başına bağlayıcı eşik değil, karar vermeyi destekleyen bağlamsal göstergeler olarak kullanıldığını düşündürmektedir.

Müze ortamlarında kirletici denetimi, insan sağlığı için tanımlanmış sınır değerlerin doğrudan esas alınmasına indirgenmemelidir. Sağlık temelli gereklilikler asgari güvenlik çerçevesi sağlayabilir ancak bunun üzerine koleksiyonun malzeme bileşimi, iç ve dış kaynaklar, sergileme sistemi, hava değişim oranı, vitrin içi emisyon ve izleme sonuçlarıyla desteklenen ikinci bir koruma yaklaşımının kurulması gerekir. Koruma literatüründe öne çıkan kaynak denetimi, izleme stratejisi ve risk temelli çevresel yönetim yaklaşımı da bunu doğrulamaktadır. Kültür varlıklarının sergilendiği veya depolandığı üniteler, ziyaretçiler, personel ve nesnelerin kendisi kirletici kaynağı olabildiği için karar yalnızca kirleticinin türüne göre değil, kaynağına, başka bir bileşiğe dönüşüm potansiyeline ve hangi malzeme ile aynı ortamda bulunduğuna göre verilmelidir.

5. SONUÇ

Bu çalışma, insan sağlığı ile kültür varlıklarının korunması amacıyla geliştirilen kirletici ölçütlerinin aynı kirletici türleri etrafında şekillenmesine rağmen, değerlendirme mantığı, kanıt temeli ve karar üretme biçimi bakımından önemli ölçüde farklılaştığını göstermektedir. İnsan sağlığı alanında ölçütler, esas olarak epidemiyolojik ve toksikolojik verilere dayanmakta; toplum düzeyinde hastalık ve ölüm riskinin azaltılmasını hedeflemektedir. Kültür varlıkları alanında ise değerlendirme, malzeme bozunması, kimyasal yatkınlık, geri döndürülemez hasar riski ve hassas

nesne grupları üzerinden kurulmaktadır. Bu durum, aynı kirletici için belirlenen değerlerin iki alanda aynı anlamı taşımadığını ve korunan unsurun niteliğine göre yorumlanması gerektiğini göstermektedir.

Karşılaştırma, maruziyet süresinin iki alanda farklı biçimlerde anlam kazandığına işaret etmektedir. İnsan sağlığı bağlamında kısa, orta ve uzun süreli ortalamalar akut ve kronik etkilerin birlikte değerlendirilmesine imkân vermekte bu nedenle ortalamalar karar süreçlerinde belirleyici rol oynamaktadır. Kültür varlıkları alanında ise hasar çoğu zaman derişim ve sürenin birlikte etkili olduğu kümülatif bir süreç içinde ele alınmaktadır. Bu nedenle anlık ya da kısa süreli ortalamalar tek başına yeterli açıklama sağlamamakta; uzun süreli maruziyet senaryoları ve birikim etkisi daha belirleyici hâle gelmektedir.

İnsan sağlığı alanında partikül madde, kükürt dioksit, azot dioksit ve karbon monoksit gibi kirleticiler için çoğunlukla $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ve mg/m^3 düzeyinde ortalama değerler kullanılmaktadır. Buna karşılık kültür varlıkları alanında bazı hassas malzemeler çok daha düşük kirletici düzeylerinde tepki verebilmektedir. Özellikle gümüşün hidrojen sülfüre, kurşunun asetik asite karşı son derece düşük derişimlerdeki duyarlılığı, malzeme temelli koruma yaklaşımının insan sağlığı odaklı eşiklerden neden farklılaştığını açıklamaktadır. Bu fark, kültür varlıklarının korunmasında yalnızca kirletici türüne değil, malzeme bileşimine ve bozunma mekanizmasına da odaklanması gerektiğini göstermektedir.

Sonuç olarak, müze, arşiv ve kütüphanelerde kirletici denetimi, insan sağlığı odaklı ölçütlerle sınırlı tutulmamalıdır. Sağlık temelli değerler, kullanıcı güvenliği açısından gerekli bir asgari çerçeve sağlasa da koleksiyonların korunması için bunun ötesine geçen ikinci bir değerlendirme katmanı oluşturulmalıdır. Bu ikinci katman, malzeme duyarlılığı, iç ve dış kirletici kaynakları, hava değışim oranı, vitrin içi emisyon, izleme sonuçları ve risk değerlendirmesi gibi değışkenleri birlikte ele almalıdır. Böylece hem kullanıcı sağlığı hem de kültür varlıklarının uzun süreli korunma gereksinimleri birlikte gözetileceğinden daha dengeli, bağlama duyarlı ve uygulanabilir bir çevresel yönetim yaklaşımı geliştirilebilecektir.

KAYNAKLAR

1. Thomson, G. (1986). The museum environment (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
2. Canadian Conservation Institute. (t.y.). Agent of deterioration: Pollutants. <https://www.canada.ca/en/conservation-institute/services/agents-deterioration/pollutants.html>
3. World Health Organization. (2010). WHO guidelines for indoor air quality: Selected pollutants. <https://www.who.int/publications/i/item/9789289002134>
4. World Health Organization. (2005). Air quality guidelines: <https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/74e5a36c-1ff4-4c42-b5f4-f0db0e2be800/content>
5. Grzywacz, C. M. (2006). Monitoring for gaseous pollutants in museum environments: Tools for conservation. The Getty Conservation Institute.
6. World Health Organization. (2021). WHO global air quality guidelines. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>

7. European Union. (2008). Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe. Official Journal of the European Union. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32008L0050>
8. U.S. Environmental Protection Agency. (2023). Air quality standards. U.S. Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants>
9. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2008). Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği. Resmî Gazete. <https://www.mevzuat.gov.tr>
10. Fanger, P. O. (1970). Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering. McGraw-Hill.
11. ASHRAE. (2020). ANSI/ASHRAE Standard 55: Thermal environmental conditions for human occupancy. ASHRAE.
12. Grau-Bové, J., & Strlič, M. (2013). Fine particulate matter in indoor cultural heritage: A literature review. *Heritage Science*, 1, Article 8. <https://doi.org/10.1186/2050-7445-1-8>
13. Canadian Conservation Institute. (t.y.). Control of pollutants in museums and archives (Technical Bulletin 37). <https://www.canada.ca/en/conservation-institute/services/conservation-preservation-publications/technical-bulletins/pollutants-museums-archives.html>
14. Canosa, E., & Norrehed, S. (2019). Strategies for pollutant monitoring in museum environments (Technical report). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.24172.00640>
15. Ankersmit, H. A., Tennent, N. H., & Watts, S. F. (2005). Hydrogen sulfide and carbonyl sulfide in the museum environment - Part 1. Atmospheric Environment.
16. British Standards Institution. (1977/ 1989). BS 5454: Recommendations for the storage and exhibition of archival documents. <https://knowledge.bsigroup.com/products/recommendations-for-the-storage-and-exhibition-of-archival-documents>
17. Calmes, A. R., & Baer, N. S. (1989). National Archives Advisory Committee on Preservation. *Restaurator*, 10.
18. Tétreault, J. (2018). The evolution of specifications for limiting pollutants in museums and archives. *Journal of the Canadian Association for Conservation*, 43.
19. British Standards Institution. (2012). PAS 198:2012: Specification for managing environmental conditions for cultural collections. <https://knowledge.bsigroup.com/products/specification-for-managing-environmental-conditions-for-cultural-collections>
20. British Standards Institution. (2012). PD 5454:2012: Guide for the storage and exhibition of archival materials. <https://knowledge.bsigroup.com/products/guide-for-the-storage-and-exhibition-of-archival-materials>
21. International Organization for Standardization. (2015). ISO 11799:2015: Information and documentation - Document storage requirements for archive and library materials. <https://www.iso.org/standard/63810.html>
22. Ryhl-Svendsen, M. (2006). Indoor air pollution in museums: A review of prediction models and control strategies. *Reviews in Conservation*, 7, 27-41.
23. Canadian Conservation Institute. (t.y.). Products Used in Preventive Conservation – Technical Bulletin 32. <https://www.canada.ca/en/conservation-institute/services/conservation-preservation-publications/technical-bulletins/products-used-preventive-conservation.htm>

SICAK VE KURAK İKLİM GELENEKSEL MİMARİSİNDE MEKANSAL İÇ GÖÇÜN ENERJİ PERFORMANSINA ETKİSİ

Ruşen Ergün^{1*}

¹Dicle Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi
Sur, Diyarbakır, 21280

ÖZET

Sıcak ve kurak iklim geleneksel mimarisinde yılın farklı mevsimlerinde ve günün farklı saatlerinde kullanıcıların mekanlar arası hareketi, pasif iklimlendirme stratejilerinin önemli bileşenleri arasındadır. Bu çalışmanın amacı, günün saatlerine göre mekanlar arası dikey hareketlilik ve mevsimlere göre mekanlar arası yatay hareketliliğin enerji korunumuna etkisini araştırmaktır. Diyarbakır geleneksel mimarisinin tipik bir örneği olan Cahit Sıtkı Tarancı Müzesi, çalışmanın amacına yönelik referans bina olarak seçilmiştir. Binanın fiziksel ölçümleri; alan çalışması ve literatür taramalarına dayanmaktadır. Elde edilen verilere göre Energyplus tabanlı DesignBuilder yazılımında binanın davranış senaryoları modellenmiş ve analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışmada diğer mekanların pasifleştirilmesi koşuluyla yazlık mekanların yaz döneminde kışlık mekanların ise kış dönemindeki kullanımlarının tüm binanın kullanımına göre %70-80 oranında enerji korunumu sağlanabileceğini göstermektedir. Yazlık mekanların gün içinde iç göç kapsamındaki doğru kullanımları ise enerji tüketimini yaklaşık %19 oranında azaltabilmektedir. Elde edilen bulgular, geleneksel mimarinin yapısal özelliklerinin yanı sıra kullanıcı davranışlarının da çevresel sürdürülebilirlik ve enerji performanslarının değerlendirilmesinde göz ardı edilmemesi gereken kriterler olduğunu kanıtlamaktadır.

Anahtar kelimeler: Sıcak ve kurak iklim, tarihi bina, mekansal iç göç

THE IMPACT OF SPATIAL INTERNAL MIGRATION ON ENERGY PERFORMANCE IN TRADITIONAL ARCHITECTURE IN HOT AND DRY CLIMATES

ABSTRACT

In traditional architecture of hot and dry climates, the movement of users between spaces at different times of the day and different seasons of the year is an important component of passive climate control strategies. The aim of this study is to investigate the effect of vertical movement between spaces according to the time of day and horizontal movement between spaces according to the season on energy conservation. The Cahit Sıtkı Tarancı Museum, a typical example of Diyarbakır's traditional architecture, was selected as the reference building for the purpose of this study. The physical measurements of the building are based on fieldwork and literature reviews. Based on the data obtained, the building's behavior scenarios were modeled and analyzed using the Energyplus-based DesignBuilder software. The study shows that, provided other spaces are passivized, summer spaces during the summer season and winter spaces during the winter season can achieve 70-80% energy conservation compared to the entire building's usage. The correct use of summer spaces during the day within the scope of internal migration can reduce energy consumption by approximately 19%. The findings demonstrate that, in addition to the structural characteristics of traditional architecture, occupant behavior is also a criterion that should not be overlooked in the assessment of environmental sustainability and energy performance.

Keywords: Hot and dry climate, historic building, spatial internal migration.

^{1*} rusen.ergun@dicle.edu.tr

1. GİRİŞ

Endüstrileşme sonucu artan nüfus, enerji tüketimi ve karbon salınımının artmasına neden olarak sürdürülebilirliği olumsuz etkilemiştir. Özellikle 1970 yılındaki enerji krizi ile gelecek nesillere sürdürülebilir yaşam alanı bırakılmasına yönelik araştırmalar hız kazanmıştır. Bu kapsamda 1987 yılında yayınlanan Brundtland raporu ile sürdürülebilirlik kavramının uluslararası düzeyde araştırılmaya başlandığı söylenebilir [1]. Mevcut bina sektörü enerji tüketiminin %35, karbon salınımının ise yaklaşık %37'sinden sorumludur [2], [3]. Binalarda tüketilen enerjinin neredeyse 1/3'ü iklimlendirme amaçlı kullanılmaktadır. Endüstri devriminin ilanı ile ortaya çıkan mevcut bina sektörünün bu çıktıları, sürdürülebilirliğin sağlanmasındaki en büyük engeller arasında gösterilmektedir [4].

Sürdürülebilir bina tasarımının temeli, iklim ve coğrafya gibi yere özgü kriterlere bağlı olarak tasarım yapmaktan geçmektedir. Yere özgü tasarım olarak tanımlanabilen geleneksel mimarinin sürdürülebilir bina tasarımının önemli bir rehberi olduğu açıktır [5], [6]. Bu kapsamda geleneksel mimarinin pasif iklimlendirme stratejilerinin ortaya çıkarılması, birçok akademisyen tarafından benimsenmiş ve araştırılmıştır [7]. Sıcak ve kurak iklim geleneksel mimarisinde özellikle pasif soğutmaya sağlamaya dayalı iklimlendirme stratejilerinin araştırılması bunun önemli bir örneğidir [8], [9]. Sıcak ve kurak iklim geleneksel mimarisindeki pasif iklimlendirme stratejilerinin genellikle sıcak yaz dönemlerinde; güneşten korunma, toprak ile soğutma ve radyant soğutmaya dayalı iken soğuk kış dönemlerinde güneş radyasyonundan yararlanmaya dayalıdır [10], [11]. Sıcak ve kurak iklim geleneksel mimarisinde sıklıkla kullanılan avlu, eyvan, pencere kapakları ve pencere ölçüleri gibi bileşenler gölgeleme amaçlı kullanılmıştır. Damda uyuma ve açık renkli bina tasarımı radyant soğutmanın önemli kriterleri iken serdap gibi toprak altı mekân kullanımı ise toprak ile soğutmanın önemli bileşenleridir. Avluda havuz gibi su elemanlarının kullanımı ise buharlaşmalı soğutmaya yönelik stratejilerdir [10], [12], [13].

Sıcak ve kurak iklim geleneksel mimarisinde iç göç; toprak ile soğutma, güneşten korunma, güneş radyasyonundan yararlanma ve radyant soğutmanın hepsinden yararlanılan bir kullanıcı hareketi tipi olarak tanımlanabilir. Geleneksel mimaride yatay ve düşey iç göç olmak üzere iki türlü kullanıcı hareketi bulunmaktadır [14], [15]. Yatay iç göç, genellikle mevsimler arası hareketlilik olarak tanımlanabilir. Yaz mevsiminde güneşten korunma amacıyla kuzeye bakan mekanlar, kışın güneş radyasyonundan yararlanmak amacıyla güneye bakan mekanlar kullanılırken doğu ve batı cephelerindeki mekanlar genellikle bahar dönemlerinde kullanılmıştır. Düşey iç göç ise kullanıcıların sıcak yaz döneminde yazlık mekanlar arasındaki hareketini ifade etmektedir [12]. Düşey iç göç kapsamında serdap gibi toprak altı mekanların kullanılması toprak ile soğutma, avlunun en/boy oranı gibi fiziksel özelliklerinin gölgeleme sağlama ve bina tasarımına dahil edilen su ve ağaç gibi peyzaj elemanlarının ise buharlaşmalı soğutma özelliklerinden yararlanır. Ayrıca gece saatlerinde damın uyuma alanı olarak kullanımı gece soğutmasının aktif kullanımı olarak tanımlanabilir. Kullanıcıların yatay ve düşey iç göç hareketliliği İran ve Türkiye gibi sıcak iklim bölgelerinin geleneksel mimarisinde sıklıkla tercih edilmiştir. Baran vd. (2011) Diyarbakır geleneksel mimarisinde; kullanıcıların mevsimlere göre kullandıkları mekanların sıcaklığını dış ortam sıcaklığı ile karşılaştırmıştır. Çalışma sonucunda kış döneminde kışlık mekanların iç ortam sıcaklığı ile dış ortam sıcaklığı arasında ~ 7 °C, sıcak yaz döneminde yazlık mekanların dış ortam ile sıcaklık farkı ~ 6 °C, bahar döneminde ise baharlık olarak kullanılan mekanlar ile dış ortam sıcaklığı arasında ~ 2 °C fark olduğunu belirlemiştir [16]. Rizi (2022) İran'ın Yazd şehri geleneksel mimarisindeki kullanıcı hareketliliğinin termal konfor ile ilişkisini araştırmıştır. Bu kapsamda bina

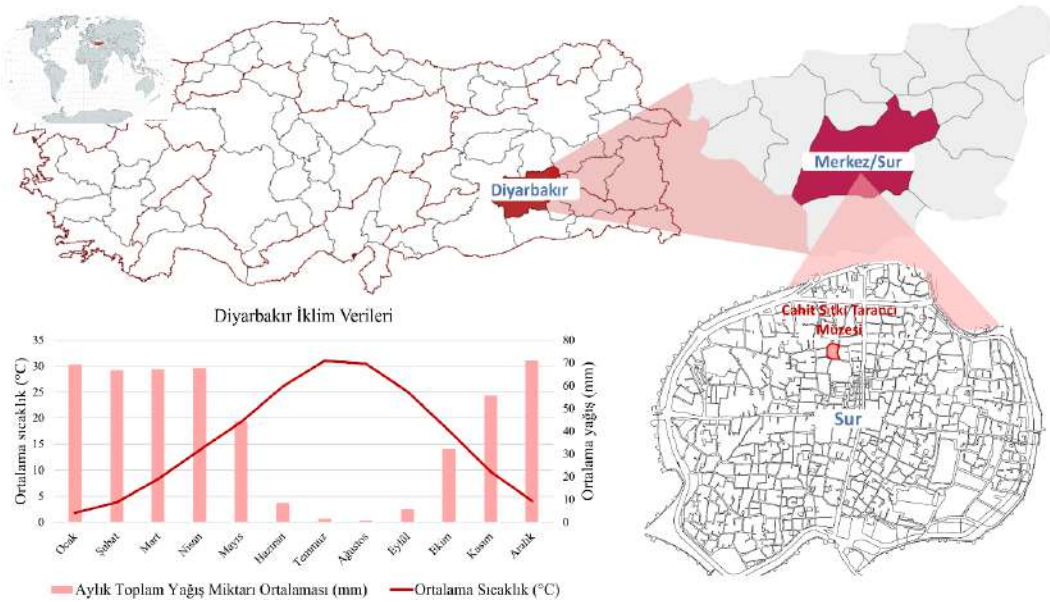
tasarımlarının kullanıcı hareketliliğine uygun olduğunu ve yatay ve düşey hareketliliğin termal konfor açısından avantajlı olduğunu ortaya koymuştur [15]. Bu çalışmalar, sıcak ve kurak iklim geleneksel mimarisinde sıklıkla kullanılan yatay ve düşey iç göçün termal konfora ulaşmak için etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmanın amacı sıcak ve kurak iklim bölgesindeki yatay ve düşey iç göçün enerji tüketimine etkisini analiz etmektir. Çalışma kapsamına alınan referans bina Diyarbakır geleneksel mimarisinden seçilmiştir. Çalışma; alan araştırması ve simülasyon programının çıktılarına dayanmaktadır. Simülasyon programı olarak Designbuilder tercih edilmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

Diyarbakır, Türkiye'nin Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde 37°55 kuzey enlemi 40°12' doğu boylamında bulunmaktadır. Diyarbakır tarihi kent dokusu yaklaşık 5km uzunluğundaki tarihi Diyarbakır Surları ile çevrilidir. [17]. Şehirdeki yapılaşmanın 1930'lara kadar tamamen surun içinde olduğu ancak bu tarihten sonra artan nüfusla yapılaşmanın surun dışına taştığı bilinmektedir [18].

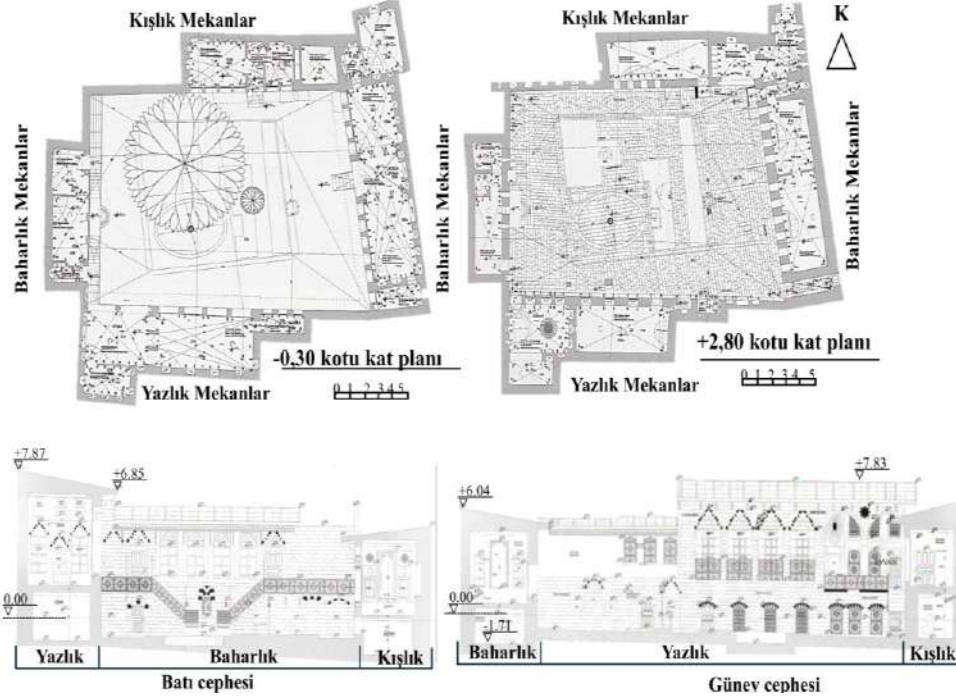
Sıcak ve kurak bir iklime sahip kentte Temmuz (31 °C) ve Ağustos (30,5°C) ayları en yüksek ortalama sıcaklığa sahip iken 1,8°C ile ocak ayı ise en düşük sıcaklığa sahiptir. En yüksek ortalama yağış miktarı 70,9mm ile aralık ayında en düşük yağış miktarı ise 1,00mm ile Ağustos ayındadır (Şekil 1) [19]. Bu değerlerin yanı sıra özellikle sıcak yaz dönemlerinde gece ve gündüz arasındaki sıcaklık farkı yüksek seviyelere çıkabilmektedir [20].



Şekil 1. Diyarbakır iklim ve coğrafi bilgileri.

Çalışma kapsamında referans bina olarak tarihi Sur içi bölgesinde bulunan Cahit Sıtkı Tarancı Müzesi seçilmiştir. Cahit Sıtkı Tarancı Müzesi (37°54'K 40°14'D) tarihi yapılaşmanın kuzeybatı bölümünde, Ulu Camii'nin kuzeyinde bulunmaktadır. Bina, orta avlulu olup avlunun dört cephesinde de mekanlar bulunmaktadır. Binanın mekanları kullanıldıkları mevsime göre yazlık

(kuzeye bakanlar), kışlık (güneye bakanlar) ve baharlık (doğu ve batıya bakanlar) olarak tanımlanmaktadır. Yazlık bölümün kat yüksekliği ~ 7,80m iken baharlık bölümler yaklaşık ~5,00m, kışlık bölümler ise yaklaşık ~5,40m'dir. Evin yazlık bölümünde; serdap, oda ve yazlık eyvan, kışlık bölümünde; oda ve depo, baharlık bölümlerinde ise eyvan, oda, depo gibi mekanlar bulunmaktadır (Şekil 2).



Şekil 2. Cahit Sıtkı Tarancı Müzesi kat planları ve kesitleri (Yıldırım vd.,2012'den düzenlenmiştir [21].

Mevcut çalışmada mevsimlik ve günlük kullanıcı hareketlerinin enerji tüketimine etkisinin analizi için Designbuilder yazılımı kullanılmıştır. Çalışmada dört senaryolu bir yöntem kullanılmıştır. Çalışmanın ilk senaryosunda Cahit Sıtkı Tarancı Müzesi referans alınarak basitleştirilmiş bina enerji modeli hazırlanmıştır. Bina enerji modelinde iç mekanlar bütüncül olarak alınmıştır. Bu kapsamda binanın tüm detaylarının aksine yapı bileşenlerinin temel özellikleri (duvar, döşeme, tavan ve çatı özellikleri), pencere/duvar açıklık oranları, kat yükseklikleri ve mekân yönelimleri dikkat edilerek referans model oluşturulmuştur (Tablo 1).

Tablo 1. Bina Yapı Bileşenleri, Isı Geçirgenlik Katsayıları (U-Değerleri) ve bina enerji modeli.

Duvar	Zemin Kat Döşemesi	Çatı	Bina enerji modeli
U değeri:1.19W/m²K Duvar kalınlığı: 60cm	U değeri:3.598W/m²K Döşeme kalınlığı:10cm	U değeri: 0.36W/m²K Çatı kalınlığı:0.78cm	

İkinci senaryoda binanın tüm mekanlarının dört mevsimde de aktif olarak kullanıldıkları varsayılarak birim alan başına enerji tüketimleri (kWh/m²) analiz edilmiştir. Enerji tüketimleri kapsamında ısıtma ve soğutma amaçlı enerji tüketimleri dikkate alınmıştır. Aydınlatma kaynaklı ısı kazançları sisteme dahil edilmemiştir. Bu kapsamda termostat ısıtma ayarı 21°C ve soğutma ayarı 25°C olarak Designbuilder yazılımının başlangıç değerleri sabit tutulmuştur. Mevcut çalışmada temel amaç karşılaştırma yapmak olduğu için hava sızdırmazlık değeri, ısıtma ve soğutma gibi başlangıç değerleri değiştirilmemiştir. Mekansal iç göçün termal konfora etkisi analiz edildiği için gölgeleme elemanları yok varsayılmıştır. Pencere tipi, 6mm kalınlığında tek camlı ahşap çerçeveli olarak kabul edilmiştir. Pencerenin U değeri 4.8W/m²K olarak kabul edilmiştir. Üçüncü senaryoda geleneksel kullanım biçimine benzer şekilde mevsimlere bağlı olarak mekanlar aktifleştirilmiştir. Bu kapsamda yazlık mekanların; Haziran-Ağustos, kışlık mekanların; Aralık-Şubat, baharlık mekanların ise Mart-Mayıs ve Eylül-Kasım ayları arasında aktif kullanıldığı varsayılarak diğer aylarda pasif durumda olup enerji tüketimleri yok sayılmıştır.

Dördüncü senaryoda ise yazlık mekanların günlük iç göç kapsamındaki kullanıcı hareketlerinin birim alan başına tüketilen enerjinin analizine odaklanılmıştır. Bu kapsamda; 22.00-06.00 arasında damın, 06.00-12.00 arasında tüm kapalı mekanların, 12.00-16.00 arasında toprak altı mekânın (serdap), 16.00-19.00 arasında avlunun 19.00-22.00 arasında ise serdap dışındaki diğer kapalı mekanların aktif olarak kullanıldığı varsayılmıştır [10]. Toprak altı mekanlar genellikle yılın en sıcak dönemlerinde kullanıldıklarından dolayı çalışmada baharlık bölümlerde kullanılan toprak altı mekanlar kapsam dışı bırakılmıştır. Kışlık bölümdeki toprak altı mekan kullanımının dahil edilmesinin temel sebebi ise sıcak ve soğuk dönemlerdeki kullanımlarının enerji tüketimine etkisini analiz edebilmektir.

3. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Çalışmanın ilk aşamasında daha önce belirtildiği gibi tarihi binanın tüm mekanlarının dört mevsimde de aktif olarak kullanıldığı varsayılarak birim alan başına yıllık toplam enerji tüketim analizleri yapılmıştır (Tablo 2).

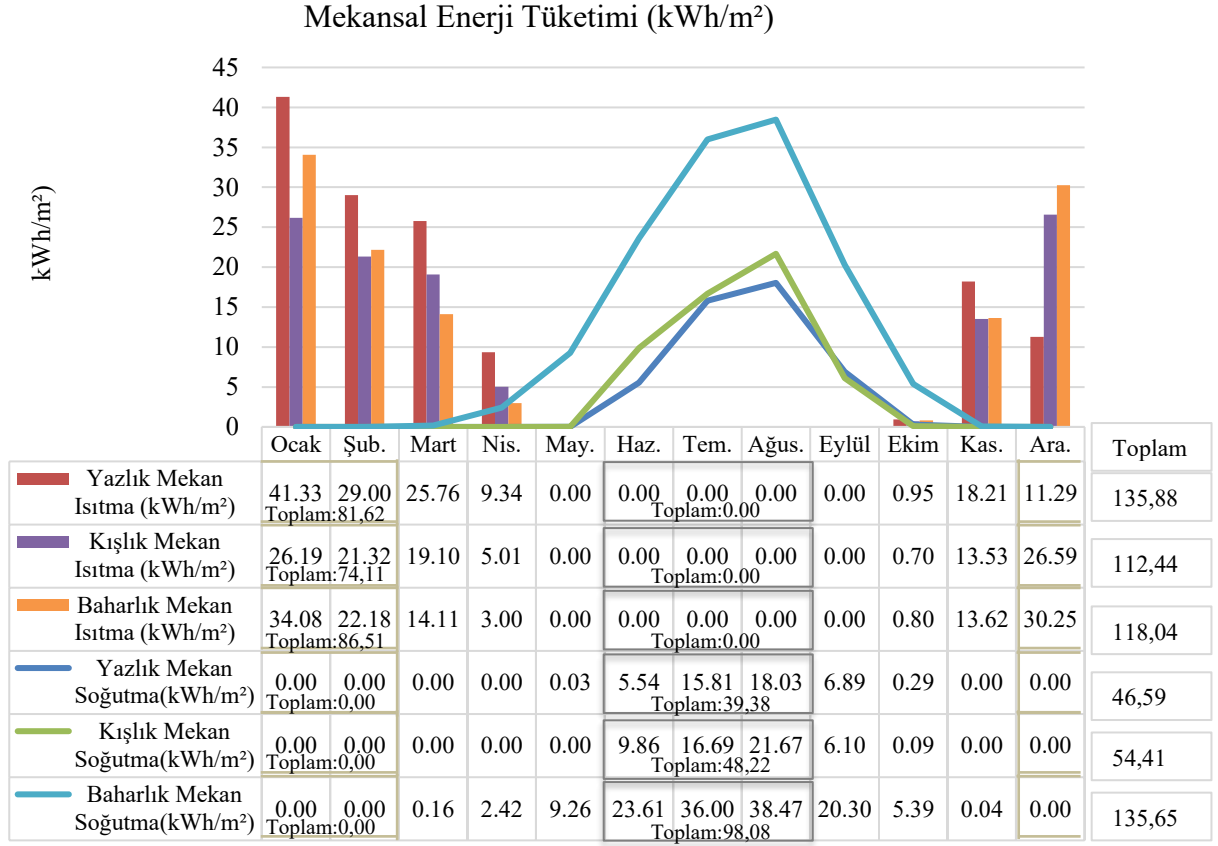
Tablo 2. Mekânlara göre yıllık enerji tüketimi (kWh/ m²)

Enerji tüketimi (kWh/m ²)	Isıtma				Soğutma			
	Yazlık	Kışlık	Baharlık	Yıllık	Yazlık	Kışlık	Baharlık	Yıllık
Toplam	135,88	112,44	118,04	366,35	46,59	54,41	135,65	236,66

Binanın tamamının yıl boyunca aktif olarak kullanıldığı varsayılarak birim alan başına tüketilen enerji miktarı incelendiğinde soğutma amaçlı enerji tüketiminin 236,66 kWh/m² iken ısıtma amaçlı enerji tüketiminin 366,35 kWh/m² olduğu belirlenmiştir. Isıtma amaçlı enerji tüketiminde; yazlık ve baharlık mekanların enerji tüketiminin %69,62'sinden sorumlu olduğu belirlenmiştir. Kışlık (%23) ve baharlık mekanların (%57,28) ise soğutma amaçlı enerji tüketiminin %80,28'sinden sorumlu olduğu belirlenmiştir.

Yapılan analizler sonucunda tüm mekanlarda kış aylarında (Aralık-Şubat) ısıtma yükü ve yaz aylarında ise (Haziran-Ağustos) soğutma yükünde artış meydana geldiği belirlenmiştir. Yazlık mekanların yaz aylarında birim alan başına toplam soğutma yükü (39,38 kWh/m²) en düşüktür.

Kışlık mekanların ise kış aylarında birim alan başına toplam ısıtma yükü (74,09 kWh/m²) en düşüktür. Mekanların birim alan başına yıllık toplam enerji yükleri incelendiğinde ise 253,70 kWh/m² ile en yüksek enerji tüketimi baharlık mekanlara aittir. Baharlık mekanların birim alan başına ısıtma (118,50 kWh/m²) ve soğutma (135,65kWh/m²) yükleri birbirine yakındır. Bunun aksine özellikle yazlık mekanların birim alan başına ısıtma ve soğutma amaçlı enerji tüketimleri arasında ciddi bir fark bulunmaktadır. Bu kapsamda yazlık mekanların ısıtma yükünün (135,87 kWh/m²) soğutma yükünden (46,59 kWh/m²) %28,18 oranında daha fazla olduğu belirlenmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. Mevsimlik mekân kullanımı ve enerji tüketimi

Mekânların bulundukları kata göre ısıtma amaçlı enerji tüketimleri incelendiğinde, yazlık toprak altı mekânların, yazlık toprak üstü mekânlara kıyasla yaklaşık yarısı kadar enerji tüketimine neden olduğu belirlenmiştir. Kışlık mekânların ısıtma amaçlı enerji tüketimleri karşılaştırıldığında ise alt mekânlarda harcanan enerjinin, toprak üstü mekânlarda tüketilen enerjinin %72,33'üne karşılık geldiği tespit edilmiştir (Tablo 3).

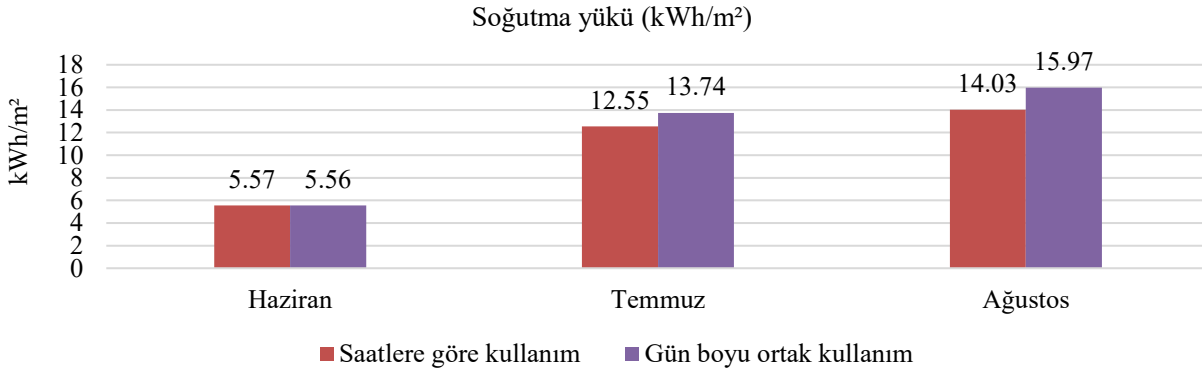
Tablo 3. Yazlık ve kışlık mekanların bulunduğu konuma göre enerji tüketimleri (kWh/ m²)

Mekanlar	Yazlık Mekân		Kışlık Mekân	
	Isıtma	Soğutma	Isıtma	Soğutma
Alt kat	41,79	8,73	47,19	11,65
Üst kat	94,08	37,86	65,24	42,76
Toplam	135,87	46,59	112,43	54,41

Soğutma amaçlı enerji tüketimleri incelendiğinde, yazlık bölümde yer alan toprak altı mekânlarda kullanılan enerji miktarı, üst katlarda harcanan enerjinin yaklaşık %23,05'ine karşılık gelmektedir. Kışlık mekânlarda yapılan karşılaştırmada ise toprak altı mekânlarda tüketilen enerji, toprak üstü mekânlarda harcanan enerjinin %27,27'sine denk gelmektedir.

Mevsimlik kullanıcı hareketlerinin enerji tüketimine etkisini analiz edebilmek amacıyla, mekânlar kullanım dönemlerine göre aktifleştirilmiş veya pasifleştirilmiştir. Bu kapsamda yazlık mekanların yaz iklimindeki kullanımı aktifleştirilerek soğutma yükü analiz edilmiştir. Yaz mevsiminde yazlık birimin soğutma yükü 3820 kWh (38,20kWh/m²) olarak belirlenmiştir. Tüm binanın yaz mevsiminde soğutma amaçlı yükü 16632,13 (52,46kWh/m²) kWh'dir. Bu durum yaz mevsiminde diğer mekanların pasifleştirilerek sadece yazlık mekanların kullanımında yaklaşık %77 oranında (12812 kWh) enerji korunumu sağlanabileceğini göstermektedir. Kış mevsiminde binanın ısıtma amaçlı enerji yükü 25729,85 kWh (81,16kWh/m²) iken sadece kışlık mekanların kullanımı ile enerji tüketiminin 7187,43 kW'a (74,09kWh/m²) düştüğü belirlenmiştir.

Kullanıcılar, mevsimlik yatay iç göçünün yanı sıra özellikle sıcak yaz dönemlerinde yazlık mekanlar arasında dikey iç göç de gerçekleştirmektedir. Bu kapsamdaki kullanıcı hareketinin enerji tüketimine etkisi ayrıca analiz edilmiştir. Bu analiz kapsamında damın 22.00-06.00 arasında, yazlık tüm kapalı mekanların 06.00-12.00 arasında, serdabın 12.00-16.00 arasında, avlunun 16.00-19.00 arasında, avlu ve serdap dışındaki diğer mekanların ise 19.00-22.00 arasında aktif olarak kullanıldığı varsayılmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. Yazlık mekanların birim alan başına enerji tüketimi

Yazlık mekanların yaz döneminde gün boyu kullanımlarının birim alan başına 39,38 kWh/m² enerji tüketimine neden olurken, saatlere bağlı kullanımda enerji tüketiminin ~%19,85 oranında azalarak 31,56kWh/m²'ye düştüğü söylenebilir. Bu durum geleneksel mimarideki günlük kullanıcı hareketlerinin enerji tüketimi üstündeki etkisini açıkça ortaya koymaktadır.

4. SONUÇ

Bu çalışmada sıcak ve kurak iklim geleneksel mimarisinde mevsimlere ve saatlere göre mekanlar arası kullanıcı hareketinin ısıtma ve soğutma amaçlı enerji tüketimine etkisi analiz edilmiştir. Diyarbakır geleneksel mimarisinin tipik bir örneği olan Cahit Sıtkı Tarancı Müzesi çalışma kapsamında referans bina olarak kabul edilmiştir. Çalışmada binanın yazlık bölüm olarak

tanımlanan kuzeye bakan mekanların birim alan başına düşen soğutma yükü 46,59kWh/m² ile en düşüktür. Kışlık bölüm olarak tanımlanan ve güneye yönelen mekanların birim alan başına düşen ısıtma yükü 112,43kWh/m² ile en düşüktür. Birim alan başına düşen ısıtma ve soğutma amaçlı yıllık enerji tüketiminin en yüksek değeri (254,1kWh/m²) ise baharlık mekanlarındadır. Yazlık ve kışlık mekanların enerji tüketiminin en önemli faktörleri olarak üst katlar iken toprak altı mekanların ısıtma ve soğutma amaçlı enerji tüketimlerinin (%70-80) daha düşük seviyede olduğu belirlenmiştir. Bunların yanı sıra bulgular, sıcak yaz döneminde dış ortam sıcaklığının etkisiyle gerçekleşen kullanıcıların düşey iç mekân hareketlerinin, yazlık mekânların enerji tüketiminde yaklaşık %20 oranında bir azalma sağladığını göstermektedir.

Sonuç olarak, binaların enerji performanslarının iklimsel özelliklere bağlı kullanıcı hareketleri ile önemli derecede artırılabilceği söylenebilir. Bu kapsamda, tarihi binalara yönelik yapılacak müdahalelerde mekânların konumlarının ve dönemsel kullanım amaçlarının dikkate alınmasının, tarihi binaların sürdürülebilirliği açısından önemli bir kriter olduğu vurgulanabilir.

KAYNAKLAR

1. United Nations, “Report of the World Commission on Environment and Development : note / by the Secretary General”, New York, Ağu. 1987. Erişim: 20 Ocak 2026. [Çevrimiçi].
2. UNEP, “Guidelines on Green House of Worship”, Cities. [Çevrimiçi].
3. IEA, “Perspectives for Clean Energy Transition. The Critical Role of Buildings.”, International Energy Agency, s. 117, 2019, [Çevrimiçi].
4. H. Y. Chan, S. B. Riffat, ve J. Zhu, “Review of passive solar heating and cooling technologies”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, c. 14, sy 2, ss. 781-789, 2010, doi: 10.1016/j.rser.2009.10.030.
5. R. Ergün ve A. Bekleyen, “Reinterpretation of Passive Cooling Strategies in Hot And Dry Climate Traditional Architecture: Vents in The Building”, International Journal of Built Environment and Sustainability, c. 11, sy 3, ss. 79-93, 2024, Erişim: 23 Eylül 2024. [Çevrimiçi].
6. I. Ayçam, S. Akalp, ve L. S. Görgülü, “The application of courtyard and settlement layouts of the traditional diyarbakir houses to contemporary houses: A case study on the analysis of energy performance”, Energies (Basel), c. 13, sy 3, 2020, doi: 10.3390/en13030587.
7. S. S. Chandel, V. Sharma, ve B. M. Marwah, “Review of energy efficient features in vernacular architecture for improving indoor thermal comfort conditions”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, c. 65, ss. 459-477, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.07.038.
8. M. Santamouris ve D. Kolokotsa, “Passive cooling dissipation techniques for buildings and other structures: The state of the art”, Energy Build., c. 57, ss. 74-94, 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2012.11.002.
9. S. Attia, “The role of landscape design in improving the microclimate in traditional courtyard-buildings in hot arid climates”, PLEA 2006 - 23rd International Conference on Passive and Low Energy Architecture, Conference Proceedings, sy September, ss. 6-8, 2006.
10. R. Ergün ve A. Bekleyen, “An architectural taxonomic proposal for passive design strategies used in traditional architecture of areas with hot and dry climates”, Journal of Engineering Research (Kuwait), c. 3, sy 13, ss. 2234-2251, Eyl. 2025, doi: 10.1016/j.jer.2024.05.019.

11. N. Azimi Fereidani, E. Rodrigues, ve A. R. Gaspar, “A review of the energy implications of passive building design and active measures under climate change in the Middle East”, *J. Clean. Prod.*, c. 305, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127152.
12. A. Foruzanmehr, *Thermal comfort in hot dry climates: Traditional dwellings in Iran*. London and New York: Routledge Taylor and Francis Group, 2017. doi: 10.4324/9781315527130.
13. F. Soflaee ve M. Shokouhian, “Natural cooling systems in sustainable traditional architecture of Iran”, içinde *International Conference “Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment”*, Santorini , Greece, Santorini, 2005, ss. 715-719.
14. A. Bekleyen, “Geleneksel Konut Mimarisindeki Avlulu Mekan Örgütlenmesinin Günümüzdeki Yorumları”, *TÜBAV*, c. 12, sy 1, ss. 1-13, 2019.
15. R. A. Rizi, “Occupants’ migration in residential buildings towards comfort and energy efficiency (case of traditional residential architecture in Iran)”, *Journal of Housing and the Built Environment*, c. 37, sy 1, ss. 179-211, 2022, doi: 10.1007/s10901-021-09829-w.
16. M. Baran, M. Yıldırım, ve A. Yılmaz, “Evaluation of ecological design strategies in traditional houses in Diyarbakir, Turkey”, *J. Clean. Prod.*, c. 19, sy 6-7, ss. 609-619, 2011, doi: 10.1016/j.jclepro.2010.11.001.
17. N. Dalkılıç ve A. Nabikoğlu, “The Architectural Features of The Diyarbakır City Walls: A Report on Current Status and Issues of Conservation”, *Mediterranean Archeology and Archaeometry*, c. 12, sy 2, ss. 171-182, 2012, Erişim: 25 Eylül 2024. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.researchgate.net/publication/258681052_The_architectural_features_of_the_Diyarbakir_city_walls_A_report_on_current_status_and_issues_of_conservation#fullTextFileContent
18. D. T. Kejanlı ve İ. Dinçer, “Conservation and Planning Problems in Diyarbakır Castle City”, *Megaron*, c. 6, sy 2, ss. 95-108, 2011, Erişim: 25 Eylül 2024. [Çevrimiçi].
19. Meteoroloji Genel Müdürlüğü, “İllere Ait Mevsim Normalleri-Diyarbakır(1929-2024)”. Erişim: 03 Haziran 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m=DIYARBAKIR>
20. O. Büyükalaca ve H. Bulut, “Detailed weather data for the provinces covered by the Southeastern Anatolia Project (GAP) of Turkey”, *Appl. Energy*, c. 77, sy 2, ss. 187-204, Şub. 2004, doi: 10.1016/S0306-2619(03)00108-9.
21. M. Yıldırım, N. Dalkılıç, F. M. Halifeoğlu, E. Dağtekin, ve G. Payaslı Oğuz, *Rölöve Teknikleri Dersi Öğrenci Çalışmaları*. Diyarbakır: TMMOB Mimarlar Odası Diyarbakır Şubesi, 2012.

MANTOLAMA UYGULAMALARINDA BALKON DETAYININ GÖZ ARDI EDİLMESİNİN TERMAL PERFORMANS ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Ruşen Ergün^{1*}

¹Dicle Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi
Sur, Diyarbakır, 21280

ÖZET

Türkiye’de binaların Enerji kimlik belgesi alması yasal olarak zorunludur ve bu sürecin temel kriterlerinden biri TS 825 Isı Yalıtım Standardı’na uygun mantolama uygulamalarıdır. Ancak birçok binada dış cephe mantolaması yapılmasına rağmen balkon iç duvarlarında yalıtım uygulanmadığı görülmektedir. Bu durum, ısı yalıtım sürekliliğini bozarak yapı kabuğunda ısı köprülerinin oluşmasına ve enerji tüketimi ile karbon salımının artmasına neden olmaktadır. Bu çalışmada, balkon iç duvarlarına yalıtım yapılmamasının bina enerji performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Diyarbakır modern mimarisini temsil eden tipik bir konut binası referans alınarak, balkon iç duvarının yalıtımlı ve yalıtımsız olduğu iki senaryo karşılaştırılmıştır. Analizler, EnergyPlus tabanlı DesignBuilder yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş; modelleme sürecinde TS 825 standartları, alan çalışması ve literatür verilerinden yararlanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, balkon bölgesinde sürekli ve süreksiz mantolama senaryoları arasında cephe yönelimlerine bağlı olarak enerji tüketiminde %12,06 ile %30,53 arasında değişen farklar olduğunu göstermektedir. Çalışma, balkon iç duvarlarının yalıtım sistemi içinde değerlendirilmesinin enerji verimliliğini artırırken karbon salımını da azalttığını ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: Bina dış kabuğu, Isı yalıtımı, Balkon duvarı.

THE EFFECTS OF IGNORING BALCONY DETAILS IN INSULATION APPLICATIONS ON THERMAL PERFORMANCE

ABSTRACT

In Turkey, the law stipulates that buildings must obtain an Energy Performance Certificate. A fundamental criterion for obtaining this certificate is the use of insulation applications that comply with the TS 825 Thermal Insulation Standard. However, it has been observed that while exterior wall insulation is commonly employed in numerous buildings, the same approach is not often adopted for the interior walls of balconies. This situation disrupts thermal insulation continuity, leading to the formation of thermal bridges in the building envelope and increased energy consumption and carbon emissions. The present study investigates the impact of omitting insulation in balcony interior walls on the energy performance of buildings. Utilising a paradigm residential structure embodying contemporary architecture in Diyarbakır as a point of reference, two scenarios were juxtaposed: one incorporating insulated balcony interior walls and the other eschewing this feature. The analyses were conducted utilising EnergyPlus-based DesignBuilder software; the modelling process incorporated TS 825 standards, fieldwork, and literature data. The findings indicate that there are discrepancies in energy consumption ranging from 12.06% to 30.53% between continuous and discontinuous cladding scenarios in the balcony area, contingent on the orientation of the facade. The study demonstrates that evaluating balcony interior walls within the insulation system enhances energy efficiency while concomitantly reducing carbon emissions.

Keywords: Building envelope, Thermal insulation, Balcony wall.

^{1*}Sorumlu yazar e-posta adresi: rusen.ergun@dicle.edu.tr

1. GİRİŞ

Sürdürülebilir bina tasarımı, gelecek nesillere yaşanabilir bir yer bırakmanın önemli kriterlerinden biridir. Özellikle sanayi devrimi ile artan nüfusun barınma ihtiyacını karşılamaya yönelik acil önlem olarak ortaya çıkan mevcut bina sektörü, geleneksel mimarının yere özgü tasarım kriterinden uzaklaşmıştır. Mevcut bina sektörü; enerji tüketiminin yaklaşık %35, enerji ile ilgili sera gazı emisyonunun ise yaklaşık %37'sinden sorumludur [1]. Binalarda tüketilen enerjinin yaklaşık %50'si iklimlendirme (HVAC) sistemleri için kullanılmaktadır [2]. Bu sonuçlar bina sektörünün sürdürülemez olduğunu göstermektedir. Bu kapsamda mevcut bina sektörünün iklimlendirme amaçlı tüketilen enerjisini azaltmak, birçok ülke ve araştırmacının çevresel sürdürülebilirliğe yönelik ana hedeflerinden biri haline gelmiştir [3]. Bina dış kabuğuna yönelik alınan önlemler bunun önemli bir parçasıdır. Bu kapsamda özellikle duvar, çatı ve temel yalıtımı dikkat çekicidir. Fang vd. (2014) tarafından Çin'in sıcak iklim bölgesinde yer alan Chongqing'deki binaların dış duvar yalıtımının enerji tüketimine etkisi analiz edilmiştir [4]. Yalıtımlı ve yalıtımsız dış duvar olarak bir odaya yönelik yapılan analizler sonucunda yalıtımın enerji tüketimini %23,5 oranında azalttığı belirlenmiştir. Hu ve Yu (2019), veri analizi binasının dış kabuğuna yönelik yapılacak yalıtımın enerji tüketimine etkisini araştırmıştır Beş farklı iklimde olduğu varsayılan veri analizi binasının çatı ve dış duvarına yönelik yapılacak yalıtımların yılın %50'sinde soğutma yükünü azaltacağı belirlenmiştir [5].

Sarkar ve Bose (2016) tarafından Hindistan'ın tropikal iklim bölgesindeki Mandi kasabasında bina dış kabuğuna yönelik yapılacak yalıtımların enerji tüketimine etkisi analiz edilmiştir [6]. Çalışma sonucunda binaların ısıtma yükünde %40-60, soğutma yükünde %25-40, toplam enerji tüketiminde ise %25 oranında azalma olabileceğini belirlemiştir. Yue vd. (2023) tarafından Çin'in merkez bölgesinde bulunan mevcut binaların enerji tüketimine etki eden bina dış kabuğu elemanları araştırılmıştır [7]. Yapılan analizler sonucunda dış cephe/pencere cam oranı ve dış duvar yalıtım kalınlığının enerji tüketimini en çok etkileyen bileşenler olduğunu ortaya çıkarmıştır. Friess vd. (2012) sıcak iklim bölgesindeki Dubai'nin villa tipi konut yapılarında kullanılacak uygun dış duvar yalıtımlarının enerji tüketimine etkisini analiz etmiştir [8]. Yapılan analizler sonucunda dış duvarda kullanılacak yalıtımın enerji tüketimini yaklaşık %30 oranında azaltabileceği belirlenmiştir. Enerji tüketimini azaltmak amacıyla bina dış kabuğuna yapılacak müdahalelerin etkisini inceleyen akademik çalışmaların yanı sıra, birçok ülke bu konuda çeşitli önlemler almıştır. Avrupa Birliği tarafından üye ülkeler için 2002 yılında yürürlüğe giren ve geliştirilerek devam eden “Bina Enerji Performans Direktifi” [9], Birleşik Arap Emirlikleri'nin 2001 ve 2003 yılında yürürlüğe giren ve güncellenerek devam eden bina mevzuatı, Türkiye’de 2007 yılında yürürlüğe giren Enerji Verimliliği Kanunu [10] ve “TS825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Standardı” [11] bunun önemli örnekleri olarak gösterilebilir.

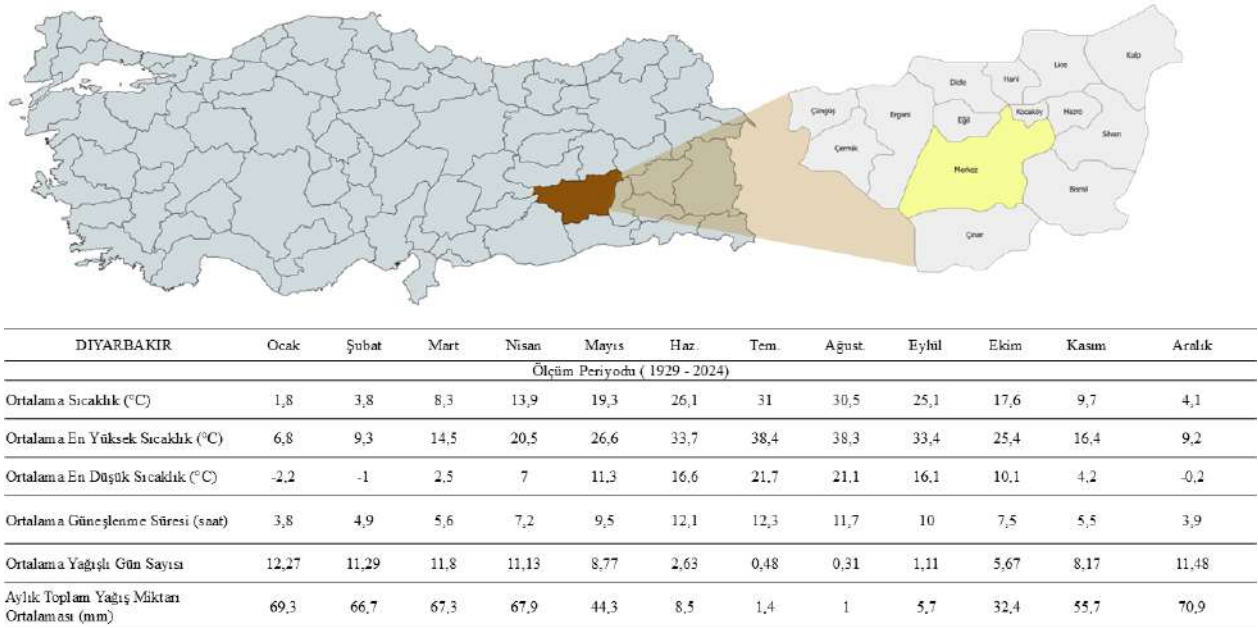
Yapılan akademik araştırmalar ve ülkelerin belirledikleri yasal düzenlemelere rağmen binaların dış kabuğuna yönelik yanlış veya yetersiz uygulamalar yapıldığı söylenebilir. Bu durum iç mekân enerji tüketimini doğrudan etkileyen ısı köprülerinin bina dış kabuğunda oluşmasına neden olmaktadır [12], [13]. Türkiye’de balkonların iç duvarına yönelik yapılan yanlış yalıtım uygulamaları bunun önemli bir örneğidir.

Bu çalışmada, balkon iç duvarlarında yalıtım uygulanmasının oda enerji tüketimi ve CO₂ salımı üzerindeki etkisi araştırılmaktadır. Çalışma kapsamında “balkon iç duvarı”, iç mekân ile balkon arasında yer alan yapı elemanı olarak tanımlanmaktadır. Balkon iç duvarı, klasik bina dış

duvarlarından farklı olarak doğrudan dış ortama değil, dış ortam ile iç mekân arasında tampon işlevi gören yarı açık bir mekân olan balkona açılmaktadır. Bu nedenle söz konusu yapı elemanı, dış ortam koşullarından dolayı olarak etkilenmekte ve ısı davranış açısından kısmen bina dış kabuğu özelliği göstermektedir. Bu kapsamda, dış ortam hava sıcaklığı, güneş radyasyonu ve rüzgâr gibi iklimsel etkenler, balkon iç duvarı üzerinde bina dış kabuğuna kıyasla daha farklı düzeylerde etkili olmaktadır. Bu durum, balkon iç duvarlarının ısı performansının ayrı bir değerlendirme gerektirdiğini ortaya koymaktadır. Bina dış kabuğunun yapısal özelliklerinin iç mekân termal konforu ve enerji tüketimi üzerindeki etkileri literatürde kapsamlı biçimde incelenmiştir. Ancak, balkon iç duvarlarının enerji performansı üzerindeki etkisine yönelik çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Bu bağlamda, balkon iç duvarlarının ısı davranışının incelenmesi, mevcut literatüre katkı sunmakta ve çalışmanın önemini artırmaktadır. Çalışmada enerji tüketimi ve CO2 salım analizleri için simülasyon programı kullanılmıştır. Referans vaka olarak sıcak ve kurak iklim bölgesindeki Diyarbakır'dan bir bina seçilmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

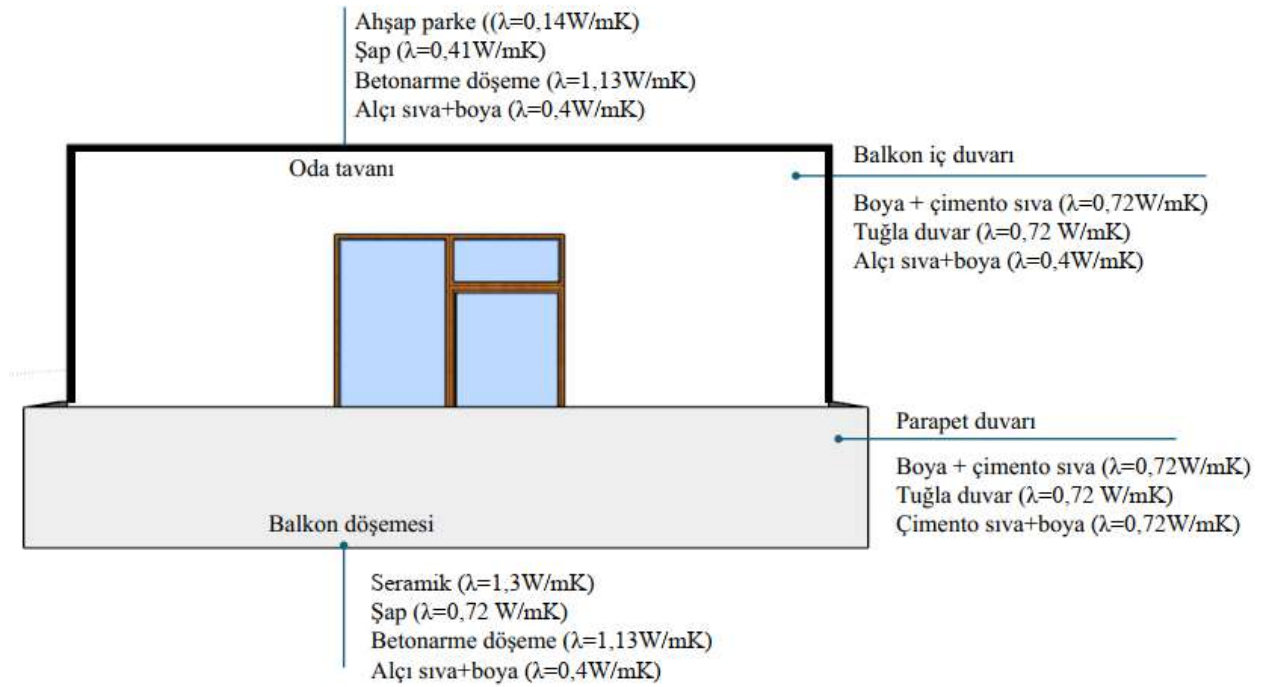
Diyarbakır 37°55 kuzey enlemi 40°12' doğu boylamında, Türkiye'nin Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde yer almaktadır. Mezopotamya'nın kuzeyi olarak tanımlanabilen El Cezire bölgesinde Karacadağ ve Dicle Nehri arasında konumlanmaktadır. Haziran-Ağustos ayları en sıcak aylar olup sıcak ve kurak iklim özelliklerine sahiptir [14].



Şekil 1. Diyarbakir konumu ve iklim verileri (İklim verileri MGM'den düzenlenmiştir)

Diyarbakır'da çalışma alanı olarak kabul edilen balkon, yedi katlı binanın altıncı katında 1m derinliğinde, 6m uzunluğunda ve güney cephesine yönelmektedir. Alan çalışmaları kapsamında referans vaka olarak kabul edilen balkon iç duvarında yalıtım uygulaması bulunmazken binanın dış duvarlarında ortalama 4,5cm kalınlığında XPS yalıtım paneli kullanıldığı belirlenmiştir.

Binanın yaklaşık 15 yıllık olduğu belirlenmiştir. Balkona açılan iç oda 6m uzunluğunda 4m genişliğinde ve 3m yüksekliğinde olup iki odanın arasında konumlanmıştır. Balkon iç duvarı dışarıdan içeriye doğru çimento sıva+boya (1cm) +tuğla duvar (19cm) +alçı sıva+boya (1cm) katmanlarından oluşur. Oda zemini parke (3mm) + zemin şapı (3cm) +betonarme döşeme (12cm) katmanlarından oluşurken balkon zemininde ahşap parke yerine seramik bulunmaktadır. Balkonun parapet duvarı ise sıva+boya (1cm) +tuğla duvar (19cm) + sıva+boya (1cm) katmanlarından oluşmaktadır. Oda ve balkon arasındaki dış duvarın ısı geçirgenlik katsayısı (U değeri) 2,115W/m²K, parapet duvarının U değeri 2,116 W/m²K, oda zemininin U değeri 1,452W/m²K, balkon zemininin U değeri ise 2,219W/m²K'dır. Oda ile balkon arasındaki geçiş, çift camlı ahşap kaplama PVC kapı ile sağlanmaktadır. Söz konusu kapı, 180×210 cm ölçülerinde açılabilir tek kanada sahip olup, çift cam sistemi 13mm hava boşluklu 6mm cam kalınlığına sahiptir (Şekil 2).



Şekil 2. Balkon ve odanın yapı bileşenleri ve termal iletkenlik değerleri

Odanın hava sızdırmazlık değeri 1 ac/h olarak kabul edilmiştir. Çalışma kapsamına alınan odanın doğrudan bağlantılı olduğu diğer mekanlar adyabatik bileşen olarak tanımlanmıştır. Bunun temel amacı çalışma kapsamına alınan odanın iç mekan enerji performansını komşu mekanların ısı iletkenliğinden soyutlamaktır. Bu yüzden çalışmada elde edilen bulgular mevcut tipoloji için geçerli olup tüm bina ölçekleri için genellenmemelidir. Yapılan analizlerde iç mekanın termostat ısıtma ayarı 21°C, soğutma ayarı ise 25°C olarak kabul edilmiştir. Analizlerde Diyarbakır TMYx iklim verilerinden yararlanılmıştır. Mevcut çalışmada balkon iç duvar yalıtımının enerji tüketimi ve karbon salımına etkisinin belirlenmesi için DesignBuilder yazılımı kullanılmıştır. İngiltere merkezli DesignBuilder yazılımı aydınlatma, HVAC, ısıtma ve soğutma amaçlı enerji tüketimi, karbon salımı gibi analizlerin yapılmasında kullanılabilmektedir [15].

Çalışmada öncelikle referans vaka olarak kabul edilen balkon ve oda, DesignBuilder yazılımında modellenmiştir. Modellemenin doğruluğunun ispatlanması için kalibrasyon analizleri yapılmıştır.

Bu kapsamda odanın içerisinde yerden 1.1 metre yükseklikte Micro Lite USB Data Logger 5016 ile sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Sıcaklık ölçümler 10 Ağustos 2025 saat 19.00 ile 17 Ağustos 2025 saat 09.00 arasında 10 dakikada bir yapılmıştır. Modelin doğruluğunun belirlenmesi için saatlik veri kriterlerine göre hesaplamalar yapılmıştır. Bu kapsamda CV(RMSE) formülü kalibrasyon değerinin belirlenmesi için kullanılmıştır. ASHRAE standartlarına göre CV(RMSE) değerinin %30'u geçmemesi beklenir. [16].

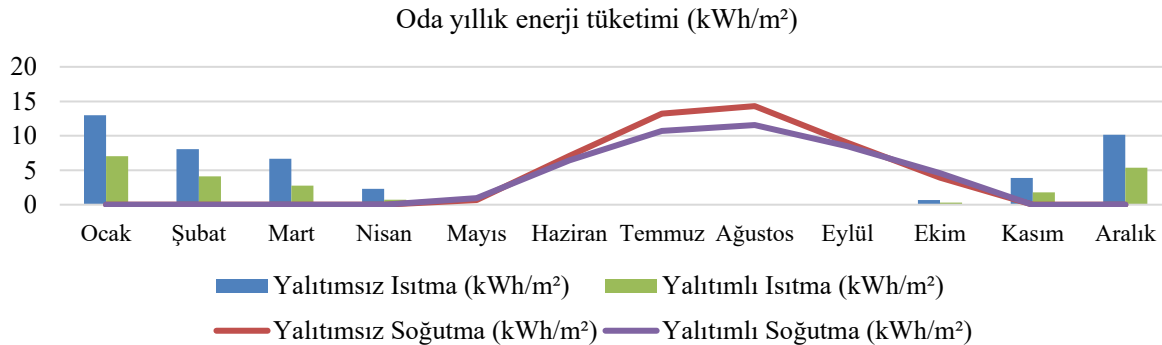
$$CV(RMSE) = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{Ni} \frac{(Mi - Si)^2}{Ni}}}{\frac{1}{Ni} \sum_{i=1}^{Ni} Mi} \quad (1)$$

Mi ölçülen saatlik değeri, Si ise simüle edilen saatlik değeri ifade etmektedir. Ni değeri ise ölçülen ve simüle edilen toplam değerleri ifade etmektedir [17]. Yapılan analiz sonucunda CV(RMSE) değerinin %16,74 olduğu belirlenmiştir. ASHRAE standartlarına göre simülasyonun gerçek bina ölçümleri ile kalibre edildiği söylenebilir.

İkinci aşamada referans vakadan yola çıkılarak balkonun 4 farklı cephedeki yalıtımlı ve yalıtımsız durumlarına yönelik analizler gerçekleştirilmiştir. Balkon duvarına yönelik yapılan yalıtım için TS 825 standartlarına uygun biçimde 9cm kalınlığında XPS ($\lambda=0,034W/Mk$) önerilmiştir [18]. Çalışma kapsamında 4 farklı cephede olduğu varsayılan balkonun yalıtımlı ve yalıtımsız durumlarının ısıtma ve soğutma amaçlı enerji tüketimi ve yıllık CO2 salımının belirlenmesine yönelik toplam 8 farklı senaryonun analizi gerçekleştirilmiştir.

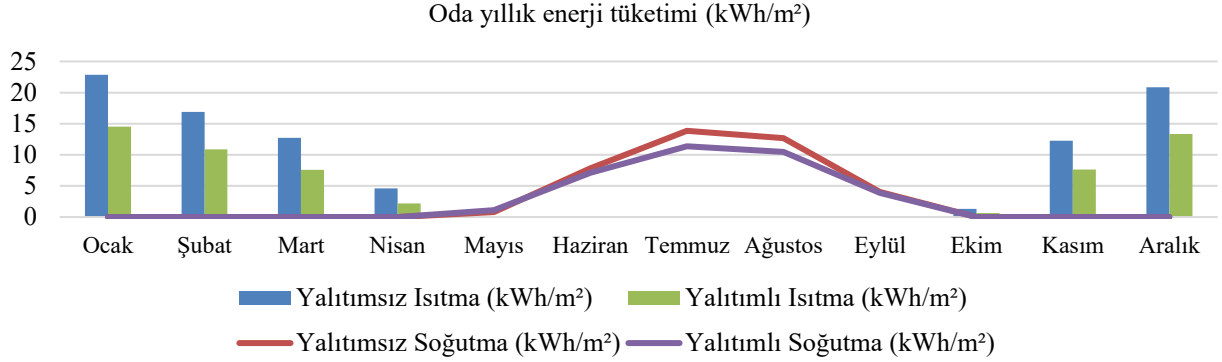
3. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Birinci senaryonun ilk aşamasında binanın yalıtımsız ve güneye yönelen mevcut durumunda soğutma yükü, ısıtma yükü ve karbon salım değerleri analiz edilmiştir. Bu kapsamda odanın birim alan başına yıllık ısıtma amaçlı enerji tüketimi 50,98 kWh/m² iken soğutma amaçlı enerji tüketiminin 46,05 kWh/m² olduğu belirlenmiştir. Yıllık karbon salımı ise 1042,11kg'dır. Balkon duvarına yönelik önerilen 9cm kalınlığındaki XPS yalıtım tabakasının enerji tüketimi ve CO2 salımına etkisi ise ikinci aşamada analiz edilmiştir. Bu kapsamda ısıtma amaçlı enerji tüketiminin %41,25 (29,95 kWh/m²), soğutma amaçlı enerji tüketiminin %9,27 (41,78 kWh/m²), yıllık CO2 salımının ise %15,86 (876,79kg) azaldığı belirlenmiştir (Şekil 3).



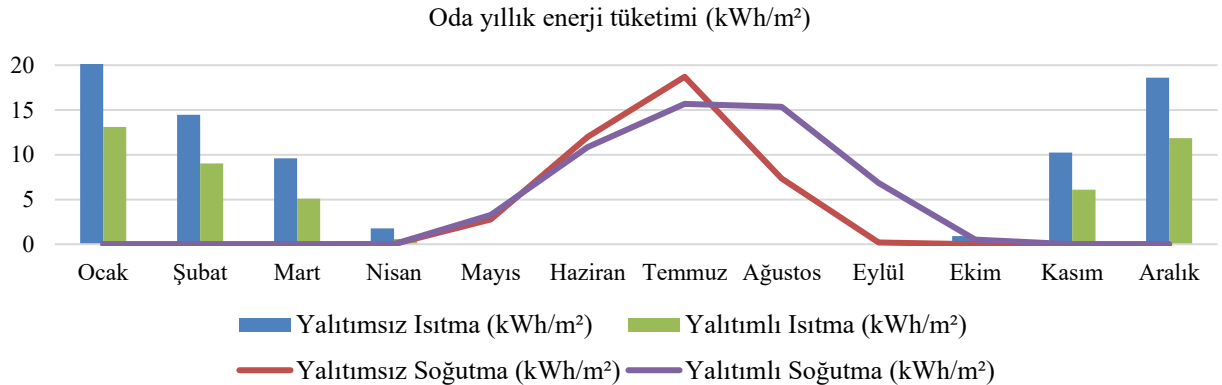
Şekil 3. Güney cephesindeki odanın m² için yıllık ısıtma ve soğutma amaçlı enerji tüketimi

İkinci senaryoda yalıtımsız iç duvara sahip balkonun kuzey cephesine yöneldiği varsayılmıştır. Bu kapsamda birim alan başına yıllık ısıtma amaçlı enerji tüketimi 95,71 kWh/m², soğutma amaçlı enerji tüketimi 37,42 kWh/m² ve yıllık CO₂ salımı ise 1111,61 kg olarak tespit edilmiştir. Senaryonun ikinci aşamasında ise balkon iç duvarına 9cm kalınlığında XPS yalıtım levhası eklendiği farz edilerek oluşturulan senaryo sonucunda ısıtma amaçlı enerji tüketiminde %33,23 (63,90kWh/m²), soğutma amaçlı enerji tüketiminde %11,15 (33,29kWh/m²), CO₂ salımında ise %18,78 (902,81kg) azalma olduğu belirlenmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. Kuzey cephesindeki odanın m² için yıllık ısıtma ve soğutma amaçlı enerji tüketimi

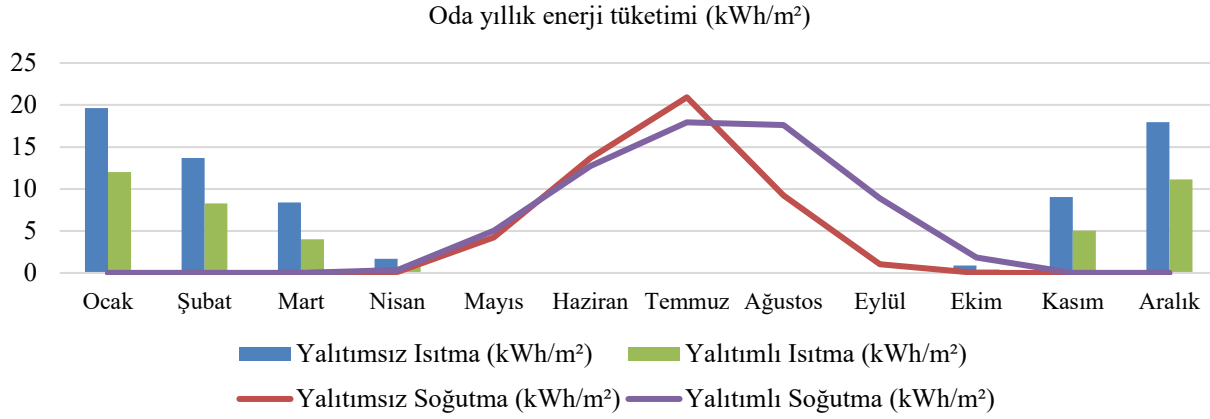
Üçüncü senaryoda çalışma alanı olarak belirlenen balkonun doğu cephesine yöneldiği varsayılmıştır. Yalıtımsız olan balkon iç duvarına yönelik yapılan analizler sonucunda birim alan başına soğutma amaçlı enerji tüketiminin 57,05 kWh/m², ısıtma amaçlı enerji tüketiminin ise 81,08 kWh/m², bunların yanı sıra yıllık CO₂ salımının ise 1312 kg olduğu belirlenmiştir. Balkon iç duvarına 9cm kalınlığında XPS yalıtım levhasının eklendiği varsayımına yönelik yapılan analizler sonucunda ise soğutma amaçlı enerji tüketiminin 51,35kWh/m², ısıtma amaçlı enerji tüketiminin 53,53kWh/m², yıllık toplam CO₂ salımının ise 1096,14kg olduğu belirlenmiştir. Bu kapsamda soğutma yükünün %9,9, ısıtma yükünün %33,97, CO₂ salımının ise %16,45 oranında azaldığı söylenebilir.



Şekil 5. Doğü cephesindeki odanın m² için yıllık ısıtma ve soğutma amaçlı enerji tüketimi

Dördüncü ve son senaryoda yalıtım katmanı bulunmayan balkonun batı cephesine yöneldiği varsayılmıştır. Bu kapsamda odanın birim alan başına yıllık soğutma amaçlı enerji tüketiminin 66,99 kWh/m², ısıtma amaçlı enerji tüketiminin 76,39 kWh/m² ve yıllık CO₂ salımının ise 1426,08

kg olduğu belirlenmiştir. Aynı cephede bulunan balkon iç duvarına 9cm XPS yalıtım tabakasının eklendiği varsayıldığında ısıtma amaçlı enerji tüketiminin %36,03 (48,86kWh/m²), soğutma amaçlı enerji tüketiminin %6 (62,97 kWh/m²) ve CO₂ salımının ise %13,84 (1228,60 kg) azaldığı belirlenmiştir (Şekil 6).



Şekil 6. Batı cephesindeki odanın m² için yıllık ısıtma ve soğutma amaçlı enerji tüketimi

Yalıtımsız iç duvara sahip balkonun dört farklı cephedeki toplam enerji tüketimleri karşılaştırıldığında birim alan başına en düşük enerji tüketiminin 92,93kWh/m² ile güney cephesine yönelen birinci senaryoda meydana geldiği belirlenmiştir. Birim alan başına en yüksek toplam enerji tüketiminin 120,55 kWh/m² ile batı cephesine yöneldiği varsayılan dördüncü senaryoda meydana gelmiştir. Yıllık toplam karbon salım miktarları da enerji tüketimleri ilke doğru orantılı olup cephesinde en düşük batı cephesinde en yüksektir. Tüm senaryolarda 9cm kalınlığında XPS yalıtım katmanı eklendiği farz edilerek toplam enerji tüketimindeki değişimler incelenmiştir. Bu kapsamda enerji tüketimindeki en büyük azalma %30,53 ve %30,24 ile sırasıyla kuzey ve güney cephesine yönelim sağlanan birinci ve ikinci senaryolarda, en küçük değişim ise %12,06 ile batı cephesine yönelim sağlanan senaryoda meydana geldiği belirlenmiştir. Doğu cephesine yönelim sağlanan üçüncü senaryoda ise toplam yıllık enerji tüketiminde %15,79 oranında azalma meydana geldiği tespit edilmiştir.

4. SONUÇ

Bina dış kabuğu, dış ortam ile bağlantılı olduğu için sahip olduğu özellikler iç mekânın iklimlendirmesi için harcanan enerji ve CO₂ salımını doğrudan etkilemektedir. İç mekânın iklimlendirmesini etkileyen en önemli kriterlerden biri dış duvar yalıtımıdır. Binaların yalıtımına yönelik birçok araştırma ve mevzuat hazırlanmasına rağmen yanlış uygulamalardan dolayı dış duvar yalıtımlarının yeterli etkiyi gösterememektedir.

Bu çalışmada Türkiye’de sıklıkla karşılaşılan bir yanlış uygulama örneği olarak balkonların iç duvarlarına yalıtım yapılmamasının iç mekân enerji tüketimi ve CO₂ salımına etkisi araştırılmıştır. Sıcak ve kurak iklimde bulunan Diyarbakır’daki modern bir bina çalışma kapsamına referans bina olarak dahil edilmiştir. Mevcut balkonun aynı binada ve dört farklı cephede olduğu dört farklı senaryo hazırlanmıştır. Her senaryoda balkon iç duvarında yalıtım uygulamasının enerji tüketimi

ve CO2 salımına etkisi Designbuilder yazılımı aracılığı ile analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular yalıtımın olmamasının iç mekân iklimlendirmesinde enerji tüketimi ve CO2 salımını tüm senaryolarda arttırdığı belirlenmiştir. Yalıtım uygulamasının faydaları balkonun bulunduğu cepheye bağlı olarak farklılık göstermektedir. Bu kapsamda enerji tüketimindeki en büyük azalma yaklaşık %30 oranında kuzey ve güney cephesinde, en küçük değişim ise %12,06 ile batı cephesinde meydana gelmiştir. CO2 salımındaki değişim ise enerji tüketimi ile doğru orantılı olup en düşük CO2 salımındaki en büyük değişim oranı %18,78 ile kuzey cephesinde, en düşük değişim oranı ise %13,84 ile batı cephesinde meydana gelmiştir.

Sonuç olarak balkon iç duvarlarında hatalı yalıtım uygulamalarının enerji performansını önemli derecede düşürdüğü belirlenmiştir. Bu kapsamda özellikle bina cepheleri göz önünde bulundurularak yalıtım özelliklerinin belirlenmesi ve uygulanması gerekmektedir. Bu çalışmanın yeni inşa edilecek veya restore edilecek binaların dış kabuğundaki yalıtım uygulamaları için önemli bir rehber olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

1. UNEP, “Buildings and construction”, 2025. Erişim: 12 Ocak 2026. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.unep.org/topics/cities/buildings-and-construction>
2. L. P. Lombard, J. Ortiz, ve C. Pout, “A review on buildings energy consumption information”, *Energy Build.*, c. 40, ss. 394-398, 2007, [Çevrimiçi].
3. F. Kojok, F. Fardoun, R. Younes, ve R. Outbib, “Hybrid cooling systems: A review and an optimized selection scheme”, 01 Kasım 2016, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.rser.2016.06.092.
4. Z. Fang, N. Li, B. Li, G. Luo, ve Y. Huang, “The effect of building envelope insulation on cooling energy consumption in summer”, *Energy Build.*, c. 77, ss. 197-205, Tem. 2014, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2014.03.030.
5. J. Hu ve X. Yu, “Thermo and light-responsive building envelope: Energy analysis under different climate conditions”, *Solar Energy*, c. 193, ss. 866-877, Kas. 2019, doi: 10.1016/J.SOLENER.2019.10.021.
6. A. Sarkar ve S. Bose, “Exploring impact of opaque building envelope components on thermal and energy performance of houses in lower western Himalayans for optimal selection”, *Journal of Building Engineering*, c. 7, ss. 170-182, Eyl. 2016, doi: 10.1016/J.JOBE.2016.06.009.
7. J. Yue, J. Lu, C. Yan, J. Liu, ve Y. Pan, “Dynamic Simulation Analysis of Influencing Factors of Energy Consumption of Public Building Envelope in Central China”, *Sustainability*, c. 15, sy 20, s. 14982, Eki. 2023, doi: 10.3390/SU152014982.
8. W. A. Friess, K. Rakhshan, T. A. Hendawi, ve S. Tajerzadeh, “Wall insulation measures for residential villas in Dubai: A case study in energy efficiency”, *Energy Build.*, c. 44, sy 1, ss. 26-32, Oca. 2012, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2011.10.005.
9. M. Economidou, V. Todeschi, P. Bertoldi, D. D’Agostino, P. Zangheri, ve L. Castellazzi, “Review of 50 years of EU energy efficiency policies for buildings”, *Energy Build.*, c. 225, s. 110322, Eki. 2020, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2020.110322.
10. F. Ozturk Kerestecioğlu, “Reducing Cooling and Heating Loads in Existing Residential Buildings in the Context of Building Envelope: Beykoz-Kanlıca”, *MEGARON / Yıldız Technical University, Faculty of Architecture E-Journal*, 2016, doi: 10.5505/MEGARON.2015.27132.

11. T. Turkish Standards Institution, “Thermal insulation requirements for buildings”, 2013.
12. A. Aïssani, A. Chateaneuf, J. P. Fontaine, ve P. Audebert, “Quantification of workmanship insulation defects and their impact on the thermal performance of building facades”, *Appl. Energy*, c. 165, ss. 272-284, Mar. 2016, doi: 10.1016/J.APENERGY.2015.12.040.
13. I. Nardi, S. Perilli, T. de Rubeis, S. Sfarra, ve D. Ambrosini, “Influence of insulation defects on the thermal performance of walls. An experimental and numerical investigation”, *Journal of Building Engineering*, c. 21, ss. 355-365, Oca. 2019, doi: 10.1016/J.JOBE.2018.10.029.
14. Türkiye Meteoroloji Genel Müdürlüğü, “Diyarbakır iklim verileri”, Cities & Holiday Resorts. Erişim: 08 Aralık 2020. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m=DIYARBAKIR>
15. DesignBuilder, “About DesignBuilder”. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://designbuilder.co.uk/about-us>
16. ASHRAE, “ASHRAE, Guideline 14-2002, Measurement of Energy and Demand Savings”, 2002. Erişim: 13 Haziran 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://124.im/TFrzP>
17. M. Royapoor ve T. Roskilly, “Building model calibration using energy and environmental data”, *Energy Build.*, c. 94, ss. 109-120, May. 2015, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2015.02.050.
18. Turkish Standarts Institute, “TS 825: 2024 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Standardı”, 2024. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: www.izoder.org.tr

ULUSLARARASI YEŞİL BİNA SERTİFİKA SİSTEMLERİ ÜZERİNE BİR DEĞERLENDİRME

Makbule Hande Taş^{1*}

Özlem Sümengen²

^{1,2} Erciyes Üniversitesi Mimarlık Fakültesi
Melikgazi, Kayseri, 38030

ÖZET

Uluslararası sertifika sistemleri zorunlu mevzuatların dışında, çoğunlukla kullanıcı ve uygulayıcı arzına bağlı tercih edilen sistemler olarak yürütülmekle beraber Paris Anlaşması'nın taraf ülkelere yüklediği 2030 emisyon azaltım taahhütleri doğrultusunda yürürlüğe giren enerji performans yönetmelikleri ve bunlara bağlı yaptırımlar, iklim yasaları, kamu-özel sektör sözleşme kriterleri gibi unsurlar nedeniyle bu sistemler birçok ülkede zorunlu hale gelmeye başlamıştır. Bununla birlikte, yeşil bina sertifikasyonlarının yaygınlaşması önünde çeşitli yapısal ve uygulamaya yönelik birtakım sınırlamalar bulunmaktadır. Bazı sertifikasyon sistemlerinin çok katmanlı oluşu, keskin kriterler içermesi, uzman danışmanlığı gerekmesi ile maliyetlerin artması ekonomik yük oluşturmaktadır. Bazı otoritelere göre ise sadece çevresel etkileri kapsayan puanlama sistemleri, sürdürülebilirliğin sosyal, kültürel ve ekonomik parametrelerini sınırlı düzeyde ele almaktadır. Bunun yanında sertifikasyon sistemlerinin yerel koşullara uyarlanmış çeşitli versiyonları geliştirilmiş olsa da bu yerele uyarlanması hedeflenen modellerin yeterliliği de ayrı bir tartışma alanı haline gelmiştir. Son yıllarda ise bu sertifikaların kurumsal pazarlama stratejilerinin bir parçası hâline geldiğine yönelik değerlendirmeler ise greenwashing tartışmalarını da gündeme taşımıştır. Bu çalışma söz konusu eleştirel çerçeveyi temel alarak yeşil bina sertifikasyon sistemlerinin yaygınlaşmasını sınırlayan engellere ilişkin genel bir değerlendirme sunmaktadır.

Anahtar kelimeler: Yeşil Bina Sertifika Sistemleri, Sürdürülebilir Mimari, LEED, BREEAM.

A CRITICAL EVALUATION OF INTERNATIONAL GREEN BUILDING CERTIFICATION SYSTEMS

ABSTRACT

Although international certification systems are generally voluntary and implemented beyond mandatory regulations, they are increasingly becoming essential in many countries due to energy performance regulations, climate laws, and public-private sector requirements introduced in line with the 2030 emission reduction targets of the Paris Agreement. Despite their growing importance, several barriers limit the widespread adoption of green building certification systems. The complexity of certification processes, stringent assessment criteria, the need for specialized consultancy services, and associated costs can create significant economic challenges for stakeholders. In addition, some researchers argue that certification systems mainly emphasize environmental performance while addressing the social, cultural, and economic dimensions of sustainability to a lesser extent. Although localized versions of certification systems have been developed to better reflect regional conditions, their effectiveness and adequacy remain subjects of debate. Furthermore, concerns that certifications are increasingly used as corporate marketing tools have intensified discussions on greenwashing. Within this context, the present study examines the key barriers to the broader implementation of green building certification systems.

Keywords: Green Building Certification Systems, Sustainable architecture, LEED, BREEAM.

^{1*} handebozdogan94@gmail.com

1. GİRİŞ

Yeşil binalar, geleneksel yapılara kıyasla bazı avantajlar sunmaktadır. Bu yapılar; ekosistemlerin ve biyolojik çeşitliliğin korunmasına, katı atık miktarının azaltılmasına, hava ve su kalitesinin iyileştirilmesine, yapıların yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerinin optimize edilmesine, doğal kaynakların sürdürülebilir biçimde kullanılmasına, işletme ve bakım maliyetlerinin düşürülmesine, kullanıcıların genel yaşam kalitesinin artırılmasına ve gayrimenkul değerleri ile ekonomik getirilerin yükseltilmesine katkı sağlamaktadır. Bununla birlikte, yeşil binaların ilk yatırım maliyetlerinin geleneksel projelere kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir. Ancak bakım ve işletme giderleri dikkate alındığında, bu yapıların toplam yaşam döngüsü maliyetlerinin konvansiyonel binalara göre daha düşük olduğu ifade edilmektedir. Bu durum, yeşil binaların ekonomik sürdürülebilirlik açısından da önemli bir avantaj sunduğunu ortaya koymaktadır [1].

Yeşil bina değerlendirme sistemleri ise yeşil mimarlık yaklaşımını ölçülebilir ve karşılaştırılabilir standartlar çerçevesinde tanımlamak amacıyla mimarlar, mühendisler ve yapı sektörüyle ilişkili farklı disiplinlerden uzmanlar tarafından geliştirilmiştir. Bu sistemler; tasarım ekiplerine çevresel sorunlara yönelik çözüm stratejilerini uygulamaya aktarmada rehberlik etmekte, çevresel tasarım ilkelerinin formüle edilmesine yönelik referans çerçevesi sunmakta ve yüksek çevresel performans hedefleyen bina sahiplerine bu çabalarını kanıtlayabilecekleri ortak ve doğrulanabilir hedefler dizisi sağlamaktadır. Sertifika sistemlerinden BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method), 1990'lı yıllarda Birleşik Krallık'ta geliştirilmiştir. Bunu takiben, 1998 yılında Amerika Birleşik Devletleri Yeşil Bina Konseyi (USGBC) tarafından LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) sistemi oluşturulmuş ve yapıların çevresel performansını iyileştirmeye yönelik kapsamlı değerlendirme kriterleri belirlenmiştir. Bunlara ek olarak Avustralya Yeşil Bina Konseyi tarafından geliştirilen Green Star ve Japon Sürdürülebilir Bina Konsorsiyumu tarafından oluşturulan CASBEE gibi sistemler de uluslararası ölçekte kullanılmaktadır. Ancak küresel ölçekte en yaygın uygulanan değerlendirme sistemleri BREEAM ve LEED olarak öne çıkmaktadır [2].

2. AMAÇ VE KAPSAM

Sertifikasyon sistemleri, zorunlu mevzuat düzenlemelerinin dışında yer almakta ve çoğunlukla kullanıcıların ve uygulayıcıların talebine bağlı olarak tercih ve öncelik esasına dayalı biçimde uygulanmaktadır. Ancak Paris Anlaşması ile beraber söz konusu sistemler birçok ülkede giderek zorunlu bir nitelik kazanmaktadır. Buna karşın, yeşil bina sertifikasyon sistemlerinin yaygın biçimde benimsenmesi ve uygulanması sürecinde hem yapısal hem de uygulamaya ilişkin çeşitli kısıtlar ve engeller varlığını sürdürmektedir. Bu çalışmanın amacı, eleştirel bir kuramsal çerçeve temelinde yeşil bina sertifikasyon sistemlerinin yaygınlaşmasını sınırlayan yapısal ve uygulamaya ilişkin kısıtlılıklarla ilgili bir literatür incelemesi yapmak ve bu bağlamdaki yayınlar çerçevesinde eleştirileri tematik başlıklar altında sınıflandıran bir değerlendirme sunmaktır. Bu doğrultuda, literatürde son yıllarda yayımlanan ve sertifikasyon sistemlerinin sınırlılıklarını konu edinen güncel çalışmalar incelenmiş ve analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular; uygulama temelli sınırlılıklar, ekonomik kısıtlar, sertifika sistemlerine ilişkin bilgiye erişim kısıtlılıkları, sosyal ve kültürel boyutun görece sınırlı entegrasyonu, yerel bağlama uyum kısıtlılığı ve *greenwashing* olgusu başlıkları altında sınıflandırılmıştır. Bu araştırma çalışması sonucunda ise çalışmalarda yer verilen kısıtlılıkların azaltılması, çelişkilerin giderilmesi, yöntemsel eksikliklerin ortaya konulması ve değerlendirme kriterlerinin yerel koşullarla uyumlu biçimde yeniden yapılandırılması yönünde

atılacak adımların sürdürülebilirlik sertifikalarının daha geniş bir uygulama alanı bulmasına olanak sağlayacağı öngörülmektedir.

3. ARAŞTIRMA ÇALIŞMASI

Çalışma kapsamında literatürde son yıllarda yayımlanan ve sertifikasyon sistemlerinin sınırlılıklarını kapsayan güncel çalışmalar incelenmiş ve analiz edilmiştir. Çalışmalar incelendiğinde, başta LEED olmak üzere BREEAM, WELL, CASBEE ve Green Star sertifika sistemlerinin ağırlıklı olarak ele alındığı görülmektedir. Bu durum, söz konusu sertifika sistemlerinin uluslararası düzeydeki yaygınlığı ile ilişkilendirilmektedir. Bu bağlamda, araştırma kapsamında yaygın olarak kullanılan sertifika sistemlerine odaklanan literatür çalışmaları, genel ve bütüncül bir değerlendirme sunabilmesi amacıyla tercih edilmiştir. Bu çalışmaların sertifika sistemlerine dair değerlendirmeleri uygulama temelli sınırlılıklar, ekonomik kısıtlar, sertifika sistemlerine ilişkin bilgiye erişim kısıtlılıkları, sosyal ve kültürel boyutun görece sınırlı entegrasyonu, yerel bağlama uyum kısıtlılığı ve greenwashing olgusu başlıkları kapsamında incelenmiştir.

3.1. Uygulama Temelli Sınırlılıklar

Uygulama temelli sınırlılıklar; sertifika sistemlerinin değerlendirme kriterleri, bu kriterlerin sürdürülebilirlik bağlamındaki bütüncüllüğü ve değerlendirme sonuçları ile gerçek kullanım performansı arasındaki farklılıkları kapsamaktadır.

Akşar vd. tarafından Türkiye’de LEED verileri üzerinden gerçekleştirilen çalışmada, 2000–2016 yılları arasında sertifikasyon başvurularının arttığı, ancak 2016 yılındaki sistem güncellemeleri sonrasında belirgin bir düşüş yaşandığı belirtilmektedir. Araştırmacılar, güncellenen kriterlerin yeni teknik ve idari gereklilikler doğurduğunu ve bu durumun uygulama sürecini zorlaştırdığını ifade etmektedir. Ayrıca Türkiye’de ağırlıklı olarak giriş ve orta düzey sertifikaların elde edilmesi, ileri düzey sürdürülebilirlik kriterlerinin uygulamada sınırlı kaldığını göstermektedir [3]. Benzer şekilde Agyekum vd., Gana’da yürüttükleri çalışmada düzenleyici çerçeve eksikliği, yetersiz kurumsal destek ve disiplinler arası koordinasyon gerektiren karmaşık tasarım süreçlerinin sertifikasyon sistemlerinin benimsenmesini zorlaştırdığını ortaya koymuştur [4]. Ísaksdóttir ise BREEAM’in uzun ve karmaşık teknik kılavuzlarının uygulayıcılar açısından önemli bir zorluk oluşturduğunu belirtmektedir [5].

Değerlendirme kriterlerine yönelik eleştirilerden biri, aynı sertifika seviyesine sahip binaların farklı performans gösterebilmesidir. Akşit ve Baştanoğlu, LEED Gold sertifikalı binalar üzerinde yaptıkları çalışmada Avrupa’daki yapıların Türkiye’deki benzerlerine göre daha yüksek enerji performansı sergilediğini belirlemiştir. Bu durum, LEED sisteminde bazı kriterler için zorunlu asgari performans eşiklerinin bulunmamasına bağlanmaktadır. Böylece uygulaması daha kolay kriterlerden puan alınarak yüksek sertifika seviyelerine ulaşılabilen, enerji performansı gibi önemli göstergeler ikinci planda kalabilmektedir [6].

Sertifikasyon sistemlerinin sürdürülebilirliği bütüncül biçimde ele alma kapasitesi de tartışılmaktadır. Al-Jokhadar vd., WELL, LEED ve BREEAM sistemlerini karşılaştırarak özellikle LEED’de sağlık kriterlerinin çevresel performans göstergeleriyle yeterince bütünleşmediğini

ortaya koymuştur [7]. Tsirovasilis vd. ise LEED, BREEAM ve WELL sistemlerinin farklı alanlarda güçlü yönleri sahip olmasına rağmen, enerji performansı, yaşam döngüsü değerlendirmesi ve insan refahını bütüncül biçimde bir araya getirmekte sınırlılıklar taşıdığını belirtmektedir [8]. Benzer şekilde Anyanya vd., mevcut sertifikasyon sistemlerinin operasyonel karbon verimliliğine ağırlık verirken gömülü karbon, malzeme üretimi ve kullanım ömrü sonu etkilerini kapsayan bütün bina yaşam döngüsü değerlendirmelerini yeterince entegre edemediğini ifade etmektedir [9].

Uygulama temelli sınırlılıkların bir diğer boyutu, değerlendirme kriterleri ile gerçek kullanım performansı arasındaki farklılıklardır. Zarghami ve Ahmed, LEED sisteminde kullanıcı refahı, kaynak verimliliği ve alan sürdürülebilirliği gibi alanlarda üstün performans göstermeden de yüksek puanlara ulaşabildiğini ortaya koymuştur. Ayrıca bazı benzer kriterlerin ayrı ayrı puanlandırılması, sistemde “çift sayım etkisi” oluşturarak toplam puanı artırabilmektedir [10]. Tsirovasilis vd. ise kullanım sonrası performans değerlendirmelerinin yetersiz olması nedeniyle tasarım aşamasında öngörülen performans ile gerçek kullanım çıktıları arasında bir “performans açığı” oluştuğunu belirtmektedir [8].

Genel olarak literatür, güncellenen kriterlerin uygulamada teknik ve idari güçlükler yarattığını, ileri düzey sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmanın zorlaştığını, kriterlerin bütüncüllük açısından eksiklikler içerdiğini ve tasarım performansı ile kullanım performansı arasında farklılıklar oluşabildiğini göstermektedir. Bu nedenle uygulama temelli sınırlılıklar, literatürde en sık ele alınan kısıtlılık alanı olarak öne çıkmaktadır.

3.2. Ekonomik Kısıtlar

Ekonomik kısıtlar sertifikasyon süreçlerine ait finansal teşvik ve destek yetersizliği, sertifikasyon sürecinin danışmanlar aracılığıyla yürütülmesinin getirdiği ek maliyetler, sertifika bedellerinin yüksekliği, sertifikasyonlara dair eğitim ve mesleki yeterlilik süreçlerinin maliyetli olması gibi konuları içermektedir.

Akşar vd. çalışmalarında, Türkiye’de LEED sertifikasyon sistemine yönelik başvuruların ölçek ve yatırım kapasitesi ile doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır. Çalışmada küçük ölçekli projelerde başvuru sayısının oldukça düşük olduğu ve bu durumun finansal teşvik ve destek mekanizmalarının yetersizliği ile ilişkili olduğu belirtilmektedir. Sertifikasyon süreçlerinin büyük ölçekli ve kurumsal yatırım projeleriyle sınırlı kaldığı; bireysel konut sahipleri ile küçük ve orta ölçekli işletmelerin sisteme dahil olamadığı tespit edilmektedir [3]. Benzer şekilde Anyanya vd. ise yeşil bina sertifikasyon süreçlerinin maliyet ve zaman boyutuna dikkat çekmektedir. Çalışmada sertifikasyon sürecinin yüksek maliyetli ve zaman alıcı olması, özellikle küçük ölçekli projeler ve sınırlı bütçeye sahip uygulamalar açısından caydırıcı bir unsur olarak değerlendirilmektedir [9].

Sertifika sistemlerinin yaygınlaşmasını etkileyen ekonomik kısıtlılıklardan bir diğeri ise sertifika süreçlerinin danışman aracılığıyla yürütülmesinin ek maliyet oluşturduğu değerlendirmesidir. Agyekum vd. sektördeki paydaşların yeterli bilgi ve eğitim düzeyine sahip olmaması nedeniyle sürecin çoğunlukla danışmanlar aracılığıyla yürütülmesinin ek maliyet oluşturduğu vurgulanmaktadır. Bu durum, sertifikasyon sistemlerinin ekonomik erişilebilirliğini sınırlandıran bir unsur olarak değerlendirilmektedir [4]. Ade ve Rehm çalışmalarında danışmanlık ücretlerinin ek maliyet getirmesine değinirken bununla beraber sertifika bedellerinin yatırımcılar açısından ek

yük oluşturduğunu belirtmektedir. Bu maliyet unsurlarının, özellikle maliyet duyarlı projelerde sertifikasyon sistemlerine yönelimi sınırlayabileceği ifade edilmektedir [11].

Ekonomik kısıtlılıkların farklı bir açıdan değerlendirildiği bir çalışmada Eldib, yeşil bina sertifikasyon sistemlerinin değerlendiricilerine yönelik yürüttüğü SWOT analizi kapsamında, özellikle uluslararası sistemlerde sertifikasyonlara dair eğitim ve mesleki yeterlilik süreçlerinin maliyetli olmasının profesyonellerin sisteme katılımını sınırladığını ifade etmektedir [12].

Bu çalışmalara göre finansal teşvik ve destek yetersizliği, danışman ihtiyacının ek maliyeti, sertifika bedelleri, eğitim süreçlerinin masraflı olması sebebiyle profesyonellerin sisteme katılımının etkilenmesi gibi ekonomik nedenlerin sertifika sistemlerinin yaygınlaşması önünde önemli bir engel olduğu görülmektedir. Güncel akademik çalışmalar incelendiğinde, ekonomik kısıtlılıkların, sosyal ve kültürel boyutun görece sınırlı entegrasyonu başlığıyla birlikte en sık ele alınan ikinci kısıtlılık alanı olduğu görülmektedir.

3.3. Sertifika Sistemlerine İlişkin Bilgiye Erişim Kısıtlılıkları

Agyekum vd. çalışmalarında, yeşil bina değerlendirme sistemlerine ilişkin veri tabanı eksikliği ve değerlendirilen ürünlere yönelik erişilebilir ve güvenilir bilgi kaynaklarının sınırlı olması önemli bir engel olarak tanımlanmaktadır. Sertifikasyon sistemlerine ilişkin şeffaf ve sistematik veri üretiminin yetersizliği, karar vericilerin ve uygulayıcıların süreci değerlendirmesini güçleştirmektedir. Bunun yanı sıra sektördeki paydaşların sertifikasyon sistemlerine ilişkin bilgi ve eğitim düzeylerinin sınırlı olması, sistemin yaygınlaşmasını doğrudan etkilemektedir. Bu durum, bilgi altyapısının güçlendirilmesinin sertifikasyon sistemlerinin benimsenmesi açısından kritik bir unsur olduğunu göstermektedir [4]. Akşar vd. ise Agyekum vd. çalışmalarına benzer şekilde sürdürülebilirlik kriterlerinin daha ileri düzeyde uygulanmasına yönelik teknik bilgi, uzmanlık ve kurumsal farkındalığın sınırlı olabileceğine işaret etmektedir. Bu duruma gerekçe olarak ise çalışmalarında Türkiye’de gold ve silver düzey sertifikasyonun platinium düzeye göre daha sık başvuru aldığını göstermektedir. Bu başvuru sayısını ise platinium sertifikasyon gerekliliklerinin daha bütüncül ve derinlikli sürdürülebilirlik kriterleri içermesi ve bu kriterlere dair bilgi ve eğitim düzeyinin kısıtlı olması ile ilişkilendirmektedir. Bu bağlamda, sertifikasyon sistemlerine ilişkin bilgi ve uygulama kapasitesinin geliştirilmesi gerekliliği ifade etmektedir [3]. Bu çalışmalar doğrultusunda sertifika sistemlere ilişkin bilgiye erişim kısıtlılıklarının veri tabanı ve güvenilir bilgi kaynaklarının sınırlılığından kaynaklandığı görülmektedir. Sertifika sistemlerine ilişkin en güvenilir bilgi kaynaklarının resmi rehberler olması ve bu bilgilere çoğunlukla danışmanlar aracılığıyla erişilebilmesi, sertifika ücretleri ile danışmanlık maliyetlerinin bilgiye erişim açısından önemli bir kısıt oluşturmaya neden olmaktadır. Ayrıca bilgiye erişim kısıtlılıklarını konu alan çalışmalar teknik bilgi eksikliğine de dikkat çekmektedir. Ancak bu bağlamda sertifika sistemlerine ilişkin bilgiye erişim kısıtlılıklarının ise güncel akademik çalışmalarda, ele alınan tematik başlıklar arasında en az incelenen alan olduğu görülmektedir.

3.4. Sosyal ve Kültürel Boyutun Görece Sınırlı Entegrasyonu

Sosyal ve kültürel boyutun görece sınırlı entegrasyonu başlığı yeşil bina sertifika sistemlerinde sürdürülebilirliğin sosyal ve kültürel boyutunun, çevresel boyuta göre sınırlı temsiline dair değerlendirmeleri ele almaktadır.

Al-Jokhadar vd. araştırmalarında, BREEAM, WELL ve LEED sertifikasyon sistemlerinin de sosyal eşitlik boyutunda sınırlı performans sergilediğini ortaya koymaktadır. Sertifikasyon sistemlerinin ağırlıklı olarak çevresel performans ve sağlık kriterlerine odaklandığı; ancak sosyal adalet, erişilebilirlik ve toplumsal kapsayıcılık gibi sürdürülebilirliğin sosyal boyutunu oluşturan unsurların sınırlı düzeyde temsil edildiği belirlenmiştir. Bu bulgu, sürdürülebilirliğin l yapısında (evresel–ekonomik–sosyal) sosyal ve kültürel boyutun ikincil konumda kaldığını göstermekte; sertifikasyon sistemlerinin sürdürülebilirliği bütüncül bir toplumsal dönüşüm aracı olarak ele almakta yetersiz kaldığına işaret etmektedir [7]. Florez vd. ise kültür, konfor, sağlık ve esenlik gibi sosyal içerikli faktörlerin sertifikasyon sistemlerinin güncellenmiş versiyonlarında artış gösterdiğini belirtmektedir. Bununla birlikte söz konusu kriterlerin toplam değerlendirme içindeki ağırlığının hlen sınırlı düzeyde kaldığı ifade edilmektedir. Bu bulgu, sürdürülebilirliğin sosyal boyutunun sertifikasyon sistemlerinde artan bir görünürlük kazanmakla birlikte çevresel kriterlere kıyasla daha düşük ağırlıkta temsil edildiğini göstermektedir [13]. Anyanya vd. alışmalarında sertifikasyon sistemlerinin büyük ölçüde teknik ve çevresel göstergelere odaklandığı; kültürel pratikler ve toplumsal bağlama ilişkin değişkenlerin değerlendirme çerçevesinde sınırlı yer bulduğu belirtilmektedir. Ayrıca “kutucuk işaretleme” (checklist) yaklaşımının yapının gerçek performansını ve kullanıcı deneyimini tam olarak yansıtmayabileceği ifade edilmektedir. Bu durum, sürdürülebilirliğin sosyal boyutunun performans değerlendirme süreçlerinde ikincil konumda kalabileceğine işaret etmektedir [9]. Gonzalo vd. araştırmalarında ise bütünlük açısından sürdürülebilirliğin çevresel, sosyal ve ekonomik boyutların birlikte ele alındığı; ancak sertifika sistemlerinin kriter dağılımında çevresel göstergelerin ağırlıklı olduğu belirtilmektedir [14]. Ade ve Rehm, sertifika sistemlerinde kullanıcı katılımının sınırlı düzeyde ele alındığını ve değerlendirme süreçlerinin çoğunlukla tasarım aşamasındaki öngörüler üzerinden yürütüldüğünü belirtmektedir. Kullanıcı davranışlarının bina performansı üzerindeki belirleyici etkisine rağmen, bu değişkenlerin derecelendirme sistemlerinde yeterince temsil edilmemesi, sürdürülebilirliğin sosyal boyutunun görece ikincil konumda kaldığını göstermektedir [11]. Eldib, uluslararası sertifikasyon sistemleri kapsamında yetiştirilen değerlendiricilerin yüksek teknik yeterliliğe sahip olduğunu; enerji modelleme yazılımları ve yaşam döngüsü analizi gibi ileri düzey mühendislik araçlarını etkin biçimde kullanabildiklerini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte değerlendirici eğitimlerinin büyük ölçüde teknik ve çevresel performans göstergelerine odaklandığı, sosyal ve kültürel bağlama ilişkin değerlendirme kapasitesinin daha sınırlı kalabildiği belirtilmektedir. Bu durum, sürdürülebilirliğin sosyal boyutunun uygulama sürecinde teknik kriterlere kıyasla daha düşük görünürlük kazanabileceğine işaret etmektedir [12].

Bu çalışmalara göre, sosyal ve kültürel boyutun görece sınırlı entegrasyonu başlığının ekonomik kısıtlılıklar başlığıyla birlikte en sık ele alınan ikinci kısıtlılık alanı olduğu görülmektedir. Bu çalışmaların ortak eleştirisi, sosyal, kültürel ve bağlamsal boyutların kriter setleri içerisinde yeterince yer almamasının, sertifika sistemlerini büyük ölçüde teknik performans göstergelerine indirgediği yönündedir. Bu durumun ise söz konusu sertifika sistemlerinin yaygınlaşması ve benimsenmesinin önünde sınırlayıcı bir etken oluşturabildiği değerlendirilmektedir. Ayrıca sosyal ve kültürel boyutun görece sınırlı entegrasyonu ile ilişkili alt başlıkların uygulama temelli kısıtlılıklardan kriterlerin sürdürülebilirlik bağlamında bütüncüllük yönüyle sınırlı olmasından kaynaklandığı görülmektedir.

3.5. Yerel Bağlama Uyum Kısıtlılığı

Yerel bağlama uyum kısıtlılığı başlığı sertifikasyon sistemlerinin standartlaşmış kriterlerinin yerel bağlamla uyum kısıtlılıkları, değerlendiricilerin eğitim biçimlerinin küresel kriterler içermesi sebebiyle yerel bağlam hakkındaki değerlendirme eksiklikleri gibi konular ele almaktadır.

Florez vd. çalışmasında sertifikasyon sistemlerinin küresel ölçekte yaygınlık kazandığını ve farklı ülkelerde uygulandığı belirtilmekle birlikte, değerlendirme kriterlerinin büyük ölçüde standartlaştırılmış çerçeveler üzerinden yapılandırıldığı ifade etmektedir. Bu durum, farklı coğrafi, kültürel ve iklimsel bağlamlara uyum kapasitesinin sınırlı olabileceğine işaret etmektedir [13]. Benzer şekilde Anyanya vd. sertifikasyon sistemlerinin iklim, doğal kaynaklar ve kültürel uygulamalar bakımından bölgesel farklılıkları yeterince dikkate almayan genel kriterler üzerinden yapılandırıldığı belirtilmektedir. Bu durumun, yerel koşullara tam olarak karşılık vermeyen standartlaştırılmış çözümler üretebileceğini ifade edilmektedir [9].

Eldib, küresel çerçeveler doğrultusunda eğitilmiş değerlendiricilerin, bölgeye özgü yapım teknikleri, yerel iklim koşulları ve kültürel faktörler konusunda yeterli bağlamsal bilgiye sahip olmayabileceğini belirtmektedir. Uluslararası standartlara dayalı değerlendirme yaklaşımının, yerel bilgi ve uygulama pratikleriyle tam uyum sağlayamadığı durumlar olabilmektedir [12].

Bu çalışmalara göre yerel bağlama uyum kısıtlılığı, sosyal ve kültürel boyutun görece sınırlı entegrasyonu teması ile doğrudan ilişkilidir. Florez vd., Anyanya vd., ve Eldib çalışmalarında bölgeye özgü kriterlerin değerlendirme sisteminde yer almasının gerekliliğine vurgu yapmaktadır.

3.6. Greenwashing Olgusu

Greenwashing olgusunu ele alan üç çalışmada performans açığı, kriterlerin yanıltıcılığı, alternatif kriterlerle sürdürülebilirlik sertifikalarının alınabilmesi gibi konularını ele almaktadır.

Tsirovasilis vd. sertifikasyon sistemlerinin kuralcı kontrol listeleri üzerinden yapılandırılmış değerlendirme mekanizmalarının zamanla küresel yönetişimin stratejik araçlarına dönüştüğü belirtmektedir. Bu durum, sertifikasyonun yalnızca teknik bir performans aracı olmanın ötesine geçerek sembolik bir meşruiyet üretim mekanizması olarak işlev görebileceğine işaret etmektedir. Bu bağlamda çalışma, sertifikasyon sistemlerinin greenwashing tartışmaları çerçevesinde ele alınabileceğine yönelik eleştirel bir zemin sunmaktadır [8].

Akşit ve Baştanoğlu ise uygulama temelli sınırlılıklar başlığında da ifade edilen çalışmalarının sonucunda enerji verimliliği yüksek olmayan bir binanın diğer kriterleri karşılamadığı halde yalnızca sertifika edinmiş olduğu için yüksek verimli bir yapı gibi algılanmasının gayrimenkul sektöründe sertifikalı bir binada beklenen özelliklere ilişkin karışıklığa ve belirsizliğe yol açtığını belirtmektedirler. Bu durumun sertifika sistemlerine ilişkin güvensizlik ve greenwashing tartışmalarının önünü açtığını söylemektedirler [6].

Zarghami ve Ahmed, çalışmalarında LEED'in belirli kategorilerde sistemik eksiklikler bulunmasına rağmen farklı değerlendirme kriteri kombinasyonları aracılığıyla yüksek puan elde edilebilmesi, sertifikasyonun performansın bütüncül niteliğinden öte puan optimizasyonuna dayanabileceğini söylemektedir. Araştırmada "çift sayım etkisi" olarak adlandırılan kredi yapısının

sertifikasyona erişimi kolaylaştırdığı, ancak aynı zamanda sertifikanın temsil ettiği performans düzeyine ilişkin soru işaretleri doğurabileceği ifade edilmektedir. Bu bağlamda çalışma, sertifikasyon sistemlerinin performans temsili ile pazarlanabilirlik arasındaki gerilimi görünür kılmakta ve literatürde greenwashing tartışmalarıyla ilişkilendirilebilecek eleştirel bir zemin sunmaktadır [10].

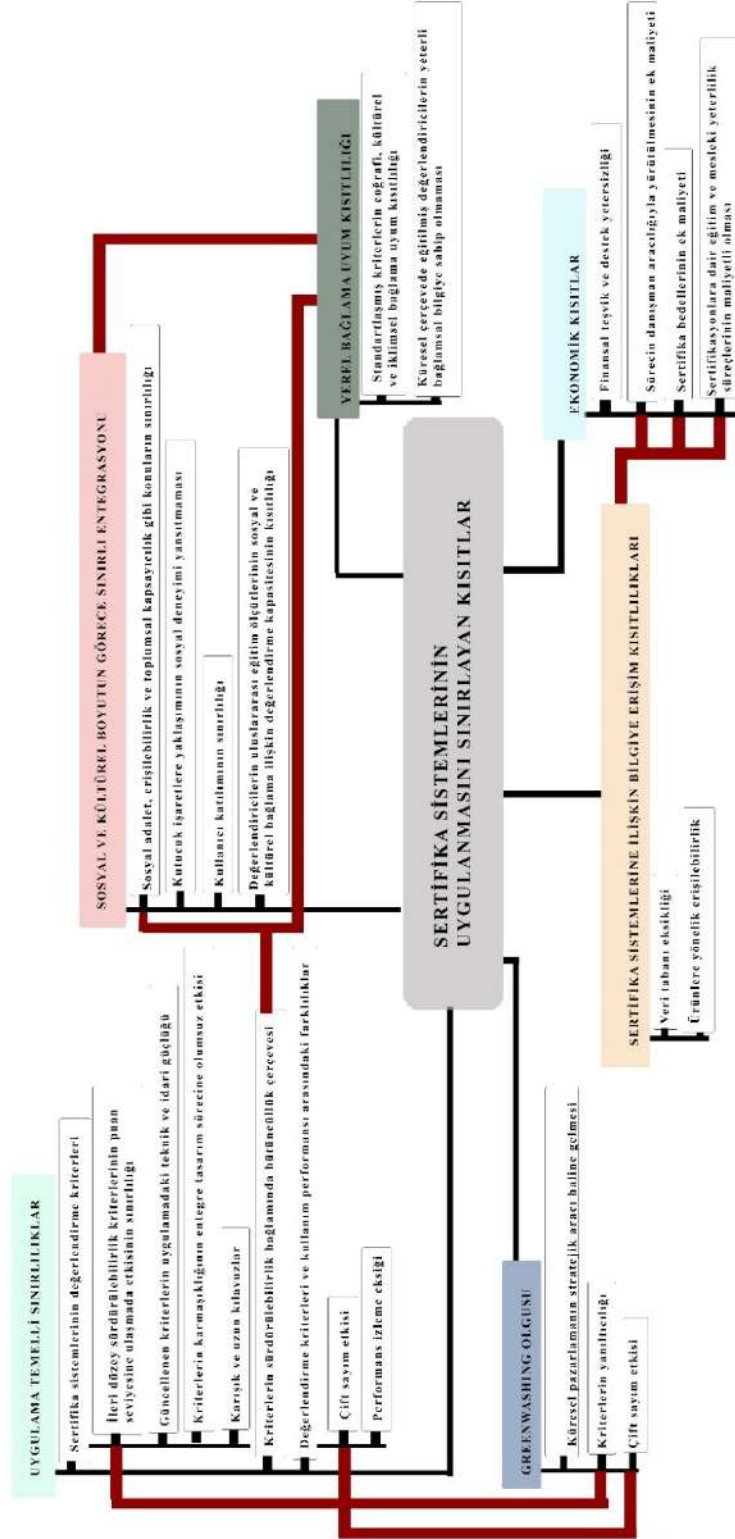
Bu araştırmalara göre ele alınan konular bakımından uygulama temelli sınırlılıklar ile benzer bir kapsamda değerlendirilmesi nedeniyle greenwashing olgusu, uygulama temelli sınırlılıklar ile ilişkilidir.

4. DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Uygulama temelli sınırlılıklar, sertifika sistemlerinin değerlendirme kriterlerinin niteliği, sürdürülebilirliğin bütüncül ele alınma düzeyi ve tasarım aşamasında sağlanan kriterlerle kullanım sürecindeki performans arasındaki uyumsuzluk gibi konuları kapsamaktadır. Ekonomik kısıtlar ise sertifikasyon süreçlerinde finansal teşvik ve destek mekanizmalarının yetersizliği, sürecin çoğunlukla danışmanlık hizmetleri aracılığıyla yürütülmesinin yarattığı ek maliyetler ve değerlendirme sistemlerinde ekonomik boyutun sınırlı temsili gibi hususlarla ilişkilidir. Sertifika sistemlerine ilişkin bilgiye erişim kısıtlılıkları; ileri düzey uygulamalar için gerekli teknik uzmanlığın ve kurumsal farkındalığın sınırlı olması, güvenilir veri tabanı eksiklikleri ve sektör paydaşlarının eğitim düzeyindeki yetersizlikler üzerinden değerlendirilmektedir. Sosyal ve kültürel boyutun görece sınırlı entegrasyonu başlığı altında ise sürdürülebilirliğin çevresel boyutuna kıyasla sosyal ve kültürel göstergelerin sertifikasyon sistemlerinde daha zayıf temsil edildiği vurgulanmaktadır. Yerel bağlama uyum sorunu, sertifikasyon sistemlerinin standartlaşmış kriterlerinin farklı coğrafi ve sosyo-ekonomik koşullara yeterince uyarlanamaması, değerlendiricilerin çoğunlukla küresel ölçekte tanımlanmış ölçütler üzerinden eğitim almaları nedeniyle yerel bağlamı yorumlama kapasitesinin sınırlı kalması gibi konuları içermektedir. Greenwashing olgusu kapsamında ise kontrol listesi temelli değerlendirme mekanizmalarının zamanla stratejik pazarlama araçlarına dönüşebilmesi, çift sayım etkisi, enerji verimliliği gibi temel sürdürülebilirlik göstergeleri yerine alternatif kriterlerle sertifika elde edilebilmesinin yanıltıcı sonuçlar doğurması gibi eleştiriler öne çıkmaktadır. Ayrıca çalışma sonucunda greenwashing olgusunun uygulama temelli kısıtlılıklardan sertifika sistemlerinin değerlendirme kriterleri ile doğrudan ilişkili olduğu, sosyal ve kültürel boyutun görece sınırlı entegrasyonunun kriterlerin sürdürülebilirlik bağlamında bütüncüllük çerçevesine uygun olmamasından kaynaklandığı ve aynı zamanda sosyal ve kültürel boyutun görece sınırlı entegrasyonunun yerel bağlama uyum kısıtlılıkları meydana getirdiği değerlendirmelerine varılmıştır (**Şekil 1**).

Bu bağlamda, çalışmada ortaya konulan kısıtlılıkların azaltılması, yöntemsel çelişkilerin giderilmesi ve değerlendirme kriterlerinin yerel koşullarla uyumlu biçimde yeniden yapılandırılması yönünde atılacak adımların, sürdürülebilirlik sertifikasyon sistemlerinin daha geniş ve etkili bir uygulama alanı bulmasına katkı sağlayacağı öngörülmektedir. Çalışmanın kısıtları bakımından değerlendirildiğinde, analiz edilen literatürün önemli bir bölümünün LEED sertifika sistemine odaklandığı görülmektedir. LEED'in küresel ölçekte yaygın kullanımı, akademik çalışmalarda da baskın biçimde ele alınmasına neden olmuştur. Buna karşılık, BREEAM ve WELL sertifika sistemlerinin literatürde LEED çalışmalarına göre daha kısıtlı ele alındığı görülmüştür. Bu nedenle çalışma, sertifika sistemlerine yönelik genel bir değerlendirme sunmakla

birlikte, her bir sistemin kendi bağlamı içinde daha kapsamlı ve karşılaştırmalı analizlerle ele alınması gerekmektedir.



Şekil 1. Sertifika sistemlerinin uygulanmasını sınırlayan kısıtlara ait diyagram.

5. KAYNAKLAR

1. Güzelkocar, O. ve Gelişen, G. (2019). Mevcut yapıların sürdürülebilir yeşil binalara dönüştürülmesi. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, 2(2), 76–90.
2. Kobaş, B. (2011). *Oluşturulmakta olan Türk yeşil bina değerlendirme sisteminin malzeme kategorisi için BREEAM ve LEED örneklerinin incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
3. Akşar, S. (2025). Türkiye’de yeşil bina sertifikasyonu: LEED verileri üzerinden bir değerlendirme. *Sürdürülebilir Mühendislik Uygulamaları ve Teknolojik Gelişmeler Dergisi*, 8(1), 45–60. <https://doi.org/10.51764/smutgd.1668796>
4. Agyekum, K., Adinyira, E., Baiden, B., Ampratwum, G. ve Duah, D. (2019). Barriers to the adoption of green certification of buildings: A thematic analysis of verbatim comments from built environment professionals. *Smart and Sustainable Built Environment*, 8(2), 1035–1053. <https://doi.org/10.1108/SASBE-01-2019-0007>
5. Ísaksdóttir, G. H. (2023). *Analysing the costs and benefits of green building certifications: A study on stakeholder experience of using BREEAM and the Nordic Swan in Iceland* (Master’s thesis). University of Iceland, Faculty of Civil and Environmental Engineering.
6. Akşit, Ş. F., ve Baştanoğlu, E. (2021). A review of LEED green building certification systems in Europe and Turkey. *ITU A|Z*, 18(1), 115–126.
7. Al-Jokhadar, A., Soudi, Y. ve Alnusairat, S. (2025). Beyond green buildings: How green certification systems contribute to the dual imperative of environmental and well-being outcomes through the lens of SDGs. *Archnet-IJAR: International Journal of Architectural Research*.
8. Tsirovasilis, E., Katafygiotou, M. ve Psathiti, C. (2025). Comparative assessment of LEED, BREEAM, and WELL: Advancing sustainable built environments. *Energies*, 18, Article 4322. <https://doi.org/10.3390/en18164322>
9. Anyanya, D., Paulillo, A., Fiorini, S., ve Lettieri, P. (2025). Evaluating sustainable building assessment systems: A comparative analysis of GBRS and WBLCA. *Frontiers in Built Environment*, 11, Article 1550733. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2025.1550733>
10. Zarghami, S. A., ve Ahmad, T. (2025). Empirical evaluation of the LEED green building rating system: Exploring limitations through configurational analysis. *Building Research & Information*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1080/09613218.2025.2541834>
11. Ade, R. ve Rehm, M. (2020). Yeşil bina derecelendirme araçlarının yazılmamış tarihi: “Kurucu babalardan” bazılarının kişisel bakış açısı. *Bina Araştırma ve Bilgi*, 48(1), 1–17. <https://doi.org/10.1080/09613218.2019.1627179>
12. Eldib, H. E. S. H. A. (2025). Global and local approaches to energy efficiency in green building certifications: A comparative analytical study. *International Design Journal*, 15(2), 587–603.
13. Flórez, L., Castro-Lacouture, D., ve Sefair, J. A. (2020). “Measuring sustainability in construction projects: A review of sustainability certification systems and their economic implications.” *Sustainability*, 12(3), 1–20.
14. Gonzalo, M., Jorge-Ortiz, A., & Bovea, M. D. (2022). How are indicators in green building rating systems addressing sustainability dimensions and life cycle frameworks in residential buildings? *Environmental Impact Assessment Review*, 95, 106793. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106793>

BİNALARDA ZAMANSAL ENERJİ DAYANIKLILIĞI: PASİF TASARIM STRATEJİLERİNİN UZUN DÖNEMLİ DEĞERLENDİRMESİ

Gökçe Tomrukcu^{1*}
Aslıhan Ünlü²

¹ Graduate School of Engineering and Science, Department of Architecture, Ozyegin University, Istanbul, Turkey

² Faculty of Architecture and Design, Department of Architecture, Ozyegin University, Istanbul, Turkey

ÖZET

Binalar, yüksek enerji tüketimleri ve sera gazı emisyonlarındaki payları nedeniyle iklime uyum sürecinde kritik bir role sahiptir. Ancak bina enerji performansı çoğunlukla sabit iklim koşulları altında, anlık verimlilik göstergeleri üzerinden değerlendirilmektedir. Oysa iklim değişikliği, bina enerji performansının zaman içerisindeki davranışını da belirleyici hale getirmektedir. Bu çalışma, pasif tasarım stratejilerinin uzun dönemli performansını değerlendirmek üzere “zamansal enerji dayanıklılığı” kavramını önermektedir. Çalışma kapsamında, İstanbul iklim bölgesinde yer alan bir konut yapısı için kalibre edilmiş dinamik bir enerji modeli oluşturulmuş ve simülasyonlar IESVE yazılımı kullanılarak yürütülmüştür. Farklı iklim senaryoları altında 2020–2080 dönemi için ısıtma, soğutma ve toplam birincil enerji tüketimleri analiz edilmiştir. Farklı pasif bina kabuğu stratejileri karşılaştırılmış; sonuçlar üzerinden performans eğilimleri, adaptasyon katsayısı ve stabilite aralığı göstergeleri hesaplanmıştır. Elde edilen bulgular, bazı pasif stratejilerin kısa vadede etkili görünmesine karşın uzun vadede daha kırılgan hale gelebildiğini, güneş kazançlarını da kontrol eden bütüncül yaklaşımların ise daha yüksek zamansal dayanıklılık sunduğunu göstermektedir. Bu yönüyle çalışma, bina enerji performansının zaman boyutu üzerinden değerlendirilmesine yönelik yeni bir metodolojik çerçeve önermektedir.

Anahtar kelimeler: Zamansal Enerji Dayanıklılığı, Pasif Tasarım, Enerji Performansı, Yapı Fiziği, Adaptasyon Katsayısı

TEMPORAL ENERGY RESILIENCE IN BUILDINGS: LONG-TERM EVALUATION OF PASSIVE DESIGN STRATEGIES

ABSTRACT

Buildings play a critical role in climate adaptation due to their high energy consumption and contribution to greenhouse gas emissions. However, building energy performance is mostly evaluated based on instantaneous efficiency indicators under constant climate conditions. Climate change, however, makes the behavior of building energy performance over time a determining factor. This study proposes the concept of "temporal energy resilience" to evaluate the long-term performance of passive design strategies. Within the scope of the study, a calibrated dynamic energy model was created for a residential building located in the Istanbul climate zone, and simulations were carried out using IESVE software. Heating, cooling, and total primary energy consumption were analyzed for the period 2020–2080 under different climate scenarios. Different passive building envelope strategies were compared; performance trends, adaptation coefficient, and stability range indicators were calculated from the results. The findings show that some passive strategies, while appearing effective in the short term, can become more fragile in the long term, while holistic approaches that also control solar gains offer higher temporal resilience. In this respect, the study proposes a new methodological framework for evaluating building energy performance over time.

Keywords: Temporal Energy Resilience, Passive Design, Energy Performance, Building Physics, Adaptation Coefficient

^{1*}Sorumlu yazar e-posta adresi: gokce.tomrukcu@ozu.edu.tr

1. GİRİŞ

Binalar, küresel enerji tüketimi ve sera gazı emisyonlarının önemli bir bölümünden sorumlu olmaları nedeniyle iklim değişikliğiyle mücadele ve uyum politikalarının merkezinde yer almaktadır [1,2]. Yapı sektöründe enerji verimliliğine yönelik çalışmalar uzun yıllardır yalıtım iyileştirmeleri, sistem verimliliği ve yenilenebilir enerji entegrasyonu gibi stratejiler üzerinden ilerlemektedir [3]. Ancak bu çalışmaların büyük bölümü, bina performansını sabit iklim verileri altında ve tekil zaman dilimlerine ait göstergeler üzerinden değerlendirmektedir [4]. Oysa iklim değişikliği, yalnızca ortalama sıcaklık artışı değil, ısıtma ve soğutma yüklerinde zaman içinde kademeli fakat kalıcı bir dönüşüm anlamına gelmektedir [1]. Bu durum, bugün için yüksek performanslı görünen bir pasif çözümün, gelecekte aynı düzeyde etkili kalamayabileceğini göstermektedir. Mevcut literatürde iklim değişikliğinin bina enerji tüketimine etkisini inceleyen çok sayıda çalışma bulunmakla birlikte, bu çalışmaların büyük bölümü farklı gelecek senaryoları altında mutlak enerji tüketimlerini karşılaştırmaya odaklanmaktadır [5,6]. Bu yaklaşım, farklı pasif tasarım stratejilerinin zaman içindeki davranış biçimlerini ve performans kaybı hızlarını ayırt etmekte yetersiz kalmaktadır. Oysa iklime uyumlu tasarım açısından asıl kritik soru, bir çözümün bugün ne kadar iyi olduğundan ziyade, gelecekte ne kadar süreyle “yeterince iyi” kalabildiğidir. Bu bağlamda mühendislik ve ekolojik sistemler literatüründe yaygın olarak kullanılan dayanıklılık (resilience) kavramı, bina enerji performansı açısından zamansal bir bakış açısıyla yeniden ele alınabilir [7]. Bina ölçeğinde enerji dayanıklılığı çoğunlukla ani şoklar ve kısa süreli krizler üzerinden tartışılrsa da, iklim değişikliği bağlamında belirleyici olan, uzun yıllara yayılan yönlü ve kademeli bir çevresel dönüşümdür [1,13]. Bu çalışma, bu boşluktan hareketle, “zamansal enerji dayanıklılığı (temporal energy resilience)” kavramını önermekte ve pasif tasarım stratejilerinin performansını tekil yıllar yerine zaman içindeki performans eğrileri üzerinden değerlendiren bir metodolojik çerçeve sunmaktadır. Bu kapsamda, temsili bir konut binası için geliştirilen farklı bina kabuğu odaklı pasif tasarım senaryoları, RCP4.5 ve RCP8.5 Temsili Konsantrasyon Yolları (Representative Concentration Pathways) altında 2020–2080 dönemi için dinamik enerji simülasyonlarıyla analiz edilmiştir [8]. Böylece pasif stratejilerin yalnızca bugünkü enerji tasarruf potansiyelleri değil, uzun vadeli iklim değişimi karşısındaki dayanıklılıkları da karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

2. BİNA PERFORMANSI VE ZAMANSAL ENERJİ DAYANIKLILIĞI

Bina enerji performansının değerlendirilmesine yönelik yaygın yaklaşımlar, çoğunlukla sabit iklim verileri altında hesaplanan yıllık enerji tüketimi gibi tekil zaman dilimine ait göstergelere dayanmaktadır [4]. Bu yaklaşım, mevcut koşullar altındaki enerji performansını göstermekte yararlı olmakla birlikte, iklim koşullarının zaman içerisindeki evriminin bina performansı üzerindeki etkilerini doğrudan yansıtamamaktadır. İklim değişikliğinin bina performansı üzerindeki etkilerini ele alan çalışmalar, geleceğe yönelik iklim projeksiyonlarının bina enerji simülasyonlarına entegrasyonu yoluyla, özellikle ısıtma-soğutma yüklerindeki uzun dönemli kaymaları ve aşırı ısınma riskindeki artışı ortaya koymuştur [5, 9, 10, 11]. Ancak literatürün büyük bölümü, farklı zaman dilimlerini bağımsız senaryolar olarak ele almakta ve değişimi ağırlıklı olarak mutlak değerler üzerinden karşılaştırmaktadır. Öte yandan, dayanıklılık (resilience) kavramı, sistemlerin dışsal baskılar karşısında işlevlerini sürdürebilme ve uyum sağlayabilme kapasitesini tanımlamaktadır [7,12]. Bina ölçeğinde enerji dayanıklılığı çoğunlukla ani şoklar üzerinden tartışılrsa da, iklim değişikliği bağlamında belirleyici olan, on yıllara yayılan yönlü ve

kademeli bir dönüşümdür [1,13]. Bu nedenle pasif tasarım stratejilerinin değerlendirilmesinde, performansın toparlanma hızından çok, zaman içinde ne kadar süreyle kararlı kaldığı ve değişen koşullara ne ölçüde uyum sağlayabildiği önem kazanmaktadır. Bu çalışmada önerilen “zamansal enerji dayanıklılığı (temporal energy resilience)”, bir binanın veya pasif tasarım stratejisinin değişen iklim koşulları altında enerji performansını uzun süre kabul edilebilir sınırlar içinde sürdürebilme kapasitesi olarak tanımlanmaktadır. Bu yaklaşımda performans, tekil bir yıl yerine zamana bağlı bir davranış eğrisi olarak ele alınmakta; pasif stratejiler (i) performans eğilimi, (ii) adaptasyon kapasitesi ve (iii) stabilite boyutları üzerinden karşılaştırılmaktadır. Bu bakış açısı, pasif tasarım kararlarının yalnızca kısa vadeli verimlilik hedefleriyle değil, uzun vadeli iklim uyumu ve performans sürekliliği perspektifiyle değerlendirilmesine olanak tanımaktadır.

3. YÖNTEM VE DEĞERLENDİRME ÇERÇEVESİ

Bu çalışmada önerilen zamansal enerji dayanıklılığı göstergeleri, üç yerleşik literatür hattının kesişimine dayanmaktadır: (i) bina performansının geleceğe yönelik iklim senaryoları altında zaman içinde anlamlı biçimde değiştiğini ortaya koyan çalışmalar [5,9,10,11]; (ii) sistemlerin uzun dönemli dışsal baskılar altında kabul edilebilir bir performans aralığında kalabilme kapasitesini vurgulayan dayanıklılık (resilience) literatürü [7,12] ve (iii) mühendislik sistemlerinde performansın zaman içindeki değişimini eğilim ve bozulma hızı üzerinden değerlendiren yaklaşımlar. Bu üç çerçeve birleştirilerek, bina enerji performansı zamana bağlı bir davranış eğrisi olarak ele alınmıştır. Bu eğrinin eğimi adaptasyon katsayısı (K_{ad}), performansın kabul edilebilir sınırlar içinde kaldığı zaman aralığı ise stabilite aralığı olarak tanımlanmıştır. Bu iki gösterge birlikte, pasif tasarım stratejilerinin iklim koşullarının şiddetlenmesi karşısındaki uzun dönemli uyum kapasitesini ve performans kararlılığını nicel olarak ifade etmektedir. Bu doğrultuda, kalibre edilmiş bir dinamik bina enerji modeli, RCP4.5 ve RCP8.5 iklim yollarına ait projeksiyonlar ve zamansal performans göstergelerine dayanan bütünlük bir analiz çerçevesi geliştirilmiştir. Önerilen yöntem dört adımdan oluşmaktadır: (i) referans bina modelinin oluşturulması ve kalibrasyonu, (ii) bina kabuğuna yönelik pasif tasarım senaryolarının tanımlanması, (iii) her bir senaryonun 2020–2080 dönemi için farklı iklim yolları altında dinamik simülasyonlarla değerlendirilmesi ve (iv) sonuçların K_{ad} ve stabilite aralığı üzerinden analiz edilmesi. Bu çerçeve, pasif tasarım stratejilerinin yalnızca tekil bir yıldaki performansını değil, zaman içindeki davranış biçimini esas alarak, farklı çözümlerin hangi hızla bozulduğunu ve ne kadar süreyle kabul edilebilir performans sunduğunu karşılaştırmalı olarak değerlendirmeyi mümkün kılmaktadır.

3.1. Referans Bina Modeli ve Kalibrasyon

Bu çalışmada, İstanbul iklim bölgesinde (Beykoz) yer alan iki katlı bir konut yapısını temsil eden bir referans bina modeli oluşturulmuştur. Bina geometrisi, yapı kabuğu özellikleri ve kullanım profilleri mevcut durumu temsil edecek şekilde tanımlanmış; dinamik enerji simülasyonları IESVE yazılımı ile gerçekleştirilmiştir (**Şekil 1**). Modelin gerçeğe yakın sonuçlar üretmesini sağlamak amacıyla, referans model aylık toplam enerji tüketim verileri kullanılarak kalibre edilmiştir. Kalibrasyon sürecinde kullanım programları, iç ısı kazançları, havalandırma/infiltrasyon oranları ve sistem verimleri ayarlanmıştır. Model başarımı, NMBE ve CVRMSE göstergeleri ile değerlendirilmiş ve sonuçların ASHRAE Guideline 14’te önerilen kabul edilebilir hata sınırları içinde kaldığı doğrulanmıştır [14]. Bu doğrultuda elde edilen kalibre edilmiş referans model, pasif

tasarım senaryolarının ve farklı iklim yolları altındaki performanslarının karşılaştırmalı analizi için güvenilir bir referans noktası olarak kullanılmıştır.



Şekil 1. Referans binanın üç boyutlu enerji modelinin oluşturulması

3.2. Referans Bina (Mevcut Durum) Kabuk Özellikleri

Zamansal enerji dayanıklılığını değerlendirebilmek amacıyla, bina kabuğuna ilişkin başlıca pasif tasarım stratejilerini temsil eden parametrik bir senaryo seti oluşturulmuştur. Referans senaryoya ek olarak, yapı kabuğunun hem ısı transferini hem de güneş kazançlarını doğrudan etkileyen üç temel tasarım parametresi üzerinden alternatifler tanımlanmıştır: (i) opak bileşenlerin ısıl performansı (dış duvar, çatı ve döşeme U-değerleri), (ii) pencere sistemlerinin ısıl ve güneş kontrol özellikleri ve (iii) gölgeleme stratejileri (var/yok). Her bir senaryo, IESVE ortamında ilgili yapı elemanlarının ısıl özellikleri güncellenerek modellenmiştir; tüm senaryolarda kullanım profilleri, iç ısı kazançları ve sistem varsayımları sabit tutulmuştur. Böylece gözlenen performans farklarının yalnızca pasif tasarım kararlarından kaynaklanması sağlanmıştır. Bu yaklaşım, her bir tasarım parametresinin tekil ve bileşik etkilerinin enerji performansı ve zamansal dayanıklılık göstergeleri üzerinden karşılaştırılmasına olanak tanımaktadır. Referans bina, İstanbul'daki tipik mevcut konut stokunu temsil edecek şekilde, yalıtımsız veya zayıf yalıtımlı kabuk bileşenlerine ve düşük hava sızdırmazlık performansına sahip olarak tanımlanmıştır (**Çizelge 1**).

Çizelge 1. Referans bina (mevcut durum) bina kabuğu özellikleri

Bina Elemanı	Katman Yapısı (içten dışa)	Toplam Kalınlık (cm)	U-Değeri (W/m ² K)	Açıklama
Dış Duvar	İç sıva (2 cm) + Tuğla (19 cm) + Dış sıva (3 cm)	~24	1.40	Yalıtımsız veya çok zayıf yalıtımlı tipik mevcut bina
Çatı	İç kaplama + Betonarme döşeme (12 cm) + Su yalıtımı + Kiremit	~25	1.90	Isı yalıtımı yok veya çok zayıf
Zemin Döşeme	Seramik + Şap + Betonarme döşeme	~20	1.30	Toprak temaslı, yalıtımsız
Pencere	Çift cam (4-12-4), alüminyum doğrama	—	2.8	Low-e yok, eski tip çift cam
Hava sızdırtısı	—	—	—	Yüksek 1.0–1.5 ach @50Pa eşdeğeri

3.3. Pasif Tasarım ve İklim Senaryolarının Tanımlanması

Pasif tasarım stratejilerinin iklim değişikliği karşısındaki uzun dönemli davranışını incelemek amacıyla, çalışma kapsamında iki farklı iklim yolu kullanılmıştır: orta emisyon senaryosu RCP4.5 ve yüksek emisyon senaryosu RCP8.5. Bu senaryolara ait gelecek iklim dosyaları, CCWorldWeatherGen tabanlı iklim projeksiyonlarından türetilmiştir. Her bir pasif tasarım senaryosu, her iki iklim senaryosu altında simüle edilerek, aynı bina ve aynı tasarım kararlarının yalnızca iklim koşullarındaki değişim nedeniyle nasıl bir performans evrimi gösterdiği analiz edilmiştir (**Çizelge 2**). Değerlendirilen başlıca göstergeler, yıllık ısıtma, soğutma ve toplam (birincil) enerji tüketimleridir. Bu göstergelerin zamansal değişimi, adaptasyon katsayısı (K_{ad}) ve stabilite aralığı metrikleri kullanılarak analiz edilmiştir.

Çizelge 2. Pasif iyileştirme senaryoları

Senaryo Kodu	Senaryo Adı	Dış Duvar (U)	Çatı (U)	Zemin Döşeme (U)	Pencere (U)	g / SHGC	Gölgeleme
REF	Mevcut durum	1.4	1.9	1.3	2.8	0.72	Yok
S1	Duvar iyileştirme	0.60	1.9	1.3	2.8	0.72	Yok
S2	Duvar + çatı iyileştirme	0.60	0.35	1.3	2.8	0.72	Yok
S3	Duvar + çatı + döşeme iyileştirmesi	0.60	0.35	0.45	2.8	0.72	Yok
S4	Bina kabuğu + pencere (Low-E)	0.60	0.35	0.45	1.6	0.50	Yok
S5	Bina kabuğu + pencere + gölgeleme	0.60	0.35	0.45	1.6	0.50	Sabit dış gölgeleme

3.4. Zamansal Enerji Dayanıklılığı Göstergeleri

Her bir pasif tasarım senaryosu için enerji tüketimi zamanın bir fonksiyonu olarak ele alınmış ve $E_s(t)$ ile gösterilmiştir. Bu zaman serileri üzerinden üç tamamlayıcı gösterge tanımlanmıştır. Performans Eğilimi (Trend): Her bir senaryo için enerji tüketimindeki uzun dönemli değişim eğilimi, zaman ekseninde doğrusal bir regresyon ile temsil edilmiştir:

$$E_s(t) = a_s t + b_s \quad (1)$$

Burada a_s , ilgili senaryonun enerji tüketimindeki yıllık değişim hızını (eğimi) ifade etmektedir. Bu katsayı, enerji performansının zaman içinde iyileşen mi yoksa kötüleşen mi bir eğilim izlediğini göstermektedir.

Adaptasyon Katsayısı: İklim koşullarının şiddetlenmesi karşısında performansın ne ölçüde ve ne hızla bozulduğunu karşılaştırmalı olarak değerlendirebilmek amacıyla, her bir senaryo için enerji tüketimi zaman serileri referans yıla ($t_0 = 2020$) göre normalize edilmiştir:

$$E_s^*(t) = \frac{E_s(t)}{E_s(t_0)} \quad (2)$$

Her bir senaryo için adaptasyon katsayısı ($K_{ad,s}$) literatürdeki yıllık ortalama performans kaybı (annual average performance loss) kavramıyla uyumlu olarak, normalize edilmiş enerji tüketimi eğrisinin eğimi olarak tanımlanmıştır [6,10]:

$$K_{ad,s} = \frac{dE_s^*(t)}{dt} \quad (3)$$

Bu çalışmada enerji performansının zamansal evrimi, basitleştirilmiş bir modelleme yaklaşımı kapsamında doğrusal regresyon ile temsil edilmiştir. İklim değişikliğinin doğası gereği doğrusal olmayan karaktere sahip olduğu bilinmekle birlikte, bu çalışmanın amacı kısa dönemli dalgalanmaları veya uç değerleri tahmin etmek değil, bir binanın kullanım ömrü boyunca maruz kalacağı uzun dönemli ortalama performans bozulma eğilimini karşılaştırmalı olarak ortaya koymaktır. Bu nedenle belirtilen $K_{ad,s}$ katsayısı, analiz periyodu boyunca gerçekleşen yıllık ortalama performans kaybını ifade ederek, farklı tasarım stratejilerinin uzun dönemli dayanıklılığını karşılaştırmak için kullanılan birincil performans metriği olarak kabul edilmiştir. Bu tanıma göre, daha düşük K_{ad} değerleri, ilgili pasif stratejinin iklim değişikliği karşısında daha yavaş performans kaybına uğradığını ve dolayısıyla daha yüksek zamansal enerji dayanıklılığı sergilediğini göstermektedir.

Stabilite Aralığı: Stabilite aralığı, bir pasif tasarım stratejisinin enerji performansını kabul edilebilir sınırlar içinde koruyabildiği zaman aralığını temsil etmektedir. Bu çalışmada kabul edilebilir performans bandı, referans yıla göre $\pm\delta$ oranında bir sapma ile tanımlanmıştır:

$$E_s^*(t) \leq 1 + \delta \quad (4)$$

$\delta = 15\%$ eşik değeri, literatürde yüksek performanslı binaları tanımlayan en verimli %15 (top 15% efficiency) ölçütleri ve Avrupa Enerji Performansı Direktifi (EPBD) kapsamındaki birincil enerji tüketimi azaltım hedefleriyle uyumlu olacak şekilde seçilmiştir [15, 16]. Bu değer, binanın mevcut enerji sınıfından bir alt sınıfa düşme riskini temsil eden kritik bir performans eşiği olarak kabul edilmektedir. Bu koşulun ilk kez aşıldığı yıl t_{kritik} olarak tanımlanmış ve stabilite aralığı $[t_0, t_{kritik}]$ biçiminde ifade edilmiştir. Eğer ilgili senaryo analiz süresi boyunca bu eşiği aşmıyorsa, stabilite aralığı tüm analiz periyodunu kapsamaktadır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Model Kalibrasyonu ve Referans Modelin Doğrulanması

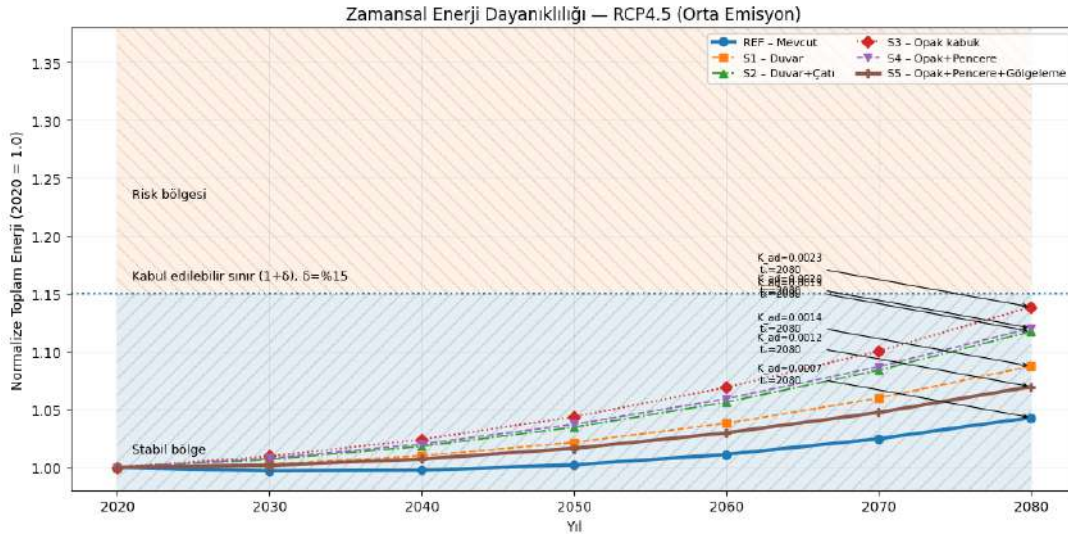
Referans bina modelinin kalibrasyon sonuçları **Çizelge 3**'te sunulmaktadır. Binanın elektrik ve doğalgaz tüketimleri üzerinden yapılan kalibrasyonda, fatura ve simüle edilen yıllık enerji tüketimlerinin karşılaştırılması, modelin hem toplam enerji düzeyini hem de enerji taşıyıcıları arasındaki dağılımı başarılı biçimde temsil ettiğini göstermektedir. Kalibrasyon performansı NMBE ve CVRME göstergeleri ile değerlendirilmiş ve her iki enerji türü için elde edilen değerlerin ASHRAE Guideline 14 sınırları içinde kaldığı doğrulanmıştır.

Çizelge 3. Model kalibrasyon sonuçları

Enerji Türü	Ölçülen (kWh/yıl)	Simüle (kWh/yıl)	Mutlak Fark (kWh/yıl)	NMBE (%)	CVRMSE (%)	ASHRAE Guideline 14
Elektrik	1080	1105	+25	+2.3	8.5	Uygun
Doğalgaz	7200	7050	-150	-2.1	9.2	Uygun
Toplam	8280	8155	-125	-1.5	7.8	Uygun

4.2. Enerji Performansının Zamansal Evrimi: RCP4.5 ve RCP8.5 Karşılaştırması

Pasif tasarım senaryolarının 2020–2080 dönemi boyunca enerji performansındaki zamansal evrimi, normalize edilmiş tüketim verileri üzerinden analiz edilmiştir. Tüm senaryolar için kabul edilebilir performans eşiği $1+\delta=1.15$ ($\delta = \%15$) olarak tanımlanmıştır. RCP4.5 iklim senaryosunda (Şekil 2), tüm stratejiler teknik olarak analiz süresi boyunca stabilite aralığı içinde kalmaktadır ($t_{kritik} > 2080$). Ancak yıllık ortalama performans kaybını ifade eden adaptasyon katsayıları K_{ad} arasında belirgin farklar gözlemlenmiştir. S1–S3 gibi yalnızca opak kabuk iyileştirmelerine odaklanan senaryolar, 0.0019 ile 0.0023 arasında değişen daha yüksek K_{ad} değerleri sergileyerek iklim değişikliği karşısında daha hızlı bir performans bozulması eğilimi göstermektedir. Buna karşılık, güneş kazançlarını kontrol eden S5 senaryosu, en düşük adaptasyon katsayısı ($K_{ad} = 0.0007$) ile en yüksek zamansal dayanıklılığı sunmaktadır.



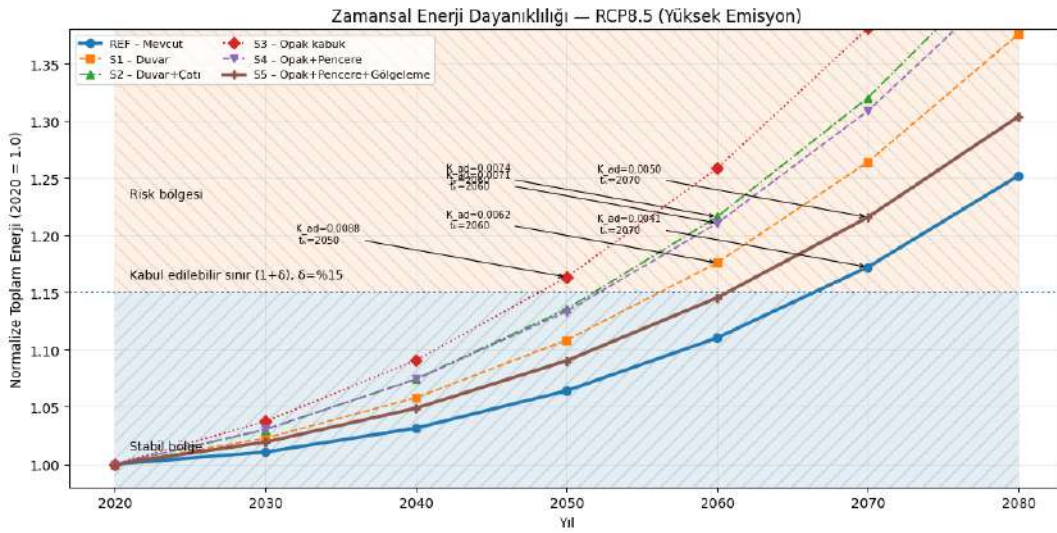
Şekil 2. RCP4.5 senaryosunda pasif tasarım senaryolarının zamansal enerji dayanıklılığı

RCP8.5 senaryosunda (Şekil 3), iklim etkilerinin şiddetlenmesiyle stratejiler arasındaki farklar daha erken ve daha belirgin ortaya çıkmaktadır. S3, en yüksek yıllık ortalama performans kaybını ($K_{ad} = 0.0088$) göstererek yaklaşık 2050 yılında stabilite aralığını kaybetmektedir ($t_{kritik} \approx 2050$). Bu durum, yüksek yalıtımın ısınan iklimde termal hapsolme yaratarak soğutma yüklerini artırdığını doğrulamaktadır. Buna karşılık S5, analiz dönemi boyunca 1.15 eşiğinin altında kalan

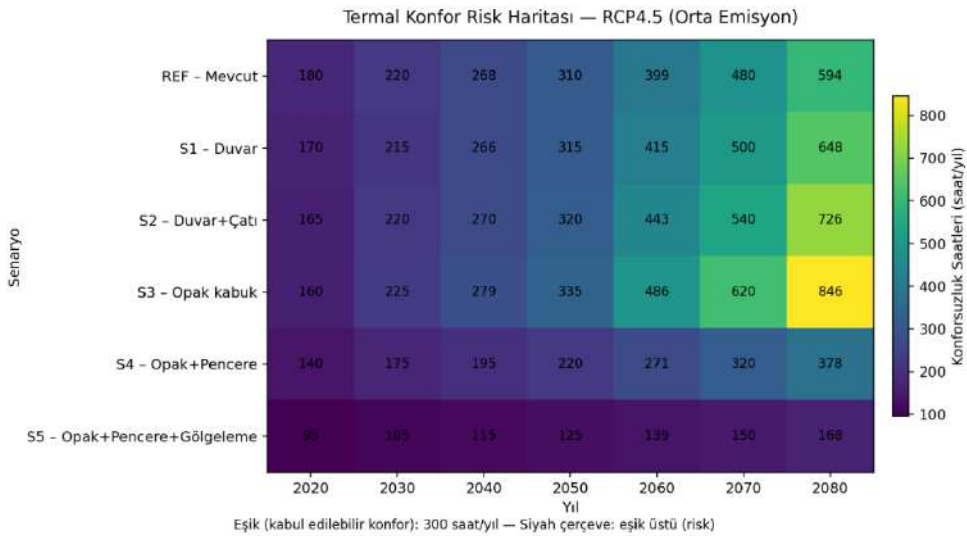
tek senaryo olup, düşük K_{ad} değeri sayesinde yüksek emisyon koşullarında dahi performans kararlılığını korumaktadır. Sonuçlar, bütüncül pasif stratejilerin yalıtım odaklı çözümlere kıyasla daha yüksek zamansal enerji dayanıklılığı sunduğunu göstermektedir.

4.3. Termal Konfor Açısından Zamansal Dayanıklılık

Pasif tasarım stratejilerinin iç mekân konforuna etkileri, yıllık konforsuzluk/aşırı ısınma saatleri üzerinden değerlendirilmiş; 300 saat/yıl üzeri değerler yüksek risk olarak kabul edilmiştir [17]. RCP4.5 senaryosunda (Şekil 4), referans bina ile S1–S3 senaryolarında 2040 sonrasında konforsuzluk saatleri hızla artarken, S3 senaryosu 2080'e doğru belirgin şekilde yüksek risk bölgesine geçmektedir. Buna karşılık S5, tüm dönem boyunca düşük risk seviyesini koruyarak en kararlı konfor performansını sunmaktadır.

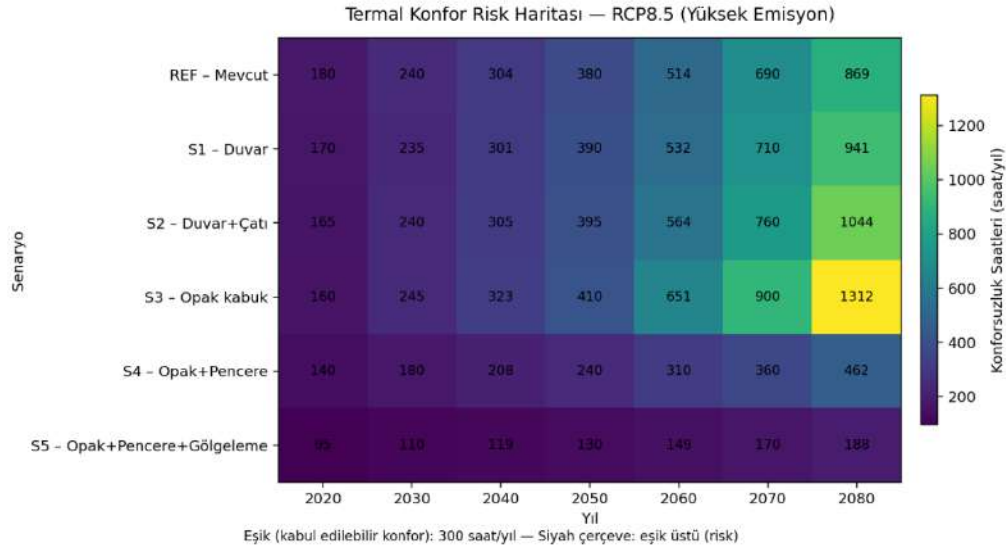


Şekil 3. RCP8.5 senaryosunda pasif tasarım senaryolarının zamansal enerji dayanıklılığı



Şekil 4. RCP4.5 senaryosunda pasif tasarım senaryolarının termal konfor risk haritası

RCP8.5 senaryosunda ise (**Şekil 5**), referans bina ve opak kabuk ağırlıklı çözümlerin çok daha erken dönemde yüksek risk bölgesine geçtiği; özellikle S3 senaryosunun 2060 sonrasında aşırı yüksek konforsuzluk saatlerine ulaştığı gözlemlenmektedir. Bu senaryo 2080 yılına gelindiğinde hem RCP4.5 (846 saat/yıl) hem de RCP8.5 (1312 saat/yıl) altında en yüksek risk grubunda yer almaktadır. Buna karşılık S5 senaryosu, 2080 yılında dahi kabul edilebilir konfor sınırları içinde kalabilen tek senaryo olarak öne çıkmaktadır. Bu strateji ile güneş kazancı yönetimi sayesinde 2080 yılında dahi 300 saat eşiğinin altında kalarak konfor açısından da "zamansal enerji dayanıklılığı" kavramını desteklemektedir. Bu bulgular doğrultusunda, iklim değişikliği bağlamında yalnızca ısı kayıplarını azaltmanın değil, yaz dönemi güneş kazançlarını kontrol etmenin de kritik öneme sahip olduğunu açık biçimde ortaya koymaktadır.



Şekil 5. RCP8.5 senaryosunda pasif tasarım senaryolarının termal konfor risk haritası

Enerji tüketimi ve termal konfor sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, bazı pasif stratejilerin kısa vadeli enerji kazanımlarına rağmen uzun vadede kırılgan hale gelebildiği görülmektedir. Özellikle yalnızca opak kabuk iyileştirmelerine dayanan S3 senaryosu, başlangıçta olumlu performans göstermesine karşın hem RCP4.5 hem de RCP8.5 altında en hızlı performans kaybına uğrayan ve konfor açısından en riskli çözümlerden biri haline gelmektedir. Buna karşılık, pencere performansı ve gölgeleme stratejilerini içeren S5 senaryosu, en düşük adaptasyon katsayısı ve en uzun stabilite aralığı ile en yüksek zamansal enerji dayanıklılığını sunmaktadır. Bu bulgular, pasif tasarım stratejilerinin yalnızca mevcut verimlilikleriyle değil, gelecekteki performans süreklilikleriyle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışma, pasif tasarım stratejilerinin bina enerji performansının iklim değişikliğinin zamansal etkileri çerçevesinde değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu kapsamda, bina performansını zamana bağlı bir davranış olarak ele alan “zamansal enerji dayanıklılığı” kavramı tanımlanmış ve adaptasyon katsayısı (K_{ad}) ile stabilite aralığı göstergelerine dayanan bir

değerlendirme çerçevesi önerilmiştir. İstanbul’da yer alan temsili bir konut yapısı üzerinde RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları altında gerçekleştirilen simülasyonlar, bazı pasif stratejilerin kısa vadede olumlu performans göstermesine karşın uzun vadede enerji tüketimi ve termal konfor açısından kırılgan hale gelebildiğini göstermiştir. Özellikle yalnızca opak kabuk iyileştirmelerine dayanan çözümler yüksek emisyon senaryosunda daha hızlı performans kaybı sergilerken, pencere performansı ve gölgeleme stratejilerini içeren bütüncül yaklaşımlar daha yüksek zamansal enerji dayanıklılığı sunmuştur. Bulgular, pasif tasarım kararlarının uzun vadeli performans sürekliliği ve termal konfor açısından da değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Bu yaklaşım, bina kabuğu tasarımı ve yenileme kararları için uzun vadeli iklim uyumunu merkeze alan bir çerçeve sunmaktadır. Çalışmanın İstanbul iklimi ve temsili bir bina ile sınırlı olması nedeniyle, gelecekte farklı iklim bölgeleri ve bina tiplerinde gerçek kullanım verileriyle doğrulama çalışmalarının yanı sıra maliyet, karbon emisyonları ve uygulanabilirlik boyutlarının değerlendirilmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

1. IPCC. (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report*. Cambridge University Press.
2. IEA. (2023). *Buildings: Tracking clean energy progress*. International Energy Agency. <https://www.iea.org>.
3. Ürge-Vorsatz, D., Cabeza, L. F., Serrano, S., Barreneche, C., & Petrichenko, K. (2015). Heating and cooling energy trends and drivers in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 85–98. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.039>
4. Hong, T., Chou, S. K., & Bong, T. Y. (2000). Building simulation: An overview of developments and information sources. *Building and Environment*, 35, 347–361. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(99\)00023-2](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(99)00023-2)
5. Crawley, D. B. (2008). Estimating the impacts of climate change and urbanization on building performance. *Journal of Building Performance Simulation*, 1(2), 91–115. <https://doi.org/10.1080/19401490802182079>
6. Wang, X., Chen, D., & Ren, Z. (2010). Assessment of climate change impact on residential building heating and cooling energy requirement in Australia. *Building and Environment*, 45, 1663–1682. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.01.022>
7. Meerow, S., Newell, J. P., & Stults, M. (2016). Defining urban resilience: A review. *Landscape and Urban Planning*, 147, 38–49. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.11.011>
8. Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., et al. (2011). The representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change*, 109, 5–31. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>
9. Jentsch, M. F., Bahaj, A. S., & James, P. A. B. (2008). Climate change future proofing of buildings — Generation and assessment of building simulation weather files. *Energy and Buildings*, 40(12), 2148–2168. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.06.005>
10. de Wilde, P., & Coley, D. (2012). The implications of a changing climate for buildings. *Building and Environment*, 55, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.03.014>
11. Eames, M., Kershaw, T., & Coley, D. (2011). On the creation of future weather files for building simulation. *Building Services Engineering Research and Technology*, 32(2), 127–142. <https://doi.org/10.1177/01436244103799>
12. Folke, C. (2006). Resilience: The emergence of a perspective for social–ecological systems analyses. *Global Environmental Change*, 16(3), 253–267. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.04.002>

13. Panteli, M., & Mancarella, P. (2015). The grid: Stronger, bigger, smarter? Presenting a conceptual framework of power system resilience. *IEEE Power and Energy Magazine*, 13(3), 58–66. <https://doi.org/10.1109/MPE.2015.2397334>
14. ASHRAE. (2014). *ASHRAE Guideline 14-2014: Measurement of energy, demand, and water savings*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
15. Technical Working Group (TWG). (2020). *Taxonomy: Final report of the Technical Expert Group on Sustainable Finance*. European Commission.
16. European Parliament and the Council of the EU. (2024). *Directive (EU) 2024/1273 on the energy performance of buildings (recast)*. Official Journal of the European Union.
17. CIBSE. (2017). *TM59: Design methodology for the assessment of overheating risk in homes*. Chartered Institution of Building Services Engineers.

SERALARIN ENERJİ VERİMLİLİĞİ AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

Buğra Çinkır¹
Şule Filiz Akşit²
^{1,2} İTÜ Mimarlık Fakültesi
Taşkışla, Şişli, İstanbul, 34367

ÖZET

Günümüzde artan gıda talebi, iklim değişikliği ve çeşitli çevresel kısıtlamalar geleneksel tarım için engel teşkil ederken; sera sistemleri gibi kontrollü tarım uygulamalarının artmasına yol açmaktadır. Bu uygulamaların; yatırım ve işletme maliyetleri açısından sürdürülebilir bir üretim döngüsü sağlayabilmesi hayati bir önem taşımaktadır. Seralarda işletme maliyetlerinin kritik bir bölümünü oluşturan enerji gereksinimleri, tasarım aşamasındaki mimari kararlar ve malzeme seçimiyle doğrudan ilişkilidir. Bu çalışmanın amacı: seralarda farklı çatı formlarının, saydam kabuk malzemelerinin ve pasif iklimlendirme sistemlerinin ısıtma enerjisi tüketimi üzerindeki etkilerini değerlendirmektir. Bu amaçla, DesingBuilder yazılımı kullanılarak İstanbul iklim koşullarına dayalı ısıtma enerjisi hesapları yapılmıştır. 1 Eylül-31 Mayıs tarihlerini kapsayan ısıtma dönemi için elde edilen simülasyon sonuçları, çatı formlarının, saydam kabuk malzemelerinin ve pasif iklimlendirme sistemlerinin birim ısıtma enerjisi tüketiminin azaltılmasında belirleyici bir rol oynadığını ortaya koymuştur. Sonuçlara bakıldığında, uygun çatı formu, saydam kabuk malzemesi ve pasif iklimlendirme sistemi seçimleri ile ısıtma enerjisi tüketiminde %71,88'e varan oranlarda tasarruf sağlanabileceğini göstermektedir. Bu doğrultuda çalışma, sürdürülebilir ve enerji verimli sera tasarımı için farklı tasarım alternatiflerinin optimize edilmesine yönelik bütüncül bir yaklaşım sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Sera Tasarımı, Enerji Verimliliği, Çatı Formu, Pasif İklimlendirme, Sürdürülebilir Tarım.

EVALUATION OF GREENHOUSES IN TERMS OF ENERGY EFFICIENCY

ABSTRACT

Today, increasing food demand, climate change, and various environmental constraints pose obstacles to traditional agriculture, leading to an increase in controlled agricultural practices such as greenhouse systems. It is vital that these practices provide a sustainable production cycle in terms of investment and operating costs. Energy requirements, which constitute a critical portion of operating costs in greenhouses, are directly related to architectural decisions and material selection during the design phase. The aim of this study is to evaluate the effects of different roof forms, transparent envelope materials, and passive climate control systems on heating energy consumption in greenhouses. For this purpose, heating energy calculations based on Istanbul climate conditions were performed using DesignBuilder software. Simulation results obtained for the heating period covering September 1st to May 31st revealed that roof forms, transparent envelope materials, and passive climate control systems play a decisive role in reducing unit heating energy consumption. The results show that savings of up to 71.88% in heating energy consumption can be achieved with appropriate roof form, transparent envelope material, and passive climate control system selections. Accordingly, this study offers a holistic approach to optimizing different design alternatives for sustainable and energy-efficient greenhouse design.

Keywords: Greenhouse Design, Energy Efficiency, Roof Form, Passive Climatization, Sustainable Agriculture.

¹ e-posta adresi: cinkir15@itu.edu.tr

² e-posta adresi: aksitf@itu.edu.tr

1. GİRİŞ

Dünya genelinde artan nüfus ve iklim değişikliği, kontrollü tarım uygulamalarını gün geçtikçe daha önemli hale getirmektedir. Kontrollü tarım uygulamalarının en başında yer alan sera yapıları, bitki üretimi için optimum iç iklim koşulları sağlayarak yüksek verim ve kaliteli ürünler elde edilmesini mümkün kılan kapalı tarım yapılarıdır. Ancak bu yapıların en büyük dezavantajı, hedeflenen mikro iklim koşullarını korumak için yüksek enerji tüketimi gerektirmeleridir. Isıtma gereksinimleri, seraların toplam enerji tüketiminin en büyük payını oluşturmaktadır [1]. Ülkemizdeki seraların coğrafi dağılımı da bu durumu destekler niteliktedir. Tarım ve Orman Bakanlığı'nın 2024 verilerine göre, Türkiye'deki örtü altı tarım alanlarının yaklaşık %80'i bulundukları enlem nedeniyle ısıtma dönemi kısa olan Adana, Antalya ve Mersin illerinde bulunmaktadır [2]. Örtü altı tarım alanlarının bu bölgelerde yoğunlaşmasının temel sebebi seraların ısıtma enerjisi yüklerinin düşük olmasıdır. Sert iklim koşullarına sahip bölgelerde seraların ısıtma yükünün fazla olmasından dolayı işletmeler ekonomik olarak sürdürülebilir değildir [3]. Bu durumun en net kanıtı, yüksek ısıtma ihtiyacı olan bölgelerde jeotermal enerji kaynaklarının bulunduğu sınırlı alanlarda seracılık faaliyetlerinin yapılmasıdır [3]. Aksi durumlarda, ısıtma amaçlı enerji tüketimi fosil yakıtlarla karşılandığında üretim maliyetini aşırı derecede artıracaktır ve çevresel sürdürülebilirliği doğrudan tehdit edecektir [1]. Bu bağlamda, sera yapılarındaki yüksek ısıtma enerjisi yüklerini en aza indirmek için, enerji verimliliğini artıracak mimari tasarım kararları almak ve pasif iklimlendirme stratejilerini sera yapılarına entegre etmek, farklı iklim bölgelerinde seracılığın yaygın olarak benimsenmesi için temel bir gereklilik haline gelmiştir.

Seralarda enerji verimliliği konusunda yapılan literatür çalışmasında farklı uygulamalar bulunduğu görülmüştür. Bu çalışmaların bazılarında sürdürülebilir sera sistemleri, seralarda enerji tasarrufu stratejileri ve seralarda ısıtma enerjisi yükünü azaltmanın önemini vurgulanmaktadır [4-8]. Seralarda ısıtma enerjisi yükünü azaltmak için aktif ve pasif enerji sistemlerinin birlikte çalışması temel tasarım hedeflerinin arasındadır [1]. İklim verilerine göre sera çatı formunun ve yönlendiriliş durumunun ısıtma enerjisinin verimliliğine farklı etkileri bulunmaktadır; en elverişli çatı formu ve yönlendiriliş durumunun ekonomik olarak yatırım getirisi sağlamaktadır. [7, 8].

2. SERALARIN ÖZELLİKLERİ VE ENERJİ VERİMLİLİĞİ

Bu bölümde öncelikle seraların genel tanımı ve tarihsel gelişimi, sonra ise enerji verimliliği açısından seralarda etkili olan tasarım değişkenleri açıklanmaktadır.

2.1. Seraların Genel Tanımı ve Tarihsel Gelişimi

Seralar, bitki büyümesi için gerekli olan sıcaklık, nem, radyasyon ve hava sirkülasyonu gibi çevresel parametrelerin kontrolüne olanak sağlayan saydam malzemelerle kaplı tarımsal yapılardır. Bu yapılar, ürün yetiştiriciliğini büyük ölçüde dış çevresel koşullardan bağımsız hale getirir. Bu sayede sınırlı iklim koşullarına sahip bölgelerde ve ürün yetişmesine uygun olmayan zaman dilimlerinde de üretimi mümkün kılar [9,10].

Sera yetiştiriciliğinin geçmişine baktığımızda, bitkileri olumsuz çevresel koşullardan korumak için tasarlanmış basit sistemlere dayanmaktadır. Sera yetiştiriciliğinin ilk uygulamaları antik çağa kadar

uzanmaktadır, ancak bu uygulama yöntemlerinin Roma İmparatorluğu'nun yıkılmasıyla ortadan kalktığı bilinmektedir. 15. yüzyılın sonları ile 18. yüzyıl arasında seralar İngiltere, Fransa ve Hollanda'da bir rönesans yaşamıştır; seraların ticari üretimde yaygın kullanımı 19. yüzyılın ortalarında başlamış ve özellikle 1945'ten sonra hızla artmıştır. Zamanla, malzeme teknolojisindeki gelişmeler ve iklim kontrol sistemlerinin entegrasyonu, bu tesisleri daha iyi kontrol edilen üretim ortamlarına dönüştürmüştür [5,10,11]. Teknolojik gelişmelerin ürünü olan topraksız tarım ile bitki büyümesini en üst düzeye çıkaran ve kaynak tüketimini en aza indirmeyi amaçlayan yeni teknikler kullanılmaya başlanmıştır [12]. Topraksız tarımda bitkiler, toprak yerine besin çözeltileri içeren katı alt tabakalarda ya da doğrudan suda yetiştirilmektedir. Bu, birim alan başına verimi önemli ölçüde artırmakta, su ve gübrede önemli tasarruflar sağlamaktadır [12]. Ayrıca, akıllı sera teknolojilerinde kullanılan iklim otomasyonu, sensör ağları ve modern sulama sistemleri, seraları basit tarım yapılarından tamamen kontrol edilebilir ve verimli üretim tesislerine dönüştürmektedir [12].

Bu küresel teknolojik değişime paralel olarak, Türkiye'de sera yetiştiriciliği de önemli bir gelişme göstermiştir. 1940'larda Antalya'da inşa edilen cam seralarla başlayan süreçte, 1960'larda plastik örtülerin kullanılmaya başlanmasıyla hızlı bir gelişme dönemi yaşanmıştır [13]. 1970'lerden günümüze kadar geleneksel aile çiftçiliği, modern endüstriyel sera tarımından önemli ölçüde dönüşüm geçirmiştir [12]. Türkiye örtü altı tarım alanları (sera) ve üretim miktarı açısından dünyada 4. sırada, Avrupa'da ise İspanya'dan sonra 2. sırada yer almaktadır [14]. Üretimin yaklaşık %94'ü sebze (başta domates, salatalık ve biber) olup, geri kalanı ise meyve ve süs bitkilerinden oluşmaktadır. Domates, toplam sebze üretiminin %50'sinden fazlasını oluşturmakta ve sektörün en önemli ürünü olmaya devam etmektedir [12]. Türkiye'deki seraların büyük çoğunluğu Akdeniz ve Ege kıyıları boyunca, özellikle Antalya, Mersin ve Muğla (Fethiye) gibi ısıtma döneminin daha kısa yaşandığı bölgelerde yoğunlaşmıştır. Bu bölgelerde sera yetiştiriciliğinin gelişmesinin başlıca nedenleri, düşük ısıtma maliyetleri ve ısıtma dönemindeki güneş enerjisi potansiyelinin yüksek olmasıdır [15]. Bununla birlikte, son yıllarda, yüksek ısı talebini maliyet etkin bir şekilde karşılamak amacıyla, özellikle Afyon, Kırşehir ve Denizli gibi jeotermal kaynaklara sahip illerde, karasal iklime sahip iç bölgelerde modern jeotermal seralara yapılan yatırımlar hızlanmıştır [12]. Bu gelişmeler, Türkiye'de sera kullanımının sadece iklim dostu çözümlere değil, aynı zamanda teknolojik ve enerji verimli çözümlere doğru evrildiğini göstermektedir.

Genel olarak, seranın formu, yönlendiriliş durumu, saydam kabuk malzemesi ve teknik sistemler gibi değişkenler, sera tasarımında enerji tüketimini ve maliyet verimliliğini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, teknolojik ilerlemeyle desteklenen farklı iklim bölgeleri için en uygun sera tasarımının belirlenmesi, enerji verimliliğine ulaşmanın en temel bilimsel yaklaşımı olarak kabul edilmektedir [7]. Şekil 1'de örnek modern sera görselleri yer almaktadır.



Şekil 1: Örnek sera görselleri [16, 17]

2.2. Enerji Verimliliği Açısından Seralarda Etkili Olan Tasarım Değişkenleri

Enerji verimliliği açısından seralarda etkili olan tasarım değişkenleri yer, yönlendiriliş durumu, form, yapı kabuğu optik ve termofiziksel özellikleri ve pasif iklimlendirme sistemleri olarak aşağıda açıklanmıştır.

- Yapının bulunduğu yer: İklim özellikleri açısından seranın bulunduğu yer önem taşımaktadır. Soğuk iklim bölgelerinde ısıtma dönemindeki düşük sıcaklıklar yüksek ısıtma yüklerine yol açarken, ısıtma döneminin daha kısa yaşandığı bölgelerde ise ana tasarım problemi yaz aylarında aşırı ısıtma ve soğutma ihtiyacıdır. Yapının bulunduğu yerin enlemi, rakım ve topografik özellikleri, sera yapısından mekanik ekipmana kadar tüm sistem seçimlerini şekillendiren birincil parametrelerdir [1,3].
- Yönlendiriliş durumu: Güneş ışınlarının düşük açıyla geldiği kış aylarında direkt güneş ışınlamından maksimum fayda sağlamak için sera çatılarının geniş yüzeylerini güney yönüne doğru yönlendirmek yani yapıyı doğu-batı eksenini boyunca yönlendirmek önemli bir adımdır. Yapının yönlendiriliş durumunun belirlenmesinde en kritik etken direkt güneş ışınlamı kazanımı olmasına rağmen hâkim rüzgâr yönü de etkin rol oynamaktadır. Hâkim rüzgâr yönü, doğal havalandırma ve sera yapısına uyguladığı kuvvet açısından dikkate alınmalıdır [4,8,18].
- Form: Çok açıklıklı, gotik veya çift eğimli sera formları, yapısal stabilite, rüzgâr yükü direnci ve üretim hacmi dengesi dikkate alınarak optimize edilmektedir. Ayrıca çatı eğimine bağlı olarak, içeri giren direkt güneş ışınlamı miktarında değişiklik olmaktadır. Bu nedenle çatı formunun önemi ortaya çıkmaktadır [7,18,19].
- Yapı kabuğu optik ve termofiziksel özellikleri: İç ve dış mekân arasında bariyer olan dış cephe kaplama malzemesi, fotosentez için hayati önem taşıyan fotosentetik olarak aktif radyasyonu (PAR) iletmeli ve aynı zamanda iletim ve taşınım yoluyla ısı kaybına karşı yeterli ısı yalıtımını sağlamalıdır. Sadece direkt güneş ışınlamı iletimine odaklanan geleneksel ince malzemeler, kış aylarında önemli ısı kayıplarına yol açmaktadır. Bu nedenle, direkt güneş ışınlamı toplama ve enerji tasarrufu arasında optimum bir denge sağlamak için, kızılötesi yansıtma, UV kontrolü ve düşük emisyon özelliklerine sahip özel kaplamalar kullanılmaktadır [4,20,21].
- Pasif iklimlendirme sistemleri: Mimari tasarım yoluyla mekanik ısıtma ve soğutma sistemlerine olan bağımlılığı en aza indirmek mümkündür. Gün boyunca fazla güneş enerjisini biriktiren ve gece boyunca serbest bırakan ısıl atalet elemanları (su depoları, taş duvarlar, toprak) veya faz değişim malzemeleri (PCM'ler), iç mekan mikro iklimini pasif olarak stabilize etmektedir [5,8]. Geceleri biriken ısıнын kaybını önlemek için, dış iklime göre otomatik olarak ayarlanabilen ve ısıtma enerjisi gereksinimlerini %20'ye kadar azaltan ısı perdeleri kullanılmaktadır [8,22]. Sıcak dönemlerde, baca etkisi yaratan çatı/yan pencereler ve rüzgâr kırıcılar, aşırı ısınmayı önlemek için doğal soğutma sağlamakta, ayrıca, mekanik pompa gerektirmeyen pasif güneş kolektörleri (Trombe duvarı, siyah borular), kuzey cephesinin gölgelenmesiyle sağlanan ısı yalıtımı ve toprağın ısıl ataletini kullanan yarı gömülü yapılar [4,8], seralardaki enerji kayıpları sorununu temelden çözen ek yaklaşımlar olarak vurgulanmaktadır.

3. SERALARIN ENERJİ VERİMLİLİĞİ AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

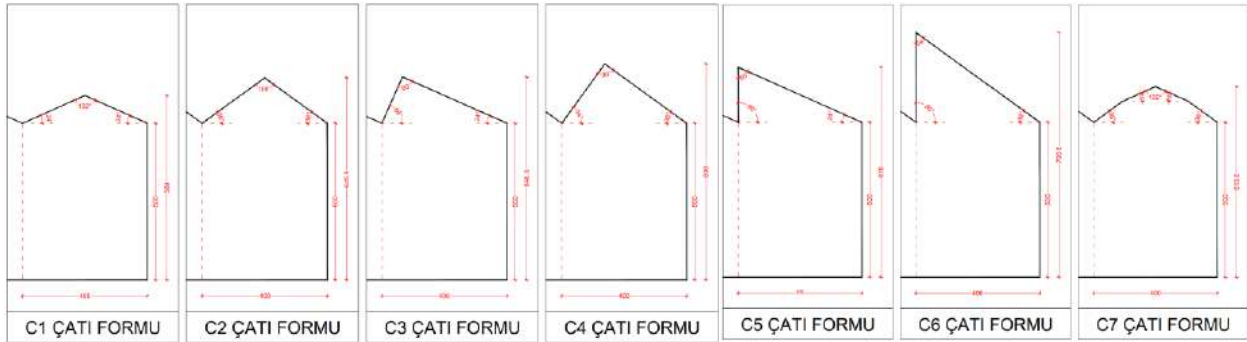
Yapılan literatür araştırmaları da dikkate alınarak, seraların enerji verimliliğini artırmak amacıyla yapılan çalışmanın adımları aşağıda görülmektedir:

3.1. Seralarda Etkili Olan Tasarım Değişkenlerinin Belirlenmesi

Çalışma kapsamında ele alınan kabuller, literatürdeki veriler ve güncel sera uygulamaları dikkate alınarak belirlenmiştir. Çalışma, maliyetlerin de düşürülmesi amacıyla, Türkiye’de en fazla nüfusun ve buna bağlı olarak en fazla tüketimin de olduğu ılımlı-nemli iklim bölgesinde yer alan İstanbul ilinde gerçekleştirilmiştir. Seralarda en fazla üretimi yapılan ve üzerinde en fazla çalışmanın yapıldığı bir ürün olması nedeniyle, serada yetiştirilecek ürün olarak domates seçilmiştir.

Seralar, pasif güneş enerjisi kazanım potansiyellerini artırmak amacıyla, uzun cephesi güney yönüne bakacak şekilde konumlandırılmıştır. Bu strateji, kış aylarında düşük açılı direkt güneş ışınımından daha fazla yararlanarak doğal ısıtmayı en üst düzeye çıkarmaktadır [8]. Diğer tasarım değişkenlerinin ısıtma enerjisi tüketimi üzerindeki etkisini karşılaştırmak için bu çalışmadaki tüm seralar aynı yönlendiriliş durumunda ele alınmıştır.

Seranın formu, iç hacmini, ısı geçişi olan yüzey alanını ve güneş geçirgenliğini doğrudan belirleyen mimari bir değişkendir. Bu çalışmada, seraların taban ölçüleri 32 x 62 m. olarak ele alınmıştır. Rüzgar ve stabilite için EN 13031-1 Avrupa standartlarına uygun olarak, ticari seralar için 24°’lik bir referans çatı eğim açısı mevcuttur [19,23]. Ayrıca kış aylarında güneş enerjisi kazanımını en üst düzeye çıkarmak amacıyla, İstanbul için optimum güneş kolektörü açısı olan 35,5° dikkate alınarak, çatılarda 24° ve 36° eğim kullanılmıştır [18]. Şekil 2’de ele alınan farklı çatı formlarına ait ölçüler görülmektedir. Çatı formları C harfi ile gösterilmiştir.



Şekil 2. Çatı formları

Seralarda saydam kabuk malzemesi olarak, tek cam (M1), Low-E cam (M2), polietilen (M3) ve polikarbon (M4) malzemeler kullanılmıştır. Bu malzemelere ait optik ve termofiziksel özellikler, Çizelge 1’de görülmektedir [21]. Tüm dış cephe %100 saydam yüzey olarak ele alınmıştır. Saydam kabuk malzemeleri M harfi ile gösterilmiştir.

Çizelge 1. Saydam kabuk malzemelerine ait optik ve termofiziksel özellikler [21]

Saydam Kabuk Malzemesi	Kalınlık (mm)	Isı İletkenlik Katsayısı (W/m ² K)	Güneş Geçirgenliği (Tsol)	Güneş Yansımaları (Rsol-İç/Dış)	Görünür (PAR) Geçirgenliği (Tpar)	Görünür Yansımaları (Rpar-İç/Dış)	Emisyon (İç/Dış)
Tek Cam (M1)	4.0	1.04	0.847	0.078	0.902	0.081	0.84
Low-E Cam (M2)	4.0	1.07	0.689	0.115	0.825	0.112	0.15
Polietilen (M3)	1.0	0.15	0.899	0.088	0.895	0.091	0.87
Polikarbon (M4)	1.0	0.20	0.896	0.060	0.892	0.051	0.92

Pasif iklimlendirme sistemleri açısından konu irdelendiğinde, fosil yakıtlar veya harici elektrik tabanlı enerji kaynakları kullanılmadan seralarda ısıtma enerjisi tüketiminin azaltılması büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada dört farklı pasif iklimlendirme sistemi incelenmiştir ve pasif ısıtma sistemleri P harfi ile gösterilmiştir.

- **Temel Durum (P1):** Bu sera tipinde herhangi bir ilave pasif iklimlendirme sistemi kullanılmamıştır. Bu model, oluşturulan çatı formlarının ve saydam kabuk malzemelerinin enerji verimliliğinin ölçüldüğü ve diğer sistemler tarafından elde edilen enerji tasarruflarının karşılaştırıldığı temel durum olarak tasarlanmıştır.

- **Isıl Kütle (P2) :** Gündüz giren fazla güneş enerjisini depolayıp gece ortama salarak sıcaklık dalgalanmalarını sönümleyen stratejidir. Bu modelde ısıtma kütle, topraksız tarım domates hatlarının altına yerleştirilen beton bloklar olarak kurgulanmıştır. Literatürdeki optimum ışık, havalandırma ve operasyonel hareket alanına [24,25] uygun olarak; bitki hatları uzun kenara (62 m) paralel, kenarlardan 120 cm çekme mesafesiyle ve 146,5 cm aks aralığıyla yerleştirilerek 21 tane üretim hattı oluşturulmuştur. Isı depolama için bu hatların altına 30 x 50 x 5960 cm boyutlarında 21 adet beton blok modellenmiştir. DesignBuilder'da "iç ısıtma kütle" olarak tanımlanan bu blokların doğrudan zemine oturan alt kısımları hariç, havayla temas eden üç yüzeyi termodinamik hesaplamalara dâhil edilmiştir.

- **Isı Perdeleri (P3):** Seralarda, ısı perdeleri, özellikle kış gecelerinde ısı kaybını önlemek için bitki seviyesinin üzerinde (oluk seviyesinde) zemine paralel olarak gerilmiş hareketli yalıtım örtüleri olarak uygulanır [22]. Bu çalışmada, ısı perde malzemesi olarak beyaz polyester seçilmiştir [22]. DesignBuilder yazılımının geometrik sınırlamaları nedeniyle, bu sistem çatı ve cephe malzemelerinin altına doğrudan entegre edilerek iç gölgeleme elemanı olarak tasarlanmıştır. Gün batımında otomatik olarak devreye giren bu tasarım sayesinde, perde sadece çatıda değil seranın tüm saydam alanlarında da sürekli bir yalıtım katmanı olarak programa dahil edilmiştir.

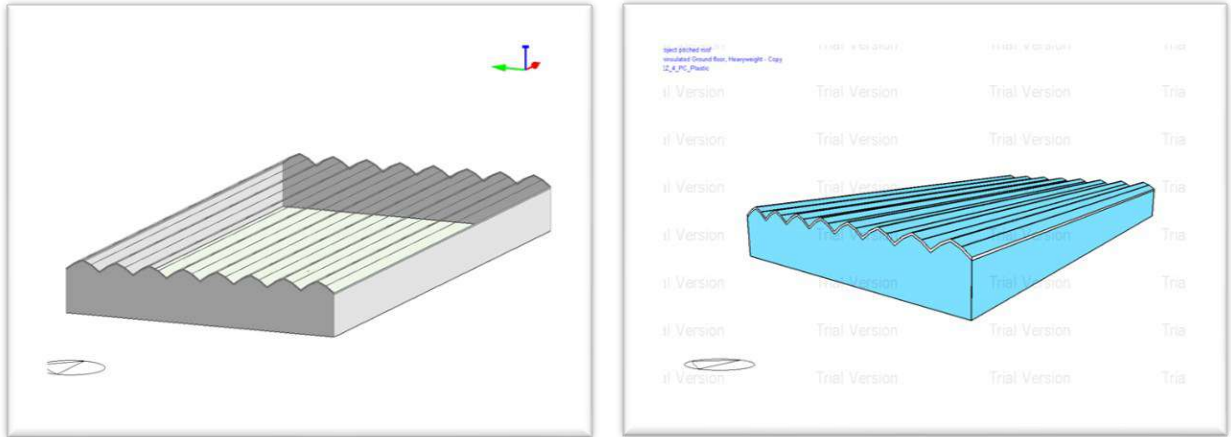
- **Entegre Sistem (Isıl Kütle + Isı Perdeleri) (P4):** Gündüz ısıyı biriktiren ısıtma kütle (P2) ve gece boyunca ısı kaybını önleyen ısı perdeleri (P3) sistemlerinin aynı anda çalıştığı bir sistemdir; her iki uygulamanın ısı yükü üzerindeki bütüncül etkisini incelemek için kullanılmıştır.

3.2. Isıtma Enerjisi Hesaplamalarının Yapılması

İstanbul'da yer alan sera yapılarının ısıtma enerjisi hesapları için DesignBuilder programı kullanılmıştır. Bu programda kullanılan meteorolojik veriler, İstanbul Atatürk Havalimanı istasyonundan alınmış olup uzun vadeli ortalamaları temsil eden "Tipik Meteorolojik Yıl" (TMY) veri seti kullanılarak DesignBuilder yazılımında tanımlanmıştır. Modelleme için dış iklim verileri olarak sıcaklık, rüzgar ve güneş ışınımının saatlik değerleri ele alınmıştır. Seralar tekil ısıl zon olarak tanımlanmış ve seraların iç ortam koşulları domates yetiştiriciliği için önerilen sıcaklık aralıkları (18-22°C) dikkate alınarak belirlenmiştir [26]. Isıtma sisteminin, iç hava sıcaklığının 18°C'nin altına düştüğünde devreye girdiği varsayılmıştır.

Hesaplama hassasiyetini belirleyen "saatlik zaman adımı" (time steps per hour) değeri 4 olarak tanımlanmıştır. Isı geçişini doğru bir şekilde hesaplamak için, yapısal bileşenler ayrıntılı olarak tanımlanmıştır. Seranın zemini, beton ve toprak katmanlarından oluşacak şekilde modellenmiştir.

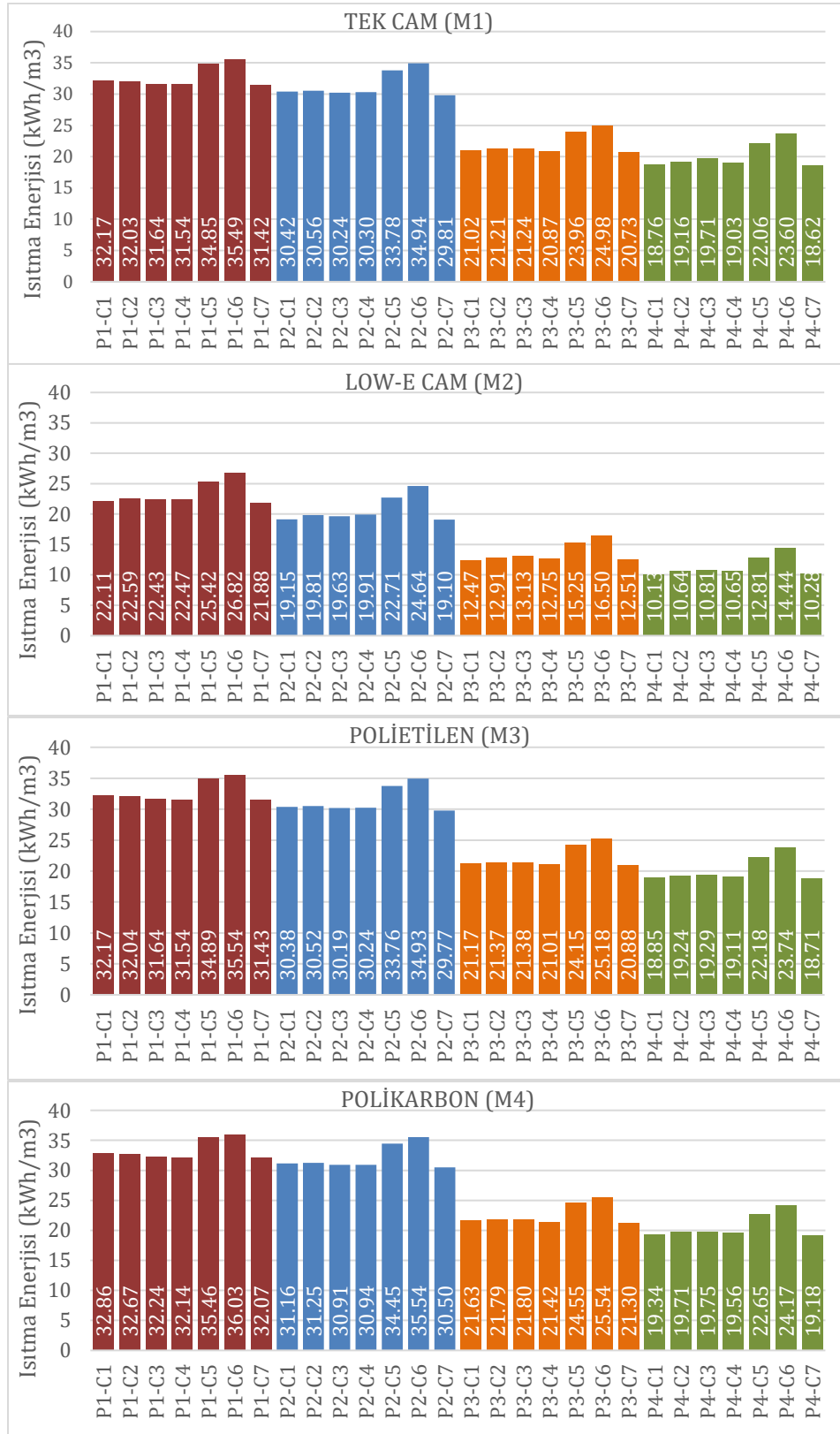
İstanbul iklim koşullarında, seralarda ısıtmanın gerekli olduğu 1 Eylül ile 31 Mayıs tarihleri arasında, 7 çatı formu (C1-C7), 4 farklı saydam kabuk malzemesi (M1-M4) ve 4 pasif iklimlendirme sistemi (P1-P4) olmak üzere toplam 112 farklı sera tipi, öncelikle DesingBuilder programında modellenmiştir. Şekil 3'te sera modellerine ilişkin örnek görseller görülmektedir. Sonra ise bu modellerin simülasyonu gerçekleştirilerek ısıtma enerjisi hesaplamaları yapılmıştır. Hesaplarda çatı formlarının hacimsel farklılıkları göz önünde bulundurularak, birim hacimdeki ısıtma enerjisi değerleri (kWh/m³) dikkate alınmıştır.



Şekil 3. Sera model görselleri

3.3 Hesap Sonuçlarının Tasarım Değişkenleri Açısından Değerlendirilmesi

İstanbul'da 112 farklı sera tipinin DesingBuilder programı kullanılarak yapılan ısıtma enerjisi hesap sonuçlarına ilişkin hazırlanan grafikler Şekil 4'te görülmektedir. Buna göre aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 4: Farklı saydam kabuk malzemeleri için çatı formunun ve pasif iklimlendirme sistemlerinin ısıtma enerjisi tüketimi açısından karşılaştırılması

- Sonuçların çatı formları açısından değerlendirilmesi

Saydam kabuk malzemeleri ve pasif iklimlendirme sistemleri sabit alındığında, nerdeyse tüm alternatiflerde C7'nin en düşük ısıtma enerjisi tüketimini sağlayan çatı formu olduğu görülmüştür. Bu durum, çatının çift kademeli yapısı nedeniyle kış güneşini farklı açılardan verimli bir şekilde yakalamasından kaynaklandığını göstermektedir. Bu sonuçtan farklı olarak M2-P3 ve M2-P4 alternatiflerinde C1 çatı formu, en düşük ısıtma enerjisi tüketimini sağlamaktadır. Bunu yine C7 çatı formu izlemektedir. Bunlara ek olarak, kullanılan tüm saydam kabuk malzemeleri ve pasif iklimlendirme sistemlerinde, ısıtma enerjisi tüketiminin en yüksek olduğu alternatifler sırasıyla C5 ve C6 çatı formlarıdır. Bu durum, çatı formlarında Kuzey yönüne bakan düşey (90°) bir yüzeyin bulunması ile açıklanabilir. Kuzeye bakan düşey yüzey, hem ısı kazancının azaltmış hem de ısı kaybını artırmıştır.

- Sonuçların saydam kabuk malzemeleri açısından değerlendirilmesi

Seralarda kullanılan saydam kabuk malzemesinin optik ve termofiziksel özellikleri ısı geçişi miktarını belirleyen en önemli değişkenlerden biridir. Tüm çatı formları ve pasif iklimlendirme sistemlerinde en düşük ısıtma enerjisi tüketimini sağlayan saydam kabuk malzemesinin Low-E Cam (M2) olduğu görülmüştür. Bu durum Low-E camın gelişmiş optik kaplama teknolojisine sahip olmasıyla açıklanabilir. Tek cam (M1) ve Polietilen (M3) saydam kabuk malzemeleri, tüm alternatiflerde M2'den daha fazla, ancak birbirine çok yakın ısıtma enerjisi tüketimi değerleri göstermişlerdir. Çizelge-1'de görülen saydam kabuk malzemelerinin ısı iletkenlik katsayısı değerinin aksine emisyon değerinin seraların enerji verimliliği üzerinde daha fazla etkisi olduğu gözlemlenmiştir. En fazla ısıtma enerjisi tüketimi ise Polikarbon (M4) saydam kabuk malzemesinde oluşmuştur.

- Sonuçların pasif iklimlendirme sistemleri açısından değerlendirilmesi

Tüm sonuçlarda pasif iklimlendirme sistemlerinin enerji tasarrufuna etkisi net olarak görülmektedir. Bunun yanında bu sistemlerinin enerji verimliliğine katkısı, saydam kabuk malzemesinin özellikleri ve çatı formuna bağlı olarak da değişim göstermektedir. Tüm saydam kabuk malzemeleri ve çatı formlarında, en düşük ısıtma enerjisi tüketimini sağlayan pasif iklimlendirme sisteminin entegre sistem (ısıl kütle + ısı perdesi) (P4) olduğu görülmektedir. Bunu sırasıyla ısı perdesi (P3) ve ısıl kütle (P2) pasif iklimlendirme sistemleri takip etmektedir. P1 alternatifi ise temel durum diye adlandırılan ilave bir pasif iklimlendirme sisteminin olmadığı durumdur ve en fazla ısıtma enerjisi tüketiminin olduğu alternatiftir.

- Tüm Tasarım Değişkenlerinin Birleşik Etkisinin Değerlendirilmesi

İstanbul'da doğu-batı doğrultusunda yönlendirilmiş seralarda, farklı çatı formu, saydam kabuk malzemesi ve pasif iklimlendirme sistemlerinin ele alındığı 112 farklı alternatif birlikte değerlendirildiğinde; ısıtma enerjisi tüketimi açısından, saydam kabuk malzemesi olarak Low-E cam (M2) ve pasif iklimlendirme sistemi olarak entegre sistem (P4), en düşük ısıtma enerjisi tüketimini sağlayan alternatifler olarak öne çıkmaktadır. C7 çatı formu, nerdeyse tüm alternatiflerde ısıtma enerjisi tüketimi açısından en düşük değerleri sağlamasına rağmen sadece M2-P3 ve M2-P4 alternatiflerinde C1 çatı formu daha düşük ısıtma enerjisi tüketimi sağlamaktadır.

Sonuçlara bakıldığında, en düşük ısıtma enerjisi tüketimini (10,13 kWh/m³) M2-P4-C1 alternatifinin, en yüksek ısıtma enerjisi tüketimini (36,03 kWh/m³) ise M4-P1-C6 alternatifinin sağladığı görülmüştür. Bu sonuç, uygun çatı formu, saydam kabuk malzemesi ve pasif iklimlendirme sistemi seçimiyle ısıtma enerjisi tüketiminde %71,88 tasarruf sağlanabileceğini göstermiştir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

İstanbul iklim koşullarında gerçekleştirilen bu çalışma, seralarda çatı formu, saydam kabuk malzemesi ve pasif iklimlendirme sistemlerinin enerji verimliliğini artırabileceğini göstermektedir. Bu sonuçların pratik uygulamalara aktarılabilmesi için, disiplinler arası yaklaşımlarla desteklenmesi ve ileri düzey araştırmalarla geliştirilmesi gerekmektedir. Bununla birlikte, önerilen çözümlerin ekonomik uygulanabilirliğinin değerlendirilmesi amacıyla kapsamlı finansal fizibilite analizlerinin yapılması önem taşımaktadır. Ayrıca, üretim sürecinde kullanılan yüksek kaliteli yapı malzemelerinin karbon ayak izinin belirlenmesi, projelerin sürdürülebilirlik performansının bütüncül olarak değerlendirilebilmesi açısından, yaşam döngüsü analizi yöntemleri kullanılarak incelenmelidir.

Sera tasarımının biyolojik boyutunu oluşturan tarımsal gereksinimlerin mimari tasarım sürecine entegrasyonu büyük önem taşımaktadır. Isıtma enerjisi tüketimini ve buna bağlı olarak ısı kayıplarını azaltmada etkili olan saydam kabuk malzemeleri, bitki gelişimi açısından önemli olan ışık geçirgenliği açısından da değerlendirilmelidir. Bununla birlikte, ısı kütlesi kullanımının bitkilerin yaşam döngüsü üzerindeki etkileri bütüncül bir yaklaşımla incelenmelidir. Çatı formundaki değişiklikler ise rüzgâr yükleri, taşıyıcı sistem elemanlarının boyutlandırılması ve buna bağlı olarak ilk yatırım maliyetleri üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Bu çok boyutlu etkileşimler, farklı disiplin ve uzmanlık alanlarının katkısını gerektiren kapsamlı akademik çalışmaların yürütülmesini zorunlu kılmaktadır.

Sonuç olarak, mimari çözümler, tasarım gereksinimleri, iklim kontrol algoritmaları ve bitki büyüme senaryolarının tek bir platformda eş zamanlı olarak değerlendirilebilmesine olanak tanıyan entegre bir sera modelleme yazılımının geliştirilmesi önerilmektedir. Böyle bir aracın sektöre kazandırılmasıyla, enerji, ekonomik ve biyolojik değişkenleri bütüncül bir yaklaşımla ele alan seraların tasarım süreçlerinde verimliliğin artırılması mümkün olacaktır.

KAYNAKLAR

1. Paris, B., Vadorou, F., Balafoutis, A. T., Vaiopoulos, K., Kyriakarakos, G., Manolakis, D., & Papadakis, G. (2022). Energy Use in Greenhouses in the EU: A Review Recommending Energy Efficiency Measures and Renewable Energy Sources Adoption. *Applied Sciences*, 12, 5150. <https://doi.org/10.3390/app12105150>
2. Tarım ve Orman Bakanlığı. (2024). İllere Göre Örtüaltı Tarım Alanları. Erişim Tarihi (Nisan 2024) <https://www.tarimorman.gov.tr/Konular/Bitkisel-Uretim/Tarla-Ve-Bahce-Bitkileri/Ortu-Alti-Yetistircilik>
3. Boyacı S 2018. Kırşehir ve Antalya İlleri İçin Seraların Isı Gereksiniminin Belirlenmesi ve Isıtmada Kullanılan Enerji Kaynaklarının Karşılaştırılması. *KSÜ Tar Doğa Derg* 21(6) : 976-986, DOI:10.18016/ksutarimdog.vi.464627

4. Fabrizio, E. (2012). Energy reduction measures in agricultural greenhouses heating: Envelope, systems and solar energy collection. *Energy and Buildings*, 53, 57–63. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.07.003>
5. Cuce, E., Harjunowibowo, D., & Cuce, P. M. (2016). Renewable and sustainable energy saving strategies for greenhouse systems: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, 34–59. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.077>
6. Rabiou, A., Adesanya, M. A., Na, W. H., Ogunlowo, Q. O., Akpenpuun, T. D., Kim, H. T., & Lee, H. W. (2023). Thermal performance and energy cost of Korean multispans greenhouse energy-saving screens. *Energy*, 285, 129514
7. Chahidi, L. O., & Mechaqrane, A. (2023). Energy and economic analysis for the selection of optimal greenhouse design: A case study of the six Morocco's climatic zones. *Energy and Buildings*, 289, 113060.
8. Ding, D. (2024). Design strategies of passive solar greenhouses: A bibliometric and systematic review. *Ain Shams Engineering Journal*, 15, 102680. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2024.102680>
9. Shamshiri, R. R., Jones, J. W., Thorp, K. R., Ahmad, D., Man, H. C., & Taheri, S. (2018). Review of optimum temperature, humidity, and vapour pressure deficit for microclimate evaluation and control in greenhouse cultivation of tomato: A review. *International Agrophysics*, 32, 287–302.
10. Zhang, M., Yan, T., Wang, W., Jia, X., Wang, J., & Klemeš, J. J. (2022). Energy-saving design and control strategy towards modern sustainable greenhouse: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 164, 112602.
11. von Elsner, B., Briassoulis, D., Waaijenberg, D., Mistriotis, A., von Zabeltitz, C., Gratraud, J., Russo, G., & Suay-Cortes, R. (2000). Review of structural and functional characteristics of greenhouses in European Union countries: Part I, design requirements. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 75, 1–16.
12. Doğu Akdeniz Kalkınma Ajansı. (2015). *TR63 Bölgesi seracılık (örtüaltı bitki yetiştiriciliği) sektör raporu*. <https://www.dogaka.gov.tr/dokuman-merkezi/arastirma-ve-planlama/seracilik-ortualti-bitki-yetistirciligi-sektor-raporu-2015>
13. Karakoca, E., & Bay, A. (2023). Sakarya Nehri vadisindeki seracılık faaliyetlerinin zamansal ve mekânsal değişiminde etkili olan coğrafi faktörler (Söğüt, Bilecik). *Erciyes Akademisi*, 37(4), 1913–1932.
14. Gıda, Tarım ve Hayvancılık Bakanlığı. (2017). *2. Ulusal Seracılık Çalıştayı kitapçığı*. Gıda, Tarım ve Hayvancılık Bakanlığı Yayınları.
15. Sevgican, A., Tüzel, Y., Gül, A., & Eltez, R. Z. (2000). Türkiye'de örtüaltı yetiştiriciliği. *Türkiye Ziraat Mühendisliği V. Teknik Kongresi* (pp. 679–707).
16. BHK Greenhouse. *Sera kurulumu ve modern sera sistemleri*. Erişim Tarihi (Nisan 2024) <https://www.bhkgreenhouse.com/tr/sera-kurulumu-ve-modern-sera-sistemleri-akademi-tr/>
17. Gotik Sera. (2021). Pro sera sistemleri. <https://gotiksera.com/>
18. Gebremedhen, Y. B. (2014). Determination of optimum fixed and adjustable tilt angles for solar collectors by using typical meteorological year data for Turkey. *International Journal of Renewable Energy Research*, 4(4), 925–928.
19. Bronkhorst, A. J., Geurts, C. P. W., van Bentum, C. A., van der Knaap, L. P. M., & Pertermann, I. (2017). Wind loads for stability design of large multi-span duo-pitch greenhouses. *Frontiers in Built Environment*, 3, 18. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2017.00018>
20. Papadakis, G., Briassoulis, D., Scarascia Mugnozza, G., Vox, G., Feuilleley, P., & Stoffers, J. A. (2000). Radiometric and thermal properties of, and testing methods for, greenhouse covering materials. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 77(1), 7–38.

21. Zhang, E., Elmi, M., Jahid, A., Duan, Q., & Wang, J. (2026). Assessing greenhouse covering systems for energy efficiency and solar irradiance modulation: A technical review. *Green Technologies and Sustainability*, 4, 100281.
22. Rasheed, A., Na, W. H., Lee, J. W., Kim, H. T., & Lee, H. W. (2019). Optimization of greenhouse thermal screens for maximized energy conservation. *Energies*, 12, 3592.
23. CEN. (2001). Greenhouses: Design and Construction – Part 1: Commercial Production Greenhouses. EN 13031-1. Brussel: European Committee for Standardization.
24. Blanchard, C., Pickens, J., da Silva, A., & Wells, D. (2023). *Greenhouse tomato production* (ANR-2955). Alabama Cooperative Extension System.
25. Nkansah, G. O., Amoatey, C., Zogli, M. K., Owusu-Nketia, S., Ofori, P. A., & Opoku-Agyemang, F. (2021). Influence of topping and spacing on growth, yield, and fruit quality of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) under greenhouse condition. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 659047.
26. Hocagil, M. M., & Öztürk, H. H. (2005). Seralarda sıcaklık ve bağıl nem kontrolü üzerine bir araştırma. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 1(3), 255–261.

BIM ORTAMINDA KURAL TABANLI OTOMATİK YANGIN GÜVENLİĞİ DENETİMİ

Tuba Tunç Kurt^{1*}

¹Tuba Tunç Kurt Mimarlık
Ankara

ÖZET

İşbirliğine dayalı tasarım süreçlerinde, farklı disiplinler tarafından üretilen bilgilerin bina yaşam döngüsü boyunca güncellenmesi, Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik (BYKHY) hükümlerine ilişkin uyumluluğun konvansiyonel yöntemlerle tutarlı biçimde denetlenmesini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, yangın güvenliği hükümlerinin dijital modeller üzerinden otomatik olarak doğrulanmasına yönelik yaklaşımlar, tasarım sürecinin erken aşamalarından itibaren etkin bir kontrol mekanizması olarak değerlendirilmektedir. Bu çalışma, Türkiye’de yürürlükte olan Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik (BYKHY) hükümlerinin BIM ortamında otomatik olarak değerlendirilmesine yönelik Revit-Dynamo tabanlı bir yöntem önermektedir. Yöntem kapsamında, yönetmelik maddelerine karşılık gelen kontrol parametreleri doğrudan Revit modeli üzerinde tanımlanmış ve bu veriler Dynamo ortamında algoritmik kural setleri aracılığıyla otomatik olarak analiz edilmiştir. Önerilen sistem; manuel kontrol ihtiyacını azaltması, insan hatasını minimize etmesi, yönetmelik hükümlerinin parametrik yapıda modellenmesine olanak sağlaması ve tekrarlanabilir bir dijital denetim süreci sunması; değişikliklerin harici veri kaynaklarıyla entegre biçimde yeniden değerlendirilmesine imkân tanıyarak, yangın güvenliği uyumluluğunun erken tasarım aşamalarından itibaren hızlı, bütünlüklü ve tutarlı biçimde doğrulanmasını mümkün kılmaktadır.

Anahtar kelimeler: Yapı Bilgi Modellemesi, BIM, Otomatik Kod Denetimi, Yangın Güvenliği

RULE-BASED AUTOMATED FIRE SAFETY COMPLIANCE CHECKING IN THE BUILDING INFORMATION MODELING ENVIRONMENT

ABSTRACT

In collaborative design processes, the continuous updating of information produced by different disciplines throughout the building life cycle makes it difficult to consistently verify compliance with the provisions of the Regulation on the Protection of Buildings from Fire (BYKHY) using conventional methods. Therefore, approaches aimed at the automated verification of fire safety requirements through digital models are considered an effective control mechanism from the early stages of the design process. This study proposes a Revit-Dynamo-based method for the automated evaluation of the provisions of the Regulation on the Protection of Buildings from Fire (BYKHY), currently applicable in Türkiye, within a BIM environment. In this method, control parameters corresponding to regulatory clauses are defined directly within the Revit model, and the extracted data are automatically analyzed in the Dynamo environment using algorithmic rule sets. The proposed system reduces the need for manual checking and minimizes human error, enables the parametric modeling of regulatory provisions, and provides a repeatable digital inspection process. By allowing any changes to be re-evaluated in an integrated manner through external data sources, the method enables rapid, consistent, and integrated verification of fire safety compliance from the early design stages.

Keywords: Building Information Modeling, BIM, Automated Code Compliance Checking, Fire Safety

^{1*} tubatunckurt@gmail.com

1. GİRİŞ

Yapı Bilgi Modellemesi (Building Information Modeling – BIM); bina modellerinin oluşturulması, bu modeller aracılığıyla iletişimin sağlanması, çeşitli analizlerin gerçekleştirilmesi amacıyla kullanılan modelleme teknolojileri ve ilgili prosedürlerin bütünü ifade etmektedir [1,2]. Yapı Bilgi modellemesi (BIM) tasarım, yapım ve işletme süreçlerindeki kararların, veriye dayalı biçimde alınmasını amaçlamakta; bu doğrultuda güvenilir ve tutarlı karar alma süreçlerini kolaylaştırmak için, yapı bir varlığın ortak ve paylaşılan dijital temsilinin kullanılmasını esas almaktadır [1,3]. Bu yönüyle BIM, yalnızca geometrik bir modelleme yöntemi değil; aynı zamanda yapı üretim sürecinin tüm aşamalarında bilgi yönetimini merkezine alan bütüncül bir yaklaşımdır. BIM'i geleneksel çizim tabanlı yöntemlerden ayıran temel özellik ise, yapı elemanlarının tanımlı özniteliklere, parametrik kurallara ve ilişkisel veri yapılarına sahip akıllı nesneler olarak modellenmesidir. Bu özellik, BIM modellerinin kural tabanlı analiz ve otomatik denetim süreçleri için kullanılabilmesini mümkün kılmaktadır. Yazılımlar arasında sağlanan birlikte çalışabilirlik sayesinde, BIM modeli içerisinde disiplinler arası koordinasyon daha etkin biçimde gerçekleştirilebilmekte; olası çakışmalar tasarım sürecinin erken aşamalarında tespit edilebilmektedir. BIM sistemi, tasarım aşamasından nihai ürüne kadar tüm paydaşların sürece bütüncül bir bakış açısıyla katılımını hedefleyerek iletişim eksikliğini ve revizyon takibindeki belirsizlikleri azaltmaktadır. Aynı zamanda görev ve sorumlulukların netleşmesiyle olası sorumluluk karmaşalarının önüne geçerken, sağladığı en yüksek faydanın ise tesis yönetimi aşamasında ortaya çıktığı kabul edilmektedir [1].

Yangın güvenliği, yapı tasarım sürecinden itibaren can ve mal kayıplarını önlemeye yönelik temel bir disiplindir [4,5]. F. Demirel ve H. Başdemir tarafından 2010 yılında yapılan çalışmada, bir literatür taraması yapılmış ve ulusal ile uluslararası standart ve yönetmeliklerde yer alan düzenlemeler karşılaştırmalı olarak incelenmiştir [6]. N. Serteser ve Ş. Beşiroğlu tarafından 2023 yılında gerçekleştirilen kapsamlı çalışmada ise, BIM ve yangın güvenliği/emniyeti arakesitindeki ulusal ve uluslararası akademik yayınlar sistematik bir literatür taraması yöntemiyle incelenmiş; BIM tabanlı yaklaşımlar, kullanılan yöntemler ve araştırma eğilimleri ayrıntılı biçimde değerlendirilmiştir. Bu bağlamda, binalarda yangın güvenliği ile BIM yaklaşımlarını birlikte ele alan çalışmaların, sayıca sınırlı olduğu görülmektedir [7]. Mevcut literatürdeki bu sınırlılık, BIM tabanlı yangın güvenliği uygulamalarının henüz ortak bir yöntem ve standart çerçevesinde ele alınamadığını ortaya çıkarmakta; buna bağlı olarak, yangın güvenliği alanındaki uzmanların benimsediği problem çözme yaklaşımlarına göre BIM destekli yazılımların kullanım biçimlerinin, ülkeden ülkeye ve yürürlükteki yasal düzenlemelere bağlı olarak farklılık gösterebildiği anlaşılmaktadır [7,8]. Mevcut ticari çözümlerin ise pasif yangın korumasının temel unsurlarını yeterli düzeyde kapsayamadığı görülmektedir [8,9]. Literatür, yönetmelik maddelerinin bilgisayar tarafından eksiksiz ve anlamlı biçimde yorumlanabilmesi için uzman bilgisine dayalı manuel bir kural dönüşümünün gerekli olduğunu; bunun da verilerin serbestçe işlenmesine ve kural oluşturma süreçlerinde esnekliğe duyulan ihtiyaçla ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır. BIM tabanlı görsel programlama araçlarının (Dynamo, Grasshopper, Marionette) ise bu uzman temelli süreci destekleyerek kural tanımlama ve denetim aşamalarında esnek bir yapı sunduğu vurgulanmaktadır [9].

Ülkemizde binalarda yangın güvenliğine ilişkin tüm gereklilikler, 'Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik' kapsamında tanımlanmıştır [10]. Ayrıca Aralık 2024'te Çevre,

Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından ‘Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik Kılavuzu’ yayımlanmıştır [11].

2. AMAÇ

Bu çalışmanın amacı, Türkiye’de yürürlükte olan Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik (BYKHY) hükümleri uyarınca; BIM ortamı içinde otomatik ve bütünleşik biçimde denetlenmesini sağlayan bir yöntem uygulamaktır. Ayrıca otomatik yönetmelik denetim sistemi ile; tasarım, uygulama, işletme ve revizyon aşamalarını kapsayan; bina yaşam döngüsü boyunca esnek, sürdürülebilir, dinamik ve güncellenebilir bir yaklaşımı incelemektir. Bu kapsamda, pasif yangın güvenlik önlemlerinden örneklem olarak seçilen yönetmelik maddelerinin, BIM modelinde tanımlı parametrik veriler aracılığıyla algoritmik kurallara dönüştürülmesi ve hem model değişikliklerine duyarlı hem de harici veri kaynaklarından beslenebilen bir doğrulama sürecinin kurulması hedeflenmektedir. Bir sonraki aşamada ise, disiplinler arası entegrasyon kapsamında, mimari modele tanımlanan yönetmelik parametreleri ve kural setleri aracılığıyla elde edilen analiz sonuçlarının hem diğer disiplinlerle paylaşılabilir hem de tesis yönetimi süreçlerinde kullanılabilecek şekilde veri alışverişine uygun hâle getirilmesi hedeflenmektedir. Ayrıca, önerilen otomatik denetim yaklaşımı; örneklem olarak ele alınan pasif yangın güvenliği hükümleri üzerinden kurgulanmış olsa da kural tanımlama mantığı ve parametrik veri yapısı sayesinde farklı yönetmelik maddeleri ve disiplinler için yeniden yapılandırılabilir bir sistem mimarisi sunmaktadır.

3. YÖNTEM, KAPSAM VE SINIRLILIKLAR

Aşağıda açıklanan yöntem doğrultusunda, BYKHY hükümlerinden örneklem olarak seçilen “Madde 26: Döşemeler” başlığı altındaki 26/1, 26/2, 26/3, 26/4 ve 26/5 maddeleri esas alınarak; BIM’i destekleyen yazılımlar aracılığıyla, parametrik veri yapısı ve algoritmik kural değerlendirme yaklaşımına dayalı bir otomatik kontrol sistemi oluşturulmuştur.

3.1. Yönetmelik Maddelerine Ait Parametrelerin Oluşturulması

Autocad ortamında iki boyutlu olarak tasarlanan bir sağlık ocağı projesi, parametrik çalışma imkânı sunan ve BIM’i destekleyen yazılımlardan biri olan Revit 2022.1 yazılımı ile modellenmiştir. Modeli oluşturan yapı elemanları LOD 300 seviyesinde modellenmiştir. Level of Development (LOD), yapı bilgi modellemesi (BIM) kullanan paydaşlar arasında yapı elemanlarına ilişkin iletişim kalitesini artırmayı amaçlayan bir referans yaklaşımı olup, bir elemanın geometrisinin ne ölçüde düşünülüp geliştirildiğini ve proje ekibi üyelerinin bu bilgiye hangi düzeyde güvenilebileceğini tanımlamaktadır [12]. Bu bağlamda LOD, model elemanlarının minimum geometrik ve geometrik olmayan bilgi seviyesi olarak tanımlanır ve BIM Forum tarafından her yıl güncellenir [13,14]. Otomatik kod denetiminin gerçekleştirilebilmesi amacıyla, BYKHY maddeleri esas alınarak BIM bilgi ve model gereksinimleri belirlenmiştir. Tasarlanan ve modellenen projeye özgü; geometriye ilişkin değerleri, geometrik olmayan öznitelikleri ve yönetmelik eşik değerlerine esas nitelikleri kapsayan parametreler, modeldeki yapı bileşenlerine manuel olarak tanımlanmıştır. Bu aşama, yöntemin algoritmik işleyişi için veri temelini oluşturmaktadır. Revit ortamında parametreler tanımlanırken, projede yer almayan yapı bileşenlerine (örneğin dişli döşeme veya asma tavan) ilişkin herhangi bir parametre

oluşturulmamış; buna karşılık, her bir yönetmelik maddesi için projeyle doğrudan ilişkili mimari unsurlara karşılık gelen parametreler tanımlanmıştır. Bu bağlamda, otomatik denetime uygun olan ilgili ve bağımlı maddeler alınmış, ilgisiz ve açıklama içeren metinler ise yapı bileşenlerine parametre olarak atanmamıştır. Ayrıca modele tanımlanan parametreye karşılık gelen değerler, gerçek uygulamaya ait kesin veya sertifikalı performans verilerini temsil etmekten ziyade, önerilen otomatik yönetmelik denetim yaklaşımının işleyişini ve uygulanabilirliğini ortaya koymaya yönelik kabul edilen girdiler olarak değerlendirilmiştir.

3.2. Görsel Programlama Yazılımına Veriyi Aktarma

Yönetmeliklere ait kural setlerinin oluşturulabilmesi için Revit arayüzünden ulaşılabilen görsel programlama yazılımı olan Dynamo 2.12.1 kullanılmıştır. BIM tabanlı Revit içerisinde oluşturulan ve projeye özgü BYKHY maddelerine karşılık gelen parametreler, kural seti oluşturulmak üzere otomatik kod kontrolü yapabilen BIM tabanlı ve Revite geri yazdırma/düzeltilme imkânı tanıyan Dynamo görsel programlama yazılımına aktarılmıştır.

3.3. Yönetmelik Hükümlerinin Algoritmik Kural Setine Dönüştürülmesi

Dynamo içerisinde Revit'ten çağrılan parametreler, BYKHY hükümlerinde yer alan sayısal sınırlar, mantıksal koşullar ve performans kriterleri ile; matematiksel eşitsizliklere, mantıksal ifadelerle (if-and), sınıf eşleşmelerine ve parametrik karşılaştırmalara dönüştürülmüştür.

3.4. Otomatik Kod Denetiminin Çalıştırılması ve Model Üzerinde Düzeltme Fonksiyonları

Devamında Dynamo'da; her bir kural elemanı taranmış, parametrik uygunluklar ve uyumsuzluklar tespit edilmiş, uygun/uygunsuz durumu ve düzeltmeler Revit'e; 'setparameter' nodu sayesinde oluşturulan kurallar aracılığı ile geri yazdırılmıştır. Bu aşamadaki çift taraflı veri alışverişi model ve kural seti arasında bütüncül bir çalışma imkânı sunmuştur.

Sistem, IFC veri setlerinin çift yönlü veri akışına açıktır [15]. Ancak bu çalışmada IFC verileri kullanılmamıştır.

3.5. Analiz Sonuçlarının Raporlanması

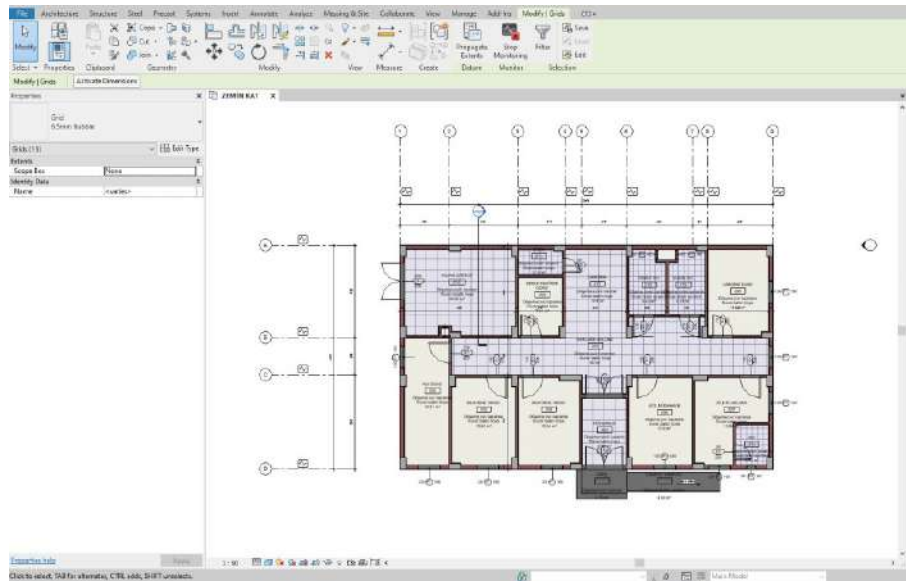
Otomatik kod denetiminin tamamlanmasının ardından, sisteme excel tabanlı rapor üretme scriptleri yazılmış; her eleman için uygunluk durumu ve ihlal edilen yönetmelik maddesi görsel programlama yazılımı olan Dynamo tarafından Excel tabanlı bir rapor dizisine dönüştürülmüştür.

Sistem ayrıca; Revit içerisinde elemanları uygun / uygunsuz renk şemalarıyla renklendirebilir, ihlal türlerine göre filtrelenmiş görünüm oluşturabilir, sonuçları işlenerek mimari model içinde takip edilebilir bir denetim izi üretebilir. Bu sayede her bir ihlal, model üzerinde anlık olarak görselleştirilebilir hâle gelir ve tasarımcı gerekli düzeltmeleri hızlıca yapabilir. Ancak bu çalışmada hedeflenen; Revit veya Dynamo bilgisi olmayan kullanıcıların, Excel gibi yaygın olarak kullanılan bir program aracılığıyla sisteme veri girişi yapabilmesi ve sistemden elde edilen çıktıları aynı ortam üzerinden geri alabilmesi olduğundan, Revit içerisindeki uygun/uygunsuz durumları için görsel haritalandırılma kapsam dışı bırakılmıştır.

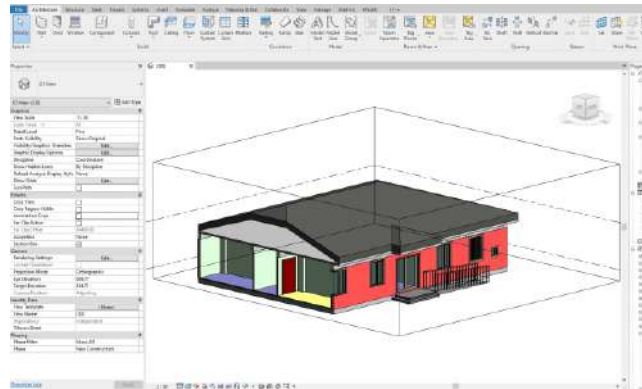
4. ÖRNEK UYGULAMA: BIM TABANLI OTOMATİK YANGIN GÜVENLİĞİ KOD DENETİMİ

4.1. Örneklem Kapsamı ve Seçim Kriterleri

Çalışma öncesinde AutoCAD ortamında sağlık ocağı olarak tasarlanmış olan, kurumsal yapı niteliği taşıyan ve orta tehlike-1 sınıfında değerlendirilen 240 m² büyüklüğündeki tek katlı yapının; bu çalışma kapsamında Revit yazılımı kullanılarak hem statik hem de mimari modelleri oluşturulmuştur. **Şekil 1**'de gösterildiği gibi statik projede tanımlı taşıyıcı sistem elemanları Revit ortamında 'Copy/Monitor' yöntemi ile mimari modele aktarılmış ve söz konusu elemanlar izlemeye alınarak model tutarlılığı sağlanmıştır. **Şekil 2**'de ise örnek proje kesitine ait 3D görüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 1. Örnek Sağlık Ocağı Projesi Zemin Kat Planı Ekran Görüntüsü



Şekil 2. Örnek Sağlık Ocağı Projesi- Kesite Ait 3D Ekran Görüntüsü

BIM yaklaşımında amaç, belirli bir yazılımı işaret etmekten ziyade; yazılımdan bağımsız olarak farklı yazılımların birbirleriyle etkin biçimde iletişim kurabilmesini sağlamaktır. Bu bağlamda

Revit yazılımı, diğer BIM yazılımlarına kıyasla parametrik modelleme altyapısının gelişmiş olması, disiplinler arası koordinasyonu destekleyen yapısı, yaygın kullanıcı ağı ve esnek veri yönetimi özellikleri nedeniyle; Dynamo görsel programlama ortamı ise, Revit ile doğrudan entegre çalışabilmesi, algoritmik kural tanımlamalarına olanak sağlaması ve harici veri kaynaklarıyla çift yönlü veri alışverişini desteklemesi sayesinde, otomatik kod kontrol sisteminin geliştirilmesini kolaylaştırdığı için bu çalışmada tercih edilmiştir. Ancak söz konusu yazılımlar yerine BIM tabanlı aynı işleve sahip başka yazılımlar da kullanılabilir.

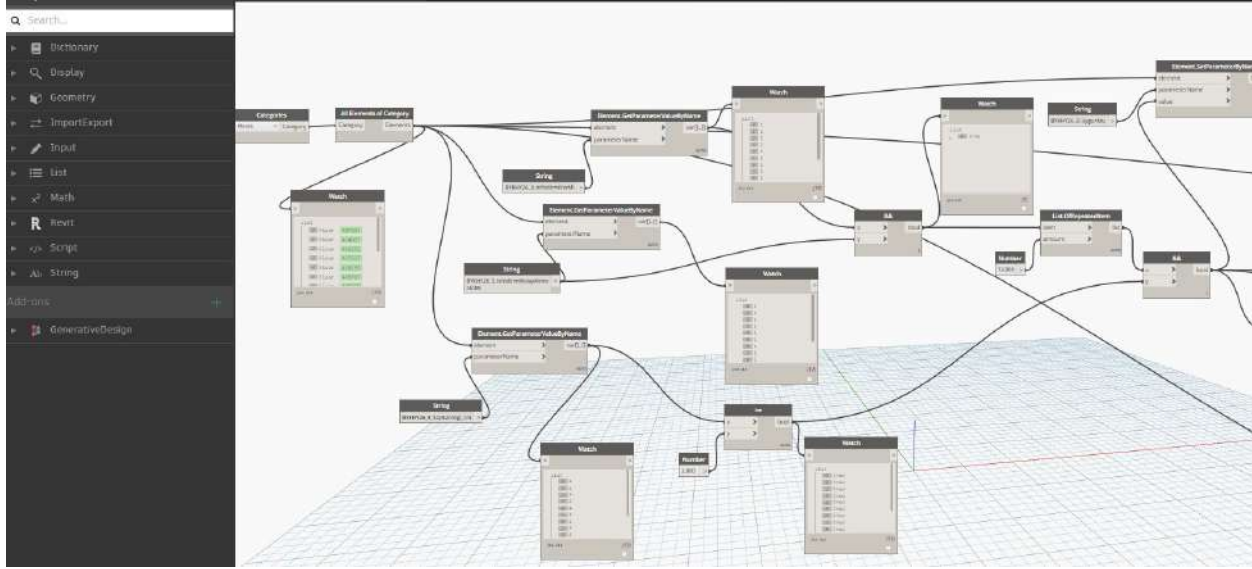
BYKHY hükümlerinden örneklem olarak seçilen “Madde 26: Döşemeler” başlığı altındaki 26/1 maddesi; “Madde 25: Yangın Duvarları” ve BYKHY maddeleri ekleri olan “Ek-3/B: Yapı Elemanlarının Yangına Dayanım (Direnç) Süreleri” ve “Ek-3/C: Bina Kullanım Sınıflarına Göre Yangına Dayanım (Direnç) Süreleri” ile doğrudan ilişkili bağımlı kurallar oluşturmaktadır. Bu doğrultuda 26/1 maddesi; yapı elemanlarının yangına dayanım süresi (REI: R–yük taşıma kapasitesi, E–bütünlük, I–yalıtım) ilişkilerini değerlendiren, çok parametrelili tek bir kural seti şeklinde tanımlanmıştır. 26/2, 26/3 ve 26/4 maddeleri ise yapı malzemeleri ile ilişkili olup; yönetmelikte tanımlanan, “Ek-2/C: Yanıcılık Sınıfı A1 Olan Yapı Malzemeleri” ve “Ek-2/Ç: Yapı Malzemelerinin TS EN 13501-1 ve TS EN 13501-5’e Göre Yanıcılık Sınıfları” kapsamındaki malzeme sınıflandırmalarıyla doğrudan bağlantılıdır. Bu bağlamda, örneklem olarak seçilen döşeme maddeleri; hem yapı elemanı düzeyindeki yangın dayanım kriterlerini hem de yapı malzemelerine ilişkin yanıcılık sınıflarını aynı anda kapsamaları nedeniyle, otomatik kod kontrol yönteminin çok ölçekli değerlendirme kapasitesini ortaya koyan uygun bir örneklem niteliği taşıdığı düşünülmektedir. 26/5 maddesi ise penetrasyonların, farklı disiplinlerin birlikte çalışmasının ve sistem detaylarının önemini vurgulamak için tercih edilmiştir. Bu nedenle BYKHY kapsamında örneklem olarak seçilen “Madde 26: Döşemeler”; çok parametrelili yapısı, yönetmelik maddeleri arası bağımlı ilişkiler içermesi, farklı ölçeklerde BIM verisinin birlikte değerlendirilmesini zorunlu kılması ve disiplinler arası koordinasyonu doğrudan etkilemesi nedeniyle, önerilen otomatik yönetmelik denetim yönteminin kapsamını, esnekliğini ve uygulanabilirliğini ortaya koymak açısından uygun ve temsil gücü yüksek bir örneklem niteliği taşımaktadır.

Bu bağlamda; açıklama, tanım ve sembol içeren metinler veya projede yer almayan kavramlar parametre olarak atanmamıştır. Çalışma kapsamında kullanılan tüm sayısal girdiler; gerçek uygulamaya ait deneysel, sertifikalı veya ölçülmüş performans verilerini temsil etmemekte olup, önerilen otomatik yangın yönetmeliği denetim yaklaşımının işleyişini, kural mantığını ve uygulanabilirliğini ortaya koymak amacıyla tanımlanmış kabul değerleri olarak değerlendirilmiştir. Bu sayede çalışma; parametrik veriler üzerinden sayısallaştırılabilir girdilerin oluşturulmasına, malzeme veya detay değişikliklerine bağlı senaryo analizlerinin yapılmasına ve geliştirilen kural tabanlı sistemin diğer yönetmelik maddelerine ve farklı disiplinlere kolaylıkla uyarlanabilirliğinin gösterilmesine olanak sağlamaktadır.

4.2. Döşemelere İlişkin Parametrelerin Tanımlanması ve Kural Setlerine Dönüştürülmesi

BYKHY hükümlerinden “Madde 26: Döşemeler” başlığındaki 26/1, 26/2, 26/3, 26/4 ve 26/5 maddeleri, öncelikle excel ortamında analiz edilmiş; otomatik denetime uygun olan ilgili ve bağımlı maddeler Revit yazılımında, ‘shared parametre’ olarak parametrelere dönüştürülmüştür. Söz konusu parametreler, Revit ortamında oluşturulan ‘schedule’ tabloları aracılığıyla her bir döşeme elemanına hızlı ve sistematik biçimde atanmıştır. **Şekil 3**’te gösterildiği gibi, ilgili

parametreler Dynamo görsel programlama yazılımına çağırılmış ve BYKHY hükümleri uyarınca, döşeme maddelerinin her biri için (26/1, 26/2, 26/3, 26/4 ve 26/5) ayrı kural setleri oluşturulmuştur. Her maddenin kendi içerisinde uygunluk analizi yapılmış ve Dynamo ortamındaki kural setinin sonuna eklenen ‘setparameter’ düğümü aracılığıyla, 26/1, 26/2, 26/3, 26/4 ve 26/5 maddeleri için elde edilen uygunluk sonuçları Revit ortamına geri yazdırılmıştır.



Şekil 3. Madde 26/3 için Dynamo Ortamında Oluşturulan Kural Setine Ait Ekran Görüntüsü

4.3. Model Üzerinde Otomatik Değerlendirme ve Raporlama

BYKHY hükümlerinden 26.maddeye ait genel bir değerlendirme yapılabilmesi amacıyla alt hükümler için oluşturulan kural setleri Dynamo’da birleştirilmiş, nihai uygunluk sonucu ise tekrar Revit’e geri yazdırılarak değerlendirme süreci tamamlanmıştır.

Çalışmanın bu aşamasına kadar gerçekleştirilen değerlendirmeler, Revit ve Dynamo arasındaki veri alışverişi üzerinden BIM ortamında yürütülen yönetmelik analizini kapsamaktadır. Bu aşamadan sonrası, Dynamo ortamında elde edilen analiz sonuçlarının harici yazılımlara aktarılması, başka bir ifadeyle Revit veya Dynamo kullanmayan uzmanların da bu çıktıları değerlendirebilmesi, aynı zamanda dinamik ve sürekli güncellenebilir bir veri modeli üzerinden raporlama süreçlerinin oluşturulmasını kapsamaktadır.

Harici veri kaynaklarından beslenebilen, dinamik ve güncellenebilir raporlama süreçleri; BYKHY 26/5 maddesinde yer alan “*Su, elektrik, ısıtma ve havalandırma tesisatı ile benzeri tesisatların döşemeden geçmesi hâlinde, tesisat çevresi açıklık kalmayacak şekilde en az döşemenin yangın dayanım süresi kadar, yangın ve duman geçişine karşı yalıtılması gerektiği*” hükmü doğrultusunda değerlendirilmiştir. Söz konusu değerlendirme, tesisat çevresinde kullanılan yalıtım malzemesinin yanı sıra, tesisat–döşeme geçiş detayının tamamının yeniden kurgulandığı bir senaryo esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Buna bağlı olarak, döşemeden geçen tesisat geçişlerinde kullanılan yalıtım malzemesinin temsil ettiği geçiş detayının, döşemenin kendi yangın dayanım süresinden büyük ve eşit olması gerekliliği, otomatik denetim sürecinde temel değerlendirme ölçütü olarak ele alınmıştır.

Bu bağlamda, Revit ortamında 26/5 maddesine ilişkin ilk değerlendirme sonuçları **Şekil 4**'te; buna bağlı 26. maddeye ait Revit-Dynamo nihai uygunluk analizi ile Dynamo kural setleri aracılığıyla dışa aktarılan Excel raporu ise **Şekil 5**'te birlikte gösterilmiştir.

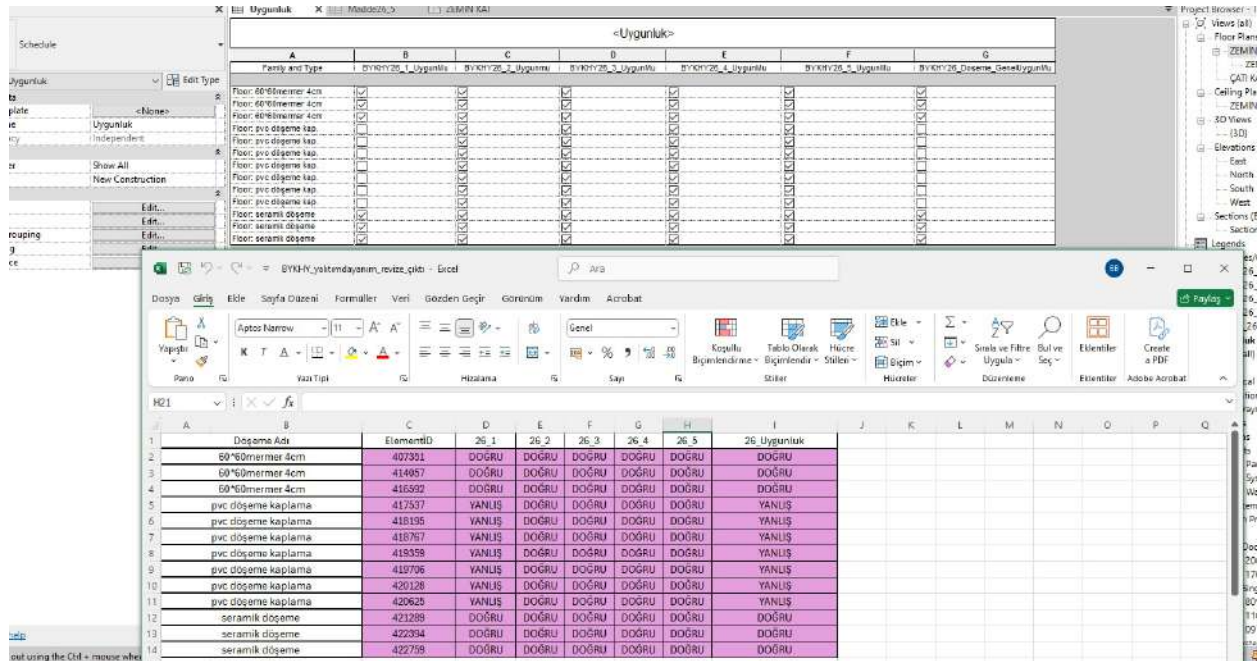
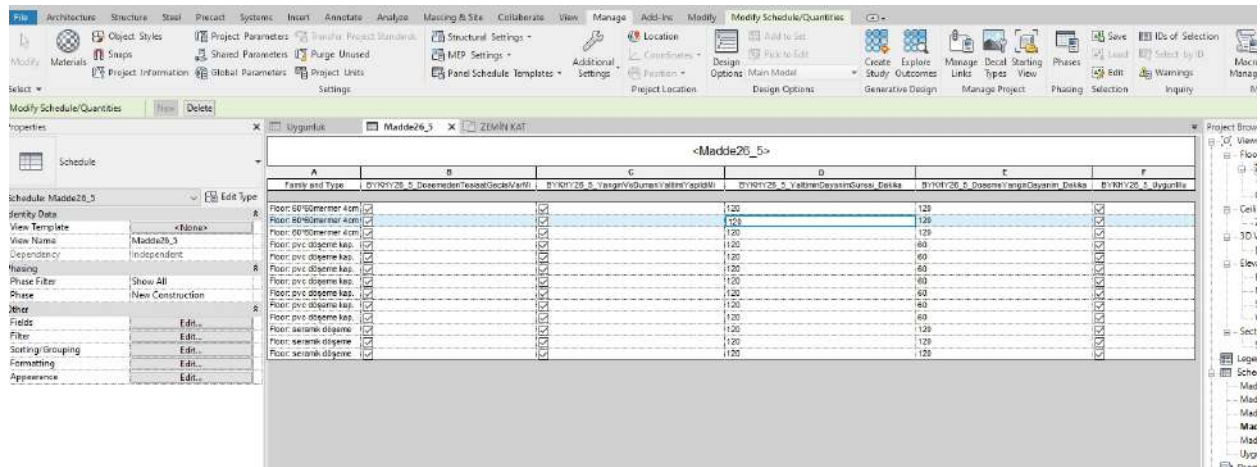
Family and Type	BYKRY26_5_DöşemeninTesisatıDoğruYanılı	BYKRY26_5_YatayVeDikeyYanılı	BYKRY26_5_YatayYanılıSüresiCakla	BYKRY26_5_DöşemeninYanılıCakla	BYKRY26_5_Uygunlu
Floor: 60°60mermer 4cm			90	120	
Floor: 60°60mermer 4cm			90	120	
Floor: 60°60mermer 4cm			90	120	
Floor: pvc döşeme kap.			90	90	
Floor: pvc döşeme kap.			90	90	
Floor: pvc döşeme kap.			90	90	
Floor: pvc döşeme kap.			90	90	
Floor: pvc döşeme kap.			90	90	
Floor: seramik döşeme			90	120	
Floor: seramik döşeme			90	120	
Floor: seramik döşeme			90	120	

Şekil 4. Madde 26/5 İlk Değerlendirme Analizi Ekran Görüntüsü

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
Döşeme Adı	26.1	26.2	26.3	26.4	26.5	26.6	26.7	26.8						
60°60mermer 4cm	407951	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU						
60°60mermer 4cm	414057	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU						
60°60mermer 4cm	416592	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU						
pvc döşeme kaplama	417537	YANLIŞ	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU						
pvc döşeme kaplama	418195	YANLIŞ	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU						
pvc döşeme kaplama	418767	YANLIŞ	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU						
pvc döşeme kaplama	419359	YANLIŞ	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU						
pvc döşeme kaplama	419706	YANLIŞ	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU						
pvc döşeme kaplama	420126	YANLIŞ	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU						
pvc döşeme kaplama	420625	YANLIŞ	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU						
seramik döşeme	421289	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU						
seramik döşeme	422394	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU						
seramik döşeme	422759	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU	DOĞRU						

Şekil 5. Madde 26 Nihai Değerlendirme Revit-Dynamo Analizi ve Excel Raporu Çıktısı Ekran Görüntüsü

Tesisatın geçtiği döşemeye ait yangın dayanım süresinin, döşemenin kendi yangın dayanım süresinden büyük ve eşit olduğu revize senaryo ile gerçekleştirilen, 26/5 maddesine ilişkin son değerlendirme sonuçları **Şekil 6**'da; buna bağlı 26. maddeye ait Revit-Dynamo nihai uygunluk analizi ile Dynamo kural setleri aracılığıyla dışa aktarılan Excel raporu ise **Şekil 7**'de birlikte gösterilmiştir.



5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, BYKHY'nin 26/5 maddesi kapsamında döşemeden geçen tesisatlara ait yalıtımlı döşeme geçiş detayı, revizyon temelli bir senaryo üzerinden BIM tabanlı otomatik denetim yaklaşımıyla değerlendirilmiştir. Revit–Dynamo tabanlı kural setleri aracılığıyla gerçekleştirilen analizler, uygunluk durumlarının hem Revit üzerinde hem de harici raporlar üzerinden eş zamanlı olarak doğrulanmasına olanak sağlamıştır. Elde edilen bulgulara göre, tesisatın geçtiği döşemeye ait yangın dayanım süresinin, döşemenin kendi yangın dayanım süresinden büyük ve eşit olduğu revize senaryoda iyileşme sağlanmasına rağmen; tüm döşemelerin yangın duvarı niteliğini karşılayamamasından dolayı, 26.maddenin nihai sonucunun uygun olmadığı gözlemlenmiştir. Bu

bağlamda yangın güvenliği değerlendirmelerinde mimari detayların ve bu detayların mekanik ve elektrik disiplinleriyle birlikte ele alınmasının, kritik öneme sahip olduğu ortaya çıkmaktadır.

Örneklem olarak seçilen yönetmelik maddeleri üzerinden gerçekleştirilen bu uygulama, BIM tabanlı Revit–Dynamo altyapısı kullanılarak, Türkiye’ye özgü ulusal BYKHY hükümlerinin otomatik kod kontrolüne dayalı bütünleşik bir yöntemle ele alınabileceğini göstermektedir. Yönetmelik bilgisine sahip bir uzman tarafından manuel olarak oluşturulan kural setleri sayesinde, sistemin harici veri kaynaklarıyla otomatik olarak veri alışverişi yapılabildiği gözlemlenmiştir. Excel programından sağlanan girdiler doğrultusunda, çalışmada gerçekleştirilen revizyona ait kural setinin tetiklenmesiyle, önerilen sistemin anlık uyum sağlayarak otomatik yeniden değerlendirme gerçekleştirebildiği gözlemlenmiştir. Bu çalışmada hedeflenen, Revit veya Dynamo bilgisi olmayan kullanıcıların, Excel gibi yaygın olarak kullanılan bir program aracılığıyla sisteme veri girişi yapabilmesi ve sistemden elde edilen çıktıları aynı ortam üzerinden geri alabilmesi sağlanmıştır.

Bina kullanım süresi boyunca ulusal yönetmeliklerdeki performans gerekliliklerinin değişebilmesi, tesis yönetimine ilişkin operasyonel verilerin güncellenmesi veya bakım-onarım faaliyetleri sonucunda teknik niteliklerin farklılaşabilmesi göz önünde bulundurulduğunda, geliştirilen sistemin güncellenebilir ve uyarlanabilir bir kural motoru sunması önemli bir gereksinimi karşılamaktadır. Bu doğrultuda sistem, hem tesis yönetiminden elde edilen operasyonel verileri hem de projeye özgü parametreleri harici veri kaynaklarından dinamik olarak okuyabilen esnek bir yapıya sahiptir. Ayrıca sistem, erken tasarım aşamalarından itibaren yangın güvenliği uyumluluğunun hızlı ve bütünleşik biçimde doğrulanmasını desteklemektedir. Bu durum, manuel yönetmelik kontrolüne olan ihtiyacı azaltırken, insan kaynaklı hataların önüne geçilmesine ve yönetmelik maddelerinin BIM tabanlı parametrik bir yapı içerisinde modellenmesine olanak sağlamaktadır.

Ancak incelenen bu yöntem, veri kalitesine ve parametrik tanımlamaların doğruluğuna yüksek derecede bağımlıdır. Harici veritabanından çekilen veriler ile yönetmeliğe göre oluşturulan parametrik verilerin hatalı, eksik ya da tutarsız girilmesi, analiz çıktılarının doğruluğunu doğrudan etkileyebilir. Ayrıca ilgili mevzuat ve yönetmeliklerde zaman içinde meydana gelebilecek değişiklikler, kullanılan parametre setleri, eşik değerleri ve kural tanımlarının periyodik olarak güncellenmesini gerekli kılabılır. Yönetmelik içeriklerinin değişmesi, çekirdek algoritmanın değil; fakat bu algoritmanın üzerine tanımlanan kural ve parametre katmanının revizyonunu zorunlu hâle getirir. Bu nedenle sistem tarafından üretilen sonuçların, özellikle kapsamlı revizyon dönemlerinde, konu uzmanı tarafından manuel olarak doğrulanması önerilir.

Önerilen bu yöntem, yalnızca tek bir projeye veya mevzuata özgü olmayıp, harici veri dosyalarının güncellenmesi yoluyla farklı projelere kolaylıkla uyarlanabilen ve aynı algoritmik altyapının yeniden kullanılmasına imkân tanıyan ölçeklenebilir bir BIM tabanlı denetim sistemi sunmaktadır.

Sonuç olarak, bu yöntemin uluslararası literatürde çeşitli uygulamaları bulunsa da Türkiye’de yürürlükte olan BYKHY doğrultusunda ilk kez kural tabanlı otomatik denetim gerçekleştirebilen ve gerekli düzeltmeleri doğrudan BIM ekosistemi içerisinde işleyebilen bütünleşik bir yaklaşım ortaya konulmaktadır. Çalışma aynı zamanda, farklı ulusal düzenlemelerin de değerlendirilebildiği genişletilebilir bir altyapı sunmaktadır.

KAYNAKLAR

1. Ergen Pehlevan, E. (2025). *BIM (yapı bilgi modellemesi) ile ilgili temel kavramlar*. İstanbul Teknik Üniversitesi Sürekli Eğitim Merkezi.
2. 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.). John Wiley & Sons.
3. International Organization for Standardization. (2018). *ISO 19650-1: Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works — Information management using building information modelling — Part 1: Concepts and principles*. ISO.
4. Demirel, F. (2025). *Binalarda yangın güvenliği* [Yüksek lisans ders notları]. Gazi Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi.
5. Demirel, F., Hoçanlı, Ö., & Tunç Kurt, T. (2014). Ankara’da bir fakülte binasının Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik kapsamında incelenmesi. *1. Ulusal Yapı Fizikliği ve Çevre Kontrolü Kongresi Bildiriler Kitabı* (p.353-362). İstanbul Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, İstanbul.
6. Başdemir, H., & Demirel, F. (2010). Binalarda pasif yangın güvenlik önlemleri bağlamında bir literatür araştırması. *Politeknik Dergisi*, 13(2), 101–109. <https://doi.org/10.2339/2010.13.2.101-109>
7. Beşiroğlu, Ş., & Serteser, N. (2023). Bina tasarımında yangın emniyetinin dijital dönüşümü ve yapı bilgi modelleme (BIM) üzerine bir inceleme. *Mimarlık ve Yangın Sempozyumu Bildiri Kitabı* (p. 63-70). İstanbul: İTÜ Taşkışla, 4–5 Mayıs 2023.
8. Beşiroğlu, Ş., & Serteser, N. (2025). Yapı bilgi modelleme (BIM) ile binaların yangın emniyeti performansının değerlendirilmesi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 40(1), 501–513.
9. Kincelova, K., Botton, C., Blanchet, P., & Dagenais, C. (2020). Fire safety in tall timber buildings: A BIM-based automated code-checking approach. *Buildings*, 10(7), 121. <https://doi.org/10.3390/buildings10070121>
10. *Binaların yangından korunması hakkında yönetmelik* (Resmî Gazete: 19 Aralık 2007, Sayı 26735; son değişiklik: Resmî Gazete, 20 Kasım 2021, Sayı 31665).
11. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2024, Aralık). *Binaların yangından korunması hakkında yönetmeliğin uygulanmasına ilişkin kılavuz*. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı.
12. BIM Forum. (2025). Level of development (LOD) specification: Part I. <https://bimforum.org/lod>
13. Ergen Pehlevan, E. (2025). LOD ve Level of Information Need [Ders notları]. İstanbul Teknik Üniversitesi Sürekli Eğitim Merkezi.
14. buildingSMART Türkiye. (2023). *Yapı yaşam döngüsünde bilgilerin düzenlenmesi, sayısallaştırılması ve yönetimi rehber kitabı*. Türkiye İMSAD.
15. Choi, J., Choi, J., & Kim, I. (2013). *Development of BIM-based evacuation regulation checking system for high-rise and complex buildings*. *Automation in Construction*. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.12.005>

BİNA PERFORMANS ÇALIŞMALARINDA TEST BİNALARININ ROLÜNÜN İNCELENMESİ

Simin Pakakar^{1*}

Suzi Dilara Mangan²

^{1,2} YTÜ Mimarlık Fakültesi, Yıldız Kampüsü, Beşiktaş, İstanbul, 34349

ÖZET

Bina sektörü için belirlenen sürdürülebilirlik hedeflerinin başarılabilesinde binaların enerji ve çevresel performanslarını daha da artırabilecek yeni bina konseptlerinin, teknolojilerinin ve malzemelerinin sürekli olarak geliştirilmesi ciddi bir öneme sahiptir. Bu kapsamda geliştirilen yeni teknolojilerin ve malzemelerin bina performansı üzerindeki etkisinin nicel değerlendirilmesi ise, yaygın olarak sayısal ve deneysel yöntemler kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Sayısal yöntemler kapsamında kullanılan bina performans simülasyon araçları ile kurulan modelin ve gerçekleştirilen simülasyonların kontrolünü, hassasiyetini ve güvenilirliğini sağlamak için doğrulama ve onaylama süreçlerinin yapılabilmesi hayati önem taşımaktadır. Bina tasarım aşamasında öngörülen performans değeri ile bina kullanımı aşamasında ölçülen performans değeri arasındaki farkı tanımlayan performans açığının indirgenmesinde deneysel yöntemlerin de dikkate alınması gerekmektedir. Dolayısıyla, bu çalışmada bina performans çalışmalarında Köppen-Geiger iklim sınıflandırmasına göre Csa iklim bölgesinde gerçekleştirilmiş açık alan test hücrelerinin rolünün sistematik literatür taraması aracılığıyla incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç çerçevesinde, Web of Science ve Scopus veri tabanlarında PRISMA kılavuzunun esas alındığı bir iş akışına dayalı olarak açık alan test hücrelerine ilişkin çalışmalar taranmış olup bu test binalarının bina performans çalışmalarındaki rolü ağırlıklı olarak tasarım özellikleri ve test kapasiteleri açısından incelenmiştir. İnceleme sonucunda bina sektöründe yüksek performanslı bina üretimine yönelik geliştirilecek açık alan test hücrelerine ilişkin gereksinimlerin sunulması hedeflenmiştir.

Anahtar kelimeler: Bina Performansı, Deneysel Yöntemler, Test Binası, Sistematik Literatür Taraması, Açık Alan Test Hücresi.

INVESTIGATION OF THE ROLE OF TEST BUILDINGS IN BUILDING PERFORMANCE STUDIES

ABSTRACT

Continuous development of new building concepts, technologies, and materials that can further improve the energy and environmental performance of buildings is crucial for achieving the sustainability goals set for the building sector. Quantitative evaluation of the impact of these newly developed technologies and materials on building performance is commonly carried out using numerical and experimental methods. For building performance simulation tools used within the scope of numerical methods, verification and validation processes are vital to ensure the control, accuracy, and reliability of the models and simulations performed. Experimental methods should also be considered in reducing the performance gap, which defines the difference between the performance value predicted during the building design phase and the performance value measured during the building's use. Therefore, this study aims to systematically examine the role of outdoor test cells implemented in the Csa climate zone according to the Köppen-Geiger climate classification in building performance studies through a literature review. Within this framework, studies on outdoor test cells were searched in the Web of Science and Scopus databases based on a workflow guided by the PRISMA guidelines, and the role of these test buildings in building performance studies was examined primarily in terms of their design characteristics and test capacities. The aim of this review was to present the requirements for outdoor test cells to be developed for high-performance building production in the building industry.

Keywords: Building Performance, Experimental Methods, Test Building, Systematic Literature Review, Outdoor Test Cell.

^{1*}Sorumlu yazar e-posta adresi: siminpakakar26@gmail.com

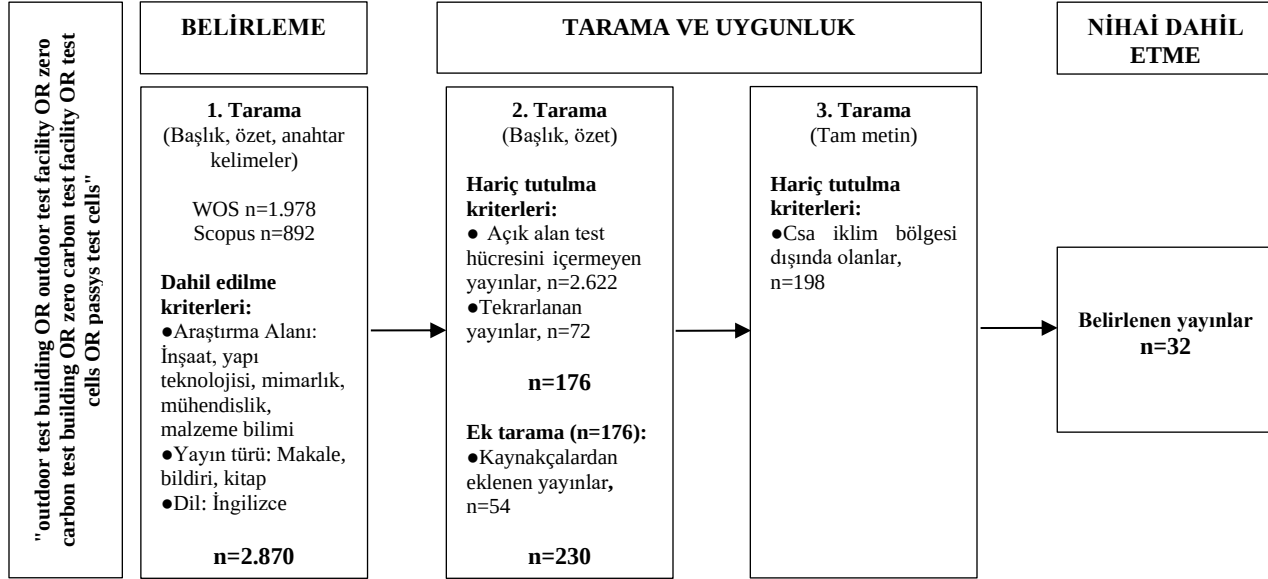
1. GİRİŞ

Bina sektörünün küresel enerji tüketimi ve bu enerji tüketimine dayalı CO₂ salımlarının büyük bir kısmından sorumlu olması, bina sektörünü dünya çapında iklim değişikliği krizine çözüm sunabilecek kritik sektörlerden biri konumuna getirmektedir. Öte yandan, binalarda metrekare başına tüketilen enerji, uygulanan önlemler ve artırılan bilinç düzeyine bağlı olarak azalmış olsa da bu azalma hızının önümüzdeki on yılda önemli ölçüde- neredeyse beş kat- hızlanması gerekmektedir [1,2]. Bu bağlamda, ekonomik döngülere karşı oldukça duyarlı ve parçalı bir yapıya sahip olan bina sektörü, pek çok ülke ekonomisinin 2050 yılına kadar karbonsuzlaştırılması hedefine yönelik ciddi bir dönemeçten geçmektedir. Dolayısıyla, önümüzdeki on yıllar boyunca uzun ömürlü, verimsiz bina stokları ve kentsel alanların çözüm üretilemez hale gelmesinin önüne geçmek için bina sektöründeki mevcut verimlilik açığının azaltılmasına ilişkin enerji verimli ve düşük karbonlu çözümlerin geliştirilmesi, uygulanması, yaygınlaştırılması ve desteklenmesi büyük bir önem arz etmektedir. Ancak, basit bir karar verme sürecine dayalı olmayan yüksek performanslı, enerji etkin bina tasarımında bina sektörünün bilgi odaklı sürdürülebilir bir işletmeye dönüştürülebilmesi için enerji tüketimini ve CO₂ salımlarını azaltmayı sağlayan yenilikçi teknolojiler ve çözümlere ilişkin bilgilendirici destek sağlayan çalışmaların geliştirilmesi zorunludur. Binaların gerçek performanslarının niceliksel olarak belirlenmesi, hesaplama modellerinin doğrulanması ve karbon nötr veya pozitif enerjili binalar için yeni gelişmiş çözümlerin entegre edilmesinin ancak yerinde testler ve dinamik veri analizleri aracılığıyla etkili bir şekilde gerçekleştirilebileceği de açıktır. Dolayısıyla, 2030'a kadar ekonomik büyüme, sosyal katılım ve çevre koruma konularına ilişkin Yeni Sürdürülebilir Kalkınma Gündemi 'ne dayalı olarak yaşanan paradigma değişimine yönelik bina tasarım aşamasında öngörülen performans değeri ile bina kullanım aşamasında ölçülen performans değeri arasındaki farkı tanımlayan performans açığının indirgenmesinde deneysel yöntemlerin de dikkate alınması gerekmektedir. Bu açıdan, üç ana kategori (açık alan gerçek ölçekli, kapalı laboratuvar ve açık alan test hücreleri) altında dikkate alınan deneysel değerlendirme yöntemlerinden açık alan test hücreleri, ilk iki kategori arasındaki boşluğu dolduran bir yaklaşım olarak kabul edilmektedir [3]. Diğer bir deyişle, iç ortam koşulları (sıcaklık, hava akışı vb.) kontrol altında tutulurken, dış ortam koşulları mevcut gerçek koşulları yansıtacak düzeyde değişkendir ve böylelikle bina üretim süreçlerindeki verimliliğin ve kapasite geliştirme faaliyetlerinin artırılmasına yönelik olarak gerçekçi dinamik koşullarda ölçüm yapma, laboratuvar sonuçlarını doğrulama ve bina enerji simülasyonlarını kalibre etme gibi ciddi katkılar sağlanması söz konusudur.

Bu bağlamda, 2030 yılına kadar %21'e varan artıştan azaltım hedefini %41 olarak güncellemiş ve 2030 yılı için yaklaşık 500 milyon ton CO₂ salım azaltımının yapılmasını hedefleyen Türkiye [4] için de bina sektörünün karbonsuzlaştırılmasına yönelik çalışmalar önem kazanmaktadır. Öte yandan, Türkiye'de farklı amaçlar için birbirlerinden bağımsız olarak yapılmış açık alan test hücresi örnekleri [5,6] ile farklı çalışmalar yapılmaya devam edilse de bu test hücreleri ile elde edilen verinin kapsamı oldukça sınırlıdır. Dolayısıyla, bu çalışmada Köppen-Geiger iklim sınıflandırmasına [7] göre Türkiye'nin de içerisinde bulunduğu Csa (Akdeniz iklimi) iklim bölgesinde gerçekleştirilmiş açık alan test hücrelerinin bina performans çalışmalarındaki rolünün sistematik literatür taraması aracılığıyla incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç çerçevesinde, Web of Science (WOS) ve Scopus veri tabanlarında PRISMA kılavuzunun [8] esas alındığı bir iş akışına dayalı olarak açık alan test hücrelerine ilişkin çalışmalar taranmış olup bu test binalarının bina performans çalışmalarındaki rolü ağırlıklı olarak tasarım özellikleri ve test kapasiteleri açısından incelenmiştir.

2. YÖNTEM

Bina performans çalışmalarında açık alan test hücrelerinin rolü, PRISMA kılavuzuna [8] dayalı gerçekleştirilen sistematik literatür taraması aracılığıyla incelenmiştir. Bu bağlamda esas alınan iş akışının genel çerçevesi, **Şekil 1**'de verilmiş olup ilgili adımlar, aşağıda kısaca açıklanmıştır.



Şekil 1. İlgili literatürü belirlemek için esas alınan iş akışı

Belirleme

Literatür taraması, akademik çalışmalarda en yaygın kullanılan iki temel veri tabanı olan WOS ve Scopus aracılığıyla Eylül 2025 tarihinde gerçekleştirilmiştir. Arama stratejisi, açık alan test hücresi ve sıfır karbon hedefleriyle ilişkili anahtar kelimeleri kapsayacak şekilde kurgulanmıştır. Arama kapsamı, "VEYA /OR" bağlacı ile genişletilmiş olup arama kombinasyonu olarak "outdoor test building OR outdoor test facility OR zero carbon test building OR zero carbon test facility OR test cells OR passys test cells" kullanılmıştır. Bu kombinasyon ile gerçekleştirilen ilk tarama, yayın başlığı, özet ve anahtar kelimeler ile sınırlı tutulmuş olup dahil edilme kriterleri olarak araştırma alanı, yayın türü ve dil hususları dikkate alınmıştır. Birinci tarama sonucunda, WOS veri tabanından 1.978 ve Scopus veri tabanından 892 olmak üzere tarama ve uygunluk adımıyla irdelenecek toplam yayın sayısı, 2.870 adet yayın olarak belirlenmiştir.

Tarama ve Uygunluk

Belirleme adımıyla elde edilen yayınlar, başlık ve özet düzeyinde ikinci kez taranmıştır. Bu tarama kapsamında, i) açık alan test hücresi ile ilişkili olmayan 2.622 yayın ve ii) iki veri tabanı üzerinde gerçekleştirilen arama sonucu çakışan veya aynı test hücresini inceleyen 72 yayın olmak üzere toplam 2.694 yayın elenmiştir. Öte yandan, ikinci tarama sonucunda belirlenen 176 yayının kaynakçaları da gerek sistematik taramanın kapsamını genişletmek gerekse veri tabanı aramalarında gözden kaçabilecek ilgili yayınları belirleyebilmek amacıyla ayrıca taranmıştır.

Kaynakça taraması sonucunda açık alan test hücresini içeren 54 ek yayın daha tespit edilmiş olup ikinci tarama sonucunda toplam yayın sayısı 230 olarak belirlenmiştir. Bu adımda, ikinci tarama sonrası belirlenen 230 yayın için tam metin taraması gerçekleştirilerek tarama kapsamında Köppen-Geiger iklim sınıflandırmasına göre Csa (Akdeniz iklimi / yazları sıcak ve kurak, kışları ılık ve yağışlı) iklim bölgesinde gerçekleştirilmemiş olan açık alan test hücresi ile ilişkili yayınlar hariç tutulmuştur. Bu açıdan 198 yayın daha elenmiştir.

Nihai Dâhil Etme

Son adım kapsamında Csa iklim bölgesinde yer alan açık alan test hücreleri ile ilişkili 32 yayın, sistematik literatür taramasının nihai yayınları olarak belirlenmiştir.

3. BULGULAR

Nihai yayınlar üzerinden 32 açık alan test hücresinin bina performans çalışmalarındaki rolü ağırlıklı olarak tasarım özellikleri ve test kapasiteleri açısından irdelenmiş olup inceleme sonuçları, aşağıda yer verilen alt başlıklar aracılığıyla sunulmuştur.

Amaç ve Konum

Bina performansının iyileştirilmesi amacına yönelik olarak geliştirilen 32 açık alan test hücreleri irdelendiğinde, iki tanesinin konut binası olarak geliştirildiği [9,10], geri kalan 30'unun ise farklı amaçlara hizmet edecek test hücrelerinden [11-40] oluştuğu belirlenmiştir. Bu amaçlar, i) bina kabuğu sistemlerinin (cephe ve duvar sistemleri [11-17,21,23,26,28,30,32,33,35,40], pencere ve gölgeleme sistemleri [18,19,21,27,29,31,36-38] ve yenilikçi malzemeler [11,12,14-16,21,23,24,27,30,32,33,38], ii) iklimlendirme sistemlerinin [9,10,20,21,22,24,25,40], iii) yenilenebilir enerji sistemlerinin [9,10,21,22,24,25] analiz edilmesi alt amaçları ile birlikte iv) gerçek zamanlı ölçümlerin gerçekleştirilmesi [9-40] ve böylelikle simülasyon uygulamalarının doğrulanması [9,10,12,14-16,18,22,24,27,30,33,35-40] olarak sıralanmaktadır.

Farklı amaçlara dayalı olarak gerçekleştirilen test hücrelerinin bulundukları ülke ve kıta açısından bir değerlendirmesi yapıldığında, Avrupa kıtasında 29 adet [10-16,18-22,24-40], Asya [17], Afrika [23] ve Amerika [9] kıtalarında ise 1'er adet açık alan test hücresinin Csa iklim bölgesinde yer aldığı tespit edilmiştir. Avrupa kıtası üzerindeki test hücrelerinin dağılımı incelendiğinde ise, %31 ile İtalya'nın (9 adet) [10,14,15,22,27-29,38,39] ilk sırada yer aldığı ve İtalya'yı %21 ile İspanya (6 adet) [12,13,18,20,21,30], %21 ile Yunanistan (6 adet) [25,33-37], %14 ile Portekiz (4 adet) [19,31,32,40] ve %10 ile Fransa'nın (3 adet) [11,24,26] ile %3 Malta (1 adet) [16] takip ettiği belirlenmiştir. Öte yandan, test hücreleri inşaat yılları açısından 2000 yılı öncesi ve sonrası olarak iki grup altında da irdelenmiştir. 2000 yılı öncesi tamamlanmış altı test hücresinden [11,26,27,35-37] en eski inşa yılı 1990 yılına aittir [27]. Bu test hücresinin Avrupa PASSYS (Passive Solar Systems Testing) projesi [41] kapsamında geliştirilen standart test hücresine uygun olarak yapıldığı belirlenmiştir. 2000 yılı sonrası tamamlanmış 26 test hücresinden [9,10,12-25,28-34,38-40] en yenisi olan [16] ise 2022 yılında inşa edilmiştir.

Form ve Yapım Sistemi

İncelenen test hücrelerinin tek [9,10,12,14,18-22,24-40] veya çoklu test hücrelerine [11,13,15-17,23] sahip oldukları gibi farklı sayıda mekanları bir arada barındıran tek bir test binasından [9,10,27,28,30,32,35] oluşabildikleri belirlenmiştir (Şekil 2). Bu açıdan, taban alanı aralıklarının minimum 4,0 m² [21] ile maksimum 153 m² [9] arasında değişkenlik gösterdiği tespit edilmiştir. Test hücrelerinin biçim faktörü (plandaki bina uzunluğu/bina derinliği) incelendiğinde, biçim faktörü 1 olan kare tipi hücreler [12,14,21,23,26,33,35,38] olduğu gibi biçim faktörü 1,1 [31] ile 2,31 [20] aralığında değişkenlik gösteren dikdörtgen hücreler de tespit edilmiştir. A/V (yüzey alanı/hacim) oranının minimum 0,72 [9] ile maksimum 3,0 [21] olacak şekilde değiştiği belirlenmiştir. Bazı test hücreleri [13,15,20,26,32,35] tamamen adyabatik tasarlandığı için pencere açıklıkları mevcut değildir. Diğerlerinde ise saydamlık oranının (toplam pencere alanı/toplam cephe alanı), minimum %5 [27] ile maksimum %100 [21] olacak şekilde değişkenlik gösterdiği saptanmıştır. Pencere açıklıklarının test amaçlarına (ısıl performans ve enerji testleri, güneş kazancı ve saydamlık oranı odaklı testler, kullanıcı konforu ve iç ortam kalitesi) dayalı olarak çoğunlukla güney yönünde konumlandırıldığı belirlenmiştir [9,12,16,18,19,22,24,25,27,29,31,33,37-40]. Diğer yönlerde de pencere açıklığı olan test hücreleri ise, az sayıdadır [9,11,14,17,21,22,24,25,28,30,39]. İncelenen test hücrelerinin 2 tanesi [9,33] dışında geri kalan hepsi tek katlıdır [10-32,34-40]. Bu test hücrelerinin birden fazla kata sahip olmasının temel sebebi, sadece bir bina bileşeninin (duvar, pencere vb.) izole bir şekilde test edilmesi amacının dışında gerçek bina kullanım koşullarının, kullanıcı konforunun ve enerji performansının bütüncül değerlendirilmesine yönelik olarak tasarlanmış olmalarıdır. Tek katlı test hücrelerinin yüksekliklerinin ise minimum 2,0 m [21] ile maksimum 5,5 m [14,38] arasında değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir. Yüksekliği diğerlerine göre fazla olan test hücrelerinde, doğal havalandırma kapsamında baca etkisinden yararlanılmasının [14] ve yüksek tavanlı bir ofis ortamı için akıllı cam testlerinin gerçekleştirilmesinin [38] ön planda tutulduğu saptanmıştır.



Şekil 2. a) tek test hücresi [23], b) çoklu test hücreleri [15], c) farklı sayıda mekanları barındıran test binası [9]

İncelenen test hücrelerindeki kabuk bileşenlerine ilişkin U-değerleri her yayında paylaşılmamış olup paylaşılan yayınlara dayalı belirlenen minimum ve maksimum U-değerleri ise, i) duvar bileşeni için 0,039 W/m²K [9]- 2,78 W/m²K [33], ii) çatı bileşeni için 0,016 W/m²K [9]- 2,72 W/m²K [23], iii) zemin için 0,034 W/m²K [9]- 4,0 W/m²K [17] ve iv) pencere için 0,15 W/m²K [9]- 6,1 W/m²K [17] olarak sıralanmaktadır. Bazı test hücrelerinde de farklı bina bileşenlerinin veya sistemlerinin test edilmesine yönelik değişken U-değerlerinin kullanıldığı tespit edilmiştir. Bu bağlamda, dış duvar bileşeni için içten yalıtım uygulamasının etkisinin belirlenmesine [11] yönelik olarak yalıtım uygulamasından önce ve sonraki U-değerleri paylaşılmıştır. Mevcut ile iyileştirilmiş cephe sisteminin karşılaştırılmasına [11,13-15] yönelik dikkate alınan farklı cephe

sistemlerine ait U-değerleri verilmiştir. Bina bileşenlerinin etkinliğinin geliştirilen farklı senaryolara dayalı olarak belirlenmesine [17] yönelik duvar, çatı, zemin, pencere için ayrı ayrı U-değerleri paylaşılmıştır. Dinamik bina sistemlerinde (su akışlı cam cephe sistemi [21], yeşil çatı [35]) malzeme ve katman kalınlıklarının değişiklik göstermesi söz konusu olduğu için tek bir sabit U-değerinin paylaşıldığı tespit edilmiştir. Mevsimsel farklara dayalı teorik ile deneysel karşılaştırmaları [16] incelemek amacıyla bina bileşenleri için farklı U-değerlerinin test edildiği belirlenmiştir. İncelenen bazı test hücrelerinde [9-14,16,17,21,22,28-30,35,38] ise bina bileşenleri için yapıldığı ülkedeki yönetmelik ve standartlara uygun sabit U-değerlerinin dikkate alındığı belirlenmiştir.

Yapım sistemi açısından gerçekleştirilen irdeme sonucunda, yaklaşık %58'inin modüler sistemlere (hafif çelik karkas [15,20,31-34,37], çelik [13,14,19,35,38] ya da alüminyum [21,25] iskelet, sandviç panel sistemler [15,19,20,32,34,37], ahşap karkas [9,14,24,27,28] veya CLT (Çapraz Lamine Ahşap) [22]) dayalı olarak inşa edildiği, %20'sinin yığma (tuğla yığma duvarlar [18,23,33], beton blok (masif) duvarlar [11,16,26,40], çift sıra yığma duvarlar [12,17]) olarak tasarlandığı, %22'sinin ise, betonarme karkas üzerine taşıyıcı olmayan dolgu duvarlar [10,29,39], yerinde 3B yazdırılmış mikro-betonarme taşıyıcı duvarlar [30], sabit deney platformları [27,35,36] veya özel düzeneklere [28,37,38] dayalı olarak gerçekleştirildiği belirlenmiştir.

Bina Kabuğu, İklimlendirme ve Yenilenebilir Enerji Sistemleri

Bina kabuğu dış duvar gövde malzemesi olarak yaygın kullanılan malzemenin tuğla olduğu belirlenmiştir [10,12,13,18,23,29,33,35,39]. İkinci sırada ise, taşınabilir ve modüler test hücrelerinde sağladığı pratiklik ile metal yüzeyli sandviç paneller yer almaktadır [15,19,20,32,34,37]. Ayrıca, performans karşılaştırması amacına yönelik olarak çeşitli deneysel ve gelişmiş cephe sistemlerinin de uygulandığı belirlenmiştir [11-17,23,30-33,35,40]. Bu sistemler, havalandırmalı cepheler (seramik, HPL veya prefabrik beton plak kaplama + hava boşluğu) [13,35], referans duvar ile inşaat atıklarından üretilen havalandırmalı opak cephe [14], dıştan ısı yalıtım sistemleri (ETICS/ETIS) [11,13,30,33], faz değiştiren malzeme (PCM) panelleri [23,24], silika aerojel esaslı yüksek performanslı yalıtım panelleri [11], termokromik kaplama harçları [12], şeffaf cam veya polikarbon levhalarla oluşturulan trombe duvar [12,26], su akışlı cam cephe [21], 3B baskı (mikro-beton) duvar [30] ve çift cidarlı cepheler [13,14,19,40] olarak sıralanmaktadır. Sınırlı düzeyde de olsa, modüler yeşil duvar sistemi kullanımına dayalı olarak gölgeleme ve evaporatif soğutmanın irdelendiği test hücreleri de mevcuttur [32]. Öte yandan, test hücrelerinde ısı yalıtım malzemesi olarak polistiren esaslı yalıtım (EPS/XPS) [13,17,23,29,30,40] ve poliüretan esaslı yalıtım (PUR/PUF) [15,16,20,32,37,39] malzemelerinin en yaygın kullanılan ısı yalıtım malzemeleri olduğu belirlenmiştir.

Açık alan test hücrelerinin %50'si pasif iklimlendirme stratejilerine [11,15-19,28,30-37,39], %44'ü hibrit (pasif+aktif) iklimlendirme stratejilerine [9,10,12-14,20-26,29,40] ve geri kalanı ise aktif iklimlendirme stratejilerine [27,38] dayalı olarak tasarlanmıştır. Pasif soğutma açısından doğal havalandırma [9,10,14,15,17,20-22,25,26,31,35-37,40] ve gölgeleme sistemlerinin [9,10,12,15,17,19,22,26-29,31,32,36,38] ağırlıklı kullanıldığı belirlenmiştir. Aktif ve hibrit iklimlendirme sistemlerinde en çok tercih edilen sistemin ise ısı pompası olduğu belirlenmiştir [9,10,13,14,21,22,38]. Öte yandan, yenilenebilir enerji sistemlerinin incelenen test hücrelerine entegre edilme oranı yaklaşık %19'dur. Entegre edilen bu sistemler, ağırlıklı olarak güneş panelleri [9,10,22,24,25], rüzgâr türbinleri [25], güneş kolektörleri [10,22,25] ve jeotermal sistemler (sondaj

ısı değiştiricileri veya toprak-hava ısı değiştiricileri) [9,10,21,22] olarak sıralanmaktadır. Ayrıca bu sistemlerin yaygın olarak ısı pompaları ve batarya depolama üniteleri ile de desteklendiği tespit edilmiştir [22].

Ölçme ve Doğrulama

Test hücrelerinin hepsinde gerçek zamanlı ölçümler gerçekleştirilmiş olup çoğunluğunda simülasyon uygulamalarının doğrulanması [9,15,16,18,22,24,30,33,35,36,38-40] birincil hedefler arasındadır. Bu nedenle en yaygın kullanılan yöntemin "Deneysel Validasyonlu Hibrit Yöntem" olduğu belirlenmiştir. Bu açıdan yaygın kullanılan temel donanımlar, i) sıcaklık ölçümü için termokupllar ve Pt100/Pt1000 sensörleri [13-16,23,24,26,27,31-33,35,37-39], ii) ısı akışı için ısı akışı ölçerler [11,13,14,16,23,26-28,32,33], iii) gün ışığı ve pencere performans testlerinde lüksmetreler, kamaşma sensörleri ve radyometreler [19,27,29,31,34,37-39], iv) doğal havalandırma için anemometreler [14,15,24-27,35,37], v) akustik ölçüm cihazları [11,30] ve yangın test ekipmanları [11] olarak sıralanmaktadır. Ölçme verilerine dayalı olarak bina performans simülasyon modellerinin geliştirilmesinde kullanılan yazılımlar ise, i) bina enerji simülasyonu için ağırlıklı olarak EnergyPlus (DesignBuilder arayüzü ile kullanım) [9,10,12,14,22,39,40], TRNSYS [15,35,38,39], ESP-r [35], PHPP [10] ve jEPlus [9], ii) hava akışı ve sıcaklık dağılımını detaylı incelemek için PHOENICS [36] veya genel hesaplamalı akışkanlar dinamiği kodları [14,20,36], iii) matematiksel modelleme, özellikle Direnç-Kapasitans modelleri oluşturmak için MATLAB [9,21,24,26,33,36,38-40], iv) pencere ve cam sistemleri için WINDOW 7.5 [38], ısı köprüleri ve nem analizi için Delphin [16] ve v) yaşam döngüsü analizi için Simapro ve Ecoinvent [22,25]'tir. Sonuç olarak, çalışmaların çoğunda sensörler aracılığıyla ölçme, EnergyPlus/TRNSYS ile modelleme, doğrulama ve optimize etme döngüsünün takip edildiğini söylemek mümkündür.

Zorluklar ve Gelişmeye Açık Alanlar

Açık alan test hücrelerinin gerçekleştirilme amacı, yaygın olarak enerji tüketimi ve ısıl konfor açısından bina kabuğu bileşenlerinin ve pasif/hibrit iklimlendirme sistemlerinin performanslarının gerçek iklim koşulları altında test edilmesidir. Ancak bu amaca yönelik olarak yapılan çalışmalarda pek çok zorlukla karşı karşıya kalınmakta olup bunlardan öne çıkanları, i) gerçek iklim koşullarının kontrol edilememesi, ii) hava akışı ve doğal taşınımın ölçümünün zor olması, iii) modüler veya sökülebilir sistemlerde montaj ve demontaj sırasında oluşan detay problemleri, iv) test hücrelerinde homojen iç ortam koşulu sağlamanın güçlüğu, v) simülasyonlar aracılığıyla elde edilen veriler ile deney sonuçlarının birebir eşleştirilememesi olarak sıralanmaktadır. Öte yandan, 32 adet test hücresi içerisinde sadece ikisinde [10,22] gerçek kullanıcı deneyimine ilişkin ölçümlerin yapıldığı tespit edilmiştir. Diğer çalışmalarda konfor ve kullanım şartları, nesnel ölçümler, matematiksel modeller ve standartlara dayalı olarak belirlenmiştir. Ayrıca, binaların karbonsuzlaştırılmasına yönelik çalışmaların öneminin arttığı bu dönemde, incelenen 32 çalışmadan yalnızca 3 tanesinde yaşam döngüsü analizinin gerçekleştirildiği [14,21,30] belirlenmiştir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışma ile binaların enerji ve çevresel performanslarını iyileştirebilecek yeni bina konseptlerinin, teknolojilerinin ve malzemelerinin sürekli olarak geliştirilmesine katkı sağlamak

için gerçekleştirilen açık alan test hücrelerinin rolü, sistematik literatür taraması aracılığıyla incelenmiştir. Türkiye'nin de içinde bulunduğu Csa iklim kuşağında gerçekleştirilen çalışmalara yönelik yapılan detaylı analiz sonucunda, test hücrelerinin tasarım özellikleri ve test kapasiteleri açısından önemli sonuçlara ulaşılmıştır.

Bu bağlamda, Akdeniz iklimine yönelik çalışmalarda doğal havalandırma, gölgeleme ve ısıl kütle gibi pasif tasarım stratejilerinin baskın bir yaklaşım olduğu belirlenmiştir. Öte yandan, gerçek iklim koşullarında deneysel kontrol gereksinimi ve performans optimizasyonu ihtiyacı, hibrit sistemlerin de yaygın bir biçimde tercih edilmesine neden olmuştur. Yenilenebilir enerji sistemlerinin test hücrelerine entegrasyonunun sınırlı düzeyde kalması ise, özellikle net sıfır enerjili ve sıfır karbon bina hedefleri doğrultusunda literatürde önemli bir araştırma boşluğuna işaret etmektedir. İncelenen 32 yayının yalnızca üçünde Yaşam Döngüsü Analizi (LCA) bulunması, gömülü karbon gibi çevresel etkilerin ihmal edildiğini göstermektedir. Paris Anlaşması'nın küresel ısınmayı 1,5°C ile sınırlandırma ve 2050 yılına kadar net sıfır emisyon hedefleri dikkate alındığında, deneysel bina araştırmalarında yaşam döngüsü temelli değerlendirmelerin yaygınlaştırılması kritik bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır. Buna ek olarak, çalışmaların büyük çoğunluğunda gerçek kullanıcı verisinin bulunmaması, konfor analizlerinin ağırlıklı olarak matematiksel modeller ve standartlar üzerinden yapılmasına yol açmış; bu durum bina performansının kullanıcı davranışları üzerindeki etkilerinin yeterince temsil edilememesine neden olmuştur.

Öte yandan açık alan test hücreleri, yalnızca tekil bina bileşenlerinin performansını ölçen deneysel araçlar olmanın ötesinde; bina enerji simülasyonlarının doğrulanması, yeni yapı teknolojilerinin güvenilirliğinin test edilmesi ve performans açığının azaltılması açısından kritik bir araştırma altyapısı sunmaktadır. Özellikle PASSYS [41] ve DYNASTEE [42] gibi uluslararası ölçekte kurulmuş test hücresi ağları, farklı iklimlerde elde edilen deneysel verilerin karşılaştırılmasına olanak tanıyarak bina sektöründe ortak standartların gelişmesine katkı sağlamaktadır. Bu ağlar sayesinde akademik çalışmalar daha tekrarlanabilir ve karşılaştırılabilir hale gelirken, bina malzemeleri ve sistemleri için bilimsel temelli sertifikasyon süreçleri desteklenmekte; kamu otoriteleri için ise enerji verimliliği ve karbon azaltımına yönelik mevzuatların oluşturulmasında güvenilir bir veri altyapısı sağlanmaktadır. Türkiye'de ise, halihazırda farklı amaçlarla kurulmuş açık alan test hücresi örnekleri bulunsa da bu tesisleri bütüncül bir çerçevede bir araya getirecek, uluslararası ağlarla entegre bir araştırma altyapısının eksikliği dikkat çekmektedir. Bu çalışmadan elde edilen bulgular doğrultusunda, Türkiye'de kurulacak yeni açık alan test hücrelerinin; Akdeniz iklimine özgü koşulları temsil eden, yaşam döngüsü analizlerini ve kullanıcı odaklı değerlendirmeleri içeren, aynı zamanda uluslararası test ağlarıyla uyumlu biçimde kurgulanması, yüksek performanslı bina üretimine yönelik ulusal hedeflere önemli katkılar sağlayacağı açıktır.

KAYNAKLAR

1. International Energy Agency. (2023). *Buildings – Energy System*. International Energy Agency. Erişim Tarihi (01/01/2026) <https://www.iea.org/energy-system/buildings>
2. Organisation for Economic Co-operation and Development (2025), *Zero-Carbon Buildings in Cities: A Whole Life-Cycle Approach*, OECD Urban Studies, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/daae8779-en>

3. Cattarin, G., Causone, F., Kindinis, A., & Pagliano, L. (2016). Outdoor test cells for building envelope experimental characterisation: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 606–625. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.012>
4. T.C. Dışişleri Bakanlığı. (2022). *Paris Anlaşması*. Erişim Tarihi (10/02/2026), <https://www.mfa.gov.tr/paris-anlasmasi.tr.mfa>
5. Buyruk, E., Kılınç, F., Karabulut, K., Caner, M., & Bostancı, A. E. (2017). Investigation of the effect of insulation thickness on energy saving by using thermography. *8th International Advanced Technologies Symposium (IATS'17)*, 19–22 October 2017, Elazığ, Turkey.
6. Dalmaçyalı Isı Yalıtım Sistemleri. (2024). *Gebze Isı Yalıtımı Test Evleri*. Erişim Tarihi (10/02/2026), <https://www.dalmacyali.com.tr/gelecek-icin-dalmacyali/isi-yalitim-test-evleri>
7. Climate Change & Infectious Diseases Group. (2006). *World Maps of Köppen-Geiger climate classification*. Erişim Tarihi (10/02/2026), <https://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/>
8. PRISMA Executive. (2009). *PRISMA Statement: Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*. Erişim Tarihi (10/02/2026), <https://www.prisma-statement.org/>
9. Tao, M., Gou, Z., & Ma, N. (2025). Assessment of thermal comfort and thermal resilience in dwellings during heat waves: A case study of a near-zero energy house. *Journal of Building Engineering*, 109, 113052. <https://doi.org/10.1016/j.job.2025.113052>
10. Causone, F., Tatti, A., Pietrobon, M., Zanghirella, F., & Pagliano, L. (2019). Yearly operational performance of a nZEB in the Mediterranean climate. *Energy and Buildings*, 198, 243–260. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.05.062>
11. Ibrahim, M., Nocentini, K., Stipetic, M., Dantz, S., Caiazzo, F. G., Sayegh, H., & Bianco, L. (2019). Multi-field and multi-scale characterization of novel super insulating panels/systems based on silica aerogels: Thermal, hydric, mechanical, acoustic, and fire performance. *Building and Environment*, 151, 30–42. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.01.019>
12. Martín-Consuegra, F., Alonso, C., Pérez, G., Frutos, B., Guerrero, A., & Oteiza, I. (2021). Design, optimization and construction of a prototype for a thermochromic Trombe wall. *Advances in Building Energy Research*, 15(2), 161–178. <https://doi.org/10.1080/17512549.2019.1684365>
13. Alonso, C., Oteiza, I., García-Navarro, J., & Martín-Consuegra, F. (2016). Energy consumption to cool and heat experimental modules for the energy refurbishment of façades: Three case studies in Madrid. *Energy and Buildings*, 126, 252–262. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.04.034>
14. De Masi, R. F., Ruggiero, S., & Vanoli, G. P. (2021). Hygro-thermal performance of an opaque ventilated façade with recycled materials during wintertime. *Energy & Buildings*, 245, 110994. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110994>
15. Ciampi, G., Spanodimitriou, Y., Scorio, M., Rosato, A., & Sibilio, S. (2021). Energy performance of PVC-coated polyester fabric as novel material for the building envelope: Model validation and a refurbishment case study. *Journal of Building Engineering*, 41, 102437. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102437>
16. Caruso, L., Buhagiar, V., Larcher, M., Borg, S. P., & Bottino-Leone, D. (2024). Validation of 3D thermal simulations of the Double C Block, a novel composite masonry unit, using in-situ U-value measurements. *Energy and Buildings*, 325, 114956. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114956>
17. Saleh, P. H., Schiano-Phan, R., & Gleeson, C. (2018). The Rasmaska project: Temperature behaviour of three, full scale test cells in hot Mediterranean summer: Non-insulated double masonry wall and different insulation locations. *Energy and Buildings*, 178, 304–317. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.08.025>

18. Acosta, I., Campano, M. Á., Domínguez, S., & Fernández-Agüera, J. (2019). Minimum daylight autonomy: A new concept to link daylight dynamic metrics with daylight factors. *LEUKOS*, 15(4), 251–269. <https://doi.org/10.1080/15502724.2018.1564673>
19. Gomes, M. G., Santos, A. J., & Moret Rodrigues, A. (2014). Solar and visible optical properties of glazing systems with venetian blinds: Numerical, experimental and blind control study. *Building and Environment*, 71, 47–59. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.09.003>
20. Salmerón, J. M., Álvarez, S., Sánchez, J., Ford, B., & Gillott, M. (2012). Analysis of a PHDC (Passive and Hybrid Dwindraft Cooling) experimental facility in Seville and its applicability to the Madrid climate. *International Journal of Ventilation*, 10(4), 391–404. <https://doi.org/10.1080/14733315.2012.11683964>
21. Moreno Santamaria, B., del Ama Gonzalo, F., Griffin, M., Lauret Aguirregabiria, B., & Hernández Ramos, J. A. (2021). Life cycle assessment of dynamic water flow glazing envelopes: A case study with real test facilities. *Energies*, 14(8), 2195. <https://doi.org/10.3390/en14082195>
22. Ascione, F., De Masi, R. F., Gigante, A., & Vanoli, G. P. (2022). Resilience to the climate change of nearly zero energy-building designed according to the EPBD recast: Monitoring, calibrated energy models and perspective simulations of a Mediterranean nZEB living lab. *Energy and Buildings*, 262, 112004. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112004>
23. Mourid, A., El Alami, M., & Kuznik, F. (2018). Experimental investigation on thermal behavior and reduction of energy consumption in a real scale building by using phase change materials on its envelope. *Sustainable Cities and Society*, 41, 35–43. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.04.031>
24. Rouault, F., Bruneau, D., Sébastien, P., & Lopez, J. (2014). Experimental investigation and modelling of a low temperature PCM thermal energy exchange and storage system. *Energy and Buildings*, 83, 96–107. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.05.026>
25. Toumpoulidis, P., Dimoudi, A., Kosmopoulos, P., & Zoras, S. (2017). The contribution of a solar air heater collector to the cooling load in a building. In *Proceedings of the ZED-KIM experimental studies* (Xanthi, Greece).
26. Zalewski, L., Chantant, M., Lassue, S., & Duthoit, B. (1997). Experimental thermal study of a solar wall of composite type. *Energy and Buildings*, 25(1), 7–18. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(96\)00974-7](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(96)00974-7)
27. Aleo, F., Pennisi, A., Scalia, S., & Simone, F. (2001). Optical and energetic performances of an electrochromic window tested in a “PASSYS” cell. *Electrochimica Acta*, 46(14), 2243–2249. [https://doi.org/10.1016/S0013-4686\(01\)00010-2](https://doi.org/10.1016/S0013-4686(01)00010-2)
28. Alcamo, G., & De Lucia, M. (2014). A new test cell for the evaluation of thermo-physical performance of facades building components. *International Journal of Sustainable Energy*, 33(4), 954–962. <https://doi.org/10.1080/14786451.2013.796943>
29. Carletti, C., Sciarpi, F., Pierangioli, L., Asdrubali, F., Pisello, A. L., Bianchi, F., Sambuco, S., & Guattari, C. (2016). Thermal and lighting effects of an external venetian blind: Experimental analysis in a full-scale test room. *Building and Environment*, 106, 45–56. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.06.017>
30. Salandin, A., Quintana-Gallardo, A., Gómez-Lozano, V., & Guillén-Guillamón, I. (2022). The first 3D-printed building in Spain: A study on its acoustic, thermal and environmental performance. *Sustainability*, 14(20), 13204. <https://doi.org/10.3390/su142013204>
31. Carlos, J. S., Corvacho, H., Silva, P. D., & Castro-Gomes, J. P. (2010). Real climate experimental study of two double window systems with preheating of ventilation air. *Energy and Buildings*, 42(6), 928–934. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.01.003>

32. Manso, M., & Castro-Gomes, J. P. (2016). Thermal analysis of a new modular system for green walls. *Journal of Building Engineering*, 7, 53–62. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2016.03.006>
33. Atsonios, I. A., Mandilaras, I. D., Kontogeorgos, D. A., & Founti, M. A. (2017). A comparative assessment of the standardized methods for the in-situ measurement of the thermal resistance of building walls. *Energy and Buildings*, 154, 198–206. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.064>
34. Vasilakopoulou, K., Kolokotsa, D., Santamouris, M., Kousis, I., Asproulas, H., & Giannarakis, I. (2017). Analysis of the experimental performance of light pipes. *Energy and Buildings*, 151, 242–249. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.061>
35. Kotsiris, G., Androutsopoulos, A., Polychroni, E., & Nektarios, P. A. (2012). Dynamic U-value estimation and energy simulation for green roofs. *Energy and Buildings*, 45, 240–249. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.11.005>
36. Papakonstantinou, K. A., Kiranoudis, C. T., & Markatos, N. C. (2000). Numerical simulation of air flow field in single-sided ventilated buildings. *Energy and Buildings*, 33, 41–48. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00063-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00063-3)
37. Dascalaki, E., Santamouris, M., Argiriou, A., Helmis, C., Asimakopoulos, D. N., Papadopoulos, K., & Soilemes, A. (1996). On the combination of air velocity and flow measurements in single sided natural ventilation configurations. *Energy and Buildings*, 24, 155–165. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(96\)00973-1](https://doi.org/10.1016/0378-7788(96)00973-1)
38. Ciampi, G., Scorpio, M., Spanodimitriou, Y., Rosato, A., & Sibilio, S. (2020). Thermal model validation of an electric-driven smart window through experimental data and evaluation of the impact on a case study. *Building and Environment*, 181, 107134. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107134>
39. Barone, G., Buonomano, A., Forzano, C., & Palombo, A. (2019). Building energy performance analysis: An experimental validation of an in-house dynamic simulation tool through a real test room. *Energies*, 12(21), 4107. <https://doi.org/10.3390/en12214107>
40. Oliveira Panão, M. J. N., Santos, C. A. P., Mateus, N. M., & Carrilho da Graça, G. (2016). Validation of a lumped RC model for thermal simulation of a double skin natural and mechanical ventilated test cell. *Energy and Buildings*, 121, 92–103. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.054>
41. CORDIS. (1994). PASSYS (Grant agreement ID: EN3S0085). CORDIS – EU research results. Erişim Tarihi (01/01/2026) <https://cordis.europa.eu/project/id/EN3S0085>
42. DYNASTEE. (2023). DYNASTEE – DYNamic Analysis, Simulation and Testing applied to the Energy and Environmental performance of buildings. Erişim Tarihi (10/02/2026), <https://dynastee.info/>

SÜRDÜRÜLEBİLİR AKUSTİK MALZEMELERİN SES YUTMA VE ÇEVRESEL PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ: TÜRKİYE ÖRNEĞİ

Doğukan Danışmaz^{1*}

Ayşe Bayraktaroğlu²

Seda Kulak Dalkılıç³

^{1,2,3} İstanbul Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü

ÖZET

Sürdürülebilirlik ilkeleri doğrultusunda geliştirilen akustik malzemeler yapı fiziği alanında giderek önem kazanmaktadır. Bu çalışma, Türkiye’de temin edilebilen sürdürülebilir akustik malzemelerin akustik ve çevresel performanslarını üretici beyanları üzerinden incelemeyi amaçlamaktadır. Veri toplama sürecinde, üretici firmaların web siteleri üzerinden teknik bilgiler, test raporları ve ürün sertifikaları incelenmiştir. İncelenen ürünler, kullanılan malzeme, ses yutuculuk katsayısı ve sürdürülebilirlik kriterleri açısından değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında polyester keçe, ahşap yünü ve cam yünü esaslı ürünler detaylı olarak incelenmiştir. Bulgular, cam yünü esaslı malzemenin geniş frekans aralığında en yüksek ve en dengeli ses yutuculuk performansını sergilediğini; ahşap yünü panellerin özellikle orta ve yüksek frekanslarda etkili olduğunu; PET esaslı panellerin ise ürün özelliklerine bağlı olarak değişken, ancak genel olarak orta ve yüksek frekanslarda artış gösteren bir performans sunduğunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, çevresel beyanların sınırlı olması değerlendirmelerin kapsamının genişletilmesi gerektiğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Akustik Malzeme, Sürdürülebilirlik, Ses Yutumu

AN INVESTIGATION OF THE SOUND ABSORPTION AND ENVIRONMENTAL PERFORMANCE OF SUSTAINABLE ACOUSTIC MATERIALS: THE CASE OF TURKEY

ABSTRACT

Acoustic materials developed in line with sustainability principles are gaining increasing importance in building physics. This study aims to examine the acoustic and environmental performance of sustainable acoustic materials available in Turkey based on manufacturer declarations. During the data collection process, technical information, test reports, and product certificates were examined via the manufacturer’s websites. The products examined were evaluated in terms of the materials used, sound absorption coefficient, and sustainability criteria. The findings indicate that the glass wool-based material exhibits the highest and most balanced sound absorption performance across a wide frequency range; wood wool panels are particularly effective at medium and high frequencies; and PET-based panels demonstrate performance that varies depending on product characteristics but generally increases at medium and high frequencies. However, the limited availability of environmental declarations suggests that the scope of such assessments should be expanded.

Keywords: Acoustic Material, Sustainability, Sound Absorption

^{1*}Sorumlu yazar e-posta adresi: dogukan.danismaz@ogr.iu.edu.tr

1. GİRİŞ

Günümüz dünyasında kentleşme ve nüfus artışı giderek ivme kazanmaktadır. Bu ivme sonucunda ortaya çıkan en önemli çevresel sorunlardan biri de gürültü kirliliğidir. Literatürde rahatsızlık veren veya istenmeyen sesler olarak tanımlanan gürültü, yalnızca işitme sağlığını değil, aynı zamanda psikolojik konforu, üretkenliği ve yaşam kalitesini de olumsuz etkilemektedir [1]. Bu bağlamda, akustik konforun sağlanması, kullanıcıların bulunduğu mekânlarda hem fiziksel hem de zihinsel iyilik hâlini destekleyen temel bir gereklilik haline gelmiştir [2].

İç mekânlarda gürültü, çoğunlukla mekanik sistem (ısıtma, soğutma, havalandırma, tesisat) ve insan kaynaklı iç mekân aktivitelerinden doğan seslerden kaynaklanmaktadır. Gürültü bileşenlerinin kontrol altına alınması, mekânın boyutları, geometrisi, yüzey kaplamalarının akustik özellikleri ve kullanılan ses yutucu malzemelerin niteliğiyle doğrudan ilişkilidir. Hacim boyutlarının uygun biçimde tasarlanması, ses yansıtıcı yüzeylerin sınırlandırılması, ses yutucu malzeme miktarının artırılması ve kullanıcı yoğunluğunun mekân işlevine göre düzenlenmesiyle iç mekân akustiği optimize edilebilir. Bu bağlamda, akustik malzeme seçimi, reverberasyon süresinin dengelenmesi ve akustik konforun sağlanmasında temel bir rol oynamaktadır.

Son yıllarda, yapı sektöründe enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda sürdürülebilir akustik malzemelere olan ilgi artmıştır. Geleneksel akustik malzemelerin çoğunun petrol veya mineral kökenli olması ve bu malzemelerin üretim süreçlerinin yüksek gömülü enerji içermesi hem karbon ayak izinin artmasına hem de doğal kaynakların tükenmesine yol açmaktadır [3]. Buna karşılık, geri dönüştürülmüş veya biyobazlı içeriklere sahip doğal lif tabanlı malzemeler; polyester keçe, ahşap, kenaf, kenevir, hindistan cevizi lifi ve benzeri hammaddelerle üretilen panellerle akustik performans açısından başarılı sonuçlar elde edilmekte, aynı zamanda çevresel etki ve yaşam döngüsü maliyeti azaltılmaktadır [4,5].

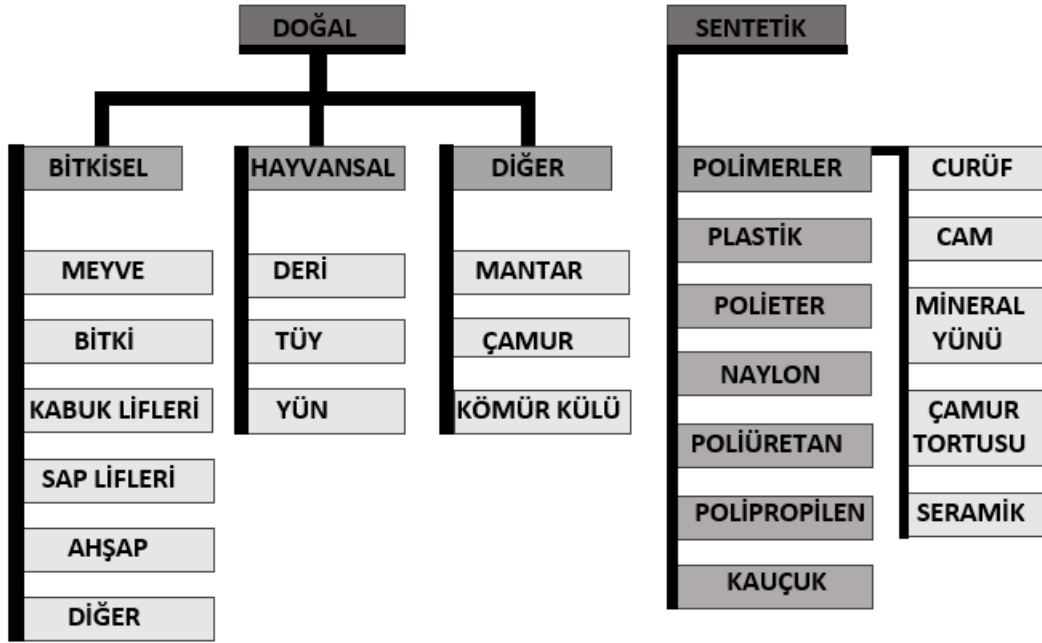
Mevcut literatür incelendiğinde, Türkiye’de sürdürülebilir akustik malzemelere ilişkin verilerin oldukça sınırlı olduğu görülmektedir. Özellikle sektörde ticari olarak temin edilebilen ürünlerin akustik ve çevresel performanslarının sistematik biçimde karşılaştırılmadığı dikkat çekmektedir. Bu durum hem akademik araştırmaların kapsamının genişletilmesi hem de sürdürülebilir malzeme kullanımının tasarım ve uygulama süreçlerine entegrasyonunun güçlendirilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Bu çalışma, söz konusu boşluğu gidermek amacıyla, Türkiye’de temin edilebilen sürdürülebilir akustik malzemelerin ses yutma özellikleri ve çevresel performanslarını üretici beyanları ve teknik dokümanlar üzerinden incelemeyi; böylece yapı fiziği alanında sürdürülebilir malzeme kullanımına ilişkin mevcut duruma genel bir değerlendirme sunmayı hedeflemektedir.

2. YALITIM MALZEMELERİNİN SINIFLANDIRILMASI

Isı ve ses yalıtımında kullanılan malzemeler, kaynaklarına göre doğal ve sentetik olmak üzere iki ana grupta sınıflandırılmaktadır (**Şekil 1**). Doğal malzemeler, bitkisel, hayvansal ve diğer organik kökenli bileşenlerden oluşurken; sentetik malzemeler polimer, plastik, poliüretan, kauçuk vb. esaslı bileşenleri kapsamaktadır. Doğal malzemeler sürdürülebilirlik, biyolojik olarak parçalanabilirlik ve çevre dostu özellikleriyle öne çıkarken, sentetik malzemeler yüksek dayanım, çok yönlülük ve uzun ömürlü performans avantajı sağlamaktadır. Ses yutucu malzemelere ilişkin literatürde belirli

bir sınıflandırma bulunmadığından, bu çalışmada yalıtım malzemelerine yönelik sınıflandırma esas alınmıştır [6].



Şekil 1: Yalıtım malzemelerinin sınıflandırılması [6]

3. SES YUTUMU ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

Ses yutuculuk katsayısının belirlenmesinde en yaygın kullanılan iki ölçüm yöntemi: empedans tüpü yöntemi (ISO 10534-2) [7] ve çınlama odası yöntemi (ISO 354) [8]'dir. Empedans tüpü yöntemi, özellikle küçük boyutlu numunelerin düşük ve orta frekans bantlarındaki ses yutma özelliklerini ölçmek için tercih edilir. Bu yöntemde, tüpün bir ucuna yerleştirilen ses kaynağından yayılan ses dalgalarının malzeme yüzeyinden yansımaları mikrofona aracılığıyla ölçülür. Yansıma katsayısı üzerinden dik gelişli ses yutma katsayısı hesaplanır. Çınlama odası yöntemi ise geniş hacimli laboratuvar ortamında, sesin farklı yönlerde dağınık yansımalarına izin vererek ölçüm yapılmasını sağlar. Bu yöntem, büyük boyutlu numunelerin veya karmaşık yapısal özelliklere sahip malzemelerin geniş frekans aralığında rastgele gelişli ses yutma katsayısının ölçülmesi için uygundur ve daha gerçekçi bir akustik performans analizi sunar.

Ses yutum performansını değerlendirmede kullanılan başlıca kavramlar arasında Ses Yutma Katsayısı (α), Ağırlıklı Ses Yutma Katsayısı (α_w), Gürültü Azaltma Katsayısı (NRC) ve Ses Yutma Ortalaması (SAA) yer almaktadır. Ses Yutma Katsayısı (α), bir malzemenin belirli bir frekanstaki gelen ses enerjisinin ne kadarını yuttuğunu gösteren temel ölçüttür ve 0 ile 1 arasında bir değer alır. Ağırlıklı Ses Yutma Katsayısı (α_w) ise ISO 11654 [9] standardına göre farklı frekanslardaki yutma katsayılarının tek bir değerle ifade edilmesini sağlayan, malzemenin genel ses yutma performansını temsil eden bir göstergedir. Gürültü Azaltma Katsayısı (NRC), ASTM C423 [10] standardına göre 250, 500, 1000 ve 2000 Hz frekans bantlarında ölçülen ses yutma katsayılarının ortalaması alınarak hesaplanır ve malzemenin orta frekanslardaki ortalama ses yutma performansını gösterir. Ses Yutma Ortalaması (SAA) ise yine ASTM C423 [10] standardına göre 200–2500 Hz arasındaki 12

adet 1/3 oktav bantta ölçülen katsayıların ortalamasıyla belirlenir ve NRC'ye göre daha hassas bir ölçüm sunar.

4. YÖNTEM

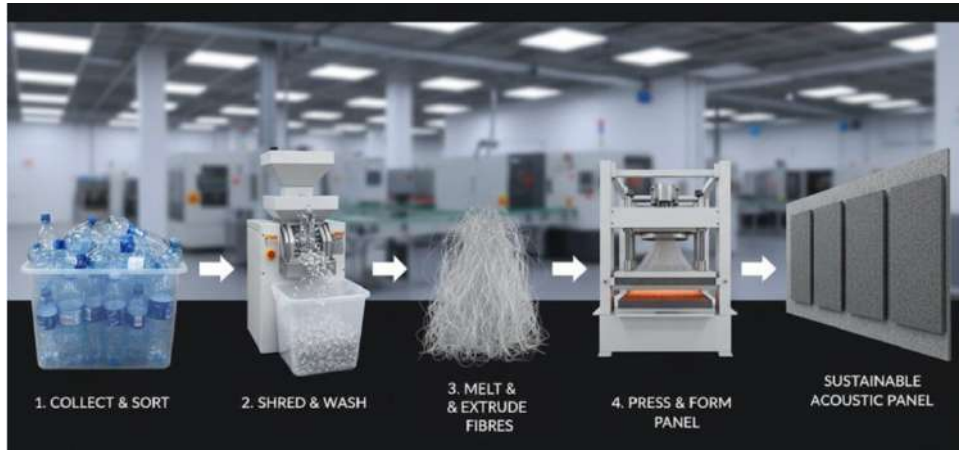
Bu çalışmada, Türkiye'de temin edilebilen sürdürülebilir akustik malzemelerin ses yutum ve çevresel performansları, üretici firmaların sağladığı teknik dokümanlar, test raporları ve ürün sertifikaları üzerinden incelenmiştir. Veriler, firmaların web sitelerinde yer alan açık kaynaklı bilgilerden derlenmiş ve karşılaştırmalı çizelgeler halinde sunulmuştur.

İncelenen her bir ürünün görseli, hammaddesi, malzeme sınıfı, üretim yöntemi, üretildiği yer, malzeme kalınlığı ve montaj koşulları bilgileri **Çizelge 1**'de verilmektedir.

5. BULGULAR

5.1 PET Polyester Keçe Panel

Üretim sürecinde, kullanım ömrünü tamamlamış PET şişeler toplanarak yıkama ve ayıklama işlemleriyle temizlenmekte, ardından küçük parçalara ayrılıp eritilerek ince lifler elde edilmektedir. Bu lifler iğneleme (needle-punching) tekniği ile birleştirilip sıkıştırılarak ses yutucu özellikte keçe esaslı panellere dönüştürülmektedir. **Şekil 2**'de şematik olarak gösterildiği üzere, bu süreç sayesinde atık PET şişeler yeniden değerlendirilmekte, böylece hem atık miktarı azaltılmakta hem de akustik malzeme üretimi için gerekli hammadde ihtiyacı karşılanmaktadır. PET polyester keçe paneller, sentetik kökenli malzemeler kapsamında polimer esaslı plastikler sınıfında yer almaktadır.



Şekil 2: PET'ten akustik panel üretim süreci [11]

İncelenen firmalar kapsamında, dört firmanın ürünlerinin söz konusu üretim yöntemiyle elde edildiği belirlenmiştir. Çalışmanın bu bölümünde, her bir ürüne ilişkin olarak üretici beyanları ve teknik dokümanlar üzerinden derlenen bilgilere yer verilmektedir.

Çizelge 1: İncelenen sürdürülebilir akustik malzemelerin özellikleri

Ürünün Ticari Adı	Görsel	Hammadde	Malzeme Sınıfı	Üretim Yöntemi	Üretildiği Yer	Malzeme Kalınlığı	Montaj Koşulları	Ürün Kodu	Ref.
Akustik Sert Keçe		%100'e kadar geri dönüştürülmüş polyester elyaf	Sentetik/ Plastik	Non-woven (Dokumasız) / Isıl işleme preslenmiş	Türkiye (Yerel üretim)	12 mm	Belirtilme miş	A	[12]
Akustik Elyaflı Homojen Ahşap Yünü Panel		Geri dönüştürülebilir ahşap	Doğal/ Ahşap	Magnezit bağlayıcılı ahşap yünü akustik panel. Homojen yapıda, akustik elyaf ilaveli üretim	Avusturya	15 mm	Tavan sarkma yüksekliği 45 mm	B	[13]
Manta Akustik Panel		PET (Polietilen Tereftalat) Keçe, %50'si PET şişelerden geri dönüştürülmüş %100 polyester	Sentetik/ Plastik	Yüksek yoğunluklu geri dönüştürülmüş PET keçeden, ısıt form verme yöntemiyle üretilen 3 boyutlu akustik panel	Türkiye (Yerel üretim)	50 mm	Belirtilme miş	C	[14]
Akusto Wall A		Yüksek yoğunluklu 3.nesil cam yünü	Sentetik / Polimer / Mineral yünü	Yüksek yoğunluklu cam yününden üretilen, ön yüzeyi boyalı cam tülü kaplı panel. Arka yüzeyi cam tülü, kenarları ise boyasız/doğal yapıda yüksek performanslı akustik levha	İsveç	40 mm	Sistemin toplam derinliği 43 mm	D	[15]
Akustik Keçe Baffle Tavan		PET Polyester Keçe	Sentetik/ Plastik	%100 PET keçeden üretilen, dikey olarak tavana asılan veya raylı sistemle monte edilen akustik baffle sistemi. Isıl işleme preslenmiş lifli yapı	Türkiye (Yerel üretim)	12 mm	Belirtilme miş	E	[16]
Akustik Keçe Kanopi		Polyester Elyaf Keçe, geri dönüştürülmüş pet şişelerden üretilmektedir	Sentetik/ Plastik	%100 PET keçeden üretilen, özel askı aparatları ile tavadan yatay şekilde sarkıtılan akustik kanopi sistemi. Isıl işleme preslenmiş lifli yapı	Türkiye (Yerel üretim)	20 mm	Belirtilme miş	F	[17]

A kodlu Akustik Sert Keçe [12], ses yutumu performansının yanı sıra ısı yalıtımı da sağlayan, B-s1,d0 yangın sınıfına sahip bir malzemedir. Yüksek darbe dayanımı ve şok emici özellik gösteren ürün, kullanım süresince deformasyon ve çürüme eğilimi göstermez. REACH, RoHS, Oeko-Tex, TSE, CE ve UTO sertifikalarına sahip olup kanserojen madde içermez, elektrik iletmez ve insan sağlığı açısından güvenlidir. Tamamı geri dönüştürülmüş PET şişelerden elde edilen polyester elyaftan, kimyasal katkı kullanılmadan non-woven iğneleme teknolojisiyle üretilir. %100 geri dönüştürülebilir olup formaldehit ve VOC içermez; toksik ve alerjen değildir.

C kodlu Manta Akustik Panel [14], su ve yağ itici özellikte olup neme karşı yüksek dayanım göstermektedir ve ışık geçirimsiz bir yapıya sahiptir. EN 13501 [18] standardına göre B-s1,d0 yangın sınıfındadır. Isı iletkenlik katsayısı 0,040 W/mK olan malzemenin akustik performansı ASTM C423 [10] ve EN ISO 354 [8] standartlarına göre test edilmiştir. İçeriğinin yaklaşık %50'si geri dönüştürülmüş PET şişelerden elde edilmekte olup ürün %100 polyester esastır.

E kodlu Akustik Keçe Baffle Tavan [16], yüksek yangın dayanımına sahip olup kesici aletlerle serbest biçimde şekillendirilebilmektedir. Çevre dostu bir üretim süreciyle imal edilen ürün, geri dönüştürülmüş içerik barındırmakta ve sürdürülebilir malzeme yaklaşımı sunmaktadır.

F kodlu Akustik Keçe Kanopi [17], hassas kesim yapısı sayesinde panellerin birleşim noktalarında ısı ve ses köprüsü oluşumunu engellemektedir. RoHS ve REACH mevzuatına uygun olan ürünün yoğunluğu 2000 g/m², ısı iletkenlik katsayısı 0,034–0,039 W/mK aralığında olup yangın performansı B-s1,d0 sınıfındadır. VOC ve formaldehit içermeyen malzeme; koku yapmaz, antialerjiktir, nem ve sudan etkilenmez, çürüme göstermez ve mikroorganizma barındırmaz. Geri dönüştürülmüş PET şişelerden üretilmekte olup %100 geri dönüştürülebilir niteliktedir.

5.2 Ahşap Yünü Panel

Ahşap talaşı esaslı panellerin üretiminde, uygun ağaç türlerinden elde edilen lifler özel işlemlerden geçirilerek çimento ile belirli oranlarda karıştırılmakta ve karışım kalıplara yerleştirilerek hidrolik pres ile sıkıştırılmaktadır. Kalıptan çıkarılan paneller, çimentonun tam dayanım kazanması için doğal ortam koşullarında kürlenmektedir. Bu üretim süreci sonucunda elde edilen lifli ve gözenekli yapı, malzemenin ses yutma performansını belirleyen temel özellik olarak öne çıkmaktadır [19].

Ahşap yünü panel kapsamında değerlendirilen B kodlu Akustik Elyafli Homojen Ahşap Yünü Panel [13], manyezit bağlayıcılı, tek katmanlı bir ahşap yünü esaslı tavan ve duvar panelidir. Yaklaşık 1 mm lif genişliğine sahip ince yüzey yapısı ve arka yüzeyindeki akustik şilte sayesinde yüksek ses yutma performansı sunmaktadır. Sınıf 1A darbe dayanımına ve B-s1,d0 yangına tepki sınıfına sahiptir. %90'a kadar sabit bağıl neme sahip iç mekânlarda kullanıma uygun olup dış hava koşullarına doğrudan maruz kalan alanlar için önerilmemektedir. Ürün; EPD, FSC ve PEFC sertifikalarına sahip olup hammadde temininden yaşam döngüsü sonuna kadar çevresel etkilerinin beyan edildiğini ve kullanılan ahşabın sürdürülebilir ormancılık ilkelerine uygun şekilde temin edildiğini göstermektedir.

5.3 Cam Yünü Panel

Cam yünü paneller, mineral yünü sınıfında yer alan sentetik kökenli akustik malzemelerdir. Silis kumu, geri dönüştürülmüş cam ve mineral katkıların yüksek sıcaklıkta eritilerek liflendirilmesiyle elde edilen gözenekli yapı, ses dalgalarının sönümlenmesini sağlayarak yüksek ses yutma performansı sunar. Lifler bağlayıcılarla bütünleştirilip şekillendirilerek levha formunda üretilmektedir.

Bu kapsamda incelenen D kodlu Akusto Wall A [15], A2-s1,d0 yangın sınıfında olup yanmaz malzeme grubundadır. Yüksek nem dayanımına sahip olmakla birlikte taşıyıcı bir eleman değildir, ancak DIN 18032-3 [20] standardına uygun darbe dayanımı sağlamaktadır. Eurofins Indoor Air Comfort Gold sertifikası iç mekân hava kalitesine uygunluğunu gösterirken, Cradle to Cradle Certified – Bronze ve Material Health Certificate – Silver belgeleri ürünün çevresel ve içerik sağlığı kriterleri açısından değerlendirildiğini ortaya koymaktadır. %53–60 oranında geri dönüştürülmüş içerik barındırmakta, kullanım ömrü sonunda tamamen geri dönüştürülebilmekte ve EPD belgeleri ile yaşam döngüsü çevresel etkileri beyan edilmektedir.

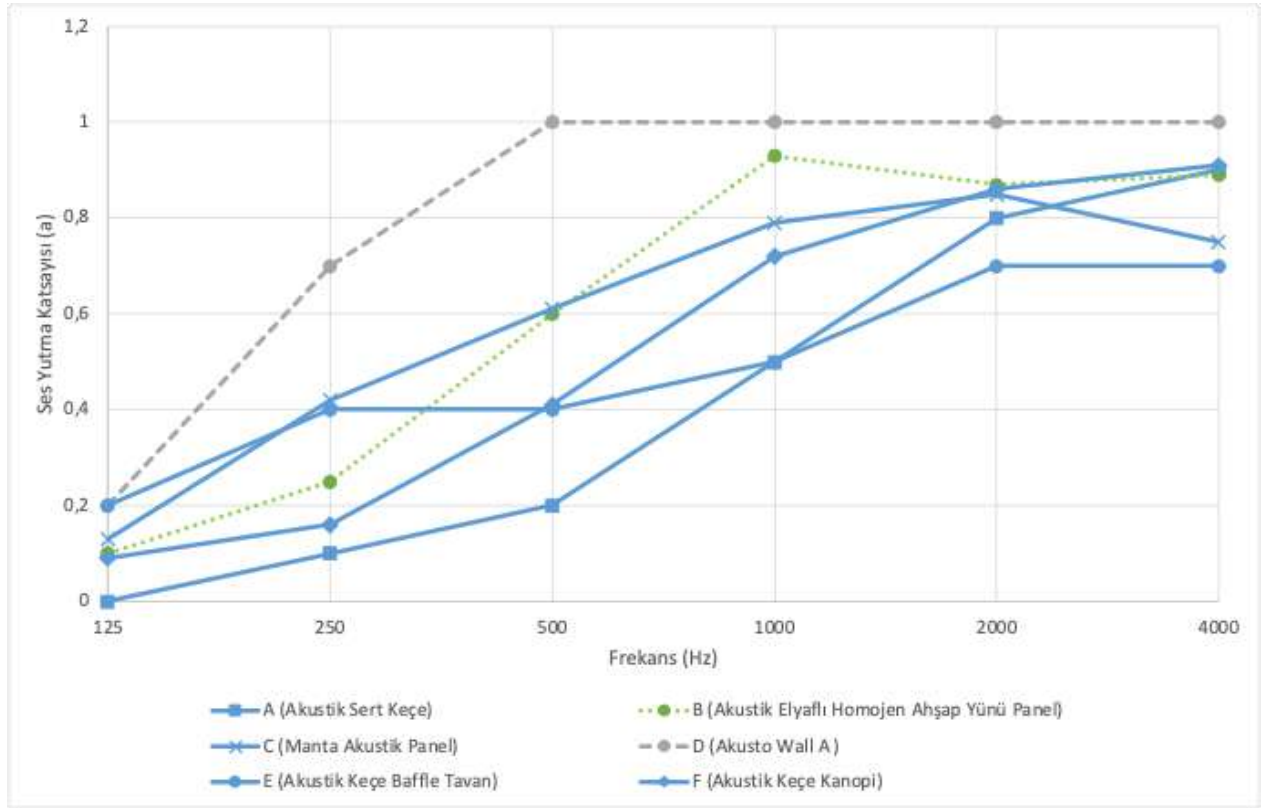
6. TARTIŞMA

Çizelge 3 ve **Şekil 3**'te incelenen malzemelere ait ses yutuculuk katsayısı (α), ağırlıklı ses yutma katsayısı (α_w), NRC ve SAA değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. α_w değeri, deney numunesinin ses yutuculuk katsayısı olan α_s değeri esas alınarak belirlenmiştir. Bir önceki bölümde malzemeler, temel içeriklerine göre PET polyester keçe paneller, ahşap yünü paneller ve cam yünü paneller olmak üzere üç ana başlık altında sınıflandırılmış ve her bir grup için genel özellikler değerlendirilmiştir.

Bu bölümde ise söz konusu malzeme gruplarının akustik performans parametreleri birlikte ele alınarak, içerik türü ile ses yutma performansı arasındaki ilişkiler tartışılmakta ve malzemeler arasındaki benzerlikler ile farklılıklar bütüncül bir bakış açısıyla değerlendirilmektedir.

Sunulan veriler incelendiğinde, malzemelerin akustik performanslarının içeriklerine bağlı olarak farklılık gösterdiği görülmektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde, cam yünü panel (D) en yüksek ve en dengeli ses yutma performansını sergilemektedir. Bunu ahşap yünü panel (B) izlemekte; PET polyester keçe paneller (A, C, E, F) ise özellikle düşük frekanslarda daha sınırlı bir performans göstermektedir. Orta ve yüksek frekans bantlarında ise tüm malzemelerde belirgin bir artış eğilimi gözlenmektedir.

PET polyester keçe grubunda yer alan malzemeler genel olarak düşük frekanslarda sınırlı, orta ve yüksek frekanslarda ise artan bir ses yutma performansı göstermektedir. Ancak ürünler arasında belirgin farklılıklar bulunmaktadır. Bu farkın malzeme kalınlıklarının farklı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir: A (12 mm), C (50 mm), E (12 mm) ve F (20 mm). A kodlu malzeme PET ürünler arasındaki en düşük performansı sergilerken ($\alpha_w=0,30$; NRC=0,40), E ve F kodlu malzemeler orta düzeyde performans göstermektedir ($\alpha_w\approx 0,45-0,50$). C kodlu malzeme daha yüksek bir genel performans sunmakta ($\alpha_w=0,65$; NRC=0,70). Sonuç olarak, PET keçe paneller arasında performans farklılıkları bulunmakla birlikte, diğerlerine kıyasla oldukça kalın olan C kodlu ürünün bu kategori içinde daha dengeli ve daha yüksek bir akustik performans sunduğu görülmektedir.



Şekil 3: İncelenen atık tabanlı sürdürülebilir akustik malzemelerin ses yutum performanslarının karşılaştırılması

Çizelge 3: İncelenen atık tabanlı sürdürülebilir akustik malzemelerin ses yutuculuk katsayısı, α_w , NRC ve SAA değerleri

Frekans (Hz)- Ses Yutuculuk Katsayısı (α)	A	B	C	D	E	F
63	0,00		0,04		0,10	
125	0,00	0,10	0,13	0,20	0,20	0,09
250	0,10	0,25	0,42	0,70	0,40	0,16
500	0,20	0,60	0,61	1,00	0,40	0,41
1000	0,50	0,93	0,79	1,00	0,50	0,72
2000	0,80	0,87	0,85	1,00	0,70	0,86
4000	0,90	0,89	0,75	1,00	0,70	0,91
α_w	0,30	0,55	0,65	1,00	0,45	0,45
NRC	0,40	0,65	0,70		0,50	0,55
SAA	0,39				0,48	0,55

A = Akustik Sert Keçe; B = Akustik Elyafli Homojen Ahşap Yünü Panel; C = Manta Akustik Panel; D = Akusto Wall A; E = Akustik Keçe Baffle Tavan; F = Akustik Keçe Kanopi

B kodlu ahşap yünü panel (13 mm), 250 Hz'den itibaren belirgin bir performans artışı göstermekte; 500 Hz'de $\alpha=0,60$ ve 1000 Hz'de $\alpha=0,93$ değerlerine ulaşmaktadır. $\alpha_w=0,55$ ve NRC=0,65

değerleri, bu malzemenin benzer kalınlığa sahip A ve E kodlu PET keçe panellere kıyasla daha yüksek ses yutma performansı sunduğunu göstermektedir. Gözenekli lifli yapısının orta ve yüksek frekanslardaki etkinliği artırdığı söylenebilir.

D kodlu cam yünü panel (40 mm), neredeyse tüm frekans bantlarında en yüksek performansı göstermektedir. 250 Hz’de $\alpha=0,70$ değerine ulaşmakta ve 500–4000 Hz aralığında $\alpha=1,0$ değerini korumaktadır. $\alpha_w=1,00$ değeri, malzemenin geniş bantta neredeyse tam yutucu karakter gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu sonuç, cam yününün lifli ve yüksek gözenekli yapısının ses enerjisini etkin biçimde sönümlediğini göstermektedir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında Türkiye’de temin edilebilen sürdürülebilir akustik malzemelerin ses yutma performansları ile çevresel özellikleri üretici beyanları doğrultusunda karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular, malzemelerin akustik performanslarının içerik türüne bağlı olarak farklılık gösterdiğini ortaya koymuştur. Cam yünü esaslı malzemenin tüm frekans bantlarında en yüksek ve en dengeli performansı sergilediği; ahşap yünü panelin orta ve yüksek frekanslarda güçlü bir performans sunduğu; PET polyester keçe panellerin ise ürün tipine ve kalınlığına bağlı olarak değişken olmakla birlikte özellikle düşük frekanslarda daha sınırlı kaldığı belirlenmiştir.

Çevresel açıdan değerlendirildiğinde, geri dönüştürülmüş PET ve biyobazlı içeriklerin kullanımı atık yönetimi ve kaynak verimliliği açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Bununla birlikte, çevresel performansın çoğunlukla üretici beyanlarına dayanması ve tüm ürünler için kapsamlı yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) verilerinin bulunmaması önemli bir sınırlılık olarak öne çıkmaktadır.

Bu doğrultuda, gelecekte yapılacak çalışmalarda malzemelerin laboratuvar ortamında standartlaştırılmış ölçümlerle test edilmesi, yaşam döngüsü analizlerinin gerçekleştirilmesi ve akustik performans ile karbon ayak izi arasındaki ilişkinin bütüncül biçimde ele alınması önerilmektedir. Ayrıca sürdürülebilir akustik malzemelerin tasarım süreçlerine entegrasyonunu destekleyecek performans-veritabanlarının oluşturulması hem akademik hem de uygulama alanı için önemli katkılar sağlayacaktır.

8. KAYNAKÇA

1. Aydın, M. S. & Özçetin, Z. (2025). Urban design and noise management: Environmental noise problems and solutions suggestions in Mardin city centre. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33(3).
2. Akay, A., & Önder, S. (2021). A New Approach on the Determination of the Spatial Criteria and Parameters Affecting Walking Comfort: Selcuk University Example. *Selcuk Journal of Agriculture and Food Sciences*, 35(1), 24–32.
3. A. İ. Kaya & T. Dalgar. (2017). Ses Yalıtımı Açısından Doğal Liflerin Akustik Özellikleri. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Özel Sayı 1*, 25-37.

4. E. Sariay, A. Cörüt & B. Y. Büyükkakıncı. (2023). Miselyum Kompozitlerinin Sürdürülebilir Yapı Malzemesi Olarak Kullanımı. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 14(1), 196-207. <https://doi.org/10.29048/makufebed.1228676>
5. M. Kılıç (Ed.) & İ. Pürlüsoy (Ed.). (2025). *İç Mimarlıkta Uluslararası Araştırma ve Değerlendirmeler 2025*. Livre de Lyon.
6. F. Asdrubali, F. D'Alessandro & S. Schiavoni. (2015). A review of unconventional sustainable building insulation materials. *Sustainable Materials and Technologies (SM&T)*, Volume 4, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2015.05.002>
7. International Organization for Standardization. (1998). *ISO 10534-2: Acoustics — Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes — Part 2: Transfer-function method*. ISO.
8. International Organization for Standardization. (2003). *ISO 354: Acoustics — Measurement of sound absorption in a reverberation room*.
9. International Organization for Standardization. (1997). *ISO 11654: Acoustics — Sound absorbers for use in buildings — Rating of sound absorption*.
10. ASTM International. (2023). *ASTM C423-23: Standard test method for sound absorption and sound absorption coefficients by the reverberation room method*.
11. Office Reality "Our Complete Guide to PET Recycled Felt Screens: Eco Acoustic Panels and Sustainable Wall Solutions" <https://www.officereality.co.uk/blog/our-complete-guide-to-pet-recycled-felt-screens-eco-acoustic-panels-and-sustainable-wall-solutions>
12. Felti Akustik. (n.d.). *Sert Keçe*. <https://www.izobozzfeltbi.com.tr/urunler/akustik-urunler/sert-kece/>
13. Knauf. (n.d.). *HERADESIGN® Superfine Alpha+ 35mm*. https://knauf.com/tr-TR/p/urun/heradesign-r-superfine-alpha-35mm-29233_0240
14. Feltouch. (n.d.). *Manta*. <https://www.feltouch.tr/product/manta/>
15. Qubi. (n.d.). *Akustik Duvar Panelleri*. <https://qubi.com.tr/urunler/hacim-akustigi/akustik-duvar-panelleri/>
16. Aksa Acoustic. (n.d.). *Aksa Felt Panels® Akustik Keçe Baffle Tavan*. <https://www.aksaacoustic.com/akustik-kece-baffle-tavan/>
17. İzobozz Feltbi. (n.d.). *Akustik Keçe Kanopi*. <https://www.izobozzfeltbi.com.tr/urunler/akustik-urunler/akustik-kanopi/>
18. European Committee for Standardization. (2018). *EN 13501-1: Fire classification of construction products and building elements — Part 1: Classification using data from reaction to fire tests*.
19. Jafari, A., Monazzam Esmaelpour, M. R., & Zandsalimi, F. (2024). Effect of production and application parameters on acoustic performance of wood wool cement panels. *Journal of Health and Safety at Work*, 14(2), 367–384.
20. Deutsches Institut für Normung. (2018). *DIN 18032-3: Sports halls — Halls and rooms for sports and multi-purpose use — Part 3: Testing of safety against ball throwing*.

MEVCUT BİNA STOKUNUN ENERJİ PERFORMANSI AÇISINDAN HARİTALANMASI: BEŞİKTAŞ ÖRNEĞİ

Beyzanur Baş Kahveci^{1*}

Suzi Dilara Mangan²

^{1,2} YTÜ Mimarlık Fakültesi

Yıldız Kampüsü, Beşiktaş, İstanbul, 34349

ÖZET

Yüksek kentleşme ve iklim değişikliği risklerine artan maruziyet ve çok boyutlu kırılganlık düzeyi ile karşı karşıya kalan kentler, kentsel alanlarda sürdürülebilir kalkınmayı sağlayabilmek için enerji verimliliğini önceliklendiren pek çok eylemde bulunmaktadır. Bu eylemlerin başında ise, binaların yüksek enerji verimlilik düzeylerine sahip olacak şekilde üretilmesi veya iyileştirilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, bina enerji performansının değerlendirilmesini ve karşılaştırılmasını gerçekleştirebilen enerji kimlik belgesi (EKB), en yaygın kullanılan araçtır. Dolayısıyla, bu çalışmada da enerji arzı açısından yüksek düzeyde dışa bağımlı olan Türkiye için mevcut bina stokunun enerji performansının tespitine yönelik olarak EKB verileri (EKB'ye sahip bina sayısı, EKB alım oranı, EKB sınıf dağılımları vb.) üzerinden kapsamlı bir analiz gerçekleştirilmesi ve böylelikle Türkiye'de EKB uygulaması için hazırlanması planlanan altyapıya katkı sağlanması amaçlanmıştır. Bu analiz kapsamında çalışma alanı olarak ise, İstanbul ili içerisinde yüksek nüfusa sahip 23 mahalleden oluşan, eski ve yeni bina stokunu bir arada bulunduran Beşiktaş ilçesi dikkate alınmıştır. Analizler sonucunda yasal sınır olan C ve üzeri sınıfa sahip EKB'li bina sayısının mevcut bina stokuna oranı % 4,6 olarak belirlenmiştir. EKB'li binaların % 66,7'sinin C sınıfı, %29,9'unun D-G sınıfı ve %3,4'ünün ise, B sınıfına sahip olduğu tespit edilmiştir. Analiz sürecindeki en ciddi zorluk ise, farklı kurumlardan temin edilen verilerin birbiriyle uyumlu olmaması nedeniyle karşılaşılan yüksek zaman maliyetidir.

Anahtar Kelimeler: Bina enerji performansı, Enerji kimlik belgesi, Mevcut bina stoku, Veri analizi, Zaman maliyeti.

MAPPING THE ENERGY PERFORMANCE OF THE EXISTING BUILDING STOCK: THE CASE OF BEŞİKTAŞ

ABSTRACT

In the face of increasing exposure to rapid urbanisation, climate change risks and multidimensional vulnerability, cities are implementing numerous measures that prioritise energy efficiency to ensure sustainable development in urban areas. The most important of these actions is the need to build or retrofit buildings to achieve high levels of energy efficiency. In this context, the Energy Performance Certificate (EKB) is the most widely used tool for evaluating and comparing building energy performance. This study therefore aims to contribute to the planned infrastructure for EKB implementation in Turkey — a country that is highly dependent on foreign energy resources — by conducting a comprehensive analysis of EKB data (e.g. the number of buildings with an EKB, EKB adoption rates and EKB class distributions) to assess the energy performance of the existing building stock. The Beşiktaş district of Istanbul, characterised by a high population across 23 neighbourhoods and a mix of old and new buildings, was selected as the study area. The analysis revealed that 4.6% of the existing building stock has an EKB with a rating of C or higher — the legal threshold. Furthermore, it was determined that, of the buildings with an EKB, 66.7% are in Class C, 29.9% are in Classes D–G, and 3.4% are in Class B. The most significant challenge encountered during the analysis process was the high time cost resulting from data incompatibility between different institutions.

Keywords: Energy performance, Energy performance certificate, Existing building stock, Data analysis, Time cost.

^{1*}Sorumlu yazar e-posta adresi: beyzanuurbas@gmail.com

1. GİRİŞ

2050 yılına kadar dünya nüfusunun %68'inin kentsel alanlarda yaşayacağı öngörüsü, kentsel alanların enerji altyapıları üzerindeki baskıyı artırmakta ve dolayısıyla iklim değişikliğine uyum ve iklim değişikliğini azaltım kapasitesinin güçlendirilmesini de zorunlu kılmaktadır [1]. Bu açıdan bina stoku, dünya genelindeki nihai enerji tüketiminin yaklaşık %30'unu ve enerji tüketimine dayalı karbon salımlarının ise, %26'sını oluşturması nedeniyle kentsel alanlarda sürdürülebilir kalkınmanın gerçekleştirilmesinde en kritik temel bileşenlerden biridir [2]. Dolayısıyla, sürdürülebilir kalkınma amaçlarından (SKA) [3] özellikle, SKA 13-iklim eylemine, SKA 11-sürdürülebilir şehirler ve topluluklar ve SKA 7- erişilebilir ve temiz enerjiye doğrudan katkı sağlanabilmesi için binaların yüksek enerji verimlilik düzeylerine sahip olacak şekilde üretilmesi veya iyileştirilmesi gerekmektedir. Bunun başarılabilmesi için de bina enerji performansının değerlendirilmesini ve karşılaştırılmasını gerçekleştirebilen araçlara ihtiyaç vardır. Bu açıdan, yaygın olarak benimsenen değerlendirme araçlarından biri, bina enerji talebini ölçmek ve enerji planlamasını desteklemek amacıyla tasarlanmış enerji kimlik belgesidir (EKB).

EKB, bina enerji performansını görünür, ölçülebilir ve karşılaştırılabilir hâle getirerek kullanıcı davranışlarını ve yatırım kararlarını etkileyebilmekle birlikte mekânsal diğer bir deyişle konum bilgileriyle bütünleştğinde de bina stokunun farklı performans göstergelerine dayalı olarak değerlendirilmesine ve böylelikle bina stokunda öncelikli iyileştirilmesi gereken unsurların belirlenebilmesine pozitif katkı sağlayan bir araçtır [4,5]. Bu bağlamda, EKB'ye dayalı sistemlerin geliştirilmesi ile bina stokunun enerji yoğunluğunun azaltılma hızının da artacağı açıktır [6,7]. Dolayısıyla, iklim değişikliğinin etkilerine karşı yüksek bir kırılganlık düzeyine sahip, Ekim 2021'de Paris Anlaşmasını onaylamış ve 2053 yılına kadar net sıfır emisyon hedefi ile iddialı bir taahhütte bulunmuş olan Türkiye [8] için de bina sektöründe EKB uygulamasının yaygınlaştırılması öncelikli hedeflerden biridir. Binalarda Enerji Performansı mevzuatı [9] kapsamında BEP-TR 2 [10] yazılımı aracılığıyla hazırlanan EKB, binaya ilişkin enerji sınıfı, birincil enerji tüketimi (BET), CO₂ salımı gibi önemli performans göstergelerini içermektedir. Mevzuat çerçevesi 2008'de tanımlanmış olup binalarda asgari C sınıfı şartının karşılanması koşulu ise, 2011 yılı itibarıyla uygulanmaya başlanmıştır [9]. Ancak, bu verilerin kent ölçeğinde karşılaştırılabilir çıktılara dönüşebilmesi için bina stokuna ilişkin Bakanlık ve yerel yönetimlere ait verilerin uyumlaştırılması, veri niteliğinin doğrulanması ve mekânsal bilgiler [11,12] ile ilişkilendirilmesi gibi kapsamlı pek çok çalışmanın ivedilikle yürütülmesi gereklidir.

Dolayısıyla, bu çalışmada enerji arzı açısından yüksek düzeyde dışa bağımlı olan Türkiye için mevcut bina stokunun enerji performansının tespitine yönelik olarak EKB verileri (EKB'ye sahip bina sayısı, EKB alım oranı, EKB sınıf dağılımları vb.) üzerinden kapsamlı bir analizin gerçekleştirilmesi ve böylelikle Türkiye'de EKB uygulaması için hazırlanması planlanan altyapıya katkı sağlanması amaçlanmıştır. Bu amaç çerçevesinde, çalışma alanı olarak fiziksel ve sosyo-mekânsal heterojenliği ile öne çıkan Beşiktaş ilçesi dikkate alınmıştır. Çalışma kapsamında, kurumlar arası veri uyumsuzluklarını gidermek amacıyla bina bazlı bir doğrulama süreci yürütülerek elde edilen geniş örneklem üzerinden EKB verilerine dayalı olarak mevcut bina stokunun enerji performansı açısından haritalanması gerçekleştirilmiş ve ilgili değerlendirmeler yapılmıştır.

2. YÖNTEM

Bu çalışmada, mevcut bina stokunun enerji performansını haritalamak amacıyla esas alınan iş akışı, i) çalışma alanının belirlenmesi, ii) veri setinin oluşturulması ve iii) veri setinin analiz edilmesi olmak üzere üç ana adıma dayalı olarak yapılandırılmış olup ilgili adımlar, aşağıda kısaca açıklanmıştır.

Adım-1: Çalışma Alanının Belirlenmesi

Çalışma alanının belirlenmesi sürecinde mevcut bina stok çeşitliliği, nüfus yoğunluğu ve sosyo-mekânsal katmanlaşma unsurları ön planda tutulmuştur. Bu bağlamda, çalışma alanı olarak belirlenen İstanbul ili içerisindeki Beşiktaş ilçesi, 23 mahalleden oluşmakta olup yaklaşık 20.000 binayı içeren bir stoka sahiptir. İlçe genelindeki bina stokunun %91'inin yapım yılının 2000 yılı öncesine ait olması, mevcut bina stokunun büyük bölümünün güncel mevzuata uygun olarak üretilmediğini göstermektedir [13]. Öte yandan, bu husus yapısal risklerin minimize edilmesi yönünde hızlandırılan kentsel dönüşüm çalışmalarında, bina enerji performansının iyileştirilmesi hususunun da önceliklendirilmesi için önemli bir fırsat sunmaktadır. Ayrıca, ilçe genelinde ortalama nüfus yoğunluğu 98 kişi/ha iken bu değer planlı gelişen mahallelerde (örn. Muradiye) 576 kişi/ha seviyelerine çıkabildiği, planlı gelişen mahallelerde (örn. Levazım) ise, 26 kişi/ha düzeyine düşebildiği belirlenmiştir [14]. Konut ve ticaret işlevlerinin iç içe geçtiği bu karma yapılaşmaya dayalı yüksek mekânsal heterojenlik, farklı mahallelerin EKB sahiplik ve EKB verilerine dayalı enerji performans düzeylerinin karşılaştırmalı analizi açısından da yüksek bir potansiyel sunmaktadır.

Adım-2: Veri Setinin Oluşturulması

İkinci adım kapsamında, ilgili kamu kurumları ile gerçekleştirilen görüşmeler sonucunda edinilen verilere dayalı olarak Beşiktaş ilçesine yönelik gereksinim duyulan veri setinin oluşturulması hedeflenmiştir. Bu açıdan, Beşiktaş ilçesine ait i) EKB verileri Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığından (ÇŞB) [15], ii) güncel hâlihazır haritalar ve mevcut bina stokuna ilişkin öznitelik verileri (kat adedi, yapım yılı, fonksiyon vb.) Beşiktaş Belediyesinden (BB) [13] ve iii) nüfus verileri ise, Türkiye İstatistik Kurumundan [14] elde edilmiştir.

ÇŞB'den [15] Nisan 2025 tarihinde elde edilen veriler irdelendiğinde, Beşiktaş ilçesinde yer alan 19.793 adet binadan 1.787 adet binanın EKB belgesine sahip olduğu belirlenmiştir. Öte yandan, EKB belgesine sahip olan bu binalara ilişkin pek çok husus (bina ruhsat tarihi, EKB sınıfı, iklimlendirilen/toplam alan ve enerji performans göstergeleri) açısından kapsamlı bir veri mevcut iken bu verilerin hangi binaya ait olduğunu gösteren herhangi bir verinin (Ulusal Adres Veri Tabanı (UAVT) kodu, mahalle adı) edinilen verilerde yer almadığı belirlenmiştir. Dolayısıyla, EKB belgesine sahip olan 1.787 adet binanın Beşiktaş ilçesinin hangi mahallesinde olduğu ve hangi binaları kapsadığını belirleyebilmek için açık erişimli BEP-TR 2 [10] ve BB Kent Otomasyon Sistemi (KEOS) [12] sistemi kullanılmıştır.

Bu iki sistem üzerinden Beşiktaş ilçesindeki toplam 19.793 bina için yinelemeli gerçekleştirilen bir veri temin süreci yürütülmüştür. Bu süreç kapsamında, (i) KEOS'dan 23 ayrı mahalle sınırları içerisindeki her bir binanın üzerine tıklanarak binaya ilişkin UAVT kodunun elde edilmesi, (ii) BEP-TR 2'den "EKB Sorgula" butonunun tıklanarak açılan ekran üzerinde UAVT kodunun ilgili

alana yazılması ve sorgulamaların yapılması, (iii) sorgulama sonucunda ilgili binanın EKB belgesine sahip olması durumunda EKB belgesinin indirilmesi ve dijital olarak arşivlenmesi, (iv) EKB belgesinin detaylı irdelenmesi ve belgede yer alan verilerin (EKB sınıfı, ruhsat tarihi, kullanım alanı gibi) ÇŞB'den edinilen veriler ile eşleştirilmesi ve ilgili binanın belirlenmesi, v) belirlenen bina için ÇŞB'den edinilen verilerde eksik olan konum bilgileri ve binaya ilişkin özelliklerin (kat adedi, yeni-mevcut bina gibi) oluşturulan yeni veri setine eklenmesi ve (vi) 2022 yılına ait güncel Beşiktaş ilçesinin 23 mahallesine ait hâlihazır haritaları [13] üzerine ilgili binanın EKB sahiplik durumunun (var ya da yok olması durumuna ve var ise EKB sınıfına göre) çalışma kapsamında esas alınan lejanta dayalı işlenmesi olarak sıralanmaktadır. [10] ve [12] aracılığıyla 19.793 adet bina için ayrı ayrı yürütülen sorgulama, eşleştirme, arşivleme ve görselleştirme adımlarını kapsayan bu yinelemeli süreç için bina başına ortalama 3,6 dakikalık bir süre harcanmıştır. Toplam harcanan süre ise, 1.188 saattir, diğer bir deyişle 132 gündür (9 saat/gün).

Yinelemeli süreç sonucunda Beşiktaş ilçesi kapsamındaki 23 ayrı mahallede 1.364 adet binanın EKB verisine sahip olduğu tespit edilmiştir. Ancak, bu verinin [15]'ten elde edilen 1.787 adet EKB'ye sahip bina sayısı ile örtüşmediği görülmüştür. Diğer bir deyişle, 423 adet EKB'li binaya [10] ve [12] aracılığıyla gerçekleştirilen tarama sonucunda ulaşamadığı belirlenmiştir. Dolayısıyla, bu adım kapsamında Beşiktaş ilçesi için EKB sahibi 1.364 adet binayı içeren nihai bir veri seti oluşturulmuştur.

Adım-3: Veri Setinin Analiz Edilmesi

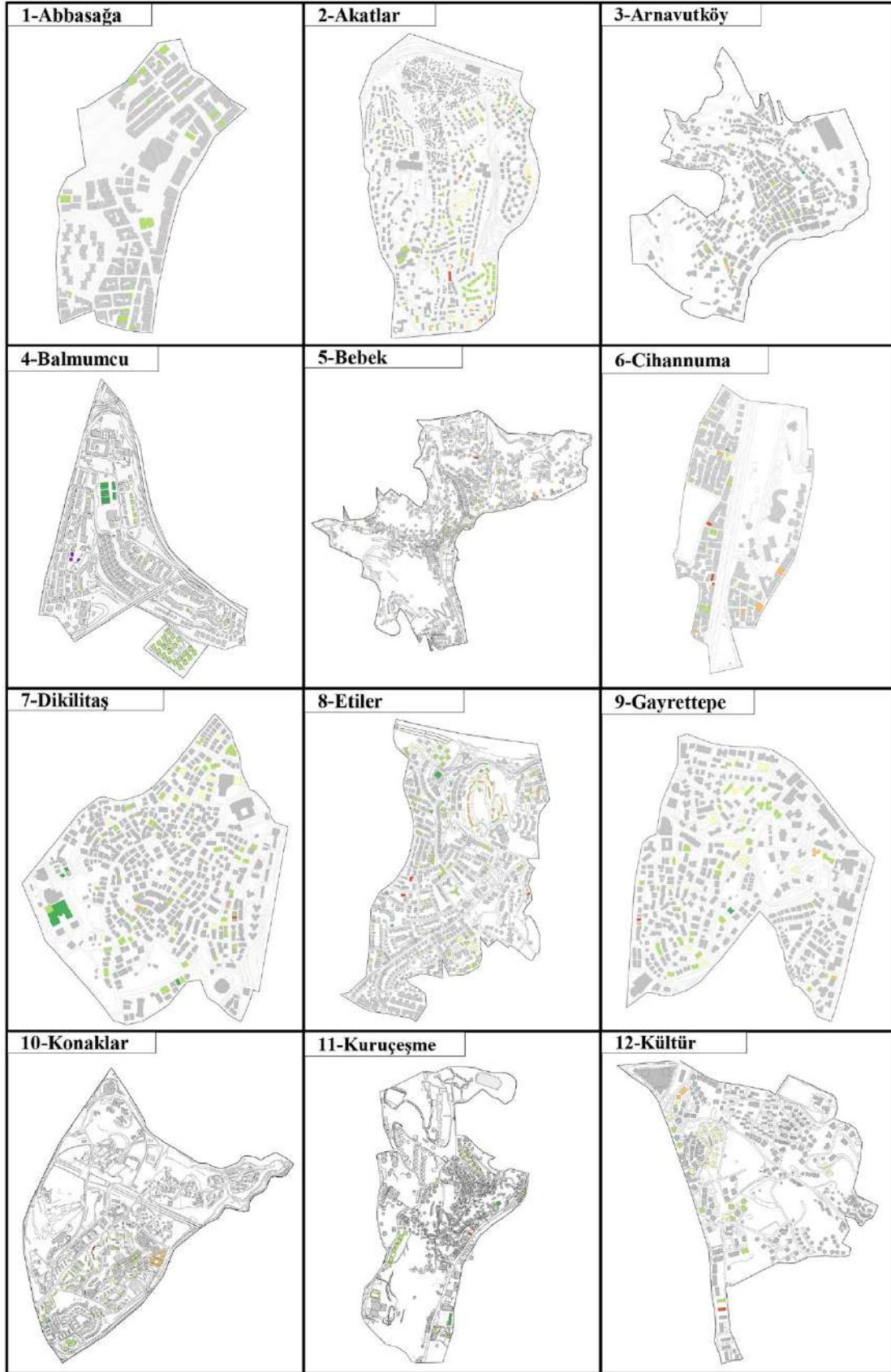
Nihai veri setinin analizi sonucunda Beşiktaş ilçesi için bina stokunun EKB sahiplik oranı % 6,9 olarak belirlenmiş olup bu oran yasal asgari sınır C ve üzeri sınıf için irdelendiğinde ise, % 4,6'dır. Bu belirleme çerçevesinde gerçekleştirilen pek çok analize ilişkin bulgular, Çizelge 1 ve Şekil 1-3 aracılığıyla sunulmuştur.

Çizelge 1: Mevcut bina stokunun enerji performansı açısından EKB'ye dayalı analiz sonuçları

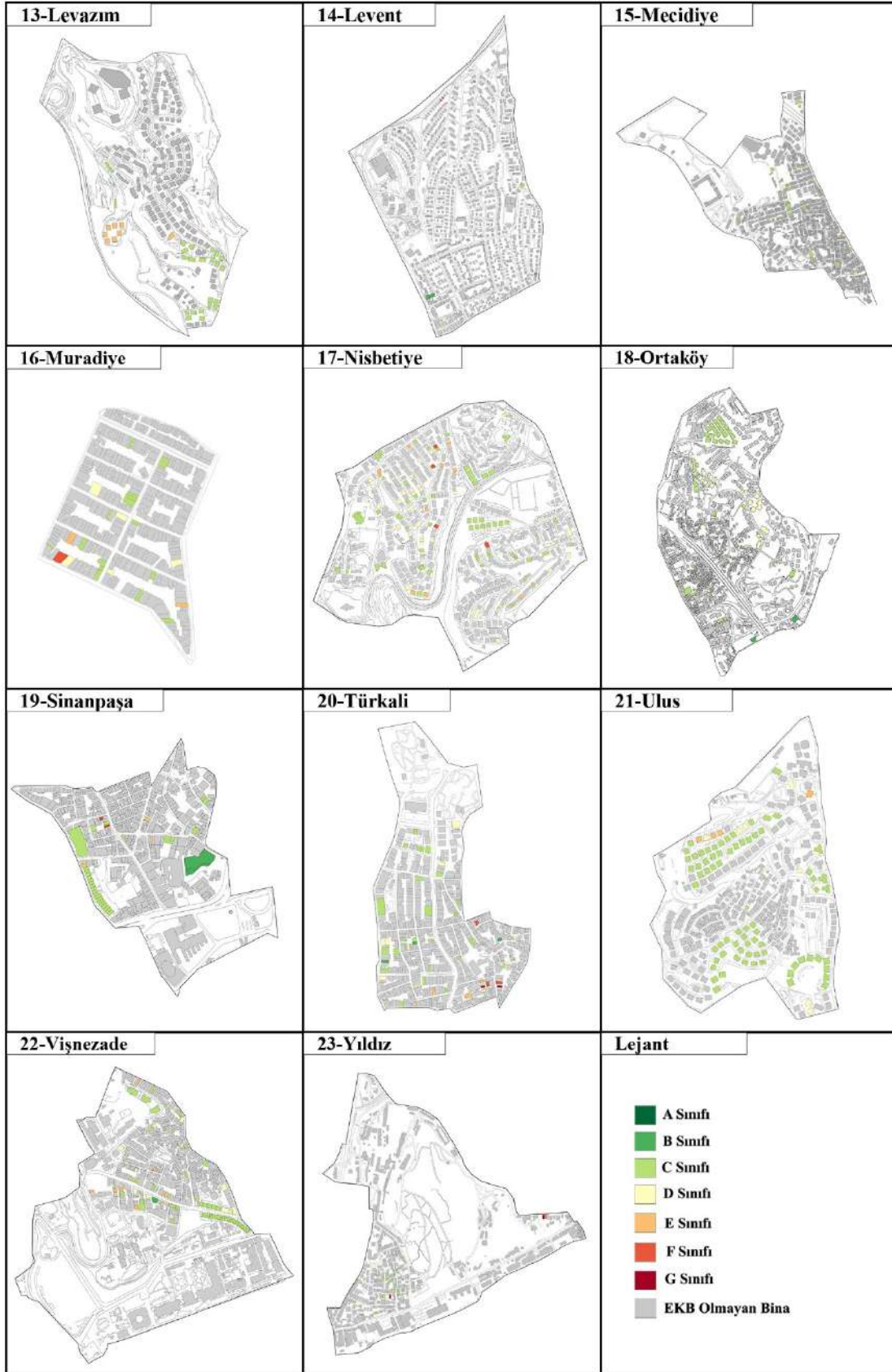
No	Mahalle	Toplam Bina Sayısı	Toplam EKB'li Bina Sayısı	EKB'li bina Oranı (C Sınıfı) (%)	BET değeri (kWh/m ² .yıl) (ort ± std)		
					< 2000	2000-2010	> 2010
1	Abbasağa	544	26	88.5	149.1 ± 45.7	153.6 ± 32.4	129.3 ± 28.6
2	Akatlar	1078	123	59.3	154.4 ± 58.4	299.7*	119.8 ± 30.2
3	Arnavutköy	1401	21	90.5	177.6 ± 45.8	-	145.4 ± 24.0
4	Balmumcu	388	45	68.9	123.9 ± 19.1	-	109.8 ± 35.6
5	Bebek	1260	41	61.0	170.9 ± 53.3	-	156.3 ± 44.6
6	Cihannuma	662	22	31.8	173.7 ± 53.3	165.4*	176.0 ± 90.5
7	Dikilitaş	1087	73	69.9	155.0 ± 79.9	142.2 ± 18.5	161.2 ± 131.8
8	Etiler	1097	129	50.4	164.9 ± 52.6	100.2 ± 31.6	113.8 ± 24.6
9	Gayrettepe	505	57	59.6	146.2 ± 42.4	118.0 ± 23.9	134.9 ± 29.7
10	Konaklar	620	104	52.9	134.9 ± 28.2	96.8*	128.7 ± 26.0
11	Kuruçeşme	837	32	78.1	155.8 ± 24.8	98.4*	365.7 ± 205.6
12	Kültür	485	40	28.2	162.0 ± 30.0	130.8*	112.1*
13	Levazım	279	66	77.3	170.5 ± 38.1	123.4 ± 33.3	144.3 ± 5.3
14	Levent	1545	17	41.2	173.6 ± 69.4	139.1*	168.4 ± 37.3
15	Mecidiye	1574	40	70.0	166.6 ± 68.2	62.7*	143.4 ± 46.6
16	Muradiye	417	21	61.9	145.8 ± 36.1	138.9 ± 51.8	144.6 ± 24.2
17	Nispetiye	872	106	50.9	151.5 ± 41.9	103.7 ± 35.5	148.7 ± 45.2
18	Ortaköy	1105	103	66.0	142.6 ± 36.9	146.1 ± 19.1	173.8 ± 149.4
19	Sinanpaşa	896	32	81.8	175.3 ± 65.3	133.8 ± 148.8	235.2 ± 187.5
20	Türkali	1128	56	58.9	174.9 ± 71.4	177.1 ± 112.4	131.7 ± 24.4
21	Ulus	604	92	85.9	130.4 ± 18.1	103.3 ± 26.1	127.1 ± 4.9
22	Vişnezade	832	85	72.9	149.2 ± 43.7	133.6 ± 54.0	122.3 ± 38.9
23	Yıldız	577	33	69.7	154.6 ± 37.1	108.3 ± 20.4	132.6 ± 15.1

* Bina yapım yılı kapsamında sadece bir adet EKB'li bina mevcuttur.

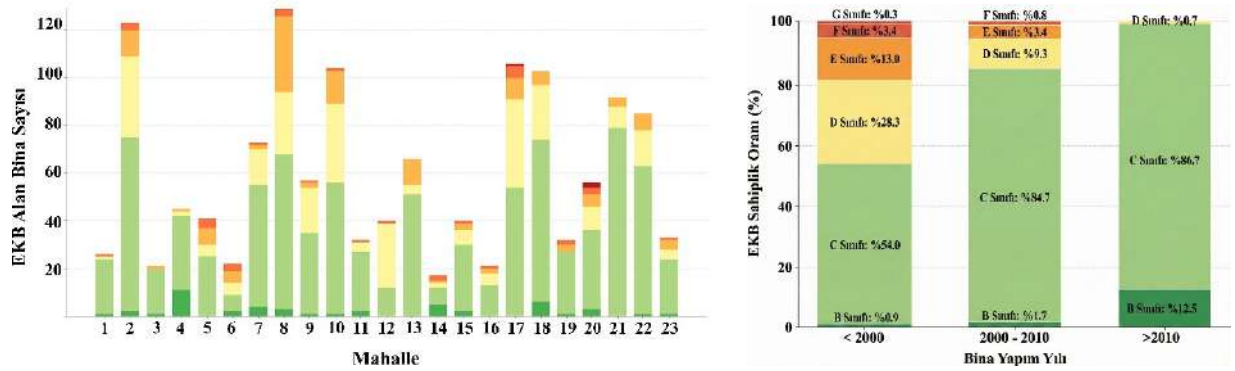
- Bina yapım yılı kapsamında herhangi bir EKB'li bina mevcut değildir.



Şekil 1: Mevcut bina stokunun enerji performansı açısından EKB'ye dayalı olarak haritalanması



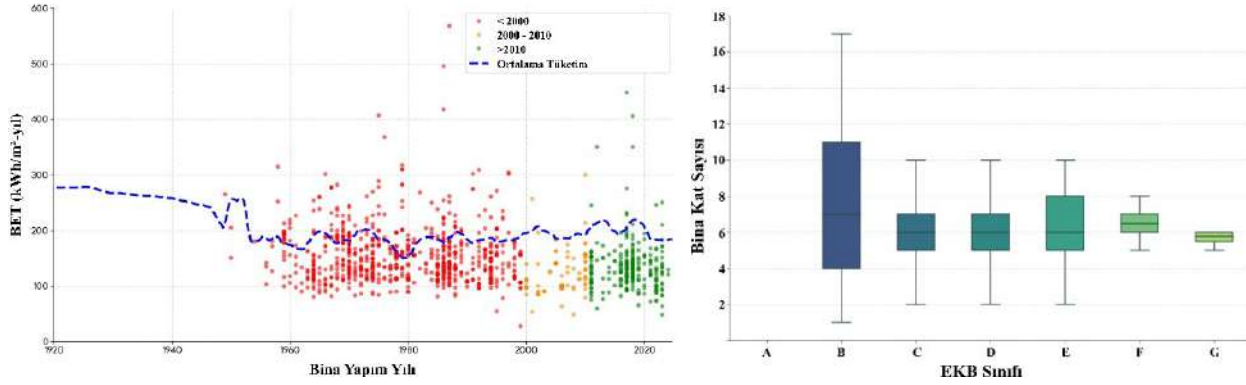
Şekil 1 (devam) : Mevcut bina stokunun enerji performansı açısından EKB'ye dayalı olarak haritalanması



Şekil 2: a) EKB'li binaların sınıf bilgilerine dayalı mahalle bazlı dağılımı, b) Bina yapım yıllarına göre dağılımı

Çizelge 1, Şekil 1-2a'da görüldüğü üzere, Beşiktaş ilçesi kapsamındaki mevcut bina stoku içerisinde EKB'li bina sayısı 23 ayrı mahalle için yüksek farklılıklar göstermektedir. Levazım (%23,7) ve Konaklar (%16,8) gibi site tipi yapılaşmaların ve bina yönetim uygulamalarının yoğun olduğu mahallelerde EKB sahiplik oranının yüksek, Bebek (%3,3) ve Arnavutköy (%1,5) gibi tarihi dokunun baskın olduğu mahallelerde ise, bu oranın düşük olduğu belirlenmiştir. Bu düşük değer üzerinde mevcut koruma statüleri ve mülkiyet yapısının etkili olabileceği çıkarımı da yapılabilir. Öte yandan, EKB'li binalar içerisinde A sınıfı EKB'ye sahip bina olmamakla birlikte EKB'li binaların ağırlıklı olarak C sınıfı (%63,3, 864 bina) EKB'ye sahip olduğu saptanmıştır. C sınıfı EKB'li bina oranı açısından en yüksek değer (%90,5) Arnavutköy mahallesinde, en düşük değer (%30) ise, Kültür mahallesinde gerçekleştirildiği tespit edilmiştir. EKB'li binalar yapım yılı açısından incelendiğinde, 2000 yılı öncesi inşa edilen bina sayısı 967, 2000-2010 yılları arası inşa edilen bina sayısı 118, 2010 yılı sonrası inşa edilen bina sayısı ise, 279 olarak saptanmıştır. Bu bağlamda EKB sınıf dağılımı olarak i) 2000 yılı öncesi inşa edilen binalar için yasal sınırın altında olan D-G sınıflarının %45,1 (436 adet bina), C sınıfının % 54,0 (522 adet bina) ve B sınıfının ise % 0,9 (9 adet bina) gibi çok sınırlı bir orana sahip olduğu, ii) 2000–2010 yılları arası inşa edilen binalar için C sınıfının %84,7 (100 adet bina), B sınıfının %1,7 (2 adet bina), D-G sınıflarının ise %13,6 (16 adet bina) olduğu, iii) 2010 yılı sonrası inşa edilen binalar için C sınıfının %86,7 (242 adet bina), B sınıfının %12,5 (35 adet bina) ve D–G sınıflarının ise %0,7 gibi (2 adet bina) oldukça sınırlı bir düzeyde kaldığı belirlenmiştir (Şekil 2b). Öte yandan, D-G sınıfına sahip EKB'li binaların ise ağırlıklı olarak bölgesel gayrimenkul değerlerinin ve sosyo-ekonomik profilin yüksek olduğu Nispetiye (%49,1), Etiler (%47,3) ve Konaklar (%46,2) mahallelerinde yer aldığı tespit edilmiştir (Çizelge 1, Şekil 2a–b). Bu tespit, söz konusu mahallelerde bina stokunun ağırlıklı olarak eski olması (2000 yılı öncesi bina payı %85,1–%95,1) ve kapsamlı bir kentsel dönüşüm sürecinin sınırlı düzeyde olması ile de desteklenmektedir. Ayrıca, ilçe genelinde 2010 yılı sonrası inşa edilmiş EKB'li bina sayısı ise, 279'dur (%20,5). Oluşturulan nihai veri seti içerisinde bina kullanım tipolojisi ise %83,0 ile apartman (1.132 adet bina) en büyük payı oluştururken, bunu %7,1 ile ofis/işyeri (97 adet bina) ve %6,5 ile müstakil konut (88 adet bina) olarak sıralandığı belirlenmiştir.

Şekil 3a'da görüldüğü üzere, binaların BET (kWh/m²-yıl) değerleri bina inşa yılı fark etmeksizin ağırlıklı olarak 100–200 kWh/m²-yıl aralığında değişiklik göstermektedir. Bu açıdan, ana yoğunlaşmanın olduğu BET aralığı ilçe genelindeki C sınıfı EKB'li binaları temsil ederken 100



Şekil 3: a) BET ile bina yapım yılı arasındaki ilişki, b) Bina kat sayısına göre EKB sınıflarının dağılımı

kWh/m²-yıl'ın altı ağırlıklı olarak B sınıfı veya kısmen düşük tüketimli C sınıfı EKB'li binaları belirtmektedir. Öte yandan, kat sayısı açısından B sınıfı binalar veri setinde geniş bir aralığı (1–17 kat, ort.:7 kat) temsil ederken C, D ve E sınıfı binaların ise 2–10 kat (ort.: 6 kat), F ve G sınıfı binaların ise 5–6 kat aralığında olduğu saptanmıştır.

3. SONUÇLAR

Dünya genelindeki yüksek kentleşme ve dolayısıyla artan enerji talebine dayalı olarak sürdürülebilir yapma çevrelerin üretimi, iklim değişikliği ile mücadele, enerji güvenliğinin artırılması gibi önemli sorunların odak noktasında yer alan bina stokunun mevcut enerji performansının belirlenmesi öncelikli öneme sahiptir. Bu çalışma kapsamında da, 23 mahalle içerisinde yaklaşık 20.000 binayı barındıran Beşiktaş ilçesindeki mevcut bina stokunun enerji performansı EKB'ye dayalı olarak analiz edilmiştir. Analizler aracılığıyla elde edilen ana bulgular, i) ilçe genelindeki EKB'li binaların mevcut bina stokuna oranının %6,9 (1.364 adet bina, tüm EKB sınıfları dâhil) olması, ii) C ve ve üzeri sınıfa sahip EKB'li bina oranının ise %4,6 (910 adet bina) olması, iii) A sınıfı EKB'ye sahip herhangi bir binanın mevcut olmaması, iv) EKB'li binaların % 63,3'ünün (864 adet bina) C sınıfı, %33,3'ünün (454 adet bina) D-G sınıfı ve %3,4'ünün (3 adet) Neredeyse Sıfır Enerjili Bina olmak üzere toplam 46 adet bina) ise B sınıfına sahip olması ve v) EKB'li binaların yapım yıllarının %70,9 ile 2000 yılı öncesi (967 adet bina), %20,5 ile 2010 yılı sonrası (279 adet bina), %8,7 ile 2000–2010 yılları arasındadır (118 adet bina).

Çalışma kapsamında elde edilen bulguların doğrudan Beşiktaş ilçesindeki mevcut bina stokunun enerji performansı açısından EKB verilerine dayalı haritalanmasına, dolaylı olarak Türkiye'de EKB uygulaması için hazırlanması planlanan altyapıya yönelik ciddi katkılar sunduğu açıktır. Ancak, bu haritalamaya ilişkin kurumlardan elde edilen verilerin birbirleriyle uyumlu olmaması, eksik/hatalı veri içermesinden kaynaklı olarak her bir bina için sorgulama, eşleştirme, arşivleme ve görselleştirme adımlarını kapsayan yinelemeli bir sürecin dikkate alınmasını zorunlu kılmıştır. Bu zorunluluk, yüksek bir zaman maliyetine (132 gün (9 saat/gün)) neden olmuştur. Öte yandan, bu tarz çalışmaların yaygınlaştırılması enerji arzı ile enerji talebi arasındaki uyumsuzluğun mevcut olduğu, hızlı kentleşme ve yüksek nüfus artışının yaşandığı Türkiye için kritik öneme sahiptir. Dolayısıyla, farklı kurumlar bünyesinde tutulan verilerin kapsamlı veri analizlerine imkân

sağlayacak şekilde ivedilikle düzenlenmesi gerekmektedir. Böylelikle, yerel yönetimlerin kentsel mekâna yönelik üst ölçekli planlama ve imar kararlarının şekillendirilmesi, mevcut bina stokunun enerji performansının iyileştirilmesine ilişkin eylem planlarının geliştirilmesi, veriye dayalı yerel iklim politikalarının oluşturulması gibi birbiriyle doğrudan bağlantılı pek çok husus için doğru ve verimli çalışmaların yürütülmesi olanaklı hale gelecektir.

KAYNAKLAR

1. United Nations Department of Economic and Social Affairs. (2018). *2018 revision of world urbanization prospects*. United Nations. <https://www.un.org/en/desa/2018-revision-world-urbanization-prospects>
2. International Energy Agency. (2023). *Buildings*. IEA. Erişim Tarihi (14/02/2026) <https://www.iea.org/energy-system/buildings>
3. United Nations. (2015). *The 17 goals*. Sustainable Development. Erişim Tarihi (14/02/2026) <https://sdgs.un.org/goals>
4. Dall'O', G., Galante, A., & Pasetti, G. (2012). A methodology for the energy performance classification of residential building stock on an urban scale. *Energy and Buildings*, 48, 211–219. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.01.034>
5. Gangolells, M., Casals, M., Forcada, N., Macarulla, M., & Cuerva, E. (2016). Energy mapping of existing building stock in Spain. *Journal of Cleaner Production*, 112, 3895–3904. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.105>
6. Li, Y., Kubicki, S., Guerriero, A., & Rezgui, Y. (2019). Review of building energy performance certification schemes towards future infrastructures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 113, 109244. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109244>
7. Pasetti, G., & Ruggieri, G. (2017). Energy retrofits of the building stock: A methodology based on the transposition of the energy performance certificate data. *Sustainable Cities and Society*, 28, 454–463. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.10.012>
8. World Bank Group. (2022). *Türkiye country climate and development report (CCDR Series)*. World Bank. <http://hdl.handle.net/10986/37521>
9. T.C. Resmi Gazete. (2008). *Binalarda enerji performansı yönetmeliği* (Sayı: 27075). <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2008/12/20081205-6.htm>
10. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2025). *BEP-TR 2 (Binalarda enerji performansı yazılımı)*. Erişim Tarihi (Mayıs 2025) <https://bepr.csb.gov.tr/>
11. T.C. Resmi Gazete. (2006). *Adres ve numaralamaya ilişkin yönetmelik* (Sayı: 26245). <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2006/07/20060731-1.htm>
12. Beşiktaş Belediyesi. (2025). *Kent rehberi*. Beşiktaş Belediyesi KEOS. Erişim Tarihi (Mayıs 2025) <https://keos.besiktas.bel.tr/>
13. Beşiktaş Belediyesi. (2025, Mart). *Beşiktaş ilçesi güncel hâlihazır haritalar ve bina öznitelik veri seti*. Beşiktaş Belediyesi birimleri ile yapılan kişisel görüşmeler neticesinde elde edilmiştir.

14. Türkiye İstatistik Kurumu. (2025, Nisan). *Adrese dayalı nüfus kayıt sistemi (ADNKS) Beşiktaş ilçesi nüfus ve yoğunluk verileri*. Resmi veri talebi üzerine sağlanan kayıtlar.

15. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2025, Nisan). *Beşiktaş ilçesi Enerji Kimlik Belgesi (EKB) veri seti*. Resmi veri talebi üzerine sağlanan kayıtlar.

SAĞLIK YAPILARINDA HASTA ODALARININ GÜN IŞIĞI PERFORMANSININ FARKLI SİMÜLASYON ARAÇLARI İLE KARŞILAŞTIRILMASI

Sena GAZAN¹

Mustafa Serhan ÜNLÜTÜRK^{2*}

Berk EKİCİ³

¹ Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enst., Mimarlık ABD, Çağış Kampüsü, Altıeylül, Balıkesir, 10145

² Balıkesir Üniversitesi Mimarlık Fakültesi, Çağış Kampüsü, Altıeylül, Balıkesir, 10145

³ İYTE Mimarlık Fakültesi, Gülbahçe Kampüsü, Urla, İzmir, 35430

ÖZET

Sağlık yapıları günün tüm saatlerinde hastalar, hasta yakınları ve sağlık personellerine hizmet veren yapılardır. Dolayısıyla iç mekan konfor koşullarının sürekliliğini sağlamak gerekmektedir. Özellikle bulaşıcı hastalıkların kontrolü sırasında hata payının en aza indirilmesi için iç mekânda gün ışığı performansının doğru planlanmış olması gerekmektedir. Aydınlatma stratejileri planlanırken yapının iç mekân performansını ve kullanıcı konforunu olumsuz etkileyecek tasarımlardan da kaçınmak gerekmektedir. Literatürde bina gün ışığı simülasyonu için pek çok yazılım mevcuttur. Sağlık yapılarında güvenilir bina performans simülasyonu gerçekleştirecek yazılımın seçimi başa çıkılması gereken önemli bir sorundur. Bu çalışma farklı bina performans simülasyon yazılımlarının gerçek verilere göre ne kadar saptığını ve güvenilirliğini test etmeyi hedeflemektedir. İncelenen odanın parametrik modelini Rhino/Grasshopper programları oluşturmuştur. Gün ışığı simülasyonları Ladybug v1.7.0 eklentisi ve Cyclops eklentisi ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca çalışmada bu yazılımların iklime göre davranışını da test etmek amacıyla Türkiye'nin ılıman iklim tipindeki Balıkesir ile benzer enlemde bulunan ancak aşırı soğuk iklim tipine sahip Erzurum ele alınmıştır. Çalışma aşırı soğuk ve ılıman iklimlerdeki sağlık yapılarının bu yazılımlar ile gerçekleştirilen simülasyonlarını analiz yöntemleri ile karşılaştıracaktır.

Anahtar kelimeler: Günışığı, bina kabuğu, simülasyon hesaplamalı tasarım.

COMPARISON OF DIFFERENT SOFTWARE IN HEALTHCARE BUILDING PERFORMANCE SIMULATIONS

ABSTRACT

Healthcare facilities are structures that provide services to patients, their relatives, and healthcare personnel at all hours of the day. Therefore, it is necessary to ensure the continuous comfort conditions of indoor environments. Especially during the control of infectious diseases, the indoor daylight performance must be properly planned to minimize the margin of error. When planning lighting strategies, it is also important to avoid designs that negatively affect the indoor performance of the building and user comfort. Selecting a reliable building performance simulation software for healthcare buildings is a critical issue to address. This study aims to test how much different building performance simulation software deviates from real data and their reliability. The parametric model of the examined room was created using Rhino/Grasshopper programs. Daylight simulations were conducted using the Ladybug v1.7.0 plugin and the Cyclops plugin. Additionally, to test the behavior of these software programs according to climate, Erzurum, which has an extremely cold climate and is located at a similar latitude to Balıkesir, a temperate climate region in Turkey, was also considered. The study will compare the simulation results of healthcare buildings in extremely cold and temperate climates using these software programs through analysis methods.

Keywords: Daylight, building envelope, simulation, computational design.

^{2*}Sorumlu yazar e-posta adresi: serhan.unluturk@balikesir.edu.tr

1. GİRİŞ

Sağlık yapıları hafta boyunca kesintisiz bir şekilde hastalar, hasta yakınları ve sağlık personeline hizmet vermektedir. Bu yapılar kullanım ömrü boyunca kesintisiz hizmet vermesi, bulaş riskinin önlenmesi açısından yüksek hijyen gereksinimleri, kullanıcının fiziksel ve psikolojik sağlığını doğrudan etkileyen mekânsal koşulları nedeniyle özel tasarım çözümleri gerektirmektedir. Sağlık yapılarında iç mekan konfor koşullarının sağlanması bireylerin tedavi süreçlerini olumlu yönde etkilemekte olup fiziksel iyileşmeyi desteklemektedir [1]. İç mekan tasarım parametrelerinin doğru şekilde planlanması ile özellikle bulaşıcı hastalık riskini azaltan çevre koşullarının elde edilmesi sağlık yapısı tasarımlarının temel bileşeni olarak değerlendirilebilir. Sağlık yapılarının iç mekan çevre koşullarının iyileştirilmesi Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları'nın (BM SKA) üçüncü ve on birinci amacı ile doğrudan ilişkilidir. BM SKA'nın üçüncü amacı bireylerin sağlık hizmetlerine kolaylıkla erişimini hedefleyen "Sağlıklı ve Kaliteli Yaşam" iken on birinci amacı kentlerde enerjinin verimli kullanımını hedefleyen "Sürdürülebilir Şehirler ve Topluluklar"dır [2].

İç mekanın ısı konforu, hava kalitesi ve görsel konfor gibi birbirleriyle ilişkili olan ve üzerlerinde etkileri bulunan parametreler iç mekan çevresel performansı meydana getirmektedir [3]. Bireylere muayene, tedavi ve ameliyat gibi farklı hizmetleri sunan ve fonksiyonu sebebiyle birbirinden farklı boyutlarda birçok mekânı barındıran sağlık yapılarında performans ölçütleri iyileştirilirken birbirinden bağımsız düşünülmemelidir. Bir performans ölçütü iyileştirilirken başka bir ölçütün olumsuz etkilenmemesi gerekmektedir. Özellikle gün ışığından yararlanmak için cephe açıklarının artırılması yapay aydınlatma gereksinimini azaltırken tasarımın kontrolsüz yapılması aşırı ısınma problemlerine yol açabilmektedir [4]. Bu sebeple sağlık yapılarının tasarımı gerçekleştirilirken farklı performans ölçütleri bir arada değerlendirilmelidir.

Önceki dönemlerde bina tasarım sürecinde performansı tahmini için matematiksel modeller kullanılmaktaydı [5]. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte gün ışığı performansının öngörülmesi simülasyon programları ve eklentileri ile sağlanabilmektedir. Ancak bina performans simülasyon yazılımlarının elde ettiği sonuçların sağlık yapıları gibi tasarım süreci hassas olan yapılarda gerçek verileri ne derece temsil ettiği araştırma konusudur [6]. Literatürde bina performans simülasyonlarını ele alan çalışmalar büyük oranda konut ve ofis işlevli yapıları ele almaktadır [7]. Sağlık yapılarının bina performans simülasyonu çalışmaları ise çoğunlukla simülasyon sonuçlarını gerçek verilerle karşılaştırarak modelin doğruluğunu tespit ederek iyileştirme sürecini gerçekleştirmektedir. Çizelge 1, literatürde sağlık yapılarının iç mekan performans simülasyonunu gerçekleştiren çalışmaları karşılaştırmalı olarak ele almaktadır.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde sağlık yapılarında gün ışığı performans simülasyonları ile ilgili birçok çalışma bulunmakta olup bu çalışmalar çoğunlukla tek bir simülasyon yazılımını kullanmaktadır. Sağlık yapıları gibi kullanıcı konforunun önem arz ettiği yapılarda simülasyon yazılımlarının değerlendirilmesinin kısıtlılığı dikkati çekmektedir. Ayrıca aynı mekanın farklı iklim koşullarındaki davranışını yazılım temelli karşılaştırmalı analizlerin literatürde yeterince ele alınmadığı tespit edilmiştir. Bu çalışmada hasta odalarında gün ışığı performansını farklı simülasyon araçları kullanarak değerlendirmek ve elde edilen sonuçları kullanıcı konforu ve iyileşme süreci üzerindeki olası etkileri bağlamında karşılaştırmalı olarak incelemeyi hedeflemektedir. Bu kapsamda çalışmada sağlık yapılarında gün ışığı simülasyonuna olanak sağlayan Ladybug ve Cyclops eklentilerinin sonuçları farklı iklim senaryoları ile karşılaştırmalı

olarak değerlendirilmiştir. Çalışma, performans simülasyon yazılımlarının farklı işlev ve iklim senaryolarında değerlendirilmesi açısından gelecek çalışmalara yön verecektir.

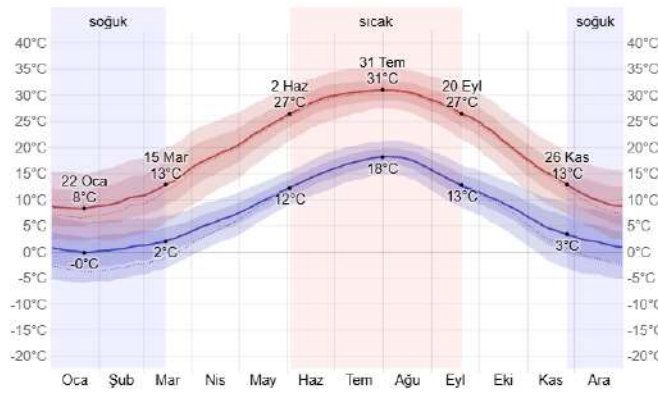
Çizelge 1. Literatürde sağlık yapısı iç mekan performansı üzerine yapılan çalışmalar.

Çalışma, yılı	Metot	Araç	Bölge	Simülasyon Yazılımı Karşılaştırması
<i>Bu çalışma, 2026</i>	Simülasyon	Ladybug v1.7.0 Cyclops	Balıkesir Erzurum	+
[8], 2017	Simülasyon Optimizasyon	Ladybug	Izmir	-
[9], 2020	Simülasyon	RadianceIES	Leuven	-
[10], 2024	Simülasyon Optimizasyon	Ladybug	Seville	-
[11], 2025	Simülasyon Optimizasyon	Ladybug	Erbil	-

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. İklim Özellikleri ve Alan Çalışması

Bu çalışmada, sağlık yapılarında bina performans simülasyon araçlarının farklı iklim koşullarındaki güvenilirliğini tespit etmek amacıyla Türkiye'nin iki farklı iklim bölgesindeki Balıkesir ve Erzurum illeri ele alınmıştır. Balıkesir ve Erzurum benzer enlemlerde yer alsa da Balıkesir ılıman iklim bölgesindeyken Erzurum aşırı soğuk iklime sahiptir. Bu durum iklim koşullarının gün ışığı performansı üzerindeki etkileri incelemek açısından önem arz etmektedir. Balıkesir ili sıcak ve kurak bir iklim olan Akdeniz (CSA) iklim tipinin özelliklerini göstermektedir [12]. TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Standardının sınıflandırmasına göre ise Balıkesir 3. derece gün bölgesinde yer almaktadır [13]. Balıkesir'in yıllık ortalama sıcaklığı görece yüksek olup 2025 yılı verilerine göre 14.9 °C'dir [14]. Yaz aylarında sıcaklıklar gündüz saatlerinde çoğunlukla 29 °C'nin üzerindedir (Şekil 1).



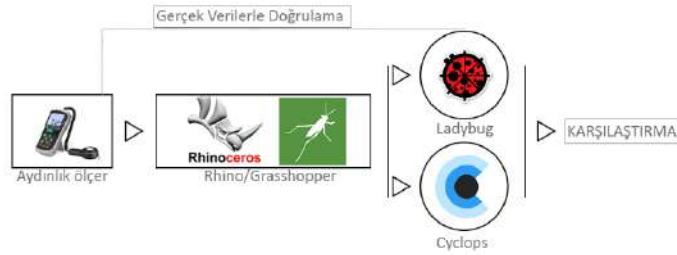
Şekil 1. Balıkesir'in 2025 yılı ortalama sıcaklık grafiği [14].



Şekil 4. (a) Bahkessir Üniversitesi Tıp Fakültesi güney cephesi, (b) Hasta odası iç mekanı.

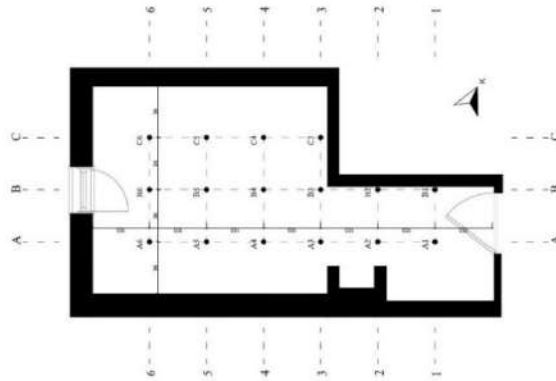
2.2. Yöntem

Bu çalışma sağlık yapılarında gün ışığı simülasyon yazılımlarının etkinliğini değerlendirmek amacıyla saha ölçümleri, parametrik modelleme, simülasyon, model kalibrasyonu ve karşılaştırmalı analiz aşamalarını gerçekleştirmiştir. Erzurum Türkiye'nin sert karasal iklim koşullarını temsil etmekte ve güneş yükü farklı gün ışığı karakteristiklerini sunmaktadır. Bu bağlamda çalışma aynı mekansal özellikler için farklı iklim koşullarında gün ışığı performansını analiz ederek tasarım kararlarında iklimsel duyarlılıklarını ortaya koymayı hedeflemektedir. Şekil 5, bu çalışmanın iş akışını özetlemektedir.



Şekil 5. Çalışmanın iş akışı.

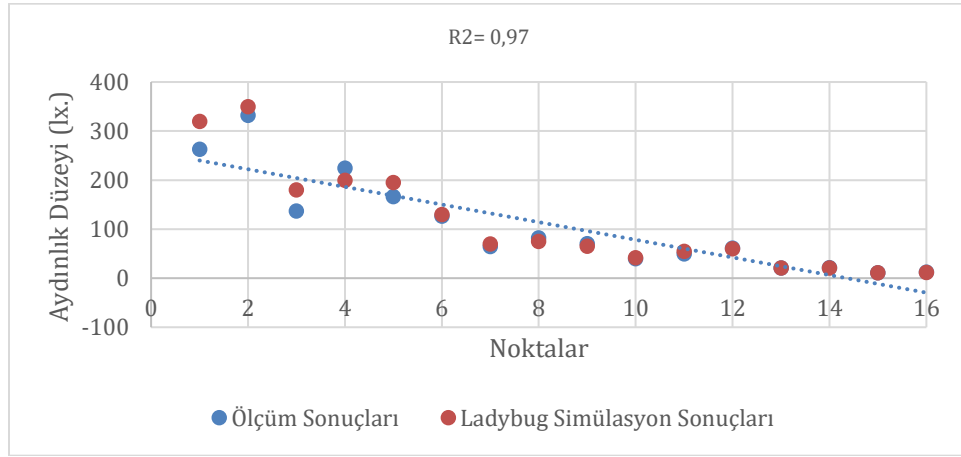
Gün ışığı ölçümleri: 21 Aralık 2025 gündönümü tarihinde alan çalışmasına konu olan güney yönelimli hasta odasında Cem DT-1309 aydınlık ölçer ile aydınlık düzeyi ölçümleri yapılmıştır. Hasta odasında aydınlık düzeyi ölçümlerinin gerçekleştirilmesi için hasta odası ızgaralara bölünmüştür (Şekil 7). Ölçüm için gerçekleştirilen y eksenindeki noktalar arası mesafe 1.03 m. iken x eksenindeki 0.94 m.'dir. x ve y eksenindeki noktalar arasındaki mesafeler kendi içlerinde eşittir. Oluşturulan ölçüm düzlemi zeminden 85 cm. yüksektedir.



Şekil 6. Hasta odasındaki aydınlık düzeyi ölçümü gerçekleştirilen noktalar.

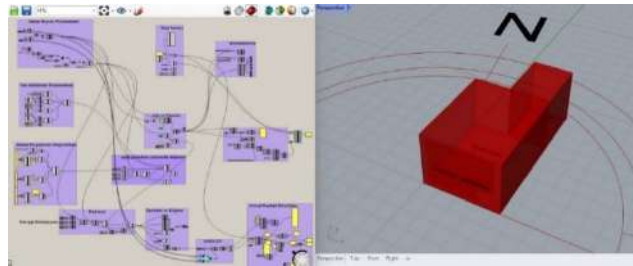
Parametrik model ve gün ışığı simülasyonları: Alan çalışmasına konu olan hasta odasının parametrik modeli Rhino/Grasshopper kullanılarak oluşturulmuştur. Çalışma Grasshopper'ın Ladybug ve Cyclops eklentilerini kullanarak gün ışığı simülasyonlarını gerçekleştirmiştir. Ladybug eklentisi hava durumu verilerini kullanarak radyasyon, gölge ve gün ışığı analizlerini oluşturmayı sağlamaktadır [17]. Cyclops GPU kullanarak çevresel simülasyonları hızlandıran; gün ışığı ve radyasyon analizlerini gerçekleştiren eklentidir [18]. Her iki eklenti de simülasyon sürecinde Balıkesir ve Erzurum'un tipik meteorolojik yıl (TMY) tabanlı güncel epw dosyaları kullanılmıştır.

Model validasyon süreci: Çalışmada Balıkesir Üniversitesi Tıp Fakültesi Hastanesi'nde 21 Aralık 2025 tarihinde saat 09.00, 12.00 ve 15.00 saatlerinde gerçekleştirilen aydınlık düzeyi ölçümlerinin her nokta için ayrı ayrı ortalamaları alınmıştır. Ladybug'ın gün ışığı simülasyonu sonucunda 21 Aralık için elde edilen aydınlık düzeyi ile gerçek veriler karşılaştırılmıştır (Şekil 7). Ayrıca modelin güvenilirliğini sağlamak amacıyla regresyon analizi gerçekleştirilmiş ve belirleme katsayısı (R^2) %97 elde edilmiştir. Bu değer modelin güvenilir olduğunu göstermektedir.



Şekil 7. Gerçek veriler ile Ladybug simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması.

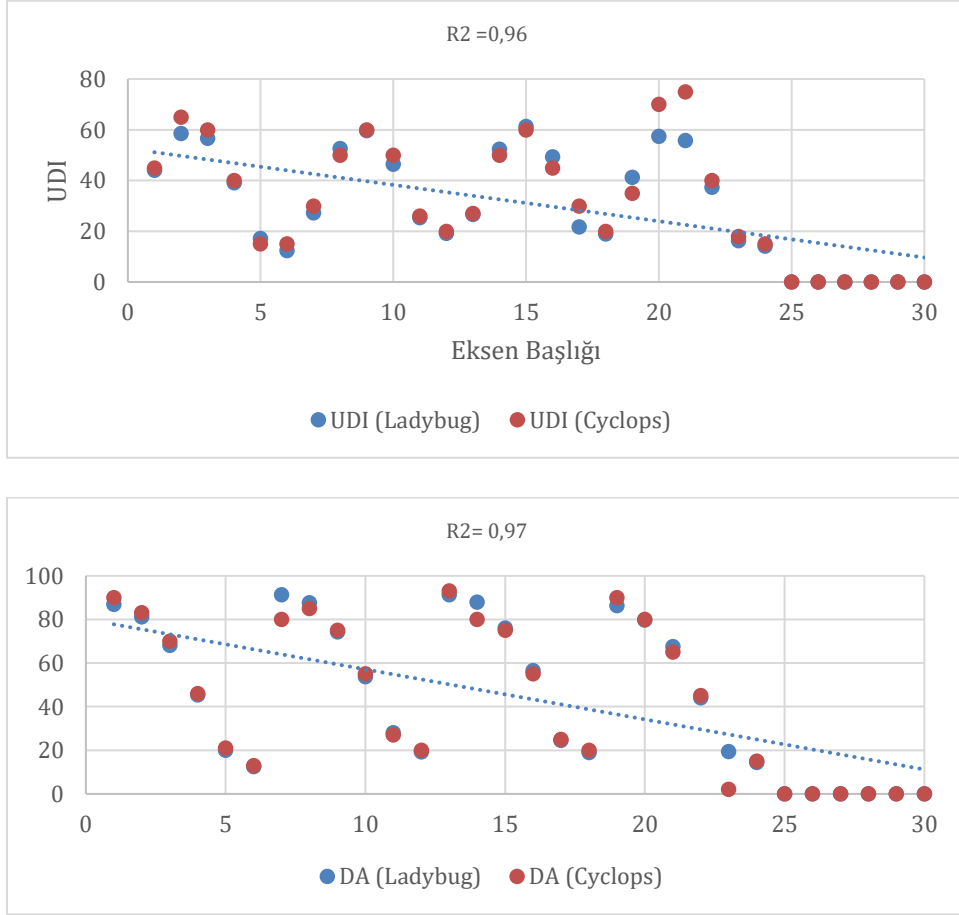
Ladybug ve Cyclops yazılımlarının farklı iklim senaryolarında elde ettiği sonuçları karşılaştırmak amacıyla Faydalı Gün Işığı Aydınlanma (UDI) ve Gün Işığı Otonomisi (DA) göz önünde bulundurulmuştur. Şekil 8, Cyclops eklentisi ile hasta odasının gün ışığı simülasyon modelini göstermektedir.



Şekil 8. Cyclops ile hasta odası gün ışığı modeli.

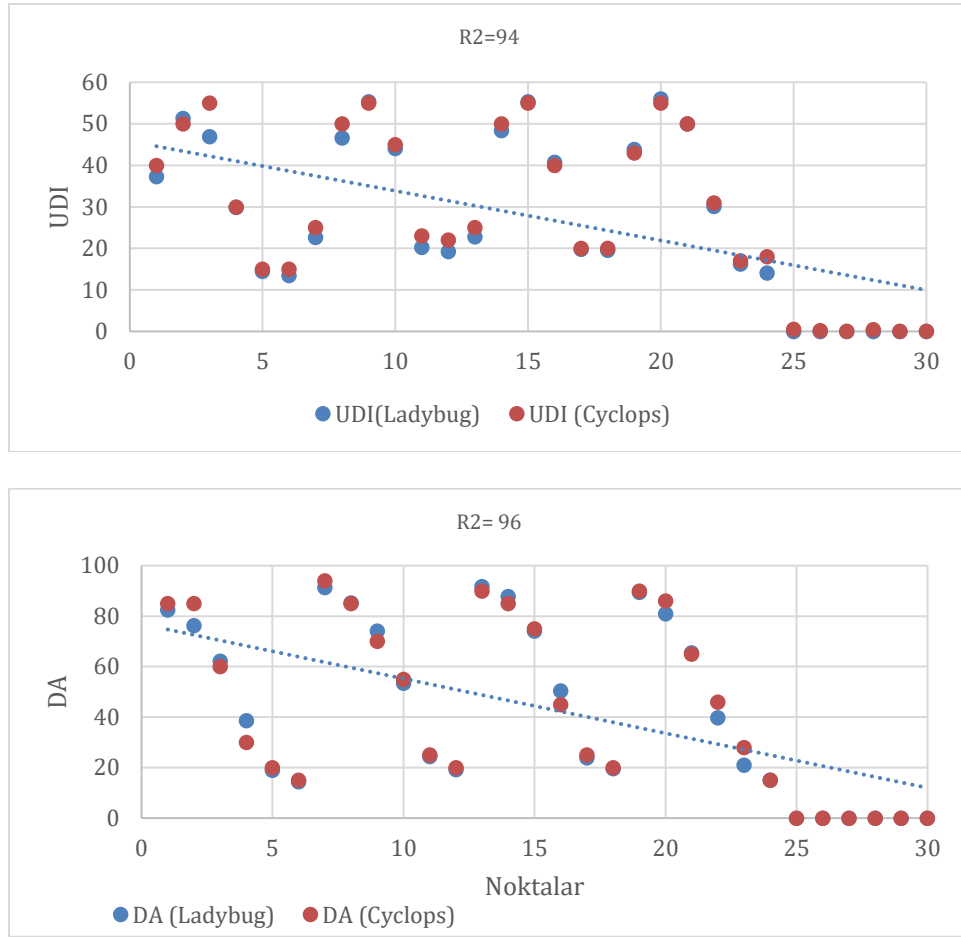
3. BULGULAR

Çalışmanın bu bölümü sağlık yapılarının gün ışığı simülasyon tahminlerini farklı iklim koşullarında değerlendirmektedir. Çalışma kapsamında Balıkesir Üniversitesi Tıp Fakültesi Hastanesinde yer alan güney cepheli hasta odasının gün ışığı simülasyonu Balıkesir ve Erzurum iklim senaryolarında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada Ladybug simülasyon yazılımının aydınlık düzeyi sonuçları gerçek verilerle doğrulanmıştır (Şekil 8). Şekil 9, Balıkesir'in Ladybug ve Cyclops yazılımları kullanılarak elde edilen UDI ve DA sonuçlarını karşılaştırmaktadır. UDI karşılaştırması sonucunda $R^2 = 0,96$ elde edilmiş, DA karşılaştırmasının sonucunda $R^2 = 0,97$ elde edilmiştir. Bu değerler simülasyon sonuçlarının doğrusal bir ilişki içinde olduğunu göstermektedir.



Şekil 9. Ladybug ve Cyclops'un Balıkesir için elde ettiği UDI ve DA sonuçlarının karşılaştırması.

Şekil 10, Erzurum'un Ladybug ve Cyclops yazılımları kullanılarak elde edilen UDI ve DA sonuçlarını karşılaştırmaktadır. UDI karşılaştırması sonucunda $R^2 = 0,94$ elde edilmiş, DA karşılaştırmasının sonucunda $R^2 = 0,96$ elde edilmiştir. Bu değerler simülasyon sonuçlarının doğrusal bir ilişki içinde olduğunu göstermektedir.



Şekil 10. Ladybug ve Cyclops'un Erzurum için elde ettiği UDI ve DA sonuçlarının karşılaştırması.

4. SONUÇLAR ve GELECEK ÇALIŞMALAR

Gün ışığı simülasyonlarının gerçekleştirilmesi amacıyla literatürde birçok yazılım bulunmaktadır. Günümüzde teknolojinin gelişimi ile yeni yazılımlar gelişmeye başlamaktadır. Foster Partners tarafından geliştirilen Cyclops da bu yeni gün ışığı simülasyon yazılımlarından biridir. Bu çalışma sağlık yapılarında kullanılan Ladybug ve Cyclops gün ışığı simülasyon yazılımlarının güvenilirliğini karşılaştırmalı olarak incelemektedir. Çalışma model güvenilirliğini sağlamak adına Balıkesir Üniversitesi Tıp Fakültesi Hastanesinde yer alan güney cepheli hasta odasında aydınlık düzeyi ölçümleri gerçekleştirmiştir. Aydınlık düzeyi ölçüm sonuçları ile alan çalışmasına konu olan hastanenin Ladybug simülasyon sonuçları karşılaştırılarak model güvenilirliği tespit edilmiştir ($R^2=0,97$).

Ilıman iklim bölgesi olan Balıkesir iklim verilerini kullanan senaryoda Ladybug ve Cyclops yazılımlarından elde edilen UDI ve DA değerleri arasında sırasıyla $R^2 = 0,96$ ve $R^2 = 0,97$ tespit edilmiştir. Bu değerler elde edilen veriler arasında yüksek uyumu göstermektedir. Aşırı soğuk iklim bölgesi olan Erzurum iklim verilerini kullanan senaryoda Ladybug ve Cyclops yazılımlarından elde edilen UDI ve DA değerleri arasında sırasıyla $R^2 = 0,94$ ve $R^2 = 0,96$ tespit edilmiştir. Bu değerler

elde edilen veriler arasında yüksek uyumu göstermektedir. Bu sonuçlar her iki simülasyon aracının farklı iklim koşullarında gün ışığı performansının eğilimlerinin tutarlı olduğunu göstermektedir. Çalışmanın sonuçları, kullanıcı konforunun önem arz ettiği sağlık yapılarında gün ışığı performansına yönelik simülasyon çalışmalarında kullanılan yazılımın seçiminde yalnızca yazılımın yaygın kullanımına değil, gerçek verilerle uyumuna ve iklimsel koşullarda verdiği tepkilere dikkat edilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, Ladybug ve Cyclops yazılımlarının farklı iklim senaryosunda da gün ışığı performansını yüksek doğrulukla tahmin edebildiği görülmüştür. Ancak sonuçların hata metrikleri ile birlikte değerlendirilmesinin daha sağlıklı yorumlar yapılmasına olanak sağlayacağı değerlendirilmektedir. Gelecek çalışmalar model güvenilirliği tespit etmek adına daha çok yazılımı ele alıp RMSE, MAE ve MBE gibi hata metrikleri ile destekleyebilir. Ayrıca farklı cephe yönelimleri, oda geometrileri ve cephe açıklık oranlarının simülasyon doğruluğu üzerindeki etkilerinin incelenmesi, sağlık yapıları için daha genellenebilir tasarım rehberlerinin oluşturulmasına katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

1. Oduntan, I. E., & Akande, O. K. (2023). Architectural interventions to improve daylight and colour impact for the long-term sustainable wellbeing of paediatric hospital patients in Abuja, Nigeria. *Journal of African Resilience and Advancement Research*, 2(2).
2. United Nations. (t.y.). *Sustainable development goals*. <https://sdgs.un.org/goals>
3. ASHRAE. (2017). *ASHRAE handbook—Fundamentals*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
4. International Energy Agency. (2006). *Daylight in buildings: A source book on daylighting systems and components*. International Energy Agency.
5. Lam, J. C., Hui, S. C. M., & Chan, A. L. S. (1997). Regression analysis of high-rise fully air-conditioned office buildings. *Energy and Buildings*, 26(2), 189–197. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(97\)00018-2](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(97)00018-2)
6. Lamberts, R., & Hensen, J. L. M. (Eds.). (2011). *Building performance simulation for design and operation*. Spon Press.
7. Attia, S., et al. (2013). Simulation-based decision support tool for early stages of zero-energy building design. *Energy and Buildings*, 49, 2–15. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.12.028>
8. Yufka, M., Ekici, B., Cubukcuoglu, C., Chatzikonstantinou, I., & Sariyildiz, I. S. (2017). Multi-objective skylight optimization for a healthcare facility foyer space. In *Proceedings of the 2017 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)* (pp. 1008–1014). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CEC.2017.7969426>
9. Englezou, M., & Michael, A. (2020). Assessment of daylight performance and the impact of shading devices for typical in-patient rooms in healthcare facilities in Cyprus. *Procedia Manufacturing*, 44, 277–285. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.230>
10. Rodríguez, P., Campano, M. A., Domínguez-Amarillo, S., & Acosta, I. J. (2024). Optimization of window design in hospital rooms for effective access to daylight. *E3S Web of Conferences*, 487, 02002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202448702002>

11. Ali, L. A., Miran, F. D., & Mustafa, F. A. (2025). Fenestration design model for daylight optimization in patient rooms in Erbil city. *Architecture*, 5(4), 110.
12. Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (2020). *Köppen iklim sınıflandırmasına göre Türkiye iklimi*. Erişim tarihi (01/01/2026)
https://www.mgm.gov.tr/FILES/iklim/iklim_siniflandirmalari/koppen.pdf
13. Türk Standardları Enstitüsü. (2013). *TS 825: Binalarda ısı yalıtım kuralları*. TSE.
14. WeatherSpark. (t.y.). *Balıkesir, Türkiye ortalama hava durumu*. Erişim tarihi (01/01/2026)
<https://tr.weatherspark.com/y/94368/Bal%C4%B1kesir-T%C3%BCrkiye-Ortalama-Hava-Durumu-Y%C4%B1l-Boyunca>
15. WeatherSpark. (t.y.). *Erzurum, Türkiye ortalama hava durumu*. Erişim tarihi: 01/01/2026
<https://tr.weatherspark.com/y/102045/Erzurum-T%C3%BCrkiye-Ortalama-Hava-Durumu-Y%C4%B1l-Boyunca>
16. Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (t.y.). *Türkiye global güneş radyasyonu verileri (iller bazında)*, MGM. [Online].
https://www.mgm.gov.tr/kurumici/radyasyon_iller.aspx
17. Ladybug Tools. (t.y.). *Ladybug Tools (Grasshopper eklentisi)*, Food4Rhino platformu. [Online].
<https://www.food4rhino.com/en/app/ladybug-tools>
18. Cyclops. (t.y.). *Cyclops (Grasshopper eklentisi)*, Food4Rhino platformu. [Online].
<https://www.food4rhino.com/en/app/cyclops?lang=en>

DIŞ DUVAR SİSTEMLERİNİN GÖMÜLÜ VE KULLANIM FAZİ EMİSYONLARININ EPD TABANLI KARŞILAŞTIRILMASI

T. Gülfem Kaya^{1*}

Ferhan Hasımaden²

^{1,2} ÖZÜ Mimarlık Fakültesi

Çekmeköy Kampüsü, Nişantepe, İstanbul, 34794

ÖZET

Küresel karbon emisyonlarının %37'sinden sorumlu olan inşaat sektörü için döngüsel ekonomi ve sürdürülebilirlik stratejileri bir zorunluluktur. Bu çalışma; Çapraz Lamine Ahşap (CLT), tuğla ve prefabrike beton blok (CMU) dış duvar sistemlerinin çevresel ve enerji performanslarını Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA) perspektifinden karşılaştırmalı olarak incelemektedir. Araştırma kapsamında, malzemelerin ısı iletkenlik ve termal kütle etkileri izole edilerek yıllık ısıtma-soğutma yükleri simüle edilmiş; ardından Çevresel Ürün Beyanları (EPD) aracılığıyla gömülü ve operasyonel karbon salımları (A1-A4 ve kullanım fazı) hesaplanmıştır. Simülasyon sonuçları, CLT sisteminin düşük U-değeri sayesinde ısıtma yüklerini %59-60 oranında azalttığını, ancak düşük termal kütlesi nedeniyle soğutma yüklerinde tuğla ve CMU'ya göre daha zayıf performans sergilediğini göstermiştir. Buna rağmen yıllık toplam enerji tüketiminde CLT, diğer sistemlerden %9-10 daha verimlidir. 60 yıllık bina yaşam döngüsü analizinde CLT, toplam karbon salımında yaklaşık %25-26 oranında tasarruf sağlayarak en sürdürülebilir seçenek olmuştur. Özellikle üretim ve nakliye aşamasında (A1-A4), CLT'nin bünyesinde hapsediği biyogenik karbon sayesinde -992,37 kg değerine ulaşması en çarpıcı bulgudur. Çalışma, düşük karbonlu bina tasarımında malzeme seçiminin hem gömülü hem de operasyonel emisyonlar üzerindeki kritik etkisini nicel verilerle ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: EPD, LCA, Gömülü Karbon, Operasyonel Karbon, Toplam Yaşam Döngüsü Karbonu

EPD BASED COMPARISON OF EMBODIED AND OPERATIONAL EMISSIONS OF EXTERNAL WALL SYSTEMS

ABSTRACT

The construction industry, responsible for 37% of global carbon emissions, necessitates circularity and sustainability strategies. This study evaluates the environmental and energy performance of external wall systems composed of cross laminated timber (CLT), brick, and concrete masonry units (CMU) through a comparative life cycle assessment (LCA) perspective. By isolating the thermal conductivity and thermal mass effects of materials, the research simulates annual heating and cooling loads, subsequently calculating embodied and operational carbon emissions (A1-A4 and usage phases) via environmental product declarations (EPD). Simulation results indicate that the CLT system reduces heating loads by 59–60% due to its lower U-value, although its lower thermal mass leads to higher cooling demands compared to brick and CMU. Nevertheless, in terms of total annual energy consumption, CLT remains 9–10% more efficient than the alternatives. Within a 60-year building life cycle, CLT emerged as the most sustainable option, achieving approximately 26% reduction in total carbon emissions. The most significant finding is observed in the production and transport stages, where CLT reached a value of -992.37 kg, highlighting its capacity for biogenic carbon storage. This study quantitatively demonstrates the critical impact of material selection on both embodied and operational emissions in low-carbon building design.

Keywords: EPD, LCA, Embodied Carbon, Operational Carbon, Whole Life Carbon

^{1*}Sorumlu yazar e-posta adresi: gulfem.kaya@ozyegin.edu.tr

1. GİRİŞ

Küresel iklim değişikliği ile mücadele kapsamında yapı sektörü, karbon emisyonlarını azaltma konusunda en stratejik alanlardan biri olarak öne çıkmaktadır. Günümüzde binaların enerji etkin tasarımı sayesinde operasyonel karbon salımları kontrol altına alınmaya başlansa da, yapım aşamasında kullanılan malzemelerin doğasında bulunan "gömülü karbon" etkisi, toplam yaşam döngüsü performansında giderek daha kritik bir paya sahip olmaktadır [1]. Bu bağlamda, bir yapının çevresel etkilerini bütüncül bir perspektifle değerlendirebilmek için Yaşam Döngüsü Analizi (LCA) metodolojisi vazgeçilmez bir araç haline gelmiştir [2]. LCA, bir ürünün veya sistemin ham madde çıkarımından başlayarak, üretim, nakliye, kullanım ve ömür sonu aşamalarını kapsayan tüm çevresel yüklerini sayısal verilerle ortaya koymaktadır [3].

LCA çalışmalarının en temel bileşeni, güvenilir ve doğrulanmış veri girişidir. Geçmişte yapı malzemelerinin çevresel etkilerine dair standart bir veri formatının bulunmaması, tasarımcıların malzeme seçimi aşamasında objektif kararlar vermesini zorlaştırmaktaydı. Bu belirsizliği gidermek ve şeffaflığı sağlamak amacıyla geliştirilen Çevresel Ürün Beyanları (EPD), yapı malzemelerinin çevresel performansını ISO 14025 standardına göre raporlayan Tip III etiketleridir [4] [5]. EPD'ler, bağımsız kuruluşlarca doğrulanan teknik belgeler olarak malzemenin Küresel Isınma Potansiyeli (GWP) başta olmak üzere birçok parametreyi standartlaştırarak, farklı malzemelerin aynı fonksiyonel birim üzerinden kıyaslanabilmesine olanak tanır [6].

Bir yapının karbon performansını optimize etmek, sadece malzeme seçimiyle değil, malzemenin binanın operasyonel süreciyle olan etkileşimini anlamakla mümkündür. Özellikle binanın dış kabuğu, hem gömülü karbonu barındıran ana unsur hem de termal performansı belirleyerek operasyonel enerji tüketimini doğrudan etkileyen katmandır [7]. Bu çalışma, hipotetik bir hacmin Güney cephesindeki dış duvar kurgusunu, üç farklı malzeme katmanlaşması üzerinden analiz etmektedir. Analiz kapsamında, LCA sistem sınırları olarak üretimin ham madde tedarikinden fabrika çıkışına kadar olan A1-A3 (Beşikten Kapıya) aşamaları ve malzemenin şantiyeye nakliyesini kapsayan A4 aşamasını temel alınmıştır [8], [9].

Çalışmanın metodolojik özgünlüğü, EPD verilerinden elde edilen bu gömülü karbon değerleri ile DesignBuilder simülasyon yazılımı aracılığıyla hesaplanan operasyonel karbon salımını birleşik bir yaklaşımla karşılaştırmasından gelmektedir. Böylece, düşük gömülü karbonlu bir malzemenin operasyonel süreçteki enerji verimliliği ile olan dengesi, toplam karbon ayak izi üzerinden bütüncül bir biçimde tartışmaya açılmaktadır.

Ahşap esaslı taşıyıcı sistemler özelinde yapılan çalışmalar, CLT duvarların uygun yalıtım konfigürasyonları ile referans çelik-karkas sistemlere kıyasla daha düşük yıllık ısıtma ve toplam enerji tüketimi sağlayabildiğini göstermektedir [10]. CLT panellerin deneysel olarak belirlenen ısı iletkenlik, özgül ısı ve buhar difüzyon direnci gibi malzeme parametrelerinin enerji simülasyonlarına entegre edilmesi, model güvenilirliğini artırmaktadır [10], [11] [12]. Ayrıca, yalıtımın konumu (iç/dış) ve türünün hem hygrotermal stabilite hem de enerji performansı üzerinde etkili olduğu; dış yalıtım sistemlerinin genellikle daha avantajlı sonuçlar verdiği belirtilmektedir [11]. Duvar performansının yalnızca teorik U-değeri ile değil, dinamik ısı iletim davranışı dikkate alınarak değerlendirilmesi gerektiği; özellikle ısıtma-ağırlıklı iklimlerde bu yaklaşımın enerji sonuçlarını anlamlı biçimde değiştirdiği ortaya konmuştur [13], [14]. Türkiye ve yurtdışı bağlamında gerçekleştirilen çok kriterli optimizasyon çalışmaları ise CLT dış duvar sistemlerinin enerji, gömülü karbon ve maliyet parametreleri birlikte değerlendirildiğinde iklime duyarlı

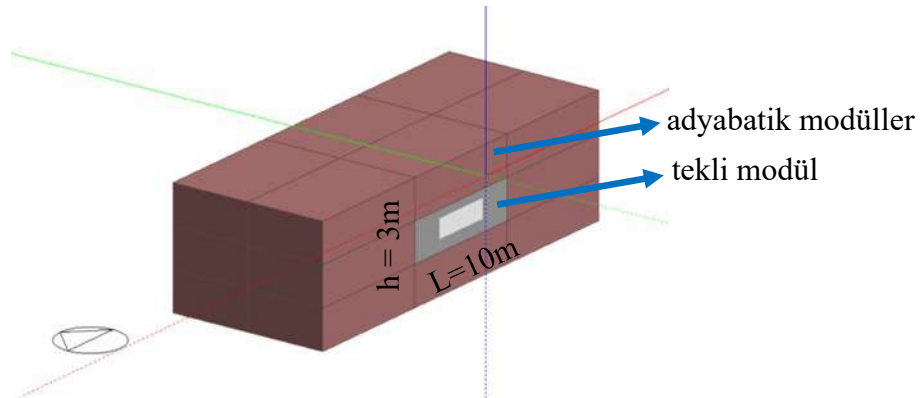
üstünlükler gösterebildiğini göstermektedir [15], [16]. Bu literatür doğrultusunda, CLT, CMU ve tuğla dış duvar sistemlerinin sınır koşulları sabit tutularak enerji performansı üzerinden karşılaştırılması, malzeme kaynaklı ısı davranış farklılıklarını izole etmek ve yaşam döngüsü karbon değerlendirmesine altyapı oluşturmak açısından anlamlı bir araştırma boşluğunu hedeflemektedir.

2. YÖNTEM

Bu çalışma, farklı dış duvar sistemlerinin etkilerini bütüncül bir perspektifle değerlendirmek amacıyla gömülü karbon ve operasyonel karbon salınımlarını kapsayan bir Yaşam Döngüsü Analizi (LCA) metodolojisi üzerine kurgulanmıştır. Bu çalışmada, dış duvar malzemesinin operasyonel enerji performansı üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla, basitleştirilmiş bir hipotetik hacim üzerinden enerji simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Simülasyon modeli, DesignBuilder yazılımı kullanılarak oluşturulmuş ve daha büyük bir konut yapısının tekrar eden tipik birimlerinden biri olacak şekilde kurgulanmıştır. Bu doğrultuda, modelde yalnızca test edilen cephe dış ortama açık bırakılmış, diğer tüm cepheler ve üst-alt sınırlar adiyabatik olarak tanımlanmıştır. Bu yaklaşım ile, enerji tüketimindeki farklılıkların mümkün olduğunca yalnızca dış duvar sisteminden kaynaklanması ve model karmaşıklığının kontrol altında tutulması hedeflenmiştir.

2.1. Bina Modeli ve Parametreler

Analizler, 6mx10m boyutlarında, 3m kat yüksekliğinde tek katlı bir modül üzerinden yürütülmüştür (Şekil 1). Bu boyutlar, konut ölçeğinde temsil edilebilir bir hacim sunarken, cepheye ait ısı iletim ve termal kütle etkilerinin yıllık ısıtma ve soğutma enerji taleplerine yansımaları gözlemlemeye olanak sağlamaktadır. Modelin geometrisi ve kullanım senaryosu tüm simülasyonlarda sabit tutulmuş; yalnızca dış duvar katmanlaşması CLT, delikli tuğla ve CMU beton blok sistemler olacak şekilde değiştirilmiştir.



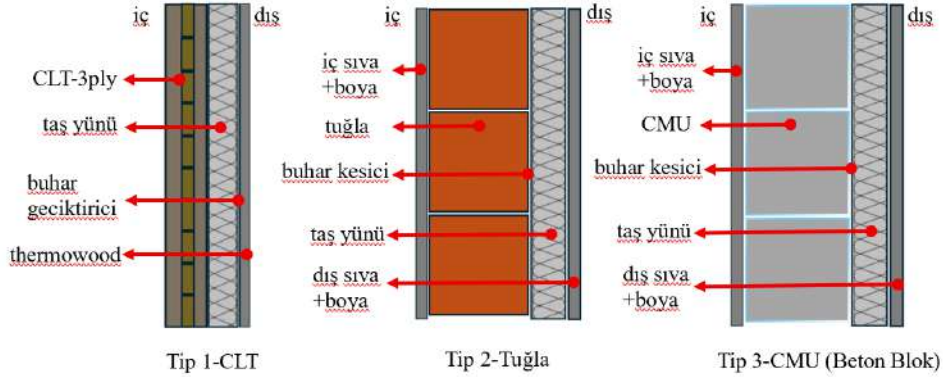
Şekil 1: Simüle edilecek tekli modül: d;6m, l;10m, h: 3m

Isıl kararlılığı sağlamak ve sadece değişken olan dış duvar performansına odaklanmak amacıyla, üç cephe, taban ve tavan adiyabatik kabul edilmiştir. Test edilen cephede, tüm senaryolarda aynı pencere türü ve saydamlık oranı kullanılmıştır. Pencere-duvar oranı (WWR) %25 olarak sabitlenmiş, böylece cam yüzeylerin etkisi kontrol altında tutularak dış duvar malzemesinin enerji

performansı üzerindeki rolü ön plana çıkarılmıştır. Cephe güney yönelimli olarak modellenmiş ve ısı performansını doğrudan karşılaştırabilmek amacıyla gölgeleme elemanları kullanılmamıştır. Simülasyonlar için **EnergyPlus EPW** formatındaki İstanbul saatlik tipik yıl verisi kullanılmıştır.

2.2. Duvar Tipleri ve Katmanlaşma

Çalışma kapsamında üç farklı yapısal gövde malzemesi temelinde dış duvar kesitleri oluşturulmuştur (**Şekil 2**). Duvar malzemeleri arasındaki ısı kütlesi ve zaman gecikmesi gibi kritik parametreler analize dahil edilmemiştir.



Şekil 2: Tip 1-CLT duvar katmanları dıştan içe doğru; thermowood cephe kaplaması, buhar kesici, taşyünü, CLT-3ply. Tip 2-Tuğla duvar katmanları dıştan içe doğru; iç sıva+boya, tuğla (19cm'lik), buhar kesici, taşyünü, dış sıva+boya. Tip 3 – CMU_beton blok duvar katmanları dıştan içe doğru; iç sıva+boya, CMU (19cm'lik), buhar kesici, taşyünü, dış sıva+boya.

Referans hacmin kabuk kesiti **Çizelge 1**'de gösterildiği üzere TS 825 2024 Standardı Asgari gereksinimlerine uygun olarak tasarlanmıştır. Paket tip terminal ısı pompası (PTHP), kanal gerektirmeyen tüm birleşik ısıtma ve soğutma çözümü olarak kullanılmıştır. PTHP sistemi ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2013'teki temel bina için önerilen standart boyutlu PTHP tipine uygun şekilde temel (baseline) HVAC sistemi olarak seçilmiştir.

2.3. Senaryo

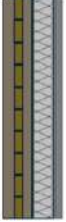
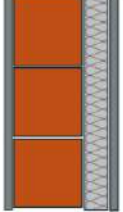
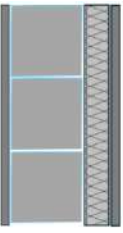
Değerlendirme iki farklı senaryo üzerinden gerçekleştirilmiştir (**Çizelge 2**):

Senaryo 1: Sabit U- Değeri; tüm duvar tiplerinin toplam ısı iletim katsayıları (U değeri) yalıtım kalınlıkları optimize edilerek eşitlenmiştir, infiltrasyon değerleri literatürle uyumlu dikkate alınmıştır. Bu sayede malzemelerin gömülü karbon ve operasyonel karbon farkları incelenmiştir. Birinci senaryoda, farklı dış duvar sistemlerinin yalnızca malzeme temelli ısı özelliklerinin etkisini izole edebilmek amacıyla, tüm dış duvar kesitlerinin TS 825'e göre ısı geçirgenlik katsayıları (U değerleri) eşitlenmiş ve hava sızdırmazlık (infiltration) değerleri dikkate alınmıştır. Bu senaryo, ısı iletkenlik değeri eşit koşullar altında, çekirdeği CLT, tuğla ve CMU olan duvar sistemlerinin enerji ve konfor koşullarını karşılaştırmayı amaçlamaktadır.

Senaryo 2: CLT, tuğla ve CMU duvar sistemleri aynı toplam kalınlıkta modellenmiş ve tüm sistemlerde yalıtım kalınlığı 0.067 m olarak sabitlenmiştir. Bu yaklaşım, gömülü karbon (A1–A3)

hesaplamalarında katman ve kalınlık farklılıklarından kaynaklanan değişkenliği azaltarak sistemlerin eşdeğer konstrüksiyon koşulları altında karşılaştırılmasını amaçlamıştır.

Çizelge 1:Enerji modeli için duvar konfigürasyonları

	Malzeme	Isıl İletkenlik (W/mK)	Isıl Kapasite (J/kg.K)	Yoğunluk (kg/m ³)	Kalınlık (m)	Isıl İletkenlik (W/m ² .K)	Görsel
Tip 1- CLT Duvar	Thermowood kaplama	0.72	840	428	0.02	0.40	
	Taş yünü	0.033	710	100	0.036		
	Buhar geciktirici	2.3	2300	130	0.001		
	CLT-3ply	0.163	958	602	0.12		
Tip 2- Tuğla Duvar	Çimento sıva+boya	0.72	840	1760	0.02	0.40	
	Taş yünü	0.033	710	100	0.033		
	Buhar kesici	2.3	2300	130	0.001		
	Delikli Tuğla	0.30	840	1000	0.19		
	Çimento sıva+boya	0.72	840	1760	0.02		
Tip 3 – CMU Duvar	Çimento sıva+boya	0.72	840	1760	0.02	0.40	
	Taş yünü	0.033	710	100	0.051		
	Buhar kesici	2.3	2300	130	0.001		
	CMU	1.13	1000	1800	0.19		
	Çimento sıva + boya	0.72	840	1760	0.02		

CMU duvarın TS 825 gerekliliklerini bu yalıtım kalınlığı ile sağlayabilmesi nedeniyle, aynı yalıtım kalınlığı diğer sistemlere de uygulanarak karşılaştırmanın malzeme bazlı ısı davranış ve termal kütle etkilerine odaklanması sağlanmıştır. Böylelikle malzemelerin doğal yalıtım performanslarının operasyonel enerjiye etkisi ölçölmüőtür. İkinci senaryoda da, uygulamaya daha yakın koşulları temsil edebilmek amaçıyla, dış duvar sistemlerine özęü hava sızdırmazlık düzeyleri dikkate alınmış ve infiltrasyon değerleri malzeme ve yapıım sistemi özelliklerine bağlı olarak farklılaőtırılmıőtır. Bu senaryo ile, malzeme seçimi ile birlikte yapıım sistemi ve detay kalitesinin operasyonel enerji tüketimi üzerindeki bileşik etkisinin ortaya konulması hedeflenmiőtır.

Çizelge 2: Değerlendirme için kullanılan iki farklı senaryo tipi

Senaryo	Kontrol Değişkeni	Bağımsız Değişken	Amaç
Senaryo A	Sabit U-Değeri	Katman Kalınlıkları	Isıl performans eşitken malzemenin karbon farkını görmek
Senaryo B	Sabit Gövde Kalınlığı	U-Değeri	Aynı duvar kesitinde malzemenin verimliliğini ölçmek.

2.3. Veri Toplama

Senaryo 1'deki sabit U değeri ve senaryo 2'deki sabit gövde kalınlığı hedefiyle, Design Builder'dan 12 aylık ısıtma-soğutma yük değerleri okunmuş ve yıllık toplam operasyonel enerji değerleri hesaplanmıştır (**Çizelge 3**).

Çizelge 3: Değerlendirme için kullanılan iki farklı senaryo tipi

Duvar Tipi	Senaryo 1-Sabit U değeri Toplam Operasyonel Enerji (kWh)	Senaryo 2-Sabit Kalınlık Toplam Operasyonel Enerji (kWh)
CLT	3631,8	3861,38
Tuğla	4314,7	4274,67
CMU (Beton Blok)	4295,4	4295,34

Duvar tiplerini oluşturan malzemelerin gömülü karbon (LCA: A1-A3; gömülü karbon, A4; taşıma) değerlerini bulmak için EPD Türkiye ve EPD International kütüphanesinde yer alan uygun malzemelerin GWP verileri çekilmiştir. Bu verilerle gömülü karbon (A1-A3, A4) verileri çekilmiştir. Herbir malzeme için gerekli birim normalizasyonları yapılarak 30m² duvar için toplam gömülü karbon hesabı yapılmıştır (**Çizelge 4**).

Çizelge 4: Malzemelerin EPD'lerden alınan 30m² duvar için gömülü karbon değerleri

Duvar Tipi (pencere hariç)	Toplam Gömülü Karbon (A1-A3, A4) 30m ² dış duvar	Gömülü Karbon m ² başına	Birim
CLT Duvar	-992,37	-33,08	kg CO ₂ eq.
Tuğla Duvar	4660,16	155,33	kg CO ₂ eq.
Beton Blok Duvar	5426,44	180,88	kg CO ₂ eq.

DesignBuilder yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda her iki senaryo için kWh cinsinden hesaplanan enerji tüketim değerleri, elektrik/enerji için belirlenen emisyon faktörleri esas alınarak kgCO₂ eşdeğeri (kgCO₂e) cinsine dönüştürülmüştür. Sonraki aşamada EPD'lerde belirtilen malzeme hizmet ömrü dikkate alınarak 60 yıllık kullanım süresi üzerinden harcadığı toplam enerji hesaplanmıştır. (**Çizelge 5**).

Çizelge 5: Farklı duvar tiplerine sahip hacmin bina ömrü boyunca harcadığı operasyonel enerji

Duvar Tipi	Senaryo-1 Toplam Operasyonel Enerji Yıllık(kWh)	Senaryo-2 Toplam Operasyonel Enerji Yıllık(kWh)	Senaryo-1 Karbon (yıllık) kgCO ₂ eq	Senaryo-2 Karbon (yıllık) kgCO ₂ eq	Senaryo-1 Operasyonel enerji-60 yıl kgCO ₂ eq	Senaryo-2 Operasyonel enerji-60 yıl kgCO ₂ eq
CLT	3631,80	3861,38	653,72	695,05	39223,44	41702,904
Tuğla	4314,72	4274,67	776,65	769,44	46598,976	46166,436
CMU (Beton Blok)	4295,44	4295,34	773,18	773,16	46390,752	46389,672

Çalışma kapsamında incelenen duvar tiplerinin çevresel performansı, üretim ve nakliye aşamalarını içeren gömülü karbon ile kullanım evresinde ortaya çıkan operasyonel karbonun bütünleşik değerlendirilmesiyle yaşam döngüsü karbonu (Whole Life Carbon) yaklaşımı çerçevesinde hesaplanmıştır. Bu hesaplamaları takiben, her bir malzeme türüne karşılık gelen toplam enerji tüketimi nicel olarak **Çizelge 6’da** ortaya konmuştur.

Çizelge 6: Duvar tiplerine göre toplam yaşam döngüsü karbonu

Duvar Tipi	Senaryo 1 Operasyonel enerji- 60 yıl kgCO ₂ eq	Senaryo 2 Operasyonel enerji-60 yıl kgCO ₂ eq	Toplam Gömülü Karbon (A1-A3, A4) 30m2 dış duvar (kgCO ₂ eq)	Senaryo 1 Toplam Karbon Yaşam Döngüsü WLC kgCO ₂ eq	Senaryo 2 Toplam Karbon Yaşam Döngüsü WLC kgCO ₂ eq
CLT	39224,44	41702,90	-992,37	38232,07	40710,53
Tuğla	46598,97	46166,43	4660,16	51259,13	50826,59
CMU (Beton Blok)	46390,75	46389,67	5426,439	51817,19	51816,11

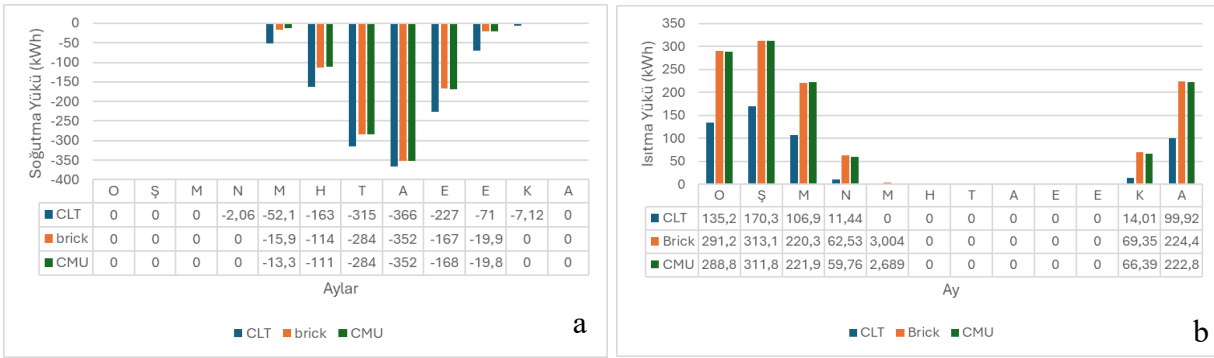
3. SONUÇLAR

3.1. Duvar Sistemlerinin Operasyonel Enerji Yüklerine Etkisi

Bu çalışmada, ortalama bir konut biriminin enerji tüketimi cephe malzemesi ve buna bağlı hava sızdırmazlığı (infiltrasyon) değerleri değiştirilerek analiz edilmiştir. Bulgular, bir yapının termal performansında yalnızca ısı iletkenlik değerlerinin değil, aynı zamanda hava sızdırmazlığı ve termal kütle özelliklerinin de belirleyici olduğunu ortaya koymuştur. Simülasyon sonuçları, benzer U-değerlerine sahip dış duvar sistemleri arasında dahi operasyonel soğutma yüklerinde anlamlı farklılıklar oluşabileceğini göstermektedir. CLT dış duvar sisteminde yıllık toplam soğutma enerjisi **Şekil 3a’da** görüldüğü gibi tuğla ve beton briket (CMU) sistemlerine kıyasla yaklaşık %26 daha yüksek hesaplanmış; bu fark özellikle yaz ve geçiş aylarında belirginleşmiştir. Tuğla ve CMU sistemlerinin yüksek yoğunluk ve hacimsel ısı kapasitesi sayesinde benzer ısı davranış sergilediği ve gündüz depolanan ısıнын iç mekân sıcaklık dalgalanmalarını sınırlayarak soğutma yüklerini azalttığı gözlenmiştir. Buna karşılık CLT sistemin düşük termal kütlesi, iç mekân sıcaklığının daha hızlı yükselmesine ve HVAC sisteminin daha erken ve daha uzun süre çalışmasına neden olmuştur. CLT, gömülü karbon açısından önemli avantajlar sunsa da sıcak iklim koşullarında operasyonel soğutma enerji tüketimini artırma potansiyeline sahiptir. Dolayısıyla, yapı sistemlerinin

sürdürülebilirlik değerlendirmesinde yaşam döngüsü analizi yaklaşımının benimsenmesi ve iklim bağlamının bütüncül olarak ele alınması kritik öneme sahiptir.

Simülasyon sonuçları, benzer U-değerlerine sahip duvar sistemleri arasında ısıtma enerjisi tüketiminde belirgin farklılıklar olduğunu göstermiştir. CLT duvar sisteminde yıllık ısıtma enerjisi talebi, **Şekil 3b**'de görüldüğü gibi tuğla ve beton briket (CMU) sistemlerine kıyasla yaklaşık %55 daha düşük bulunmuştur. Bu fark, ısıl iletkenlikten ziyade sistemlerin termal kütle özellikleri ile ilişkilendirilmiştir. Düşük yoğunluklu CLT sisteminin daha hızlı ısınması, sabit iç sıcaklık koşullarında ısıtma sisteminin daha kısa süre çalışmasına olanak tanımıştır. Buna karşılık yüksek hacimsel ısı kapasitesine sahip tuğla ve CMU sistemlerinde başlangıç ısı yükü artmış ve ısıtma enerjisi talebi yükselmiştir.



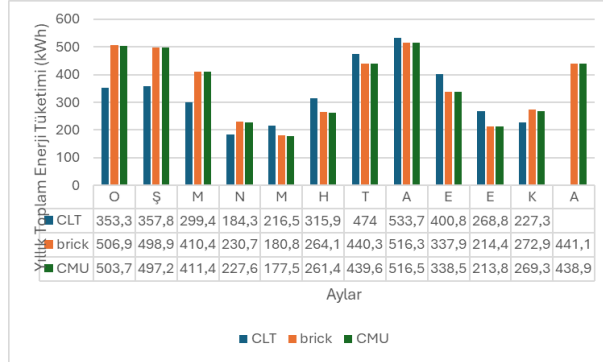
Şekil 3a: Kabuk malzemesine göre yıllık soğutma enerjisi tüketimi, **Şekil 3b:** Kabuk malzemesine göre yıllık ısıtma enerjisi tüketimi

Sonuçlar, termal kütlelerin ısıtma ve soğutma yükleri üzerindeki etkisinin mevsimsel olarak ters yönlü çalıştığını ortaya koymaktadır. Aylık enerji tüketim analizleri, kış aylarında ısıtma yüklerinin, yaz aylarında ise soğutma yüklerinin baskın olduğunu ve geçiş mevsimlerinde toplam enerji tüketiminin azaldığını **Şekil 4'de** göstermiştir. CLT sisteminde kış aylarında toplam enerji yükleri tuğla ve CMU sistemlerine göre yaklaşık %10 daha düşük hesaplanırken, yaz döneminde toplam enerji talebi artış göstermiştir. Bu durum, CLT'nin düşük termal kütle nedeniyle kışın hızlı ısınma avantajı sağlamasına karşın yazın iç ortam sıcaklık dalgalanmalarını sönümleme kapasitesinin sınırlı olmasına bağlanmıştır.

Tuğla ve CMU sistemleri, yüksek termal kütle etkisi sayesinde yaz döneminde daha dengeli iç ortam koşulları sağlayarak soğutma yüklerini azaltmış; ancak kış aylarında yüksek hacimsel ısı kapasitesi nedeniyle başlangıç ısıtma enerjisi gereksinimini artırmıştır. Genel olarak, duvar sistemlerinin toplam enerji performansının mevsime bağlı olarak farklılaştığı ve termal kütle etkisinin yıl boyunca tek yönlü bir avantaj sağlamadığı sonucuna ulaşılmıştır.

Aylık net duvar ısı transferi analizleri, kış döneminde CLT duvar sisteminde tuğla ve CMU sistemlerine kıyasla daha yüksek ısı kayıpları olduğunu göstermiştir. Buna karşılık yaz döneminde yüksek termal kütleyle sahip tuğla ve CMU sistemlerinde iç mekâna doğru ısı kazançlarının arttığı gözlemlenmiştir. Bu bulgular, yüksek kütleli duvarların dış ortam ısını depolayarak gecikmeli biçimde iç mekâna aktarması ile ilişkilendirilmiştir. Ancak duvarlardan gerçekleşen net ısı transferinin tek başına toplam ısıtma ve soğutma yüklerini belirlemediği; özellikle CLT sisteminde daha yüksek kış ısı kaybına rağmen toplam ısıtma enerjisinin düşük olmasının, düşük termal kütleli

sistemlerin daha hızlı ısıl tepki vermesi ve HVAC çalışma sürelerinin kısalmasıyla açıklanabileceği ortaya konmuştur [18].



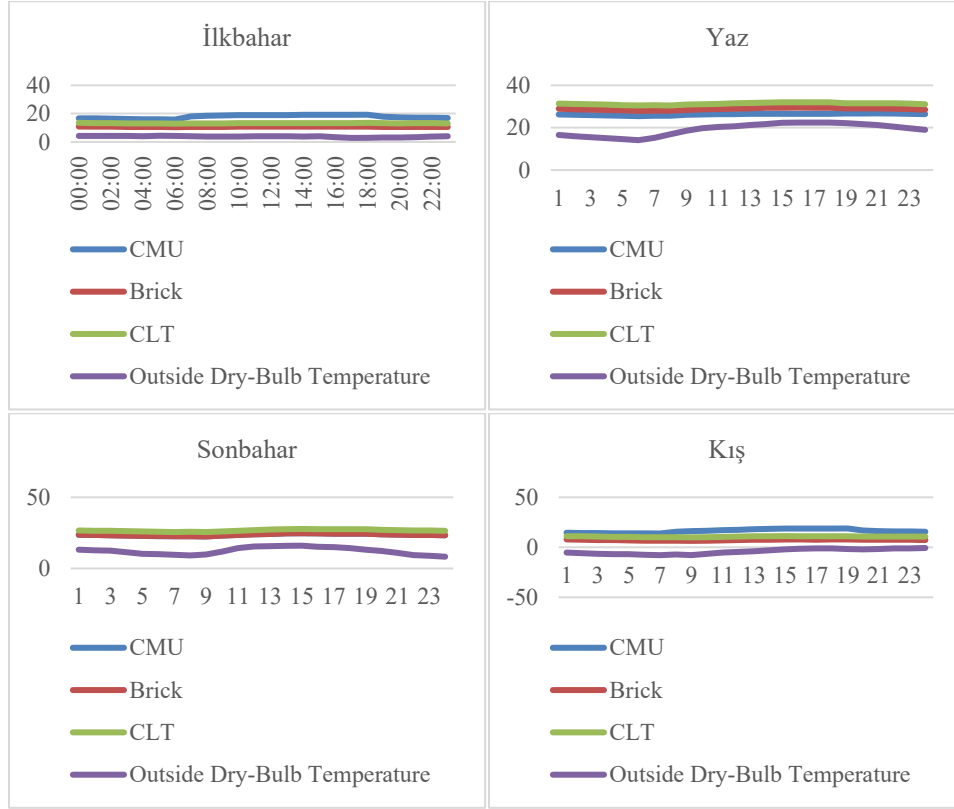
Şekil 4: Kabuk malzemesine göre yıllık toplam enerji tüketimi

İkinci senaryoda; CLT, tuğla ve CMU duvar sistemleri ve yalıtım katmanları aynı kalınlıkta modellenmiş U-değerleri, CLT için $0.284 \text{ W/m}^2\text{K}$, tuğla için $0.338 \text{ W/m}^2\text{K}$ ve CMU için $0.400 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak hesaplanmış; sonuçlar eşit yalıtım kalınlığına rağmen CLT sisteminin daha yüksek ısı direnç sağladığını göstermiştir.

Simülasyon sonuçları, CLT duvar sisteminin ısıtma enerjisi açısından tuğla ve CMU sistemlerine kıyasla belirgin bir üstünlük sağladığını göstermiştir. Daha düşük U-değeri ve katmanlı yapıya bağlı ısı özellikler nedeniyle CLT sisteminde ısıtma yükleri yaklaşık %59–60 oranında azalmıştır. Buna karşılık CLT'nin düşük termal kütlesi, soğutma döneminde daha yüksek enerji talebine yol açarken; tuğla ve CMU sistemleri yüksek yoğunluk ve hacimsel ısı kapasitesi sayesinde iç mekân sıcaklık dalgalanmalarını sönümleyerek soğutma yüklerini yaklaşık %20–22 oranında azaltmıştır. Yıllık toplam enerji tüketimi değerlendirmesinde CLT sistemi, ısıtma yüklerindeki belirgin düşüşün soğutmadaki artışı dengelemesi sonucunda tuğla ve CMU sistemlerine göre yaklaşık %9–10 daha düşük operasyonel enerji tüketimi göstermiştir. Bu bulgular, CLT sistemlerin özellikle ısıtma ağırlıklı iklimlerde avantajlı olabileceğini, ancak soğutma ağırlıklı iklimlerde termal kütlenin tasarım sürecinde kritik bir parametre olarak ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, katman kalınlıklarının eşitlenmesiyle elde edilen sonuçlar, sonraki gömülü karbon değerlendirmeleri için metodolojik tutarlılık sağlamaktadır.

Ayrıca, HVAC sisteminin aktif olduğu zaman dilimleri esas alınarak saatlik operatif sıcaklık değerleri analiz edilmiştir. Şekil 5. duvar sistemlerinin mevsimlere göre HVAC devrede iken iç ortam operatif sıcaklıklarını göstermektedir. Bu yaklaşım, malzeme ve konstrüksiyonun doğrudan operasyonel enerji tüketimine (HVAC elektrik tüketimi, çalışma süresi, pik güç) etkisini izole etmeye olanak verir; HVAC kapalı iken ortaya çıkan pasif davranışla; gece soğuma, serbest soğutma, gecikmeli ısı geri verme, analiz sonuçlarını maskeleyebileceğinden, aktif-periyot odaklı değerlendirme termal kütlenin HVAC kontrolü üzerindeki etkilerini daha net ortaya koyar. Ayrıca HVAC'in aktif olduğu analizler, düşük kütleli sistemlerin daha sık devreye girme ve kısa süreli yüksek pik talepleri üretme eğilimini göstermektedir. Bu bağlamda CLT'de günlük $T_{max} - T_{min}$ genliği en yüksek; CMU en düşüktür. Bu, CLT'nin düşük hacimsel ısı kapasitesi nedeniyle gündüz ısı kazançlarını daha az sönümlemesinden kaynaklanır. Saatlik ortalama ve standart sapma analizleri CMU'nun en stabil, CLT'nin en değişken sistem olduğunu göstermektedir. $20-24^\circ\text{C}$ aralığı dışına çıkan saat sayısı CLT'de en fazla; CMU en az. Bu, CLT'nin yaz döneminde daha

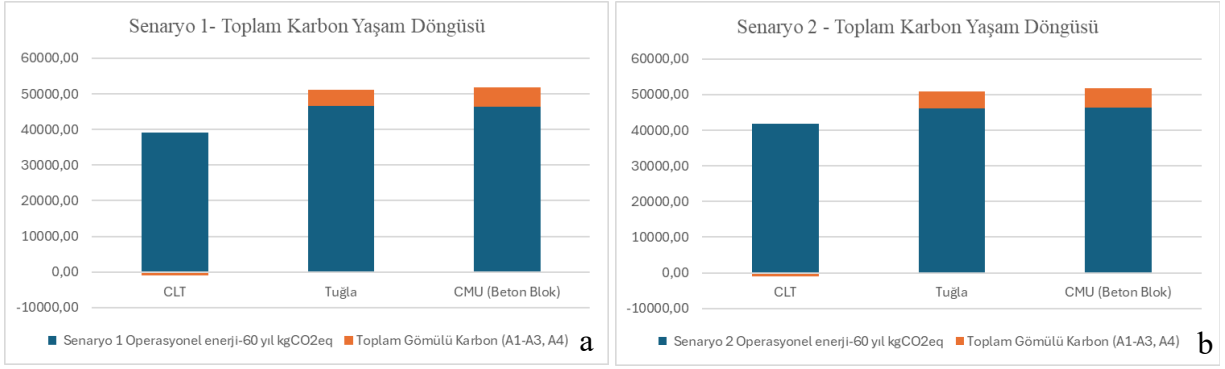
fazla konfor ihlali ürettiğini gösterir. Dış sıcaklık pikine göre iç sıcaklık pikinin gecikmesi (faz gecikmesi) en fazla CMU’da, en düşük CLT’de gözlenmiştir. Yüksek termal kütleye sahip CMU blokların faz gecikmesini artırdığı ve faz gecikmesi gereksinimi yüksek iklimler için (sıcak-kuru, soğuk vb.) uygun olduğunu göstermektedir. Bu nedenle malzeme seçimi iklim bağlamında yapılmalı; ısıtma-ağırlıklı bölgelerde CLT, soğutma-ağırlıklı veya yüksek gündüz-gece genliği olan bölgelerde yüksek kütleli duvarlar tercih edilmeli, nihai karar verilirken operasyonel enerji ile gömülü karbon arasındaki yaşam döngüsü takası da göz önünde bulundurulmalıdır.



Şekil 5. Duvar sistemlerinin mevsimlere göre operatif sıcaklıklara etkisi

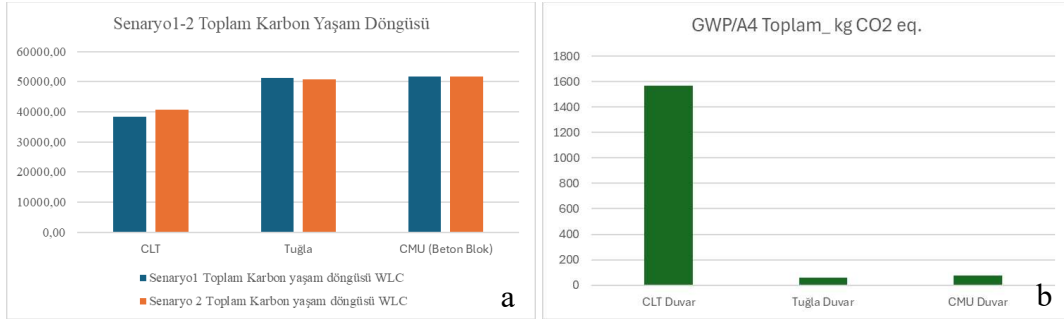
3.2. Toplam karbon yaşam döngüsü (WLC) sonuçları

Son aşamada duvar tiplerinin çevresel performansları; üretim ve nakliye aşamalarını içeren gömülü karbon ile kullanım evresindeki enerji tüketiminden kaynaklanan operasyonel karbonun toplamı olan bütünsel yaşam döngüsü karbonu üzerinden değerlendirilmiştir. Yapılan çalışma üç farklı duvar tipinin (CLT, tuğla, beton blok) 60 yıllık bir bina yaşam döngüsü boyunca toplam karbon performansını ortaya koyuyor. Sonuçlara göre CLT her iki senaryoda da karbon açısından en sürdürülebilir seçenek olmuştur. CLT, diğer sistemlere göre toplam yaşam döngüsü karbonunda yaklaşık %25-26 oranında daha düşük bir salım değerine sahiptir. CLT modülü 60 yılın sonunda yaklaşık 38-40 ton CO₂eq salım yaparken tuğla ve beton blok 51-52 ton seviyelerindedir. Bu, tek bir modül için yaklaşık 12-13 tonluk bir karbon tasarrufu anlamına gelir. Verilerdeki en çarpıcı fark malzeme üretim ve nakliye (A1-A4) aşamasında görülmektedir. CLT'nin gömülü karbon değeri -992,37kg olarak hesaplanmıştır. Bu malzemenin üretilirken saldığınan daha fazla karbonu bünyesinde hapsettiği, biyogenik karbon anlamına gelir (Şekil 6a-b).



Şekil 6a. Senaryo 1 için toplam karbon yaşam döngüsü; **6b.** Senaryo 2 için toplam karbon yaşam döngüsü.

Tuğla duvar sistemi 4.6 Ton, beton blok duvar sistemi 5.4 Ton atmosfere kullanım ömrü başlamadan ciddi bir karbon yükü bırakmaktadır. Bunun yanında CLT kullanımı, projeye karbon açısından alacaklı başlanmasını sağlar. Ayrıca her iki senaryo için de CLT enerji verimliliği açısından önde yer almaktadır (**Şekil 7a**). Tuğla duvar ve CMU beton blok duvar toplam karbon yaşam döngüsü değerlendirmesinde birbirlerine yakın çizgidedir. CLT ithal edilen bir malzemedir. Bu durumda Avusturya menşeli bir üreticiden alınan CLT'nin İstanbul'a gelişi ciddi bir nakliye mesafesi sebebiyle karbon yükünü CLT aleyhine artırmaktadır. Bunun yanında tuğla ve CMU beton blok yerel malzemeler olduğu için alınıp kullanılması ve nakliyeden doğacak karbon yükünü minimize etmesi açısından daha avantajlıdır. **Şekil 7b'de** yer alan A4 nakliye analizinde CLT'nin ithalat mesafesi nedeniyle nakliye karbonu yerel alternatifleri tuğlaya göre yaklaşık 25 kat, CMU beton bloğa göre yaklaşık 20 kat fazladır.



Şekil 7a. İki senaryo için CLT, tuğla ve CMU beton blok duvarların toplam karbon yaşam döngüsü. **7b** A4-Nakliye analizi

Fakat bu durum yine de üretim aşamasındaki ahşap malzemenin sahip olduğu çok ciddi biyogenik karbon nedeniyle hala avantajlı durumdadır. Fakat yine de yerel üretim senaryosu ile CLT'nin nakliye yükü düşürülebilir. Sayısal analizler sonucunda CLT sisteminin ön görülen yaşam döngüsü boyunca bütünsel karbon salınımının geleneksel sistemlere göre yaklaşık %26 oranında daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Binanın bir bölümü değil de bütünü düşünüldüğünde bu farkın karbon yükü açısından oldukça verimli olacağı düşünülmelidir. Araştırma bulguları, malzeme seçiminin sadece operasyonel enerji verimliliğini değil, aynı zamanda gömülü karbon değerlerini de kökten etkilediğini ortaya koyarak iklim krizine karşı dirençli ve net sıfır karbon hedefleriyle uyumlu yapı sistemlerinin geliştirilmesinde Simülasyon ve LCA verileri ışığında, CLT'nin soğutma yüklerindeki termal kütle dezavantajına rağmen, ısıtma ağırlıklı yıllık toplam enerji tüketiminde sağladığı verim ve biyogenik karbon onu 60 yıllık kullanım ömrü boyunca çevre performansı açısından üstün bir yapı bileşeni haline getirmektedir.

KAYNAKLAR

1. Global Status Report for Buildings and Construction (2023). UNEP & Global Alliance for Buildings and Construction.
2. Ramesh, T., Prakash, R., & Shukla, K. K. (2010). Life cycle energy analysis of buildings: An overview. *Energy and Buildings*.
3. Hoxha, E., et al. (2020). Influence of embodied carbon on the life cycle assessment of low-energy buildings. *Energy and Buildings*, 218.
4. EPD International (2024). The International EPD® System: General Programme Instructions (GPI) 4.0.
5. ISO 14025:2006. (2006). Environmental labels and declarations — Type III environmental declarations — Principles and procedures.
6. EN 15804:2012+A2:2019. (2019). Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products.
7. De Wolf, C., et al. (2017). Measuring embodied carbon in buildings: A review and critique of current industry practice. *Energy and Buildings*.
8. Moncaster, A. M., & Symons, K. E. (2013). A method and tool for calculating potentially embodied carbon of existing UK buildings. *Journal of Cleaner Production*.
9. Ministries Jwr. 2050 carbon neutrality and green growth commission. 2050 carbon neutrality scenarios.
10. Cho, H. M., Park, J. H., Wi, S., Chang, S. J., Yun, G. Y., & Kim, S. (2019a). Energy retrofit analysis of cross-laminated timber residential buildings in Seoul, Korea: Insights from a case study of packages. *Energy and Buildings*, 199, 32–47.
11. Cho, H. M., Wi, S., Chang, S. J., & Kim, S. (2019b). Hygrothermal properties analysis of cross-laminated timber wall with internal and external insulation systems. *Journal of Cleaner Production*, 227, 12–21.
12. Andersen JH, Rasmussen NL, Ryberg MW. (2022). Comparative life cycle assessment of cross laminated timber building and concrete building with special focus on biogenic carbon. *Energy Build*, 254:111604.
13. Yu, J., Chang, W. S., Park, J., Wang, B. J., & Dong, Y. (2023). Comparing operational energy use between masonry and cross-laminated timber (CLT) buildings: Considering dynamic U-values of walls. *Energy and Buildings*, 285.
14. Liang, Y., Li, C., Liu, Z., Wang, X., Zeng, F., Yuan, X., & Pan, Y. (2022). Decarbonization potentials of the embodied energy use and operational process in buildings: A review from the life-cycle perspective. *Journal of Cleaner Production*, 363, 132–145.
15. Akkan Çavdar, A., & Lakot Alemdağ, E. (2025). Multi-criteria optimization of cross-laminated timber (CLT) wall systems for energy, carbon, and cost performance: A case study for Türkiye's climate zones. *Materials Science and Engineering*.
16. Szalay, Z., Szagri, D., Bihari, Á., Nagy, B., Kiss, B., Horváth, M., & Medgyasszay, P. (2022). Development of a life cycle net zero carbon compact house concept. *Energy Reports*, 8, 11234–11249.
17. Jayalath A, Navaratnam S, Ngo T, Mendis P, Hewson N, Aye L. (2020). Life cycle performance of Cross Laminated Timber mid-rise residential buildings in Australia. *Energy Build*, 223:110091.
18. H. Skogstad, L. Gullbrekken, K. Nore, (2011). Air leakages through cross lam- inated timber (CLT) constructions, 9th Nord. Symp. Build. Phys.

BEP-TR İLE ENERJİ PERFORMANS ANALİZİ: ERCİYES ÜNİVERSİTESİ MİMARLIK FAKÜLTESİ ÖRNEĞİ

Büşra Mete ^{1*}

Halime Kılıç ²

Melike Kıvanç ³

Selman Sevindik ⁴

^{1,2,3,4} Erciyes Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Kayseri, Türkiye

ÖZET

Yapı sektörü, küresel iklim krizi ve artan enerji talebi bağlamında toplam enerji tüketiminde önemli bir paya sahiptir. BEP-TR yazılımı, binaların enerji tüketimi ve sera gazı emisyonlarını analiz ederek Enerji Kimlik Belgesi (EKB) oluşturulmasını sağlamaktadır. Bu çalışma kapsamında, Erciyes Üniversitesi Mimarlık Fakültesi A Blok binasının enerji performansı BEP-TR yazılımı ile analiz edilerek; pasif (yalıtım) ve aktif (PV sistem) iyileştirme stratejilerinin etkileri değerlendirilmiştir. Mevcut durumda yalıtımsız olan ve Enerji Kimlik Belgesi (EKB) alamayan bina, Senaryo 1 (taş yünü ve XPS yalıtımı) ve Senaryo 2 (yalıtım + 100 kWp PV sistem) üzerinden simüle edilmiştir. Elde edilen bulgular, sadece yapı kabuğu iyileştirmesinin ısıtma yükünde %23 oranında tasarruf sağladığını ve binayı "C" enerji sınıfına yükselttiğini göstermiştir. Senaryo 2 kapsamında kurgulanan fotovoltaiik sistem ise birincil enerji ihtiyacının %35'ini karşılayarak binayı "B" sınıfı performans seviyesine taşımış ve operasyonel karbon emisyonlarında %49'luk bir azalma sağlamıştır. Sonuç olarak çalışma, mevcut eğitim yapılarının üreten tüketici (prosumer) statüsüne geçerek ulusal net sıfır emisyon hedefleri doğrultusunda yüksek bir karbonsuzlaşma potansiyeli taşıdığını kanıtlamaktadır.

Anahtar sözcükler: Bina enerji performansı, Enerji kimlik belgesi (EKB), BEP-TR, Yalıtım, Fotovoltaiik sistemler.

BEP-TR BASED ENERGY PERFORMANCE ANALYSIS: A CASE STUDY OF ERCIYES UNIVERSITY FACULTY OF ARCHITECTURE

ABSTRACT

The building sector accounts for a significant share of total energy consumption within the context of the global climate crisis and increasing energy demand. The BEP-TR software enables the preparation of Energy Performance Certificates (EPC) by analysing buildings' energy consumption and greenhouse gas emissions. This study analyses the energy performance of Erciyes University Faculty of Architecture Block A using the BEP-TR software and evaluates the impact of passive (insulation) and active (PV system) improvement strategies. The building, which is currently uninsulated and unable to obtain an Energy Performance Certificate (EPC), was simulated through Scenario 1 (rock wool and XPS insulation) and Scenario 2 (insulation + 100 kWp PV system). Findings indicate that shell improvement alone provides a 23% reduction in heating load and elevates the building to EPC class "C". The photovoltaic system integrated in Scenario 2 meets 35% of the primary energy demand, upgrading the building to class "B" performance and achieving a 49% reduction in operational carbon emissions. In conclusion, the study demonstrates that existing educational buildings hold significant decarbonization potential by transitioning to "prosumer" status, aligning with national net-zero emission targets.

Keywords: Building energy performance, Energy performance certificate (EPC), BEP-TR, Insulation, Photovoltaic systems.

^{1*} 1060110653@erciyes.edu.tr, ⁴ selmansevindik@erciyes.edu.tr

1. GİRİŞ

Yapı sektörü, küresel ölçekte enerji tüketimi ve sera gazı salınımlarında önemli bir paya sahiptir. Yapıların inşaat, kullanım ve yıkım süreçlerini kapsayan tüm yaşam döngüsü boyunca yüksek miktarda enerji tüketmesi, enerji verimliliğini sürdürülebilir mimarlığın temel unsurlarından biri haline getirmiştir [1]. Bu bağlamda, yapıların enerji performansının artırılmasına yönelik tasarım kararları ve iyileştirme stratejileri, çevresel etkilerin azaltılmasında kritik bir rol oynamaktadır. Dünya genelinde enerji verimliliğini artırmaya yönelik yasal ve teknik düzenlemeler giderek yaygınlaşmaktadır. Özellikle Avrupa Birliği tarafından kabul edilen Binaların Enerji Performansı Direktifi (EPBD), binalarda enerji etkinliğini sağlamaya yönelik en kapsamlı düzenlemelerden biri olarak öne çıkmaktadır. Avrupa Parlamentosu'nun 2002'de yürürlüğe koyduğu ve 2024'de güncellediği Binaların Enerji Performansı Direktifi (EPBD), bugün Avrupa Yeşil Mutabakatının 2050 yılına yönelik karbon nötr vizyonunun temel taşlarından biridir. Yönetmelik, yeni binalar için performansa dayalı verimlilik standartları getirirken; mevcut yapıların da iyileştirilerek verimliliğini artıracak yöntemlerle yenilenebilmesini hedeflemektedir.[8]. Söz konusu düzenlemeler, enerji performansının yalnızca yeni yapılarla sınırlı kalmayıp mevcut yapı stoğunu da kapsaması gerektiğini vurgulamaktadır.

Türkiye'de de enerji; ekonomik kalkınma, çevresel sürdürülebilirlik ve enerji arz güvenliği açısından stratejik bir öneme sahiptir. Fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılması ve yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaştırılması, ulusal enerji politikalarının temel hedefleri arasındadır [2]. Bu doğrultuda, 2008 yılında Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği yürürlüğe girmiş; yönetmeliğin uygulanmasını desteklemek amacıyla 2009 yılında BEP-TR yazılımı geliştirilerek Enerji Kimlik Belgesi (EKB) sistemi hayata geçirilmiştir [3]. EKB, yapıların enerji tüketim düzeylerini, enerji sınıflarını ve mekanik sistem performanslarını ortaya koyan temel bir değerlendirme aracıdır. Enerji verimliliğinin artırılmasında ilk adım, yapıların mevcut durumlarının bütüncül bir şekilde analiz edilmesidir. Özellikle yalıtımın yetersiz olduğu eski yapılarda, hatalı tasarım kararları yüksek enerji kayıplarına yol açmaktadır [1]. BEP-TR yazılımı aracılığıyla yapılan hesaplamalar sonucunda, binaların birim alan başına düşen yıllık enerji tüketimi ve CO₂ salımı belirlenmekte; elde edilen veriler referans bina ile karşılaştırılarak yapıların enerji sınıfı A ile G arasında tanımlanmaktadır. Mevzuata göre yeni yapılacak binaların en az C enerji sınıfında olması zorunludur [4]. Mevzuatımızda 2022 yılında yapılan değişikliklerle Neredeyse Sıfır Enerjili Binalar (nSEB) konseptine dair tanımlamalar eklenmiş ve büyük ölçekli binalar için yenilenebilir enerji kullanımı zorunlu hale getirilmiştir [5,6].

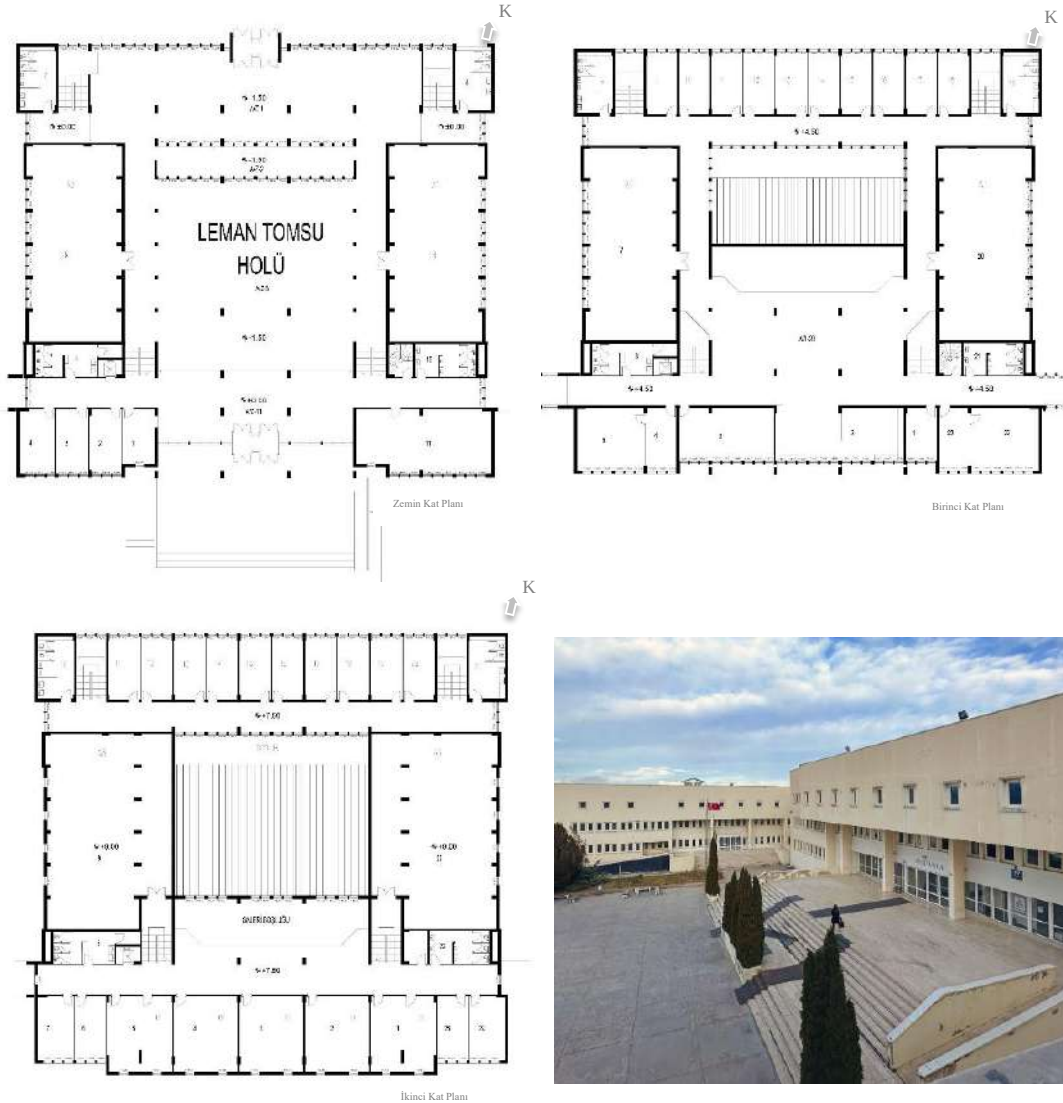
Bu çalışmanın temel amacı, mevcut bir kamu binası örneği üzerinden enerji verimliliği potansiyelini ve iyileştirme stratejilerinin etkilerini ortaya koymaktır. Bu amaç doğrultusunda, Erciyes Üniversitesi Mimarlık Fakültesi A-Blok binasının mevcut enerji performansı BEP-TR yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Yapılan analizler neticesinde; yalıtım iyileştirmeleri ve fotovoltaik (PV) sistem entegrasyonu gibi senaryolar geliştirilmiş; bu müdahalelerin enerji tüketimi, sera gazı emisyonları ve enerji sınıfı üzerindeki etkileri detaylı olarak değerlendirilmiştir.

2.YÖNTEM

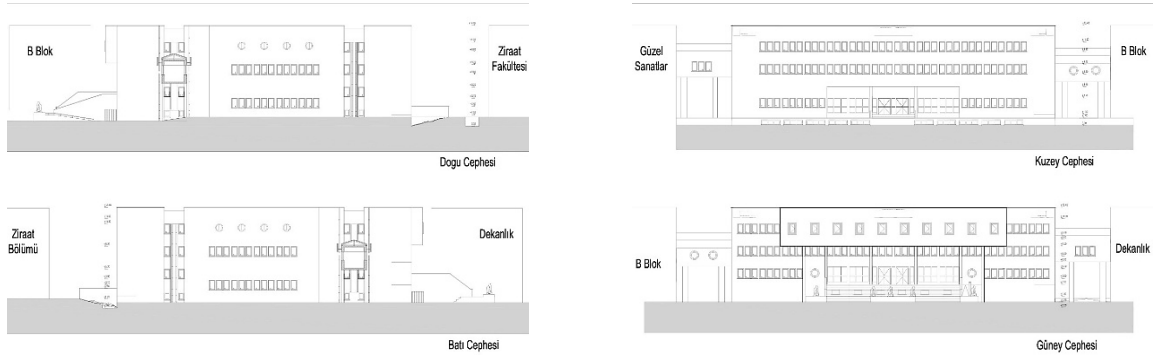
Bu çalışma, mevcut bir eğitim yapısının enerji performansının ulusal yazılım aracılığıyla analiz edilmesi ve iyileştirme senaryolarının değerlendirilmesi üzerine kurgulanmıştır.

2.1. İncelenen Bina: Erciyes Üniversitesi Mimarlık Fakültesi A Blok

Çalışma kapsamında, Kayseri ilinde bulunan Erciyes Üniversitesi Mimarlık Fakültesi yerleşkesindeki A Blok ele alınmıştır (**Şekil 1**). TS 825 standartlarına göre 4. iklim bölgesinde yer alan yapı, betonarme iskelet sistemine sahip olup zemin üzerine iki kattan oluşmaktadır. Binanın toplam inşaat alanı 5.478 m², iklimlendirilen alanı ise 4.954 m² olarak belirlenmiştir. Mevcut durumda yapıda herhangi bir dış kabuk yalıtımı bulunmamakta, pencereler ise 80 cm × 130 cm ölçülerinde 252 adet standart çift camlı PVC doğramalardan oluşmaktadır. Pencere sistemleri PVC doğramalı, standart çift camlı olup toplam pencere alanı yaklaşık 262 m²'dir. Binada aktif bir soğutma sistemi ve yenilenebilir enerji kullanımı bulunmamaktadır. BEP TR sistemine göre Erciyes Üniversitesi Mimarlık Fakültesi yerleşkesi A Blok D sınıfında olduğu belirlenmiştir.



Şekil 1. Erciyes Üniversitesi Mimarlık Fakültesi A blok plan şemaları ve giriş cephesi dış mekân fotoğrafı.

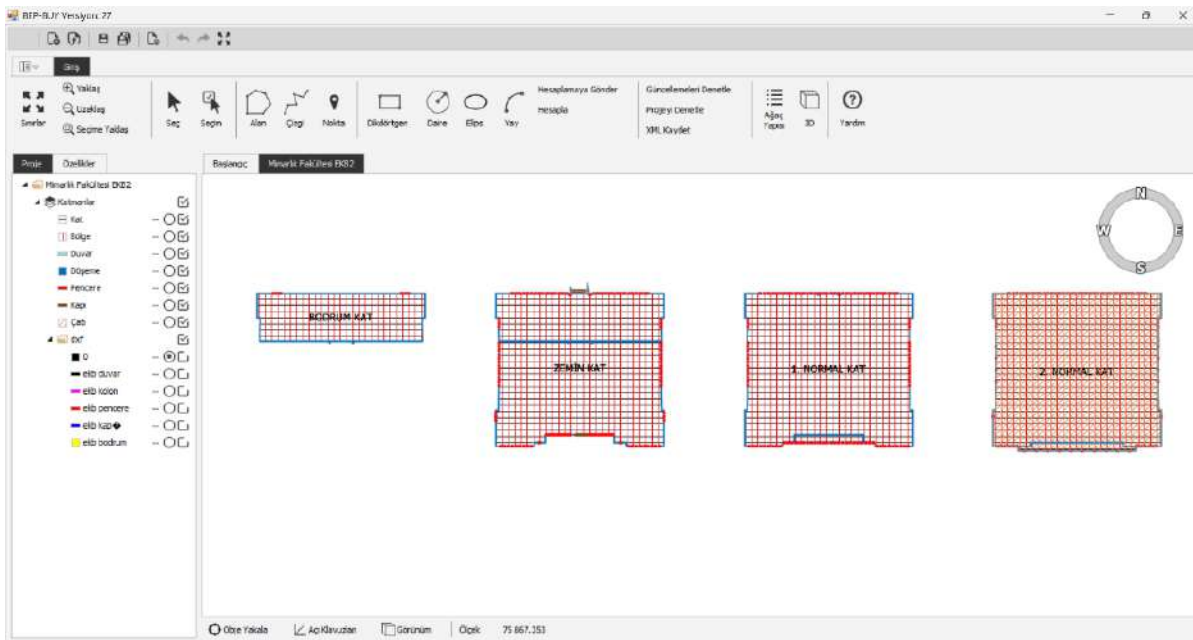


Şekil 2. Erciyes Üniversitesi Mimarlık Fakültesi A blok cephesi görünüşleri.

Erciyes Üniversitesi Mimarlık Fakültesi mevcut yapı kabuğunda yer alan saydam bileşenler (Şekil 2). Çift camlı yalıtım sistemlerinden oluşur. Cam ünitesi olarak 4+9+4 mm hava boşluklu ve low-e kaplamalı yalıtım camı kombinasyonu mevcuttur. Bu sistemin ısı geçirgenlik katsayısı u değeri 1.9 w/m²k ve güneş enerjisi toplam geçirgenlik katsayısı g değeri 0.70 olarak analizlere dahil edilmiştir. Saydam alanlarda kullanılan bu teknik parametreler binanın mevcut enerji performans seviyesinin belirlenmesinde ve önerilen iyileştirme senaryolarının temel verimlilik sınırlarının çizilmesinde referans alınmıştır.

2.2. BEP-TR Modelleme Süreci ve Parametreler

Binanın enerji performansı, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından onaylı BEP-TR yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Modelde zemin kat, birinci kat ve ikinci kat ayrı zonlar olarak tanımlanmış; duvar, pencere ve döşeme bileşenleri yapı kabuğu parametreleri ile sisteme işlenmiştir. Dış cephe duvarlarına uygulanan ısı yalıtımı tanımlanarak, yalıtımın bina enerji performansına etkisi senaryo bazlı olarak analiz edilmiştir. (Şekil 3).



Şekil 3. Erciyes Üniversitesi Mimarlık Fakültesi A blok BEP-TR programı modeli

Modelleme sürecinde, binanın mimari projeleri referans alınarak yapı kabuğu, pencere alanları ve mekanik sistem verileri sisteme girilmiştir. Mevcut durum analizi için kullanılan temel parametreler **Çizelge 1**'de özetlenmiştir:

Çizelge 1: Erciyes Üniversitesi Mimarlık Fakültesi A blok özellikleri

Parametre	Değer
Bina türü	Eğitim yapısı (Üniversite)
Bina kullanım amacı	Mimarlık fakültesi
İncelenen bölüm	A blok
Kat sayısı	Zemin + 1.kat + 2.kat
İklim bölgesi	TS 825 – 4. bölge (Kayseri)
Isıtma sistemi	Merkezi ısıtma
Soğutma sistemi	Mevcut değil
Taşıyıcı sistem	Betonarme iskelet sistem
Yapı Kabuğu Durumu	Yalıtımsız tuğla ve betonarme (U-değeri $\approx 1.20-1.40$ W/m ² K)

2.3. İyileştirme Senaryolarının Oluşturulması

Mevcut binanın enerji sınıfının C seviyesinin altında kalması ve Enerji Kimlik Belgesi (EKB) alamaması nedeniyle iki temel iyileştirme senaryosu geliştirilmiştir (**Çizelge 2**):

- **Senaryo 1 (Isı Yalıtımı):** Yapı kabuğundaki yüksek ısı kayıplarını minimize etmek amacıyla; dış cephede 10 cm, çatıda ise 16 cm kalınlığında taş yünü ($\lambda = 0,035$ W/mK) kullanımı öngörülmüştür. Zemin yalıtımında ise 10 cm kalınlığında ekstrüde polistiren köpük (XPS: $\lambda = 0,030$ W/mK) tercih edilmiştir. Taş yünü seçimi; yangın dayanımı, ısıl iletkenlik performansı ve maliyet etkinliği kriterlerine dayanmaktadır. XPS kullanımı ise, zemindeki mekanik yükleri karşılayabilecek yüksek basma dayanımına ve nem direncine sahip olması nedeniyle tercih edilmiştir.
- **Senaryo 2 (Fotovoltaik Sistem Entegrasyonu):** Yalıtım uygulamasına ek olarak, binanın elektrik ihtiyacının yenilenebilir kaynaklardan karşılanması hedeflenmiştir. Yapının çatısına entegre 100 kWp kurulu güce sahip monokristal silikon PV panellerin yerleştirilmesi planlanmıştır. Sistem, 500 m² panel alanı ve %30 eğimle güney yönlü olacak şekilde kurgulanmıştır. Literatürde cepheye entegre fotovoltaik sistem uygulamaları bulunmakla birlikte, bu çalışma kapsamında yapının mimari cephe bütünlüğünün korunması amacıyla fotovoltaik (PV) sistemlerin çatıya entegre edilmesi tercih edilmiştir.

Çizelge 2. Erciyes Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Analiz Tablosu

Parametre	Mevcut durum	Senaryo 1 (Isı Yalıtımı)	Senaryo 2 (Isı Yalıtımı + PV)
Duvar yapısı	Betonarme + Tuğla (Yalıtımsız)	Betonarme + Tuğla + Yalıtım	Betonarme + Tuğla + Yalıtım
Duvar ısı yalıtımı	Yok	10 cm taş yünü ($\lambda = 0,035$ W/mK)	10 cm taş yünü ($\lambda = 0,035$ W/mK)
Duvar U-Değeri (W/m ² K)	1,18	0,27	0,27
Zemin ısı yalıtımı	Yok	10 cm XPS ($\lambda = 0.030$ W/mK)	10 cm XPS ($\lambda = 0.030$ W/mK)
Zemin U-Değeri (W/m ² K)	1,20	0,24	0,24
Çatı ısı yalıtımı	Yok	16 cm taş yünü ($\lambda = 0,035$ W/mK)	16 cm taş yünü ($\lambda = 0,035$ W/mK)
Çatı U-Değeri (W/m ² K)	3,71	0,21	0,21
Yenilenebilir enerji	–	–	Çatıya PV sistemi entegrasyonu
Birincil enerji ihtiyacı	Yüksek	Azaltılmış	Daha da azaltılmış
BEP-TR enerji sınıfı	D	C	B
TS 825 uygunluğu	Uygun değil	Uygun	Uygun

Erciyes Üniversitesi Mimarlık Fakültesi A Blok binası için geliştirilen iyileştirme stratejileri kapsamında; dış cephede 10 cm, çatıda ise 16 cm kalınlığında taş yünü ($\lambda = 0.035$ W/mK) kullanımı öngörülmüştür. Zemin yalıtımında ise mekanik yükleri karşılama kapasitesi ve nem direnci göz önünde bulundurularak 10 cm kalınlığında ekstrüde polistiren köpük (XPS: $\lambda = 0.030$ W/mK) tercih edilmiştir. Önerilen bu yalıtım kalınlıkları ve düşük ısı iletkenlik katsayısına sahip bileşenlerin entegrasyonu sonucunda; dış duvar, zemin ve çatı için hesaplanan U-değerlerinin (0,27 / 0,24 / 0,21 W/m²K), TS 825 standardında 4. Bölge (Kayseri) için tanımlanan ısı geçirgenlik sınır değerlerini tam olarak karşıladığı ve bu limitlerin altına indiği tespit edilmiştir. Bu doğrultuda, pasif iyileştirme senaryosunun ulusal enerji verimliliği mevzuatına ve ısı yalıtım standartlarına tam uyum sağladığı bilimsel olarak doğrulanmıştır.

Yapı kabuğunda sağlanan bu ısı iyileştirme, binanın enerji performansını yasal sınırların üzerine taşısa da çalışma kapsamında müdahaleler yalnızca pasif yöntemlerle sınırlı tutulmamıştır. Enerji performansını daha ileri bir aşamaya taşımak ve bina enerji gereksiniminin bir bölümünü yerinde üretilen yenilenebilir kaynaklardan karşılamak amacıyla Senaryo 2 kapsamında fotovoltaik (PV) sistem entegrasyonu öngörülmüştür. Bu aktif sistem desteği sayesinde binanın enerji sınıfının 'B' seviyesine yükseltilmesi ve operasyonel süreçte yüksek enerji verimliliğine ulaşılması hedeflenmiştir.

3. BULGULAR

Bu bölümde, Erciyes Üniversitesi Mimarlık Fakültesi A Blok binasının enerji performansı; mevcut yapı stoğunu temsil eden referans durum, pasif iyileştirme stratejisi (Senaryo 1) ve aktif yenilenebilir enerji entegrasyonu (Senaryo 2) üzerinden karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Elde edilen veriler, Türkiye’deki kamu binalarının enerji verimliliği potansiyelini ve karbon nötr hedeflerine ulaşma kapasitesini ortaya koymaktadır.

Yapılan BEP-TR analizleri sonucunda binanın yıllık toplam enerji tüketimi; mevcut yalıtımsız durumda 742.955 kWh olarak hesaplanmıştır (**Çizelge 3**). Kabuk iyileştirmesinin yapıldığı Senaryo 1’de bu değer 656.352 kWh’ye, PV sistem entegrasyonu ile ise 428.279 kWh seviyesine gerilemiştir. Isıtma yükü özelinde incelendiğinde; yapı kabuğuna uygulanan yalıtım sayesinde duvar, zemin ve çatı için mevcut durumda 1,18 W/m²K, 1,20 W/m²K ve 3,71 W/m²K olan U-değerleri, sırasıyla 0,27 W/m²K, 0,24 W/m²K ve 0,21 W/m²K seviyelerine düşürülerek TS 825 4. Bölge sınır değerlerinin altına indirilmiştir. Bu iyileştirme, ısıtma enerjisi tüketimini 413.891 kWh seviyesinden 319.447 kWh seviyesine çekerek yaklaşık %23’lük bir tasarruf sağlamıştır. Isıtma yükündeki bu düşüş, Kayseri gibi soğuk iklim bölgesindeki kentlerde yapı kabuğunun termal performansının toplam enerji bütçesi üzerindeki belirleyici rolünü kanıtlamaktadır. Ancak toplam tüketimin hala kayda değer seviyelerde kalması, sadece opak bileşenlerdeki yalıtımın yeterli olmadığını; pencerelerin termal niteliği, sızdırmazlık ve verimsiz mekanik sistemlerin de bütüncül bir rehabilitasyon sürecine dahil edilmesi gerektiğini göstermektedir.

Çizelge 3. Senaryolara Göre Yıllık Enerji Tüketimi Karşılaştırması

Enerji Türü	Mevcut Durum	Senaryo 1 Yalıtım	Senaryo 2 Yalıtım + PV	Değişim (S0→S2)
Toplam Birincil Enerji (kWh/yıl)	742.955	656.352	428.279	%42 Azaltım
Birim Alan Enerji (kWh/m ² .yıl)	149,97	132,49	86,45	%42 Azaltım
Isıtma (kWh/yıl)	413.891	319.447	319.447	%23 Azaltım
Havalandırma (kWh/yıl)	15.131	15.131	15.131	Sabit
Aydınlatma (kWh/yıl)	27.364	27.426	27.426	Sabit
Fotovoltaik Üretim (kWh/yıl)	0	0	228.072	%35 Yenilenebilir Enerji Kullanım Oranı

Senaryo 2 kapsamında çatıda kurgulanan 100 kWp kapasiteli fotovoltaik sistem, binanın birincil enerji ihtiyacının %35’ini karşılayabilme kapasitesine sahiptir (**Şekil 4**). 500 m² panel alanına ve %30 eğim açısına sahip olan PV paneller, yerinde enerji üretiminin maksimize edilmesini sağlamıştır. Mevzuatta yer alan %5’lik yenilenebilir enerji zorunluluğu ile kıyaslandığında ulaşılan

%35'lik oran, mevcut kampüs yapılarının pasif birer tüketici olmaktan çıkıp üreten tüketici (prosumer) statüsüne geçebileceğini kanıtlamaktadır. Bu durum, büyük ölçekli fakülte binalarının geniş ve gölgeleme etkisi az olan çatı alanlarının, kampüs ölçeğinde bir mikro-şebeke (microgrid) altyapısı oluşturmak için stratejik birer enerji sahası olarak görülmesi gerektiğini işaret etmektedir.



Şekil 4. Mevcut durum (sol) ve Senaryo 1 (orta) ve Senaryo 2 (sağ) analizlerine ait yenilenebilir enerji kullanım oranları

Çevresel etki açısından incelendiğinde; mevcut durum ve sadece yalıtımın uygulandığı Senaryo 1'de sırasıyla yıllık $36,19 \text{ kgCO}_2/\text{m}^2$ ve $32,20 \text{ kgCO}_2/\text{m}^2$ olan sera gazı emisyon değeri, PV sistem kullanımıyla beraber $18,49 \text{ kgCO}_2/\text{m}^2$ seviyesine inmiştir (**Şekil 5**). Bu değişim, operasyonel karbon emisyonlarında %49'luk bir azalma anlamına gelmektedir. Analiz sonuçları, enerji verimliliği (yalıtım) ve enerji kaynağı dönüşümü (PV) arasındaki farkı net bir şekilde ortaya koymaktadır. Yalıtım uygulaması enerji talebini düşürse de emisyon değerlerindeki asıl kırılma, fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılmasıyla yaşanmıştır. Bu bulgu, ulusal karbonsuzlaşma hedefleri doğrultusunda verimlilik önceliği prensibi ile yenilenebilir enerji kullanımının eş zamanlı yürütülmesinin zorunluluğunu vurgulamaktadır.



Şekil 5. Mevcut durum (sol) ve Senaryo 1 (orta) ve Senaryo 2 (sağ) analizlerine ait sera gazı emisyonları

Mevcut yapı; yalıtımsızlığı ve yüksek enerji yoğunluğu sebebiyle BEP-TR sisteminde herhangi bir sınıfa dahil olamazken ve Enerji Kimlik Belgesi (EKB) alamazken; Senaryo 1 ile "C", Senaryo 2 ile "B" sınıfına yükselmiştir (**Şekil 6**). Mevcut yapının başlangıçta EKB dahi alamıyor oluşu, yapı stoğumuzdaki 2000'li yılların başında yapılan kamu yapılarının enerji kimliklerinin yasal sınırların çok uzağında olabileceğini göstermektedir. Senaryo 2 ile ulaşılan "B" sınıfı performansı, binanın

sadece mevcut yönetmelikleri sağlamasını değil, aynı zamanda 2023 sonrası zorunlu hale gelen nSEB (Neredeyse Sıfır Enerjili Binalar) kriterlerine tam uyum sağlamasını ve binanın ekonomik ömrü boyunca enerji maliyetlerini minimize etmesini garanti altına almaktadır.



Şekil 6. Mevcut durum (sol) ve Senaryo 1 (orta) ve Senaryo 2 (sağ) analizlerine ait enerji performans sertifikaları

5. SONUÇ

Bu çalışma, mevcut kamu binalarının enerji performans düzeyini ulusal mevzuat çerçevesinde değerlendirmek ve iyileştirme potansiyellerini somutlaştırmak amacıyla Erciyes Üniversitesi Mimarlık Fakültesi A Blok binası üzerinden gerçekleştirilmiştir. BEP-TR yazılımı kullanılarak yürütülen analizlerde, yapının mevcut mimari ve mekanik özellikleri referans alınmış; pasif (yalıtım) ve aktif (PV sistem) müdahale senaryolarının binanın birincil enerji tüketimi, karbon salımı ve enerji sınıfı üzerindeki etkileri nicel verilerle ortaya konmuştur.

Elde edilen bulgular, 2000'li yılların başında inşa edilen kamu yapılarının güncel enerji verimliliği standartlarının ve 2053 Net Sıfır Emisyon vizyonunun oldukça gerisinde olduğunu kanıtlamaktadır. Mevcut durumda yıllık 742.955 kWh olan toplam birincil enerji tüketimi, binanın yapı kabuğundaki yüksek ısı kayıplar nedeniyle herhangi bir enerji sınıfına dahil olamamasına ve Enerji Kimlik Belgesi (EKB) alamamasına yol açmaktadır. Ancak, dış cephede 10 cm, çatıda 16 cm taş yünü ve zeminde 10 cm XPS uygulamalarını içeren Senaryo 1 kapsamında; ısıtma yükünde %23'lük bir tasarruf sağlanmıştır. Bu iyileştirme ile yapı bileşenlerinin U-değerleri, TS 825 4. Bölge sınır değerlerinin altına indirilerek bina "C" enerji sınıfına yükseltilmiştir.

Çalışmanın bir diğer sonucu, yenilenebilir enerji entegrasyonunun enerji bağımsızlığı üzerindeki etkisidir. Senaryo 2 kapsamında kurgulanan 100 kWp kapasiteli fotovoltaik sistem, binanın yıllık enerji ihtiyacının %35'ini tek başına karşılayarak birincil enerji tüketimini 428.279 kWh seviyesine düşürmüştür. Bu durum, üniversite yerleşkelerindeki yapı stokunun sahip olduğu geniş ve gölgeleme etkisi az olan çatı alanlarının, Neredeyse Sıfır Enerjili Bina (nSEB) dönüşümü için stratejik birer enerji sahası olduğunu doğrulamaktadır. Çevresel sürdürülebilirlik açısından bakıldığında, PV sistem desteği ile sera gazı emisyonları yıllık 36,19 kgCO₂/m² değerinden 18,49 kgCO₂/m² seviyesine inerek operasyonel karbon ayak izinde %49 oranında radikal bir azalma sağlamıştır.

Sonuç olarak, Erciyes Üniversitesi örneği üzerinden geliştirilen bu metodoloji, kamu yapılarının enerji etkin rehabilitasyonu için somut bir yol haritası sunmaktadır. Uygulanan senaryolarla binanın "B" sınıfı performans seviyesine taşınması, mevcut yapı stokunun doğru mühendislik çözümleriyle modernize edilebileceğini kanıtlamaktadır. Çalışma sınırlı bir örneklem sunsa da her yapının özgün parametrelerine göre özelleştirilebilir bir model kurgulamaktadır. Özellikle saydam bileşenlerde yapılacak iyileştirmelerin kritik etkisi, güncel optimizasyon teknikleri ve geniş malzeme seçenekleri ile desteklenmelidir. Bu süreçte teknik verimliliğin yanı sıra maliyet parametresinin de analize dahil edilmesi büyük önem taşımaktadır. Gelecek çalışmalarda, bu teknik müdahalelerin Yaşam Döngüsü Analizi (LCA) ve ekonomik geri dönüş süreleri ile desteklenmesi, karar vericiler için daha bütüncül ve stratejik bir veri seti oluşturacaktır.

KAYNAKLAR

1. Türkmenoğlu, H., & Abusamhadana, A. (2018). Enerji verimliliği kapsamında yapılarda ısı performansın değerlendirilmesi. *Ulusal Yapı Fiziği Sempozyumu Bildirileri* (ss. 22–29).
2. Satman, A. (2006). Türkiye’de enerji politikaları ve sürdürülebilirlik. *Enerji Dergisi*, 34(1), 15–27.
3. Gökhan, D., & Sadık, O. (2014). Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği ve BEP-TR programı üzerine değerlendirmeler. *Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Yayınları*.
- Türk Standartları Enstitüsü. (2013). *TS 825: Binalarda ısı yalıtım kuralları*. TSE.
4. Zengin, B. (2025, Kasım–Aralık). *XPS yalıtım malzemesi teknik ve uygulama değerlendirmesi*. Şantiye Dergisi. Erişim tarihi: (01/01/2026)
5. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2022). *Binalarda enerji performansı yönetmeliği*. Erişim tarihi: 15/01/2026 <https://www.mevzuat.gov.tr>
6. Bayrak, Y., & Aktürk Sezer, H. R. (2008). Konut aydınlatmasında elektrik tasarrufu ve toplam Türkiye tüketimine etkisi. *Elektrik Mühendisleri Odası Yayınları*. Ankara, Türkiye.
7. Karaca, Ü. B., & Uçar, S. (2018). Konut çatı ve cephelerinde farklı fotovoltaik sistem uygulamalarının değerlendirilmesi. *Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*.
8. Yıldız, C. (2024). Binalarda enerji verimliliğinde son gelişmeler: türkiye örneği. Gazi Üniversitesi Gazi University Fen Bilimleri Dergisi Journal Of Science Part C: Tasarım ve Teknoloji.

YAPI FİZİĞİ EĞİTİMİNDE YAPAY ZEKÂ İLE GÖRSEL-ŞEMA ÜRETİMİ

Ayşe Melike Zenbil^{1*}

Rabia Emir²

^{1,2} İstanbul Üniversitesi Mimarlık Fakültesi
Süleymaniye, Fatih, İstanbul, 34116

ÖZET

Yapı fiziği; mimarlık ve inşaat mühendisliği eğitiminde ısı ve nem kontrolü, havalandırma, iç hava kalitesi, aydınlatma ve akustik gibi teknik konuları kapsayan bir çalışma alanıdır. Termal, akustik ve görsel konfor gibi başlıklar bu eğitimlerin temel bileşenleri arasında yer almaktadır. Ancak ısı köprüleri, buhar difüzyonu ve ışık yansımaları gibi süreç temelli kavramların öğrenciler tarafından anlaşılması ve zihinde canlandırılması güçtür. Bu durum, görsel anlatım araçlarının eğitimdeki önemini artırmaktadır. Kavramsal çizimler, şemalar, diyagramlar ve basit simülasyonlar öğrenme verimliliğini olumlu yönde etkilemektedir. Son yıllarda gelişen yapay zekâ tabanlı görüntü üretim araçları, bu tür görsel anlatımların hızlı ve çeşitli biçimlerde üretilmesine olanak tanımakta ve mimarlık eğitiminde yeni sunum teknikleri sunmaktadır. Bu çalışmanın amacı, yapı fiziği eğitimi için öğretici görsellerin yapay zekâ ile üretilebilirliğini incelemek ve bu görsellerin öğrenme ve tasarlama süreçlerine dâhil edilmesine yönelik bir yöntem önermektir. Çalışma kapsamında belirlenen konu başlıkları için metin tabanlı istem stratejileri geliştirilmiş, farklı yapay zekâ araçlarıyla üretilen görseller şematik sadelik ve kavramsal netlik gibi ölçütlere göre değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, yapay zekâ tabanlı görsel üretimin yapı fiziği eğitiminde yenilikçi bir öğretim aracı olabileceğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Yapı Fiziği, Yapay Zekâ, Görsel Üretim, Mimarlık Eğitimi

VISUAL-SCHEMA PRODUCTION WITH ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN BUILDING PHYSICS EDUCATION

ABSTRACT

Building physics is a field of study in architecture and civil engineering education that includes technical topics such as heat and moisture control, ventilation, indoor air quality, lighting, and acoustics. Thermal, acoustic, and visual comfort constitute core components of these educational frameworks. However, process-based concepts such as thermal bridges, vapor diffusion, and light reflections are often difficult for students to understand and visualize. This challenge increases the importance of visual representation tools in education. Conceptual drawings, schemas, diagrams, and basic simulations have been shown to positively support learning efficiency. Recent advances in artificial intelligence-based image generation tools enable the rapid and diverse production of such visual representations, offering new presentation techniques for architectural education. The aim of this study is to investigate the feasibility of producing instructional visuals for building physics education using artificial intelligence and to propose a method for integrating these visuals into learning and design processes. For selected topic areas, text-based prompt design strategies were developed, and visuals generated by different AI tools were evaluated according to criteria such as schematic simplicity and conceptual clarity. The findings indicate that AI-based visual production has the potential to serve as an innovative instructional tool in building physics education.

Keywords: Building Physics, Artificial Intelligence, Visual Production, Architectural Education

^{1*} melikezenbil@hotmail.com

1. GİRİŞ

Mimarlık eğitimi, mekânsal tasarım kararlarının yanı sıra, çevresel ve fiziksel performans kriterlerinin de ele alındığı bütüncül bir öğrenme anlayışını benimser. Bu bağlamda yapı fiziği, ısı, nem, akustik, aydınlatma gibi konular aracılığıyla kullanıcı konforu, sürdürülebilirlik gibi alanların değerlendirilmesini sağlar. Mimarlık eğitimde yapı fiziği dersleri, öğrencileri tasarım sürecinde analitik ve teknik yönden destekleyen bir alan olarak karşımıza çıkar.

Yapı fiziği dersleri kapsamında ele alınan birçok kavram, soyut nitelikli ve süreç odaklıdır. Hava hareketleri, mekânın akustik davranışı, ısı transferi gibi süreçlerin doğası gereği yalnızca metinsel anlatımla kavranması güçtür. Bu durum, yapı fiziği dersinde öğrenilen bilgilerin tasarım sürecine dahil edilmesini olumsuz yönde etkiler. Bu noktada kavramsal şema, diyagram gibi görsel temsiller bahsedilen süreçlerin öğrenci zihninde efektif bir biçimde şekillenmesini sağlayarak bağlantı kurmayı kolaylaştırır [1].

Yapay zekanın görüntü üretim araçlarının her geçen gün gelişmesiyle, yapı fiziği eğitiminde kullanılacak materyallerin oluşturulmasında yeni fırsatlar doğmaktadır. Yapay zekâ destekli görseller, metin temelli istemler aracılığıyla hızlı bir şekilde oluşturulabilmekte ve fiziksel bir süreci şematik düzeyde betimleyebilmektedir. Kavramsal öğrenme sürecinde öğrenciler için basit ve açıklayıcı görsellerin üretimini kolaylaştırmakla birlikte, bu görsellerin eğitim amaçlı kullanılabilme potansiyelinin yüksek olduğu belirtilmektedir [2].

2. YÖNTEM

Bu çalışma, yapı fiziği eğitiminde kullanılması önerilen yapay zekâ tabanlı görsellerin, çeşitli kriterlere uygunluk açısından değerlendirilmesine yönelik keşifsel nitelikte bir ön çalışma olarak kurgulanmıştır. Çalışma kapsamında, yapı fiziği eğitiminde ele alınan konu başlıklarından 25 adedi seçilmiş, her bir konu başlığı için üç farklı yapay zekanın görüntü üretim aracı kullanılarak öğretici olması hedeflenen görseller üretilmiştir.

Üretilen görsellerin değerlendirilmesi için, mimarlık ve ilişkili disiplinlerde öğrenim gören lisans/yüksek lisans öğrencileri ve öğretim elemanlarının görüşlerini toplamaya yönelik çevrimiçi bir değerlendirme formu hazırlanmıştır. Form kapsamında bahsedilen konu başlıkları hakkındaki bilgi düzeylerinin ve üretilen görsellerin kavramsal netlik, ders içi kullanım uygunluğu gibi kriterlere göre oylanması istenmiştir.

Elde edilen geri bildirimler, sayısal bir ölçüm iddiası taşımaksızın, farklı görsel temsil biçimlerinin nasıl algılandığına dair eğilimleri gözlemlemek amacıyla nitel olarak değerlendirilmiştir. Bu süreçte, belirli görsel özelliklerin öne çıkıp çıkmadığı, araçlar arasında algılanan farklılıkların oluşup oluşmadığı ve bazı temsil biçimlerinin kavramsal olarak daha anlaşılır bulunup bulunmadığı incelenmiştir.

Değerlendirme sürecinde, elde edilen geri bildirimler sonucunda farklı görsel temsil biçimlerinin algılanmasına ilişkin eğilimler analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular sonucunda öne çıkan görsel özelliklerin ve araçlar arasında algılanan farklılıkların varlığı ile bazı temsil biçimlerinin kavramsal olarak daha anlaşılır bulunup bulunmadığı incelenmiştir.

3. YAPI FİZİĞİ EĞİTİMİNDE GÖRSELLEŞTİRMENİN ROLÜ

Yapı fiziği, ısı, nem, ses ve ışık gibi fiziksel olguların mekânsal ve zamansal etkileşimleri üzerinden okunmasını gerektiren, soyut kavramların yoğun olduğu bir bilgi alanıdır [3]. Bu sebeple yapı fiziği eğitiminde fiziksel olgular arasındaki bağlantıların anlaşılmasını sağlayan görsel üretim metotları, sadece destekleyici araç olmayıp aynı zamanda öğrenim aşamalarının önemli bir parçası olarak değerlendirilmektedir [4]. Özellikle mimarlık eğitiminde öğrenim görenlerin mekânsal okuma, neden sonuç bağlantısı oluşturma ve sistemlerin birbiriyle ilişkisi gibi durumları algılama kabiliyetleri önemli ölçüde görsel temsiller sayesinde gelişmektedir [5].

Deneyimsel Öğrenme Teorisi, öğrenmeyi “deneyimin yeni bilgiye dönüştürülmesi” süreci olarak tanımlar. Kolb’a göre bilgi, deneyimin kavranması ve dönüştürülmesinin birleşimiyle üretilir. Bu değerlendirme, öğrenmenin düz çizgi halinde olmayan, döngüsel bir işleyiş olduğunu ek olarak da kişinin deneyimle devamlı bağlantı içinde olduğunu belirtir. Öğrenme döngüsü, Kolb’un anlatımında dört aşamadan oluşmaktadır: Somut Deneyim (SD), Yansıtıcı Gözlem (YG), Soyut Kavramsallaştırma (SK) ve Aktif Deneyimsel Öğrenme (AD) [6].

Bahsedilen döngü, öncelikle kişinin bir deneyim yaşamasıyla (Somut Deneyim) ortaya çıkar; sonrasında yaşadığı deneyim kapsamında düşünmesi ve gözlemlemesi (Yansıtıcı Gözlem) ikinci aşama olur. Soyut Kavramsallaştırma yani üçüncü aşama, kişinin gözlemlediği deneyimi kuramsal bir zemine oturtmasını, kavramlar ve görseller vasıtasıyla anlamlandırması aşamasıdır. Son olarak da Aktif Deneyimsel Öğrenme ile birlikte oluşturulan kavramsal bütünlüğün yeni olgularda test edilmesi ve uygulanması döngünün dördüncü aşaması kabul edilir. Her yeni deneyimin yeni somut algılar oluşmasıyla döngü süreklilik gösterir [7].

4. YAPAY ZEKÂ TABANLI GÖRSEL ÜRETİM ARAÇLARININ EĞİTİMDE KULLANIMI

Yapay zekâ tabanlı görsel üretim araçları, eğitimde öğrencinin öğrenimine katkı sağlamaya dayalı yöntemler bakımından ele alınabilecek bir potansiyel taşımaktadır. Yapay Zekâ Destekli Eğitim (Artificial Intelligence in Education- AIED) alanındaki çoğu çalışma, yapay zekâ çalışma prensiplerinin var olan öğrenmeyi ele alış biçimlerine dahil edilmesine odaklanmakta, ayrıca çoğu zaman halihazırdaki eğitimsel varsayımları tekrar oluşturmaya ya da otomatikleştirmeye yatkınlık göstermektedir. Oysa yapay zekâ teknolojileri, sadece mevcut öğretim uygulamalarını otomatikleştirmek dışında öğrenim ve öğretim süreçlerine yeni imkanlar sağlayarak farklı şekillerde kurgulanmasına kapı açmaktadır. Yapay zekanın sağladığı üretken, esnek ve çok yönlü ürünler ile özellikle anlaşılması güç, soyut ve kavramsal konularda pedagojik yöntemlerin eleştirilmesi, yerine kullanılabilecek anlatım yöntemlerinin tartışılması ve öğretmenlerin öğrenme sürecindeki etkilerini arttırarak geliştirmesi desteklenmektedir. Böylece öğretim üyeleri öğrencilerin eğitimi üzerinde daha etkili müdahalelerde bulunabilir [8].

Bu yapay zekâ araçları, aynı kavramın birbirinden farklı özelliklerle ön plana çıkan görsel somutlaştırmalarla sunulmasına fırsat tanıyarak öğrenim gören bireylerin kendi bilişsel tercihlerine göre materyali anlamlandırmalarını destekleyebilir. YZDE teknolojileri genellikle üç başlık altında sınıflandırılır, bunlar; öğrenciye öğretmeye yönelik (öğretimci/instructionist), öğrenciyi

desteklemeye yönelik (yapılandırmacı/constructivist) ve öğretmeni desteklemeye yönelik uygulamalardır [9].

5. YAPI FİZİĞİ KAVRAMLARI İÇİN GÖRSEL ŞEMA ÜRETİM YAKLAŞIMI

Bu çalışmada ön çalışma aşamasında gerçekleştirilen yapay zekâ aracılığıyla görsel üretimi, daha çok Kolb'un öğrenme döngüsündeki Soyut Kavramsallaştırma (SK) aşamasını kapsamaktadır (Kolb, 2015: 41). Teorik bilgi kavramlarını aktarmaya dayalı yapı fiziği dersi, ısı, nem, akustik, fiziksel etkileşimler gibi deneyim temelli öğrenmeye dayalı, soyut süreçleri kapsamaktadır [10]. Bu nedenle bahsedilen konuların sadece sözel ya da yazı üzerinden aktarılması öğrenim görenlerin konuyu kavramada güçlük çekmesine sebep olabilmektedir.

Çalışma kapsamında teorik anlatımla aktarılan yapı fiziği konularını daha anlaşılabilir hale getirme hedefiyle, yapay zekâ destekli görselleştirme araçları kullanılarak soyut kavramlar görselleştirilip gözlemlenebilir ders materyalleri oluşturulmuştur. Üretilen görseller ve şematik anlatımlar kullanarak değerlendirme formu ön çalışması kapsamında öğrencilerden, seçeneklerdeki görseller içinden konuyu kavramalarında ve anlatım dili olarak en etkili olan görseli seçmeleri istenmiştir.

Ön çalışma sonucunda, öğrenim görenlerin farklı görsel ifade şekillerine farklı seviyelerde yanıt verdiklerini ve belirli görsel karakterler taşıyan ürünlerin geri kalanlara göre kavramsal açıdan daha açıklayıcı olduğu gözlemlenmiştir. Dolayısıyla deneyimsel öğrenme yaklaşımı bağlamında, soyut kavramsallaştırma aşamasının her öğrenci açısından benzer ilerlemediği, görsel temsil çokluğunun öğrenme yolculuğuna desteği önemli bir unsur olarak değerlendirilmelidir. Öğrencilerin bireysel kavramsallaştırma sırasında adaptif öğrenme içeriklerinin iyileştirilmesi bakımından, yapay zekâ tabanlı görsel üretim araçları kayda değer derecede olanak sağlamaktadır.

6. METİN TABANLI İSTEM (PROMPT) TASARIM SÜRECİ

Çalışma ön aşamasındaki değerlendirme formu sorularının hazırlanması adımı, görselleştirilmesi üzerine çalışılan yapı fiziği kavramları (ısı köprü, kılcallık, güneş kontrolü vb.) yapay zekâ araçlarına yalın ve anlaşılır cümlelerle ifade edilmiş, bu araçlardan konuları en hatasız ve açıklayıcı özellikte görselleştirebilecek istem (prompt) metinleri oluşturmaları beklenmiştir. Bu izlenen yöntemde yapay zekâ, sadece görsel üretim aracı görevinde değil, istem tasarlama aşamasında da yardımcı bir görev üstlenmektedir.

Görsel üretim aşamasında yapay zekanın üretimleri analiz edilmiş, planlanan anlatım ve öğretim hedeflerini karşılamayan çıktılar üzerinden istem metinlerinde güncellemeler yapılmıştır. Yeniden düzenleme süreci, kavramsal yanılsamaların düzenlenmesi, açıklamanın sadeliği ya da görsel odaklarının belirginleştirilmesi gibi çalışmalarla ilerlemiştir. Buna bağlı olarak istem metinlerinin üretimi, tek aşamalı bir ilerleme değil sonuçların eksiklerine göre düzenlemelerin yapıldığı döngüsel bir ilerleyiştir.

Üretilen istem metinleri farklı yapay zekâ tabanlı görsel üretim araçlarında kullanılarak, araçların arasındaki farklı tasarım yöntemleri de saptanmıştır. Araçların tek istemde birden fazla ürün oluşturmaları sebebiyle istenen öğretim hedefiyle uyumlu çıktılar tercih edilerek son ürünler

kararlaştırılmıştır. Bu değerlendirmenin sonucunda farklı yapay zekâ araçlarında sorunsuz işleyen istemler sayesinde üretilen görseller, değerlendirme formunda sunulan görsellerdir (Şekil 1-2).

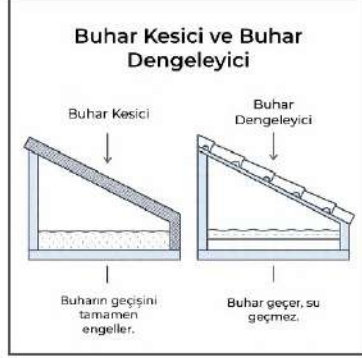
PROMPT:

Architectural infographic diagram titled 'Buhar Kesici vs Buhar Dengeleyici'. Left side: wall or roof section showing a 'Buhar Kesici (Vapor Barrier)' layer placed on the warm side of insulation. Completely impermeable membrane illustrated with dense solid line. Vapor particles attempting to pass but fully blocked. Label: 'Buharın geçişini tamamen engeller'. Right side: roof section showing 'Buhar Dengeleyici / Nefes Alan Örtü (Vapor Control Layer / Breathable Membrane)' placed under roof tiles. Semi-permeable membrane with arrows showing controlled vapor flow outward but no water entering inward. Label: 'Buhar geçer, su geçmez'. Clear comparison arrows between the two concepts. Clean minimalist architectural drawing, thin linework, white background, soft blue/gray palette, technical diagram style, modern infographic design, no people. High resolution. --ar 16:9 --v 6

İSTEM:

'Buhar Kesici vs Buhar Dengeleyici' başlıklı mimari infografik diyagram. Sol taraf: yalıtımın sıcak tarafına yerleştirilmiş 'Buhar Kesici (Vapor Barrier)' katmanını gösteren duvar veya çatı kesiti. Tamamen geçirimsiz membran, yoğun ve kesintisiz bir çizgiyle ifade edilmiş. Buhar parçacıkları geçmeye çalışıyor ancak tamamen engelleniyor. Etiket: 'Buharın geçişini tamamen engeller'. Sağ taraf: çatı kaplamasının altında yer alan 'Buhar Dengeleyici / Nefes Alan Örtü (Vapor Control Layer / Breathable Membrane)' katmanını gösteren çatı kesiti. Yarı geçirgen membran, buharın kontrollü şekilde dışarı çıkmasını gösteren oklarla ifade edilirken, suyun içeri girişi engellenmiştir. Etiket: 'Buhar geçer, su geçmez'. İki kavram arasında net karşılaştırma okları bulunur. Temiz minimalist mimari çizim, ince çizgiler, beyaz arka plan, açık mavi ve gri tonlar, teknik diyagram tarzı, modern infografik tasarım, insan figürü yok. Yüksek çözünürlük. --ar 16:9 --v 6

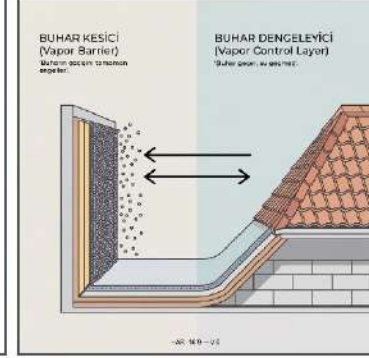
META AI



NANO BANANA



IDEOGRAM



Şekil 1: Buhar kesici ve buhar dengeleyici kavramları için geliştirilen örnek istem (prompt) metni ve bu istem doğrultusunda farklı yapay zekâ araçları tarafından üretilen görseller.

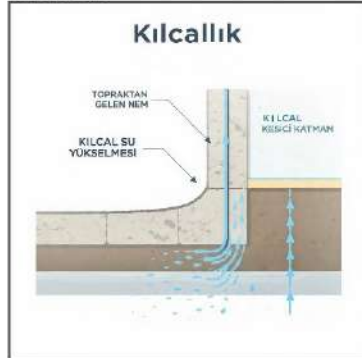
PROMPT:

Architectural infographic diagram titled 'Kılcallık (Capillarity)'. Building foundation and soil cross-section. Moist soil layer at the bottom with water illustrated as small droplets. Arrows showing water rising upward through porous building materials due to capillary action. Masonry or concrete wall texture with vertical water rise channels. Labels: 'Topraktan Gelen Nem', 'Kılcal Su Yükselmesi'. Include a capillary break layer (waterproof membrane) with a label 'Kılcal Kesici Katman'. Minimalist linework, clean architectural section drawing, soft blues and grays, white background, thin arrows, clear typography. Modern technical infographic style, no people. High resolution. --ar 16:9 --v 6

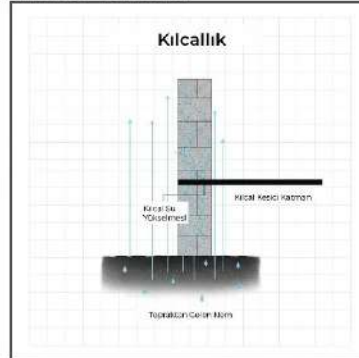
İSTEM:

'Kılcallık (Capillarity)' başlıklı mimari infografik diyagram. Yapı temeli ve zemin kesiti. Alt kısımda nemli toprak tabakası, su küçük damlacıklar halinde gösterilmiş. Oklar, suyun kılcal etkiyle gözenekli yapı malzemeleri boyunca yukarı doğru yükseldiğini gösteriyor. Düşey su yükselme kanallarına sahip yığma ya da beton duvar dokusu. Etiketler: 'Topraktan Gelen Nem', 'Kılcal Su Yükselmesi'. 'Kılcal Kesici Katman' etiketiyle bir kılcal kesici tabaka (su yalıtım membranı) dahil edisin. Minimalist çizgiler, temiz mimari kesit çizimi, açık mavi ve gri tonlar, beyaz arka plan, ince oklar, net tipografi. Modern teknik infografik tarzı, insan figürü yok. Yüksek çözünürlük. --ar 16:9 --v 6

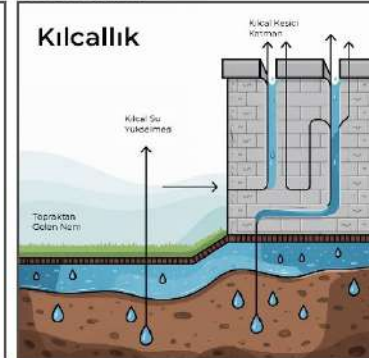
META AI



NANO BANANA



IDEOGRAM



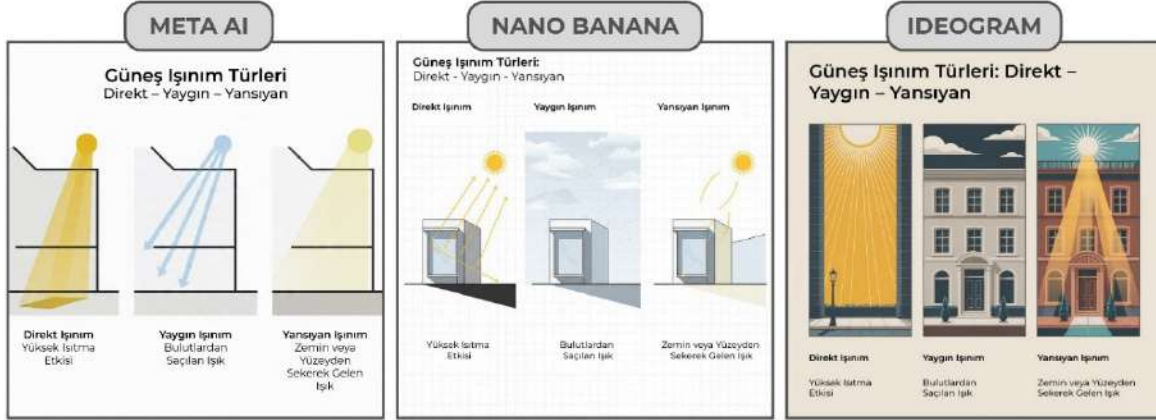
Şekil 2: Kılcallık kavramı için geliştirilen örnek istem (prompt) metni ve bu istem doğrultusunda farklı yapay zekâ araçları tarafından üretilen görseller.

7. YAPAY ZEKÂ ARAÇLARI ARASINDAKİ GÖRSEL ÜRETİM YAKLAŞIMLARI

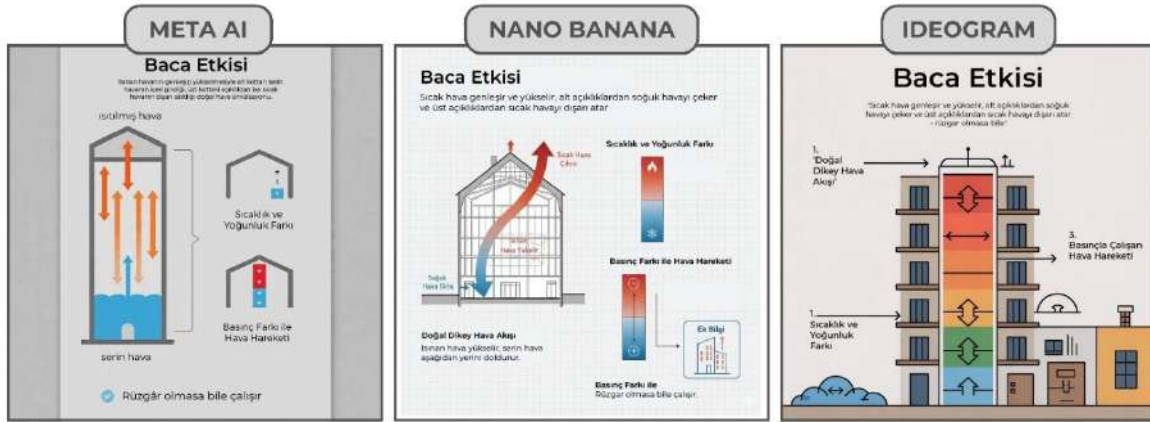
Çalışma kapsamında kullanılan yapay zekâ görsel üretim araçlarının, aynı metin tabanlı istemlere (prompt) karşılık olarak farklı temsil yaklaşımları gösterdiği gözlemlenmiştir. Üretilen görseller; detay yoğunluğu, soyutlama düzeyi, şematik sadelik gibi kriterlerde ayrıışmaktadır. Bu durumda,

yapay zekâ görsel üretim araçlarının teknik altyapılarının yanı sıra, görsel üretim mantıklarının da farklı olduğu söylenebilir [11].

Örneğin bir görsel üretim aracında, yapı fiziği kavramlarının görselleştirilmesinde sade ve şematik bir yaklaşımın benimsendiği, kavramların temel düzeyde açıklandığı ve başlangıç düzeyinde bilgilerin yer aldığı gözlemlenmiştir. Bir başka araçta ise daha betimleyici, görsel ve içerik bakımından zengin ve sürecin daha detaylı görselleştirildiği temsiller öne çıkmaktadır (Şekil 3-Şekil 4) [12].



Şekil 3: Güneş ısıtım türleri kavramı için farklı yapay zekâ araçları tarafından üretilen görseller.



Şekil 4: Güneş ısıtım türleri kavramı için farklı yapay zekâ araçları tarafından üretilen görseller.

Yapay zekâ görsel üretim motorları arasındaki bu farklılaşma, özellikle soyut ve süreç odaklı yapı fiziği kavramlarının görselleştirilmesinde önemli hale gelmektedir. Çeşitli süreçlerin farklı temsil biçimleri, görsellerin yapı fiziği eğitimindeki potansiyel kullanım alanlarını da çeşitlendirmektedir [13]. Bu kapsamda oluşturulan Tablo 1’de yer alan değerlendirmeler; üretilen görsellerin bilgi yoğunluğu, şematik sadelik, kavramsal netlik, eğitimde kullanım potansiyeli ve temsil yaklaşımı gibi ölçütler çerçevesinde karşılaştırmalı olarak incelenmesiyle oluşturulmuştur.

Ölçütlerin belirlenme sürecinde, aktarılan kavramsal veri miktarını gözlemlemek için bilgi yoğunluğu, görselin okunabilirliğini ve grafik yalınlığını ölçmek için şematik sadelik, temsilin yapı fiziği kavramını ne ölçüde anlaşılır kıldığını ölçmek için kavramsal netlik başlıkları seçilmiştir.

Görsellerin ders içi anlatımda hangi aşamada kullanılabileceğine ilişkin öngörü, eğitimde kullanım potansiyeli başlığı altında incelenirken; görselin temsilde merkeze aldığı anlatım dili (süreç, kavram, metin) ise temsil yaklaşımı olarak isimlendirilmiştir.

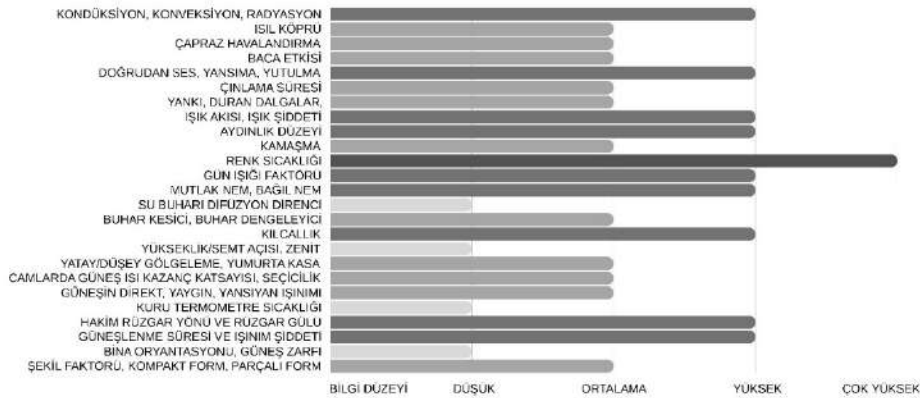
Değerlendirmeler ışığında, yapay zekâ araçlarının tek tip görsel sunmadığı, farklı amaçlara hizmet edebilecek temsiller üretebildiği görülmektedir (**Tablo 1**). Bu üretim farklarının sonucunda, eğitimci rehberliğinin önemi ve öğrenim süreci doğrultusunda bilinçli seçimin gerekliliği öne çıkmaktadır.

	GÖRSEL ÜRETİM ARACI 1 META AI	GÖRSEL ÜRETİM ARACI 2 NANO BANANA	GÖRSEL ÜRETİM ARACI 3 IDEOGRAM
BİLGİ YOĞUNLUĞU	DÜŞÜK	YÜKSEK	ORTA
ŞEMATİK SADELİK	ÇOK YÜKSEK	DÜŞÜK-ORTA	ORTA
KAVRAMSAL NETLİK	TEMEL	DETAYLI	SEZGİSEL
EĞİTİMDE KULLANIM	KAVRAM TANITIMI	ANLATIM + ANALİZ	GİRİŞ SEVİYESİ
AI YAKLAŞIMI	SÜREÇ MERKEZLİ	METİN MERKEZLİ	KAVRAM MERKEZLİ

Tablo 1: Yapay zekâ araçlarının görsel üretim yaklaşımları.

8. ÖN BULGULARA İLİŞKİN GÖZLEMLER

İlk aşamada, 36 katılımcının yapı fiziği kavramlarına dair mevcut bilgi düzeylerini anlamaya yönelik bir değerlendirme yapılmıştır. Katılımcı profili; 29 lisans öğrencisi (2 birinci sınıf, 1 ikinci sınıf, 5 üçüncü sınıf, 21 dördüncü sınıf), 2 lisansüstü öğrenci, 2 öğretim üyesi, 2 iç mimar ve 1 mimardan oluşmaktadır. Bu kapsamda, 25 adet kavram veya kavram grubu belirlenerek katılımcılardan bu kavramlara olan aşinalıklarını öznel değerlendirmelerine dayalı olarak belirtmeleri istenmiştir. Bu değerlendirme sonucunda; gündelik yaşamda doğrudan gözlemlenebilir olan veya etkileri hissedilebilen hâkim rüzgâr yönü, renk sıcaklığı, aydınlık düzeyi, nem gibi kavramların katılımcı açısından daha tanıdık bulunduğu yönünde eğilimler gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra, gerçek hayatta daha süreç temelli ve doğrudan gözlemlenmesi güç olan su buharı difüzyonu, baca etkisi, ısı köprü gibi kavramların sınırlı düzeyde anlaşıldığı düşünülmektedir (**Grafik 1**).



Grafik 1: Katılımcıların kavram bilgi düzeyleri.

İkinci aşamada, üç farklı yapay zekâ görsel üretim motoru kullanılarak üretilen 25 kavramın her birine ait görseller katılımcılar tarafından değerlendirilmiştir. Bu aşamaya ilişkin değerlendirmeler, araçların görsel üretim yaklaşımlarının algılanan tercihleri etkileyebileceği yönündedir. Oylama sonucunda, kavramsal bilgi miktarı orta ve yüksek seviyede olan görsellerin katılımcılar tarafından daha fazla ilgi gördüğü yönünde eğilimler gözlemlenmiştir.

Buna ek olarak, belirli ölçüde görsel detay ve bağlamsal ipucu içeren, bir başka deyişle şematik sadelik düzeyi düşük ya da orta seviyede olan görsellerin daha sık tercih edildiği elde edilen bulgular arasındadır. Bu durum, yapı fiziği gibi soyut ve süreç odaklı kavramlar barındıran bir alanda, görsel yoğunluğa ve yüksek kavramsal bilgi miktarına sahip temsillerin de açıklayıcı bulunabildiğini düşündürmektedir (**Tablo 2**).

KONU BAŞLIKLARI	1. YAPAY ZEKÂ MOTORU (META AI)	2. YAPAY ZEKÂ MOTORU (NANO BANANA)	3. YAPAY ZEKÂ MOTORU (IDEOGRAM)
KONDUKSİYON, KONVEKSİYON, RADYASYON	%16,7	%80,6	%2,8
ISIL KÖPRÜ	%25	%47,2	%27,8
ÇAPRAZ HAVALANDIRMA	%8,3	%30,6	%61,1
BACA ETKİSİ	%22,2	%30,6	%47,2
DOĞRUDAN SES, YANSIMA, YUTULMA, SAÇILMA	%30,6	%55,6	%13,9
ÇINLAMA SÜRESİ	%11,1	%38,9	%50
YANKI, DURAN DALGALAR, ODAKLANMA	%5,6	%69,4	%25
IŞIK AKISI, IŞIK ŞİDDETİ	%22,2	%36,1	%41,7
AYDINLIK DÜZEYİ	%38,9	%13,9	%47,2
KAMAŞMA	%30,6	%41,7	%27,8
RENK SICAKLIĞI	%47,2	%19,4	%33,3
GÜN IŞIĞI FAKTÖRÜ	%52,8	%8,3	%38,9
MUTLAK NEM, BAĞIL NEM	%19,4	%47,2	%33,3
SU BÜHARİ DİFÜZYON DİRENÇİ	%13,9	%38,9	%47,2
BÜHAR KESİCİ, BÜHAR DENGELİYİCİ	%38,9	%25	%36,1
KİLÇALLIK	%41,7	%5,6	%52,8
YÜKSEKLİK AÇISI, SEMT AÇISI, ZENİT	%5,6	%61,1	%33,3
YATAY GÖLGELEME, DÜŞEY GÖLGELEME, YUMURTA KASA	%22,2	%47,2	%30,6
CAMLARDAN GÜNEL ISI KAZANÇ KATSAYISI, CAMLARDAN SEÇİCİLİK	%41,7	%36,1	%22,2
GÜNEŞİN DİREKT/YAYGIN/YANSIYAN IŞINIMI	%44,4	%38,9	%16,7
KURU TERMOMETRE SICAKLIĞI	%27,8	%41,7	%30,6
HAKİM RÜZGAR YÖNÜ VE RÜZGAR GÜCÜ	%22,2	%27,8	%50
GÜNEŞLENME SÜRESİ VE IŞINIM ŞİDDETİ	%25	%41,7	%33,3
BİNA ORYANTASYONU VE GÜNEŞ ZARFI	%44,4	%22,2	%33,3
ŞEKİL FAKTÖRÜ, KOMPAKT FORM, PARÇALI FORM	%19,4	%33,3	%47,2

Tablo 2: Yapay zekâ ile oluşturulan görsellerin kavramlara göre oylama sonuçları.

Elde edilen sonuçlar, yapay zekâ ile üretilen görsellerin yapı fiziği eğitiminde nasıl algılandığına ilişkin bir ön çerçeve sunmaktadır.

9. TARTIŞMA: YAPI FİZİĞİ EĞİTİMİNDE OLASI KATKILAR

Bu tür çalışmalar, eğitimde standartlaştırılmış içerik ve öğretim yöntemlerine bağlı uygulama modellerinin kısıtlılıklarına değinmektedir. Öğrenme tasarımı ile ilgili çalışmalarda, öğretim üyeleri ve eğitim tasarımcılarının öğrenme faaliyetlerini ne şekilde kurguladıkları üzerinde daha farkındalığı yüksek seçimler yapmalarını teşvik eden yaklaşımların geliştirilmesi bu nedenle önemlidir. Öğrenme tasarımı; eğitsel seçimleri planlı hale getirmeyi, öğrencilerin edinim

süreçlerini desteklemeyi ve bununla birlikte öğrenme süreçlerine ilişkin veri analiziyle eğitime yönelik veri madenciliği için altyapı oluşturmayı hedefleyen bir çerçeve sunar [14].

Eğitimde ortalama öğrenci profiline uygun izole bir öğretimsel uygulamanın kaçınılmaz olarak kısıtlayıcı olduğu öne sürülmektedir. Bir ele alış biçiminin ortalama olarak daha etkili olduğunun gözlemlenmesi, farklı ele alış biçimlerinin eğitim görenlerin belirli bir bölümünde daha etkili olabileceği durumunu gölgelememelidir [8]. Çalışma kapsamında uygulanan değerlendirme formu ön araştırmasında; aynı yapı fiziği konularının farklı yapay zekâ araçlarıyla ve farklı özelliklerde üretilmiş görsellerin yakın oranlarda ‘konuyu daha verimli anlattığı düşünüldüğü için’ seçilmesi, öğrenim görenlerin çeşitli öğrenme biçimlerine ve farklı algılama türlerine sahip olduklarının gözlemlenmesini sağlamıştır. Bu seçimler sonucunda, yapay zekanın kullanıcı deneyimine dayalı veriler üzerinden öğrenen ve adapte edilebilen sisteminden yararlanılarak, bireysel öğrenme biçimlerine uygun kişiselleştirilmiş konu anlatım görselleri oluşturulması yapı fiziği eğitiminde dinamik ve alternatif bir yaklaşım olarak önerilebilir.

10. SONUÇ

Çalışma, yapı fiziği öğretim sürecinde yararlanılmak amacıyla yapay zekâ aracılığıyla görsellerin oluşturulabilirliğini ve oluşturulan görsellerin kavramsal açıklamaya sağlayabileceği katkıları ele alan bir ön araştırma özelliğine sahiptir. Yapı fiziği alanında bulunan soyut ve işleyiş esaslı terimlerin, alışlagelmiş metin odaklı anlatımın sınırlılıkları göz önünde bulundurulduğunda, görsel şemaların öğrenim ilerleyişindeki önemi gözlemlenmektedir.

Çalışma bünyesinde üretilen metin tabanlı istem oluşturma aşaması, yapay zekânın sadece görsel üretme aracı değil, bununla beraber anlam düzeyinde basitleştirme ve eğitim amaçlarının tanımlanması süreçlerinde de yardımcı bir araç olduğu gözlemlenmiştir. Farklı yapay zekâ görsel üretim araçlarının aynı istemler üzerinden çeşitli çıktılar vermeleri, yapı fiziği kavramlarının tekdüze bir görsel ifadeyle kısıtlanamayacağını, çeşitli temsil türlerinin farklı öğrenim seçimlerine yönelik olabileceğini ortaya koymaktadır.

Ön çalışma sonucunda, bağlamsal ipuçları içeren ve bilgi yoğunluğu diğerlerine kıyasla yüksek düzeyde olan görsellerin bazı durumlarda daha açıklayıcı olarak algılanabildiğine işaret eden nitel eğilimler ortaya koymuştur. Bu durum, soyut süreçler barındıran yapı fiziği alanında, sadeleştirme düzeyi yüksek olan şemaların değil, detaylı görsel temsillerin de pedagojik anlamda değer taşıyabileceğine işaret etmektedir. Elde edilen bulgular genelleme iddiası taşımamakla birlikte yapay zekâ ile üretilen görsellerin yapı fiziği eğitiminde algılanabilirliğine dair genel bir çerçeve sunmaktadır.

Bu çalışma kapsamında elde edilen bulgular, yapay zekâ tabanlı görsel üretim araçlarının yapı fiziği eğitiminde kavramsal anlatımı destekleyebilecek tamamlayıcı bir öğretim aracı olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir. Özellikle soyut ve süreç temelli kavramların farklı görsel temsil biçimleriyle sunulması, öğrenim sürecinde kavramsallaştırmayı destekleyen alternatif bir yaklaşım sunmaktadır. Bununla birlikte, bu çalışma keşifsel nitelikte olup, gelecekte yapılacak daha geniş örneklemler ve deneysel çalışmalarla yapay zekâ destekli görsellerin öğrenme performansı üzerindeki etkilerinin sistematik olarak incelenmesi gerekmektedir.

TEŞEKKÜR

Çalışma sürecinde değerli görüşleri ve yönlendirmesiyle katkı sağlayan kıymetli hocamız Seda Kulak Dalkılıç'a ve çevrimiçi değerlendirme formuna katılarak araştırmaya katkıda bulunan tüm katılımcılara içtenlikle teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

1. Sönmez, E. D., Önder, A. N., & Yıldırım, E. G. (2024). Examining Students' Explanations of Some Physics Topics with Diagrams and Association of Them with Daily Life. *Karaelmas Eğitim Bilimleri Dergisi*, 12(1), 61-77.
2. Aktay, S. (2022). Eğitimde Yapay Zeka (AI) tarafından oluşturulan görüntülerin kullanılabilirliği. *International Technology and Education Journal*, 6(2), 51-62.
3. Szokolay, S. V. (2014). *Introduction to Architectural Science: The Basis of Sustainable Design*. Routledge.
4. Hensen, J. L., & Lamberts, R. (Eds.). (2019). *Building Performance Simulation for Design and Operation*. Routledge.
5. Kolarevic, B. (2003). *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*. Taylor & Francis.
6. Kolb, D. A. (2015). *Experiential Learning: Experience as the Source of Learning and Development*. (2. Baskı). Upper Saddle River, NJ: Pearson Education.
7. Ketizmen, G. (2023). Mimarlık Öğrencilerinin Kişilik Özellikleri ve Öğrenme Stilleri / Personality Traits and Learning Styles Among Architecture Students. *Disiplinlerarası Eğitim Araştırmaları Dergisi*, 7(16), 500-517. <https://doi.org/10.57135/jier.1380726>
8. Holmes, W., Bialik, M., & Fadel, C. (2019). Artificial Intelligence in Education, The Center for Curriculum Redesign, Boston, 151-180.
9. Holmes, W. & Tuomi, I. (2022). *State of the art and practice in AI in education*. European Journal of Education, 57(4), 542-570.
10. Hens, H. S. (2017). *Building Physics - Heat, Air and Moisture*. Ernst & Sohn.
11. Ramesh, A., Pavlov, M., Goh, G., Gray, S., Voss, C., Radford, A., Chen, M., & Sutskever, I. (2021). Zero-shot text-to-image generation. In *International Conference on Machine Learning* (pp. 8821–8831). PMLR.
12. Ware, Colin. (2004). *Information Visualization: Perception for Design: Second Edition*. Morgan Kaufmann.
13. Ainsworth, Shaaron. (2006). DeFT: A conceptual framework for considering learning with multiple representations. *Learning and Instruction*, 16(3), 183-198, <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2006.03.001>
14. Conole, G. (2013). *Designing for Learning in an Open World*. Springer.

İNŞAAT SEKTÖRÜNÜN DÖNGÜSEL DÖNÜŞÜMÜ: ÇOK PAYDAŞLI DÖNGÜSEL EKONOMİ ÇERÇEVESİ

Hafize Büşra Bostancı^{1*}

Ali Murat Tanyer²

¹ Hitit Üniversitesi, Güzel Sanatlar, Tasarım ve Mimarlık Fakültesi, Çorum, Türkiye

² ODTÜ Mimarlık Fakültesi, Ankara, Türkiye

ÖZET

Yapılı çevre ve inşaat sektörünün çevresel etkilerinin giderek daha görünür hale gelmesinin araştırmacıları ve politika yapıcıları yeni kavram arayışlarına yöneltmesiyle ivme kazanan sürdürülebilirlik tartışmaları, iklim değişikliğinin ötesine geçerek kaynak kıtlığı, atık yönetimi ve ekosistem bozulması gibi sorunları da kapsayan yeni paradigmaların ortaya çıkmasına neden olmuştur. Atıksız tasarım, ürün ve malzemelerin kullanımda tutulması, doğal sistemlerin yenilenmesi prensiplerine dayanan döngüsel ekonomi (CE), inşaat sektörü de dahil olmak üzere birçok sektör için stratejik bir paradigma olarak öne çıkmaktadır. CE alanında farklı kurumlar tarafından geliştirilen çeşitli çerçeveler, uygulayıcılara, karar vericilere ve araştırmacılara yol göstermeyi amaçlamaktadır. Ancak inşaat sektörünün çok paydaşlı, karmaşık ve çok ölçekli bir ekosisteme sahip olması, mevcut modellerin kapsamını ve sektöre doğrudan uygulanabilirliğini sınırlamaktadır. Bu çalışma, bu sınırlılığı aşmak amacıyla geliştirilen inşaat sektörünün döngüsel dönüşümü için çok paydaşlı kavramsal çerçeveyi sunmaktadır. Model, paydaş odaklı literatür araştırması sonucu sistematik biçimde ortaya konan döngüsel inşaat stratejilerinin Doğal Dil İşleme (NLP) kullanılarak analiz edilmesiyle yapılandırılmıştır. Geliştirilen çerçeve, kaynak yönetimi, tasarım, doğrulama, organizasyon, yasal düzenlemeler ve teknoloji boyutlarının da döngüsel dönüşüm süreçlerine bütüncül olarak entegre edilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Anahtar kelimeler: Döngüsel ekonomi, Döngüsel inşaat sektörü, İnşaat paydaşları, Paydaş katılımı

CIRCULAR TRANSFORMATION OF THE CONSTRUCTION INDUSTRY: MULTI-STAKEHOLDER CIRCULAR ECONOMY FRAMEWORK

ABSTRACT

Sustainability debate, which gained momentum as the environmental impacts of the construction and building sector became increasingly visible, prompting researchers and policymakers to seek new concepts, has gone beyond climate change, leading to the emergence of new paradigms encompassing issues such as resource scarcity, waste management, and ecosystem degradation. The circular economy (CE), based on the principles of design-out-waste, retaining products and materials in use, and renewing natural systems, stands out as a strategic paradigm for many sectors, including construction. Various frameworks developed by different institutions in the CE field aim to guide practitioners, decision-makers, and researchers. However, the multi-stakeholder, complex, and multi-scale ecosystem of the construction industry limits the scope and direct applicability of existing models. This study presents a multi-stakeholder framework for the circular transformation of the construction industry, developed to overcome this limitation. The framework is developed through a stakeholder-oriented literature review and the systematic analysis of circular construction strategies using Natural Language Processing (NLP). The developed model emphasizes that resource management, design, validation, organization, regulations, and technology dimensions should be holistically integrated into circular transformation processes.

Keywords: Circular economy, Circular construction industry, Construction stakeholders, Stakeholder engagement

^{1*} e-posta adresi: busrabostanci@hitit.edu.tr

² e-posta adresi: tanyer@metu.edu.tr

1. GİRİŞ

İnşaat ve yapı sektörünün mevcut düzeninin lineer ekonomi modeline olan bağımlılığının bu sektörün yoğun kaynak kullanımı ve yüksek emisyonlara sahip olmasına sebep olması, çevre üzerinde olumsuz sonuçlar oluşturmaktadır. Bu bağımlılık, sektör paydaşlarının yüzleşmek ve çözüm bulmak zorunda olduğu birçok baskı oluşturmaktadır. Enerjiyle ilgili sera gazı (GHG) emisyonlarının %40'ından fazlasını [1-3], hammadde tüketiminin %50'sini ve Avrupa Birliği'nin (AB) toplam atık üretiminin %35'ini oluşturan [4] en zorlu sektör olması nedeniyle, hükümet kurumları ve endüstriyel paydaşlar da dahil olmak üzere kilit aktörler, Paris Anlaşmasını [5] takiben temel stratejiler geliştirmeye ve sağlam çözümler benimsemeye odaklanmaktadır. Bu kapsamda, 1987'de Brundtland raporu [6] ile tanıtilen sürdürülebilirlik kavramı, inşaat ve yapı sektöründe yoğun bir yankı uyandırmıştır. Çevresel, ekonomik ve sosyal sürdürülebilirliği öncüllemek için malzemeden tasarıma, yapım süreçlerinden tedarik zinciri optimizasyonuna ve yıkım planlamasından yenilikçi iş modellerine kadar birçok farklı alanda sürdürülebilir inşaat kavramına ilişkin ilgi artmıştır. Sürdürülebilirlik kavramına olan ilgi, son on yılda döngüsel ekonomi (*Circular Economy* - CE) kavramına evrilmiştir. Geleneksel “al-yap-at” anlayışının hakim olduğu lineer ekonomi modeline alternatif bir model olarak sunulan CE, kaynakları uzun süre sistem içinde tutma, atık oluşumunu en aza indirme ve doğal sistemi yenileme prensiplerine dayanmaktadır [7]. Her ne kadar AB'nin 2015 yılında yayınladığı rapor [8] ve Ellen MacArthur Foundation (EMF) girişimleriyle [7, 9-10] kavrama ilişkin ilgi artsa da, kavramın ortaya çıkışı 1970'lere dayanmaktadır [9, 11]. Bu noktada CE kavramının güncel tanımına ulaşması, farklı düşünce okulunun (*School of Thoughts*) harmanlaşmasıyla tamamlanmıştır.

Global iklim kriziyle baş etme konusunda birçok endüstriyel pratikte sorgulanan CE kavramına olan ilgi, yoğun kaynak kullanımına ve atık oluşumuna sebep olan inşaat sektöründe de araştırmacılar ve uygulayıcılar arasında da artan bir ivmeye sahiptir. İnşaat sektöründe döngüsel geçişi sağlayabilmek için malzeme kullanımı, tasarım, yapım ve yıkım kararları, yenilikçi iş modelleri gibi alanlarda verimliliği sağlamak üzere farklı stratejiler geliştirilmektedir. İnşaat sektörünün, çok paydaşlı ve çok katmanlı bir ekosisteme sahip olması nedeniyle karmaşık ve dağınık süreçlere dayanması [12, 13], sektörün döngüsel dönüşümünde paydaş birlikteliğini gerekli kılmaktadır. Ancak döngüsel inşaat sektörü için mevcut anlayışın tekil paydaş, süreç ve stratejilere dayanması, döngüsel inşaat sektörüne geçişte bir kısıtlılık oluşturmaktadır. Bu nedenle, sadece malzeme ve ürün değil, süreç ve insan odaklı bir bakış açısıyla inşaat sektöründe çevresel, ekonomik ve sosyal kalkınmanın desteklenebilmesi için bütüncül bir anlayış geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu kapsamda bu çalışma, bu boşluğu doldurmak amacıyla geliştirilen çok katmanlı bir yapıda döngüsel geçişi hızlandırmak için çok-paydaşlı bir CE kavramsal çerçevesini sunmaktadır. CE yaklaşımı, yapı fiziği ve çevre kontrolü kapsamında malzeme seçimi, yapı bileşenlerinin sökülebilirliği, yeniden kullanım potansiyeli, bakım-onarım senaryoları ve yaşam döngüsü boyunca kaynak verimliliğine ilişkin kararlar; bina ölçeğinde gömülü ve operasyonel çevresel etkilerin azaltılması, iç çevre kalitesinin konforu ve sürekliliği, dayanıklılık ve performansın yaşam döngüsü boyunca korunması gibi yaklaşımlarla doğrudan ilişkilidir. Bu bağlamda önerilen kavramsal çerçeve, çevresel performansın yalnızca işletme evresiyle sınırlı olmayan, tasarım, yapım, kullanım ve yaşam sonu kararlarını birlikte ele alan bütüncül bir değerlendirme zemini sunmaktadır. Dolayısıyla çalışma, yapı fiziği ve çevre kontrolü alanında giderek önem kazanan yaşam döngüsü temelli çevresel performans, kaynak etkinliği ve tasarım kararlarının bütünlük ele alınmasına kavramsal düzeyde katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

2. YÖNTEM

Bu çalışma, döngüsel inşaat sektörü için geliştirilen çok paydaşlı bir döngüsel dönüşüm kavramsal çerçeveyi sunmaktadır. Sadece çevresel değil, ekonomik ve sosyal sürdürülebilirliği de hedefleyerek insan, süreç ve ürün odaklı bütüncül bir anlayış geliştirmeyi amaçlayan kavramsal model, birbirini takip eden bir dizi aşama sonucunda geliştirilmiştir. İlk olarak, Avrupa Birliği tarafından hazırlanan “*Circular Economy - Principles for Building Design*” raporunda ele alınan sektörde dönüştürücü etkiye sahip olan hedef grupları temel alınarak sektör paydaşları tanımlanmıştır. Bu paydaşlar, (i) yapı kullanıcıları, tesis yöneticileri ve sahipleri, (ii) tasarım ekipleri, (iii) müteahhitler ve yapı yüklenicileri, (iv) yapı malzemeleri üreticileri, (v) yıkım ve söküm ekipleri, (vi) yatırımcılar, geliştiriciler ve sigorta sağlayıcılar ve (vii) hükümet/düzenleyici kurumlar/yerel yetkililerdir [14].

İnşaat sektöründeki ana paydaşlar tanımlandıktan sonra, CE literatüründe döngüsellik stratejilerini derlemek için yedi paydaş odaklı yedi ayrı araştırma sorgusu yürütülmüştür. Kapsamı nedeniyle en çok başvurulmuş Scopus veritabanından İngilizce makaleler çıkarılmıştır. Paydaşlar özelinde sonuçlanan makaleler detaylı olarak analiz edilmiş, makalelerde ele alınan stratejiler malzeme, yapı ve şehir ölçeğinde analiz edildikten sonra paydaş odaklı bir bakış açısıyla Excel ortamında eşleştirilmiştir. Analiz sonucunda değerlendirilen makalelerdeki stratejiler, hem paydaş hem de ölçek özelinde listelenerek benzersiz numaralarla tanımlanmıştır. Bu tanımlanan CE stratejileri, benzeşen stratejilerin kökenini çözümlemek amacıyla Doğal Dil İşleme (*Natural Language Processing* - NLP) yöntemiyle analiz edilmiştir. Bu analiz süreci, en çok başvurulmuş stratejileri, bu stratejilerin ele alındığı ölçekleri ve hem strateji hem de ölçekte paydaşların kapsamını belirlemeye yardımcı olmuştur [15, 16].

Bu analiz sonucundan inşaat sektörünün döngüsel geçişinde (i) bazı paydaşların döngüsellikle daha çok eşleştirilmesi, bazı paydaşların da daha etkisiz görülmesi, (ii) döngüsellik stratejilerinin farklı ölçeklerde farklı yoğunluklara sahip olması, (iii) paydaşların farklı ölçeklerde farklı ağ örgülerine sahip olması nedenleriyle, döngüsel geçişi yönlendiren güncel çerçevelerden de yola çıkarak, inşaat sektörünün çok ölçekli doğasında paydaş bütünlüğünü sağlayacak çok-paydaşlı bir CE kavramsal çerçeve geliştirilmiştir. NLP yöntemiyle kökenlerine ayrılan stratejilerin sunduğu belirteçler, inşaat sektörünün döngüsel dönüşümünü hızlandırmak için 37 kritik başarı faktörü (*Critical Success Factors* – CSFs) altında kümelenmiştir. Kümelen bu CSFs, ürün, süreç ve insan odaklı bir geçişi mümkün kılmak amacıyla altı ana grupta toplanmıştır. Böylece, tüm paydaşların ortak hedeflere yönelik sinerjisini artırarak malzeme, yapı ve şehir ölçeğinde döngüsel bir inşaat sektörü yapılandırmak için kavramsal bir çerçeve geliştirilmiştir.

3. BULGULAR

3.1. Döngüsel Geçiş Yönlendiren Güncel Çerçeveler

CE üzerine yürütülen tartışmalar, son yıllarda farklı sektörlerde uygulanabilirliği artıracak kavramsal ve pratik çerçevelerin geliştirilmesine ivme kazandırmıştır. Bu çerçeveler, bir yandan yönetim yapılarının güçlendirilmesini hedeflerken diğer yandan uygulayıcılar, kent yönetimleri ve politika yapıcılar arasında döngüsellik uygulamalarının nasıl hayata geçirileceğine ilişkin ortak bir anlayış üretmeyi amaçlamaktadır.

Bu çerçeveler arasında EMF tarafından geliştirilen ve en çok başvurulan *ReSOLVE* yaklaşımı [17] döngüsel geçişi altı eylem alanı üzerinden somutlaştırarak “*regenerate, share, optimize, loop, virtualize, and exchange*” boyutlarını tanımlamıştır. *ReSOLVE*’un sunduğu bu yönlendirici perspektif, sektörel uyarlamaları da teşvik etmiştir. Bu doğrultuda ARUP’un Brand’ın *6S-Shearing Layers* modelini sistem düzeyiyle genişleten uyarlaması inşaat bağlamında mezo ve makro ölçekte ürün ve sistem odaklı stratejileri öne çıkarmıştır [18, 19]. Döngüsellik pratiklerinin hiyerarşik olarak sınıflandırılmasına dayanan yaklaşımlar ise daha çok “R” ilkeleri üzerinden şekillenmiştir. R-temelli yaklaşımlar, 10R hiyerarşisi üzerinden stratejileri “*refuse*”dan “*recover*”a uzanan bir süreklilikte sınıflandırarak döngüsellik düzeylerini daha sistematik biçimde tartışmaya açmaktadır [20, 21]. Böylece, döngüsel geçişin yalnızca teknolojik yenilikle açıklanamayacağı; inovasyonun yanında sosyo-kurumsal dönüşümün de gerekli olduğu vurgulanarak bu tartışma kurumsal kapasite ve yönetim eksenine taşınmıştır.

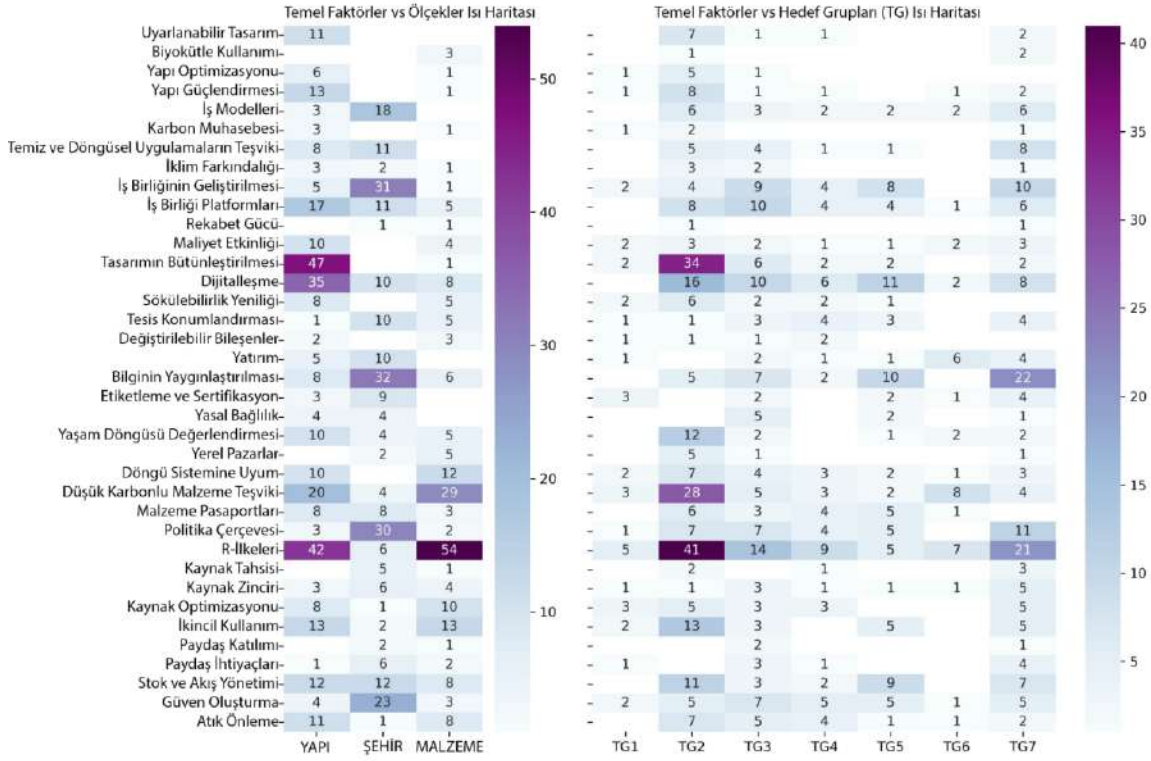
Küresel ölçekte bilgi paylaşımı ve uygulama yönlendirmesi sunmayı amaçlayan kuruluşlardan biri olan *Circle Economy* de, farklı aktörlere hitap eden birden fazla çerçeve ortaya koymuştur. *Circle Economy*’nin *KE* ve *DISRUPT* çerçeveleri, çekirdek ve kolaylaştırıcı öğeleri ayırıştırıp ürün geliştirmeye yönelik somut stratejileri derlerken [22, 23], *Circular City Actions* ve *Urban Policy* çerçeveleri döngüsellığı kent ölçeğinde politika kategorileri ve araç setleriyle yönetim eksenine taşımıştır [24, 25]. İşletme düzeyinde uygulamayı kolaylaştıran çerçeveler arasında ise *Value Hill*, döngüsellığı iş modeli dönüşümü ve değer zinciri konumlandırması üzerinden pratikleştirir [26]. Son dönemde çerçeve çeşitliliğini artıran girişimlerden biri de *World Economic Forum* (WEF) tarafından yayımlanan *LASER* yaklaşımıdır. *LASER* çerçevesi, tasarım inovasyonuna döngüsellik perspektifini entegre etmek için uyarlanabilir bir süreç sunar [27]. Bu yaklaşımlar birlikte okunduğunda, CE’nin yalnız teknik döngü optimizasyonu değil; paydaş beklentileri, davranışlar ve yönetim düzenekleriyle örülü, insan-merkezli bir dönüşüm gündemi olduğu ortak biçimde görünürleşmektedir.

Bununla birlikte, bu çerçevelerin tümü birlikte değerlendirildiğinde, mevcut çerçevelerin önemli bir kısmı döngüsellığı ağırlıkla teknik ve operasyonel stratejiler ile yönetim araçları üzerinden ele alırken, paydaşların algıları, değer çatışmaları ve dağıtımsal etkiler gibi sosyo-politik dinamikleri ikincil düzeyde işlemekte; bu da uygulamada kabul, meşruiyet ve davranışsal benimsemede sınırlılık yaratabilmektedir. Başka bir ifadeyle ister *ReSOLVE*’un eylem alanları, ister *LASER*’ın uyarlama odaklı planlaması, ister 10R hiyerarşisi olsun; sürdürülebilir etkinin, paydaşların algıladığı sorunlar ve beklentiler başlangıç noktası olarak ele alınmadan üretilmesi döngüsel geçişi zorlaştırmaktadır. Dolayısıyla CE, teknik döngülerin optimizasyonunun ötesinde, değerlerin, davranışların ve yönetim modellerinin hizalanmasını gerektirir. Bu nedenle mikro (malzeme), mezo (yapı) ve makro (şehir) ölçekleri arasında karşılıklı etkileşimi açıklayan ölçekler arası geri besleme mekanizmalarının ampirik olarak modellenmesi ve farklı aktörlerin hedeflerini kesiştiren “*co-benefits*” (ortak fayda) alanlarının ölçülebilir göstergelerle görünür kılınması kritik görünmektedir. Böyle bir yaklaşım, döngüsel ekonomiyi tüm paydaşlar için paylaşılan bir vizyona dönüştürerek, yalnızca atık ve kaynak yönetiminde değil; toplumsal refah ve ekolojik iyi oluşta da somut ilerlemeyi mümkün kılabilir.

3.2. Literatür Bulguları ve Kritik Başarı Faktörleri Tanımlanması

Döngüsel inşaat sektörü için özelleşmiş bir kavramsal çerçeve geliştirmek amacıyla birbirini takip eden bir dizi aşama yürütülmüştür. Bu aşamalardan ilkinde, Scopus veri tabanında yedi paydaş odaklı sistematik olarak yürütülen literatür araştırmasıyla İngilizce dilindeki makalelerin çıkarılmıştır. Literatür araştırması toplamda 112 nicel sonuç vermiş, bunların on yedi tanesi konuyla ilgisi olmadığı için kapsam dışı tutularak 95 ilgili makaleden oluşan bir külliyat elde edilmiştir. Elde edilen makalelerin kapsamı paydaş ve ölçek odaklı detaylı olarak analiz edildikten sonra makalelerden elde edilen döngüsel inşaatla yönelik stratejiler malzeme, yapı ve şehir ölçeklerinde paydaş odaklı haritalandırılmıştır. Bu haritalama sonucu, tasarım ekipleri ve politika yapıcılarda diğer paydaşlara göre daha fazla sonuç olduğu gözlenmiştir. Yapı ölçeğine yönelik stratejiler tasarım ekipleriyle ilgili sonuçlarda yoğunluk gösterirken, şehir ölçeğine yönelik stratejiler politika yapıcılarda yoğunluk göstermiştir. Malzeme ölçeğindeki stratejiler ise, aynı hedef gruptaki yapı ve şehir ölçeklerindekiyle kıyasla üreticiler ve yapı yıkım ve söküm ekipleri için daha fazla olmuştur [16].

Makalelerden çıkarılan stratejilerin Excel dokümanında haritalandırılmasının ardından NLP süreci için kullanılacak veri seti elde edilmiştir. Benzer stratejilerin rafine edilmesi amacıyla, kelime kökenlerine ayrıştırılması için yürütülen NLP yöntemi, toplamda 804 belirteç ortaya koymuştur. Bu belirteçlerden yola çıkarak, döngüsel inşaat sektörüne geçişi hızlandırmaya yönelik özelleşmiş, en yapıcı ve dönüştürücü etkiye sahip 37 CSFs tanımlanmıştır. Bu faktörler, elde edilen benzer belirteçlerin kümelenmesiyle oluşturulmuştur. 804 belirteci içeren ve döngüsel inşaat sektörüne geçiş için insan, ürün ve süreç odaklı bir yaklaşım sunan 37 CSFs'in paydaş ve ölçeklerdeki yoğunluğu Şekil 1'de gösterilmiştir.



TG1 | Yapı kullanıcıları; TG2 | Tasarım ekipleri; TG3 | Müteahhitler ve Yükleniciler; TG4 | Malzemeleri üreticileri; TG5 | Yıkım ekipleri; TG6 | Yatırımcılar, Geliştiriciler; TG7 | Düzenleyici kurumlar

Şekil 1. Ölçekler ve hedef grupları içinde kümelenmiş temel faktörlerin nicel dağılımı ([15, 16] çalışmalarından yazar tarafından adapte edilmiştir)

Bu sonuca göre, inşaat sektöründe en yaygın stratejilerin R-prensipleriyle ilgili olduğu sonucuna varılmıştır. Ardından, döngüsel tasarım prensipleriyle ilgili stratejilere daha çok başvurulurken, bunu döngüsel geçişi hızlandırmak için yasal düzeneklerin geliştirilmesi gerekliliğini vurgulayan politika çerçeveleri takip etmiştir. Bununla birlikte, düşük karbonlu yapı malzemeleri, biyokütle kullanımı, karbon muhasebesi, stok ve akış yönetimi ve paydaşların ihtiyaçlarını dikkate alarak, farkındalıklarını artırarak, kaynak tahsis ederek, yeni pazarları teşvik ederek paydaşları desteklemek de literatürden çıkarılan stratejilere örnek olmaktadır [16].

3.3. Çok Paydaşlı Döngüsel Ekonomi Kavramsal Modeli: REVERT Çerçevesi

Literatür araştırması sonucu derlenen döngüsel inşaata yönelik stratejilerde benzer ifadelerin kümelenmesiyle tanımlanan faktörler altı boyutta gruplandırılmıştır. Boyutların tanımlanmasında insan, süreç ve ürün odaklı bütüncül bir yaklaşım benimsenmiştir. Böylece, hem çevresel hem de sosyal ve ekonomik sürdürülebilirliğin öncüllemesi amaçlanmıştır. Bu boyutlar (i) kaynak ve malzeme (*Resource*), (ii) tasarım öngörüsü (*Envisagement*), (iii) doğrulama ve değerlendirme süreçleri (*Validation*), (iv) organizasyonel süreçler (*Entity*), (v) yasal düzenlemeler (*Regulation*) ve (vi) teknoloji entegrasyonuna (*Technology*) dayanmaktadır. Tanımlanan faktörlerin ilgili boyutlarla ilişkilendirilmesiyle REVERT çerçevesi geliştirilmiştir [15, 16]. Geliştirilen REVERT çerçevesi, inşaat sektörünün çok paydaşlı ve çok ölçekli bir ekosistem yapısına sahip olması nedeniyle, döngüsel bir inşaat sektörü için bütüncül bir paydaş katılımının gerekli olduğunu vurgulamaktadır. REVERT çerçevesinin boyutları aşağıda detaylandırılmıştır:

- *Resource* (kaynak ve malzeme) boyutu, kaynak ve malzemelerin verimli kullanımını hedefler. Çevresel ve ekonomik sürdürülebilirlik ilkelerine dayanan bu boyut, atıkları en aza indirmek için hem ikincil malzemelerin kullanımını hem de çevresel etkisi düşük (*low-carbon*) yenilikçi malzemelerin benimsenmesini teşvik etmektedir. İnşaat sektörü en çok ham madde tüketen endüstri olduğundan, bu boyut, malzeme ve kaynakların yaşam döngüsü boyunca verimli kullanımına yönelik kapsamlı bir “sorumlu malzeme yönetimi” yaklaşımının geliştirilmesinin önemini vurgular.
- *Envisagement* (tasarım öngörüsü) boyutu, döngüsel inşaat sektörünü önceliklendiren ve malzeme ve yapı bileşenlerinin tekrar kullanımını ve geri dönüşümünü mümkün kılan döngüsel tasarım stratejilerinin geliştirilmesini hedefler. Böylece, erken tasarım aşaması kararlarıyla tasarım sürecinden yapım sürecine, bina bakımından yıkım sürecine kadar bütün aşamalarda döngüsel bir yaklaşım benimsenebilir. Hem malzeme ve bileşenlerin tekrar kullanımını kolaylaştıran modüler ve uyarlanabilir yapı yaklaşımları, hem de fonksiyonel esnekliğini artırmak için mevcut yapı stoğunun yenilenmesi desteklenerek döngüsel inşaat sektörü sistematik olarak güçlendirilebilir.
- *Validation* (doğrulama ve değerlendirme süreçleri) boyutu, döngüsel performansın ölçülmesini, raporlanmasını ve sürekli iyileştirilmesini mümkün kılmayı amaçlamaktadır. Tüm teknik ve teknik olmayan aktörlerin entegrasyonunu sağlamak için karbon ayak izi hesaplamaları, karbon muhasebesi, malzeme ve stok akışı analizleri ve maliyet optimizasyonu gibi süreç odaklı faktörleri kapsamaktadır. Paydaşların bütüncül katılımıyla bu süreçlerin tüm değer ve tedarik zinciri boyunca yarattığı değerler çevresel, ekonomik ve sosyal sürdürülebilirlik kapsamında optimize edilebilir, titizlikle izlenebilir ve denetlenebilir.

- *Entity* (organizasyonel süreçler) boyutu, iş modeli ve insan odaklı dinamikleri kapsar. Yeni iş modellerini, yerel pazarları ve verimli bir tedarik zincirini teşvik etmeyi, iş birliğine dayalı ve rekabetçi bir pazar sağlamayı ve aktörler arasında verimli kaynak tahsisini destekler. Ayrıca, iklim değişikliği konusunda farkındalığı ve bilgiyi artırmaya yönelik girişimlerle davranışsal değişikliklerin mümkün kılınabileceğini savunarak, döngüsel dönüşümün sosyal kabulünü ve uygulanabilirliğini artırmaya odaklanır.
- *Regulation* (yasal düzenlemeler) boyutu, döngüsel inşaat sektörünün yasal düzenlemelerle desteklenebileceğini vurgulayarak paydaşların etkin bir şekilde benimsediği yol haritalarının, yasal düzenlemelerin ve kurumsal ve normatif çerçevelerin oluşturulmasına dayanır. Bu boyutun öncelikli amacı, paydaşları, işletmeleri ve ilgili kurumları lineer üretim ve tüketim modellerinden uzaklaştırarak sürdürülebilir ve yenileyici döngüsel uygulamalara geçişini sağlayacak düzenleme mekanizmaları geliştirmektir. Oluşturulan yasal altyapı ile döngüsel inşaat sektörüne yönelik stratejilerin ölçeklenebilirliğinin artırılacağı savunulmaktadır.
- *Technology* (teknoloji entegrasyonu) boyutu ise, yapı ve yapım süreçlerine ait tüm yaşam döngüsü boyunca kaynakların verimli kullanımını ve yönetimini sağlayan kapsamlı bir dijital altyapı geliştirilmesini desteklemektedir. Bu bağlamda, döngüsel dönüşüm süreçlerini hızlandırmak için BIM, GIS, malzeme veri tabanları, büyük veri analitiği, yapay zeka, dijital ikizler, blok zincirler, 3D-baskı ve robotik gibi dijital teknolojilerin ve yenilikçi çözümlerin kullanımını teşvik etmeyi amaçlamaktadır. Tüm süreçlerin eş zamanlı ve duyarlı bir şekilde yönetilmesiyle yüksek hassasiyetli veriler üretilerek döngüsel geçiş hızlandırılabilir.

REVERT çerçevesi, altı boyut arasında etkili koordinasyonu sağlamak için malzeme, yapı ve şehir ölçeklerinde paydaş katılımını güçlendirmeyi amaçlamıştır. Böylece, paydaşları her ölçeğe özgü rollerle sürece aktif olarak dahil ederek çok ölçekli ve çok paydaşlı katılım mekanizması geliştirilmiştir. Bu mekanizma, döngüsel inşaat sektörü için somut, ölçülebilir ve tekrarlanabilir bir dönüşüm süreci sağlayabilir. Tüm paydaşların ortak hedeflere yönelik sinerjisini artırmak, döngüsel inşaatla yönelik etkili ve sürdürülebilir bir dönüşümü optimize edebilir [16, 28].

4. SONUÇLAR

İnşaat sektöründeki yoğun yapılaşma faaliyetlerinin ve yapıların operasyonel süreçlerinin çevre üzerinde oluşturduğu baskı bugün tartışılması ve çözülmesi gereken bir boyuta ulaşmıştır. Bu noktada, lineer ekonomi modeline alternatif bir paradigma olarak anlam kazanan CE kavramının kapsamı ve uygulama stratejileri, araştırmacılardan uygulayıcılara, karar vericilerden kullanıcılara kadar inşaat sektörünün farklı paydaşları tarafından tartışılmaktadır. Döngüsel inşaatla yönelik artan literatür çalışmaları, farklı bileşenler, farklı ölçekler ve farklı paydaşlar kapsamında yenilikçi ve uygulanabilir stratejiler sunduğu gibi, doğası gereği karmaşık ve dağınık ilişkilere sahip olan inşaat sektöründe tekil boyutta kalabilmektedir.

Çok paydaşlı ve çok katmanlı inşaat sektöründe döngüsel bir geçiş için bütün paydaşların ortak değerlerle ve anlayışla faaliyetlerine yön vermesi paydaş birlikteliğinin sağlanmasıyla mümkündür. Ancak, döngüsel geçişi yönlendiren mevcut çerçevelerin kapsamına bakıldığında, paydaş birlikteliğinin önemi göz ardı edilmektedir. Bu nedenle bu çalışma, AB tarafından

tanımlanan yedi ana paydaşı temel alarak, inşaat sektöründeki paydaş odaklı CE stratejilerini literatüre dayalı olarak derlemiştir. Derlenen çalışmalarda sunulan ve önerilen döngüsel inşaatla yönelik stratejiler paydaş ve ölçek odaklı olarak listelenmiş ve sonuçlanan stratejiler NLP yöntemiyle kökenlerine ayrılarak kapsamlı bir derleme yöntemi takip edilmiştir. Stratejilerin NLP yöntemiyle analizi sonucu elde edilen belirteçler, döngüsellik anlayışının genel olarak R-odaklı prensiplere dayandığını, paydaş birlikteliği, maliyet optimizasyonu gibi temellenmiş stratejilerin ise nispeten düşük yoğunlukta kaldığını göstermiştir. Ayrıca, tasarım ekipleri, malzeme üreticileri, karar vericiler gibi paydaşlar döngüsel inşaat için en çok başvurulmuş paydaş grupları iken, yıkım ekipleri, kullanıcılar, geliştiriciler gibi paydaşlar düşük etkili paydaşlar olarak sonuçlanmıştır. Bu bağlamda, NLP sonucu elde edilen belirteçlerin benzerliklerine göre kümelenerek döngüsel inşaat sektörüne geçişi hızlandıracak 37 CSFs tanımlanmıştır. Bu noktada, elde edilen bulgulara dayalı olarak geliştirilen inşaat sektörünün döngüsel dönüşümü için çok paydaşlı döngüsel ekonomi kavramsal REVERT çerçevesi sunulmuştur. Sadece çevresel değil, ekonomik ve toplumsal sürdürülebilirliğin de sağlanması gerekliliğinin altını çizerek ürün, süreç ve insan odaklı bir bakış açısıyla geliştirilen kavramsal REVERT çerçevesi, sektörün döngüsel dönüşümü için paydaşların malzeme, yapı ve şehir ölçeğinde birliktelik anlayışının geliştirilmesi gerektiğini vurgular.

Literatürden derlenen döngüsel inşaatla yönelik stratejileri paydaş ve ölçek odaklı analiz ederek döngüsel inşaat için çok paydaşlı bir geçiş modeli sunan bu çalışmanın sonuçları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Paydaş odaklı döngüsellik stratejileri malzeme, yapı ve şehir ölçeklerinde listelenmiştir,
- Listelenen stratejiler, NLP ile kökenlerine ayrıştırılmıştır,
- Kökenlerine ayrıştırılan benzer ifadeler 37 CSFs olarak kümelenmiştir,
- Paydaş ve ölçeklerde bütüncül bir bakış açısı oluşturmak için 37 CSFs altı ana boyutta gruplandırılmıştır,
- Altı ana boyuttan yola çıkarak kavramsal REVERT çerçevesi tanımlanmıştır.

Bu çalışmanın sonuçları, karmaşık ilişkilere ve çok paydaşlı bir ekosisteme dayanan inşaat sektöründe döngüsel dönüşümü başarılı kılmak için birçok farklı paydaşın ortak fayda elde etmeye yönelik bütünleştirilmesi gerekliliğini savunmaktadır. Bu sava yönelik geliştirilen REVERT çerçevesi kavramsal bir model olmakla beraber, sektör özelinde geliştirilmiş yenilikçi bir modeldir. Böylelikle model, sektör paydaşlarının döngüsel dönüşümdeki rollerini daha net biçimde kavramalarına ve geleceğe dönük gelişim ve uygulama stratejilerini şekillendirmelerine katkı sunmayı amaçlamaktadır. Önerilen REVERT çerçevesi, yapı ölçeğinde özellikle erken tasarım kararlarının çevresel etkilerinin sistematik biçimde ele alınmasına katkı sunmaktadır. Çerçeve; malzeme seçimi, bileşenlerin sökülebilirlik ve yeniden kullanım potansiyeli, bakım-yenileme kurgusu, yaşam döngüsü boyunca performansın korunması ve yaşam sonu senaryolarının değerlendirilmesi gibi karar alanlarında paydaşlar arası koordinasyonu desteklemektedir. Bu yönüyle REVERT, fiziksel çevre kontrolü bağlamında yapı kabuğu, malzeme sistemi ve kullanım sürecine ilişkin kararların yalnızca anlık performans değil, yaşam döngüsü temelli çevresel çıktıların iyileştirilmesi açısından da değerlendirilmesine imkân vermektedir.

KAYNAKLAR

1. Galimshina, A., Moustapha, M., Hollberg, A., Lasvaux, S., Sudret, B., & Habert, G. (2024). Strategies for robust renovation of residential buildings in Switzerland. *Nature Communications* 2024 15:1, 15(1), 1–12.

<https://doi.org/10.1038/s41467-024-46305-9>

2. Priore, Y. D., Habert, G., & Jusselme, T. (2023). Exploring the gap between carbon-budget-compatible buildings and existing solutions – A Swiss case study. *Energy and Buildings*, 278, 112598. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2022.112598>
3. UNEP. (2024). *Global Status Report for Buildings and Construction: Beyond foundations: Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector*. Nairobi. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/45095>
4. EEA. (2024). *Buildings and Construction*. 2023. https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/sustainability/buildings-and-construction_en
5. UN. (2015). Paris Agreement. In *United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)*. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>
6. Brundtland, G. (1987). Our common future: Report of the 1987 World Commission on Environment and Development (pp. 1–59). *Oslo: United Nations*.
7. EMF. (2013a). *Towards a circular economy: economic and business rationale for an accelerated transition*. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications/towards-the-circular-economy-vol-1-an-economic-and-business-rationale-for-an-accelerated-transition>
8. EC. (2015). Closing the Loop - An EU Action Plan for the Circular Economy. In *Brussels*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52015DC0614&from=EN>
9. EMF. (2013b). *Towards the circular economy: opportunities for the consumer goods sector*. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications/towards-the-circular-economy-vol-2-opportunities-for-the-consumer-goods-sector>
10. EMF. (2015a). *Towards a circular economy: business rationale for an accelerated transition*. Ellen MacArthur Foundation London. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications/towards-a-circular-economy-business-rationale-for-an-accelerated-transition>
11. Weigend Rodríguez, R., Pomponi, F., Webster, K., & D’Amico, B. (2020). The future of the circular economy and the circular economy of the future. *Built Environment Project and Asset Management*, 10(4), 529–546. <https://doi.org/10.1108/BEPAM-07-2019-0063>
12. Eberhardt, L. C. M., Birgisdottir, H., & Birkved, M. (2019). Potential of Circular Economy in Sustainable Buildings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 471(9). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/471/9/092051>
13. Hart, J., Adams, K., Giesekam, J., Tingley, D. D., & Pomponi, F. (2019). Barriers and drivers in a circular economy: The case of the built environment. *Procedia CIRP*, 80, 619–624. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.12.015>
14. EC. (2020). *Circular Economy - Principles for Building Design*. <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/39984>
15. Bostancı, H. B., Tanyer, A. M., & Habert, G. (2025). *REVERT Framework: Stakeholder Perspective to Enable Circular Transformation of Construction Industry*. 1039–1049. https://doi.org/10.1007/978-3-031-69626-8_87
16. Bostancı, H. B., Tanyer, A. M., & Habert, G. (2024). A multi-stakeholder engagement framework for material-building-city synergy through circular transformation. *Sustainable Cities and Society*, 116, 105892. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2024.105892>
17. EMF. (2015b). *Delivering the circular economy: a toolkit for policymakers*. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/a-toolkit-for-policymakers>

18. Brand, S. (1995). *How buildings learn: What happens after they're built*. New York, USA: Penguin Books.
19. Zimmann, R., O'Brien, H., Hargrave, J., & Morrell, M. (2016). *The circular economy in the built environment*. Arup: London, UK.
20. RLI. (2015). *Circular economy: from wish to practice Council for the Environment and Infrastructure*. <https://en.rli.nl/publications/2015/advice/circular-economy-from-wish-to-practice>
21. Potting, J., Hekkert, M. P., Worrell, E., & Hanemaaijer, A. (2017). *Circular economy: measuring innovation in the product chain*.
22. Circle Economy. (n.d.-b). *The key elements of the circular economy - Circle Economy*. Retrieved July 31, 2024, from <https://www.circle-economy.com/circular-economy/key-elements>
23. Circle Economy. (n.d.-a). *The DISRUPT framework*. Retrieved July 14, 2025, from <https://www.circle-economy.com/resources/the-disrupt-framework>
24. Novak, M., Robinson, B., Russell, M., Greco, A., Guénard, M., Hoffmann, C., Horn, O., Burcu, T., Corbin, E., Ritter, F., Streefland, T., Kuch, A., O'carroll, S., O'rourke-Potocki, H., Newton, J., Tulac, M., & Tokareva, O. (2021). Circular City Actions Framework. *ICLEI-Local Governments for Sustainability*, 1–20. www.iclei.org
25. Circle Economy. (n.d.-c). *The Urban Policy Framework*. <https://www.circle-economy.com/resources/the-urban-policy-framework>
26. Achterberg, E., Hinfelaar, J., & Bocken, N. (2016). Master Circular Business with the Value Hill. *Circle Economy, Nuovalente, Sustainable Finance Lab and TU Delft*. <https://www.circleeconomy.com/wp-content/uploads/2016/09/finance-white-paper-20160923.pdf>
27. WEF. (2023). *Designing innovations for the circular economy*. <https://www.weforum.org/stories/2023/03/designing-innovations-circular-economy/>
28. Bostancı, H. B., & Tanyer, A. M. (2025). NLP-based Social Network Analysis of the Construction Stakeholders Through Shared Circular Economy Strategies. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1554(1), 012011. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1554/1/012011>

AHŞAP YAPILARIN İNŞA SÜRECİNDE NEM ETKİSİ VE NEMİN DAYANIKLILIK ÜZERİNE ETKİLERİ

Mehmet Kara^{1*}

Zehra Canan Girgin²

^{1,2} YTÜ Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Taşıyıcı Sistemler Araştırma Grubu
Yıldız Kampüsü, Beşiktaş, İstanbul, 34349

ÖZET

Ahşap ve endüstriyel ahşap yapı elemanlarının servis ömrü ve yapısal etkinliği, nem içeriği ile doğrudan ilişkilidir. Artan yağış şiddeti, bağıl nem değişimleri ve iklimsel belirsizlikler, özellikle inşaat sürecinde ahşap elemanların maruz kaldığı nem koşullarını daha kritik hale getirmektedir. Ahşabın higroskopik yapısı nedeniyle nem artışı, boyutsal değişim, dayanım kaybı, birleşim etkinliğinde düşüş ve ayrılma (delaminasyon) riskinin yükselmesi gibi sonuçlar doğurmaktadır. Bu çalışmada ahşap yapılarda nem davranışı, servis sınıfları, nem gradyanı ve ıslanma-kuruma döngülerinin mekanik etkinlik üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. CLT ve glulam elemanlarda nem kaynaklı hasar mekanizmaları incelenmiş ve inşaat sürecindeki nem maruziyeti özel bir risk alanı olarak tartışılmıştır. Çalışma kapsamında ayrıca şantiye uygulamalarına yönelik bütüncül bir nem yönetim planı çerçevesi önerilmiştir. Bulgular, inşaat sürecinde sistematik nem kontrolünün uzun dönem dayanıklılık ve etkinlik açısından belirleyici olduğunu göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Endüstriyel ahşap ürünler, Nem yönetimi, İnşaat süreci, CLT, Glulam, Nem etkinliği

MOISTURE EXPOSURE DURING THE CONSTRUCTION OF TIMBER STRUCTURES AND ITS EFFECTS ON DURABILITY

ABSTRACT

The service life and structural performance of timber and engineered wood products are directly related to moisture content. Rainfall intensity and climate variability make moisture exposure during construction more critical. Due to the hygroscopic nature of wood, increased moisture leads to dimensional changes, strength reduction, decreased joint performance, and higher delamination risk in laminated members. This study evaluates moisture behavior of timber structures and examines the effects of service classes, moisture gradients, and wetting-drying cycles on performance. Moisture-related damage mechanisms in CLT and glulam are discussed, with particular focus on construction-phase exposure. In addition, a moisture management plan for construction practice is proposed. The results indicate that systematic moisture control during construction is decisive for long-term durability and performance.

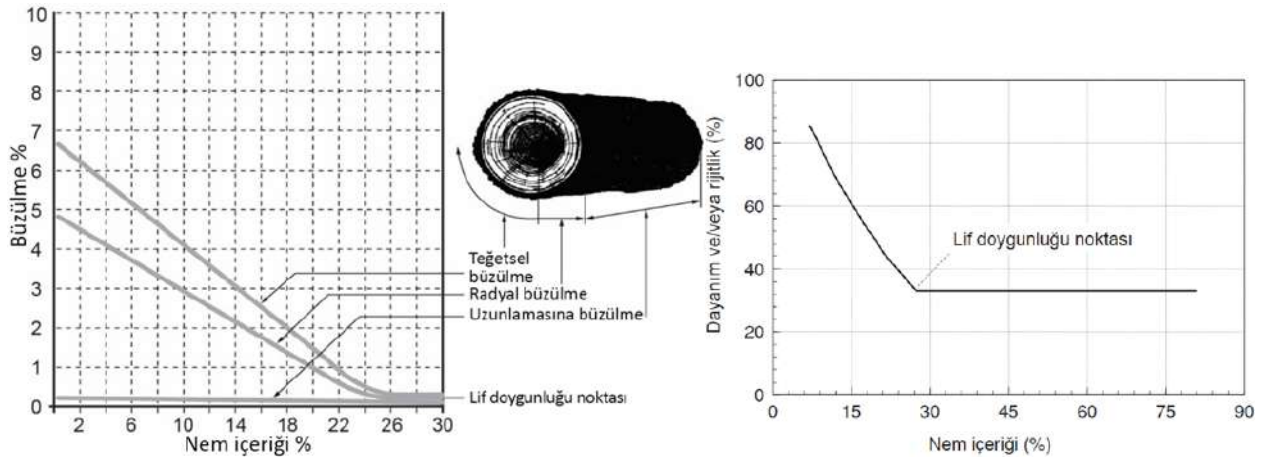
Keywords: Engineered wood products, Moisture management, Construction phase, CLT, Glulam, Moisture performance

^{1*} mehmet.kara@yildiz.edu.tr

1. GİRİŞ

Ahşap, düşük karbon ayak izi, yüksek özgül dayanım ve yenilenebilir kaynak niteliği nedeniyle sürdürülebilir yapı üretiminde giderek daha fazla tercih edilen bir taşıyıcı sistem malzemesidir. Endüstriyel ölçekte geliştirilen Çapraz Lamine Ahşap (CLT, *Cross Laminated Timber*) ve Tutkallı Lamine Ahşap (*Glulam*) gibi elemanlar, büyük açıklık geçebilme, prefabrikasyon ve hızlı montaj gibi avantajları sayesinde çok katlı yapılarda da yaygın biçimde kullanılmaya başlanmıştır. Ancak ahşap ve kompozit ahşap ürünlerin servis ömrü ve etkinliği, diğer yapı malzemelerine kıyasla nem koşullarına daha duyarlıdır.

Ahşabın higroskopik yapısı, çevresel bağıl nem ve sıcaklık koşullarına bağlı olarak sürekli nem hareketine neden olur. Nem içeriğindeki değişimler; lif yönüne paralel ve dik doğrultularda farklı oranlarda şişme ve büzülme davranışı oluşturur, bu durum boyutsal stabiliteyi ve birleşim davranışını doğrudan etkiler [1]. Lif doygunluğu noktasına kadar artan nem içeriği, dayanımda azalmaya neden olur (Şekil 1).



Şekil 1. Eksen yönleri ve nem içeriğine bağlı olarak farklı doğrultularda meydana gelen değişimler [2] ve nem içeriği dayanım ilişkisi [3]

Ahşap yapılarda nem etkisi, ısı, hava ve buhar taşınımıyla da doğrudan ilişkilidir. Nem iletim mekanizmaları ve kuruma potansiyeli birlikte ele alındığında, inşa süreci koşulları uzun dönem etkinlik üzerinde kritik rol oynar [4]. İnşa süreci, yapı kabuğunun henüz tamamlanmadığı ve ahşap elemanların doğrudan çevresel etkiler altında kaldığı bir aşama olması nedeniyle, nem etkisinin en kontrolsüz olduğu dönemdir. Bu aşamada oluşan ıslanma, malzemenin başlangıç nem durumunu belirler ve uzun dönem etkinliği doğrudan etkiler. Araştırma kapsamında ahşap ve endüstriyel ahşap yapı elemanlarında nem etkisi, malzeme davranışı ve servis koşulları bağlamında ele alınmaktadır. İnşa sürecinde ortaya çıkan nem kaynakları ve dayanıklılık üzerindeki etkiler tartışılarak, literatürde yer alan koruma yaklaşımlarını bütünleştiren, şantiye sürecine entegre edilebilir bir nem yönetim planı önerilmektedir.

2. NEM İÇERİĞİNİN MEKANİK DAVRANIŞ VE TASARIM PARAMETRELERİNE ETKİSİ

Ahşap yapı elemanlarının mekanik etkinliği, malzeme türü ve kesit özelliklerinin yanında maruz kaldığı nem düzeyi ve yükleme süresine de bağlıdır. Ahşap yapı standartlarında dayanım değerleri, çevresel koşullar ve zaman etkisini içeren düzeltme katsayıları ile ele alınmaktadır.

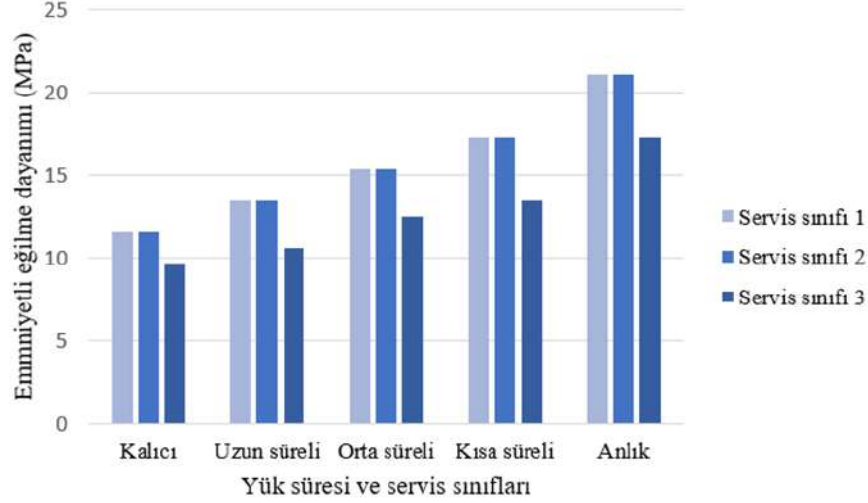
Eurocode 5’de [3], ahşap elemanların tasarım dayanımı; karakteristik dayanım değerinin, yük süresi ve nem koşullarını temsil eden uygulama katsayıları ile düzeltilmesi esasına dayanır. Tasarım dayanımı, karakteristik dayanımın bir modifikasyon katsayısı (k_{mod}) ile çarpılması ve malzeme kısmi güvenlik katsayısına bölünmesi ile elde edilerek, nem değişimi ve yük süresinin dayanım üzerindeki azaltıcı etkisini tasarım değerine yansıtır. Ahşap elemanların nem içeriği, ortam sıcaklığı ve bağıl nem koşullarına bağlı olarak denge nem içeriği (*Equilibrium Moisture Content – EMC*) değerine doğru değişim gösterir [5]. EMC kavramı, çevresel koşullar ile malzeme nem durumu arasındaki dengeyi tanımlar ve tasarım servis sınıfları ile ilişkilidir.

Standartta çevresel koşulları temsil etmek üzere üç Servis Sınıfı tanımlanmıştır. Servis Sınıfı 1, düşük bağıl nem ve yaklaşık %12’nin altında denge nem içeriğine sahip iç mekân koşullarını; Servis Sınıfı 2, daha yüksek bağıl nem ve orta düzey nem içeriğini; Servis Sınıfı 3 ise dış ortam etkilerine açık ve %20’nin üzerinde nem içeriğinin oluşabileceği koşulları temsil eder [3] (**Çizelge 1**). Servis sınıfı arttıkça Eurocode 5 kapsamında kullanılan modifikasyon katsayısı (k_{mod}) azalır ve buna bağlı olarak tasarım dayanımı düşmektedir.

Çizelge 1. Servis sınıflarının karşılaştırması

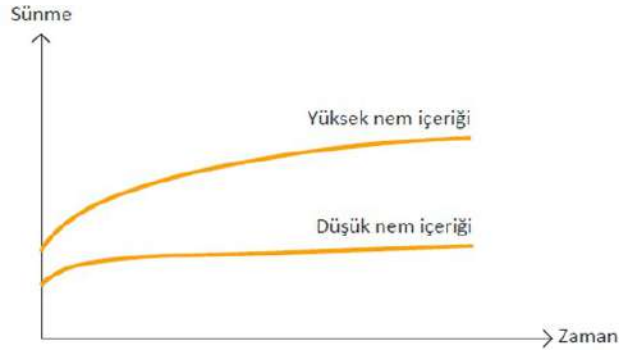
Servis Sınıfı	Bağıl Nem	Denge Nem İçeriği	Tasarım Dayanım Düzeyi
SC1	düşük	~%12	yüksek
SC2	orta	~%15–18	orta
SC3	yüksek	>%20	düşük

Lif doygunluğu noktasına kadar artan nem içeriği ile eğilme, çekme ve basınç dayanımlarında belirgin düşüşler oluşur. Servis sınıfı 3 koşullarında çalışan elemanlarda, kuru koşullara kıyasla yaklaşık %15–25 mertebesinde dayanım azalması oluşabileceği raporlanmaktadır [6]. Servis sınıfı tanımları, çevresel nem koşullarının tasarım parametresine dönüştürülmüş halidir. Böylece ortam bağıl nemi ve beklenen malzeme nem içeriği, doğrudan taşıyıcı sistem tasarımına eklenir. Karakteristik eğilme dayanımı 24 MPa olan bir glulam kiriş için, yük süresi ve servis sınıfına bağlı dayanım değişimi bu çalışma kapsamında **Şekil 2**’de grafiksel olarak gösterilmiştir. Yük süresi arttıkça ve servis sınıfı yükseldikçe eğilme dayanımında belirgin bir azalma meydana gelirken, nem içeriğinin %20’den büyük olduğu Servis sınıfı 3’te eğilme dayanımında ortalama ~%20 azalma görülmektedir.



Şekil 2. Yük süresi ve servis sınıflarına göre eğilme dayanımındaki değişim

Nem içeriği yalnızca anlık dayanımı değil, zamana bağlı şekil değiştirme davranışını da etkiler. Ahşap viskoelastik karakterli bir malzemedir ve sabit yük altında zamanla artan şekil değiştirmesi sünme olarak tanımlanır. Nem düzeyi yükseldikçe sünme şekil değiştirmenin büyüklüğü de artar. Nem değişkenliğinin yüksek olduğu koşullarda şekil değiştirme artışı daha belirgin hale gelmektedir (Şekil 3).



Şekil 3. Farklı nem seviyelerinde ahşap kirişte meydana gelen sünme [6]

Sabit nem koşullarındaki sünme viskoelastik sünme, değişken nem koşullarındaki ek şekil değiştirme ise mekanosorptif sünme olarak tanımlanır. Tasarım hesaplarında sünme etkisi, servis sınıfına bağlı tanımlanan sünme katsayısı (k_{def}) ile hesaba katılır [7]. Özellikle yüksek nem değişkenliğine maruz kalan elemanlarda uzun dönem yer değiştirmeleri, servis sınır durumları açısından kritiktir.

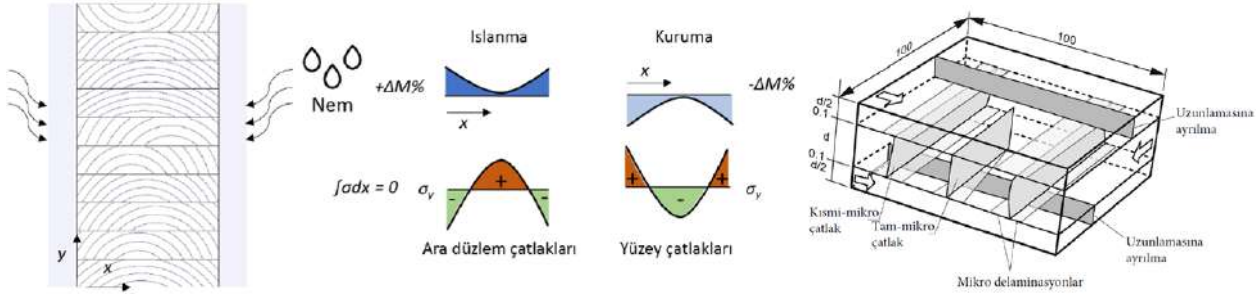
3. AHŞAP ELEMANLARDA NEM VE DAYANIKLILIK İLİŞKİSİ

CLT ve glulam gibi endüstriyel ahşap ürünler, üretim teknikleri, katmanlaşma biçimleri ve yük taşıma davranışları açısından farklılık gösterir. CLT paneller, birbirine dik doğrultuda yerleştirilen katmanlardan oluşarak iki yönlü yük aktarımına olanak sağlarken; glulam elemanlar lif yönüne

paralel lamellerin yapıştırılması ile yüksek eğilme dayanımı sunar. Bu elemanlarda kullanılan tutkal türleri (fenol-resorsinol formaldehit (PRF), melamin üre formaldehit (MUF) ve poliüretan (PUR)) ile üretim koşulları, nem etkisi altındaki etkinliği belirleyen temel parametrelerdir.

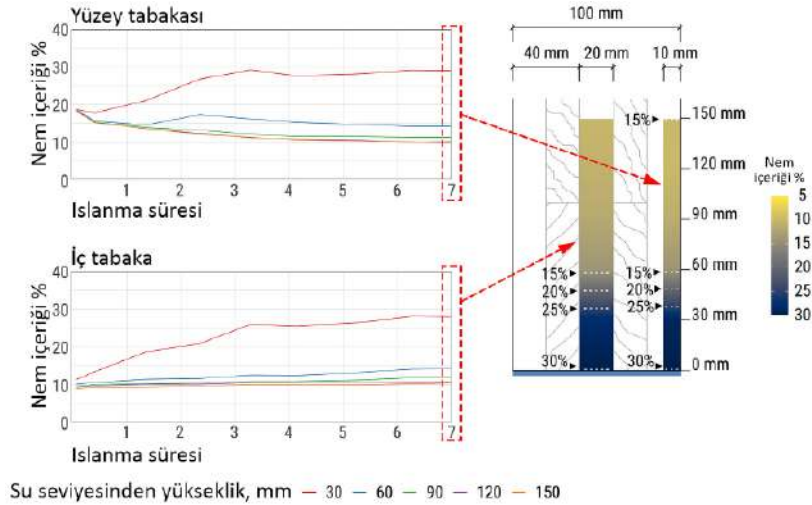
Çok katmanlı bu kompozit yapı, nem etkisi altında masif ahşaptan farklı ve daha karmaşık bir davranış sergiler. Nem değişimleri sonucunda kesit içinde oluşan nem gradyanı, tabakalar arasında farklı şişme ve büzülme davranışlarına yol açarak liflere dik doğrultuda çekme gerilmeleri oluşturur. Bu gerilmeler, tutkal ara yüzeylerinde birikerek ıslanma–kuruma döngüleri altında ayrılma (*delaminasyon*) riskini artırır. Söz konusu mekanizma şematik olarak **Şekil 4**'de gösterilmiştir. Burada, x doğrultusu liflere paralel, y doğrultusu ise liflere dik yönü temsil etmektedir. Nem içeriğindeki değişim ΔM (%) ile ifade edilmekte olup kesit boyunca homojen olmayan dağılım, iç bölgeler ile yüzey arasında farklı şekil değiştirmelere neden olur. ıslanma durumunda kesit iç bölgelerinde çekme gerilmeleri oluşarak ara düzlem çatlaklarına; kuruma durumunda ise yüzeyde çekme gerilmeleri oluşarak yüzey çatlaklarına yol açar.

Tutkal türü, yüzey hazırlığı ve presleme koşulları, nem etkisi altındaki birleşim etkinliğini belirleyen temel parametrelerdir. Yapıştırma kalitesi yüzey nemi, yüzey enerjisi ve yüzey işlemlerine duyarlıdır ve yüksek nem içeriğine sahip ahşap yüzeylerde aderans etkinliği düşmektedir [11]. Hidrofobik ekstraktif oranı yüksek bazı ağaç türlerinde ise su bazlı tutkallarla zayıf bağ hatları oluşabileceği belirtilmektedir [12].



Şekil 4. Nem değişimlerine bağlı olarak ara düzlemde ve kuruma ile yüzeyde oluşan çekme gerilmeleri [9] ve ayrılma noktaları [10]

CLT paneller üzerinde yapılan deneysel çalışmalar, özellikle kenar bölgelerinin nem alımına daha açık olduğunu göstermektedir. Kenar kesitlerde liflere dik doğrultuda açık hücre yapısı bulunması nedeniyle kılcal su emilimi hızlanır ve panel kalınlığı boyunca nem gradyanı oluşabilmektedir. Kenar ıslanmasına maruz bırakılan çok katmanlı CLT numunelerinde, yüzeye yakın bölgelerde nem içeriğinin lif doygunluğu seviyesine ulaşabildiği, iç katmanlarda ise daha düşük kaldığı ölçülmüştür. Şekil 5'te, CLT kesiti boyunca oluşan nem gradyanı, panel kesiti boyunca şekil değiştirme ve gerilme oluşumuna zemin hazırlar.



Şekil 5. CLT numunenin yüzeyinde ve iç katmanlarında ölçülen ortalama nem içeriği [13]

Nem etkisi, ahşap katmanları ve tutkal hatlarının yanı sıra metal birleşim elemanlarını da etkiler. Yüksek nem düzeyi ve tekrarlayan ıslanma koşulları, bağlantı elemanlarında korozyon riskini artırarak birleşim kapasitesinde azalma ve gevrek kırılma olasılığında artışa neden olur [14]. Nem maruziyeti yüksek servis koşullarında birleşim detayları ayrıca korunmalıdır. Artan nem içeriği yalnızca korozyon riskini arttırmakla kalmayıp, vidalı ve çivili bağlantılarda sıyrılma direncinin (*withdrawal resistance*) azalmasına da neden olur [15]. Bu durum, birleşimlerin yük aktarım kapasitesini düşürerek sistem davranışı üzerinde belirleyici rol oynamaktadır.

Endüstriyel ahşap elemanlarda nem etkisi çoğunlukla bölgesel başlar. Yeterli kuruma sağlanmadığında hasar kesit geneline yayılabilir. Tasarım ve uygulama aşamasında, nem giriş yolları sınırlandırılmalı ve kuruma potansiyeli artırılmalıdır.

4. AHŞAP YAPILARDA NEM KAYNAKLARI VE İNŞA SÜRECİ MARUZİYETİ

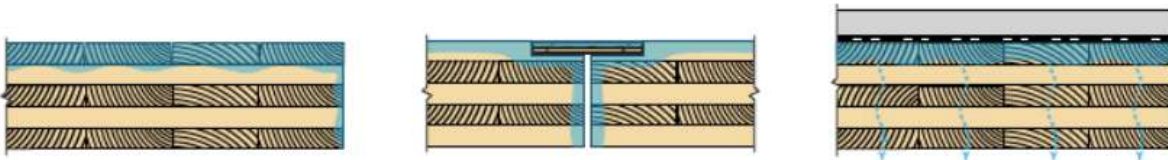
Ahşap yapılarda nem kaynakları genel olarak üretim, taşıma, depolama, inşaa ve kullanım aşamaları altında sınıflandırılmaktadır (Şekil 6). Üretimde yüksek başlangıç nemi ve ortam koşulları; taşıma ve depolamada yağış ve zemin teması; inşaa sürecinde doğrudan yağmur, kar ve yüzey suları; kullanım aşamasında ise tesisat kaçakları ve yoğunlaşma başlıca risk bileşenleri olarak tanımlanır [16]. Bu sınıflandırma içerisinde özellikle inşaa süreci, yapı kabuğunun henüz tamamlanmamış olması nedeniyle kontrolsüz nem maruziyetinin en etkili olduğu aşamadır. Bu aşamada oluşan ıslanma, çoğu durumda kullanım sürecinden önce kritik düzeye ulaşır ve yapı elemanlarının başlangıç nem koşullarını belirler.



Şekil 6. İslanma kaynakları [16]

Yapı kabuğu sistemlerinde nem hareketi; buhar difüzyonu, kapiler taşınım ve hava sızıntısına bağlı nem taşınımı olmak üzere üç temel mekanizma ile gerçekleşir. Katman düzeni, buhar difüzyon direnci ve yüzey geçirgenliği, kabuğun hem ıslanma riskini hem de kuruma potansiyelini belirler [17]. Buhar difüzyon direnci yüksek dış katmanların erken uygulanması veya çift taraflı buhar kesici etkisi oluşturan kesit çözümleri, inşa sürecinde bünyeye giren nemin dışarı atılmasını zorlaştırarak ve kesit içinde nem birikimi riskini arttırmaktadır [18].

Ahşap esaslı panellerde su girişi çoğunlukla kenar kesitler ve birleşim bölgelerinden gerçekleşir. Liflere dik doğrultudaki açık hücre yapısı nedeniyle bu bölgelerde kapiler su emilimi hızlanmakta, panel kalınlığı boyunca nem gradyanı oluşabilir. Birleşim detaylarında yer alan boşluklar, yivler ve tolerans aralıkları su tutulumuna neden olarak, homojen olmayan nem dağılımları oluşturur (Şekil 7).



Şekil 7. Ahşap yapı elemanlarının, birleşimlerin su girişi [19]

Kuruma potansiyeli, nem güvenliği açısından ıslanma kadar belirleyici bir etmendir. Masif ahşap ve glulam elemanlar görece daha hızlı kuruyabilirken, çok katmanlı ve yüzeyleri kapalı panel sistemlerinde kuruma süresi uzayabilmektedir. Prefabrike kabuk sistemlerinde buhar geçiş yollarının sınırlı olması durumunda, nemin kesit içinde hapsolme riskini artırır [17].

İnşa sürecinde eleman bünyesine giren ve yapı kabuğu kapatıldıktan sonra kesit içinde kalan nem, literatürde “inşaat nemi” (*built-in moisture*) olarak tanımlanır. Yeterli kuruma sağlanmadan kaplama ve yalıtım katmanları içinde hapsolan bu nem; küf gelişimi, biyolojik bozulma, tutkal hatlarında zayıflama ve uzun dönem dayanıklılık kaybı riskini arttırmaktadır. CLT ve glulam

elemanlar üzerinde yapılan saha ölçümleri ve higrotermal modelleme çalışmaları, şantiye sürecindeki ıslanmanın kuruma süresini önemli ölçüde uzattığını göstermektedir [20], [21].

5. ŞANTIYE SÜRECİNDE NEM YÖNETİMİ

Bu bölümde, literatürde yer alan koruma yaklaşımlarından yararlanılarak, inşa sürecine özgü nem maruziyetini kontrol etmeye yönelik bütüncül bir nem yönetim planı önerilmektedir. Önerilen yaklaşım; yalnızca genel prensipleri değil, şantiye sürecinde uygulanabilir kontrol adımlarını da içeren sistematik bir çerçeve sunmaktadır.

İnşa sürecinde nem etkisi riskini azaltmaya yönelik çeşitli tasarım ve uygulama stratejileri, su girişini sınırlama ve kuruma potansiyelini artırma ilkesine bağlı olarak tanımlanmıştır [4]. Nem kontrolü tasarım aşamasında başlatılmalı, yatay yüzeylerde su birikimini önleyen eğim ve drenaj kararları, kenar ve birleşim detaylarında su girişini sınırlayan çözümler ve geçici koruma sistemleri proje kapsamında tanımlanmalıdır. Şantiye süresinin kısaltılması ve elemanların açıkta kalma süresinin sınırlandırılması da riskin azaltılmasına yardımcı olmaktadır. Nem ölçümü ve izleme uygulamaları, özellikle yüksek riskli projelerde önerilen kontrol araçlarıdır. Kaplama ve bohçalama katmanlarının uygulanmasından önce eleman nem düzeyinin kontrol edilmesi gerekmektedir [22].

Ahşap yapılarda nem kaynaklı etkinlik kayıplarının önemli bir bölümü, inşa sürecinde gerçekleşen kontrolsüz ıslanma olayları ile ilişkilidir. Literatürde nemden korunmaya yönelik çok sayıda öneri bulunmakla birlikte, bunlar çoğunlukla dağınık teknik notlar halinde sunulmaktadır. Çalışma kapsamında, şantiye sürecine entegre edilebilecek bütüncül bir nem yönetim planı çerçevesi önerilmektedir. Bu nem yönetim planı, ön risk değerlendirmesi, tasarım kararları, uygulama kontrolü ve izleme adımlarından oluşmakta olup, bu yapı **Çizelge 2**'de özetlenmiştir.

Nem yönetimi, yalnızca geçici bir şantiye koruma önlemi değil, yapı kabuğunun uzun dönemli higrotermal etkinliğini ve dayanıklılığını belirleyen temel bir tasarım ve uygulama parametresidir.

Çizelge 2. İnşa süreci nem yönetim planı çerçevesi (derlenmiştir) [4], [7], [19], [22], [23]

Ön Risk Değerlendirmesi	- Proje bölgesinin yağış ve bağıl nem rejimi - Mevsimsel inşaat takvimi - Yapı kabuğunun tamamlanma süresi - Açıkta kalacak ahşap elemanların maruziyet süresi - Eleman kalınlığı ve kuruma potansiyeli - Panel kenar ve birleşim detaylarının açıklık durumu
Değerlendirme sonucunda proje; düşük, orta ve yüksek nem etkisi riski sınıflarından birine atanmalıdır. Risk sınıfı, uygulanacak geçici koruma düzeyini belirler.	
Tasarım ve Detaylandırma Aşaması Önlemleri	- Yatay yüzeylerde su birikimini önleyen eğim ve drenaj detayları - Panel kenarlarında su girişini sınırlayan kaplama veya bant detayları - Birleşim bölgelerinde hızlı kapatmaya uygun detay çözümü - Buhar kesici ve su yalıtım katmanlarının montaj sırası planlaması - Geçici örtü ve koruma sistemlerinin projede öngörülmesi
Bu kararlar, ıslanma miktarını azaltmayı ve kuruma potansiyelini arttırmayı hedefler.	
Şantiye Uygulama Kontrol Adımları	Teslim ve depolama: - Eleman nem içeriği ölçülerek teslim alınmalı, - Zemin teması kesilmeli, - Üst örtü sağlanmalı, yan havalanma korunmalıdır. Montaj süreci: - Yağış olasılığı düşük zaman dilimleri tercih edilmeli, - Montaj–örtüleme arası süre en aza indirilmeli, - Açıkta kalan yatay yüzeyler geçici membran ile korunmalıdır. Detay koruma: - Kenar kesitler ve panel uçları kapatılmalı, - Ek yerleri montajdan hemen sonra bantlanmalı, - Geçici drenaj noktaları oluşturulmalıdır. Su kontrolü: - Yüzeyde su birikimi düzenli uzaklaştırılmalı, - Gerekirse geçici tahliye delikleri açılmalıdır.
Uygulamalar, inşa neminin kalıcı hasara dönüşmesini engellemeye yöneliktir.	
İzleme ve Müdahale	- Gömülü nem sensörleri, - Periyodik yüzey nem ölçümleri, - Kritik eşik değer tanımı (ör. %20 üzeri uyarı seviyesi), - Kaplama öncesi zorunlu nem kontrolüdür.
Nem düzeyi hedef değerin üzerindeyse, yapı kabuğunun kapatılması işlemleri ertelenmeli ve kontrollü kurutma uygulanmalıdır.	

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada, ahşap ve endüstriyel ahşap yapı elemanlarında nem etkisinin malzeme davranışı, birleşim etkinliği ve dayanıklılık üzerindeki etkileri literatür ve standartlar temelinde değerlendirilmiş, inşa sürecine yönelik bütüncül bir nem yönetim yaklaşımı önerilmiştir. Elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Nem değişimleri kesit içinde homojen dağılmamakta, oluşan nem gradyanları özellikle CLT ve glulam gibi katmanlı ürünlerde ara yüzey gerilmelerini arttırarak çatlak ve ayrılma riskini yükseltmektedir.
- Tutkal türü ve bağ hattı kalitesi, ıslanma–kuruma döngüleri altındaki etkinlik açısından kritiktir. Yüksek nem koşulları yapışma etkinliğini olumsuz etkiler.
- Metal birleşim elemanlarında artan nem düzeyi korozyon riskini arttırarak, çivi ve vidalı birleşimlerde sıyrılma direnci ve birleşim kapasitesi düşebilmektedir.
- Eurocode 5’te tanımlanan servis sınıfları ve modifikasyon katsayıları ile nem koşulları tasarım dayanımına yansıtılarak nem etkisi, tasarım girdisi olarak ele alınır.
- Yapı kabuğu tamamlanmadan önce gerçekteşen ıslanma olayları sonucu oluşan “inşaat nemi”, yeterli kuruma sağlanmadan kaplama içinde hapsoldüğünde uzun dönemli dayanıklılık riskleri oluşturur. Katmanlaşma düzeni ve buhar difüzyon direnci dağılımı kuruma potansiyelini belirleyen temel etmenlerdir.
- Depolama, taşıma ve montaj aşamalarında uygulanan geçici koruma önlemleri, kenar ve birleşim detaylarının kapatılması ve kaplama öncesi nem kontrolü, uzun dönem etkinlik açısından belirleyicidir.
- Önerilen aşamalı nem yönetim planı; risk değerlendirmesi, tasarım kararları, şantiye kontrolü ve izleme adımlarını bir araya getirerek inşaa sürecinde nem kaynaklı hasar riskinin azaltılması için uygulanabilir bir çerçeve sunmaktadır.

KAYNAKLAR

1. S. Avramidis, C. Lazarescu, ve S. Rahimi, “Basics of wood drying”, içinde *Springer Handbooks*, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2023, 13, ss. 679-706. doi: 10.1007/978-3-030-81315-4_13.
2. P. Lu, B. P. Gilbert, C. Kumar, R. L. McGavin, ve H. Karampour, “Influence of the moisture content on the fracture energy and tensile strength of hardwood spotted gum sawn timber and adhesive bonds (gluelines)”, *European Journal of Wood and Wood Products*, c. 82, ss. 53-68, Eki. 2023, doi: 10.1007/s00107-023-01999-4.
3. J. Porteous ve A. Kermani, *Structural Timber Design to Eurocode 5*. Blackwell Publishing, 2007.
4. T. Kesik ve R. Martin, “Mass timber building science primer”, Mass Timber Institute, University of Toronto, Canada, 2021. Erişim: 17 Mart 2024. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.rdh.com/resource/mass-timber-building-science-primer/>
5. H. Zoormand, “Mechanical effects of moisture content variations in CLT-Structures”, Yüksek Lisans Tezi, Linnaeus University, 2024.
6. P. Godonou, Ed., *Design of timber structures Volume I*, 3. bs. Stockholm: Swedish Forest Industries Federation Swedish Wood, 2022. Erişim: 17 Mart 2024. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: www.swedishwood.com.
7. A. Gustafsson, *The CLT Handbook*, 1. Stockholm: Swedish Forest Industries Federation Swedish Wood, 2022. Erişim: 17 Mart 2024. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: www.traguiden.se,
8. M. Fragiaco, S. Fortino, D. Tononi, I. Usardi, ve T. Toratti, “Moisture-induced stresses perpendicular to grain in cross-sections of timber members exposed to different climates”, *Eng. Struct.*, c. 33, sy 11, ss. 3071-3078, Kas. 2011, doi: 10.1016/j.engstruct.2011.06.018.

9. M. Schiere, B. Franke, ve S. Franke, “Quality assurance and design of timber structures in varying climates”, içinde *International Network on Timber Engineering Research*, R. Görlacher, Ed., Karlsruhe: Timber Scientific Publishing, 2020, ss. 159-172.
10. M. M. Hassani, F. K. Wittel, S. Ammann, P. Niemz, ve H. J. Herrmann, “Moisture-induced damage evolution in laminated beech”, *Wood Sci. Technol.*, c. 50, sy 5, ss. 917-940, Eyl. 2016, doi: 10.1007/s00226-016-0821-5.
11. A. Hänsel, J. Tröger, M. Rößler, N. Brachhold, ve P. Niemz, “Influence of surface treatment on the bonding quality of wood for load-bearing purposes”, *Wood Mater. Sci. Eng.*, c. 18, sy 6, ss. 2128-2139, 2023, doi: 10.1080/17480272.2023.2269138.
12. T. Akbulut, Ed., *Ahşap: Doğal ve Yenilenebilir Mühendislik Malzemesi*. İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Üniversite Yayınevi, 2024. doi: 10.5152/5700.
13. K. Kalbe, T. Kalamees, V. Kuk, A. Ruus, ve A. Annuk, “Wetting circumstances, expected moisture content, and drying performance of CLT end-grain edges based on field measurements and laboratory analysis”, *Build. Environ.*, c. 221, Ağu. 2022, doi: 10.1016/j.buildenv.2022.109245.
14. S. L. Zelinka, “Corrosion of embedded metals in wood: An overview of recent research with implications for building moisture design”, içinde *ASHRAE Transactions*, 2013, ss. 442-449.
15. L. Yermán, L. M. Ottenhaus, C. Montoya, ve J. J. Morrell, “Effect of repeated wetting and drying on withdrawal capacity and corrosion of nails in treated and untreated timber”, *Constr. Build. Mater.*, c. 284, May. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122878.
16. M. Shirmohammadi, W. Leggate, ve A. Redman, “Effects of moisture ingress and egress on the performance and service life of mass timber products in buildings: a review”, *Constr. Build. Mater.*, c. 290, Tem. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123176.
17. G. Finch, J. Wang, ve D. Ricketts, “Guide for designing energy-efficient building enclosures”, Mar. 2013. Erişim: 17 Mart 2024. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: www.rdhbe.com.
18. RDH Building Science, “Mass Timber Building Enclosure Best Practice Design Guide”, Eki. 2022.
19. RDH Building Science, “Moisture Risk Management Strategies for Mass Timber Buildings”, Eki. 2022.
20. V. Kuk, J. Kers, T. Kalamees, L. Wang, ve H. Ge, “Impact of built-in moisture on the design of hygrothermally safe cross-laminated timber external walls: A stochastic approach”, *Build. Environ.*, c. 226, Ara. 2022, doi: 10.1016/j.buildenv.2022.109736.
21. R. McClung, H. Ge, J. Straube, ve J. Wang, “Hygrothermal performance of cross-laminated timber wall assemblies with built-in moisture: Field measurements and simulations”, *Build. Environ.*, c. 71, ss. 95-110, Oca. 2014, doi: 10.1016/j.buildenv.2013.09.008.
22. T. Alsmarker, *Moisture-proof CLT construction without a full temporary shelter*. Swedish Forest Industries Federation Swedish Wood, 2022. Erişim: 17 Mart 2024. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: www.traguiden.se,
23. “Joint professional practice guidelines – Encapsulated mass timber construction up to 12 storeys”, Mar. 2021.

NET SIFIR BİNALARA GEÇİŞ SÜRECİNDE TÜRKİYE VE AVRUPA MEVZUATLARININ KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

Selman Sevindik^{1*}

Dilek Arslan²

Şeyma Atik³

Zehra Nur Dişçi⁴

Kübra Doğuç⁵

¹ Erciyes Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Kayseri, Türkiye

² Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Güzel Sanatlar, Tasarım ve Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Türkiye

^{3,5} University College London, Institute of Environmental Design and Engineering, London, UK

⁴ Gaziantep Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Gaziantep, Türkiye

ÖZET

Türkiye, iklim krizi ile mücadele kapsamında 2053 yılı için "Net Sıfır Emisyon" hedefini ulusal bir taahhüt olarak belirlemiştir. Bu hedefe ulaşılmasında, bina sektörünün karbonsuzlaştırılması ve Neredeyse Sıfır Enerjili Bina (nSEB) yaklaşımının yaygınlaştırılması kritik bir öneme sahiptir. Bu çalışma, Türkiye'de bina enerji performansını düzenleyen temel referans olan TS 825 standardının 2024 revizyonunu, Avrupa'daki güncel nSEB ve bütüncül yaşam döngüsü karbonu (BYDK) yaklaşımlarıyla karşılaştırmalı olarak incelemektedir. Çalışma kapsamında; Türkiye'nin güncel bina stoku analizi yapılmış ve ulusal mevzuat; Hollanda, Norveç, Finlandiya ve İtalya gibi farklı olgunluk seviyelerindeki ülke uygulamalarıyla teknik parametreler bazında kıyaslanmıştır. Yapılan analizler, TS 825:2024'ün yapı kabuğu performansı açısından önemli bir ilerleme kaydettiğini, ancak operasyonel karbon limitleri ve bina tipolojisine özgü performans kriterleri noktasında geliştirilmeye ihtiyaç duyduğunu ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, Türkiye'nin net sıfır vizyonu doğrultusunda, kamu binalarındaki enerji verimliliği (KABEV) projelerinden elde edilen verilerin mevzuata entegrasyonu ve bütüncül yaşam döngüsü odaklı bir karbonsuzlaştırma yol haritası önerilmektedir.

Anahtar kelimeler: nSEB, TS 825:2024, Net Sıfır Binalar, Bütüncül Yaşam Döngüsü Karbonu (BYDK), Mevzuat Analizi.

A COMPARATIVE ANALYSIS OF BUILDING REGULATIONS IN TÜRKİYE AND EUROPE WITHIN THE TRANSITION TO NET ZERO BUILDINGS

ABSTRACT

In the scope of combating the climate crisis, Türkiye has declared a "Net Zero Emission" target for 2053 as a national commitment. Decarbonizing the building sector and expanding the Nearly Zero Energy Building (nZEB) approach are vital for achieving this goal. This study comparatively examines the 2024 revision of the TS 825 standard, the primary reference for building energy performance in Türkiye, with current European nZEB and Whole-Lifecycle Carbon (WLC) approaches. The study includes an analysis of Türkiye's current building stock and compares national regulations with practices in countries at different maturity levels, such as the Netherlands, Norway, Finland, and Italy. The analyses reveal that while TS 825:2024 makes significant progress in building envelope performance, it requires further development regarding operational carbon limits and building typology-specific performance criteria. Consequently, in line with Türkiye's net-zero vision, the systematic integration of data from public building energy efficiency projects (KABEV) into legislation and a life-cycle-oriented decarbonization roadmap are proposed.

Keywords: nZEB, TS 825:2024, Net Zero Buildings, Whole-life Carbon (WLC), Policy Analysis.

^{1*} selmansevindik@erciyes.edu.tr

1. GİRİŞ

Küresel enerji tüketiminin yaklaşık %40'ından ve karbon emisyonlarının %36'sından sorumlu olan bina sektörü, iklim değişikliği ile mücadelede stratejik bir role sahiptir [1]. Avrupa Birliği'nin "Yeşil Mutabakat" çerçevesinde belirlediği 2050 karbon nötr hedefiyle uyumlu olarak Türkiye de 2053 yılı için net sıfır emisyon hedefini ulusal politika olarak ilan etmiştir [2]. Bu hedefe ulaşılmasında en kritik basamaklardan biri, bina stokunun enerji performansını "Neredeyse Sıfır Enerjili Bina" (nSEB) seviyesine taşımak ve operasyonel enerjiden kaynaklı emisyonları minimize etmektir. Türkiye'de bina enerji verimliliği mevzuatının temelini oluşturan TS 825 standardı, 2024 yılındaki revizyonu ile iklim bölgelerini genişleterek ve ısı geçirgenlik sınır değerlerini (U-değerleri) sıkılaştırarak bu dönüşüm için teknik bir temel oluşturmuştur [3]. Ancak nSEB hedeflerine ulaşmak, yalnızca yalıtım kalınlıklarını artırmakla mümkün değildir. Yapılan çalışmalar, nSEB binalarının operasyonel enerji talebi çok düşük olsa da bu performansı sağlamak için kullanılan ileri teknoloji ürünlerin ve yoğun malzeme kullanımının "gömülü karbon" miktarını artırdığına dikkat çekmektedir. Bu durum, binaların çevresel etkisinin sadece kullanım aşamasıyla değil, tüm yaşam döngüsü boyunca bütüncül yaşam döngüsü karbonu (WLC) değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Norveç, Hollanda ve Finlandiya gibi ülkeler, mevzuatlarına bütüncül yaşam döngüsü karbonu hesaplamalarını dâhil ederek bu konuda öncü adımlar atmışlardır [4,5].

Türkiye'de nSEB koşullarının 2023 itibarıyla belirli büyüklükteki binalar için zorunlu hale getirilmesi önemli bir kilometre taşıdır [6]. Fakat ulusal mevzuatın henüz operasyonel karbon limitleri ve bina tipolojisine özgü dinamik performans kriterleri noktasında Avrupa örneklerinin gerisinde kaldığı görülmektedir. Bu çalışmanın temel motivasyonu, güncellenen TS 825 standardının Türkiye'nin 2053 net sıfır vizyonu ve nSEB hedefleriyle ne ölçüde örtüştüğünü analiz etmektir. Bu kapsamda çalışma, Türkiye'deki mevcut düzenlemeleri Norveç, Hollanda, Finlandiya ve İtalya gibi farklı olgunluk seviyelerindeki ülke mevzuatlarıyla karşılaştırmalı olarak irdeleyerek teknik bir kıyaslama sunmaktadır. Ayrıca, kamu binalarında enerji verimliliği (KABEV) gibi uygulama örneklerinden elde edilen verilerin mevzuatın gelişim sürecine nasıl entegre edilebileceği tartışılmakta ve Türkiye için bir yol haritası önerilmektedir.

2. TÜRKİYE BİNA STOKU VE ENERJİ PROFİLİ

Türkiye'nin bina sektöründeki enerji verimliliği potansiyelini anlamak, mevcut yapı stokunun niteliksel özelliklerinin ve bu stoku yönlendiren teknik mevzuatın gelişim sürecinin bütüncül bir şekilde değerlendirilmesini gerektirmektedir. Türkiye'de binaların enerji verimliliği ve ısı performans yönetimi açısından temel referans noktası olan TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları standardı, ilk olarak 1998 yılında yürürlüğe girmiş ve 2000 yılından itibaren uygulanması zorunlu hale getirilmiştir [7]. Bu standart, binaların ısıtma enerjisi ihtiyacının sınırlandırılmasına yönelik hesaplama metodolojilerini ve tasarım kriterlerini belirleyerek, enerji tüketiminin minimize edilmesini ve çevresel sürdürülebilirliğin korunmasını amaçlamaktadır. Isı geçirgenlik katsayıları (u-değerleri) üzerinden yapı kabuğunun performansını denetleyen TS 825, enerji kaynaklarının verimli kullanımı yoluyla hem ülke ekonomisine katkıda bulunmayı hem de iç mekân hava kalitesini ve ısı konfor şartlarını standardize etmeyi hedefleyen teknik bir düzenlemedir.

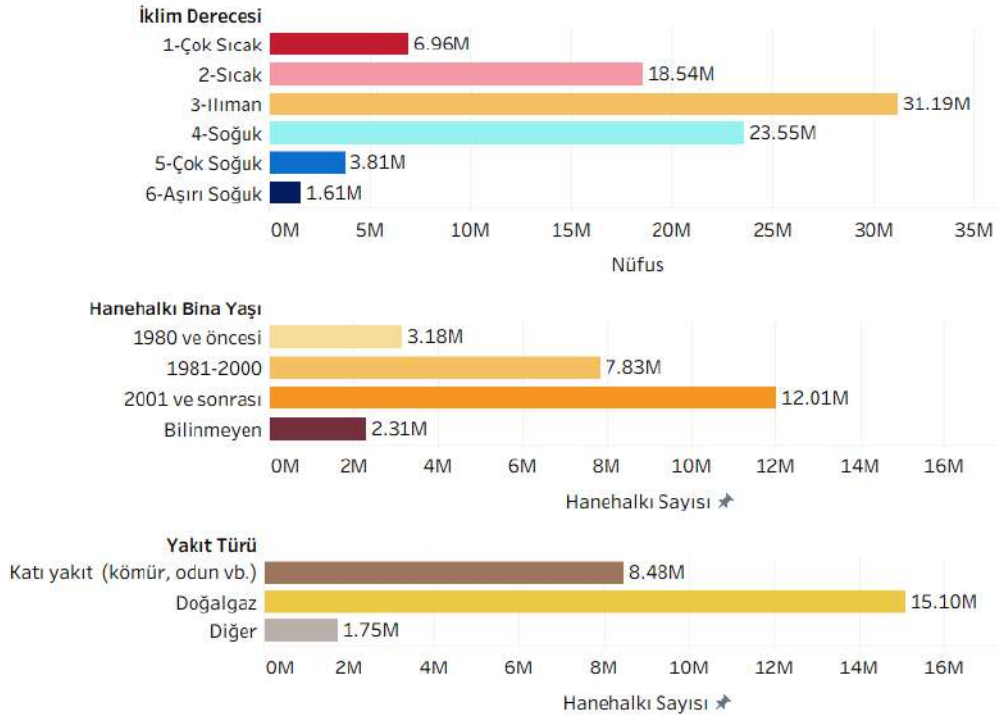
Yapı sektöründeki teknolojik gelişmeler ve enerji verimliliği hedeflerindeki artış paralelinde periyodik olarak güncellenerek ilk kapsamlı revizyonunu 2008 yılında gerçekleştirmiştir. Bu güncelleme ile hesaplama metodolojileri detaylandırılmış ve yalıtım sınır değerleri daha sıkı hale getirilmiştir. Ardından, uygulama sürecinde karşılaşılan ihtiyaçlar doğrultusunda 2013 yılında standart üzerinde yeniden düzenlemeye gidilerek teknik gereklilikler optimize edilmiştir. Günümüz itibarıyla standardın en güncel ve geçerli versiyonu Ekim 2024 tarihinde yayımlanan TS 825:2024 revizyonudur. Bu son güncelleme ile dört olan iklim bölgesi sayısı altıya çıkarılarak (**Şekil 1**) binaların ısıl performans hesaplamalarını modern uluslararası standartlarla tam uyumlu hale getirmeyi, yenilenebilir enerji entegrasyonuna zemin hazırlamayı ve Türkiye'nin 'Net Sıfır Emisyon' hedefleri doğrultusunda yapı kabuğu kriterlerini daha ileri bir seviyeye taşımayı amaçlamaktadır [3].



Şekil 1. TS 825:2024'e göre Türkiye'nin altı iklim bölgesi ([3]'ten uyarlanmıştır.)

Söz konusu iklim bölgelerindeki bu kategorizasyonun teorik bir yaklaşımdan öteye geçerek emisyon azaltım hedeflerine hizmet edebilmesi, nüfusun ve dolayısıyla bina yoğunluğunun bu bölgelerdeki dağılımının analiz edilmesine bağlıdır. Türkiye nüfusunun mekânsal dağılımı incelendiğinde, nüfusun %36'sı TS 825 standardında tanımlanan 3. iklim bölgesinde (ılıman) yoğunlaştığı görülmektedir (**Şekil 2**). Bu bölgeler, sanayileşme ve ticaret hacminin yüksekliği nedeniyle yoğun göç almakta; dolayısıyla yapı stokunun en dinamik olduğu alanları temsil etmektedir. Nüfusun yaklaşık %30'u sıcak iklimde (1-çok sıcak, 2-sıcak) %34'ü ise soğuk iklimde (4-soğuk, 5-çok soğuk, 6-aşırı soğuk) yer almaktadır. Türkiye'de sıcak, ılıman ve soğuk iklime maruz kalan nüfusun dengeli bir şekilde dağılmış olması, Net Sıfır Emisyon hedefleri doğrultusunda, sadece ısıtma değil, özellikle iklim kriziyle artan soğutma enerjisi ihtiyacının da yapı kabuğu tasarımıyla (pasif sistemler ve yüksek yalıtım) minimize edilmesini zorunlu kılmaktadır. Ayrıca bu durum, TS 825:2024 ile getirilen yeni ısı geçirgenlik katsayılarının (u-değerleri) uygulanması durumunda elde edilecek toplam enerji tasarrufu potansiyelinin ne denli kritik olduğunu ortaya koymaktadır. Ancak enerji tasarrufu potansiyeli sadece iklimsel gerekliliklerle değil, bu gerekliliklere yanıt verecek olan yapı stokunun inşa edildiği döneme özgü teknik kabiliyetleri ile de doğrudan ilişkilidir.

Hanehalkı verilerine dayalı yapılan analizler, Türkiye’deki bina stokunun yaklaşık %45’inin 1980-2000 yılları arasında, yani ısı yalıtım standartlarının henüz zorunlu olmadığı veya teknik açıdan yetersiz kaldığı dönemde inşa edildiğini göstermektedir (Şekil 2). Bu durum, net sıfır hedefine ulaşmada yeni binalardan ziyade, mevcut yaşlı yapı stokunun derin yenileme (deep renovation) süreçlerine tabi tutulması gerektiğini kanıtlamaktadır. Hanehalkı enerji tüketiminde katı yakıtlardan doğal gaz geçiş süreci, karbon yoğunluğunda birim enerji başına belirgin bir azalma sağlamış olsa da bu dönüşüm Türkiye’nin 2053 Net Sıfır Emisyon hedeflerine ulaşması için tek başına yeterli bir zemin oluşturmamaktadır (Şekil 2). Mevcut durumda fosil yakıt bazlı bir sistem olan doğal gazın baskın kullanımı, alan ısıtma kaynaklı emisyonların tamamen ortadan kaldırılmasının önündeki temel yapısal engellerden biridir. Bu bağlamda, iklim hedefleriyle uyum için sadece yakıt türünün iyileştirilmesiyle yetinilmeyip, ısıtma sistemlerinin bütüncül bir karbonsuzlaştırılması sürecine (yenilenebilir enerji entegrasyonu, ısı pompaları vb.) tabi tutulması kritik bir zorunluluktur. Eski yapı stokundaki sızdırmazlık ve yalıtım yetersizlikleri, fosil yakıt bağımlılığını sürdürerek çevresel yükü artırmaya devam etmektedir. Dolayısıyla, TS 825:2024 revizyonunun sadece yeni ruhsatlı binalarda değil, tadilat gören mevcut binalarda da ödünsüz uygulanması; hem enerji talebinin radikal şekilde düşürülmesi hem de ısıtma sistemlerinin karbonsuzlaştırılmasına geçişin teknik altyapısının hazırlanması açısından Türkiye’nin karbon nötr vizyonu kapsamında stratejik bir hamle niteliğindedir.



Şekil 2. Türkiye nüfusunun iklim derecelerine göre dağılımı (üst), hanehalkının bina yaşı (orta) ve hanehalkının yakıt türü (alt) ([8,9]’dan uyarlanmıştır.)

3. MEVZUAT ANALİZİ

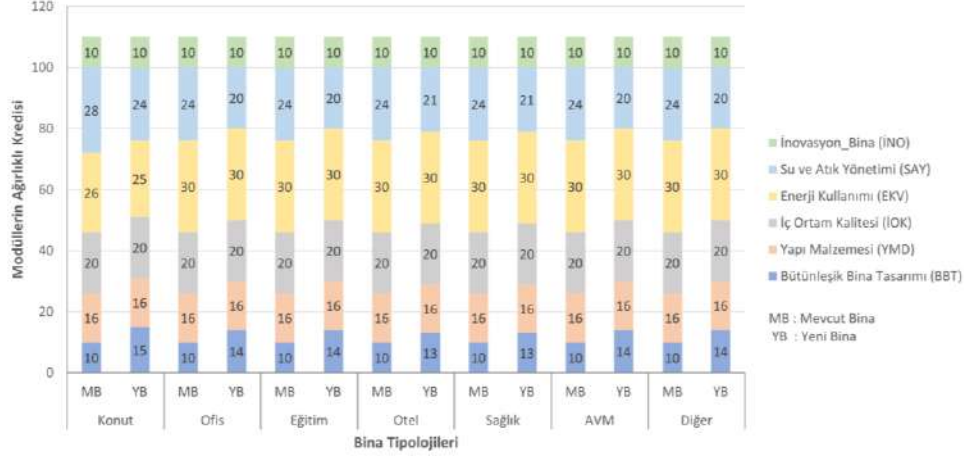
Neredeyse sıfır enerjili bina (nSEB) yaklaşımı, bina enerji tüketimini ve emisyonlarını azaltmada küresel ölçekte kabul görmüş temel bir stratejidir. Avrupa Birliği bağlamında nSEB kavramı, 2010

yılında Binaların Enerji Performansı Direktifi (EPBD) ile kurumsal bir çerçeveye oturtulmuştur [10]. Bu yaklaşım; bina kabuğu ve pasif tasarım stratejileriyle enerji ihtiyacının asgari düzeye indirilmesini ve kalan düşük ihtiyacın yenilenebilir kaynaklarla karşılanmasını esas alan, çok yüksek enerji performansına sahip yapıları tanımlamaktadır. Avrupa Parlamentosu ve Konseyi'nin 2024 yılındaki güncellemeleriyle nSEB yaklaşımı artık yeni binalar için bir başlangıç referansı olarak konumlandırılmış; politika kapsamı "sıfır emisyonlu bina" hedefine doğru genişletilerek mevcut bina stokuna yönelik minimum enerji performans standartları (MEPS) tanımlanmıştır [11,12]. EPBD kapsamında nSEB, yalnızca bir ısı yalıtım standardı olmanın ötesinde; ısıtma, soğutma, havalandırma ve aydınlatma sistemlerini içeren bütünlüklü bir performans mantığına dayanmaktadır. Ancak bu yaklaşım ağırlıklı olarak operasyonel enerjiye odaklandığından, karbonsuzlaştırma hedefleri için tek başına yeterli bir çerçeve sunmamaktadır. Küresel ölçekte operasyonel karbonun yanı sıra gömülü karbonun da dikkate alınması gerektiğine yönelik artan farkındalık; Fransa, Danimarka ve Finlandiya gibi ülkelerde nSEB yaklaşımını tamamlayan bütüncül yaşam döngüsü karbonu (WLC) temelli düzenlemelere zemin hazırlamıştır [4].

Avrupa ölçekli bu kararlı dönüşüme paralel olarak Türkiye, kendi yasal altyapısını nSEB hedefleri doğrultusunda modernize etmeye başlamıştır. Türkiye'deki nSEB çerçevesi, enerji performans sınıfları ve yenilenebilir enerji payları üzerinden dolayı bir emisyon azaltım mantığına dayanmaktadır. Bu durum operasyonel enerji talebinin düşürülmesi açısından önemli bir ilerleme olsa da [4] mevzuat yapısı henüz karbonsuzlaşmayı doğrudan hedefleyen bağlayıcı bütüncül yaşam döngüsü göstergelerini içermemektedir. Özellikle yüksek yalıtım kalınlıkları ve karmaşık mekanik sistemlerin kullanıldığı nSEB binalarında, malzeme yoğunluğu nedeniyle artan gömülü karbonun dengelenmesi ihtiyacı kritik bir politika boşluğu olarak öne çıkmaktadır.

Türkiye'de enerji verimliliğine yönelik yasal süreç, 2007 yılında yürürlüğe giren 5627 Sayılı Enerji Verimliliği Kanunu [13] ile şekillenmiş, ardından yayımlanan Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği [14] ve TS 825 Isı Yalıtımı Kuralları [15] ile binaların net ısıtma enerjisi gereksinimleri standardize edilmiştir. 2020 yılında yayımlanan rehber dokümanla [6] kavramsal olarak tanımlanan nSEB koşulları, Şubat 2022'deki yönetmelik değişikliğiyle 1 Ocak 2023 itibarıyla yeni binalar için zorunlu hale getirilmiştir. Toplam yapı inşaat alanı 2000 m² ve üzeri olan binaları kapsayan bu koşullar; Enerji Kimlik Belgesi'nin en az B sınıfı olması ve birincil enerji ihtiyacının en az %10'unun yerinde yenilenebilir kaynaklardan karşılanması kriterlerini esas almaktadır. Buna ek olarak 2023-2025 geçiş döneminde uygulama eşiği 5000 m² olarak belirlenmiş ve yenilenebilir enerji oranı %5 seviyesine düşürülmüştür.

Mevcut zorunlu mevzuatın bütüncül yaşam döngüsü karbonu (BYDK) konusundaki bu kapsayıcılık eksikliği, ulusal gönüllü sertifikasyon sistemlerinin stratejik önemini artırmaktadır. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından geliştirilen ulusal Yeşil Sertifika Sistemi (YeS-TR), binaların çevresel ve ekonomik performansını bütünlüklü bir perspektifle değerlendirmeyi hedeflemektedir [16]. Sistem; Bütünlüklü Bina Tasarımı, Yapı Malzemesi, İç Ortam Kalitesi, Enerji Kullanımı, Su ve Atık Yönetimi ile İnovasyon modülleri üzerine inşa edilmiştir. Bu modüllerin kredi dağılımı incelendiğinde, Enerji Kullanımı (EKV) modülünün tüm fonksiyonlarda en yüksek ağırlığa (25-30 puan) sahip olması, sistemin operasyonel verimliliği merkeze aldığını kanıtlamaktadır (**Şekil 3**). Bununla birlikte YeS-TR; malzeme seçimi ve çevresel ürün beyanları (EPD) kriterleri aracılığıyla, mevcut mevzuatta eksik kalan bütüncül yaşam döngüsü perspektifinin tasarım pratiğine aktarılması için stratejik bir geçiş aracı niteliği taşımaktadır.



Şekil 3. YeS-TR sertifikasyon sisteminde bina tipolojilerine göre modül ağırlıklı kredi dağılımı ([12]'den uyarlanmıştır)

4. KARŞILAŞTIRMALI ANALİZ

Bina sektörünün küresel enerji tüketimi ve sera gazı emisyonları üzerindeki kritik rolü, enerji mevzuatlarını iklim politikalarının temel araçlarından biri hâline getirmiştir. Nitekim Avrupa genelinde bina yönetmelikleri, yalnızca yapı kabuğunun ısı performansına odaklanan teknik belgeler olmaktan çıkarak; enerji talebi, birincil enerji arzı, karbon emisyonları ve dinamik kullanım profillerini kapsayan bütünleşik çerçevelere evrilmiştir. Türkiye’de bina enerji performansını düzenleyen temel referans olan TS 825 ise, 2025 yılında güncel versiyonunun (TS 825:2024) yürürlüğe girmesine rağmen bu bütünleşik dönüşümün henüz başlangıç aşamasındadır. Bu çalışmada, nitel araştırma yöntemlerinden döküman analizi kullanılarak TS 825:2024 standardı; Avrupa’daki iklimsel çeşitliliği ve karbon regülasyonlarındaki olgunluk seviyelerini stratejik olarak yansıtmak üzere amaçlı örneklem yöntemiyle seçilen Norveç, Hollanda, Finlandiya ve İtalya’nın güncel mevzuatlarıyla karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Söz konusu metodoloji; yapı kabuğu ısı performansı, operasyonel enerji limitleri ve bütüncül yaşam döngüsü karbonu (BYDK) olmak üzere üç temel parametre üzerinden kurgulanmış ve elde edilen bulgular matris tekniğiyle sistematize edilmiştir (**Çizelge 1**).

Bina sektörünün küresel enerji tüketimi ve sera gazı emisyonları üzerindeki kritik rolü, enerji mevzuatlarını iklim politikalarının temel araçlarından biri hâline getirmiştir. Avrupa genelinde bina yönetmelikleri; yalnızca yapı kabuğunun ısı performansına odaklanan teknik belgeler olmaktan çıkarak; enerji talebi, birincil enerji arzı, karbon emisyonları ve dinamik kullanım profillerini kapsayan bütünleşik çerçevelere evrilmiştir. Türkiye’de bina enerji performansını düzenleyen temel referans olan TS 825, 2025 yılında güncel versiyonunun yürürlüğe girmesine rağmen, söz konusu bütünleşik dönüşümün henüz başlangıç aşamasında yer almaktadır. Bu çalışma kapsamında TS 825:2024 standardının gelişim düzeyi; karbon emisyon limitlerinin uygulanması ve sıfır emisyon hedefleri noktasında farklı olgunluk seviyelerini temsil eden Norveç, Hollanda, Finlandiya ve İtalya mevzuatları ile karşılaştırılmalı olarak analiz edilmiştir (**Çizelge 1**). Seçilen bu ülkeler; karbon sınırlandırmalarının hâlihazırda yürürlükte olduğu veya yasal teklif aşamasında bulunduğu farklı sosyo-teknik senaryoları yansıtma bakımından stratejik bir örneklem sunmaktadır.

Çizelge 1’de sunulan veriler, Avrupa Birliği (AB) tarafında belirlenen ve ülkelerce uygulanan Minimum Enerji Performans Standardı’nın (MEPS), binalarda operasyonel karbon emisyonunu dolaylı olarak enerji kullanımını sınırlandırarak düşürmeyi amaçladığını göstermektedir. Bu standartlar, sadece yeni binaları değil, aynı zamanda mevcut bina stokunun dönüşümünü de hedefleyen bir mekanizma olarak kurgulanmıştır [17]. Buna ek olarak Çaba Paylaşım Yönetmeliği (ESR), üye ülkeler için binalarda ve diğer sektörlerde bağlayıcı sera gazı emisyonlarının azaltılmasına dair 2030’a kadar yıllık karbon emisyonu düşürme hedefleri uygulamaktadır [5]. 2030 yılına kadar toplamda %40’lık bir düşüş hedeflenirken, Hollanda gibi ülkeler bu çıtaı daha yükseğe taşıyarak 1990 yılına oranla %48’lik bir azalmayı hedeflemektedir. Hollanda, hedefi yakalamak adına binalarda BENG yönetmeliğini yürürlüğe koymuştur. Söz konusu yönetmelik, doğrudan bir operasyonel karbon limiti tanımlamamakla birlikte; yıllık enerji ihtiyacı, fosil enerji kullanımı ve yenilenebilir enerji oranını eş zamanlı olarak sınırlandıran üçlü bir yapı sunmaktadır [18]. Bu çok boyutlu yaklaşım, enerji performansını yalnızca tüketim miktarı üzerinden değil, kullanılan enerji kaynağının karbon yoğunluğu üzerinden de değerlendirmekte ve karbon azaltımını sistematik bir biçimde yönlendirmektedir. Ayrıca Hollanda, enerji tüketimini azaltmayı teşvik etmek adına enerji tüketimi 170.000 m³/yıl ya da 10.000 kWh/yıl’ı aşan kullanıcılara enerji vergisi kanunu uygulayarak süreci finansal bir disiplinle desteklemektedir.

Çizelge 1. Ülkelere ait mevzuatların karşılaştırmalı analizi (Türkiye: TS 825:2024; Hollanda: BENG; Norveç: TEK17; Finlandiya: Rakennusten Energiatarkkuus; İtalya: Decreto Ministeriale 26 giugno.)

	Türkiye	Hollanda	Norveç	Finlandiya	İtalya
İklim Sınıfları	6 iklim bölgesi (I-VI)	Tek iklim sınıfı (ülke ölçeğinde)	Soğuk iklim ağırlıklı	Soğuk iklim	6 iklim bölgesi (A-F)
Duvar U-Değeri (W/m ² K)	0,45-0,25	~0,24	~0,18	~0,17	~0,26
Çatı U-Değeri (W/m ² K)	0,35-0,20	~0,18	~0,13	~0,09	~0,22
Zemin U-Değeri (W/m ² K)	0,40-0,25	~0,25	~0,15	~0,16	~0,29
Pencere U-Değeri (W/m ² K)	1,8	~1,2	~0,8	~1,0	~1,3
Yıllık Enerji İhtiyacı (kWh/m ² ·yıl)	Hesaba dayalı	~50–70	~40–60	~75	~60–90
Operasyonel Karbon Limiti	Yok	Dolaylı	Dolaylı	Dolaylı	Dolaylı
Bütüncül Yaşam Döngüsü Karbon (BYDK)	Dâhil değil	Dâhil	~300–550 kgCO ₂ e/m ² (50 yıl)	Dâhil	Dâhil değil
LCA Zorunluluğu	Hayır	Kısmen	Evet	Evet	Hayır
Isıtma Enerjisi	Dâhil	Dâhil	Dâhil	Dâhil	Dâhil
Soğutma Enerjisi	Sınırlı	Dâhil	Dâhil	Dâhil	Dâhil
Mevzuat Yaklaşımı	Enerji verimliliği + U-değer odaklı	Enerji + karbon	Enerji + karbon + WLC	Enerji + karbon + WLC	Enerji odaklı

Mevzuatların karbon odaklı bu evrimi, sadece operasyonel enerji ile sınırlı kalmayıp yapı malzemelerinin üretiminden bertarafına kadar olan tüm çevresel etkileri kapsama alma eğilimindedir. Bu bağlamda Norveç mevzuatı (TEK17), karbon temelli yaklaşıma geçiş açısından daha detaylı ve öncü bir örnek teşkil etmektedir. Norveç bina yönetmeliğinde yeni binalar için sera gazı emisyonu hesaplamasının zorunlu hale getirilmesi, yapı tasarım sürecinde karbon performansını ikincil bir unsur olmaktan çıkarıp temel bir karar parametresine dönüştürmüştür [19,20]. Henüz bağlayıcı bir operasyonel karbon limiti tanımlanmamış olsa dahi, bütüncül yaşam döngüsü perspektifinin mevzuata entegre edilmesi, nSEB hedeflerine giden yolda kritik bir eşik olarak değerlendirilmektedir [21,22]. Finlandiya ve İtalya gibi ülkelerde ise bina enerji performansı, ısıtma ve soğutma enerjisi ile toplam birincil enerji kullanımını kapsayan net sınır değerler üzerinden analiz edilmektedir. Bu ülkelerde enerji performansı, bina türüne göre farklılaştırılmakta ve özellikle kamu binaları için çok daha sıkı kriterler işletilmektedir [22–24].

Avrupa'daki bu kapsamlı parametre setine karşılık, Türkiye'de güncellenen TS 825 ile iklim bölgesi sayısının altıya çıkarılması ve yapı kabuğu elemanları için tanımlanan U-değerlerinin sıkılaştırılması, standardın teknik hassasiyetini ve iklim duyarlılığını artırmıştır [3,25]. Bu değişiklikler, farklı coğrafi bölgelerde ısıtma ve soğutma enerji ihtiyaçlarının daha gerçekçi biçimde değerlendirilmesine olanak tanımakta ve bina enerji talebinin radikal şekilde düşürülmesi için asgari teknik altyapıyı oluşturmaktadır. Ancak karşılaştırmalı analiz (**Çizelge 1**), TS 825:2024'ün kapsamının Avrupa'daki güncel düzenlemelere kıyasla halen sınırlı kaldığını ve standardın enerji ile karbonu yöneten bütüncül bir araç olarak tam anlamıyla konumlanmadığını ortaya koymaktadır.

Mevcut durumda TS 825:2024'te enerji ihtiyacı hesaplanmakta, ancak bina türlerine göre tanımlanmış bağlayıcı enerji performans üst sınırları veya fosil enerji kullanımını doğrudan sınırlayan göstergeler bulunmamaktadır. Operasyonel karbon veya bütüncül yaşam döngüsü karbonuna yönelik herhangi bir hesaplama ya da raporlama yükümlülüğünün bulunmaması, enerji performansının ağırlıklı olarak yapı kabuğu ısıtma kayıpları üzerinden ele alınmasına neden olmaktadır. Soğutma enerjisinin hesaplara dâhil edilmesi her ne kadar önemli bir gelişme olsa da enerji performansını doğrudan sınırlayan ulusal hedef değerlerin ve bina türüne özgü performans kriterlerinin eksikliği, standardın yönlendirici etkisini ısıtma ağırlıklı bir bakış açısıyla sınırlamaktadır. Standardın teknik kapsamındaki bu kısıtlılık, özellikle bina tipolojileri bazında daha belirgin hale gelmektedir. Okullar, hastaneler ve ofisler; kullanım süreleri, iç ısı kazançları ve havalandırma gereksinimleri bakımından birbirinden keskin çizgilerle ayrılmaktadır. Avrupa mevzuatlarında bu farklılıklar stratejik bir önemle dikkate alınmakta ve EPBD kapsamında kamu binalarının 2028 sonrası net sıfır karbon emisyonlu olması hedeflenmektedir [26]. Türkiye'de ise bina türlerine yönelik ayrıştırmanın zayıf olması, kamu binaları gibi yüksek enerji yoğunluklu yapıların tasarım aşamasında yeterince yönlendirilememesine yol açmaktadır. Buna karşın, mevzuatın henüz tam kapsayamadığı bu tipoloji bazlı hedeflerin test edilmesi noktasında kamu binaları kilit bir rol üstlenmektedir. Yüksek enerji tüketimleri ve uzun kullanım süreleri nedeniyle kamu binaları, Avrupa'da enerji verimliliği politikalarının pilot uygulama alanları olarak konumlandırılmaktadır. Örneğin Hollanda, kamu binalarının derin yenileme süreçleri için DUMAVA gibi özel finansal destek programları ile piyasaya referans oluşturmaktadır [27].

Türkiye'de yürütülen Kamu Binalarında Enerji Verimliliği (KABEV) projesi, bu evrensel trende eklenme noktasında kritik bir girişimdir [28]. KABEV kapsamında kamu binalarında enerji etütleri yapılmakta ve modernizasyon çalışmaları desteklenmektedir. Ancak bu proje, ağırlıklı

olarak uygulama ve yatırım odaklı bir araç olarak kalmakta; buradan elde edilen teknik veriler ve performans kazanımları TS 825 veya genel bina enerji mevzuatına henüz sistematik biçimde entegre edilmemektedir. Avrupa'daki başarılı örneklerin aksine, Türkiye'de kamu binalarında elde edilen deneyimlerin bağlayıcı enerji ve karbon hedeflerine dönüştürülememesi, ülkenin 2053 net sıfır vizyonu kapsamında aşılması gereken stratejik bir engel olarak durmaktadır.

5. SONUÇ

Bu çalışma, Türkiye'nin 2053 net sıfır karbon hedefleri doğrultusunda bina mevzuatının mevcut durumunu ve Avrupa'daki güncel nSEB yaklaşımlarıyla olan uyumunu karşılaştırmalı bir perspektifle değerlendirmiştir. Analizler sonucunda, TS 825 standardının 2024 revizyonu ile teknik hassasiyetinin arttığı, ancak bütüncül bir karbon yönetimi aracı olmaktan ziyade halen temel bir ısı yalıtım standardı karakterini koruduğu tespit edilmiştir. Özellikle yapı kabuğu performansına odaklanan mevcut yaklaşım, enerji arzı, yenilenebilir enerji entegrasyonu ve bina tipi bazlı performans kriterleri gibi nSEB yaklaşımının belirleyici unsurlarını kapsam dışında bırakmaktadır.

Yapılan karşılaştırmalı değerlendirme, TS 825'in Türkiye'nin sıfır enerji bina hedefleri için gerekli ancak tek başına yeterli olmayan bir mevzuat olduğunu ortaya koymaktadır. Standart, bina kabuğu performansını iyileştirerek enerji talebini düşürme potansiyeline sahip olsa da "düşük karbonlu bina" hedefine yön veren stratejik bir çerçeve sunmakta eksik kalmaktadır. Avrupa mevzuatları ile aradaki makasın daraltılabilmesi için Türkiye'deki yasal altyapının kademeli olarak genişletilmesi bir zorunluluktur. Bu süreçte, operasyonel karbon göstergelerinin en azından raporlama düzeyinde mevzuata dâhil edilmesi ve bina türlerine göre ayrıştırılmış yıllık enerji performans sınırlarının tanımlanması ilk kritik adımlar olarak değerlendirilmektedir.

Çalışmanın en önemli bulgularından biri, kamu binalarının bu dönüşümdeki stratejik rolüdür. Avrupa örneklerinde görüldüğü üzere, kamu yapıları nSEB ve düşük karbonlu bina hedeflerinin pilot uygulama alanları olarak kurgulanmaktadır. Türkiye'de yürütülen KABEV projesi gibi girişimler, bu noktada muazzam bir veri seti ve uygulama tecrübesi sunmaktadır. Ancak bu projelerden elde edilen teknik kazanımların ve "derin yenileme" deneyimlerinin TS 825 ve ilgili bina enerji mevzuatına sistematik bir biçimde aktarılamaması önemli bir eksikliktir. KABEV benzeri projelerden elde edilen verilerin mevzuatın teknik omurgasına entegre edilmesi, TS 825'in yalnızca bir yalıtım standardı olmaktan çıkarak Türkiye'nin düşük karbonlu bina politikalarının stratejik merkezine dönüşmesini sağlayacaktır.

Sonuç olarak, Türkiye'nin karbon nötr vizyonuna ulaşabilmesi için mevzuatın; sadece yeni ruhsatlı binaları değil, mevcut yaşlı yapı stokunun bütüncül karbonsuzlaştırılması da (ısı pompaları, yenilenebilir enerji entegrasyonu vb.) hedeflenen dinamik yapıya ulaşılması için stratejik bir hamle niteliği taşımaktadır.

KAYNAKLAR

1. United Nations Environment Programme, Global Status Report for Buildings and Construction 2024/25: Not just another brick in the wall - The solutions exist. Scaling them will build on progress and cut emissions fast., Paris., 2025. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/47214>.

2. T.C. Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2053 Net-Sıfır Hedefi ve Türkiye'nin Uzun Dönemli İklim Değişikliği Stratejisi, (2024). <https://netsifirturkiye.org/2053-net-sifir-hedefi-ve-turkiyenin-uzun-donemli-iklim-degisikligi-stratejisi/> (accessed February 11, 2026).
3. Türk Standardları Enstitüsü, TS825:2024, 2025.
4. B.Y. Karanfil, N.C. Kayaçetin, A. Tereci, N. Bıyıklı, M. Kılınç Gilisiralıoğlu, D. Karaer, From global evidence to local action plan: a novel building decarbonization maturity scale and roadmap for nZEB office buildings in developing contexts – case of Türkiye, *Energy Build.* 348 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116443>.
5. European Comission, About Effort Sharing, (2023).
6. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Neredeyse sıfır enerjili binalar (nseb) için rehber kitap, (2020) 28.
7. Turk Standartlari Enstitusu, TS825 Binalarda Isı Yalitim Kurallari, 825 (2009) 80.
8. TÜİK, İkamet Edilen Binanın İnşa Yılına Göre Hanehalkı Sayısı, Nüfus İstatistikleri Portalı (2022). <https://nip.tuik.gov.tr/?value=BinaIstatistikleri> (accessed February 3, 2026).
9. TÜİK, Yıllara Göre İl Nüfusları - 2024, Veri Portalı (2025). <https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=Nufus-ve-Demografi-109> (accessed February 3, 2026).
10. European Union, Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings, *Off. J. Eur. Union* 153 (2010).
11. D. D'Agostino, L. Mazzarella, What is a Nearly zero energy building? Overview, implementation and comparison of definitions, *J. Build. Eng.* 21 (2019) 200–212. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2018.10.019>.
12. European Union, Directive 2024/1275/EU of the European Parliament and of the Council of 24 april 2024 on the energy performance of buildings, *Off. J. Eur. Union* (2024). <http://data.europa.eu/eli/dir/2024/1275/oj> (accessed January 29, 2026).
13. 5627 sayılı Enerji Verimliliği Kanunu, 2007.
14. Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği, 2008.
15. TS 825 Binalarda Isı Yalıtımı Yönetmeliği, 2008. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2008/10/20081009-2.htm> (accessed January 29, 2026).
16. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Yeşil Sertifika Bina Değerlendirme Kılavuzu v1, 2022.
17. European Comission, Minimum Energy Performance Standards (MEPS) and renovation trajectories in focus across Member States, *Build Up - Eur. Portal Forortal Energy Effic. Renew. Energy Build.* (2025). <https://build-up.ec.europa.eu/en/resources-and-tools/articles/meps-and-renovation-trajectories-focus-across-member-states> (accessed January 27, 2026).
18. FHI, Nearly Energy Neutral Buildings (BENG), (2021). <https://fhi.nl/en/nieuws/bijna-energie-neutrale-gebouwen-beng/> (accessed February 6, 2026).
19. O. Dike, TEK17 (Byggteknisk forskrift): Norway's national building regulation, 2025. <https://netzerocompare.com/policies/tek17-norway-national-building-regulation> (accessed February 6, 2026).
20. DIBK, Byggteknisk forskrift (TEK17) med veiledning, (2017). <https://www.dibk.no/regelverk/byggteknisk-forskrift-tek17> (accessed February 6, 2026).

21. M.K. Wiik, Developing whole-life carbon benchmark values for Norwegian buildings, *Build. Res. Inf.* 53 (2025) 345–358. <https://doi.org/10.1080/09613218.2024.2445843>.
22. I. Allard, G. Nair, T. Olofsson, Energy performance criteria for residential buildings: A comparison of Finnish, Norwegian, Swedish, and Russian building codes, *Energy Build.* 250 (2021) 111276. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111276>.
23. M. Haakana, P. Laitila, K. Forssell, M. Oy, Implementation of the EPBD Finland, 2020. <https://cdn.ca-epbd.eu/epbd/Media/638373600619852427/Implementation-of-the-EPBD-in-Finland--2020.pdf> (accessed February 6, 2026).
24. A. Hinge, International Survey of Mandatory Whole Life/ Embodied Carbon Requirements in Building Codes and Regulations, 2025.
25. T. Diz, Yeni TS825 Standardının Getirdiği Yenilikler, (2025). https://mmo.org.tr/sites/default/files/users/zeynep/MMO_TS_825_Bilgilendirme_Toplantisi_24042025.pdf (accessed January 29, 2026).
26. EPBD, Nearly-zero energy and zero-emission buildings, *Eur. Com.* (2025). https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-performance-buildings/nearly-zero-energy-and-zero-emission-buildings_en? (accessed January 29, 2026).
27. RVO, Subsidieregeling duurzaam maatschappelijk vastgoed (DUMAVA), (2026).
28. T.C. Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Kamu Binalarında Enerji Verimliliği (KABEV) Projesi, (n.d.). <https://www.kabev.org/> (accessed February 6, 2026).

FARKLI ÜLKE MEVZUATLARINDA EĞİTİM YAPILARININ YANGIN GÜVENLİĞİ KRİTERLERİ: KARŞILAŞTIRMALI BİR İNCELEME

Volkan Öztaş^{1*}

Hande Apak²

¹ Beykoz Üniversitesi Sanat ve Tasarım Fakültesi,
Kavacık, İstanbul, 34810

² İstanbul Gelişim Üniversitesi Güzel Sanatlar Fakültesi,
Avcılar, İstanbul, 34310

ÖZET

Bu çalışmada, eğitim yapılarında yangın güvenliğine ilişkin temel tasarım ve işletme kriterleri; Türkiye, Birleşik Krallık, ABD, Almanya, Fransa, İspanya, İtalya ve Japonya mevzuatları üzerinden karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Yöntem olarak doküman analizi ve içerik analizi uygulanmış; mevzuat hükümleri (kullanım sınıflandırması, kaçış yolları ve mesafeleri, yangına dayanım ve kompartımanlama, aktif sistemler, yönetim-eğitim-bakım) başlıkları altında göstergelere dönüştürülmüştür. Her ülkenin resmi metinleri veya resmi erişim sayfaları esas alınmıştır. Bulgular, eğitim yapılarının çoğu sistemde ayrı bir kullanım sınıfı/alt sınıf olarak ele alındığını; kaçış mesafesi gibi kritik parametrelerin sprinkler gibi aktif önlemlerle esnetilebildiğini; yangına dayanım sürelerinin ise bina yüksekliği/kat sayısı ve risk yaklaşımına göre kademelendiğini göstermektedir. Sonuç olarak, sınırları kesin kurallarla belirlenmiş sistemlerde uygulama netleşirken, risk/performans temelli sistemlerde tasarım esnekliği artmakta, ancak uzmanlık ve doğrulama ihtiyacı büyükmektedir.

Anahtar Kelimeler: Eğitim yapıları, Yangın güvenliği, Kaçış yolları, Yangına dayanım, Mevzuat karşılaştırması

FIRE SAFETY CRITERIA FOR EDUCATIONAL BUILDINGS IN DIFFERENT NATIONAL REGULATIONS: A COMPARATIVE REVIEW

ABSTRACT

This paper compares core fire-safety design and management criteria for educational buildings across Türkiye, the United Kingdom, the United States, Germany, France, Spain, Italy, and Japan. A document and content analysis approach was used to map regulatory requirements into indicators covering occupancy classification, means of egress, fire resistance and compartmentation, active systems, and operational management (training and maintenance). Official texts or official access portals were prioritized in a deep-source scan. Findings suggest that most jurisdictions treat schools as a distinct occupancy or a special building type, allow certain egress parameters to be relaxed when automatic suppression is provided, and tier fire-resistance levels according to building height, story, and risk philosophy. While prescriptive systems offer clearer compliance pathways, performance and risk-based frameworks increase design flexibility but require greater expertise and verification.

Keywords: Educational buildings, Fire safety, Escape routes, Fire resistance, Comparison of regulations.

^{1*}volkanoztas@beykoz.edu.tr

1. GİRİŞ

Eğitim yapıları; yüksek kullanıcı yoğunluğu, farklı yaş grupları (özellikle çocuklar), yoğun zamanlı kullanım ve çok amaçlı mekân bileşimleri nedeniyle yangın güvenliği açısından kritik yapılardır. Bu binalarda güvenli tahliye, duman kontrolü, kompartımanlama ve işletme yönetimi (tatbikat, bakım, sorumluluklar) tasarımın ayrılmaz bileşenleri olarak ele alınır. Buna karşın ülkelerin yangın güvenliği mevzuatları; risk yaklaşımı, ölçütlerin nicel tanımı, aktif sistemlerle etkileşim ve yönetim boyutu bakımından farklılaşabilmektedir. Bu çalışma, seçilmiş ülke örnekleri üzerinden eğitim yapılarında yangın güvenliği kriterlerinin nasıl kurgulandığını ortaya koymayı ve ortak/ayrışan yönleri sistematik biçimde görünür kılmayı amaçlamaktadır.

2. YÖNTEM

Çalışmada iki aşamalı bir yöntem izlenmiştir. Doküman analizi ile her ülke için temel düzenleyici metinler belirlenmiş; mümkün olan durumlarda resmî PDF metinleri veya resmî erişim sayfaları temel alınmıştır. İçerik analizi kapsamında metinler; (a) kullanım sınıflandırması ve risk kategorisi, (b) kaçış yolları ve kaçış mesafeleri, (c) yangına dayanım ve kompartımanlama, (d) aktif yangın algılama/uyarı/söndürme sistemleri, (e) yönetim-eğitim-bakım ve denetim başlıklarında kodlanarak karşılaştırılabilir göstergelere dönüştürülmüştür. Bazı ülkelerde temel teknik standartların ücretli olması (ör. DIN standartları) veya telifli kod erişimi (ör. ICC kodları) nedeniyle, analizde resmî özet/erişim sayfaları ve ücretsiz görüntüleme seçenekleri esas alınmıştır.

3. MEVZUAT ÇERÇEVESİ

Çalışma kapsamında mevzuat çerçevesi, karşılaştırmalı analizin dayandığı ulusal yangın güvenliği mevzuatlarının yapısı ve eğitim yapılarının bu mevzuatlar içindeki konumu üzerinden oluşturulmuştur. **Çizelge 1**, bu çerçevede dikkate alınan ülkelerin başlıca mevzuat metinleri ve eğitim yapılarının bu metinlerde hangi başlıklar altında ele alındığını göstermektedir. Avrupa örneklerinde (Almanya, Fransa, İspanya, İtalya) ulusal kanun-yönetmelik çerçevesi ile birlikte, teknik kuralların standartlar üzerinden (EN/DIN vb.) kurgulandığı görülmektedir. ABD’de model kodlar (IBC/IFC) yaygın uygulama alanı bulurken; NFPA kod ve standartları özellikle yaşam güvenliği ve sistem tasarımı boyutunda tamamlayıcı bir rol üstlenmektedir. Birleşik Krallık’ta “Building Regulations” için yayımlanan dokümanlar tasarım rehberi niteliğinde olup, okul binaları için ayrıca “Building Bulletin 100” gibi sektörel kılavuzlar bulunmaktadır. Japonya’da ise bina güvenliği ve yangınla ilgili hükümler “Building Standards Act” ve “Fire Service Act” yönetmelikleri ile birlikte yürütülmektedir [1-10], [13], [14].

Çizelge 1. İncelenen ülkelerde eğitim yapıları için temel mevzuat setleri (özet)

Ülke	Temel metinler	Eğitim yapısının sınıflandırılması (örnek)	Erişim notu
Türkiye	Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik Kılavuzu (Aralık 2024)	‘Kurumsal binalar’ içinde ‘eğitim tesisleri’ alt sınıfı	Resmî PDF erişimi mevcut
Birleşik Krallık	Approved Document B; Building Bulletin 100; Fire Safety Order 2005	Okullar için AD B rehber hükümler + BB100 okul odaklı kılavuz	Resmî sayfalar üzerinden ücretsiz
ABD	International Building Code (IBC); International Fire Code (IFC); NFPA 101	IBC’de Group E (Educational)	ICC kodları çevrimiçi görüntülenebilir; tam metin/telif sınırlı
Almanya	Musterbauordnung (MBO) 2024; DIN 4102-1	MBO’da ‘Sonderbauten’ kapsamında okullar/üniversiteler	MBO ücretsiz; DIN standardı ücretli
Fransa	Arrêté du 25 juin 1980 (ERP); CCH	ERP ‘Type R’ (öğretim/kreş vb.)	Legifrance üzerinden ücretsiz
İspanya	Código Técnico de la Edificación (CTE) DB-SI	‘Uso Docente’	Resmî PDF erişimi mevcut
İtalya	D.M. 03/08/2015 (Codice di prevenzione incendi) + V.7 ‘Attività scolastiche’	Okullar için özel RTV (V.7)	İtfaiye kurumu sitesinden resmî PDF
Japonya	Building Standards Act; Fire Service Act	Bina kullanımına göre genel çerçeve (Use of Buildings)	Resmî çeviri portalı üzerinden erişim

4. KARŞILAŞTIRMALI BULGULAR

4.1. Kullanım sınıflandırması ve kapsam

Eğitim yapılarının sınıflandırılması, mevzuatların en belirleyici eşiklerinden biridir; çünkü kullanıcı yükü, kaçış kapasitesi, algılama-söndürme zorunlulukları ve yangına dayanım gibi pek çok parametre bu sınıflandırmaya bağlıdır. Örneğin ABD IBC’de eğitim kullanımı “Group E” altında tanımlanmakta ve belirli yaş/kişi sayısı eşiği ile ayrıştırılmaktadır [10]. Fransa’da kamuya açık yapılar (ERP) için yangın güvenliği düzenlemesi içinde eğitim yapıları “Type R” olarak özel hükümlerle ele alınırken; İspanya CTE DB-SI’de “Uso Docente (öğretim kullanımı)” başlığı altında değerlendirilir. Almanya’da MBO, okullar/üniversiteler gibi bazı yapı türlerini “Sonderbauten (Özel Yapılar)” kapsamında sayarak ilave koşullara tabi tutar. İtalya’da ise “Codice di prevenzione incendi” kapsamında okullara özel RTV (V.7 – Attività scolastiche) bulunmaktadır [5-8]. Türkiye’de BYKHY uygulamasında ‘kurumsal binalar’ sınıfı altında ‘eğitim tesisleri’ alt başlığı yer almakta; kılavuz eklerinde kompartıman alanı ve yangına dayanım gibi birçok kriter kullanım sınıfına göre tablolastırılmaktadır. Birleşik Krallık’ta ise “Building Regulations” için “Approved Document B” genel rehberlik sağlarken, okul binalarına yönelik tasarım kararları için BB100 sektörel bir kılavuz olarak öne çıkar. Japonya’da “Building Standards Act” kapsamında bina kullanımına ilişkin bölümler ve yangın önleme bölgeleri yer alırken, “Fire Service Act” yangın önleme ve yangınla mücadele ekipmanı çerçevesini tanımlar [1-3], [13], [14].

Eğitim yapılarında yangın güvenliği hükümlerinin devreye girdiği eşikler ülkeden ülkeye farklılaşmaktadır. Türkiye’de BYKHY yaklaşımı, bina yüksekliği, kullanıcı sayısı ve bazı

fonksiyon alanları üzerinden kesin kurallarla belirlenmiş sınırlar tanımlayarak işletme organizasyonunu da doğrudan düzenler. Örneğin, acil durum ekiplerinin kuruluşu için konut dışı binalarda 50’den fazla kişi bulunması veya bina yüksekliğinin 30,50 m’yi aşması gibi eşikler öne çıkmaktadır [1]. Birleşik Krallık’ta ADB, çıkış sayısını kişi sayısı eşiklerine göre kademelendirir (≤ 60 : 1; ≤ 600 : 2; >600 : 3) ve bu yaklaşım eğitim yapılarında yoğun hacimler için doğrudan belirleyicidir [2].

Buna karşılık bazı ülkelerde (ör. İspanya’da aktif sistemlerin bakım yönetmeliği) tasarım zorunluluklarından bağımsız şekilde sistemlerin sürekliliğini sağlayan periyodik kontrol-bakım yaklaşımı daha belirgindir. Türkiye’de ise eşik temelli örgütlenme ve tasarım yükümlülükleri, okul tipine göre uygulamayı netleştirirken; Ek-7 kapsamında bazı satırların iptali gibi durumlar, eğitim yapılarında otomatik algılama gerekliliğinin yorumunda ek dikkat gerektirebilmektedir (**Çizelge 2**) [1].

Çizelge 2. Kullanım sınıflandırması ve kapsam için sayısal eşikler (seçilmiş hükümler)

Ülke / Mevzuat	Kapsamı tetikleyen sayısal eşik	Eğitim yapıları açısından yorumu
Türkiye / BYKHY (Kılavuz, 2024)	Konut dışı binalarda 50’den fazla kişi bulunması → acil durum ekipleri; bina yüksekliğinin 30,50 m’yi aşması → acil durum ekipleri [1].	Okul/kampüs/yurt gibi kalabalık veya çok katlı eğitim yapılarında organizasyonel zorunluluklar doğrudan devreye girer [1].
Türkiye / BYKHY (Kılavuz, 2024)	Otomatik algılama kapsamı Ek-7 eşikleri ile ilişkilidir; kılavuzda Ek-7’de “kurum binaları (eğitim tesisleri...)” satırlarının Danıştay kararı ile iptal edildiği belirtilir [1].	Eğitim yapılarında algılama zorunluluğunun yorumu, yalnızca tabloya değil risk profiline ve diğer maddelere dayandırılmalıdır [1].
Birleşik Krallık / Approved Document B	Çıkış sayısı (oda/alan): ≤ 60 kişi → 1; ≤ 600 kişi → 2; >600 kişi → 3 (Table 2.2) [2].	Sınıf, yemekhane, spor salonu gibi kalabalık hacimlerde çıkış sayısının belirlenmesinde doğrudan eşik oluşturur [2].
İspanya / CTE DB-SI	Genel kural: tek çıkışa izin veren üst sınır 100 kişi; ancak kreş/ilköğretim/ortaöğretimde 50 öğrenci eşiği belirtilir [5].	Okul öncesi ve zorunlu eğitim kademelerinde daha düşük kullanıcı eşiği ile kaçış düzeni sıkılaştırılır [2].

4.2. Kaçış yolları ve kaçış mesafeleri

Kaçış güvenliği, eğitim yapılarında tasarımın en kritik başlıklarındandır. Mevzuatlar genellikle kaçış kapasitesi (kapı/koridor/merdiven genişlikleri), çıkış sayısı, çıkmaz koridor sınırları ve en uzak noktadan çıkışa kadar kaçış uzaklığı gibi göstergeler üzerinden ilerler. Türkiye BYKHY kılavuzu; kullanıcı yükü katsayıları (Ek-5/A), birim genişlik esasları ve kaçış uzaklığı limitlerinin (Ek-5/B) kullanım sınıfına göre belirlendiğini vurgular [1].

İspanya CTE DB-SI’da tahliye rotalarının uzunlukları için genel bir temel sınır (ör. katın herhangi bir noktasından kat çıkışına kadar 25 m) verilmekte; otomatik sprinkler sistemi varlığında belirli durumlarda bu sınırın %25 oranında arttırılabileceği belirtilmektedir [5].

ABD IBC’de ise çıkışa erişim kaçış mesafeleri, yapı kullanım sınıfı ve sprinkler varlığına göre bir tablo ile açıklanır. Örneğin, IBC “Table 1017.2- Group E (Educational)” dahil bazı kullanımlar için sprinkler yokken 200 ft, sprinkler varken 250 ft azami mesafe tanımlanmıştır [11,10]. Birleşik Krallık ADB’de tek yön 18 m, çift yön 45 m sınırları yer alır (**Çizelge 3**) [2].

Çizelge 3. Seçilmiş mevzuatlarda kaçış mesafesi yaklaşımı (örnek)

Ülke/Mevzuat	Parametre	Aktif sistem etkisi	Örnek eşik/değer	Not
Türkiye (BYKHY)	Kaçış uzaklığı (Ek-5/B)	Kullanım sınıfına göre tabloluk; kılavuz örneği verilmiştir	(Kılavuz örneğinde) tek yön 15 m, çift yön 45 m	Eğitim için değer Ek-5/B’de; burada yöntem gösterilmiştir
İspanya (CTE DB-SI)	Kat çıkışına kadar rota uzunluğu	Sprinkler varsa belirli durumlarda %25 artış	25 m (genel temel sınır); otomatik söndürme ile +%25 uygulanabilir.[5]	Uygulama koşulları DB-SI’da tanımlıdır
ABD (IBC)	Exit access travel distance (Table 1017.2)	Sprinkler ile daha yüksek limit	200 ft (≈61,0 m) / 250 ft (≈76,2 m) [11].	Örnek: Group E dâhil bazı kullanımlar
Birleşik Krallık (Approved Document B)	Kaçış mesafesi (Table 2.1)	Sprinkler varlığı bazı kriterlerde telafi unsuru olabilir; seyahat mesafesi tablosu doğrudan kullanım grubuna bağlıdır [2].	‘Assembly and recreation (elsewhere)’ : tek yön 18 m, çift yön 45 m [2].	Okul blokları ve çok amaçlı salonlar pratikte bu gruba yakınsayan senaryolar üretir [2].

4.3. Yangına dayanım ve kompartımanlama

Yangına dayanım gereklilikleri, çoğu sistemde bina yüksekliği/kat sayısı ve kullanım sınıfı ile ilişkilidir. Türkiye BYKHY kılavuzu eklerinde, kullanım sınıflarına göre yangına dayanım süreleri (Ek-3/C) ve kompartıman alanı sınırları (Ek-4) yer almaktadır. Örneğin Ek-4’te eğitim tesisleri için azami kompartıman alanı 6.000 m² olarak verilir; uygun yangın kontrol sistemleri bulunduğu bu sınırın kaldırılabilceği belirtilir [1]. Birleşik Krallık ADB’de “Table B2, assembly and recreation” için yangına dayanım sürelerini üst kat yüksekliği ve sprinkler varlığına göre kademelendirirken; “Table 8.1” sprinkler ile izin verilen kompartıman/kat alanının 2.000 m²’den 4.000 m²’ye çıkabildiğini gösterir [2].

İspanya CTE DB-SI, taşıyıcı sistemin yangına dayanımını (R) tahliye yüksekliğine ve kullanım türüne göre kademelendirir. Örneğin, eğitim dâhil idari/konut dışı bazı kullanımlarda, tahliye yüksekliği 15 m’yi geçmiyorsa R 60; 15–28 m aralığında R 90; 28 m üzeri için R 120 gibi artan gereklilikler tanımlanır [5]. Almanya’da yangına tepki ve dayanım sınıfları DIN 4102-1 gibi standartlar üzerinden tanımlanabilmekte olup, bu tür standartlar çoğunlukla ücretli erişimle sunulmaktadır (Çizelge 4) [9].

Çizelge 4. Yangına dayanım/kompartımanlama için örnek hükümler

Mevzuat	Kriter	Örnek değer	Açıklama
Türkiye (BYKHY Kılavuzu)	Azami kompartıman alanı (Ek-4)	Eğitim tesisleri: 6.000 m ²	Uygun yangın kontrol sistemleri ile sınır kaldırılabilir
Türkiye (BYKHY Kılavuzu)	Yangına dayanım süreleri (Ek-3/C)	Kurumsal binalar için (sprinkler yok) üst katlarda 60/90 dk vb.	Değerler bodrum derinliği ve bina yüksekliğine göre değişir
İspanya (CTE DB-SI)	Taşıyıcı sistem yangına dayanımı (Tabla 3.1)	h≤15 m: R 60; 15<h≤28 m: R 90; h>28 m: R 120	Kullanım türüne göre tablolaştırılmıştır

Çizelge 4 (Devam). Yangına dayanım/kompartımanlama için örnek hükümler

Mevzuat	Kriter	Örnek değer	Açıklama
İspanya (CTE DB-SI)	Kompartıman (sektör) alanı sınırı (SI 1)	Çok katlı ‘Docente’: her sektör $\leq 4.000 \text{ m}^2$; tek katlıda sektörlere zorunlu değil [5].	Eğitim yapılarında katlı kütlelerde kompartıman büyüklüğünü doğrudan sınırlayan açık bir üst değer tanımlar [5].
Birleşik Krallık (Approved Document B)	Taşıyıcı sistem minimum yangına dayanım (Table B2)	Purpose group 5: üst kat yüksekliği $\leq 18 \text{ m} \rightarrow 60 \text{ dk}$; $\leq 30 \text{ m} \rightarrow 90 \text{ dk}$ (sprinklersiz) / 60 dk (sprinklerli) [2].	Süreler, bodrum derinliği ve üst kat yüksekliğine göre kademelendirilir; sprinkler bazı eşiklerde süreleri düşürür/‘izin verir’ [2].
Birleşik Krallık (Approved Document B)	Azami kompartıman/kat alanı (Table 8.1)	Assembly & recreation (elsewhere) çok katlı: sprinklersiz 2.000 m^2 ; sprinklerli 4.000 m^2 [2].	Sprinkler, izin verilen kompartıman alanını artırarak planlama esnekliği sağlar [2].

4.4. Aktif sistemler: algılama, alarm, söndürme

Aktif sistemler (otomatik algılama, alarm ve sprinkler gibi) mevzuatlarda iki şekilde öne çıkar: (i) doğrudan zorunluluklar ve (ii) pasif/kaçış kriterlerinde sağlanan iyileştirmeler. İspanya DB-SI’da sprinkler varlığında belirli kaçış uzunluğu sınırlarının artırılabilceği açıkça ifade edilir. Benzer biçimde, IBC’de sprinkler varlığı, azami kaçış mesafesi tablolarında daha yüksek limitlerle temsil edilir [5] [11].

Türkiye BYKHY kılavuzu, yangın güvenliği yaklaşımını yalnızca tasarım parametreleriyle sınırlamayıp yangın öncesi ve sırasında alınacak tedbirler, organizasyon, eğitim ve denetim boyutlarını da vurgular [1].

Türkiye’de otomatik söndürme sistemi zorunluluğu; bina yüksekliği (30,50 m), kapalı otopark alanı (2000 m²) ve kişi sayısı (1000 kişi) gibi eşikler üzerinden belirlenmektedir. Bunun yanında, algılama-alarm tarafında yangın uyarı butonu için montaj yüksekliği (110–130 cm) ve erişim mesafesi ($\leq 60 \text{ m}$) gibi yerleşim kriterleri sayısal olarak tanımlanmıştır [1]. Birleşik Krallık ADB’de ayrıca üst katı 30 m’yi aşan belirli kullanım gruplarında sprinkler gerekliliği açıkça belirtilir [2].

İspanya’da ise aktif sistemlerin işletme güvenilirliği, RIPCI kapsamında bakım ve denetim periyotlarının (3 ay, 6 ay, 1 yıl, 5 yıl) sistematik biçimde tanımlanmasıyla sağlanmaktadır. Bu yaklaşım, eğitim yapılarında kullanım yoğunluğu değişse dahi sistem performansını sürdürülebilir kılmayı hedefler (Çizelge 5) [15].

Çizelge 5. Aktif sistemler için sayısal eşikler ve tasarım/yerleşim parametreleri

Ülke / Mevzuat	Algılama–Alarm (sayısal)	Otomatik söndürme (sayısal)	Not
Türkiye / BYKHY (Kılavuz, 2024)	Yangın uyarı butonu yüksekliği 110–130 cm; aynı kattaki bir butona yatay erişim $\leq 60 \text{ m}$ [1].	Sprinkler zorunluluğu: bina yüksekliği $> 30,50 \text{ m}$; 1000’den fazla kişi bulunan binalar; kapalı otopark alanı $> 2000 \text{ m}^2$ vb. [1].	Büyük ölçekli okul/kampüslerde eşikler sıklıkla tetiklenir [1].

Çizelge 5 (Devam). Aktif sistemler için sayısal eşikler ve tasarım/yerleşim parametreleri

Ülke / Mevzuat	Algılama–Alarm (sayısal)	Otomatik söndürme (sayısal)	Not
Türkiye / BYKHY (Kılavuz, 2024)	–	Sprinkler başlığı kapsama alanı (düşük/orta tehlike): maks. 21 m ² /başlık [1].	Tasarım parametresi olarak doğrudan kullanılır [1].
İspanya / RD 513/2017 (RIPCI, BOE)	Algılama–alarm sistemleri bakım programı: 3 ay / 6 ay (Tablo I); ayrıca yıllık / 5 yıllık kontroller (Tablo II) [15].	Sabit söndürme sistemleri (sprinkler vb.) dahil: 3 ay / 6 ay kontroller + yıllık / 5 yıllık kontroller [15].	Eğitim yapısı özelinde değil; tüm yapılarda minimum bakım çerçevesi [15].
İspanya / CTE DB-SI	SI 4; algılama–kontrol–alarm iletimi gereksinimleri (dotasyon tablosu ile) belirlenir [5].	Otomatik söndürme, tahliye rotası limitini %25 artıran telafi unsurudur [5].	Tasarım kararları kaçış ve kompartıman kurgusunu etkiler [5].
Birleşik Krallık / Approved Document B	–	Purpose group 3–7 binalarda üst kat >30 m ise sprinkler gerekir (Table B2 notu) [2].	Sprinkler, kompartıman alan sınırını 2.000 m ² → 4.000 m ² yükseltebilir (Table 8.1) [2].

4.5. İşletme yönetimi, eğitim ve denetim

Eğitim yapılarında yangın güvenliği, işletme aşamasında sürdürülen bir yönetim döngüsü gerektirir. Birleşik Krallık'ta "Regulatory Reform (Fire Safety) Order 2005" kapsamında uzman kişiler tarafından uygunluk ve yeterlilik risk değerlendirmesinin yapılması ve düzenli aralıklarla güncel tutulması zorunludur. Bu yaklaşım, okullarda tatbikat, bakım ve sürekli iyileştirmeyi yasal bir çerçeveye oturtur. Mevzuat, ciddi ve yakın tehlike durumları için güvenlik tatbikatları içeren prosedürlerin kurulmasını ve çalışanlara yangın güvenliği eğitiminin uygun aralıklarla tekrarlanmasını zorunlu kılar [4]. Türkiye BYKHY kılavuzu da yönetmelik hedeflerinin; yangın öncesi ve sırasında alınacak tedbirler ile organizasyon, eğitim ve denetimin usul ve esaslarını belirlemek olduğunu vurgulamaktadır [1]. "Japon Fire Service Act" amacı; yangınların önlenmesi, gözetim altında tutulması ve söndürülmesi yoluyla vatandaşların hayatı, bedeni ve malının korunması olarak tanımlanmıştır; bu çerçeve yangın önleme ve ekipman yükümlülüklerinin hukuki temelini oluşturmaktadır [14].

Eğitim yapılarında yangın güvenliğinin sürdürülebilirliği, tasarım aşamasındaki tedbirlerin yanında işletme yönetimi, eğitim ve denetim döngüsü ile sağlanmaktadır. Türkiye'de BYKHY, tatbikat sıklığını (en az yılda bir) ve acil durum ekiplerinin oluşturulmasını, kullanıcı sayısı ile bina yüksekliğine ilişkin eşik değerlerle ilişkilendirerek organizasyonel yükümlülükleri netleştirir [1]. Fransa'da işyeri yangın güvenliği talimatlarının tatbikat ve ekipman denemelerini içermesi ve bu çalışmaların en az altı ayda bir yapılması zorunluluğu, eğitim yapılarında kullanıcı davranışı ve tahliye disiplini güçlendiren operasyonel bir kontrol katmanı sunar [16]. İspanya'da ise aktif sistemlerin periyodik bakım ve kontrol periyotları üzerinden güvenliğin sürekliliği sağlanır; bakım kayıtlarının en az beş yıl saklanması denetim izlenebilirliğini artırır (Çizelge 6) [15].

Çizelge 6. İşletme yönetimi–eğitim–denetim: sayısal zorunluluklar ve kayıt

Ülke / Mevzuat	Tatbikat periyodu	Organizasyon eşiği	Denetim / bakım kaydı
Türkiye / BYKHY (Kılavuz, 2024)	En az yılda 1 tatbikat [1].	Konut dışı binalarda 50+ kişi veya bina yüksekliği > 30,50 m → acil durum ekipleri [1].	Tatbikat/eğitim organizasyonu işletme sorumluluğu olarak tanımlanır [1].
Fransa / Code du travail R4227-39	En az 6 ayda 1 tatbikat ve periyodik denemeler [16].	–	Tarih ve gözlemler kayıt altına alınır, denetime açık tutulur [16].
İspanya / RD 513/2017 (RIPCI, BOE)	– (tatbikat yerine sistem bakım periyotları sayısallaşır)	–	Bakım programı uyum belgeleri en az 5 yıl saklanır; bakım periyotları 3 ay/6 ay/1 yıl/5 yıl [15].
Birleşik Krallık / Regulatory Reform (Fire Safety) Order 2005	Tatbikat: ‘safety drills’ içeren prosedürler (periyot belirtilmez). Eğitim: ‘periyodik olarak’ [4].	Tahliye prosedürlerini uygulamak için ‘yeterli sayıda’ yetkin kişi atanır [4].	– (bu maddelerde sayısal kayıt süresi belirtilmez)

5. TARTIŞMA

Karşılaştırma, eğitim yapılarının çoğu ülkede ayrı bir kullanım sınıfı veya özel bina türü olarak tanımlandığını göstermektedir. Bu durum; hareket kabiliyeti, kalabalık tahliye dinamikleri ve gözetim ihtiyacı gibi özgül risklerin mevzuata yansımaları olarak değerlendirilebilir. Bir diğer ortak nokta, aktif sistemlerin (özellikle sprinkler) kesin kurallarla belirlenmiş sınırlarının gevşetebilmesi veya tasarım alternatiflerine olanak tanımasıdır (İspanya DB-SI ve ABD IBC örnekleri). Öte yandan, ülkelerin genel mevzuat mimarisi farklıdır. İtalya’daki “Codice di prevenzione incendi” çözümleri risk temelli bir yaklaşımı güçlendirirken; Türkiye gibi ek tablolarla detaylandırılmış sistemlerde uygulama denetimi daha doğrudan bir “kontrol listesi” üzerinden yürütülebilmektedir. Birleşik Krallık örneği, yapım aşaması rehberliği ile (AD B/BB100) işletme dönemini zorunlu kılan risk değerlendirme yükümlülüğünü (FSO) birlikte ele alması bakımından dikkat çekicidir [7] [1-5], [11]. Türkiye’de BYKHY’nin eğitim yapıları açısından güçlü tarafı, bina yüksekliği (30,50 m), kullanıcı sayısı (50+ / 1000+) ve belirli alan eşikleri (ör. kapalı otopark 2000 m²) üzerinden açık kesin kurallarla belirlenmiş tetikleyicilerle hem aktif sistemleri hem de organizasyonel yükümlülükleri devreye sokmasıdır. Bu yaklaşım özellikle büyük kampüsler, çok katlı okul binaları ve yoğun kullanıcı barındıran eğitim tesislerinde karar belirsizliğini azaltır [1]. Bununla birlikte, otomatik algılama zorunluluğuna ilişkin Ek-7 tablosunda “eğitim tesisleri” satırlarının Danıştay kararı ile iptal edildiğinin kılavuzda belirtilmesi, eğitim yapılarında algılama gerekliliğinin sadece tablolı eşikler üzerinden değil; diğer maddeler ve risk profili üzerinden değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır. Bu durum, özellikle yatakhaneli/kampüslü eğitim yapılarında algılama-alarım tasarımında minimum uyum yaklaşımı yerine risk temelli bir değerlendirmeyi öne çıkarır [1]. İspanya örneğinde aktif sistemlerin güvenilirliği bakım ve denetim periyotlarının (3 ay, 6 ay, 1 yıl, 5 yıl) sistematik biçimde tanımlanmasıyla güçlendirilirken; Fransa’da tatbikatın en az altı ayda bir zorunlu tutulması insan faktörüne yönelik daha sık bir kontrol sağlar. Türkiye’nin en az yılda bir tatbikat yaklaşımıyla karşılaştırıldığında, Fransa’nın tatbikat sıklığı özellikle kalabalık ve çok katlı eğitim binalarında operasyonel hazırlığı artıran bir politika tercihi olarak öne çıkmaktadır [1,15,16].

6. SONUÇLAR

Bu çalışma, eğitim yapılarında yangın güvenliği kriterlerini; (i) kullanım sınıflandırması ve kapsam, (ii) kaçış yolları ve kaçış mesafeleri, (iii) yangına dayanım ve kompartımanlama, (iv) aktif sistemler (algılama-alarm-söndürme) ve (v) işletme yönetimi, eğitim ve denetim başlıkları altında karşılaştırmıştır. İncelenen mevzuatlar ortak hedef olarak can güvenliği ve yangının yayılımının sınırlandırılmasını benimsemekle birlikte, bu hedefe ulaşmak için farklı ağırlık merkezleri kullanmaktadır. Bazı ülkeler tasarım zorunluluklarını sayısal eşiklerle kesin kurallarla belirlenmiş sınırlar biçiminde tanımlarken, bazıları işletme-bakım ve tatbikat periyotlarını ayrıntılandırarak performans sürekliliğini garanti altına almaktadır.

Türkiye’de BYKHY kılavuzu, eğitim yapılarında özellikle kullanıcı sayısı ve bina yüksekliği gibi tetikleyiciler üzerinden karar süreçlerini netleştiren bir yaklaşım sunmaktadır. Acil durum organizasyonuna ilişkin eşikler ile otomatik söndürme ve algılama-alarm gibi aktif sistem hükümlerinin birlikte değerlendirilmesi, büyük ölçekli okul kampüsleri, yurtlar ve çok amaçlı salonların bulunduğu karma eğitim yerleşkelerinde kritik önem taşır. Buna karşın, kapsam tanımlarının farklı kararlarla değişebilmesi, eğitim yapılarında minimum uyum yaklaşımının ötesine geçilerek risk profiline dayalı yorumun önemini artırmaktadır. Bu durum, özellikle yatakhaneli eğitim yapıları, yüksek kullanıcı yoğunluğu ve etkinlik kullanımının sık olduğu tesislerde algılama-alarm ve tahliye güvenliğinin daha dikkatli ele alınmasını gerektirebilir.

Karşılaştırmanın en belirgin çıktılarından biri, kaçış güvenliğinin yalnızca geometrik düzenlemeler (kaçış yolu, çıkış sayısı, kaçış mesafesi) ile sınırlı olmadığıdır. Eğitim yapılarında kullanıcı profili (yaş grubu, davranış biçimleri, hareket kabiliyeti), kullanım saatleri ve dönemsel yoğunluk farklılıkları, kaçış güvenliği tasarımının işletme yönetimi ile birlikte ele alınmasını zorunlu kılar. Bu nedenle tasarım kriterlerinin yanında düzenli eğitim ve tatbikat uygulamalarının sıklığı, tahliye performansını doğrudan etkileyen tamamlayıcı bir güvenlik katmanı olarak görülmelidir.

Pasif önlemler kapsamında kompartımanlama ve yangına dayanım kararları, yangının başlangıç bölgesinde sınırlandırılmasını sağlayarak tahliye için gerekli zamanı artıran temel unsurlardır. Eğitim yapılarında sınıf blokları, laboratuvarlar, yemekhaneler, spor salonları, yurtlar ve otopark gibi farklı risk bileşenlerinin bir arada bulunması, kompartıman yaklaşımını daha kritik hale getirmektedir. Bu bağlamda, eğitim yapısı tipolojilerinin net tanımlanması ve pasif önlemlerin bu tipolojilere göre daha açık eşiklerle ilişkilendirilmesi, uygulamadaki yoruma dayalı farklılıkları azaltacaktır.

Aktif sistemlerde iki boyut öne çıkmaktadır: zorunluluk eşikleri ve sistemlerin sürdürülebilir performansı. Zorunluluk eşikleri ilk yatırım kararlarını yönlendirirken, bakım-denetim-kayıt düzeni sistemlerin yıllar içinde güvenilir kalmasını sağlar. Eğitim yapılarında gerçek risk azaltımı, yalnızca kurulu sistem ile değil, işletme sürecinde sistemlerin çalışır halde tutulmasıyla mümkündür. Bu nedenle bakım periyotlarının ve denetim-kayıt mekanizmalarının görünür ve denetlenebilir şekilde yapılandırılması, eğitim yapılarında yangın güvenliğini güçlendiren temel adımlardandır.

Sonuç olarak Türkiye açısından geliştirilebilecek iyileştirme alanları: eğitim yapıları için daha açık tipoloji tanımları (okul, yurt, kampüs, çok amaçlı salon vb.), işletme-bakım ve denetim mekanizmalarının daha sistematik biçimde görünür hale getirilmesi ve tatbikat-eğitim gerekliliklerinin kullanıcı yoğunluğu ve kullanıcı profilini daha doğrudan dikkate alan bir çerçeve

ile desteklenmesi olarak özetlenebilir. Bu yaklaşım, kesin kurallarla belirlenmiş eşiklerin sağladığı netliği korurken, uluslararası örneklerde görülen işletme sürekliliği avantajını da güçlendirecektir.

KAYNAKLAR

1. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Mesleki Hizmetler Genel Müdürlüğü. (2024). Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik Kılavuzu (Aralık 2024). <https://webdosya.csb.gov.tr/db/meslekihiizmetler/haberler/r2-b-nalarin-yanigin-korunmasi-hakkinda-yonetmel-k-kilavuzu-etk-les-ml--20241221082232.pdf>
2. UK Government. (2020). Building Regulations: Approved Document B (Fire safety). GOV.UK. https://assets.publishing.service.gov.uk/media/67d17064a005e6f9841a1d50/Approved_Document_B_volume_2_Buildings_other_than_Dwellings_2019_edition_incorporating_2020_2022_and_2025_amendments_collated_with_2026_and_2029_amendments.pdf
3. UK Department for Education. (2021). Building Bulletin 100: Design for fire safety in schools. GOV.UK. <https://www.gov.uk/government/publications/building-bulletin-100-design-for-fire-safety-in-schools>
4. UK Legislation. (2005). The Regulatory Reform (Fire Safety) Order 2005 (Articles 9, 15, 21). Legislation.gov.uk. <https://www.legislation.gov.uk/ukxi/2005/1541/contents/made>
5. Gobierno de España. (2019). Código Técnico de la Edificación: DB-SI Seguridad en caso de incendio. <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/SI/DBSI.pdf>
6. République Française. (1980). Arrêté du 25 juin 1980: Règlement de sécurité contre les risques d'incendie et de panique dans les ERP (Type R dâhil). Légifrance. <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/LEGISCTA000025005473>
7. Ministero dell'Interno (Italia). (2015). D.M. 3 agosto 2015: Approvazione di norme tecniche di prevenzione incendi (Codice) ve V.7 Attività scolastiche. Vigili del Fuoco. <https://www.vigilfuoco.it/codice-di-prevenzione-incendi>
8. Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt). (2024). Musterbauordnung (MBO) – Fassung 2024 (Model Building Code). <https://www.dibt.de/fileadmin/dibt-website/Dokumente/Rechtsgrundlagen/MBO.pdf>
9. DIN. (1998.). DIN 4102-1: Fire behaviour of building materials and elements. DIN Media. <https://www.dinmedia.de/en/standard/din-4102-1/5241696>
10. International Code Council (ICC). (2024). International Building Code: Group E (Educational) tanımı. <https://codes.iccsafe.org/s/IBC2024V1.0/chapter-3-occupancy-classification-and-use/IBC2024V1.0-Ch03-Sec305.2>
11. International Code Council (ICC). (2024). IBC Table 1017.2: Exit access travel distance (sprinklerli/sprinklersiz). ICC yayını. <https://www.iccsafe.org/wp-content/uploads/IBC-General.pdf>
12. National Fire Protection Association (NFPA). (t.y.). NFPA codes and standards: ücretsiz çevrimiçi görüntüleme/erişim bilgisi. NFPA. <https://www.nfpa.org/for-professionals/codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/free-access>
13. Japanese Law Translation. (2020). Building Standards Act (Act No. 201 of 1950), last version Act No. 43 of 2020. Resmî çeviri portalı.
14. Japanese Law Translation. (2008). Fire Service Act (Act No. 186 of 1948), last version Act No. 41 of 2008. Resmî çeviri portalı.
15. Gobierno de España. (2017, değişikliklerle). Real Decreto 513/2017, de 22 de mayo, por el que se aprueba el Reglamento de instalaciones de protección contra incendios (RIPCI) (texto consolidado). Boletín Oficial del Estado (BOE). <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2017-6606>
16. République Française. (2008). Code du travail, Article R4227-39. Légifrance. https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/article_jo/JORFARTI000018448936

PASİF YANGIN DURDURUCU SİSTEMLERİN AKUSTİK PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Mehmet OKAY^{1*}

¹ Armacell Yalıtım A.Ş. Ümraniye, İstanbul, 34770

ÖZET

Binalarda işitsel konforun sağlanması ve yangın güvenliğinin temini, uygulamada büyük ölçüde aynı ayırıcı yapı binalarda işitsel konforun sağlanması ve yangın güvenliğinin temini, uygulamada büyük ölçüde aynı ayırıcı yapı elemanları üzerinden karşılanmaktadır. Binaların Gürültüye Karşı Korunması Hakkında Yönetmelik (BGKKHY), ayırıcı yapı elemanlarının belirli bir akustik performansı sağlamasını zorunlu kılar; Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik (BYKHY), bu elemanları yangın kompartımanı sınırı olarak tanımlamakta ve tesisat geçişlerinin pasif yangın durdurucu sistemlerle sızdırmaz hâle getirilmesini şart koşmaktadır. Ancak tesisat geçişlerinin hedeflenen akustik performans üzerindeki etkisinin tasarım ve denetim süreçlerinde nasıl yönetileceğine ilişkin uygulamaya dönük bir çerçeve bulunmamaktadır. Bu çalışmada, tesisat geçişleri içeren ayırıcı yapı elemanları, ana yapı elemanı ile pasif yangın durdurucu sistemlerle kapatılmış açıklıkların birlikte değerlendirildiği kompozit bir sistem olarak ele alınmıştır. Eşdeğer ses geçişi temelli hesap yaklaşımı kullanılarak, yerinde ölçüm esaslı akustik performans sınırları hedef R_w değerlerine dönüştürülmüş ve tesisat geçişlerinde sağlanması gereken asgari akustik performans belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, akustik gerekliliklerin mutlak değerler yerine göreceli performans farkları üzerinden tanımlanabileceğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Yapı Fiziği, Yapı Akustiği, Yangın Güvenliği, Pasif Yangın Durdurucu

EVALUATION OF THE ACOUSTIC PERFORMANCE OF PASSIVE FIRESTOPPING SYSTEMS

ABSTRACT

In building practice, the provision of acoustic comfort and fire safety is largely addressed through the same separating building elements. While the Regulation on Protection of Buildings Against Noise (BGKKHY) requires separating elements to achieve a specified level of acoustic performance, the Regulation on Fire Protection of Buildings (BYKHY) defines these elements as fire compartment boundaries and mandates the sealing of service penetrations using passive firestopping systems. However, an application-oriented framework addressing how the impact of service penetrations on the targeted acoustic performance should be managed during design and inspection processes is lacking. In this study, separating building elements containing service penetrations are considered as a composite system formed by the main building element and openings sealed with passive firestopping systems. Using an equivalent sound transmission-based calculation approach, in-situ measurement-based acoustic performance limits are converted into target R_w values, and the minimum acoustic performance required at service penetrations is determined. The results indicate that acoustic requirements can be defined based on relative performance differences rather than absolute values.

Keywords: Building Physics, Building Acoustics, Fire Safety, Passive Fire Protection.

^{1*} okaymehmet92@gmail.com

1. GİRİŞ

Binalarda iç mekân konforunun sağlanmasında akustik performans, kullanıcı sağlığı, mahremiyet ve işlevsel verimlilik açısından temel bir tasarım kriteri olarak kabul edilmektedir. Bu kapsamda Binaların Gürültüye Karşı Korunması Hakkında Yönetmelik (BGKKHY), farklı bina tipleri ve mahal işlevleri için komşu hacimler arasında sağlanması gereken asgari ses yalıtımı gereksinimlerini tanımlamakta; konut, eğitim, sağlık ve konaklama yapıları başta olmak üzere birçok yapı türünde ayırıcı yapı elemanlarının belirli bir akustik performansı sağlamasını zorunlu kılmaktadır [1].

BGKKHY’de tanımlanan bu gereksinimler, esas olarak duvar, döşeme ve tavan gibi ayırıcı yapı elemanları üzerinden değerlendirilmekte ve bu elemanların hedeflenen akustik performansı sağlanması beklenmektedir. Yönetmeliğe eşlik eden açıklama ve uygulama kılavuzunda, proje ve saha denetimi aşamalarında, özellikle boru, kanal ve servis ekipmanlarının yapı elemanlarını deldiği noktalarda alınacak önlemler vurgulanmaktadır. Bu durum, akustik performansın yalnızca yapı elemanlarının nominal özellikleri üzerinden değil, aynı zamanda bu elemanların sürekliliğinin bozulduğu kritik detaylar dikkate alınarak ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır [2].

Öte yandan Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik (BYKHY), bina içindeki yangın güvenliğinin sağlanabilmesi amacıyla yangın kompartımanlaşmasını temel bir ilke olarak tanımlamakta ve yangın kompartımanı oluşturan ayırıcı yapı elemanlarının, yönetmelikte belirtilen asgari süreler boyunca yangına dayanım sağlamasını zorunlu kılmaktadır [3]. Bu kapsamda, ilgili bölme elemanlarının taşıyıcılıklarını koruması (R), alev ve duman geçişine karşı bütünlüğünü sürdürmesi (E) ve ısı geçişini sınırlaması (I) beklenmektedir [4]. Özellikle alev ve dumanın kompartıman sınırlarını aşarak bitişik mahallere yayılmasını önlemek amacıyla, duvar ve döşemeleri delen tesisat geçişlerinin pasif yangın durdurucu önlemlerle sızdırmaz hâle getirilmesi ve ayırıcı yapı elemanının bütünlüğünün bu noktalarda korunması zorunlu tutulmaktadır. Bu yaklaşım, tesisat geçişlerini yangın kompartımanı performansını doğrudan etkileyen kritik detaylar hâline getirmektedir. Bu çalışmada söz konusu sistemlerin yangına dayanım süreleri veri kabul edilmekte; değerlendirme, bu geçişlerin akustik performans üzerindeki etkisine odaklanmaktadır.

Bu noktada yapı fiziği açısından önemli bir tasarım ve denetim problemi ortaya çıkmaktadır. BGKKHY, akustik performansın değerlendirilmesini yerinde gerçekleştirilen DnT,A ölçümleri üzerinden tanımlamakta ve böylece birleşimler, tesisat geçişleri ve uygulama koşullarının toplam performans üzerindeki etkisinin sahada doğrulanmasını hedeflemektedir. Aynı zamanda BYKHY, bu geçişlerin yangın güvenliği açısından pasif yangın durdurucu sistemlerle kapatılmasını zorunlu kılmaktadır. Ancak mevzuatta, proje ve denetim aşamalarında bu süreksizliklerin akustik açıdan dikkate alınması gerektiği açıkça belirtilmesine rağmen, söz konusu detayların hedeflenen DnT,A performansını sağlayacak biçimde nasıl tasarlanacağı ve özellikle pasif yangın durdurucu sistemlerin hangi asgari akustik ölçütleri karşılaması gerektiği uygulamaya yönelik olarak açık biçimde ortaya konulmamaktadır. Mevzuat, bu noktada performans hedeflerini tanımlamakta; bu hedeflere hangi yöntem ve araçlarla ulaşılabileceğine ilişkin teknik çerçeveyi tasarımcıya bırakmaktadır.

Literatürde, ayırıcı yapı elemanlarının süreksizlik içeren bölgelerinin değerlendirilmesine yönelik olarak kompozit sistem yaklaşımı ve eşdeğer ses geçişi temelli hesap yöntemleri tanımlanmış; bu yaklaşımlar nomogramlar aracılığıyla görselleştirilmiştir [5]. Ancak bu çalışmaların, pasif yangın

durdurucu sistemlerin, BGKKHY kapsamında tanımlanan yerinde ölçüm temelli akustik performans hedefleriyle doğrudan ilişkilendirildiği, tasarım ve denetim süreçlerinde uygulanabilir bir çerçeve sunabilmesi için geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çalışmanın temel problemi, tesisat geçişleri içeren ayırıcı yapı elemanlarında, akustik performans gereksinimleri ile yangın güvenliği açısından zorunlu olan pasif yangın durdurucu çözümlerin, ortak bir performans dili üzerinden birlikte ve tutarlı biçimde değerlendirilmesini sağlayacak, uygulamaya dönük bir hesap kurgusunun eksikliğidir. Bu doğrultuda çalışmanın araştırma sorusu şu şekilde tanımlanmıştır; Tesisat geçişleri bulunan ayırıcı yapı elemanlarında, hedeflenen akustik performansın sağlanabilmesi için pasif yangın durdurucu sistemlerin asgari hangi akustik performansı sağlaması gerekmektedir?

2. YAPI TÜRLERİNDEKİ MAHALLERİN İŞİTSEL KONFOR VE YANGIN GÜVENLİĞİ GEREKSİNİMLERİ AÇISINDAN İNCELENMESİ

BGKKHY ve BYKHY, farklı amaçlarla düzenlenmiş mevzuatlar olmakla birlikte, bina içindeki kritik mahalleri ve bu mahalleri çevreleyen ayırıcı yapı elemanlarını doğrudan hedef almaktadır. BGKKHY, işitsel konforun sağlanabilmesi amacıyla, başta bağımsız kullanım birimleri olmak üzere kritik mahalleri çevreleyen duvar, döşeme ve tavanların yapı yerinde belirli bir akustik performansı (DnT,A) sağlamasını zorunlu kılmaktadır. BYKHY ise yangın güvenliği açısından mahalleri çevreleyen yapı elemanlarını yangın kompartımanı sınırı olarak değerlendirmekte ve bu yapı elemanlarının yangına dayanımlı olmasını, tesisat geçişlerinin ise pasif yangın durdurucu sistemlerle sızdırmaz hâle getirilmesini şart koşturmaktadır.

Çizelge 1'de, farklı yapı türlerinde kritik kabul edilen mahaller, her iki yönetmelik bağlamında karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Karşılaştırma, söz konusu mevzuatların farklı hedeflere sahip olmasına rağmen, uygulamada büyük ölçüde aynı mahalleri ve aynı ayırıcı yapı elemanlarını değerlendirme konusu yaptığını göstermektedir.

Çizelge 1. Yapı Türlerine Göre Bazı Mahallerin İşitsel Konfor ve Yangın Güvenliği Açısından Karşılaştırılması

Bina Türü	Kritik Mahal	BGKKHY	BYKHY
Konut	Bağımsız Birim	İşitsel Konfor Gereksinimi	Yangın Kompartımanı / Kaçış Düzeni
Konaklama	Odalar		
Eğitim	Derslik		
Sağlık	Hasta Odası		
Sağlık	Ameliyathane		
Büro	Çalışma/Toplantı Odaları		
Tüm Yapılar	Teknik Merkez	Gürültülü Mahal – Akustik Performans Gereksinimi	Yüksek Yangın Riski / Kompartıman
	Tesisat Şaftları	Yan İletim Açısından Kritik	Yangın ve Duman Sızdırmazlığı / Kompartıman
	Cephe Birleşim Detayları	Diş-İç ve Katlar Arası Ses Geçiş	Cepheden Yangın Yayılımı

Çizelge 1'de belirtilen mahallerin tamamı, işlevlerini yerine getirebilmeleri için kaçınılmaz olarak mekanik ve elektrik tesisat sistemleri ile donatılmakta; söz konusu sistemlerin duvar, döşeme ve tavan elemanlarından geçişi zorunlu hâle gelmektedir. Bu geçiş noktaları, her iki yönetmelik kapsamında performans göstermesi beklenen ayırıcı yapı elemanlarının en kritik ve en zayıf noktalarını oluşturmaktadır. BYKHY kapsamında, yangın kompartımanı bütünlüğünün korunabilmesi amacıyla, yapı elemanlarını delen tesisat geçişlerinde pasif yangın durdurucu sistemlerin uygulanması zorunlu tutulmaktadır. Ancak akustik açıdan bakıldığında, yapı elemanının sürekliliğini bozan bu açıklıkların, hedeflenen işitsel konfor performansı üzerindeki etkisinin nasıl yönetileceğine ilişkin uygulamaya dönük açık bir tanımlama bulunmamaktadır.

3. TESİSAT GEÇİŞLERİ VE KOMPOZİT BÖLME ELEMANI YAKLAŞIMI

Önceki bölümde ortaya konulduğu üzere, kritik mahalleri çevreleyen ayırıcı yapı elemanları, işlevlerini yerine getirebilmek için mekanik ve elektrik tesisat sistemleri ile donatılmakta; bu durum, duvar, döşeme ve tavan elemanlarında kaçınılmaz olarak tesisat geçişleri oluşturulmasına yol açmaktadır. Söz konusu geçişler, ayırıcı yapı elemanlarının sürekliliğini yerel olarak bozarak hem yangın güvenliği hem de işitsel konfor açısından performansın belirlendiği kritik bölgeler hâline gelmektedir.

Bu çalışma kapsamında ayırıcı yapı elemanları, tekil ve homojen bileşenler olarak değil; ana yapı elemanı (duvar, döşeme veya tavan) ile bu elemanı delen ve pasif yangın durdurucu sistemlerle kapatılmış tesisat geçişlerinin birlikte oluşturduğu bir sistem olarak ele alınmaktadır. Bu yaklaşım, ayırıcı yapı elemanını, farklı fiziksel ve akustik özelliklere sahip alt bileşenlerin birlikte çalıştığı kompozit ayırıcı yapı elemanı olarak tanımlamaktadır.

Kompozit ayırıcı yapı elemanı yaklaşımı, tesisat geçişlerinin toplam sistem performansı üzerindeki etkisinin nicel olarak değerlendirilmesine olanak tanımakta; akustik performansın yalnızca ana yapı elemanının nominal özelliklerine indirgenmesini engellemektedir. Bu bağlamda, bir sonraki bölümde kompozit ayırıcı yapı elemanlarında ses geçişinin hesaplanmasına yönelik temel yaklaşım sunulacak; ana yapı elemanı ile tesisat geçişlerinin toplam akustik performansa katkısı, eşdeğer ses geçişi yaklaşımı üzerinden hesap temelli olarak ele alınacaktır.

4. KOMPOZİT BÖLME ELEMANLARINDA SES GEÇİŞİNİN HESAPLANMASI

Kompozit ayırıcı yapı elemanlarının akustik performansının değerlendirilmesinde, yapı elemanını oluşturan farklı bileşenlerin ses geçişine olan katkılarının birlikte ele alınması gerekmektedir. Bu çalışmada ayırıcı yapı elemanı; ana yapı bileşeni (duvar, döşeme veya tavan) ile bu elemanı delen ve pasif yangın durdurucu sistemlerle kapatılmış tesisat geçişlerini içeren bir sistem olarak tanımlanmaktadır. Buna göre toplam akustik performans, yalnızca ana yapı elemanının performansına indirgenemez; açıklıklar dâhil tüm bileşenlerin oluşturduğu eşdeğer ses geçişi üzerinden değerlendirilir.

Bir kompozit ayırıcı yapı elemanı için toplam ses iletim katsayısı, elemanı oluşturan her bir bileşenden geçen ses enerjilerinin alan ağırlıklı ortalaması olarak ifade edilebilir [5]. Buna göre kompozit sistemin ses iletim katsayısı (τ_{kompozit}) aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$\tau_{kompozit} = \frac{S_{anaeleman} * \tau_{anaeleman} + S_{açıklık} * \tau_{açıklık}}{S_{toplam}} \quad (1)$$

Burada Sanaeleman ana yapı elemanının alanını, Saçıklık, tesisat geçişlerinin alanını, Stoplam ise kompozit elemanın toplam alanını ifade etmektedir. İlgili bileşenlere ait ses yalıtım değerleri ise ses iletim katsayıları (τ) cinsinden tanımlanmaktadır. Kompozit sistemin hava doğuşlu ses yalıtım performansı ise dB cinsinden aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır:

$$R_{kompozit} = -10 * \log(\tau_{kompozit}) \quad (2)$$

Hesaplamayı sadeleştirmek amacıyla, tesisat geçişlerine ait açıklık oranı (α) Eşitlik 3'teki gibi belirlenebilir.

$$\alpha = \frac{S_{açıklık}}{S_{toplam}} \quad (3)$$

Bu tanım kullanıldığında, hedeflenen toplam akustik performans dikkate alınarak, tesisat geçişlerinde (açıklık bölgelerinde) sağlanması gereken hava doğuşlu ses yalıtım performansı Eşitlik (4) ile ifade edilebilir:

$$R_{açıklık} = -10 * \log\left(\frac{10^{-R_{kompozit}/10} - (1-\alpha) * 10^{-R_{anaeleman}/10}}{\alpha}\right) \quad (4)$$

Elde edilen ifade, kompozit ayırıcı yapı elemanlarının akustik davranışının, ana yapı elemanı ile açıklık bölgelerinin göreceli performansları tarafından belirlendiğini açık biçimde ortaya koymaktadır. Bu bağlamda ana yapı elemanı, kompozit sistemin “güçlü” bileşenini temsil ederken; tesisat geçişleri ve bu geçişlerin kapatıldığı açıklık bölgeleri, sistemin toplam akustik performansını sınırlayan “zayıf” noktalar olarak öne çıkmaktadır.

Bu nedenle, hedeflenen eşdeğer akustik performansın sağlanabilmesi için ana yapı elemanının performansının en az hedeflenen düzeyde olması temel bir ön koşul olarak ortaya çıkmaktadır. Ana yapı elemanının bu koşulu sağlamadığı durumlarda, açıklık bölgelerinde alınacak önlemler ne kadar iyileştirilirse iyileştirilsin, kompozit sistemin toplam performansını hedeflenen değere taşımak mümkün olmayacaktır. Buna karşılık, ana yapı elemanının yeterli performansı sağladığı durumlarda, açıklık oranı ve hedeflenen toplam performans dikkate alınarak, tesisat geçişlerinde uygulanacak pasif yangın durdurucu sistemlerin sağlanması gereken asgari akustik performans, hesap temelli olarak belirlenebilmektedir.

5. TESİSAT GEÇİŞLERİNDE SAĞLANMASI GEREKEN ASGARİ AKUSTİK PERFORMANSIN BELİRLENMESİ

5.1. Yönetmelikte Tanımlanan Hedef Akustik Performansın Belirlenmesi

Binaların Gürültüye Karşı Korunması Hakkında Yönetmelik (BGKKHY) kapsamında sağlanması gereken asgari akustik performans düzeyi en az C sınıfı olarak tanımlanmaktadır. Bu kapsamda, kaynak ve alıcı mahallerin gürültülülük derecesi ile alıcı oda hassasiyetine bağlı olarak belirlenen $D_{nT,A}$ sınır değerleri, yönetmelik eklerinde açıkça verilmektedir.

Bu çalışmada, **Çizelge 1**'de tanımlanan ve farklı yapı türlerinde kritik kabul edilen mahaller esas alınarak, alıcı oda hassasiyetleri ile uyumlu C sınıfı sınır değerleri dikkate alınmıştır. Buna göre, yönetmelikte C sınıfı için tanımlanan $D_{nT,A} = 58$ dB, 55 dB, 52 dB ve 49 dB sınır değerleri, çalışmanın devamında hedeflenen akustik performans düzeyleri olarak kullanılmıştır.

Belirlenen bu sınır değerler, tesisat geçişleri içeren ayırıcı yapı elemanlarında sağlanması gereken asgari akustik performansın hesaplanmasında başlangıç noktası olarak kullanılmıştır.

5.2. $D_{nT,A}$ Sınır Değerlerinin Hedef R_w Değerine Dönüştürülmesi

BGKKHY kapsamında tanımlanan akustik performans sınır değerleri, yapı yerinde gerçekleştirilen ölçümler sonucunda elde edilen $D_{nT,A}$ büyüklüğü üzerinden ifade edilmektedir. Ancak tesisat geçişlerinin akustik performansının hesap temelli olarak değerlendirilebilmesi amacıyla, bu sınır değerlerin R_w cinsinden hedef performans değerlerine dönüştürülmesi gerekmektedir.

Yerinde ölçüm sonuçları ile spektrum uyarlama terimleri arasındaki ilişki, ilgili standartlarda tanımlanan bağıntılar esas alınarak ele alınmış; $D_{nT,A}$ değerlerinin $D_{nT,w}$ değerlerine dönüştürülmesi Eşitlik (5) doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında, TS EN ISO 10140-2 standardına göre elde edilen test raporları ile TS EN ISO 12354-1 standardına dayalı hesaplamalar birlikte değerlendirilmiş; sahada yaygın olarak karşılaşılan ayırıcı yapı elemanı tipleri için spektrum uyarlama terimi $C = -2$ dB olarak kabul edilmiştir [6,7].

$$D_{nT,A} = D_{nT,w} + C \quad (5)$$

Buna ilave olarak, alıcı hacmin özellikleri, yanal iletimler ve uygulama koşullarının etkisini temsilen ilave bir performans payı (CF) dikkate alınmıştır. Bu doğrultuda, kompozit ayırıcı yapı elemanının sağlaması gereken hedef eşdeğer akustik performans, $D_{nT,w}$ değerinden R_w cinsine Eşitlik (6) kullanılarak dönüştürülmüştür. Bu çalışmada CF değeri 3 dB olarak kabul edilmiştir [2].

$$R_{w,kompozit} = D_{nT,w} + C_F \quad (6)$$

Bu aşamada, kompozit ayırıcı yapı elemanının sağlaması gereken hedef eşdeğer akustik performans $R_{w,kompozit}$ cinsinden tanımlanmış olmaktadır. Takip eden adımda, bu hedef performansın, ana yapı elemanı ile tesisat geçişleri arasında nasıl paylaşıldığı ele alınacaktır. Bu

amaçla, farklı açıklık oranları dikkate alınarak, tesisat geçişlerinde sağlanması gereken asgari akustik performans değerleri, önceki bölümde verilen Eşitlik (4) kullanılarak hesaplanmıştır.

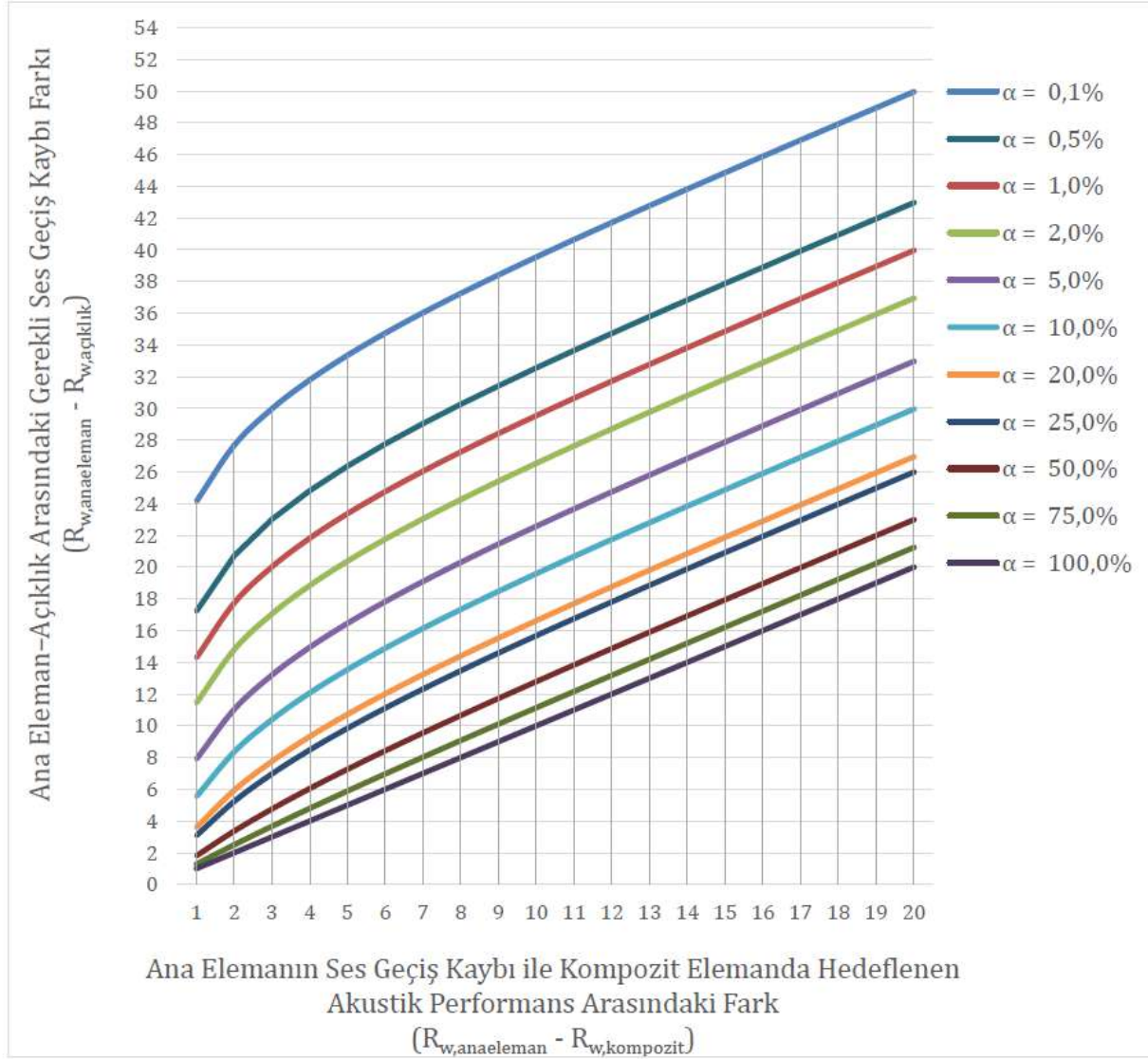
5.3. Kompozit Sistem İçin Açıklık Oranlarının Tanımlanması ve Tesisat Geçişlerinde Sağlanması Gereken Asgari Akustik Performansın Hesaplanması

Bu aşamada, kompozit ayırıcı yapı elemanlarının sağlaması gereken hedef eşdeğer akustik performans $R_{w,kompozit}$ cinsinden tanımlanmıştır. Ancak tesisat geçişleri içeren ayırıcı yapı elemanları, akustik açıdan homojen sistemler değildir. Kompozit sistemin toplam performansı, ana yapı elemanının akustik performansı ile tesisat geçişleri nedeniyle oluşan açıklık bölgelerinin performansının birlikte değerlendirilmesini gerektirmektedir. Bu nedenle, hedef $R_{w,kompozit}$ değerinin ana yapı elemanı ile tesisat geçişleri arasında nasıl paylaşıldığının ortaya konulması gerekmektedir.

Bu çalışmada açıklık oranı (α), tesisat geçişleri nedeniyle oluşan toplam açıklık alanının, ayırıcı yapı elemanının toplam alanına oranı olarak tanımlanmıştır. Açıklık oranı; tesisat geçişlerinin sayısı, çapları ve dağılımına bağlı olarak değişmekte olup, kompozit sistemin akustik performansını doğrudan etkileyen temel parametrelerden biridir. Kompozit sistem yaklaşımı kapsamında, hedeflenen $R_{w,kompozit}$ değeri ve açıklık oranı bilindiğinde, tesisat geçişlerinde uygulanacak pasif yangın durdurucu sistemlerin sağlaması gereken asgari akustik performans $R_{w,açıklık}$ Eşitlik (4) kullanılarak hesaplanabilmektedir. Bu değerlendirme, ana yapı elemanının akustik performansının hedeflenen $R_{w,kompozit}$ değerinden daha yüksek olduğu ve sistemin baskın bileşeni olarak davrandığı durumlar için geçerlidir.

Bu doğrultuda, farklı ana yapı elemanı performansları, farklı hedef $R_{w,kompozit}$ değerleri ve farklı açıklık oranları için çok sayıda senaryo hesaplanmıştır; elde edilen sonuçlar **Şekil 1**'de sunulmuştur. Grafik, kompozit sistem davranışının mutlak akustik performans değerlerinden ziyade, ana yapı elemanı ile hedeflenen kompozit performans arasındaki performans farkı ve açıklık oranı (α) tarafından belirlendiğini göstermektedir. Aynı açıklık oranı ve aynı performans farkı koşulları altında, hedeflenen $R_{w,kompozit}$ seviyesi değişse dahi, ana yapı elemanı ile tesisat geçişleri arasındaki akustik performans farkının sabit kaldığı görülmektedir.

Bu sonuç, tesisat geçişlerine ilişkin akustik tasarım probleminin mutlak performans değerleri yerine, görelî performans farkları üzerinden ele alınabileceğini ortaya koymaktadır. Geliştirilen grafik, bir yandan tasarım aşamasında tesisat geçişlerinde sağlanması gereken asgari akustik performansın belirlenmesine, diğer yandan laboratuvar ortamında belirli bir açıklık oranı için test edilmiş pasif yangın durdurucu sistemlerin, farklı açıklık oranlarına ve farklı ana yapı elemanlarına sahip saha koşullarındaki muhtemel kompozit performanslarının değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Bu yönüyle grafik hem tasarım hem de değerlendirme amacıyla kullanılabilen pratik ve hesap temelli bir karar desteği aracı sunmaktadır.



Şekil 1. Kompozit Ayırıcı Yapı Elemanlarında Tesisat Geçişleri İçin Gerekli Asgari Akustik Performans

6. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu çalışma, bina tasarımında akustik performans ve yangın güvenliği gerekliliklerinin, uygulamada büyük ölçüde aynı ayırıcı yapı elemanları üzerinde karşılandığı gerçeğinden hareket etmektedir. BGKKHY kapsamında yapı elemanlarından beklenen akustik performans ile BYKHY kapsamında tanımlanan yangına dayanım ve kompartımanlaşma şartlarının, özellikle duvar ve döşeme gibi ayırıcı elemanlarda örtüştüğü görülmektedir. Bu elemanlar, mekanik ve elektrik tesisat geçişleri nedeniyle çoğu zaman yekpare niteliklerini kaybetmekte ve bu geçişlerden kaynaklanan açıklıklar hem yangın güvenliği hem de akustik performans açısından kritik zayıflık noktaları oluşturmaktadır.

BYKHY kapsamında, yangın kompartımanlarını bölen yapı elemanlarından geçen tesisatların oluşturduğu boşlukların pasif yangın durdurucu sistemlerle kapatılması zorunlu tutulmaktadır. Bu sistemlerin yangına dayanım performansları, EN 1366 serisi ve UL 2079 gibi ilgili deney standartlarına göre test edilerek sınıflandırılmaktadır. Bu çalışmada, pasif yangın durdurucu sistemlerin söz konusu yangın performansları veri kabul edilmiş, değerlendirme bu sistemlerin ayırıcı yapı elemanlarının akustik performansı üzerindeki etkisine odaklanmıştır.

Bu kapsamda, tesisat geçişlerinin akustik etkisi, ana yapı elemanı ile birlikte çalışan bir kompozit sistem yaklaşımı çerçevesinde ele alınmıştır. Farklı ana yapı elemanı performansları ve farklı açıklık oranları için yapılan hesaplar sonucunda elde edilen grafik, tesisat geçişlerinin akustik performansının, ana yapı elemanı ile hedeflenen kompozit performans arasındaki göreceli performans farkları üzerinden değerlendirilebileceğini göstermektedir. Bu yaklaşım, mutlak performans değerlerinden bağımsız olarak, tesisat geçişlerine ilişkin akustik gerekliliklerin rasyonel ve hesap temelli biçimde tanımlanmasına imkân tanımaktadır.

Sunulan grafik, uygulamada iki temel ihtiyaca cevap vermektedir. Birincisi, hedeflenen kompozit akustik performansın sağlanabilmesi için tesisat geçişlerinde uygulanacak pasif yangın durdurucu sistemlerin sağlaması gereken asgari akustik performansın belirlenmesidir. İkincisi ise, laboratuvar ortamında belirli bir açıklık oranı için test edilmiş pasif yangın durdurucu sistemlerin, farklı açıklık oranlarına ve farklı ana yapı elemanlarına sahip saha koşullarında gösterebileceği muhtemel kompozit akustik performansın değerlendirilmesidir.

Bu çalışmanın kapsamı, hava doğuşlu ses iletiminin, tesisat geçişleri nedeniyle oluşan açıklıklar üzerinden değerlendirilmesi ile sınırlıdır. Ancak bazı uygulamalarda, özellikle ince cidarlı borular, büyük çaplı metal tesisatlar veya içinden hava geçen kanal sistemlerinde, tesisat cidar titreşimi ve kanal içindeki hava akımıyla taşınan ses, ayırıcı yapı elemanındaki açıklık etkisinden daha baskın bir iletim mekanizması hâline gelebilmektedir. Bu tür durumlarda, tesisat çevresinde uygulanan pasif yangın durdurucu sistemlerin akustik performansı tek başına belirleyici olmayabilir; tesisatın titreşimsel davranışı ve hava kaynaklı ses iletimi ayrıca değerlendirilmelidir.

Bu nedenle, ilerleyen çalışmalarda, tesisat geçişlerinin akustik etkisinin; hava doğuşlu ses iletiminin yanı sıra, yapı titreşimi ve kanal içi ses iletimi mekanizmalarını da içerecek biçimde genişletilmesi, kompozit sistem yaklaşımının farklı iletim yollarını kapsayacak şekilde geliştirilmesi önerilmektedir. Bu yönde yapılacak çalışmalar, pasif yangın durdurucu sistemlerin akustik performansının, daha karmaşık tesisat senaryoları için de bütüncül biçimde değerlendirilmesine katkı sağlayacaktır.

Sonuç olarak bu çalışma, pasif yangın durdurucu sistemlerin yangın güvenliği açısından testlerle doğrulanan performanslarının, akustik açıdan çoğu zaman ikincil planda kalan etkisini hesap temelli bir çerçeveye ele almakta; tesisat geçişlerine ilişkin tasarım ve değerlendirme süreçlerinde, yangın güvenliği ve akustik performansın birlikte ve tutarlı biçimde değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Özellikle akustik performansın, kompozit sistem yaklaşımıyla desteklenmesinin, tasarımcılar ve karar vericiler için önemli bir tamamlayıcı bilgi sağladığı değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

1. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2018). *Binaların gürültüye karşı korunması hakkında yönetmelik*.
2. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2018). *Binaların gürültüye karşı korunması hakkında yönetmelik uygulama kılavuzu*.
3. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2024). *Binaların yangından korunması hakkında yönetmelik kılavuzu*.
4. Türk Standardları Enstitüsü. (2023). *TS EN 13501-2: Yapı mamullerinin ve yapı elemanlarının yangın sınıflandırması—Bölüm 2: Havalandırma hizmetleri hariç, yangına direnç ve/veya duman kontrol deneylerinden elde edilen verileri kullanarak sınıflandırma*.
5. Hopkins, C. (2007). *Sound insulation*. Elsevier/Butterworth-Heinemann.
6. Türk Standardları Enstitüsü. (2021). *TS EN ISO 10140-2: Akustik—Yapı elemanlarının ses yalıtımının laboratuvarında ölçülmesi—Bölüm 2: Hava ile yayılan ses yalıtımının ölçülmesi*.
7. Türk Standardları Enstitüsü. (2019). *TS EN ISO 12354-1: Bina akustiği—Binaların akustik performansının elemanların performansından tayini—Bölüm 1: Odalar arasında hava ile yayılan sesin yalıtımı*.

ÜÇ ENERJİ STANDARDINA GÖRE KONUTLARIN GERÇEK VE HESAPLANAN PERFORMANS KARŞILAŞTIRMASI

Bilal GÖKGÜN^{1*}

Mehmet TÜRKOĞLU²

^{1,2} Konya, Meram Alakova mah. 42020

ÖZET

Bu çalışma, Konya iklim koşullarında üç farklı enerji standardının (Pasif Ev, TS 825:2008 ve TS 825:2024) konut performansına etkilerini incelemektedir. Çalışmada, Pasif Ev ve TS 825:2008 standartlarına göre eş zamanlı olarak inşa edilmiş, eşit kullanım alanına ve aynı kullanıcı sayısına sahip iki konutun 18 aylık ölçülmüş verileri analiz edilmiştir. Ayrıca güncel TS 825:2024 standardına göre üçüncü bir senaryo Bep-tr üzerinden simüle edilmiştir. Bulgular, Kullanıma başladıktan 18 ay sonra, Pasif Ev yapısının yıllık ısıtma enerjisi tüketiminin (12,5 kWh/m²yıl), TS 825:2008 yapısına kıyasla (200 kWh/m²yıl) 16 kat daha düşük olduğunu göstermektedir. TS 825:2008 yapısı için simüle edilen yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı 157 kWh/m²yıl iken, ölçülen tüketim değerinin 200 kWh/m²yıl olması, standartlar ne kadar iyi olursa olsun uygulama hatalarının performansı ciddi oranda düşürdüğünü kanıtlamaktadır. TS 825:2024 senaryosu teorik olarak 117 kWh/m²yıl talep öngörerek iyileşme sağlasa da Pasif Ev performansının gerisinde kalmaktadır. İç hava kalitesi analizlerinde, konvansiyonel yapıda CO₂ seviyelerinin sağlık sınırlarını (1000 ppm) aştığı, Pasif Ev’de ise stabil kaldığı belirlenmiştir. Yaşam Döngüsü Maliyet (LCC) analizi, Pasif Ev’in %9 ek ilk yatırım maliyetine rağmen, 30 yıllık projeksiyonda %70-75 oranında maliyet avantajı sağladığını ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Pasif ev, TS 825, BEP-TR, Enerji performansı, Yaşam döngüsü maliyeti

MEASURED AND CALCULATED PERFORMANCE COMPARISON OF RESIDENTIAL BUILDINGS UNDER THREE ENERGY STANDARDS

ABSTRACT

This study examines the impact of three energy standards (Passive House, TS 825:2008, and TS 825:2024) on residential building performance under the climatic conditions of Konya. Two dwellings constructed simultaneously according to the Passive House and TS 825:2008 standards, with identical usable floor areas and occupancy profiles, were monitored and 18 months of measured data were analyzed. Additionally, a third scenario compliant with TS 825:2024 was simulated using BEP-TR. Results show that the annual heating energy consumption of the Passive House (12.5 kWh/m²-year) was 16 times lower than that of the TS 825:2008 dwelling (200 kWh/m²-year). While the simulated heating demand for the TS 825:2008 building was 157 kWh/m²-year, the measured value reached 200 kWh/m²-year, indicating a significant performance gap due to construction-related deficiencies. The TS 825:2024 scenario predicts 117 kWh/m²-year, representing an improvement but remaining well above Passive House performance. Indoor air quality analysis revealed CO₂ levels exceeding 1000 ppm in the conventional building, whereas the Passive House maintained stable values. Life Cycle Cost analysis shows that despite a 9% higher initial investment, the Passive House achieves a 70–75% cost advantage over 30 years.

Keywords: Passive house, TS 825, BEP-TR, Energy performance, Life-cycle cost

^{1*} bilalgokgun@gmail.com

² tg.turkoglu@gmail.com

1. GİRİŞ

Küresel iklim değişikliği ile mücadele kapsamında binalarda enerji verimliliğinin artırılması, karbon emisyonlarının azaltılmasına yönelik stratejilerin merkezinde yer almaktadır. Avrupa Birliği'nin "Neredeyse Sıfır Enerjili Bina" (nZEB) hedefleri doğrultusunda Türkiye de ulusal mevzuatını güncellemekte ve enerji performans kriterlerini kademeli olarak sıkılaştırmaktadır [1]. Bu çerçevede, TS 825 "Binalarda Isı Yalıtım Kuralları" standardı 2008 versiyonunun ardından revize edilmiş ve 1 Nisan 2025 tarihinde yürürlüğe giren TS 825:2024 versiyonu ile kabuk performans gereklilikleri artırılmıştır [2],[3].

Ancak literatürde, tasarım aşamasında hesaplanan teorik enerji ihtiyacı ile bina işletmeye alındıktan sonra ölçülen gerçek tüketim değerleri arasında sıklıkla bir "performans farkı" (performance gap) olduğu vurgulanmaktadır [4]. Bu farkın başlıca nedenleri arasında uygulama detaylarındaki eksiklikler, ısı köprülerinin yeterince kontrol edilmemesi, hava sızdırmazlığının sağlanamaması ve kullanıcı davranışları yer almaktadır [5]. Dolayısıyla standartların iyileştirilmesi tek başına gerçek enerji performansının iyileştiğini garanti etmemektedir. Pasif Ev (Passivhaus) standardı ise enerji performansını yalnızca U-değeri sınırları üzerinden değil; hava sızdırmazlık, ısı köprüsü optimizasyonları, yüksek verimli ısı geri kazanımlı mekanik havalandırma ve enerji dengesi hesapları ile bütüncül bir yapı fiziği problemi olarak ele almaktadır [6]. Bu yaklaşım, tasarım hedeflerinin uygulama ve işletme aşamasında da doğrulanmasını amaçlamaktadır.

Bektaş Ekici tarafından yapılan çalışmada, TS 825 hesaplamalarında kullanılan güneş radyasyonu verilerinin Türkiye'nin farklı iklim bölgeleri için yeterli hassasiyeti sağlamayabileceği belirtilmiştir [7]. Karasal iklim özelliklerinin (soğuk kış, sıcak yaz) belirgin olduğu Konya gibi bölgelerde, standartların sunduğu teorik veriler ile gerçek saha performansı arasındaki ilişkinin ölçülmüş veriler üzerinden değerlendirilmesi önem taşımaktadır.

Bu çalışmanın amacı, Konya ilinde inşa edilmiş Pasif Ev ve TS 825:2008 standardına göre tasarlanmış iki konutun gerçek saha ölçümlerine dayanarak enerji tüketimi, iç mekân konforu ve yaşam döngüsü maliyeti açısından karşılaştırmalı analizini gerçekleştirmektir. Ayrıca güncellenen TS 825:2024 standardına göre üçüncü bir senaryo BEP-TR üzerinden simüle edilerek üç farklı yaklaşım arasındaki performans farkları değerlendirilmiştir.

TS 825:2008 standardı, mevcut yapı stokunun önemli bir bölümünü temsil ettiğinden, bu versiyonun karşılaştırmaya dahil edilmesi özellikle anlamlıdır. Türkiye'de enerji mevzuatındaki iyileşmeler olumlu bir gelişme olarak değerlendirilmekle birlikte, standartların asgari performans seviyelerini tanımladığı ve daha yüksek performans hedeflerinin hem ülke ekonomisi hem de son kullanıcı açısından ölçülebilir faydalar sağlayabileceği bu çalışma kapsamında ortaya konulmaya çalışılmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. İncelenen Yapılar

Çalışmanın metodolojik geçerliliğini sağlamak amacıyla, Konya ilinde (TS 825 İklim Bölgesi 3) aynı mahalle parseli içerisinde yer alan iki müstakil konut incelenmiştir. Değişkenlerin minimize

edilmesi amacıyla yapılar eş zamanlı, eş büyüklükte ve benzer kullanım profiline sahip olacak şekilde seçilmiştir. Her iki yapı da 2022 yılı içerisinde tamamlanmış olup, aynı inşaat sezonuna aittir. Isıtılan net kullanım alanları yaklaşık 150 m²'dir ve her iki konutta da dört kişilik (iki yetişkin, iki çocuk) aile yaşamaktadır. Bu yaklaşım, kullanıcı davranışı ve iklim koşullarına bağlı değişkenleri mümkün olduğunca sabit tutmayı amaçlamaktadır. Çalışmada üç senaryo değerlendirilmiştir:

Bina A (Pasif Ev):

Pasif Ev Enstitüsü (PHI) kriterlerine uygun olarak tasarlanmış ve inşa edilmiştir. Yapıda ısı köprüsüz detay çözümleri, üçlü camlı yüksek performanslı doğramalar ve ısı geri kazanımlı mekanik havalandırma sistemi (MVHR) bulunmaktadır. Isıtma sistemi hava kaynaklı ısı pompasıdır. Enerji dengesi hesapları PHPP v9 (Passive House Planning Package) yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir [8].

Bina B (Mevcut Stok – TS 825:2008):

TS 825:2008 standardına uygun olarak tasarlanmış, betonarme karkas sistemli ve çift camlı doğramalara sahip bir konuttur [2]. Isıtılan net alanı 148 m²'dir. Isıtma sistemi yoğunlaşmalı doğalgaz kombidir. Enerji performansı BEP-TR ulusal hesaplama yöntemi kullanılarak belirlenmiştir.

Bina C (Teorik Senaryo – TS 825:2024):

Bina geometrisi sabit tutulmuş, yalnızca kabuk bileşenleri 1 Nisan 2025 tarihinde yürürlüğe giren TS 825:2024 sınır değerlerine göre revize edilmiştir [3]. Enerji performansı güncel BEP-TR sürümü kullanılarak simüle edilmiştir. Bu senaryo teorik bir iyileştirme düzeyini temsil etmektedir.

2.2. Veri Toplama ve Analiz Yöntemi

Enerji performansı, yapıların kullanıma açılmasını takiben ilk 18 aylık döneme ait fatura verileri ve sayaç okumaları üzerinden izlenmiştir. Pasif Ev yapıda ısıtma sistemi olarak hava kaynaklı ısı pompası, konvansiyonel yapıda ise doğalgazlı yoğunlaşmalı kombi kullanılmaktadır.

Farklı ısıtma sistemlerinden kaynaklanan karşılaştırma sapmalarını minimize etmek amacıyla, sistemlerin mevsimsel verimlilikleri ve COP değerleri dikkate alınarak nihai enerji tüketimleri kWh cinsine dönüştürülmüş ve ısıtılan net alana bölünerek kWh/m²·yıl olarak normalize edilmiştir. Böylece farklı yakıt türlerinden kaynaklanan enerji dönüşüm farklılıkları dengelenmiştir.

Simülasyon araçları olarak Pasif Ev senaryosu için PHPP v9 [8], TS 825 senaryoları için ise güncel BEP-TR versiyonu kullanılmıştır. Bu iki hesap yaklaşımı metodolojik olarak farklı olmakla birlikte, her biri kendi standardının referans aracı olarak değerlendirilmiştir.

İç mekân konfor koşulları, her iki yapının çocuk yatak odalarına yerleştirilen kalibre edilmiş veri kaydediciler (Netatmo) ile eş zamanlı olarak ölçülmüştür. Ölçümler, pencerelerin genel olarak kapalı kaldığı kış periyodunda (Aralık–Ocak–Şubat) gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık ve CO₂ verileri anlık olarak kaydedilmiş, 12 saatlik (gündüz–gece) ortalamalar üzerinden analiz edilmiştir.

CO₂ seviyeleri bir konfor parametresinden ziyade, iç hava kalitesi ve sağlık riski göstergesi olarak değerlendirilmiştir [9]. Bu yaklaşım, aynı zamanda doğal havalandırmaya dayalı kullanım alışkanlıklarının iç ortam havası üzerindeki etkisini ortaya koymayı amaçlamaktadır.

2.3. Yaşam Döngüsü Maliyet (LCC) Analizi

Yaşam Döngüsü Maliyet (Life Cycle Cost – LCC) analizi, yapıların ilk yatırım maliyetleri ile işletme sürecinde oluşan enerji ve bakım giderlerinin bütüncül değerlendirilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Analiz, ISO 15686-5 standardında tanımlanan prensipler çerçevesinde kurgulanmıştır [12].

LCC hesabı üç temel bileşene dayanmaktadır:

1. İlk yatırım maliyeti (I_0)
2. Yıllık enerji giderleri (E_t)
3. Yıllık bakım ve işletme giderleri (M_t)

Enerji giderleri, 18 aylık ölçülmüş tüketim verileri üzerinden yıllıklaştırılmış ve analiz başlangıç yılı birim enerji fiyatları ile çarpılarak hesaplanmıştır. Enerji fiyatlarındaki değişkenliği temsil etmek amacıyla, son beş yıllık piyasa verileri incelenmiş ve ortalama yıllık fiyat artış oranı kabul değeri olarak modele dahil edilmiştir. Bu artış oranı, projeksiyon süresince bileşik artış yöntemi ile uygulanmıştır.

Yıllık enerji maliyeti aşağıda verilen Eşitlik 1 kullanılarak modellenmiştir:

$$E_t = E_0 \times (1 + g)^t \quad (1)$$

Burada;

E_0 : başlangıç yılındaki enerji maliyeti

g : yıllık ortalama enerji fiyat artış oranı

t : yıl sayısı

Bakım maliyetleri, konutların ilk bir yıllık kullanım sürecindeki kullanıcı geri bildirimleri ve sistem kapasite farklılıkları dikkate alınarak belirlenmiştir. Pasif Ev yapıda daha düşük kapasiteli mekanik sistem kullanılması ve sistem bileşenlerinin optimize edilmesi nedeniyle yıllık bakım maliyetlerinin konvansiyonel yapıya kıyasla daha düşük olduğu kabul edilmiştir. Bu fark yıllık sabit değer olarak modele dahil edilmiştir.

Toplam yaşam döngüsü maliyeti Eşitlik 2’de verildiği gibi ifade edilmiştir:

$$LCC = I_0 + \sum (E_t + M_t) \quad (2)$$

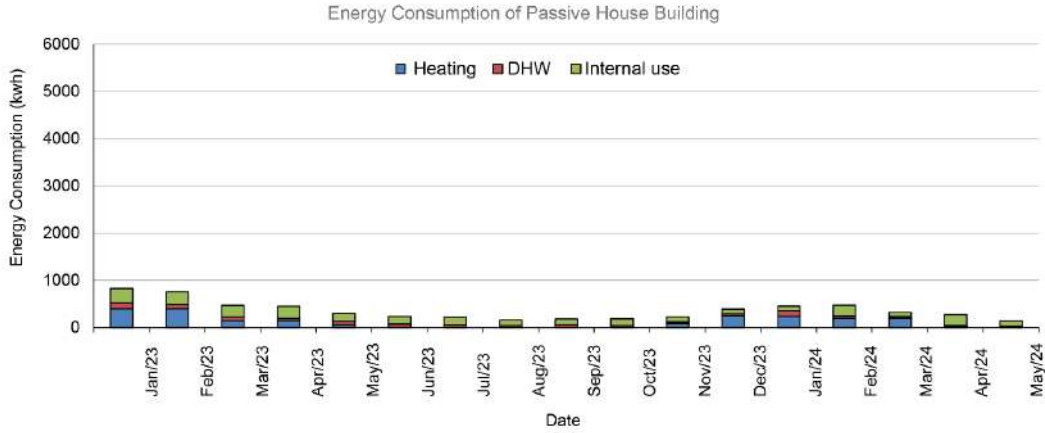
Analiz, 10 ve 30 yıllık projeksiyon periyotları için gerçekleştirilmiş; ek ilk yatırım maliyetinin geri ödeme süresi, yıllık enerji ve bakım tasarrufu farkları üzerinden hesaplanmıştır. Bu yaklaşım, yalnızca ilk yatırım maliyeti temelli değerlendirmelerin ötesine geçerek, uzun vadeli ekonomik performansı ortaya koymayı amaçlamaktadır.

3. BULGULAR

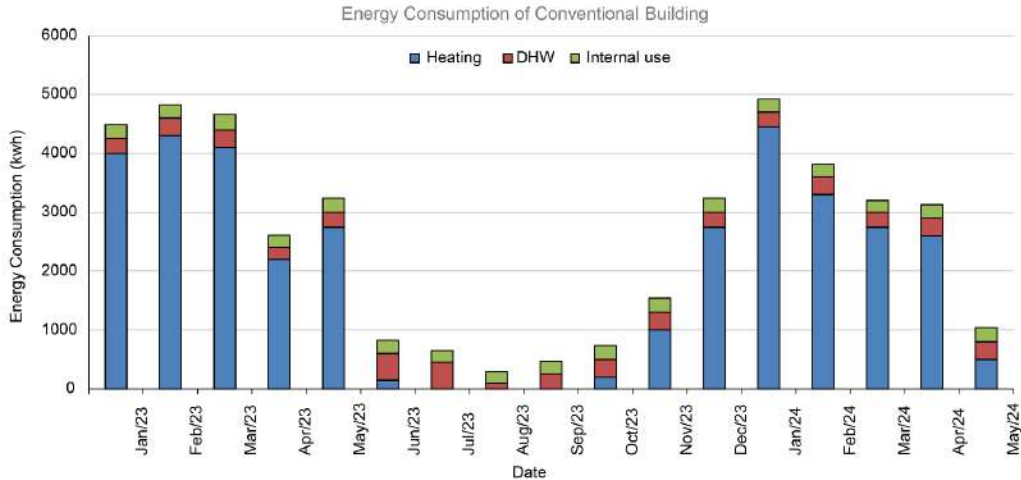
3.1. Enerji Tüketimi Karşılaştırması

Tasarım aşamasındaki hesaplamalara göre Pasif Ev'in (PHPP) yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı 15 kWh/m²·yıl, TS 825:2008 standardına göre tasarlanan yapının (BEP-TR) 157 kWh/m²·yıl ve TS 825:2024 senaryosunun (BEP-TR) ise 117 kWh/m²·yıl olarak belirlenmiştir. Güncel yönetmelik senaryosunda (117 kWh/m²·yıl), eski versiyona (157 kWh/m²·yıl) göre teorik olarak %25,4 oranında bir iyileşme hesaplanmıştır.

Ancak saha ölçümleri (Şekil 1 ve Şekil 2), teorik hesaplamalar ile gerçek işletme performansı arasındaki sapmayı ortaya koymaktadır. Pasif Ev'in ölçülen yıllık ısıtma enerjisi tüketimi 12,5 kWh/m²·yıl olarak gerçekleşirken, TS 825:2008 standardına göre inşa edilen yapıda bu değer 200 kWh/m²·yıl seviyesine ulaşmıştır.



Şekil 1. Pasif Ev binasının (Bina A) 18 aylık ısıtma enerjisi tüketim dağılımı



Şekil 2. Konvansiyonel binanın (Bina B – TS 825:2008) 18 aylık ısıtma enerjisi tüketim dağılımı

Ölçüm sonuçları, Pasif Ev'in konvansiyonel yapıya kıyasla yaklaşık 16 kat daha düşük ısıtma enerjisi tükettiğini göstermektedir. Ayrıca konvansiyonel yapıda özellikle kış aylarında enerji tüketiminin dış hava sıcaklığına bağlı olarak belirgin dalgalanmalar gösterdiği gözlenmiştir. Buna

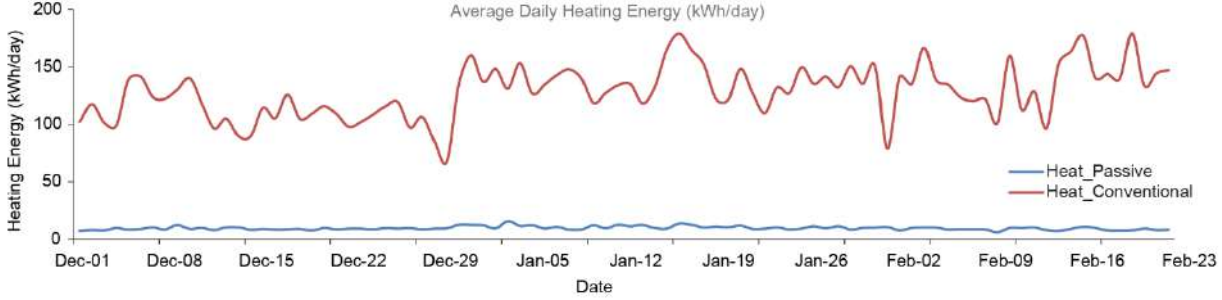
karşılık Pasif Ev yapının dış ortam sıcaklık değişimlerinden daha sınırlı ölçüde etkilendiği ve tüketim eğrisinin daha stabil olduğu belirlenmiştir. Bu durum, kabuk performansı, hava sızdırmazlık düzeyi ve ısı geri kazanımlı havalandırma sisteminin bütüncül etkisi ile açıklanabilir.

TS 825:2008 yapısında hesaplanan ($157 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{yıl}$) ve ölçülen ($200 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{yıl}$) değerler arasındaki yaklaşık %27'lik fark, performans sapmasının büyüklüğünü açıkça ortaya koymaktadır. Bu fark, uygulama detaylarındaki eksiklikler ve saha koşullarında oluşan ısı kayıplarının model varsayımlarını aşabildiğini göstermektedir.

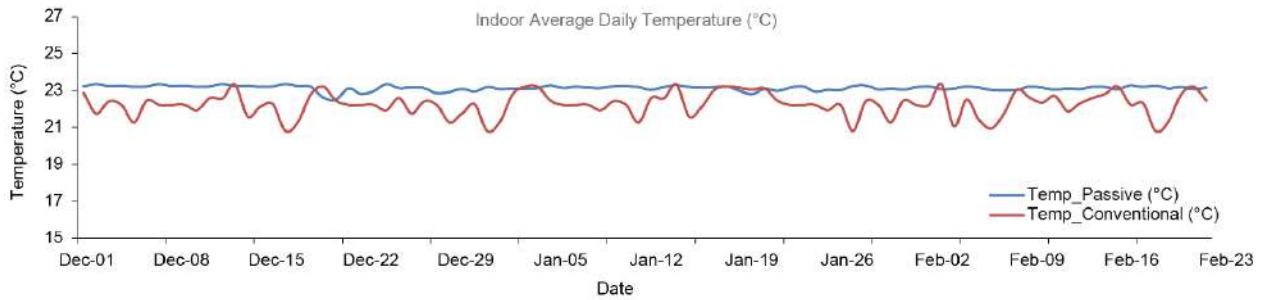
3.2. Isıtma Enerjisi ve İç Sıcaklık İlişkisi

Şekil 3 ve Şekil 4'te sunulan veriler, yapıların termal kararlılık düzeylerini ortaya koymaktadır. Pasif Ev yapıda düşük ısıtma enerjisi girdisine rağmen iç ortam sıcaklığı $22\text{--}23^\circ\text{C}$ bandında kararlı bir şekilde korunmuştur (Şekil 4). Günlük ortalama enerji tüketimi ile iç ortam sıcaklığı arasındaki ilişki, sistemin düşük talep ile stabil konfor sağlayabildiğini göstermektedir.

Buna karşılık konvansiyonel yapı, benzer ortalama sıcaklık değerlerini sağlayabilmek için daha yüksek enerji girdilerine ihtiyaç duymuş ve sıcaklık dalgalanmaları daha belirgin olmuştur. Kullanıcı geri bildirimlerinde, ortalama sıcaklık değerleri yeterli görünmesine rağmen pencere önleri ve farklı yüksekliklerde algılanan sıcaklık farklılıklarının mevcut olduğu ifade edilmiştir. Bu durum, yüzey sıcaklık farklılıkları ve hava sızdırmazlık eksiklikleri ile ilişkili olabilecek lokal konforsuzluk bölgelerine işaret etmektedir.



Şekil 3. Kış periodunda günlük ortalama ısıtma enerjisi tüketimi karşılaştırması



Şekil 4. Kış periodunda ölçülen iç hava sıcaklıklarının karşılaştırması

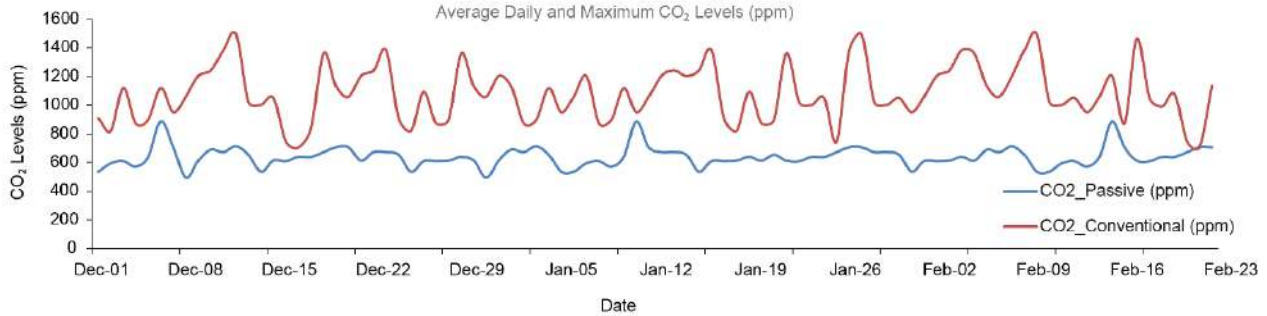
Bu bulgular, enerji tüketimi ile termal konfor arasındaki ilişkinin yalnızca ortalama iç hava sıcaklığı üzerinden değil, sıcaklık stabilitesi ve mekânsal homojenlik açısından da değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

3.3. İç Hava Kalitesi (CO₂)

İç hava kalitesinin değerlendirilmesinde CO₂ konsantrasyonu temel gösterge olarak ele alınmıştır. CO₂ seviyeleri, doğrudan bir termal konfor parametresi olmaktan ziyade, havalandırma yeterliliği ve potansiyel sağlık riski açısından önemli bir iç ortam hava kalitesi göstergesidir [13].

Şekil 5'te sunulan ölçümler, Pasif Ev yapıda kullanılan ısı geri kazanımlı mekanik havalandırma sisteminin (MVHR) etkinliğini ortaya koymaktadır. Pasif Ev'de CO₂ seviyeleri kış periyodu boyunca büyük ölçüde 800 ppm altında seyretmiş ve stabil bir dağılım göstermiştir. Bu durum, kontrollü ve sürekli havalandırmanın iç ortam hava kalitesini dış hava koşullarından bağımsız olarak sürdürülebilir biçimde sağlayabildiğini göstermektedir.

Buna karşılık doğal havalandırmaya (pencere açma) bağımlı olan konvansiyonel yapıda, özellikle kış aylarında gece saatlerinde CO₂ seviyelerinin 1500 ppm değerini aştığı gözlenmiştir. Bu artış, pencere açmanın düşük dış hava sıcaklıkları nedeniyle sınırlı kalması ve havalandırmanın süreklilik arz etmemesi ile ilişkilidir. Günlük grafiklerde CO₂ değerlerinin gündüz saatlerinde ani düşüşler gösterdiği, bunun da pencere açma yoluyla gerçekleştirilen manuel havalandırmaya bağlı olduğu belirlenmiştir. Ancak bu durum eş zamanlı olarak iç hava sıcaklığında düşüşe ve kısa süreli enerji tüketim artışına neden olmuştur. Dolayısıyla konvansiyonel yapıda enerji tüketimi ile iç hava kalitesi arasında denge kurmanın kullanıcı müdahalesine bağlı olduğu görülmektedir.



Şekil 5. Kış periyodunda ölçülen CO₂ konsantrasyonu karşılaştırması

3.4. Yaşam Döngüsü Maliyet Analizi (LCC)

Pasif Ev standardının sağlanabilmesi için kabuk yalıtım kalınlıklarının artırılması, üçlü camlı yüksek performanslı doğramaların kullanılması, ısı geri kazanımlı mekanik havalandırma sisteminin kurulması ve detay çözümlerinde daha yüksek işçilik hassasiyeti gerekmektedir. Bu kalemler ilk yatırım maliyetini artırıcı unsurlar olarak değerlendirilmiştir.

Bununla birlikte, düşük ısıtma talebi sayesinde daha düşük kapasiteli mekanik ekipman seçilebilmesi, dağıtım sistemlerinin sadeleşmesi ve sistem bileşenlerinin optimizasyonu bazı

kalemlerde maliyet azaltıcı etki yaratmaktadır. Artan ve azalan maliyet bileşenleri birlikte değerlendirildiğinde, Pasif Ev yapının toplam ilk yatırım maliyeti konvansiyonel yapıya kıyasla yaklaşık %9 oranında daha yüksek gerçekleşmiştir.

Ancak yaşam döngüsü perspektifinde enerji tüketim farkı belirleyici hale gelmektedir. Ölçülmüş tüketim değerleri esas alındığında Pasif Ev'in yıllık enerji gideri, TS 825:2008 yapıya göre çok daha düşüktür. Enerji fiyatlarındaki ortalama yıllık artış oranı modele dahil edildiğinde ve bakım maliyetlerindeki farklılıklar hesaba katıldığında, ek ilk yatırım maliyetinin geri ödeme süresi yaklaşık 4 yıl olarak hesaplanmıştır.

TS 825:2024 senaryosu teorik olarak enerji talebini düşürmekle birlikte, 30 yıllık projeksiyonda toplam maliyet (ilk yatırım + enerji + bakım) karşılaştırması Pasif Ev lehine belirgin bir avantaj göstermektedir. Model sonuçlarına göre, Pasif Ev yapının 30 yıllık dönemde toplam maliyet avantajı %70–75 aralığında gerçekleşmektedir [11].

Bu bulgular, yüksek performanslı yapıların ekonomik açıdan yalnızca başlangıç maliyeti üzerinden değerlendirilmemesi gerektiğini ve uzun vadeli enerji fiyat riskinin yaşam döngüsü analizlerinde belirleyici bir parametre olduğunu göstermektedir.

4.TARTIŞMA

Çalışma bulguları, TS 825:2024 standardının önceki versiyona kıyasla teorik olarak anlamlı bir iyileşme sağladığını doğrulamaktadır. Isıtma enerjisi ihtiyacının $157 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{yıl}$ değerinden $117 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{yıl}$ seviyesine düşmesi yaklaşık %25 oranında bir iyileşmeye karşılık gelmektedir. Bu sonuç, mevzuatın sıkılaştırılmasının kabuk performansı üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir. Ancak söz konusu teorik değer, Pasif Ev yapının ölçülmüş $12,5 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{yıl}$ tüketim değeri ile karşılaştırıldığında hâlâ oldukça yüksektir. TS 825:2024 senaryosunda hesaplanan değer, Pasif Ev performansının yaklaşık dokuz katı düzeyindedir. Bu durum, minimum gerekliliklerin iyileştirilmesinin tek başına yüksek performans seviyesine ulaşmak için yeterli olmadığını göstermektedir.

Çalışmanın en kritik bulgularından biri performans farkıdır. TS 825:2008 standardına göre tasarlanan yapı için BEP-TR üzerinden hesaplanan $157 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{yıl}$ değeri ile ölçülen $200 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{yıl}$ değeri arasındaki yaklaşık %27'lik sapma, tasarım hedeflerinin uygulama kalitesi ile doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır [5]. Bu sapma yalnızca standart sınır değerlerinin yeterliliği ile değil, hesap yönteminin temsiliyet kapasitesi ile de ilişkilidir. BEP-TR sisteminde hava sızdırmazlık değerlerinin varsayımsal kabul edilmesi, bazı ısı köprülerinin detay bazlı hesaplanmaması, ısı geri kazanımlı havalandırma sistemlerinin enerji dengesine sınırlı etkisinin modellenmesi ve pencere doğramalarında gerçek saha performansının sınır değerler üzerinden temsil edilmesi gibi faktörler, teorik hesap ile gerçek tüketim arasındaki farkın büyümesine neden olabilmektedir. Ayrıca tasarım aşamasındaki hesapların işletme öncesi ölçüm ve testlerle doğrulanmaması, uygulama hatalarının performansa doğrudan yansımaya zemin hazırlamaktadır.

Pasif Ev yapıda ise hesaplanan $15 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{yıl}$ ve ölçülen $12,5 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{yıl}$ değerlerinin birbirine yakın olması, PHPP yönteminin detaylı veri girişine olanak sağlaması ve zorunlu hava sızdırmazlık testleri ile performansın doğrulanması sayesinde mümkün olmuştur. Bunun yanı sıra, kullanıcıların

sistem kullanımı konusunda bilgilendirilmesi, tüketim sapmalarının minimize edilmesine katkı sağlamıştır. Bu durum, tasarım doğrulaması ve kullanıcı bilgilendirmesinin enerji performansında belirleyici olduğunu göstermektedir.

İç mekân performansı açısından elde edilen bulgular, yapı kabuğu kalitesi ile iç hava kalitesi arasında doğrudan bir ilişki olduğunu ortaya koymaktadır. Düşük ısıtma talebine sahip, hava sızdırmaz ve kontrollü havalandırmaya sahip bir yapının yalnızca enerji tüketimini azaltmakla kalmadığı; aynı zamanda CO₂ seviyelerini stabil tutarak iç ortam sağlığını iyileştirdiği görülmüştür. Bu sonuç, yapı fiziki prensiplerinin yapı biyolojisi ve iç mekân sağlığı ile bütünleşik değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Ekonomik açıdan değerlendirildiğinde, Pasif Ev standardının önündeki en yaygın engelin; yüksek ilk yatırım maliyetine sebep olacağı yönündeki algı bu çalışma kapsamında sorgulanmıştır. İlk yatırım maliyetindeki yaklaşık %9'luk artış, optimize edilmiş mekanik sistemler ve azaltılmış işletme giderleri ile birlikte değerlendirildiğinde, yaşam döngüsü perspektifinde belirgin bir avantaja dönüşmektedir. Özellikle enerji fiyat artışlarının yüksek olduğu ekonomik koşullarda düşük enerji talebi, uzun vadeli maliyet riskini azaltan bir unsur haline gelmektedir. Mevcut yapı stoğunun büyüklüğü ve Türkiye'nin yıllık bina üretim hızı dikkate alındığında, enerji performans standartlarının yükseltilmesinin yalnızca bireysel kullanıcıya değil, ülke ekonomisine ve enerji arz güvenliğine de katkı sağlayacağı açıktır.

5. SONUÇ

Konya örneğinde, aynı bölgede ve eş zamanlı inşa edilen konutlar üzerinde gerçekleştirilen bu karşılaştırmalı analiz aşağıdaki temel sonuçları ortaya koymuştur:

1. **Enerji Performansı:** Pasif Ev yapının ölçülmüş yıllık ısıtma enerjisi tüketimi (12,5 kWh/m²·yıl), TS 825:2008 standardına göre inşa edilen yapıya kıyasla yaklaşık 16 kat daha düşüktür. TS 825:2024 senaryosu teorik olarak iyileşme sağlamakla birlikte, Pasif Ev performansının yaklaşık dokuz katı seviyesinde kalmaktadır.
2. **Mevzuatın Etkisi:** TS 825:2024 revizyonu teorik olarak yaklaşık %25 oranında bir iyileşme sağlamaktadır [11]. Bu gelişme olumlu olmakla birlikte, nZEB hedefleri doğrultusunda daha bütüncül yaklaşımlara ihtiyaç olduğu görülmektedir.
3. **Uygulama Kalitesi ve Performans Farkı:** TS 825:2008 yapısında hesaplanan ve ölçülen değerler arasındaki %27'lik sapma, enerji verimliliğinde tasarım kadar saha uygulamasının da kritik olduğunu göstermektedir. Standartların sıkılaştırılması, uygulama denetimi ve performans doğrulama mekanizmaları ile desteklenmediği sürece hedeflenen verimlilik düzeyine ulaşmak mümkün değildir.
4. **Ekonomik Sürdürülebilirlik:** İlk yatırım maliyetindeki sınırlı artış (%9), 30 yıllık projeksiyonda %70–75 düzeyinde toplam maliyet avantajı ile dengelenmektedir [10]. Bu sonuç, yüksek performanslı yapıların uzun vadede ekonomik olarak rasyonel bir tercih olduğunu ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, enerji performansının yalnızca mevzuat sınır değerleri üzerinden değil; uygulama kalitesi, doğrulama süreçleri, iç mekân sağlığı ve yaşam döngüsü maliyeti birlikte

değerlendirilmelidir. Bu çalışma, yüksek performanslı yapı üretiminin teknik olarak uygulanabilir ve ekonomik olarak sürdürülebilir olduğunu ölçülmüş verilerle ortaya koymaktadır.

KAYNAKLAR

1. Aşıkoğlu Metehan, A. (2025). The Techno-Economic Feasibility of Retrofitting Buildings in Turkey Within the NZEB Framework: A Case Study in Izmir. *Sustainability*, 17(18), 8399. <https://doi.org/10.3390/su17188399>
2. TSE. (2008). *TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları*. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
3. TSE. (2024). *TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları (Revizyon)*. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
4. De Wilde, P. (2014). The gap between predicted and measured energy performance of buildings: A framework for investigation. *Automation in Construction*, 41, 16-23.
5. Aktas, C. B., Ryan, K. C., Sweriduk, M. E., & Bilec, M. M. (2012). Critical Success Factors to Limit Constructability Issues on a Net-Zero Energy Home. *Journal of Architectural Engineering*, 18(4).
6. Passive House Institute. (2015). *Passive House Planning Package (PHPP) Version 9*. Darmstadt.
7. Bektaş Ekici, B. (2015). Evaluation of TS 825 Thermal Insulation Requirements in Buildings in Turkey in Terms of Solar Radiation. *Megaron*, 10(1), 14-24.
8. Passive House Institute. (2016). *EuroPHit: Step by step retrofits with Passive House components*. Darmstadt.
9. World Health Organization. (2010). *WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants*. WHO Regional Office for Europe.
10. Audenaert, A., De Cleyn, S. H., & Vankerckhove, B. (2010). Economic analysis of passive houses and low-energy houses compared with standard houses. *Energy Policy*, 36(1), 47-55.
11. İzocam. (2025). İzocam General Manager Murat Savcı: The new standard will raise our country's energy efficiency level. *Alufair News Center*.
12. ISO 15686-5 (2017). Buildings and constructed assets – Service life planning – Life-cycle costing.
13. European Committee for Standardization (CEN). (2019). *EN 16798-1: Energy performance of buildings – Ventilation for buildings – Indoor environmental input parameters*. (www.din.de/resource/blob/66392/911886c68e3d0917dc03085dcc35f144/tr-16789-2-draft-data.pdf)

SALONLARIN ÇOK AMAÇLI KULLANIMINDA TASARIM İLKELERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Gülçin Tuba Ertekin^{1*}

Mehmet Nuri İlgürel²

^{1,2}YTÜ Mimarlık Fakültesi

Yıldız Kampüsü, Beşiktaş, İstanbul, 34349

ÖZET

Mimarlıkta yapı fiziği disiplini, yapıların fiziksel performansını iyileştirerek işitsel, görsel, ısısal konfor parametrelerini optimize etmeyi ve böylece kullanıcı merkezli, yaşam kalitesi odaklı bir tasarım anlayışını merkeze yerleştirmeyi hedefler. Çağdaş mimaride salonların konser, konferans, tiyatro, opera gibi konuşma ve müzikle ilişkili işlevlere uygun tasarlanabilmesi, bu salonların hacim akustiği performanslarının optimize edilmesini gerektirmektedir. Günümüzde, salonların işlevsel farklılıklarla ilgili gereksinimlerin karşılaması, bu mekânların çok amaçlı kullanımında akustik tasarımın mimari tasarım sürecinde gerçekleştirilmesini, hacim akustiği parametrelerinin önceden öngörülmesi, değerlendirilmesi ve salonun gerek mimari biçimlenişi gerekse yüzey gereçlerinin belirlenmesi gibi konularda çalışmaların yapılmasını önemli kılmaktadır. Çok amaçlı salon tasarımında iki farklı işlev için ortak kabul edilebilir akustik koşulların sağlanması, reverberasyon sürelerinin her iki işlev için de kabul edilebilir değer aralıklarına çekilerek optimize edilmesini gerektirmektedir. Uzlaşmacı tasarımın konuşma ve müzik ile ilgili akustik açıdan farklı gereksinimleri olan performanslara yanıt verebilmesi için mimari tasarımla ilişkili sahne tasarımı, yansıtıcılar, yüzey gereçleri, dinleyici alanı, hacim büyüklüğü gibi yönlerden mimari tasarıma uygun ortaklıkların oluşturulması önem taşımaktadır. Bu çalışma kapsamında, dikdörtgen planlı model bir salonun konuşma (tiyatro) ve müzik (oda müziği) işlevli akustik tasarımı ile ilgili uzlaşmacı akustik tasarım ilkelerinin uygulanması sonucunda akustik koşullar ile ilgili hesapların sanal ortamda incelenmesi ve ses alanlarının her iki işleve yanıt verecek şekilde optimize edilmesi amaçlanmıştır. Bu bağlamda, gerçekleştirilen simülasyonlarla reverberasyon süresi (RT) başta olmak üzere konuşma ve müzik ile ilgili EDT, C80, STI, LEF80 gibi hacim akustiği parametreleri hesaplanmış, kabul edilebilir değerlerle karşılaştırılarak dinleyici konumlarına bağlı değişimleri incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Çok amaçlı salon, Akustik parametreler, Uzlaşmacı mimari tasarım, Akustik amaçlı malzemeler.

DEVELOPING DESIGN PRINCIPLES FOR MULTI-PURPOSE USE OF HALLS

ABSTRACT

In architecture, the discipline of building physics aims to improve the physical performance of buildings by optimizing auditory, visual, and thermal comfort parameters, thus placing a user-centered, quality-of-life-focused design approach at the heart of the design. In contemporary architecture, the design of halls suitable for functions related to speech and music, such as concerts, conferences, theater, and opera, necessitates the optimization of the acoustic performance of these halls. Today, meeting the requirements related to functional differences in halls makes it important to carry out acoustic design in the architectural design process for the multi-purpose use of these spaces, to predict and evaluate the acoustic parameters in advance, and to conduct studies on both the architectural form and surface materials of the hall. In the design of a multi-purpose hall, ensuring acceptable acoustic conditions for two different functions requires optimizing reverberation times by bringing them within acceptable value ranges for both functions. For collaborative acoustic design to respond to performances with differing acoustic requirements related to speech and music, it is important to create appropriate partnerships in terms of architectural design, stage design, reflectors, surface materials, audience area, and volume size. This study aims to examine the acoustic conditions in a

^{1*} Sorumlu yazar e-posta adresi: tuba.ertekin@std.yildiz.edu.tr

virtual environment by applying collaborative acoustic design principles to the acoustic design of a rectangular model hall for speech (theatre) and music (chamber music) functions, and to optimize the sound fields to meet the needs of both functions. In this context, through simulations, volume acoustics parameters such as reverberation time (RT), EDT, C80, STI, and LEF80 related to speech and music were calculated and compared with acceptable values, and their variations depending on audience positions were examined.

Keywords: Multipurpose hall, Acoustic parameters, Compromising architectural design, Acoustic materials.

1. GİRİŞ

Günümüz mimari pratiğinde kültürel ve sosyal etkinliklerin çeşitlenmesi, mekanların tek bir işleve hizmet etmek yerine çok amaçlı kullanım prensibiyle tasarlanmasını zorunlu kılmaktadır. Çok amaçlı salonların tasarımındaki temel zorluk; birbirinden farklı ve zaman zaman birbiriyle çelişen akustik gereksinimlere sahip işlevlerin (konuşma ve müzik gibi) aynı fiziksel hacimde optimize edilmesidir [1]. Özellikle kültür merkezleri, eğitim yapıları ve kamu binaları gibi kompleks projelerde işlevsel çeşitliliğin tek bir hacimde çözülmesi; ekonomik verimliliğin yanı sıra çevresel sürdürülebilirlik hedefleriyle de örtüşmektedir. Bu mekanlarda işitsel konforun sağlanması, yalnızca sesin iletimiyle değil, hacmin farklı senaryolara cevap verebilecek "mekânsal esneklik" kapasitesiyle doğrudan ilişkilidir. Akustik tasarım kararlarının projenin erken safhalarında ele alınması; sonradan düzeltilmesi teknik ve mali açıdan zor olan akustik kusurların önlenmesinde kritik rol oynamaktadır. Literatürde yer alan pek çok çalışma; konser salonları veya tiyatrolar gibi tek işlevli mekanların akustik karakteristiklerini derinlemesine incelemiştir. Ancak, modern yapıların gereksinimi olan dikdörtgen plan şeması ile yelpaze oturma düzeninin hibrit kullanımı sonucu ortaya çıkan karmaşık yansıma paternleri üzerine yapılan araştırmalar sınırlıdır. Mevcut çalışmalar genellikle konser salonu işlevine odaklanırken, oda müziği işlevinin gerektirdiği hassas akustik dengeler üzerine yeterince eğilmemiştir. Oda müziği, senfonik konserlere kıyasla daha kontrollü reverberasyon süreleri gerektiren bir işlevdir [1]. Çok amaçlı salon tasarımında, reverberasyon sürelerinin birbirinden çok uzak değer aralıklarına sivrulmadan optimize edilmesi hem maliyet hem de icra edilen performansın tutarlılığı açısından daha nitelikli bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir. Uzlaşmacı akustik tasarım ilkesiyle yola çıkılan çok amaçlı salon tasarımında tiyatro ve oda müziği işlevleri arasındaki geçişi sağlayacak yerel ve güncel malzeme odaklı çözümler sunmada literatürde önemli bir boşluk fark edilmektedir. Bu bağlamda çalışma; Türkiye'deki yerel üreticilerin teknik verilerine dayanarak, yüzeylerde kullanılan yansıtıcı ve yutucu paneller, sahne alanına entegre edilecek sahne dekoru ve orkestra kabuğu bileşenlerinin her bir senaryo özelinde akustik parametreleri oda müziği ve tiyatro için uzlaşılan optimum değer aralıklarına çekme kapasitesini incelemektedir. Araştırma kapsamında; akustik yansıtıcı/yutucu paneller, orkestra kabuğu elemanları, zemin kaplamaları gibi bileşenlerin teknik verileri Odeon yazılımına aktarılmış; T30, EDT, STI, SPL, SPL(A), G, LG80, C80, C80(3), D50, Ts ve LF80 gibi parametre değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen verilerle, gerçeğe en yakın sonuçları sunan ve tasarımcılar için rehber niteliği taşıyan simülasyon senaryoları oluşturulması amaçlanmıştır.

2. AKUSTİK PERFORMANS KRİTERLERİ

Akustik tasarım literatüründe, oda müziği ve tiyatro işlevleri birbirine zıt işitsel gereksinimlere sahip iki temel uç senaryoyu temsil etmektedir. Oda müziği icralarında, enstrümanların seslerinin birbirine karışarak dolgun bir tını oluşturması için daha uzun reverberasyon süreleri ve hacimsel

canlılık aranırken; tiyatro işlevinde öncelik, her bir hecenin dinleyiciye net ulaştığı yüksek konuşma anlaşılabilirliği üzerindedir. Çok amaçlı salonlarda bu iki işlevin aynı fiziksel hacimde barındırılması, akustik parametreler açısından çelişkili bir durum ortaya çıkarmaktadır [2]. Akustik tasarımın başarısı; bu değişken gereksinimlerin, her işlev özelinde literatürce belirlenmiş ideal değer aralıklarına ne kadar uzlaştığını hesaplamaktadır. Bu kriterler sadece nicel veriler değil, aynı zamanda dinleyicilerin hacimlilik ve netlik gibi öznel işitsel algılarını da doğrudan etkilemektedir. Bu çalışma kapsamında değerlendirilen temel parametreler ve bu parametrelerin her iki işlev için hedeflenen uzlaşma optimum aralıkları izleyen bölümlerde detaylandırılmıştır.

Tablo 1. Tiyatro ve oda müziği için uzlaşılan akustik parametre değer aralıkları.

Akustik parametreler	Birim	Uzlaşma değerleri
T30 (Reverberasyon Süresi)	sn	1-1,5[3][4]
EDT (Erken Düşme Süresi)	sn	EDT<Tmid[5]
C80(3) (Netlik İndeksi)	dB	-1.0 / +3.0[6]
D50 (Belirginlik)	%	> %50 (İdeale yakın)[7]
Ts (Merkezleme Süresi)	ms	80<100[2]
STI (Konuşma İletim İnd.)	-	> 0.60 (İyi/Mükemmel) [6]
SPL	dB	+2.0 /9.0[2]
SPL(A)	dBA	75-95[2]
LF80 (Yanal Enerji)	-	0.05 – 0.35[8]
LG80 (Yanal Güç)	dB	-20.0 / +2.0[2]
G(Güç)	dB	4.0 / 5.5[8][9]

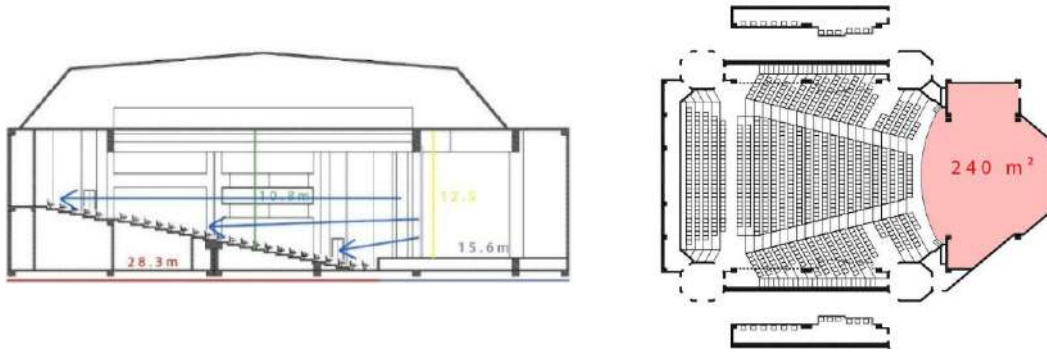
3. YÖNTEM

Çok amaçlı salonlarda, konuşma anlaşılabilirliği (tiyatro) ile müzikal yansıma zenginliği (oda müziği) gibi birbiriyle çelişen akustik gereksinimleri, uzlaşma parametre değerleriyle optimize edilmesi farklı değer aralıklarında iki işlevi bir salonda çözülebildiğini göstermektedir. Sabit tasarımlı salonlarda tiyatro performansları "kuru", müzik icraları ise "boğuk" kalabilmektedir [2]. Bunun önüne geçilebilmesi için erken tasarım aşamasında salonda kullanılacak malzemelerin, salon biçimlenişinin, hangi performansların uygulanacağını belirlenmesi salonun akustik performans üzerindeki etkilerinin akustik simülasyon yöntemi ile sınanarak uygulanabilirliğinin test edilmesi bu çalışmanın temelini oluşturmaktadır. Araştırma süreci; salon tasarımı ve modellemesi, malzeme araştırması ve ataması, simülasyon senaryolarının oluşturulması ve akustik parametrelerin hedef aralıklarının belirlenmesiyle gerçeğine en yakın analizleri elde etmeye odaklanmıştır. Hesaplamalar sekiz farklı alıcı noktası üzerinden yapılmıştır. Bu çalışma, Türkiye bağlamında ulaşılabilir ve dinamik malzeme çözümleriyle hibrit plan tipine sahip bir salonun akustik optimizasyonunu hedeflemektedir.

3.1. Referans Model ve Mimari Tasarım Süreci

Çalışmanın başlangıç noktasını, İstanbul'da bulunan ve aktif olarak kullanılan Cemal Reşit Rey (CRR) Konser Salonu oluşturmuştur. Referans alınan bu salon, merkez aksına göre simetrik,

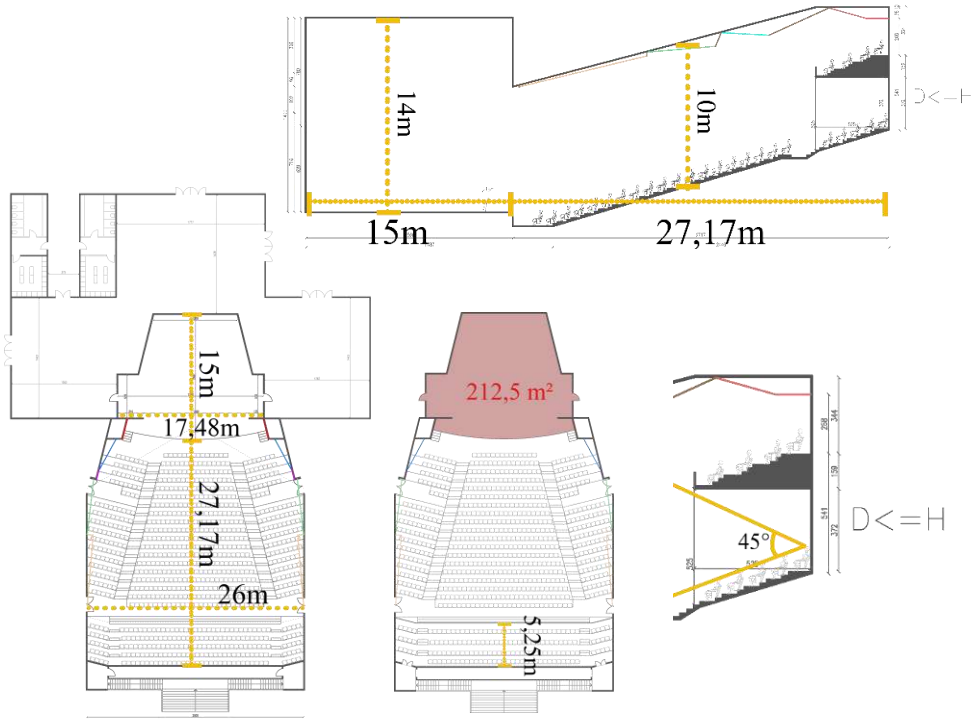
dikdörtgen planlı ve 962 kişilik kapasiteye sahiptir [10]. Bu çalışmada, CRR' nin plan şeması baz alınarak 1000 kişilik, balkonlu ve yelpaze oturma düzenine sahip yeni bir model geliştirilmiştir. CRR salonu şekil 1' de görüldüğü gibi sahne derinliği 15,6 m, dinleyici alanı uzunluğu 28,3 m, sahne yüksekliği 12,5 m' dir, sahne alanı 240 m² olarak tasarlanmıştır [10]. Kurgu salonun derinliği şekil 2' de tiyatro için önerilen 25 m ile müzik için önerilen 40 m kriterleri arasında 27,17 m olarak seçilmiştir. Salon genişliği 26 m, sahne derinliği 15 m olup sahne tavan yüksekliği 14 m, sahne alanı 212,5 m² olarak tasarlanmıştır. Salon hacmi 8831 m³ olarak hesaplanmış ve kişi başına düşen hacim 8,8 m³ olarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada CRR salonuna göre salonun tasarımı, tiyatro işlevi için izleyici-sahne yakınlığını artıran yelpaze plan tipi ile müzik işlevi için yanal yansımaları güçlendiren dikdörtgen plan tipinin hibrit kullanımı tercih edilmiştir [2]. Balkon tasarımında şekil 2' de görülen, akustik gölgelenmeyi önlemek amacıyla Beranek' in önerdiği "derinlik/yükseklik" oranı ($D/H < 1$) dikkate alınmıştır [11].



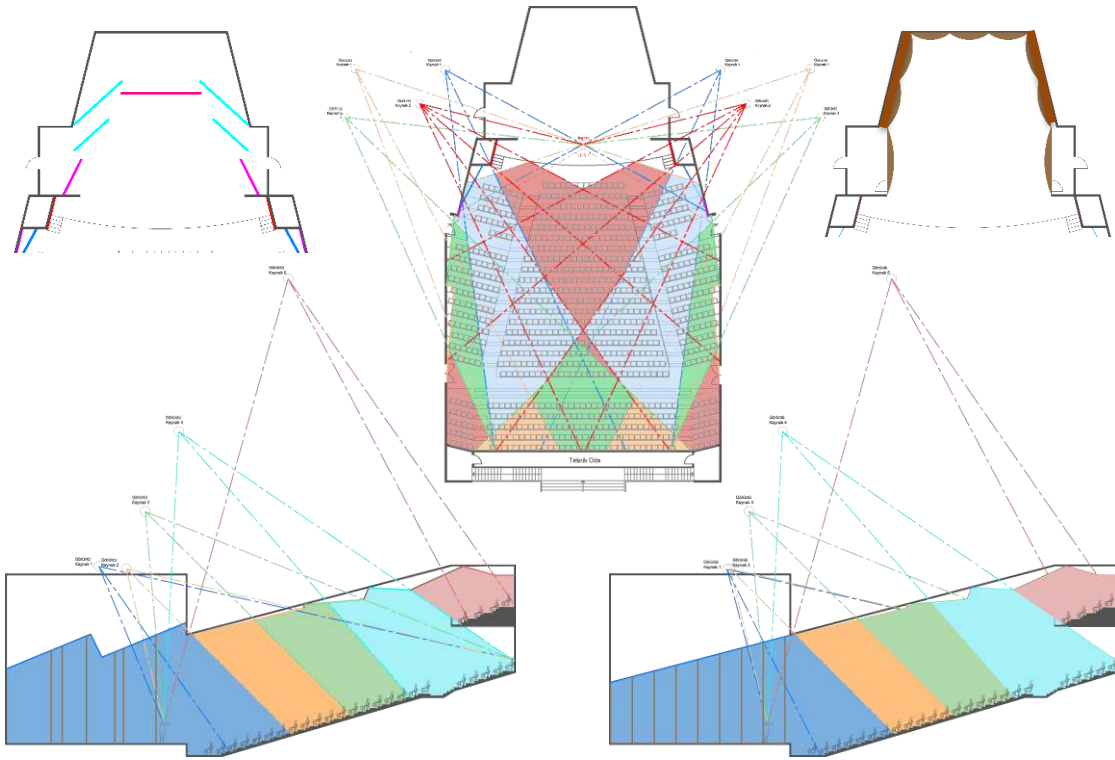
Şekil 1. CRR salonu plan ve kesiti, sahne alanı

3.2. Simülasyon Süreci ve Ölçüm Parametreleri

Akustik analizler için Odeon (Combined 9.22) yazılımı kullanılmıştır. Modele atanan malzemelerin (tablo 2.) frekansa göre ses yutma katsayıları ve yüzey düzgünsüzlüklerine bağlı saçılma (scattering) değerleri üretici teknik dökümanlarına ve literatüre göre tanımlanmıştır [12]. Her iki senaryoda da (tiyatro ve oda müziği) sonuçların homojenliğini test etmek amacıyla 8 farklı sabit dinleyici noktası tanımlanmıştır. Bu noktalardan alınan; T30, EDT, STI, SPL, C80, C80(3), G, D50, Ts ve LF verileri üzerinden hedef aralıklara göre performansların uzlaşma değerleri karşılaştırılmıştır. Akustik model hazırlanırken Odeon' da arka plan gürültü düzeyi NC25 olarak seçilmiştir. Oda müziği için Odeon' da kaynak Omni direct olarak seçilmiş ve kaynak ses düzeyi 90 dB olarak seçilmiştir. Tiyatro işlevi için kaynak Raised natural olarak seçilip kaynak ses gücü düzeyi 80 dB olarak seçilmiştir. Dinleyicilerin konumu salonun akustik konforunu her alandan test edebilmek için çeşitli bölgelerden seçilmiştir. Dinleyici alanı doluluk durumu %72 dolu olarak seçilmiştir.



Şekil 2. Salon zemin kat, balkon planı ve kesit çizimleri



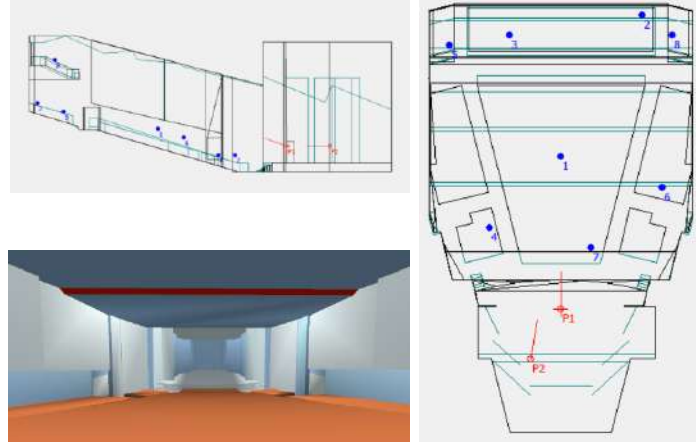
Şekil 3. Salon akustik panel etütleri ve senaryoların sahne kullanımları(tiyatro(solda), oda müziği(sağda) kesit panel yerleşimleri)

Tablo 2. Odeon’ da kullanılan yüzey malzemeleri [13],[14],[15].

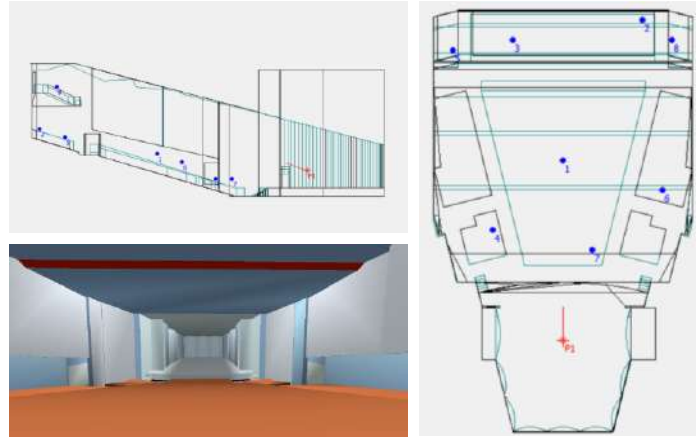
Yüzeyler	Malzeme Adı	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	Saçılma Katsayısı
Salon arka duvar	Slot 12-97/27,5L(Knauf)	0,7	1	0,85	0,95	0,85	0,85	0,15
Zemin	İnce halı(Odeon)	0,2	0,25	0,3	0,3	0,3	0,3	0,15
Balkon korkuluğu	Cam(Odeon)	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04	0,05
Teknik oda camı	Cam(Odeon)	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04	0,05
Dış duvarlar	Akustik sıva(Odeon)	0,15	0,25	0,4	0,55	0,6	0,6	0,1
Sahne zemini	Ahşap(Odeon)	0,15	0,11	0,1	0,07	0,06	0,07	0,15
Sahne arkası	Straight round perforation 10-32-R(Knauf)	0,35	0,45	0,45	0,4	0,4	0,45	0,3
Dinleyici alanı kapılar	Solid ahşap	0,35	0,5	0,6	0,6	0,55	0,55	0,05
Dinleyiciler	%72 doluluk	0,1	0,21	0,41	0,65	0,75	0,71	0,6
Balkon duvar birleşimleri	Beton(Odeon)	0,36	0,44	0,31	0,29	0,39	0,25	0,05
Tavan panelleri(yutucu)	4F 28 A KD 3/28 DS 4000 Taşyünsüz(Perfopan)	0,45	0,54	0,38	0,22	0,2	0,16	0,3
Tavan yutucuları	Kumaş panel 20mm (Perfopan)	0,1	0,43	0,96	1	1	1	0,1
Balkon altı ve üstü yutucu	Slot 12-97/27,5L(Knauf)	0,7	1	0,85	0,95	0,85	0,85	0,1
Yan duvar panelleri(yansıtıcı)	Straight round perforation 12-64 R 3% Perforation Proporsion(Knauf)	0,25	0,25	0,25	0,2	0,2	0,2	0,3
Yan duvarlar	4F 28A KD 3/28 ds 4000-Taşyünlü(Perfopan)	0,65	1	0,9	0,8	0,45	0,2	0,3
(Tiyatro için) Sahne dekorları	Mikroperfore 4x4x0,5mm %3 DS128000 (Perfopan)	0,4	0,27	0,23	0,2	0,13	0,04	0,3
(Oda müziği için) Orkestra kabuğu	Front Slot 2 16 F slot proportion 12,5% (Knauf)	0,15	0,1	0,05	0,05	0	0	0
Sahne tavanı	Ahşap	0,15	0,1	0,06	0,04	0,03	0,05	0,1
Sahne ağızı	Mikro perfore 4x4x0,5 %3 DS 128000 (Perfopan)	0,4	0,27	0,23	0,2	0,13	0,04	0,3
Balkon altı arka duvar	Bas trap	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,6
Balkon önü	3F 5A KD 3/8 mm PR %23 DS 8000 Taşyünsüz(Perfopan)	0,52	0,71	0,59	0,34	0,32	0,25	0,3
Sahne dinleyici alan birleşimi	Ahşap	0,15	0,1	0,06	0,04	0,03	0,05	0,1

4.BULGULAR

Odeon programında yapılan hesaplamalardan elde edilen verilerle yasışım süresi(T30), EDT, STI, SPL, SPL(A), G, C80, C80(3), D50, Ts, LF80 akustik parametreleri analiz edilmiştir. Her iki işlev için dinleyici konumları aynı tutulmuştur. Tiyatro için iki kaynak, oda müziği için tek kaynak belirlenmiştir. Tiyatro için kaynak raised natural, kaynak ses gücü düzeyi 80 dB olarak belirlenmiştir. Oda müziği işlevi için kaynak omni olarak seçilmiş ve kaynak ses gücü düzeyi 90 dB olarak belirlenmiştir. İki model oluşturulup aynı yüzey gereçleri kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır.



Şekil 4. Odeon, tiyatro senaryosu dinleyici konumları, malzeme kullanımı ve sahne tavanı yerleşimleri.



Şekil 5. Odeon, oda müziği senaryosu dinleyici konumları, malzeme kullanımı ve sahne tavanı yerleşimleri.

Salon modellerindeki farklar oda müziğinde kullanılan orkestra kabuğu ve tiyatro işlevinde kullanılan sahne dekorlarının malzeme farklılığıdır. Salon hesaplama sonuçlarının frekans ortalaması ve dinleyici ortalamaları Excel’ de düzenlenmiş ve hedef aralık değerlerine göre bulgular elde edilmiştir.

- Sahne tavan panelleri, orkestra kabuğu ve sahne dekorlarının sunduğu işlevler için özelleşen akustik yüzeylerle uzlaşma tasarımı desteklenmiş ve her iki performans türü için hedef reverberasyon süresi 1-1,5 s arasında 1,17 s olarak belirlenmiştir. Dinleyicilerin

ortalamasına göre reverberasyon süreleri her frekans değeri için hedef aralığa girmeyi başarmıştır. Dinleyicilerin konumu salonun akustik konforunu her alandan test edebilmek için çeşitli bölgelerden seçilmiştir. Her bir dinleyicinin bulunduğu konumdaki reverberasyon süreleri hesaplanmış, optimum değer aralığı belirlenmiş ve reverberasyon süresi grafik sonuçları elde edilmiştir.

- EDT parametresi için ortalama sonuç 1,14 s olarak hesaplanmıştır. Hedef değer $EDT < T30_{mid}$ aralığındadır. $T30_{mid}$ 1,25 s olarak hesaplanmıştır ve EDT değeri bu koşulu sağlamaktadır.
- Salonun çok amaçlı kullanım kapasitesini belirleyen STI parametresi 0,54-0,60 aralığında hesaplanıp $>0,60$ hedef aralığına yaklaşmıştır.
- D50 parametresi daha çok tiyatro/konuşma işlevi için önemlidir. Bu salonda D50 parametresi hedef değerine (%50) yaklaşmış olup %45 olarak hesaplanmıştır. Salonda konuşma belirginliği etkisi sağlanmıştır.
- Müzikal berraklığı ifade eden $C80(3)$ değeri ($C(exp)=10\log[\exp(1.104/T)-1]$) ortalama 2,12 dB olarak hesaplanmıştır. Hedef 0 ile 4,7 dB aralığında bulunarak enstrümanların seslerinin net duyulması için gereken ideal ortamı sağlamıştır.
- Yanal yansımaların göstergesi olan $LF80$ değeri 0,18 olarak hesaplanmıştır ve 0,05-0,35 hedef aralığına girmiştir. Salon oda müziği işlevi için kullanılırken bu değer sarmalanmışlık etkisini (spatial envelopment) sağlayan bir akustik ortamın oluştuğunu doğrulamaktadır.
- Salonun her iki senaryo için de 65-73dB(A) bandında seyreden SPL(A) değerleri, ses enerjisinin mekanda homojen bir şekilde dağıldığını göstermektedir fakat hedef değerlerin(75-95 dBA) altında kalmaktadır.
- Merkez zamanı parametresi T_s için hedef aralık $80 < 100$ ms'dir. Salon ortalama T_s değeri 80,52 ms bulunarak sınır değeri yakalamıştır.
- Gürlük parametresi ($G(exp)=10\log [T/V]+45$) daha çok oda müziği işlevi için önemlidir. Hesaplanan ortalama G değeri 6,16 dB'dir. Hedef aralık 4-5,5 dB aralığıdır fakat Beranek'e göre güç parametresinin fazla olması müzik işlevli salonlar için iyi bir sonuç elde edilmesidir.

Çalışmada kullanılan Türkiye kaynaklı akustik panellerin teknik döküman verilerinin kullanılmasıyla gerçekleştirilen simülasyonlar, ülkemizde ulaşılabilir verilerinin uluslararası standartlarda akustik konfor sağlama potansiyeline sahip olduğunu ve bu ürünlerle hazırlanan senaryoları uzlaştırma akustik prensibiyle tek bir salonda gerçekleştirebildiğini göstermiştir. Bu bulgu, maliyet odaklı projeler için önemli bir ekonomik veri sunmaktadır. Bu çalışma gelecekte yapılacak salonların tasarımında ulaşılabilir ve uygulanabilir bir örnek çalışma olmayı amaçlamaktadır.

5. SONUÇLAR

Bu çalışma, çok amaçlı salonların akustik tasarımında karşılaşılan işlevsel çelişkileri, yerel piyasadan temin edilebilen erişilebilir malzemeler ve "uzlaşmacı tasarım" (compromise design) yaklaşımıyla çözüme kavuşturan bir model sunmaktadır. Cemal Reşit Rey Konser Salonu'nun plan tipolojisinden hareketle geliştirilen yelpaze-dikdörtgen hibrit plan şeması, tasarımın erken aşamalarında hem görsel ergonominin hem de reverberasyon süresinin eşzamanlı olarak optimize edilebileceğini göstermiştir. Odeon (Combined 9.22) yazılımı ile gerçekleştirilen simülasyonlar, gerçekçi bir kullanım senaryosu olabilmesi için salon %72 doluluk oranı altında test edilmiş ve şu temel bulgular elde edilmiştir. Akustik uzlaşma performansı tiyatro ve oda müziği gibi farklı

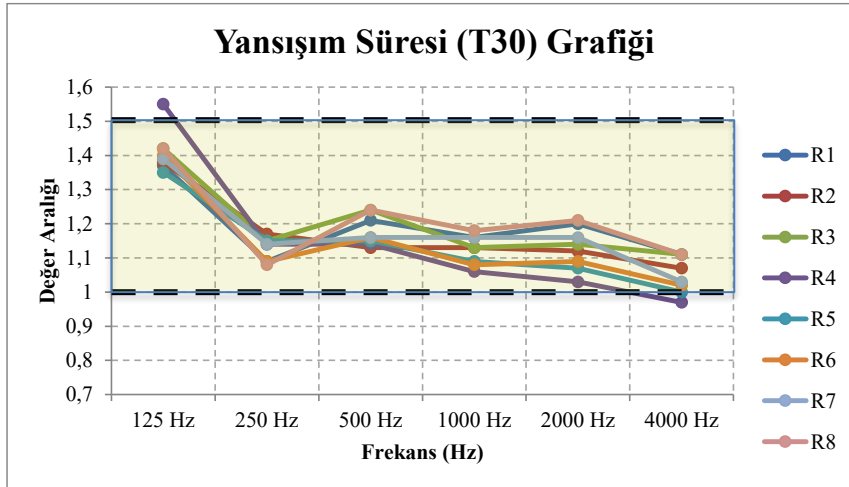
akustik gereksinimlere sahip salon işlevleri için hesaplanan 1,17 saniyelik ortalama reverberasyon süresi(T30), salonun tüm frekans bantlarında 1-1,5 s hedef aralığına girmeyi başarmıştır.

Tablo 3. Dinleyici alanlarının tüm parametrelerinin ortalama sonuçları.

Frekans Ortalama Değerlerine Göre Tüm Parametreler												
Alıcı (Receiver)	EDT (s)	T30 (s)	SPL (dB)	C80 (dB)	D50	Ts (ms)	LF80	C80 (3)(dB)	G(dB)	SPL(A)	LG80	STI
R1	1,23	1,19	65,2	0,41	0,41	88,83	0,17	1,84	6,3	71,2	56,8	0,55
R2	1,07	1,17	60,82	0,52	0,52	73,83	0,22	2,19	6,07	66,7	51,6	0,6
R3	1,05	1,2	59,28	0,48	0,48	75	0,19	1,96	6,3	65,2	50,4	0,59
R4	1,17	1,15	66,17	0,45	0,45	83,33	0,15	2,5	5,95	72,3	57,5	0,55
R5	1,04	1,14	61,75	0,48	0,48	75	0,23	2,38	6,03	67,8	53,3	0,59
R6	1,26	1,14	64,33	0,41	0,41	89,33	0,2	2,31	6,03	70,4	56,3	0,54
R7	1,18	1,17	67	0,38	0,38	86,83	0,14	2,01	6,19	73,3	58	0,54
R8	1,08	1,21	59,05	0,47	0,47	72	0,16	1,73	6,37	65,1	49	0,58
Ortalama Sonuç Değerleri	1,14	1,17	62,95	0,45	0,45	80,52	0,18	2,12	6,16	69	54,11	0,57

Tablo 4. Dinleyici alanlarının tüm parametrelerinin ortalama sonuçları.

Dinleyici Ortalamasına Göre Tüm Parametreler						
Parametreler	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
EDT (s)	1,34	1,11	1,12	1,08	1,11	1,04
T30 (s)	1,41	1,13	1,18	1,12	1,13	1,05
SPL (dB)	64,44	63,04	63,5	62,66	62,44	61,63
C80 (dB)	1,19	2,43	1,8	2,16	1,89	2,49
D50	0,41	0,48	0,44	0,46	0,44	0,47
Ts (ms)	94,13	75,5	82,63	77,63	80,25	73
LF80	0,206	0,176	0,197	0,176	0,17	0,176



Grafik 1. Çok amaçlı salon reverberasyon süresi grafiği(sarı alan optimum aralık).

Reverberasyon süresinin yanında EDT, STI, SPL, SPL(A), G, C80, C80(3), D50, Ts, LF80 akustik parametreleri her bir dinleyici noktası ile detaylı olarak analiz edilmiştir. EDT parametresi için ortalama sonuç 1,14 s olarak hesaplanmıştır. STI parametresi 0,54-0,60 aralığında hesaplanmış, hedef aralığa yaklaşan bir sonuç bulunmuştur. D50 parametresi hedef değerine (%50) yaklaşmış olup %45 olarak hesaplanmıştır. Müzikal berraklığı ifade eden C80(3) değeri 2,12 dB olarak

hesaplanmış ve hedef aralığa girmiştir. Yanal yansımaların göstergesi olan LF80 değeri 0,18 olarak hesaplanmıştır, hedef değer aralığına girmiştir. SPL(A) değerleri 63-75 dB aralığında hesaplanmış hedef değerlerin (75-95 dBA) altında kalmıştır. Merkez zamanı parametresi Ts 80,52 ms olarak hesaplanmış sınır değerine ulaşmıştır. Gürlük parametresi 6,16 dB hesaplanmış, hedef aralığı aşmış fakat bu durum Beranek' e göre iyi bir durumdur. Yerel malzeme kullanımı Türkiye' de üretilen veya satılan akustik ürünlerle salonun malzeme paletinin uluslararası standartlarda (ISO 3382) akustik konfor sağlama potansiyeline sahip olduğunu doğrulamıştır. Bu durum, yüksek maliyetli ithal sistemler yerine ulaşılabilir yerel çözümlerin kullanımını teşvik ederek projeler için önemli bir ekonomik veri kaynağı sunarak literatüre katkı sağlamayı amaçlamaktadır. Sonuç olarak, bu çalışma kapsamında geliştirilen tasarım senaryosu, tek bir hacmin "uzlaştırma akustik prensibiyle" farklı performans türlerine hizmet edebileceğini ve %72 gibi yüksek bir doluluk oranında dahi optimum akustik konforun yerel üretim imkanlarıyla sağlanabileceğini ortaya koymaktadır.

KAYNAKLAR

1. Appleton, I. (2008). *Buildings for the performing arts: A design and development guide* (2. ed). Architectural press.
2. Kuttruff, H., & Vorländer, M. (2024). *Room Acoustics* (7. bs.). CRC Press.
3. Maekawa, Z. ve Lord. P., “Environmental and Architectural Acoustics 1st ed.”, E&FN Spon, Londra, 1-33, 63-113, 245-273, 1994.
4. Barron, M., “*Auditorium Acoustics and Architectural Design* 1st ed.”, E&Fn Spon Press, London, 223-297, 1993.
5. Mehta, M., Johnson, J., Rocafort, J. “*Architectural Acoustics Principles and Design* 1st ed.”, Prentice Hall, New Jersey, 207-307, 1999.
6. Christensen, C. L., “Odeon Room Acoustics Program User Manual”, Odeon A/S, Denmark, 1-136, 2009.
7. Kuttruff, H., “*Room Acoustics* 3rd ed.”, Elsevier Applied Science, Londra, 1991.
8. TS EN ISO 3382-1, “Acoustics- Measurement of Room Acoustic Parameters-Part 1: Performance Spaces”, ISO, 2010.
9. European Committee for Standardization. (2003). *Building acoustics - Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements - Part 6: Sound absorption in enclosed spaces* (EN 12354-6:2003).
10. N.T., Vural, A., (2007). *İstanbul’ da Bulunan Dört Konser Salonunun Akustik Açısından Değerlendirmesi* (Yayın No: 251564) [Yüksek Lisans Tezi İstanbul Teknik Üniversitesi] YÖK Ulusal Tez Merkezi.
11. Beranek L. (2004) Concert halls and opera houses: Music, acoustics, and architecture.
12. Cox, T. J., & D'Antonio, P. (2009). *Acoustic absorbers and diffusers: Theory, design and application* (2. baskı). Spon Press.
13. Knauf Design. (2017, Mart). *Room acoustics with Knauf Design* (Technical Brochure Tro171.de). Knauf Riessler GmbH & Co. KG. <https://www.knauf-design.com>
14. SİREL, Ş., Yapı Akustiği I: Temel Bilgiler, İstanbul, İnkılap ve AKA Basımevi, 1974.
15. Perfopan. (t.y.). *Perfoball delikli ahşap akustik duvar panelleri* [Teknik döküman]. https://www.perfopan.com/perfopan_ahsap_akustik_panel_perfoball_delikli%20duvar_panelleri.html

GÜNEŞ KONTROL ELEMANLARININ GÜNIŞIĞI PERFORMANSI VE ENERJİ TÜKETİMİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Ece Yıldız^{1*}
Şensin Aydın Yağmur²
^{1,2} YTÜ Mimarlık Fakültesi
Beşiktaş, İstanbul, 34349

ÖZET

Eğitim yapılarında günışığının verimli ve etkili bir şekilde kullanılması, aynı zamanda konforsuzluk yaratabilecek olasılıkların en aza indirgenmesi açısından güneş kontrol elemanları önemli bir rol oynamaktadır. Yapı kabuğunun pasif soğutma stratejilerinden biri olan bu elemanlar, iç mekânda sağlanan günışığı performansını ve buna bağlı görsel konforu doğrudan etkilerken, aynı zamanda yapının ve hacmin enerji tüketimi üzerinde de belirleyici bir etkiye sahiptir. Bu nedenle, güneş kontrol elemanlarının erken tasarım aşamasında planlama sürecine dâhil edilmesi önem kazanmaktadır. Sabit güneş kontrol elemanlarına kıyasla, hareketli güneş kontrol elemanları güneşin gün içindeki ve mevsimsel hareketine uyum sağlayarak iç mekânda daha dengeli bir günışığı dağılımı sunmakta ve kamaşma riskinin azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Bu bağlamda, tip geometrik forma sahip eğitim hacimlerinde kullanılan hareketli güneş kontrol elemanlarının, EN 17037 standardında tanımlanan günışığı performansı açısından genel olarak uygunluğunun değerlendirilmesinin yanı sıra, kamaşma konusunun ayrıntılı biçimde ele alınması ve farklı saydamlık oranları ile yapıyı çevre koşulları dikkate alınarak ısıtma, soğutma ve aydınlatma yükleri üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi bu çalışmanın temel amacını oluşturmaktadır.

Anahtar kelimeler: Hareketli güneş kontrol elemanları, Günışığı analizi, Kamaşma

EVALUATION OF THE EFFECT OF SOLAR CONTROL ELEMENTS ON DAYLIGHT PERFORMANCE AND ENERGY CONSUMPTION

ABSTRACT

In educational buildings, solar control devices play an important role in ensuring the efficient and effective use of daylight while minimizing the potential causes of discomfort. As one of the passive cooling strategies of the building envelope, these elements directly affect indoor daylight performance and the associated visual comfort, while also having a determining influence on the energy consumption of the building and the space. Therefore, the integration of sun control devices into the planning process at the early design stage becomes increasingly important. Compared to fixed solar control elements, movable control devices adapt to the sun's daily and seasonal movement, providing a more balanced daylight distribution in interior spaces and contributing to the reduction of glare risk. In this context, the main objective of this study is to evaluate the overall suitability of movable control devices used in educational spaces with typical geometric forms in terms of the visual comfort parameters defined in EN 17037, as well as to examine glare in detail, and to assess their effects on heating, cooling and lighting loads by considering different transparency ratios and built environment conditions.

Keywords: Movable (adaptive) Solar control elements, Daylight analysis, Glare.

^{1*} e-posta: ece.yildiz@std.yildiz.edu.tr

² e-posta: sensina@yildiz.edu.tr

1. GİRİŞ

Mimaride sürdürülebilir yaklaşımlar kapsamında etkili bir ölçüt olan günışığından yararlanma, erken tasarım evresinde değerlendirilmesi gereken önemli bir tasarım parametresidir. Yapı kabuğunun bir bileşeni olan güneş kontrol elemanları ise günışığı performansını dengelemede, yapının iç ortam görsel konfor koşullarının belirlenmesinde ve enerji performansının değerlendirilmesinde kritik bir öneme sahiptir.

Mimari olarak, iç ortamda sağlanması gereken görsel konfor koşulları her işlev için önem taşıırken özellikle eğitim yapıları bu anlamda kullanım süresi ve odaklanmayı arttırmak amacıyla özel değerlendirilmesi gereken hacimlerdir. Hem anlatıcı olarak öğretmenlerin hem de dinleyici olarak öğrencilerin konsantrasyon, performans, motivasyonu dikkate alınarak en yüksek verimin alınması amaçlanan işlevlerdir. Bu kapsamda doğal bir kaynak olarak günışığının iç ortamdaki etkilerinin, kullanıcıların zihinsel, bedensel işleyişi ve yapının enerji performansı üzerinde önemli rolü bulunmaktadır. Bu amaçla doğru sonuçlar alabilmek için günışığının bir parametre olarak sürece entegre edilmesi ve erken tasarım aşamasında ön etütler yapılmasını gerektirmektedir. Doğal aydınlatma tasarımında kullanıcının görsel performansının yanı sıra psikolojik ve fizyolojik gereksinimlerinin karşılanabilmesi için yeterli düzeyde ve dengeli dağılıma sahip günışığının sağlanması; bununla birlikte doğrudan güneş ışığının rahatsız edici etkilerinden kaçınılması gerekmektedir. Bu kapsamda günışığının doğru kullanımı iç ortamdaki görsel konfor koşullarının sağlanmasında önemli etkiye sahiptir. Yapılan literatür araştırmasında, enerji verimliliği açısından doğru bina formu ve güneş kontrol elemanları ile ısıtma ve soğutmaya olan ihtiyacın yaklaşık %23 oranında azaldığı görülmüştür [1]. Günışığının hacim içerisinde yönetilmesi ile iç ortamdaki konfor sürekliliğinin sağlandığı, sıcak dönemde aşırı ısınmaların ve soğuk dönemde ise güneş enerjisi ile ısı kazancının desteklendiği belirtilmiştir [2]. Sınıf ortamlarında yeterli günışığı aydınlığının sağlanmasının, öğrencilerin akademik performansını arttırdığı, ruh halini iyileştirdiği ve stres düzeyini azalttığı ortaya konulmuştur [1][3]. Ayrıca, özellikle işlev gereği öğrencilerin erken yaşamlarının büyük bir bölümünü geçirdikleri öğrenme mekânları, onların bilişsel, fizyolojik ve sosyal gelişiminde kritik bir rol oynadığı vurgulanmıştır [4].

Bir mekânda yeterli miktarda doğal ışık bulunması önemli olmakla birlikte, daha yüksek aydınlık düzeylerinden kaynaklanan kamaşma olasılığının sınırlandırılması da kritik öneme sahiptir. Kamaşma analizleri, küçük engel açlarına sahip hacimlerde ve ayrıca güney yönelimli yüksek saydamlık oranlarına sahip mekanlarda kamaşma riskinin arttığını göstermekte olup; söz konusu durumlarda güneş kontrol elemanlarının kullanılması önerilmektedir [5].

İç mekânda günışığı etkisinin yönetilebilmesi ve kamaşma olasılığının azaltılarak görsel konfor koşullarının sağlanmasında güneş kontrol elemanları önemli bir tasarım parametresi olarak öne çıkmaktadır. Sabit kontrol elemanları; tasarım, hesap yöntemi ve performans tahmini gibi sistemsel özelliklerinin yanı sıra temin edilmesi ve bakım maliyetlerinin karşılanması açısından da daha kolay erişilebilir çözümler sunmaktadır. Ancak değişen çevre koşullarına tepki verememesi, performansını sınırlamaktadır. Bu özellikler dikkate alındığında daha yüksek verim elde edebilmek amacıyla hareketli kontrol elemanlarına yönelik bir çalışma yapılması amaçlanmıştır.

Yapılan bilimsel araştırmalar, hareketli kontrol sistemlerinin performans iyileştirme potansiyelini farklı yöntemler aracılığıyla ortaya koymaktadır. İstanbul'daki yüksek katlı bir ofis yapısının adaptif cephe tasarımıyla enerji verimliliği potansiyelini araştıran bir çalışmada, dönme hareketine

sahip yapı kabuğunun günışığı performansını iyileştirdiği, iç ortam aydınlık düzeyi ve kamaşma kontrolü üzerinde olumlu sonuçlar verdiği belirtilmektedir [6].

Yapı kabuğunun dış yüzeyine sabitlenen güneş kontrol elemanları, güneş ışınlarını düzenlemek ve enerji verimliliğini artırmak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu elemanlar, günışığı erişimini istemeden azaltarak yapay aydınlatma sistemlerine olan bağımlılığı artırabilmektedir. Bununla birlikte, kış döneminde faydalı güneş ışımasını engelleyerek genel ısı konfor koşullarını olumsuz etkileyebilmektedir. Bu nedenle, günışığı erişimi, görsel konfor ve ısı konfor arasında dengeli bir performans elde edebilmek için güneş kontrol elemanı türlerinin doğru seçilmesi ve optimum konumlandırılması kritik öneme sahiptir [7].

Türkiye'de Milli Eğitim Bakanlığı tarafından hazırlanan tip ilkökul dersliklerinin gün ışığı performansını analiz eden ve bu mekanlarda doğal ışıktan daha etkin yararlanılmasını sağlayacak tasarım alternatifleri geliştirmeyi amaçlayan bir çalışmada, herhangi bir kontrol elemanı kullanılmadığı durumlarda güney yönüne bakan dersliklerde tüm saatlerde, doğu yönüne bakan dersliklerde sabah saatlerinde ve batı yönüne bakan dersliklerde öğleden sonra doğrudan gelen güneş ışığının engellenmemesi sebebi ile pencereye yakın bölgelerde görsel konforu olumsuz etkileyebilecek yüksek aydınlık düzeyleri tespit edilmiştir. İstanbul iklim koşullarında DialuxEvo programı kullanılarak yapılan çalışmada güney cephesinde iç ortamdaki aydınlık düzeyi dağılımının homojenliğini sağlamak amacıyla kontrol eleman kullanılması gerektiği; doğu ve batı cephelerinde kullanıcı kontrollü toplanabilen kontrol elemanlarının kullanılması gerektiği belirtilmiştir. Ayrıca ışık rafının, aydınlığın eşit ve düzgün dağılımına olan pozitif etkisi vurgulanmıştır [8].

Kinetik sistemlerden ilham alınarak tasarlanan parametrik cephelerin iç ortamda oluşturduğu günışığı performansını analiz eden diğer bir çalışmada ise, İstanbul Gelişim Üniversitesi' nin mevcut durumda yetersiz doğal ışık performansına sahip bir derslik hacmine Grasshopper programı aracılığıyla dört farklı parametrik cephe tasarımının simülasyonları yapılarak sonuçları yorumlanmıştır. Yapılan çalışma ile elde edilen verilerin mevcut durum koşullarından daha iyi sonuçlar verdiği, yapma aydınlatmaya olan ihtiyacın azaldığı ve parametrik cephelerin aydınlık düzeyini optimize ederek kullanıcıların görsel konforu arttırdığı görülmüştür [9].

Bugüne kadar yapılan araştırmalarda güneş kontrol elemanlarının günışığı performansı değerlendirilirken, görsel konfor parametrelerinden ağırlıklı olarak gerekli aydınlığın sağlanması ve kamaşma konularına odaklanıldığı; bir kısmında enerji kullanımının değerlendirildiği ancak tüm parametrelerin birlikte ele alındığı çalışmaların eksikliği belirlenmiştir. Literatür taramasında bu araştırmaların genellikle ofis işlevli hacimlerde yapıldığı tespit edilmiş, diğer fonksiyonlar için kapsamlı araştırma sayısının yetersiz olduğu görülmüştür. Ayrıca mevcut çalışmalarda kontrol elemanı tasarımında, kullanılan panellerin (lamellerin) uygulama, bakım, kullanım kolaylığı sağlaması ve tasarım aşamasında dijital simülasyon süreçlerinin daha hızlı ve ulaşılabilir olması nedeniyle sabit elemanlı tasarımlara yönelindiği görülmüştür. Bu kapsamda konum ve iklim koşulları olarak İstanbul özelinde yapılan çalışmaların düşük yoğunluğu da dikkate alınarak, tespit edilen tüm noktalara cevap bulabilmek amacıyla bu çalışmanın yapılması düşünülmüştür.

Yapılacak olan bu çalışma ile İmar Yönetmeliği'nin tanımladığı farklı yapı tipi çevre koşullarında ve İstanbul ilinde bulunan eğitim işlevli hacimlerde, hareketli güneş kontrol elemanlarının performansını değerlendirmek için, ilk aşamada görsel konforsuzluk nedeni olan kamaşmanın

kapsamlı olarak incelenmesi, TS EN 17037 Binalarda Güneşliği Standardında belirtilen diğer güneşliği performansına yönelik ölçütler ile ısıtma-soğutma-aydınlatma yüklerinin de çoklu parametreler olarak analiz edilmesi ve tasarımcılara rehber olabilecek bir çalışma hazırlanması hedeflenmiştir [10].

2. ÇALIŞMANIN YÖNTEMİ

Günümüze kadar yansıyan çalışma ve araştırmalarda güneşliği konusunda farklı yöntemlerin kullanıldığı ve farklı parametrelerle değerlendirmeler yapıldığı görülmüştür. Bu değişim sürecini inceleyen bir araştırmada dört farklı zaman dilimindeki eğitim yapılarına olan yaklaşım analiz edilmiştir [11].

EN 17037 Binalarda Güneşliği Standardı, iç mekânlarda aydınlatmanın güneşliği kullanılarak nasıl sağlanacağına ve kamaşmanın nasıl sınırlandırılacağına ilişkin bilgiler vermektedir. Güneşliği koşullarının değerlendirilmesinde kullanılan ölçütleri tanımlamakta ve hesaplama ile doğrulama ilkelerini ortaya koymaktadır. Ele alınan yöntemle, güneşliğin yıl boyunca değişkenlik göstermesi konusu dikkate alınmış, bu doğrultuda yıllık iklim verileri kullanılmıştır.

Şekil 1’de sunulan çalışma akışında belirtildiği üzere, kare ve dikdörtgen plan tipolojilerine sahip hacimler oluşturulmuş, cepheye entegre edilen güneş kontrol elemanlarının simülasyonları Rhino ve ClimateStudio programlarında gerçekleştirilmiştir. EN 17037 Binalarda Güneşliği Standardı görsel konfor değerlendirmelerinde; ASHRAE ve TS825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Standartları ısıtma-soğutma-aydınlatma yüklerinin belirlenmesinde kullanılmış olup, elde edilen yıllık sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir [10, 12, 13, 14].



Şekil 1. Çalışmanın akış şeması

2.1. Değerlendirme Kriteri Olarak Günişığı Standardı Ölçütleri

Günişığı performansı değerlendirmesinde ele alınacak başlıklar aşağıdaki gibidir:

Gerekli Aydınlık Düzeyinin Sağlanması:

Bir mekân, günişığı saatlerinin en az yarısı ($4380 \text{ sa} \times \%50 = 2190 \text{ sa}$) boyunca, mekân içindeki referans düzleminin belirli bir bölümü üzerinde hedef aydınlık düzeyinin sağlanması durumunda yeterli günişığına sahip olarak kabul edilmektedir (**Çizelge 1**).

Çizelge 1. Gerekli aydınlık düzeyinin sağlanması [10]

Günişığından yararlanmaya yönelik önerilen derece	Aydınlık Düzeyi	
	Referans düzlemin en az % 50'sinde sağlanması gereken aydınlık	Referans düzlemin en az % 95'inde sağlanması gereken aydınlık
En az	$\geq 300 \text{ lx}$	$\geq 100 \text{ lx}$
Orta	$\geq 500 \text{ lx}$	$\geq 300 \text{ lx}$
Yüksek	$\geq 750 \text{ lx}$	$\geq 500 \text{ lx}$

Dış Ortamla Görsel Bağlantının Sağlanması:

Dış ortamla görsel bağlantının sağlanmasında, yatay görüş açısı, dış engellerin yapıdan uzaklığı ve katman sayısı olmak üzere üç ölçüt değerlendirilmektedir. **Çizelge 2'** de görüldüğü üzere bu ölçütler, en az, orta ve yüksek dereceleri ile sınıflandırılmaktadır.

Çizelge 2. Dış ortamla görsel temasın kurulması [10]

Dış ortamla görsel bağlantı ölçütleri	Görsel Bağlantısının Derecesi		
	En az	Orta	Yüksek
Pencere genişliğine bağlı yatay görüş açısı	$\geq 14^\circ$	$\geq 28^\circ$	$\geq 54^\circ$
Dış engellerin yapıdan uzaklığı	$\geq 6 \text{ m}$	$\geq 20 \text{ m}$	$\geq 50 \text{ m}$
Görünür katman özellikleri (Kullanılan alanın en az % 75' inden görünmesi gereken katmanlar)	yapma / doğal çevre görünür	en az iki katman görünür	tüm katmanlar görünür

Güneşlenme Süresi:

Güneş ışığı erişiminin değerlendirilmesi, yapının formu, cephe tasarımı ve günişığı açıklıklarının yönlendirilmesine ilişkin kararları etkilemektedir. İlgili standartta bu kapsamda bir değerlendirme yapılması için **Çizelge 3'**te özetlenen derecelendirmeler önerilmiştir. Ayrıca inceleme yapılacak gün için 1 Şubat ve 21 Mart tarihleri arasındaki herhangi bir günün seçilebileceği belirtilmekte olup, bu çalışma kapsamında 1 Mart günü değerlendirilmiştir.

Çizelge 3. Güneşlenme süresine dair derecelendirme [10]

Güneşlenme derecesi	Güneşlenme süresi
En az	1,5 saat
Orta	3 saat
Yüksek	4 saat

Kamaşmadan Korunma:

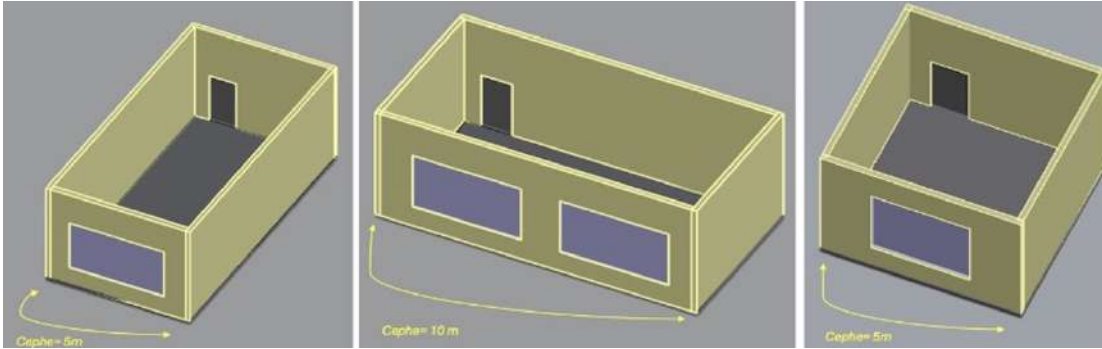
Doğrudan güneş ışığı veya görüş alanı içerisindeki aydınlık ve karanlık alanlar arasındaki yüksek aydınlık düzeyi farkları kamaşma riskini oluşturabilmektedir. Güneşin doğrudan ya da yansımalar aracılığıyla görüş alanında yer alması önlenmeli ve günışığı kaynaklı kamaşma riskini azaltmak amacıyla gölgeleme elemanlarının kullanımı önerilmektedir. Bu doğrultuda ilgili standartta korumanın olmadığı, en az, orta ve yüksek olmak üzere dört farklı değerlendirme derecesi belirtilmiştir (Çizelge 4).

Çizelge 4. Kamaşmadan korunma dereceleri [10]

Kamaşmadan Korunma Derecesi	
Koruma yok; kamaşma algılanır ve çoğunlukla tolere edilemez.	$DGP > 0,45$
En az; kamaşma algılanır ve sıklıkla rahatsız edicidir.	$0,40 < DGP \leq 0,45$
Orta; kamaşma algılanır ve fakat çoğunlukla rahatsız edici değildir.	$0,35 < DGP \leq 0,40$
Yüksek; kamaşma çoğunlukla algılanmaz	$DGP \leq 0,35$

2.2. Referans hacimlerin özellikleri

Çalışma kapsamında eğitim işlevli olmak üzere, kare plan tipi ile kısa kenar ve uzun kenarın cephe olması durumları için iki farklı dikdörtgen plan tipolojisi referans hacim olarak belirlenmiştir. Sadece bir cepheden günışığı aldığı kabul edilen söz konusu hacimlerin üç boyutlu çizimleri Rhino programında modellenmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. Referans tip geometrik hacimlerin 3D modeli (Rhino)

Tasarımı yapılan referans hacimlerin İstanbul (40,97°N, 28,82°E) iklim koşullarındaki günışığı ve enerji performansı yorumlanacak olup; simülasyon adımları Rhino çizim programı eklentisi ClimateStudio (V2.3)'da yapılacaktır.

Referans hacimlerin kesit kurgusu ile iç yüzey özelliklerinin tanımlanmasında ilgili literatür, yürürlükteki standartlar ve yönetmelikler esas alınmıştır. Buna bağlı olarak yüzeylerin yansıtma çarpanlarının belirlenmesinde EN 12464-1:2021 Işık ve Aydınlatma – Çalışma Yerlerinin Aydınlatılması Standardı referans alınmış ve tavan, duvar, döşeme, kapı için sırasıyla %90, %80, %40, %35 değerleri kullanılmıştır [15].

Yüksek ışık geçirgenliğine sahip camların iç mekân aydınlık düzeylerini önemli ölçüde arttırdığı ve doğal ışık tayfını koruyarak kullanıcıların görsel ve görsel olmayan iyi olma haline olumlu

katkısı ortaya konulmuştur [16]. Ayrıca pencere boyutunun optimize edilmesi ve camların görünür ışıyım geçirgenliğinin artırılması, iç mekân günüışığı ortamını önemli ölçüde iyileştirebildiğı belirtilmiştir [17]. Bu kapsamda yüksek ışıy geçirgenlik performansının iç ortamdaki aydınlık düzeylerine olan olumlu etkisi nedeniyle saydam yüzeyler için %74 ışıy geçirgenliği olan tip cam kesiti sabit veri olarak kabul edilmiştir.

Enerji performansı değerdendirmesi yapabilmek için referans hacimlerdeki ısıtma, soğutma ve aydınlatma sistemlerinin enerji yükü dikkate alınmıştır. Yapı kabuğunu oluşturan cam yüzeylerin optik özellikleri ile dolu (ceph) yüzeylerinin ısı geçirgenlik katsayıları, TS825 Binalarda Isı Yalıtımı Kuralları Yönetmeliğı dikkate alınarak tasarlanmıştır. Bu doğrultuda, saydam yüzeyler için hava boşluklu çift cam sistemine sahip bir cam kesiti (6 mm cam+ 12.7 mm hava boşluğu + 6 mm cam) tercih edilmiştir. Söz konusu kesitin ışıy geçirgenliği %74, toplam günüışığı geçirgenliği (SHGC) değeri 0.41, toplam ısı geçirme katsayısı (U) değeri ise 1.66 W/m²K olarak tanımlanmış olup, 3. İklim bölgesinde yer alan İstanbul için TS 825 Binalarda Isı Yalıtımı Kuralları Yönetmeliğı kapsamında belirtilen gereklilikler sağlanmıştır. Referans hacimlerin dış ortamla temas eden cephe dışındaki tüm yapı elemanları ısı alışverişı olmayacak şekilde tanımlanmıştır. Cephe katmanlaşmasında, ilgili standartta duvarlar için belirlenen sınır değerdikkate alınarak U değeri 0,39 W/m²K olan bir kesit tasarlanmıştır (Çizelge 5).

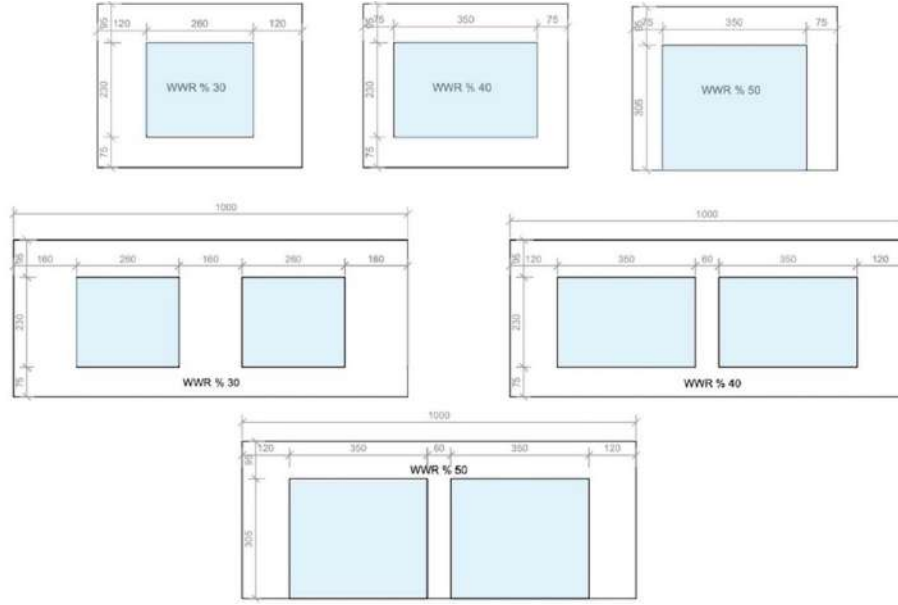
Çizelge 5. TS825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Yönetmeliğinde belirtilen bölgelere göre en fazla değerd olarak kabul edilmesi tavsiye edilen U değerdleri [14]

	Duvar	Tavan/Çatı	Döşeme	Pencere	
	U _D (W/m ² K)	U _T (W/m ² K)	U _t (W/m ² K)	U _p * (W/m ² K)	g (-)
1. Bölge	0,45	0,35	0,4	1,8	≤ 0,45
2. Bölge	0,4	0,3	0,35	1,8	≤ 0,45
3. Bölge	0,4	0,3	0,35	1,8	≤ 0,45
4. Bölge	0,35	0,25	0,3	1,8	≥ 0,55
5. Bölge	0,25	0,2	0,25	1,8	≥ 0,55
6. Bölge	0,25	0,2	0,25	1,8	≥ 0,55

Enerji tüketiminin diğerd bir bileşeni olarak çalışma düzleminde 300 lx aydınlık düzeyi hedefiyle ve günüışığı ile bütünleşik olarak devreye girebilecek şekilde dimmerlenebilir bir yapay aydınlatma sistemi kullanılmıştır. Bununla birlikte hacmin kullanım süreleri içerisinde pencerelerin açılabilir olduğı bir doğal havalandırma sistemi aktif edilmiştir. Isıtma ve soğutma sistemleri için sırasıyla 3,5 ve 3,0 performans katsayısı (cop) değerdleri belirlenmiş; iç ortam sıcaklık ayar değerdleri (setpoint) 21 °C ve 26 °C olarak tanımlanmıştır. Derslik hacminin kullanım süreleri dikkate alınarak hafta içi 8:00-17:00 saat periyodu aralığında takvim belirlenerek ısıtma-soğutma sistem verilerinin aktif olması için bir ayar yapılmıştır.

Saydamlık oranı:

Çalışma kapsamında saydamlık oranı bir değışken olarak belirlenmiştir. Bu doğrultuda üç farklı hacim alternatifi için %30, %40 ve %50 saydamlık oranları **Şekil 3'** te sunulmuştur. Sözü geçen saydamlık oranları kullanılarak farklı güneş kontrol elamanı tasarımlarının oluşturacağı yeni cephelerin iç ortamda oluşturacağı koşullar etüt edilmiştir.



Şekil 3. Saydırlık oranlarının belirlenmesi

Yapılı çevre koşulları:

Engel açısı olarak da incelenen farklı yapılı çevre koşullarının belirlenmesinde 2026 Yılı Planlı Alanlar İmar Yönetmeliği referans alınmıştır. [18] İlgili yönetmeliğin 4. madde başlığı altında değerlendirilen konuya dair oluşturulan alternatifler; yakın çevre binaların 4 katlı olup yol genişliğinin 12 m olması; komşu binaların 6 katlı olup yol genişliğinin 20 m olması; komşu binaların 8 katlı olup yol genişliğinin 25 m olması durumları değişkenler olarak değerlendirilmiştir (Çizelge 6).

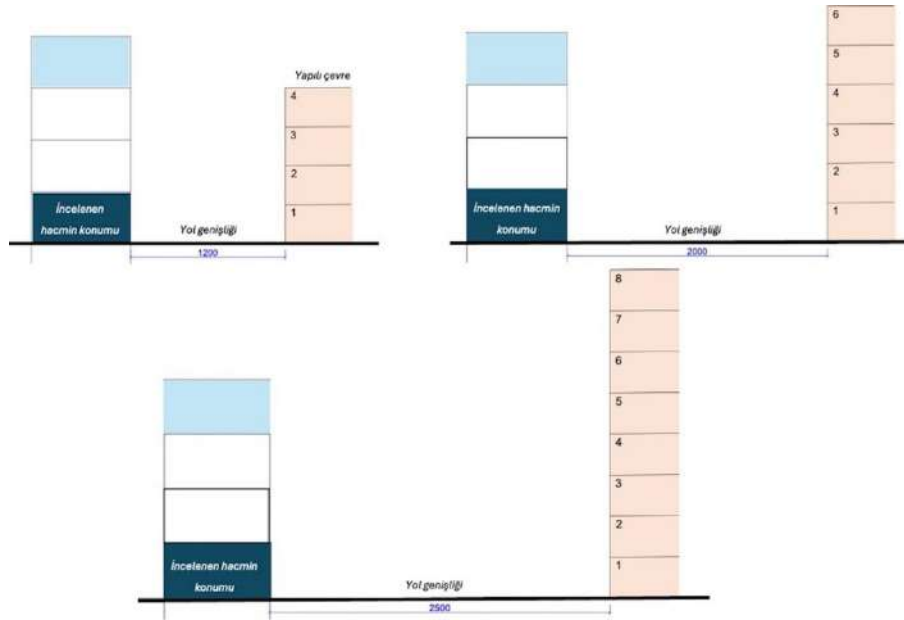
Çizelge 6. Yapılı çevre koşullarının belirlenmesi [18]

İmar Planına göre Yol genişliği (metre)	En Çok Kat Adedi (Bodrum Hariç)
Yol Genişliği ≤ 7.00	2
7.00 < Yol G. ≤ 10.00	3
10.00 < Yol G. ≤ 12.00	4
12.00 < Yol G. ≤ 15.00	5
15.00 < Yol G. ≤ 20.00	6
20.00 < Yol G. ≤ 25.00	8
25.00 < Yol G. ≤ 35.00	10
35.00 < Yol G. ≤ 50.00	14
50.00 < Yol Genişliği	18

Analiz edilecek referans hacimlerin 4 katlı bir yapıda yer aldığı kabulüyle, Çizelge 6’ da seçilen yol genişliği ve komşu bina yüksekliğinin belirlediği yapılaşma durumuna göre ilkesel alternatifler oluşturulmuştur (Şekil 4).

3. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Belirlenen tip geometrilerin günışığı ve enerji (ısıtma-soğutma-aydınlatma) performansını değerlendirmek üzere bir çalışma hazırlanmıştır. İlk analizler için en yakın engelin 50 m mesafede



olduğu yakın çevre verileri için asfalt araç yolu, beton yaya yolu ve yapı cephelerinin malzeme yansıtma çarpanları sırasıyla %12, %21 ve %55 olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada %30 saydamlık oranına sahip kare formu için dış cephede hareketli yatay kontrol elemanı tasarımı yapılmıştır. Görsel ve ısıl konfor hesap sonuçlarını etkileyecek ve değerlendirmesi yapılacak tüm fiziksel ve sistemsel veriler **Çizelge 7**'de sunulmuştur.

Hareketli yatay kontrol elemanları, saydamlık oranının izin verdiği ölçülerde kurgulanmış ve gerektiğinde tam kapanma opsiyonuyla dış ortamla görsel bağlantıyı kesebilecek şekilde tasarlanmıştır. Yatay eksenle %40 yansıtma çarpan oranına sahip kontrol elemanının dört lamelli (panelli) ve altı lamelli (panelli) tasarımları sunulmuştur. Dış cepheye entegre edilen kontrol elemanlarının panel isim ve konumları düşeyde pencere düzlemiyle yaptığı açılardan referans alınarak 30°, 60° ve 90° açılı alternatifleri ilk etapta modellenmiş ve ilgili simülasyon programından alınan yıllık sonuçlar **Çizelge 8'**de paylaşılmıştır.

Farklı kontrol elemanları ile oluşturulan farklı senaryolar, panellerin hareket potansiyelinin iç ortamda oluşturacağı koşulları değerlendirmek amacıyla sabit açılı konumlar ayrı ayrı modellenerek çok parametrelili bir çalışmanın optimizasyonu sağlanması hedeflenmiştir.

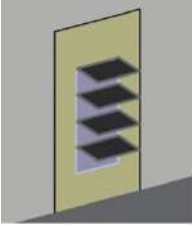
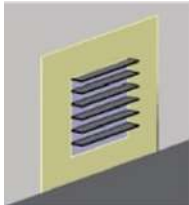
4. SONUÇLAR

Güneş kontrol elemanları, yapının cephe tasarımının bir parçası olmakla beraber, iç ortam görsel ve ısı konforunu etkileyen önemli bir tasarım parametresidir. Bir bileşen olarak, işlevsel, görsel, uygulama ve kullanım koşullarının belirlenmesi erken tasarım aşamasının önemli kararlarından biridir. Özellikle eğitim yapıları, gün içerisinde uzun zaman geçirilen, kullanıcıların bakış yönü ve oturma düzeninin belli olduğu işlevlerdir. Bu anlamda gerekli görsel konfor parametrelerinin sağlanması, yapının yıllık enerji tüketimi, kamaşma gibi görsel konforu zedeleyecek durumların önlenmesi açısından dış çevre koşullarına uyumlanan ve cepheye entegre olmuş dış ortamdaki hareketli kontrol elemanları, son yılların en önemli araştırma konularından biri olmuştur.

Çizelge 7. Referans hacim ve seçimi yapılan sistemlere ait teknik bilgiler

İç Yüzey Bitiş Elemanı Malzeme Bilgileri ve Yansıtma Çarpanları		Cephe_Saydam Yüzey Özellikleri	
Duvar (<i>duvar boyası</i>)	%80	(6 mm cam+ 12.7 mm hava boşluğu + 6 mm cam)	
Döşeme (<i>gri renk microbeton yüzey</i>)	%40	Işık geçirgenlik katsayısı (VT)	%74
Tavan (<i>tavan boyası</i>)	%90	SHGC değeri	0,41
Kapı (<i>ağşap lamine kapı</i>)	%35	Isı geçirgenlik katsayısı (u değeri)	1,66 W/m²K
Tefriş	-	saydamlık oranı	%30
Yapılı Çevre Malzeme Bilgileri ve Yansıtma Çarpanları		Enerji performansı girdileri (<i>ideal air load</i>)	
Araç yolu (<i>asfalt</i>)	%12	Isıtma sistemi performans katsayısı (<i>cop</i>)	3,5
Yaya yolu (<i>beton</i>)	%21	Soğutma sistemi performans katsayısı (<i>cop</i>)	3,0
Yapı cepheleri (<i>gri renk yüzey</i>)	%55	iç ortam sıcaklık ayar değerleri (<i>setpoint</i>)	21°C - 26°C
Güneş kontrol elemanı özellikleri		hafta içi 8:00-17:00	
d (<i>lamel derinliği</i>) 4 modül ve 6 modül	57 cm – 38 cm	Doğal havalandırma	açık
L (<i>genişlik</i>)	260 cm	hafta içi 8:00-17:00	
Malzeme (<i>yansıtma çarpanı</i>)	%40	Yapay aydınlatma (<i>dimmer ayarlı</i>)	
Cephe_Opak Yüzey Özellikleri		LPD	7,3 W/ m²
Isı geçirgenlik katsayısı (u değeri)	0,39 W/m²K	hafta içi 9:00-17:00 (2080 sa/yıl)	
cephe dışındaki dolu yüzeyler adiabatik		Hesap Düzleminin Özellikleri	
		h (yükseklik), sensör: 50 cm aralıkla	85 cm

Çizelge 8. 25m2 kare plan tipi için ilk hesap sonuçlarını gösteren tablo (güney cephe, saydamlık oranı %30)

 4 modül- lamel derinliği: 57 cm  6 modül - lamel derinliği: 38		Görsel Konfor Koşulları (EN17037)												Enerji Tüketimi
		Gerekli aydınlık düzeyinin sağlanması			Dış ortamla görsel bağlantının kurulması			Güneşlenme süresi			Kamaşmadan korunma (DGP)			Yüzdelik değişim
		en az	orta	yüksek	en az	orta	yüksek	en az (1,5 sa)	orta (3 sa)	yüksek (4 sa)	DGP ≤ 0,35	0,40 < DGP ≤ 0,45	0,35 < DGP ≤ 0,40	DGP > 0,45
Kontrol elemanı yok														-
4 modüllü kontrol elemanı tasarımı	30 °	-	-	-	-	-	-	-	-					% 151 artış
	60 °													% 104,6 artış
	90 °													% 19,3 artış
6 modüllü kontrol elemanı tasarım	30 °	-	-	-	-	-	-	-	-					% 151,4 artış
	60 °													% 122,9 artış
	90 °													% 17,9 artış

Literatür araştırmasından edinilen sonuçlara göre, kontrol elemanları özellikle dış ortam koşullarında konumlandığında iç ortamdaki görsel konforu dengeleyeceği gibi güneş ışınlamalarının iç ortama girmesine izin vermediği için yapının soğutma yüklerinin değişiminde olumlu etki sağladığı bilinmektedir.

Bu çalışmada, güney yönelimli, 25m² bir eğitim hacmi için, %30 saydamlık oranı dikkate alınarak görsel konfor ve enerji tüketimi değerlendirmesi için ilk hesap sonuçları alınmıştır. Yatay ekseninde 4 panelli (lamelli) ve 6 panelli farklı açılarda tasarlanan güneş kontrol elemanının sonuçlarına bakıldığında; güneş kontrol elemanı kullanılmadığı durumda çalışma düzlemi üzerindeki yıllık aydınlık düzeyi sonuçlarının EN 17037 standardının ‘Gerekli Güneşliğin Sağlanması’ kriterinin yüksek derecesinin sağlandığı görülmüştür. 30°, 60° ve 90° açılı yatay kontrol elemanlarının sadece 90° açılı olan alternatif kontrol elemanı kullanılmayan durumla benzer sonuç vermiştir. Bununla birlikte kontrol elemanı kullanılmadığında yüksek aydınlık düzeyleri, görsel konforsuzluk nedeni olan kamaşma potansiyeli ile sonuçlanmaktadır. Özellikle öğlen saatlerine yakın, kamaşma oluşurken tam olarak öğlen zamanı en yüksek seviyeye ulaşmaktadır. Dış ortamla görsel bağlantının sağlanması ölçütü için 30° açılı alternatifler hariç tüm senaryolarda orta derece sağlanmıştır. Bir başka görsel konfor parametresi olan güneşlenme süresinin herhangi bir kontrol elemanı kullanılmadığında en yüksek derecede sağlandığı görülmüştür. Ancak kontrol elemanı senaryolarında güneşlenme süresinin azaldığı, 4 panelli 90° açılı tasarımda orta derecesinin; 30° açılı tasarımda ise herhangi bir derecesinin sağlanamadığı kalan senaryoların da en az dereceyi sağladığı görülmüştür. Bu noktada kontrol elemanları güneşliğin hacme ulaşmasını önleyen bir engel gibi çalışmaktadır.

Enerji değerlendirmesinde belirtilen sistem verilerinin sonucu olarak, güneş kontrol elemanı kullanılmasıyla güneş ışınlamalarından pasif yararlanmanın azalması nedeniyle ısıtma yüklerinde artma, soğutma yüklerinde önemli düzeyde azalma olduğu tespit edilmiştir. Yapay aydınlatma yükleri ise iç ortamda 300 lx aydınlık düzeyi hedefiyle ve kontrol elemanın güneşliğin içeri girişine engel olması nedeniyle ciddi oranda artmıştır. Soğutma yüklerindeki azalış, ısıtma ve aydınlatma yüklerindeki artışı tolere edemediği için ısıtma, soğutma ve aydınlatma yüklerinin toplam enerji çıktısında fark yaratmıştır.

Hedeflenen bu yöntem ile, çalışmanın devamı olarak, farklı tasarımlara sahip sabit kontrol elemanlarının alınan yıllık simülasyon sonuçlarından yola çıkılarak referans hacimlerdeki iç ortam koşulları incelenecek ve kontrol elemanlarının hareket potansiyeli değerlendirilecektir. Bu kapsamda, iç ortam koşullarının çoklu parametreler üzerinden analiz edilmesi ve elde edilen bulgular doğrultusunda referans hacimler için uygun açılar ile kontrol elemanlarının hareket potansiyelinin belirlenmesine yönelik bir sistem önerilecektir. Çalışmanın başlangıç aşamasında dört ve altı panelli yatay kontrol elemanının performansı incelenmiş olup, kontrol elemanının lamel derinliğinin azalacağı farklı tasarımlı modüllerin sonuçları ve yapılı çevre etkisinin incelenmesi planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

1. Costanzo, V., Evola, G., Marletta, L., & Panarelli, D. (2017). Static and dynamic strategies for improving daylight use in side-lit classrooms: A case study. In F. Patuzzi, V. Corrado, A. Prada, G. Pernigotto, & A. Gasparella (Eds.), *Building Simulation Applications* (pp. 137-144).

2. Ziaee, N., & Vakilinezhad, R. (2022). Multi-objective optimization of daylight performance and thermal comfort in classrooms with light-shelves: Case studies in Tehran and Sari, Iran. *Energy and Buildings*, 254, 111590. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111590>
3. Mirrahimi, S., Ibrahim, N. L. N., & Surat, M. (2013). Effect of daylighting on student health and performance. In *Computational Methods in Science and Engineering*. (pp. 128-132).
4. Duyan, F., & Ünver, F. R. (2022). The influence of learning space colours on students. *Megaron*, 17(4), (pp. 629–643). <http://doi.org/10.14744/megaron.2022.53386>
5. Şendur, G. E., & Yener, A. K. (2023). Climate-responsive daylight system design for primary schools in Türkiye. *Megaron*, 18(4), (pp. 547–559).
6. Yaman, B. (2022). *Performans tabanlı parametrik ve adaptif bina kabuğu tasarım önerisi*. (Yüksek lisans tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi).
7. Zoroglu, F. (2025). *A method to design of perforated solar screens in terms of thermal and visual comfort*. (Doktora tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi).
8. Koç, S. G., & Kalfa, S. M. (2021). The effects of shading devices on office building energy performance in Mediterranean climate regions. *Journal of Building Engineering*, 44, 102653. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2021.102653>.
9. Savrunlu, M., & Uzun, T. (2025). Daylight performance evaluation of parametric facades inspired by kinetic systems. *Journal of Architectural Sciences and Applications*, 10(1), 417-433. <https://doi.org/10.30785/mbud.1644003>
10. Türk Standartları Enstitüsü. (2022). *Binalarda günışığı (TS EN 17037+A1)*.
11. Angelika, S. (2025). A review on methodological transitions in school lighting research from 1980 to 2020. *Indoor Environments*.
12. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2017). *Thermal environmental conditions for human occupancy (ANSI/ASHRAE Standard 55-2017)*.
13. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2019). *Energy standard for buildings except low-rise residential buildings (ASHRAE Standard 90.1-2019)*.
14. Türk Standartları Enstitüsü. (2024). *Binalarda ısı yalıtımı kuralları (TS 825:2024)*.
15. Türk Standartları Enstitüsü. (2021). *Işık ve aydınlatma – Çalışma yerlerinin aydınlatılması (TS EN 12464-1:2021)*.
16. Escobar, I., Orduna-Hospital, E., & Aporta, J. (2024). Efficient Daylighting: The Importance of Glazing Transmittance and Room Surface Reflectance. *Buildings*, 14(10), 3108. <https://doi.org/10.3390/buildings14103108>
17. Chen, X., Chen, Y., Li, J., Ji, Y., & Zhang, C. (2012). Study of influencing parameters on indoor daylighting environment in residential buildings in Chongqing. In *Proceedings of the 10th International Conference on Healthy Buildings 2012* (pp. 1737–1742). International Society of Indoor Air Quality and Climate (ISIAQ).
18. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2026). *Planlı alanlar imar yönetmeliği*.

SINIFLARDA IŞIĞIN GÖRSEL OLMAYAN ETKİLERİ: FİZYOLOJİK, PSİKOLOJİK VE BİLİŞSEL BİR ÇERÇEVE^{1*}

Elif Demirci^{2*}

Feride Şener Yılmaz³

Valerio Roberto Maria Lo Verso⁴

^{2,3} İTÜ Mimarlık Fakültesi, Taşkışla, Şişli, İstanbul, 34367

⁴ Politecnico di Torino, Corso Duca degli Abruzzi, Torino, İtalya, 10129

ÖZET

Işık, yalnızca görsel algıyı şekillendiren bir fiziksel uyaran değil; aynı zamanda insanın biyolojik ritimlerini, psikofizyolojik süreçlerini ve duygu durumunu etkileyen bütüncül bir çevresel faktördür. Literatürde son yıllarda yapılan çalışmalar, aydınlatmanın sirkadiyen ritimlerin düzenlenmesi, hormon salınımı, uyku-uyanıklık döngüsü, dikkat ve bilişsel performans üzerindeki belirleyici rolünü ortaya koymaktadır. Bu bulgular, ışığın görsel olmayan etkilerinin sağlık, öğrenme ve iyi olma hali açısından kritik bir bileşen olduğunu ortaya koymaktadır. Bu çalışma, öğrenme ortamlarında ışığın görsel olmayan etkilerine ilişkin mevcut bilimsel literatürü sistematik bir çerçevede incelemeyi amaçlamaktadır. Bu kapsamda, söz konusu etkilerin nörofizyolojik temelleri, ölçüm metrikleri ve değerlendirme yöntemleri gözden geçirilmekte; sınıflara yönelik araştırmalarda elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak ele alınmaktadır. Çalışmada, aydınlatmanın zihinsel uyanıklık, odaklanma, duygu durumu ve öğrenme motivasyonu üzerindeki etkilerine ilişkin bulguları bütüncül bir şekilde analiz etmeyi ve bu doğrultudaki eğilimleri ortaya koymayı hedeflemektedir. Bulgular, uygun şekilde tasarlanmış aydınlatma koşullarının öğrenci sağlığı, öğrenme performansı ve genel iyi olma hali üzerinde belirleyici bir etkisi olduğunu desteklemektedir.

Anahtar kelimeler: Sirkadiyen Aydınlatma, Sınıflar, Fizyolojik ve Psikolojik Etkiler, Bilişsel Performans, Literatür İncelemesi

NON-VISUAL EFFECTS OF LIGHT IN CLASSROOMS: A PHYSIOLOGICAL, PSYCHOLOGICAL AND COGNITIVE FRAMEWORK

ABSTRACT

Light is not merely a physical stimulus that shapes visual perception; it is also a holistic environmental factor that influences human biological rhythms, psychophysiological processes, and emotional states. Recent studies in the literature have demonstrated the decisive role of lighting in the regulation of circadian rhythms, hormone secretion, sleep-wake cycles, attention, and cognitive performance. These findings highlight the non-visual effects of light as a critical component of health, learning, and overall well-being. This study aims to systematically review the existing scientific literature on the non-visual effects of light in educational buildings. Within this framework, the neurophysiological foundations, measurement metrics and evaluation methods developed to assess them, are examined. Research findings related to educational environments are comparatively analyzed. The study seeks to provide a comprehensive synthesis of evidence regarding the effects of mental alertness, concentration, mood, and learning motivation in educational spaces, and to identify emerging trends in this research field. The findings support the view that appropriately designed lighting conditions have a decisive impact on student health, learning performance, and overall well-being.

Keywords: Circadian Lighting, Classrooms, Physiological and Psychological Effects, Cognitive Performance, Literature Review

^{1*} Bu çalışma, sorumlu yazarın yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

^{2*} Sorumlu yazar e-posta adresi: demircie24@itu.edu.tr

1. GİRİŞ

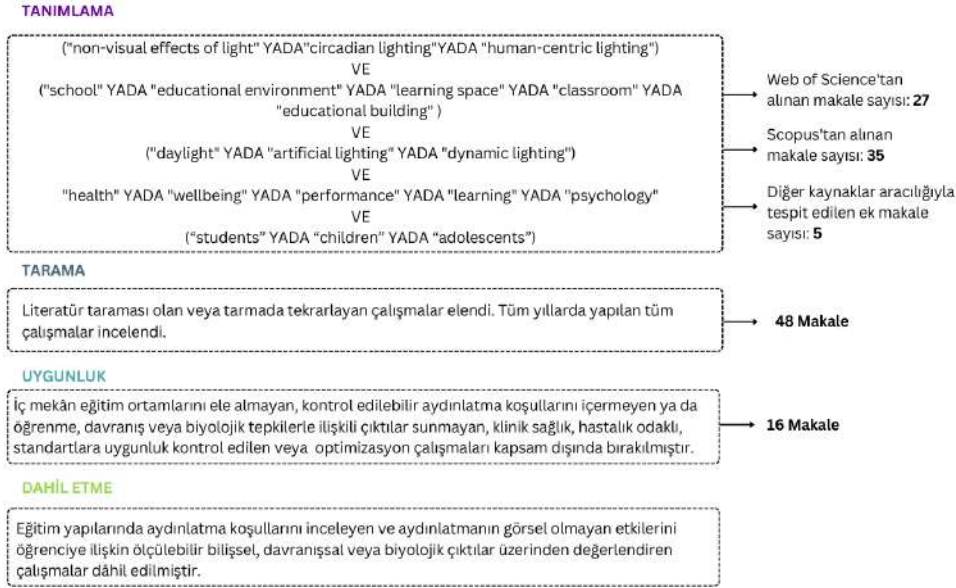
Işık, insanlık tarihinin en eski ve en güçlü unsurlarından biri olarak yalnızca görsel algının temel kaynağını değil, aynı zamanda yaşamın ritmini düzenleyen önemli bir çevresel etmeni temsil etmektedir. İnsan görme organının evrimsel gelişimi doğrudan ışığa duyarlılık üzerine şekillenmiş; bu durum, ışığın görmenin ötesinde biyolojik süreçleri de yönlendiren bir rol üstlendiğini ortaya koymuştur. Bu bağlamda en doğal ve etkili ışık kaynağı olan güneş, hem yaşamın gelişimini ve sınırlarını belirleyen temel faktör hem de insan organizmasında biyolojik saat mekanizmalarının senkronizasyonunu sağlayan en güçlü çevresel zamanlayıcı olarak tanımlanmaktadır [1]. İnsan güneşin hareketine bağlı olarak şekillenen gündüz-gece döngüsüne uyum sağlayacak biçimde gelişim göstermiştir. Özellikle gün doğumu, gündüz aktif olan türler için sirkadiyen düzenin başlangıcını işaret etmekte; gün ışığı bu yönüyle insan davranışı ve fizyolojisinin temel belirleyicilerinden biri olarak öne çıkmakta ve bu bağlamda bir zamanlayıcı mekanizma işlevi görmektedir [2]. Işığın tayfsal dağılımı, aydınlık düzeyi ve zamanlaması, sirkadiyen ritimlerin düzenlenmesinde kritik önem taşımaktadır. Dış iklimsel koşulların durumu, mevsimsel değişkenlik, ışığın yoğunluğu, tayfsal dağılımı ve geliş yönü gibi etkilerle şekillenen günlük aydınlık-karanlık döngüsü, biyolojik ritimlerle senkronizasyon sağlar ve fizyolojik dengeyi destekler. Uyku-uyanıklık döngüsü, hormon salgılanması, hücre fonksiyonları gibi çok sayıda fizyolojik süreç bu ritimlerin kontrolü altında ele alınmaktadır [3]. Dolayısıyla, aydınlatmanın etkileri yalnızca görsel konfor ile sınırlı kalmayıp; biyolojik etkileri sayesinde sağlık, iyi oluş hâli, uyanıklık düzeyi ve uyku kalitesi üzerinde de belirleyici olmaktadır. Bu bağlamda günışığı, mekânın görsel olarak aydınlatılmasının ötesinde, biyolojik saatin düzenlenmesi, ruh hâlinin dengelenmesi ve üretkenlik algısının artırılması gibi görsel olmayan etkileri de beraberinde getirmektedir. Bu bağlamda Uluslararası Aydınlatma Komisyonu CIE (Commission Internationale de l'Éclairage), ışığın görsel ve görsel olmayan etkilerini kapsayacak şekilde 'bütünleşik aydınlatma' terimini önermektedir [4].

Kullanıcıların uzun süre kapalı ortamda bulunduğu ve bilişsel performansın öncelikli olduğu eğitim yapılarında, aydınlatma tasarımı görsel konfor eşiklerinin ötesine geçerek biyolojik ve psikolojik sağlığı bütüncül bir şekilde desteklemelidir. Literatürde gün ışığının sınıflardaki olumlu etkileri sıklıkla vurgulanmakta; bu etkiler hem görsel hem de görsel olmayan yollarla kendini göstermektedir. Araştırmalar, doğal ritimle uyumsuz aydınlatma koşullarına uzun süre maruz kalmanın sirkadiyen ritimlerin doğal senkronizasyonunu bozabileceğini ve bunun ciddi sağlık sorunlarına yol açabileceğini ortaya koymuştur [5]. Bu doğrultuda, sınıflarda aydınlatma tasarımı yalnızca görsel konforu değil, aynı zamanda ışığın biyolojik ve bilişsel etkilerini de gözeterek bütüncül bir yaklaşımla ele alınmalıdır. Tasarım sürecine entegre edilen bu yaklaşım, ışığın insan fizyolojisi üzerindeki düzenleyici rolünü dikkate alarak, aydınlatma stratejilerinin sirkadiyen ritimle uyumlu hâle getirilmesini hedefler. Bu bağlamda, bu çalışma, sınıflardaki ışığın görsel olmayan etkileri üzerine mevcut bilimsel literatürü sistematik olarak gözden geçirmeyi ve böylece öğrenme ortamlarında sirkadiyen ritmi optimize etmek için kullanılan gereksinimleri, analiz yöntemlerini ve temel performans göstergelerini vurgulamayı amaçlamaktadır.

2. YÖNTEM

Ocak 2026 tarihinde Web of Science Core Collection ve Scopus veri tabanları üzerinden yürütülen literatür taramasında, öğrenme ortamlarındaki aydınlatmanın görsel olmayan (sirkadiyen)

etkilerine odaklanılmıştır. Arama stratejisi; mekân, ışık kaynağı, psikofizyolojik göstergeler ve hedef kitle anahtar kavramları üzerine kurgulanmıştır. İlk aşamada tespit edilen 67 yayından, özgün deneysel veri sunmayan 19 derleme makalesi elenmiştir. Kalan 48 çalışma; mimari müdahale alanı dışındaki dış mekân aydınlatması, yalnızca enerji performansı veya klinik odaklı araştırmalar ve eğitim bağlamı içermeyen içerikler yönünden filtrelenmiştir. Dahil etme ve hariç tutma kriterleri sonucunda; iç mekân aydınlatma koşullarının öğrencilerin bilişsel, davranışsal ve biyolojik tepkileri üzerindeki etkilerini inceleyen nihai 16 çalışma analiz kapsamına alınmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. PRISMA temelli literatür tarama yöntemi

3. SINIFLARDA SİRKADİYEN AYDINLATMA

Sınıflarda aydınlatma, yalnızca görsel konforun sağlanmasına yönelik teknik bir gereklilik olarak değil; öğrencilerin bilişsel performansı, dikkat düzeyi, ruh hâli ve öğrenme motivasyonu gibi çok boyutlu süreçleri etkileyen temel bir çevresel etmen olarak ele alınmaktadır. Son yıllarda yapılan araştırmalar ışığın görsel olmayan etkilerinin öğrenme ortamlarının niteliği ve pedagojik süreçler üzerindeki belirleyici rolünü doğrulamaktadır. Biyolojik saatle doğal senkronizasyon sağlayan günışığı, sınıflarda temel ışık kaynağı olarak öne çıkmaktadır. Günışığının sirkadiyen ritim üzerindeki düzenleyici etkisini temel alan yapay aydınlatma sistemleri ise, tayfsal dağılım ve zamansal değişkenlik bakımından günışığını taklit ederek uyarıcı ve dengeleyici bir çevresel uyarıcı sunmayı amaçlamaktadır. Aydınlatmanın biyolojik etkilerinin değerlendirilmesinde yaş faktörü, göz merceği ve nöral duyarlılık açısından belirleyici bir değişkendir. Korneal düzlemdeki ışık şiddeti sabit tutulsa dahi, retinaya ulaşan sirkadiyen uyarıcı miktarının yaşa bağlı olarak dramatik bir değişim gösterdiği kanıtlanmıştır [6]. Genç bireylerde, göz merceği ve göz küresindeki camsı sıvının yüksek geçirgenliği kısa dalga boylu ışığın retinaya daha fazla ulaşmasını sağlamakta ve gangliyon hücrelerinin uyarımını artırmaktadır. Yaşlı bireylerde ise lensin sararması, bu mavi-zengin spektrumun retinaya ulaşmasını kısıtlayarak sirkadiyen uyarımı zayıflatmaktadır. [3]. Ergenlik dönemi, biyolojik saatte sirkadiyen faz gecikmesine eğilimin arttığı kritik bir evredir. Bu dönemde akşam saatlerinde maruz kalınan yapay ışığın düzeyi (aydınlık seviyesi), kaynak sayısı

ve tayfsal içeriği (tayfın kısa dalga boyu bölgesindeki yüksek enerji yoğunluğu/ mavi ışık) melatonin salgısını daha güçlü biçimde baskılamaktadır. Bu durum, uyku başlangıcını geciktirerek toplam uyku süresinin kısalmasına yol açmaktadır. [7]. Aynı zamanda ergenlik ilerledikçe sabah ışığına olan duyarlılığın azalması, sirkadiyen ritmi öne çekme etkisini zayıflatmaktadır [8]. Bu bilimsel veriler, sınıflarda aydınlatma tasarımının hedeflenen yaş grubunu dikkate alan kişiselleştirilmiş bir stratejiyle ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

3.1. Sınıflarda Görsel Olmayan Performans İçin Aydınlatma Gereklilikleri

Sınıflarda görsel olmayan performansın tasarıma aktarılması ve etkilerin nicelleştirilebilmesi, biyolojik yanıt eşiklerini temel alan özel metriklerin kullanımını zorunlu kılmıştır. Görsel olmayan aydınlatma kriterleri ve standartları incelendiğinde, literatürde tarihsel süreçte öne çıkan iki temel yaklaşım bulunmaktadır. İlk yaklaşım olan Sirkadiyen Uyarım (CS), Rea ve arkadaşları tarafından tanımlanarak melatoninin gece baskılanmasına ilişkin laboratuvar verilerine dayandırılmış ve saha çalışmalarıyla geçerliliği doğrulanmıştır [9,10]. İkinci temel yaklaşım CIE tarafından formüle edilen Melanopik Eşdeğer Gün Işığı Aydınlatmasıdır (mel-EDI). Bu metrik, görsel olmayan süreçler üzerinde yalnızca melanopsin içeren içsel duyarlı retinal ganglion hücrelerinden gelen sinyallerin etkisini esas alan bir çerçeve sunmaktadır [11].

Işık tayfı, şiddeti, yönü, zamanlaması ve maruziyet süresi gibi değişkenlerin biyolojik etkiler üzerindeki öneminin daha iyi anlaşılmasıyla, literatürde çeşitlenen ilave metrikler ortaya çıkmıştır [12]. Güncel standartlarda kullanılan metriklerin önemli bir kısmı statik bir yapı sergilemektedir. Bu statik metrikler, bireyin gün boyunca deneyimlediği değişken ışık maruziyetini ve kümülatif biyolojik etkileri yansıtmakta sınırlı kalabilmektedir. Ayrıca, ışığın zamansal değişimlerini ve kullanıcı etkileşimini merkeze alan dinamik metrikler geliştirilmiştir. Sirkadiyen Faktör (CF) gibi ölçütler, gün içindeki ışık değişimlerini dikkate alarak daha gerçekçi bir değerlendirme sunmaktadır [13]. Benzer şekilde [14,15], değerlendirme odağını anlık değerlerden uyumlu saatler ve uyumlu günlere kaydırarak; Sirkadiyen Etkin Alan (CEA) ve Sirkadiyen Frekans (CF) gibi dikey ışık miktarına dayalı dinamik metrikler önermiştir. Ayrıca Acosta ve arkadaşları (2019) tarafından geliştirilen Sirkadiyen Uyarım Özerkliği (CSA), mekânın sirkadiyen açıdan yeterliliğini bütüncül bir perspektifle ele almaktadır. Sınıflarda görsel olmayan konfor şartlarını değerlendirmek için kullanılan temel metrikler ve bu metriklerin önerilen referans aralıkları Çizelge 1’de sunulmuştur.

Çizelge 1. Sınıflarda Aydınlatma Performansını Değerlendirmek İçin Kullanılan Görsel Olmayan Metrikler

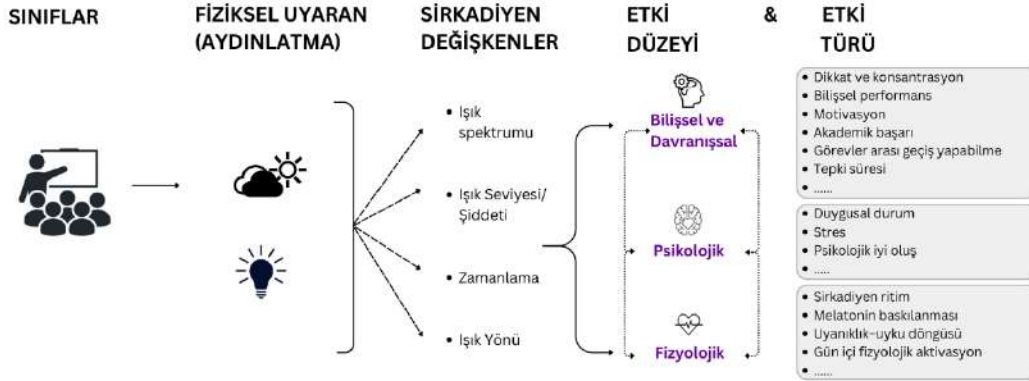
Metrik ve Birim	Açıklama	Tavsiye Edilen Değer Aralıkları	Kaynak
Eşdeğer Melanopik Lüks (EML) / [lx]	Melanopsin reseptörlerine göre ağırlıklandırılmış aydınlık düzeyi. $mEDI = 0.9058 \times EML$	1 puan: EML ≥ 150 ; En az 120 EML (109 M-EDI VE L05 Part1 ya da LO6 Part1) 3 puan: EML ≥ 275 ; En az 180 EML (163 M-EDI VE L05 Part1 ya da LO6 Part1)	[16]
		Günde 4 saat, EML ≥ 250 lx	[17]
Melanopik eşdeğer günışığı aydınlığı (mel-EDI) / [lx]	Bir ışık kaynağının spektrumunun ipRGC'leri ne kadar uyardığını ve sirkadiyen sistemi ne kadar etkilediğini, ipRGC'lerin tayfsal ışığa verdiği tepkiye göre ağırlıklandırılan ölçüm. Baz değer ile mekânsal parametrelerin pencere mesafesi, cam yüzey ışık geçirgenliği (Tv), sDA kombinasyonuna dayanır.	Günde 4 saat, mel-EDI ≥ 200 lx 1 puan: mel-EDI ≥ 136 lx; mel-EDI > 109 lx + %70 istasyon 4,88 m pencere mesafesi + Tv > %40; m-EDI > 109 lx + Alanın %75'inde sDA300,50% ortalaması. 3 puan: mel-EDI ≥ 250 lx; m-EDI > 163 lx + %70 istasyon 4,88 m pencere mesafesi + Tv > %40; m-EDI > 163 lx + Alanın %75'inde sDA300,50% ortalaması.	[16]
Sirkadiyen Uyarıcı (CS) / [%]	Bir aydınlatma ortamının ne kadar etkili bir şekilde uyardığını nicel olarak ifade eden ölçümdür.	CS ≥ 0.3 (özellikle sabah saatlerinde)	[18, 19,20]
Sirkadiyen Faktör (CF) / [%]	Bir yıl içinde belirli bir bakış yönünde (örneğin pencereden görülen manzara) melanopik ışık düzeyi (EML) 200 lüks veya üzeri olan günlerin yüzdesini gösterir.	CF eşikleri (%25, %50 ve %75), Gün içinde 9:00–13:00 saatleri arasında en az 4 saat devam etmelidir.	[14]
Sirkadiyen Eşdeğer Otonomi (CEA) / [%]	Bir odadaki EML'nin, sirkadiyen uyarım için gereken bir eşiği, günün kritik saatlerinde ne kadar süreyle karşıladığını gösteren dinamik ölçümdür.	CEA 250 EML/4 saat Uyarıcı Sıklığı Eşiği ≥ 71 %	[15]
Sirkadiyen Uyarıcı Otonomisi (CSA) / [%]	Yıl boyunca, yalnızca gün ışığı kullanarak, biyolojik uyarımı ne ölçüde sağladığını ölçen dinamik metriktir.	CSA Eşikleri: %25 Minimum, %50 Nominal ve %75 Optimum.	[21]
Melanopik Günışığı Etkinlik Oranı (MDER) / [%]	Bir ışık kaynağının melanopik aydınlık düzeyinin eşit fotopik aydınlık düzeyinde D65 günışığına göre etkinlik oranı. Tayfsal bir verim oranıdır, bir aydınlık düzeyi değildir.	$0.4 \geq MDER \geq 1.2$	[12,22,23]
Melanopik / Fotopik Oran (M/P Oranı)	Melanopik duyarlılık ile fotopik görme duyarlılığı oranı.	$0.3 \geq M/P \geq 1.5$	[24,25]

Çizelge 1, görsel olmayan performansa ilişkin aydınlatma gerekliliklerini ve eşik değerleri özetlemektedir. Ancak bu standart ve yönetmeliklere dayalı uygunluk temelli değerlendirme yaklaşımı, aydınlatma koşullarının kullanıcı üzerindeki etkilerini değil, yalnızca uygunluk düzeyini

tanımlamaktadır. Bu nedenle, bir sonraki bölümde bu koşulların ölçülebilir etkileri analiz edilmektedir.

3.2. Sirkadiyen Aydınlatmanın Fizyolojik, Psikolojik ve Bilişsel Etkileri

Öğrenme ortamı; fiziksel çevre (sınıflar), okul saatleri boyunca bu çevrede gerçekleşen öğrenme etkinlikleri ve bu etkinlikleri etkileyen ya da etkileyebilecek öğrenci davranışlarının bir bileşimi olarak tanımlanmaktadır [26]. Bu yaklaşım, öğrenmeyi çevresel, bilişsel ve biyolojik etmenlerin etkileşimiyle şekillenen çok katmanlı bir süreç olarak ele almaktadır. Aydınlatma, bu çok yönlü etmenler arasında hem bilişsel ve psikolojik hem de biyolojik düzeyde öğrenme sürecini etkileyen önemli bir çevresel bileşen olarak öne çıkmaktadır. Şekil 3'te özetlendiği üzere, literatürde ışığın; dikkat, konsantrasyon ve performans gibi bilişsel çıktıları ile sirkadiyen ritim ve ruh hâli üzerindeki biyolojik etkileri sıklıkla birbirinden bağımsız çerçevelerde raporlanmıştır [27-41]. Bu çalışma, sınıflardaki aydınlatmanın görsel olmayan etkilerini fizyolojik, psikolojik ve bilişsel boyutları kapsayan bütünlük bir çerçeve aracılığıyla ele alan bir sınıflandırma önererek bu ayrımı ortadan kaldırmayı amaçlamaktadır. Çalışmanın kavramsal çerçevesi ve değişken seçimi, ışık uyarısının biyolojik potansiyelini belirleyen dört temel faktör esas alınarak oluşturulmuştur [42]. Fotoreseptör uyarımını belirleyen tayfsal dağılım, biyolojik yanıtın doz-eşik ilişkisini tanımlayan retinal aydınlık düzeyi, sirkadiyen faz kaymalarını yöneten zamansal maruziyet profili ve biyolojik etkinin yönsel hassasiyetini belirleyen mekânsal/yönsel dağılım çalışmanın temel parametrelerini oluşturmaktadır. Bu kapsamda, sınıflarda aydınlatmanın öğrenme süreçleriyle kurduğu çok katmanlı ilişki, farklı etki düzeyleri arasında kurulan kavramsal bağlantılar üzerinden sistematik olarak incelenmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. Sınıflarda Aydınlatmanın Görsel Olmayan Etkilerine İlişkin Kavramsal Etkileşim Çerçevesi

Mevcut yaklaşımlar, sirkadiyen aydınlatmayı büyük ölçüde standartlara uygunluk üzerinden değerlendirmektedir. Bu literatür çalışması ise odağını bu uygunluk denetiminden, ışığın insan üzerindeki ölçülebilir etkilerine kaydırmaktadır. Bu kapsamda, aydınlatmanın görsel olmayan etkilerini (i) fizyolojik, (ii) psikolojik ve (iii) bilişsel/davranışsal etkiler olmak üzere üç ana kategoride sınıflandırılmaktadır. Bu ayrım, analitik netlik sağlama ve katmanlar arası etkileşimi görünür kılma amacı taşımaktadır. Şekil 3'te sunulan çalışmalar; okul öncesinden yükseköğretime kadar farklı öğrenci gruplarını kapsamakta olup, hem gerçek derslik ortamlarında yürütülen saha çalışmalarını hem de kontrollü deneysel araştırmaları içermektedir. Etki türlerinin yorumlanmasında bu metodolojik ve gelişimsel farklılıklar dikkate alınmaktadır.

	AYDINLATMA BİLGİSİ VE YÖNTEMİ	AYDINLIK DÜZEYİ / ÖZELLİĞİ	ETKİLER
BİLİŞSEL VE DAVRANİŞSAL	[27] – Dinamik flüoresan, Deneyisel vaka çalışması (İlkokul)	Aydınlık düzeyi ve renk sıcaklığı 300 lx / 4000 K; 1000 lx / 5800 K; 275–1000 lx / 3500–11000 K	Okuma hızı Anlama Akademik başan
	[28] – LED, Deneyisel laboratuvar çalışması (Genç yetişkin)	Düşük–yüksek aydınlık düzeyi karşılaştırması (400 lx, 700 lx, 1000 lx)	Uzun süreli bellek
	[29] – Dinamik LED, Gözlem ve datalog ile alan çalışması (Ortaokul)	Senaryo + zamanlama	Aktivite geçişleri Sınıf içi organizasyon Odaklanma
	[30] – Ayarlanabilir Beyaz LED, Deneyisel vaka çalışması (Üniversite)	Düşük: 309 / 128 lx (fotopik/melanopik) ve Yüksek: 513 / 214 lx, melDER sabit	Bellek Uyanıklık Duygu durumu
	[31] – Güneşiği, Alan Çalışması + Simülasyon + Anket (öz-bildirim ölçeği) (Ortaokul)	sDA / UDI / mel-EDI / CF, Görüş kalitesi	Algılanan üretkenlik Görsel olmayan etki
	[32] – LED ve flüoresan aydınlatma, Deneyisel çalışma (Çaprazlama tasarım) (Üniversite)	LED (2700–6500 K) vs floresan (~5600 K)	Dikkat / konsantrasyon Etkinin sürekliliği
	[33] – Kısa dalga boyu zengin LED ve flüoresan aydınlatma, Alan çalışması (Kontrol ve müdahale sınıfları, pre/post testler) (Lise)	Sabah ders saatleri ~300 lx'te (dikey) Mavi-zengin LED (5500 K) vs flüoresan (3000–3500 K)	Konsantrasyon Hata oranı Kısa süreli bellek İşlem hızı
PSİKOLOJİK	[27] – Dinamik LED, Deneyisel vaka çalışması (İlkokul)	Değişken dinamik aydınlatma senaryoları	Memnuniyet
	[13] – Yapma aydınlatma (genel + artırılmış ortam aydınlatması), Uzun süreli deneyisel çalışma (İlkokul, ortaokul)	300 lx (kontrol) ve 500 lx (deney); güneşiği erişimi, mevsimsel değişim	Ruh Hali Kortizol Melatonin
	[34] – LED Melatonin ve kortizol ölçümü + öznel anketler (Üniversite)	Sabah maruziyeti (~1 saat) 500 lx'te 3500 K vs 6500 K LED	Ruh Hali Kortizol Melatonin
FİZYOLOJİK	[35] – Güneşiği + Yapma aydınlatma, Vaka çalışması ölçüm+ anket (Ergenler, genç yetişkinler)	Standart vs yüksek aydınlık seviyesi Sabah / akşam maruziyet	Uyanıklık Uyku Kalitesi Uykuya Dalma
	[36] – Yapma aydınlatma + güneşiği maruziyeti, Deneyisel laboratuvar çalışması + nörogörüntülenme (Ergenler, genç yetişkinler)	Mavi ve Kehribar dalga boyulu ışık	Duygusal süreçler ile ilgili beyin bağlantıları
	[37] – LED + güneşiği, Deneyisel çalışma + nörofizyolojik ölçüm + anket (Üniversite)	Güneşiği / yapma aydınlatma Düşük–yüksek bilişsel yük	Düşük Bilişsel Yük Yüksek Bilişsel Yük
	[38] – Dinamik LED + güneşiği, Deneyisel çalışma + nörofizyolojik ölçüm + anket (Okul Öncesi)	Güneşiği dağılımı, dinamik yapma aydınlatma senaryoları, CCT ayarlanabilirliği (sıcak-soğuk)	Öğrenme sürekliliği Mekansal Organizasyon
	[39] – Kısa dalga boyu zengin LED + güneşiği, Alan çalışması (spektral ölçüm + senaryo analizi) (Üniversite)	mEDI: ~157–245 lx (senaryoya bağlı) (Yönetme, zaman, jaluizler, projektör etkisi)	Uyanıklık
	[40] – LED + güneşiği, Alan çalışması (ışık sensörü ölçümü, doğrusal karma model ve korelasyon analizi) (Üniversite)	Yüksek güneşiği + düşük/yüksek CCT LED, 0–∞ lx, gece maruziyeti (uykudan önce ~2 saat)	Uyku Zamanlaması
	[41] – Güneşiği, (ışık maruziyeti ölçümü/ aktigraf) (Lise)	Günlük ışık maruziyeti (<15 lx → ≥1000 lx), Sabah vs öğleden sonra vardiya kronotipleri (Sabahçı, akşamcı)	Uyku süresi Gündüz uyukluluğu Akademik Performans



Şekil 3. Sınıflarda Fizyolojik, Psikolojik ve Bilişsel Etkilere İlişkin Literatür Bulguları

Aydınlatma koşulları; aydınlatma türü ve yöntemi, aydınlık düzeyi/özellikleri ve tayfsal dağılım gibi parametreler üzerinden ele alınmış, bu parametrelerin farklı çıktı değişkenleri üzerindeki etkileri sistematik olarak sınıflandırılmıştır. Şekilde kullanılan renk kodları, aydınlatma parametrelerinin etkilerinin yönünü ve istatistiksel anlamlılığını (pozitif, negatif, etkisiz) göstermektedir. Ok tipleri kanıt gücünü, semboller etkilerin ortaya çıkış biçimini ifade etmektedir; yıldız doğrusal olmayan, optimum nokta içeren ilişkileri, dışlı simgesi ise etkilerin zamanlama, görev türü veya çevresel koşullar gibi bağlamsal faktörlere bağlı olarak değiştiğini göstermektedir.

Elde edilen bulgular, öğrenme ortamlarında aydınlatmanın etkilerinin tek bir parametre ile açıklanamayacak ölçüde çok boyutlu ve bağlama duyarlı olduğunu, aydınlatma–tepki ilişkisinin çoğu durumda doğrusal olmadığını, belirli koşullarda optimum performans noktalarının oluştuğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, “daha fazla ışık daha iyi performans sağlar” varsayımının geçerli olmadığını göstermektedir. Aynı şekilde, eşit melanopik uyarım koşullarında farklı aydınlık düzeylerinin bilişsel ve fizyolojik çıktılar üzerinde anlamlı bir fark yaratmaması, ışığın niceliğinden ziyade niteliğinin belirleyici olduğunu desteklemektedir. Dinamik ve bağlama duyarlı aydınlatma senaryolarının, yalnızca görsel konforu değil, aynı zamanda öğrenme süreçlerinin organizasyonu, dikkat sürekliliği ve davranışsal düzenleme üzerinde etkili bir araç olduğu görülmektedir. Günışığı ve yapma aydınlatmanın birlikte ele alındığı hibrit sistemler ise hem görsel hem de görsel olmayan performans açısından en güçlü sonuçları sunmaktadır. Bununla birlikte, aydınlatmanın bilişsel performans üzerindeki etkilerinin çoğunlukla kısa vadeli olduğu, uzun vadeli akademik başarı üzerinde ise tutarlı ve anlamlı bir etki oluşturmadığı dikkat çekmektedir. Bu durum, anlık performans artışlarının sürdürülebilir öğrenme çıktılarıyla her zaman örtüşmediğini göstermektedir.

Fizyolojik düzeyde ise, ışığın etkilerinin zamanlama ile güçlü biçimde etkileştiği görülmektedir. Mavi-zenginleştirilmiş ışığın sabah saatlerinde uyanıklık ve ruh hâli üzerinde olumlu etkiler oluşturduğu, buna karşın aynı tayfsal özelliklerin gece saatlerinde sirkadiyen ritmi geciktirici ve potansiyel olarak olumsuz etkiler doğurabildiği belirlenmiştir. Benzer şekilde, düşük melanopik uyarım düzeylerinin gündüz saatlerinde yetersiz uyanıklık ile ilişkili olabileceği, ancak akşam saatlerinde melatonin üretimini destekleyici bir rol oynayabildiği görülmektedir. Bireysel biyolojik farklılıklar ve zamanlama faktörleri (örneğin kronotip ve okul başlangıç saatleri), aydınlatma etkilerinin yönünü ve büyüklüğünü belirleyen kritik değişkenler olarak öne çıkmaktadır. Sonuç olarak, aydınlatma; yalnızca görsel bir gereksinim değil, aynı zamanda bilişsel performansı, fizyolojik ritimleri ve davranışsal süreçleri etkileyen çok katmanlı bir çevresel düzenleyici olarak değerlendirilmelidir.

4. DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Sirkadiyen sağlığın yalnızca nicel ışık maruziyetiyle açıklanamayacağı; öznel iyi oluş, algılanan konfor ve bilişsel bağlam ile bütünleşik biçimde ele alınması gerektiği son dönem çalışmalarda vurgulanmaktadır. Bu durum, ışığın yalnızca teknik bir çevresel parametre değil, aynı zamanda mekânsal deneyimi biçimlendiren bir tasarım girdisi olduğunu göstermektedir. Gün ışığının, özellikle düşük bilişsel yük altında görsel konforu ve bilişsel verimliliği desteklediği; buna karşılık yapma aydınlatmanın, yüksek bilişsel yük koşullarında çevresel stabilite sağlayarak performansın sürdürülebilirliğine katkıda bulunduğu gösterilmiştir. Bu bulgular, sınıflarda pencere oranı, yönlenme, kesit kurgusu ve gölgeleme stratejilerinin yalnızca enerji ya da görsel konfor

kriterleriyle değil, bilişsel senaryolarla birlikte ele alınmasını gerekli kılmaktadır. Biyolojik ve fizyolojik düzlemde aydınlatma, tayfsal dağılım, ışık şiddeti ve maruziyet zamanlaması aracılığıyla uyanıklık düzeyi ve sirkadiyen düzenleme üzerinde belirleyici bir rol üstlenmektedir. Kısa dalga boylu ışığın uyanıklığı artırıcı etkisi literatürde tutarlı biçimde ortaya konulurken, bu etkinin zamanlamasının sirkadiyen sağlık açısından kritik olduğu belirtilmektedir. Bu durum, cephe tasarımında sabah ışığının iç mekâna alınması, dolaşım alanlarının doğal ışıkla desteklenmesi ve gün içinde değişken aydınlatma senaryolarının kurgulanması gibi mimari stratejileri doğrudan gündeme getirmektedir.

Bu bağlamda, aydınlatma tasarımında odağın yalnızca fotopik aydınlık düzeylerinden, sirkadiyen potansiyeli temsil eden melanopik içeriğe kaydırılmasının biyolojik etkinlik açısından zorunlu olduğu ileri sürülmektedir. Bilişsel ve davranışsal düzeyde ise aydınlatma; dikkat, konsantrasyon ve görev sürekliliğini koordine eden çevresel bir düzenleyici olarak değerlendirilmektedir. Zamana bağlı ve değişken aydınlatma senaryolarının, bireylerin davranışsal adaptasyonunu destekleyerek görev geçişlerini ve zamansal örgütlenmeyi kolaylaştırdığı ortaya konmuştur. Bununla birlikte, yüksek uyarım düzeylerinin her bağlamda performans artışı sağlamadığı; özellikle derin bilişsel işleme, analitik düşünme ve problem çözme gerektiren görevlerde daha düşük aydınlık düzeylerinin bilişsel verimliliği artırabileceği gösterilmektedir. Bu bulgu, mekânda farklı ışık zonları oluşturmayı ve esnek kullanım senaryolarını mimari programın bir parçası haline getirmeyi gerektirir. Bu performans hedeflerinin tasarıma aktarılabilmesi ve nicelleştirilmesi, ışığın sirkadiyen etkisini ölçebilen ileri düzey metriklerin kullanımına bağlıdır. Geleneksel aydınlatma standartları ışığı yalnızca görsel bir uyaran olarak tanımlarken; CS, mel-EDI ve EML gibi metrikler, fotoreseptörlerin tayfsal hassasiyetini ve biyolojik yanıt eşiklerini merkeze almaktadır. Sonuç olarak, sınıflarda aydınlatma tasarımı; biyolojik hazırlık, psikolojik algı ve bilişsel davranışlar arasında aracılık eden mekânsal bir sistem olarak ele alınmalıdır. Statik standartlara dayalı homojen çözümler yerine; yönlenme, cephe oranı, kesit derinliği, gölgeleme stratejileri ve zamana bağlı ışık senaryolarını bütünleştiren İnsan Odaklı Aydınlatma yaklaşımları benimsenmelidir. Gün ışığının kontrollü biçimde iç mekâna taşınması ve yapma aydınlatma ile senkronize edilmesi, yalnızca akademik performansı değil, mekânsal deneyimin niteliğini ve öğrencilerin uzun vadeli sirkadiyen sağlığını da destekleyen temel bir tasarım meselesidir.

KAYNAKLAR

1. Refinetti, R. (2016). *Circadian physiology (3rd ed.)*. CRC Press.
2. Roenneberg, T., Kumar, C. J., & Mellow, M. (2007). The human circadian clock entrains to sun time. *Current Biology*, 17(2), R44–R45. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2006.12.011>
3. Bedrosian, T. A., & Nelson, R. J. (2017). Timing of light exposure affects mood and brain circuits. *Translational Psychiatry*, 7(1), e1017. <https://doi.org/10.1038/tp.2016.262>
4. Fishbein, A. B., Knutson, K. L., & Zee, P. C. (2021). Circadian disruption and human health. *The Journal of Clinical Investigation*, 131(19). <https://doi.org/10.1172/JCI148286>
5. International Commission on Illumination. (2024). *CIE Position Statement on Integrative Lighting Recommending Proper Light at the Proper Time (3rd ed.)*. CIE. DOI: 10.25039/PS.b2twa77g

6. Sánchez-Cano, A., Orduna-Hospital, E., Fernández-Espinosa, G., & Aporta, J. (2023). Method to calculate melanopic light reaching the retina depending on the optical density of an aging crystalline lens. *Applied Sciences*, 13(4), 2569. <https://doi.org/10.3390/app13042569>
7. Gradisar, M., Dohnt, H., Gardner, G., Paine, S., Starkey, K., Menne, A., Slater, A., Wright, H., Hudson, J., & Yamada, J. (2011). A randomized controlled trial of cognitive-behavior therapy plus bright light therapy for adolescent delayed sleep phase disorder. *Sleep*, 34(12), 1671–1680. <https://doi.org/10.5665/sleep.1432>
8. Carskadon MA, Wolfson AR, Acebo C, Tzischinsky O, Seifer R. (1998). Adolescent sleep patterns, circadian timing, and sleepiness at a transition to early school days. *Sleep*, 21(8), 71– 881.
9. Rea, M. S., Figueiro, M. G., Bullough, J. D., & Bierman, A. (2016). Light as a circadian stimulus for architectural lighting. *Lighting Research & Technology*, 50(4), 497–510. <https://doi.org/10.1177/1477153516682368>
10. Nagare, R., Plitnick, B., & Figueiro, M. G. (2020). Predictions of melatonin suppression during the early biological night and their implications for residential light exposures prior to sleeping. *Scientific Reports*, 10(1), 1–12. <https://doi.org/10.3390/en14206731>
11. CIE. (2018). CIE S 026/E:2018. *CIE System for Metrology of Optical Radiation for ipRGC-Influenced Responses to Light*. Vienna, Austria: CIE Central Bureau.
12. Cheshmeh Noor, M., Mehdizadeh Saradj, F., & Yazdanfar, S.-A. (2023). Analytical evolution of measurement methods for light's non-visual effects. *Building and Environment*, 238, 110531. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110531>
13. Xu, J., Gao, Y., & Wu, Y. (2025). The visual and non-visual effects of annual daylighting performance on middle school students: A longitudinal field survey of classrooms in Eastern China. *Energy and Buildings*, 331, 115364. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115364>
14. Konis, K. (2019). A circadian design assist tool to evaluate daylight access in buildings for human biological lighting needs. *Solar Energy*, 191, 449–458. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.09.072>
15. Konis, K. (2017). A novel circadian daylight metric for building design and evaluation. *Building and Environment*, 113, 22–38. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.025>
16. International WELL Building Institute. (2023). *WELL v2 pilot: Lighting concept – Part 1 Meet Lighting for Day-Active People (WELL Certification: 3 Pt | WELL Core: 4 Pt)*. International WELL Building Institute. <https://resources.wellcertified.com/tools/well-v2-pilot-scorecard/lighting/>
17. Brown, T. M., Brainard, G. C., Cajochen, C., et al. (2022). Recommendations for daytime, evening, and nighttime indoor light exposure to best support physiology, sleep, and wakefulness in healthy adults. *PLoS Biology*, 20, Article e3001551. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3001571>
18. Crowley, S. J., Cain, S. W., Burns, A. C., Acebo, C., & Carskadon, M. A. (2015). Increased sensitivity of the circadian system to light in early/mid-puberty. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, 100(11), 4067–4073. <https://doi.org/10.1210/jc.2015-2775>
19. Figueiro, M. G., Steverson, B., Heerwagen, J., Kampschroer, K., Gonzales, K., Plitnick, B., & Rea, M. (2017). The impact of daytime light exposures on sleep and mood in office workers. *Sleep Health*, 3(3), 204–215. <https://doi.org/10.1016/j.sleh.2017.03.005>
20. Collaborative for High Performance Schools. (2019). *CHPS core criteria 3.0*. <https://chps.net/core-criteria-3-0>

21. Acosta, I., Campano, M. Á., & Leslie, R. (2019). Daylighting design for healthy environments: Analysis of educational spaces for optimal circadian stimulus. *Solar Energy*, 193, 584–596. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.10.004>
22. Brown, T. M. (2020). Melanopic illuminance defines the magnitude of human circadian light responses under a wide range of conditions. *Journal of Pineal Research*, 69(1), e12655. <https://doi.org/10.1111/jpi.12655>
23. Spitschan, M., Lucas, R. J., Brown, T. M., & CIE TN 011:2020 Authors. (2022). What to measure? Mapping light measurements to human visual and non-visual responses. *Lighting Research & Technology*, 54(2), 153–177. <https://doi.org/10.1177/14771535211053610>
24. Miller, N. J., & Irvin, A. (2019). *M/P ratios – Can we agree on how to calculate them?* Illuminating Engineering Society. <https://www.ies.org/fires/mp-ratios-can-we-agree-on-how-to-calculate-them/>
25. Lucas, R. J., Peirson, S. N., Berson, D. M., Brown, T. M., Cooper, H. M., Czeisler, C. A., Figueiro, M. G., Gamlin, P. D., Lockley, S. W., O'Hagan, J. B., Price, L. L., Provencio, I., Skene, D. J., & Brainard, G. C. (2014). Measuring and using light in the melanopsin age. *Trends in neurosciences*, 37(1), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2013.10.004>
26. Hansen, E. K., Nielsen, S. M. L., Georgieva, D., & Schledermann, K. M. (2018). The impact of dynamic lighting in classrooms: A review on methods. *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering (LNICST)*, 479–489. Springer Verlag.
27. de Kort, Y. A. W., & Veitch, J. A. (2014). From blind spot into the spotlight: Introduction to the special issue 'Light, lighting, and human behaviour'. *Journal of Environmental Psychology*, 39, 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2014.06.005>
28. Barkmann, C., Wessolowski, N., & Schulte-Markwort, M. (2012). Applicability and efficacy of dynamic lighting in a school classroom. *Physiology & Behavior*, 105(3), 621–627. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2011.09.020>
29. Jung, H.-C., Kim, J.-H., & Lee, C.-W. (2017). The effect of the illuminance of light emitting diode (LED) lamps on long-term memory. *Displays*, 49, 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.displa.2017.05.001>
30. Schledermann, K., Pihlajaniemi, H., Sen, S., & Hansen, E. K. (2019). Dynamic lighting in classrooms: A new interactive tool for teaching. In A. Brooks, E. Brooks, & N. Vidakis (Eds.), *Interactivity, game creation, design, learning, and innovation* (pp. 487–498). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-06134-0_41
31. Siraji, M. A., Grant, L. K., Schaefer, A., Haque, S., Rahman, S. A., Lockley, S. W., & Kalavally, V. (2024). Effects of daytime exposure to short-wavelength-enriched white light on alertness and cognitive function among moderately sleep-restricted university students. *Building and Environment*, 252, 111245. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111245>
32. Gherasim, I., Gălăţanu, C. D., Bistriceanu, C. E., Țurcanu, F. E., Roşu, P. V., & Hudisteanu, V. S. (2025, June 4–6). The effect of artificial lighting spectrum on students' concentration [Conference paper]. *2025 Tenth Conference on Lighting (Lighting)*, Sozopol, Bulgaria. <https://doi.org/10.1109/Lighting64836.2025.11081790>
33. Keis, O., Helbig, H., Streb, J., & Hille, K. (2014). Influence of blue-enriched classroom lighting on students' cognitive performance. *Trends in Neuroscience and Education*, 3(3–4), 86–92. <https://doi.org/10.1016/j.tine.2014.09.001>
34. Choi, K., Shin, C., Kim, T., Chung, H. J., & Suk, H. J. (2019). Awakening effects of blue-enriched morning light exposure on university students' physiological and subjective responses. *Scientific Reports*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36791-5>
35. Govén, T., Laike, T., Raynham, P., & Sansal, E. (2011). Influence of ambient light on the performance, mood, endocrine systems and other factors of school children. *Sun City*.

36. Xu, J., Liu, M., & Xia, Z. (2023). Effects of environmental lighting on students' sleep, alertness and mood: A field study in a Chinese boarding school. *Lighting Research & Technology*, 56(2), 147–162. <https://doi.org/10.1177/14771535231165263>
37. Czeisler, C. A., Gabel, V., Sliney, D. H., & Duffy, J. F. (2021). Exposure to blue wavelength light is associated with increases in bidirectional amygdala–DLPFC connectivity at rest. *Frontiers in Neurology*, 12, 625443. <https://doi.org/10.3389/fneur.2021.625443>
38. Wang, M., Guo, N., Liu, Y., Fu, Y., & Zhou, X. (2025). Lighting effects on visual and cognitive adaptation in multimedia classrooms: A multimodal neurophysiological study. *Building and Environment*, 285(Part C), 113687. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.113687>
39. Author(s). (2026). Evaluating the melanopsin stimulus potential of classrooms under short-wavelength-enriched LED light. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 796, 1095–1108. https://doi.org/10.1007/978-3-032-14019-7_79
40. Higuchi, S., Lin, Y., Qiu, J., Zhang, Y., Ohashi, M., Lee, S. I., Kitamura, S., & Yasukouchi, A. (2021). Is the use of high correlated color temperature light at night related to delay of sleep timing in university students? A cross-country study in Japan and China. *Journal of Physiological Anthropology*, 40(7). <https://doi.org/10.1186/s40101-021-00257-x>
41. Martin, J. S., Gaudreault, M. M., Perron, M., & Laberge, L. (2016). Chronotype, light exposure, sleep, and daytime functioning in high school students attending morning or afternoon school shifts: An actigraphic study. *Journal of Biological Rhythms*, 31(2), 205–217. <https://doi.org/10.1177/0748730415625510>
42. Samiou, A. I., Doulos, L. T., & Zerefos, S. (2022). Daylighting and artificial lighting criteria that promote performance and optical comfort in preschool classrooms. *Energy and Buildings*, 258, 111819. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111819>

TOPLANMA AMAÇLI BİNALARDA PASİF YANGIN GÜVENLİĞİ STRATEJİLERİNİN MİMARİ TASARIM BAĞLAMINDA DEĞERLENDİRİLMESİ

Zuhal Özçetin¹

Merve Görkem²

Sebahat Gül İlisulu³

¹Uşak Üniversitesi Mimarlık Bölümü

²MEGO Danışmanlık Mimarlık Mühendislik İnş. San. ve Tic. Ltd. Şti.

³Başkent Üniversitesi Mimarlık Bölümü

ÖZET

Toplanma amaçlı binalar; yüksek kullanıcı yoğunluğu, değişken kullanıcı profili ve karmaşık mekânsal organizasyonları nedeniyle yangın güvenliği açısından en riskli yapı grupları arasında yer almaktadır. Bu yapılarda kullanıcıların kaçış düzenine aşına olmaması ve acil durumlarda artan algısal yük, can güvenliği riskini artıran temel unsurlardır. Mimari tasarım sürecinde alınan yapı formu, mekânsal organizasyon, yangın bölmeleri ve malzeme kararları gibi pasif yangın güvenliği önlemleri, yangının yayılımını sınırlandırmak ve güvenli tahliyeyi sağlamak açısından kritik bir rol üstlenmektedir. Bu çalışma kapsamında, toplanma amaçlı yapılarda pasif yangın güvenliği ilkeleri mimari tasarım perspektifiyle ele alınmaktadır. Literatürde öne çıkan kalabalık dinamikleri, tahliye stratejileri ve bina performansı gibi temel parametreler, güncel yönetmelikler ışığında değerlendirilmektedir. Çalışmanın uygulama aşamasında, seçilen bir örneklem yapı üzerinden mekânsal ve yapısal kararların yangın güvenliği açısından analizi gerçekleştirilmektedir. Analiz kapsamında özellikle çıkış verimliliği, yön bulmayı destekleyen mimari unsurlar ve yapısal elemanların yangın direnci gibi unsurların tahliye süreci üzerindeki etkisi irdelenmektedir. Elde edilen verilerle, pasif yangın güvenliğinin tasarım sürecindeki belirleyici rolünün ortaya konulması ve benzer nitelikteki kamu yapıları için bir değerlendirme çerçevesi sunulması amaçlanmaktadır.

Anahtar kelimeler: Pasif yangın güvenliği, Toplanma amaçlı binalar, Mimari tasarım, Tahliye stratejileri, Yangın yönetmeliği.

EVALUATION OF PASSIVE FIRE SAFETY STRATEGIES IN BUILDINGS INTENDED FOR ASSEMBLY PURPOSES WITHIN THE CONTEXT OF ARCHITECTURAL DESIGN

ABSTRACT

Buildings intended for assembly purposes are among the riskiest in terms of fire safety due to their high user density, variable user profiles and complex spatial organisation. Users' unfamiliarity with escape routes and the increased perceptual load during emergencies are key factors that increase the risk to life safety in these buildings. Passive fire safety measures such as building form, spatial organisation, fire compartments and materials selected during the architectural design process play a critical role in limiting fire spread and ensuring safe evacuation. This study examines passive fire safety principles in assembly buildings from an architectural design perspective. Prominent key parameters in the literature, such as crowd dynamics, evacuation strategies, and building performance, are evaluated in light of current regulations. During the application phase, the study analyses spatial and structural decisions from a fire safety perspective in a selected sample building. This analysis specifically examines how factors such as exit efficiency, architectural elements that support wayfinding and the fire resistance of structural elements impact the evacuation process. The aim is to reveal the decisive role of passive fire safety in the design process and to provide a framework for evaluating similar public buildings using the obtained data.

Keywords: Passive fire safety, Assembly buildings, Architectural design, Evacuation strategies, Fire regulations.

¹* Sorumlu yazar e-posta adresi: zuhal.ozcetin@usak.edu.tr

1. GİRİŞ

Toplanma amaçlı binalar; çok sayıda kullanıcının eş zamanlı olarak bulunduğu, kullanıcı profiline büyük ölçüde değişkenlik gösterdiği ve genellikle büyük ölçekli, karmaşık mekânsal organizasyonlara sahip yapı türleri arasında yer almaktadır. Konser salonları, tiyatrolar, sinema yapıları, kongre merkezleri, spor salonları ve benzeri kamusal yapılar bu kapsamda değerlendirilmektedir. Bu tür binalarda kullanıcı yoğunluğunun yüksek olması, kullanıcıların yapıya ve kaçış düzenine yeterince aşina olmaması ve etkinlik süresince algısal yükün artması, olası bir yangın durumunda can güvenliği riskini önemli ölçüde artırmaktadır.

Pasif yangın güvenliği; yapı formu, taşıyıcı sistem, mekânsal organizasyon, yangın bölmeleri, kaçış yolları, yapı malzemeleri ve duman kontrolüne yönelik mimari kararlar gibi, yangın anında sistemsel müdahaleye ihtiyaç duymadan işlevini sürdüren önlemleri kapsamaktadır. Bu önlemler, yangının çıkışının geciktirilmesi, yayılımının sınırlandırılması ve kullanıcıların güvenli tahliyesinin sağlanması açısından kritik bir rol üstlenmektedir. Özellikle toplanma amaçlı binalarda pasif yangın güvenliği stratejilerinin etkinliği, can kaybı riskinin azaltılmasında belirleyici olmaktadır.

Bu bildiri kapsamında; toplanma amaçlı binalarda pasif yangın güvenliği ilkeleri mimari tasarım bağlamında ele alınmakta; ilgili yönetmelikler ve literatür ışığında değerlendirilmekte ve seçilen bir örneklem yapı üzerinden mekânsal, yapısal ve malzeme kararlarının yangın güvenliği açısından analizi yapılmaktadır. Çalışmanın amacı, pasif yangın güvenliğinin mimari tasarım sürecindeki belirleyici rolünü ortaya koymak ve benzer yapı türleri için yol gösterici bir değerlendirme çerçevesi sunmaktır.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Toplanma amaçlı yapılar, yangın güvenliği açısından sıradan yapı türleri olarak değerlendirilemez. Bu yapılar, yönetmeliğimizde “Toplanma Amaçlı Binalar” sınıfında yer almakta olup, bu özel sınıflandırmanın arkasında önemli gerekçeler bulunmaktadır. Yüksek kullanıcı yoğunluğu, kullanıcı profiline sürekli değişkenlik göstermesi ve eş zamanlı kullanımın yaygın olması, bu yapı türlerinde yangın güvenliği risklerini belirgin ölçüde artırmaktadır.

Toplanma amaçlı yapılar (tiyatrolar, stadyumlar, konser salonları ve eğitim binaları gibi), yüksek kişi yoğunluğu ve karmaşık mekânsal düzenlemeleri nedeniyle yangın güvenliği açısından en riskli yapı gruplarından biridir (Jing ve ark., 2025; Cotfas ve ark., 2022). Bu binalarda güvenliğin sağlanması, sadece pasif yapısal önlemlere değil, aynı zamanda insan davranışı, kullanıcı profiline sürekli değişkenlik göstermesi, kalabalık dinamikleri ve bina performansının iç içe geçtiği çok boyutlu bir etkileşim sürecine dayanmaktadır (Li ve ark., 2022). Geçmişte yaşanan kulüp ve tiyatro yangınları gibi trajik olaylar, etkili bir tahliye organizasyonu yapılamadığında kitlesel can kayıplarının kaçınılmaz olduğunu göstermiştir. Toplanma amaçlı yapıların yangın güvenliğinde öne çıkan temel unsurları şunlardır:

- **Tahliye Stratejileri:** Kalabalıklar, acil durumlarda hem fiziksel hareket engelleri hem de görsel engeller oluşturabilen dinamik bir unsurdur (Li ve ark., 2022). Tahliye süreci, görevli rehberliğinde yürütülen düzenli kuyruk oluşturma stratejisi veya panik kaynaklı düzensiz kaçış

şeklinde gerçekleşebilir (Feng ve ark., 2026). Araştırmalar, durum hakkındaki bilgisizliğin veya algılanan yangının şiddetinin (alev yoğunluğu gibi) panik seviyesini artırarak tahliye belirsizleştirdiğini ortaya koymaktadır (Deng ve ark., 2022).

Kalabalık ortamlarda panik, çoğu zaman yangının kendisinden daha hızlı yayılmaktadır. Binlerce insanın eş zamanlı olarak tahliye edilmesi gerektiği anlarda, insan psikolojisi devreye girmekte ve bireyler çoğu zaman rasyonel karar verme yetisini kaybetmektedir. İtme, sıkışma ve düşünmeden çıkışlara yönelme gibi davranışlar ortaya çıkmakta bu durum, yangının doğrudan etkisinden ziyade izdiham ve ezilme sonucu can kayıplarına neden olmaktadır.

Toplanma amaçlı yapıların tahliyesi, karmaşık bir süreçtir. Bu yapılar çoğu büyük alanlara yayılmaktadır. Bu ölçek, iki temel sorunu beraberinde getirmektedir. İlk olarak, yapı genelindeki tüm kullanıcıların aynı anda bilgilendirilmesi önemli bir zorluktur. Yüksek çevresel gürültü seviyelerine sahip konser veya fuar ortamlarında geleneksel yangın alarmları yetersiz kalabilmektedir. Bu nedenle çağdaş yapılarda; sesli uyarılar, görsel flaşlar, dijital ekranlar ve hatta kayıtlı katılımcılara gönderilen kısa mesajlar gibi çoklu kitle bilgilendirme sistemleri kullanılmaktadır. Ayrıca eğitimli personelin birebir yönlendirme yapması da tahliye sürecinin etkinliğini artırmaktadır. İkinci temel sorun, çıkış altyapısının yeterliliğidir. Yangın yönetmelikleri, kaçış yollarının kullanıcı yükünü karşılayabilecek kapasitede olmasını şart koşmaktadır. Yalnızca yeterli sayıda çıkış kapısına sahip olmak değil, bu kapıların ve koridorların yeterli genişlikte olması ve daralma oluşturmaması da kritik öneme sahiptir (URL 1).

- **Mekânsal Tasarım ve Çıkış Tasarımları:** Kapılar ve çıkış rotaları tahliye sırasında temel problemleri oluşturur (Feng ve ark., 2026). Çıkış sayısı, genişliği ve yerleşimi tahliye süresini doğrudan etkilese de, çıkış sayısını artırmanın her zaman verimliliği aynı oranda artırmadığı, bir noktadan sonra azalan verimler ilkesinin devreye girdiği gözlemlenmiştir (Brunnberg, 2021).

Bu tür yapılarda kullanıcıların büyük bir bölümü, yapıyı düzenli olarak kullanan kişiler değil, geçici ziyaretçilerdir. Ziyaretçiler kaçış yollarını bilmemekte, tatbikatlara katılmamış olmakta ve çoğunlukla yalnızca girdikleri ana kapıyı çıkış olarak algılamaktadır. Araştırmalar, acil durumlarda insanların çoğunlukla girişte kullandıkları yolu çıkış olarak tercih etme eğiliminde olduğunu göstermektedir. Bu durum, ana girişlerde aşırı yoğunluğa yol açarken, diğer acil çıkışların kullanılmamasına neden olabilmektedir. Bu sorunun önüne geçmek için acil çıkışların görünürlüğünün artırılması, aydınlatmalı yönlendirme levhaları, basit plan şemaları ve mekânsal yön bulmayı destekleyen grafik unsurların kullanılması önerilmektedir (URL 1).

Tahliye işlemi, kullanıcıların yapıdan çıkmasıyla sona ermemektedir. Büyük ölçekli yapılarda, bina dışında güvenli toplanma alanlarının tanımlanması ve kullanıcıların bu alanlara yönlendirilmesi gerekmektedir. Ancak ziyaretçilerin bu alanlara da yabancı olması, süreci zorlaştırmaktadır. Etkili bir acil durum planı; açık yönlendirme işaretleri, eğitimli personel ve yerel acil durum ekipleriyle koordinasyonu içermelidir (URL 1).

Bu tür yapılarda, atmosferin bir parçası olan düşük aydınlatma düzeyi, yangın anında ciddi bir dezavantaja dönüşmektedir. Görüş mesafesinin sınırlı olması, yön bulmayı zorlaştırmakta ve panik riskini artırmaktadır. Bu durum, “yönelim kaybı” olarak tanımlanmakta ve karar verme süreçlerini olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle yangın güvenliği tasarımlarında; acil durum aydınlatma sistemleri, fotoluminesan (karanlıkta parlayan) yönlendirme elemanları ve enerjiye bağımlı

olmayan çıkış işaretleri kullanılmaktadır (URL 1). Bu yapılarda, kaçış yolları boyunca zemin seviyesinde aydınlatma sistemleri kullanılmaktadır. Bu düşük seviyeli yönlendirme, kullanıcıların dumanın etkisinden kaçınmak için eğilerek ilerlemek zorunda kaldıkları durumlarda dahi yönlerini bulmalarına yardımcı olmakta; aynı zamanda kalabalık yoğunluğunun arttığı koşullarda bile görünürlüğünü korumaktadır (URL 1).

- **Bina Performansı:** Karmaşık ve yüksek hacimli yapılarda tahliye süresi, binanın yapısal bütünlüğünü koruma ve duman bölümlendirme (kompartıman) kapasitesiyle doğrudan ilişkilidir. Yapısal elemanların yangına direnci, tahliye tamamlanana kadar binanın ayakta kalmasını ve kaçış yollarının duman ve ısıdan korunmasını sağlamaktadır (Cowland ve ark., 2013).

Sonuç olarak, toplanma amaçlı yapılarda yangın güvenliği; yangının duman, ısı, toksik gazlar etkilerinin, insan algısı ve hareket kabiliyeti üzerindeki bozucu etkilerini en aza indirecek bütünlük bir strateji gerektirmektedir (Alvarez ve ark., 2014).

3. PASİF YANGIN GÜVENLİĞİ ELEMANLARI VE FONKSİYONEL KARŞILAŞTIRMA

Pasif yangın güvenliği, bir yangın başladığında mekanik veya elektronik bir müdahale (yağmurlama sistemi, alarm vb.) gerektirmeksizin, binanın mimari yapısı ve malzeme özellikleri sayesinde yangının yayılmasını sınırlayan sistemler bütünü olarak tanımlanabilir. Bu kapsamda; pasif yangın güvenliği elemanlarının fonksiyonel analizi Çizelge 1’de sunulmuştur.

Çizelge 1. Pasif yangın güvenliği elemanlarının fonksiyonel karşılaştırılması [BYKHY 2021]

Parametre	Temel Fonksiyonu	Mimari Tasarımdaki Rolü	Kritik Teknik Kriter
Yangın Kompartımanlar	Yangını ve dumanı belirli bir hacme hapsedmek.	Binayı dikey ve yatayda yangın hücrelerine bölerek yayılımı durdurmak.	Bölücü duvarların yangın dayanım süresi (EI 60, 90, 120 dk).
Yangın Kapıları	Kaçış koridorlarını ve merdivenlerini izole etmek.	Tahliye yollarını duman ve ısıdan arındırılmış güvenli bölgeler haline getirmek.	Kendiliğinden kapanma düzeneği ve duman sızdırmazlık contaları.
Yapısal Koruma	Taşıyıcı sistemin çökmesini engellemek.	Binanın tahliye ve itfaiye müdahalesi süresince ayakta kalmasını sağlamak.	Çelik veya betonarme elemanların kritik sıcaklığa ulaşma süresinin uzatılması.
Yangın Durdurucular (Fire-stops)	Tesisat boşluklarından sızıntıyı önlemek.	Boru ve kablo geçişlerindeki "baca etkisini" (smoke-stack effect) ortadan kaldırmak.	Malzemenin yangın anında genişerek boşluğu tam sızdırmaz hale getirmesi.
Yapısal Direnç	Taşıyıcı sistemin (R) yangın dayanım süresi. Taşıyıcı sistemin (betonarme/çelik) yangın anında bütünlüğünü koruması.	Binanın tahliye ve müdahale süresince çökmesini engelleyerek, "can güvenliği" alanı oluşturmak.	Tahliye tamamlanana kadar binanın ayakta kalmasını sağlar. R (Resistance) değeri: Taşıyıcının yangına dayanım süresi (R60, R90, R120).
Duman Bölümlendirme	Kompartıman oluşturma ve duman perdeleri. Dumanın ve zehirli gazların dikey/yatay yayılımını sınırlamak.	Görüş mesafesini korumak ve dumanın kaçış yollarına sızmasını engelleyerek zehirlenmeleri önlemek.	Zehirli gazların ve dumanın kaçış yollarına sızmasını engeller. S (Smoke) sızdırmazlık sınıfı ve yangın durdurucu (fire-stop) detaylar.

Çizelge 1 (devam). Pasif yangın güvenliği elemanlarının fonksiyonel karşılaştırılması [BYKHY 2021] (devam)

Parametre	Temel Fonksiyonu	Mimari Tasarımdaki Rolü	Kritik Teknik Kriter
Kaçış Yolu Genişliği	Kullanıcı yükü bazlı kapasite hesabı. Kullanıcı yükünün güvenli ve tıkanıklık olmadan tahliyesini sağlamak.	Mimari sirkülasyon alanlarının (kaçış merdiveni, koridor ve kapı) tahliye debisini yönetmek.	Daralma (bottleneck) oluşumunu ve izdihamı önler. Kullanıcı yükü hesabı (Birim genişlik için kişi sayısı; kaçış merdivenlerinde 60, dış çıkış kapısında 100, diğer kapılarda ise 80).
Malzeme Kararı	Yanıcılık sınıfı (A1, A2 vb.) Yangın yükünü azaltmak ve alev ilerleme hızını kontrol etmek.	İç mekanın (akustik panel, zemin) yangını beslemesini önlemek ve duman yoğunluğunu düşürmek.	Yangının başlangıç aşamasında yayılım hızını kontrol eder. A1/B yanıcılık ve s1 (düşük duman), d0 (damlamasız) sınıfları.

Pasif güvenlik elemanlarının birincil fonksiyonu yangını söndürmek değil, binanın çökmesini engelleyerek, tahliye için gereken "altın süreyi" oluşturmaktır. Çizelge 1’de belirtilen yapısal koruma elemanları, taşıyıcı sistemin ısıl genişlemesini geciktirerek mimari formun yangın anındaki statik güvenliğini sağlamaktadır.

Toplanma amaçlı binalarda can kayıplarının büyük çoğunluğu alevlerden ziyade duman zehirlenmesi ve kaçış anındaki ezilmelerden kaynaklanmaktadır. Bu noktada, yangın durdurucular ve yüzey kaplamalarının fonksiyonel başarısı, dumanın kompartıman dışına sızmasını engelleyerek, kaçış yollarındaki görüş mesafesinin korunmasını sağlar. Özellikle akustik panellerin duman üretim sınıfı (s1 düzeyi), tahliye rotalarının izlenebilirliği açısından kritik önem taşımaktadır.

Yangın kapıları ve kompartıman duvarları, binanın geri kalanı yangın etkisi altındayken bile kaçış yollarının güvenli birer alan gibi çalışmasını sağlar. Fonksiyonel açıdan bu elemanlar, mekanik bir müdahaleye gerek duymaksızın sadece fiziksel varlıklarıyla yangın yayılımını durduran pasif bariyerler olarak görev yapmaktadırlar.

Kongre merkezindeki geniş açıklıklı çatılar ve salon hacmi, yangın anında yüksek ısıya maruz kalmaktadır. Yapısal direnç, bu büyük hacmin kullanıcıların üzerine çökmesini engelleyen en temel pasif savunma alanıdır. İntümesan boyalar veya yangın korunumlu sıvalar bu direncin mimari araçları olarak belirtilebilir.

Büyük fuaye boşluklarında dumanın kontrol altına alınması zorlaşmaktadır. Fonksiyonel olarak duman bölümlendirme; yangın perdeleri ve sızdırmaz kapılar aracılığıyla duman yangın hücreinde tutulur. Bu, özellikle akustik konfor için kullanılan asma tavan boşluklarında önem taşımaktadır. Kaçış yolu genişliği parametresi; mekânın geometrisi ve kullanıcı yükü ile ilişkilidir. Salon çıkışlarındaki kapı genişlikleri ve koridorların daralmadan devam etmesi, panik anındaki akışkanlığı sağlamaktadır. Fonksiyonu, mekanik bir sistemden ziyade mekânsal organizasyon ile tahliyeyi hızlandırmaktır.

Malzeme seçimi, yangının pasif kontrolü denilebilir. Salonun akustik kalitesini sağlayan ahşap panellerin "en az zor alevlenici" nitelikte seçilmesi, birincil tutuşma sonrası yangının büyüme hızını belirler.

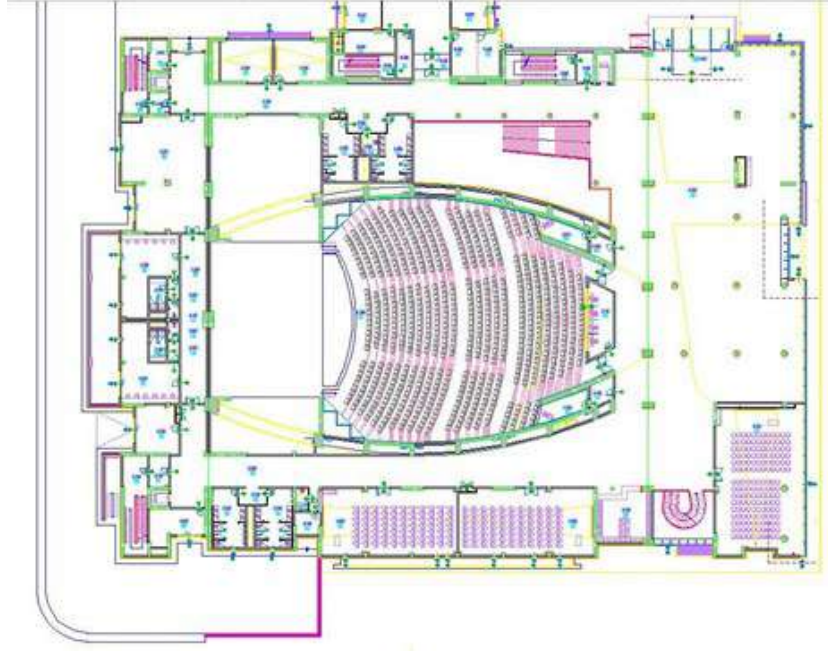
Çizelge 2. Pasif Yangın Güvenliği ile İlgili Teknik Standartlar

Analiz Parametresi	İlgili Standart (TS / EN / ISO)	Standart İçeriği ve Tanımı
Yapısal Direnç	TS EN 13501-2-2016 TS EN 1364-1-2015 TS EN 1364-2-2018	Yapı elemanlarının (duvar, döşeme, giriş) yangına dayanım sürelerinin (R, E, I değerleri) sınıflandırılması.
Malzeme Kararı	TS EN 13501-1-2019	Yapı malzemelerinin yangın karşısındaki tepki performansı (A1, A2, B, C, D sınıfları).
Duman Bölümlendirme	TS EN 12101-1-2006 TS EN 12101-8-2011	Duman ve ısı kontrol sistemleri ile duman perdelerinin performans kriterleri.
Kaçış Yolu Genişliği	TS ISO 23601-2022 TS ISO 3864-1-2016	Tahliye planlarının tasarımı ve kaçış yollarındaki işaretleme standartları.
Duman Sızdırmazlık	TS EN 1634-3-2013 TS EN 16034-2014	Kapı ve kapak takımlarının duman kontrol deneyleri

Değerlendirmesi yapılan Kongre ve Kültür Merkezi, kültürel etkinliklere ev sahipliği yapmaktadır. Hareketli platformlu orkestra çukuru sahne opera, bale, konser, tiyatro, kongre gibi etkinliklere imkân sağlayan 1000 kişilik kongre merkezi, iki bodrum kat da dâhil olmak üzere dört katlıdır. Kongre merkezi; 1 teknik oda, 6 toplantı odası, 1 senato odası, 4 adet kulis ve 1 büyük konferans salonu ve fuaye alanından oluşmaktadır (Şekil 1 ve Şekil 2).



Şekil 1. Kongre ve Kültür Merkezi büyük salonu yerleşim planı



Şekil 2. Kongre ve Kültür Merkezi büyük salonu zemin kat planı



Şekil 3. Kongre ve Kültür Merkezi kesiti

Çizelge 3. Pasif yangın güvenliği stratejileri değerlendirme tablosu

Mimari Tasarım Parametresi	İnceleme Kriteri (BYKHY Kapsamında)	Kongre ve Kültür Merkezi Özelinde Gözlem / Analiz Alanı
Kaçış Yolu Mesafesi	Toplanma amaçlı binalarda; yağmurlama sistemi olmadığı durumda tek yönde kaçış (15 m) ve iki yönde kaçış (45 m) sınırları. Yağmurlama sistemi olduğu durumda; tek yönde kaçış (25 m) ve iki yönde kaçış (60 m) sınırları.	Ana salonun en uzak noktasından en yakın kaçış merdiveni veya çıkışa olan yürüme mesafesinin ölçümü.
Kullanıcı Yüğü Analizi	Metrekare başına düşen kişi sayısı (0.5 - 1.5 m ² /kişi) veya belirtilen kişi sayısı esas alınır.	1000 kişilik ana salon ve fuaye alanındaki eş zamanlı yoğunluk kapasitesi.

Çizelge 3 (devam). Pasif yangın güvenliği stratejileri değerlendirme tablosu

Mimari Tasarım Parametresi	İnceleme Kriteri (BYKHY Kapsamında)	Kongre ve Kültür Merkezi Özelinde Gözlem / Analiz Alanı
Yangın Kompartımanları	Alan büyüklüğüne ve farklı işlevlere göre yatay ve dikey bölmeleme. Toplanma amaçlı binalarda; en fazla kompartıman alanı 6000 m ² , eğer binalarda uygun yangın kontrol sistemleri yapılmış ise kompartıman alanı sınırsızdır.	Sahne arkası, teknik hacimler ve mutfak gibi riskli alanların ana salondan ayrımı.
Çıkış Genişliği ve Sayısı	Toplam kullanıcı sayısına göre gereken net çıkış genişliği. Çıkış genişliği için, çıkış kapıları, kaçış merdivenleri, koridorlar ve diğer kaçış yollarının kapasiteleri 50 cm'lik genişlik birim alınarak hesaplanır. (Birim genişlik için kişi sayısı kaçış merdivenlerinde 60, dış çıkış kapısında 100, diğer kapılarda ise 80).	Kaçış merdivenleri, kaçış yolu ve tahliye kapılarının sayısı ve toplam genişliğinin yeterliliği.
Malzeme Yanıcılık Sınıfı	İç kaplama (akustik paneller, halılar) ve taşıyıcı sistemin yangın direnci.	Ana salondaki akustik ahşap panellerin ve koltuk döşemelerinin yanıcılık sınıfı (en az zor alevlenici A2, B, C – s3, d2 vb.).
Yönlendirme ve Aydınlatma	Elektrik kesintisinde devreye giren acil çıkış yönlendirmeleri.	Fuaye ve koridorlardaki işaretlerin ve acil aydınlatma kitlerinin yerleşimi.

Çizelge 4. Kaçış yolu ve tahliye analizi (BYKHY 2021 Kriterleri)

Kaçış Bileşeni	Mevcut Durum	Yönetmelik Şartı	Değerlendirme/ Uygunluk
En Uzak Kaçış Mesafesi	~ bodrum kat 53 m,	≤ 60 metre	Uygun
	~ zemin kat 46 m,		Uygun
	~ balkon 85 m.		Uygun değil
Toplam Çıkış Genişliği	Salon kapıları için; 8 m ana salon, 4 m balkon	Salon kapıları için; Ana salon: 1000x0.5/80=6.25 m Balkon: 173x0.5/80=1.08 m	Uygun
	Kaçış merdivenleri için; 4.1 m	Kaçış merdivenleri için; En yoğun kattaki kullanıcı sayısı 500 ile 1000 kişi arasında olduğu için kaçış merdivenleri genişliklerinin en az 150 cm olması gerekmektedir. Projede 2 adet 130 cm, 1 adet 150 cm'lik kaçış merdiveni düzenlenmiştir.	Uygun Değil
	Kaçış merdiveni kapıları için; 3 m	Kaçış merdiveni kapıları için; en yoğun 1. kat için 765x0.5/80=4.78 m	Uygun Değil
Kapı Açılış Yönü	Dışarıya (Kaçış yönüne)	Dışarıya açılmalı	Uygun
Panik Bar Varlığı	Kaçış merdiveni kapılarında	Zorunlu	Uygun
	Ana salon kapılarında	Zorunlu (100+ kişi için)	Uygun değil
Bir Sıra İçindeki Koltuk Sayısı	Çıkış yolu iki yanda olan en fazla koltuk sayısı 26 koltuk –sıra genişliği 450 mm	Çıkış yolu iki yanda; 24 koltuk-sıra genişliği 425-449 mm 26 koltuk-sıra genişliği 450-474 mm 28 koltuk-sıra genişliği 475-499 mm	Uygun
Not: Toplam kullanıcı sayısı 50 ila 500 kişi arasında ise kattaki bir kaçış yolunun genişliği 100 cm'den, 501 ila 2000 kişi arasında ise kattaki bir kaçış yolunun genişliği 150 cm'den, 2001 ve daha fazla ise kattaki bir kaçış yolunun genişliği 200 cm'den az olmayacak şekilde çıkış sayısı bulunur.			

Kongre ve Kültür Merkezi'nin acil durum aydınlatması ve genel erişilebilirlik rampaları açısından yönetmelik şartlarını sağladığı söylenebilir. Ancak, özellikle akustik konforun ön planda olduğu salon içindeki kaplama malzemelerinin (ahşap panel ve kumaş) yangıcılık sertifikalarının güncelliği kritik bir nokta olarak belirlenmiştir. Ayrıca, evrensel tasarım ilkeleri doğrultusunda, engelli bireylerin yangın anında güvenle bekleyebileceği "güvenli bölge" (refuge areas) işaretlemelerinin ve düzenlemelerinin yapılması binanın pasif güvenlik performansını artıracaktır.

4. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Çalışma kapsamında oluşturulan analizler; Kongre ve Kültür Merkezi'nin pasif yangın güvenliği performansını hem mevzuat (BYKHY) hem de mimari tasarım kriterleri açısından değerlendirmektedir.

Yapılan analiz sonucunda; Kongre ve Kültür Merkezi'nin mimari formunun merkezi ve simetrik yapısı, yangın güvenliği açısından bir avantaj teşkil etmektedir. Özellikle fuaye alanının galeri boşluklu yapısı, yangın anında dumanın yükselerek üst kata ulaşmasına sebep olacağından, duman tahliyesi önemli olmaktadır.

Çizelge 4'te görüldüğü üzere, yapının simetrik plan şeması ve amfi düzenindeki kaçış rotaları, tahliye süresini minimize eden bir faktördür. Yapılan incelemelerde; en uzak kaçış mesafesinin ~85 m olarak tespit edilmesi, mevcut yönetmeliğın izin verdiğı üst sınır olan 60 metrenin üzerinde kaldığını göstermektedir. Bu durum, tahliye anında kullanıcıların duman ve ısıya maruz kalma süresini artıracak kritik bir mimari parametredir. Söz konusu mesafenin tahliye güvenliği üzerindeki olumsuz etkisini en aza indirmek için; mekânsal verimliliğı artıracak ek kaçış merdivenleri veya kaçış mesafesini azaltacak yangın korunumlu koridorlar düzenlenmesi önerilebilir.

Malzeme analizine yönelik veriler, binanın bir kongre merkezi olması sebebiyle en önemli tartışma alanını oluşturmaktadır. Akustik panellerin ve i  mekân kaplamalarının yangıcılık sınıfları, pasif güvenliğın sadece "kaçış yolları" ile sınırlı olmadığını, aynı zamanda "yangın yükü yönetimi" ile doğrudan ilişkili olduğı görülmektedir. Salon içindeki akustik yalıtımın, B,s1, d0 gibi duman oluşumu düşük ve damlama yapmayan sınıfta seçilmiş olması, tahliye anında görüş mesafesinin korunması açısından önemli bir tasarım kararı olmaktadır.

Çizelge 3'te belirtilen kompartıman stratejisi, yapının yüksek riskli alanlarını (sahne arkası, teknik odalar) ana kullanıcı hacimlerinden izole etmektedir. Bu pasif önlem, aktif söndürme sistemleri devreye girene kadar yangının belirli bir hacimde hapsedilmesini öngörmektedir.

KAYNAKLAR

1. Binaların Yangından Korunması Hakkındaki Yönetmelik (BYKHY), (2021). Resmi Gazete, Sayı 7401.
2. Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik Kılavuzu, (2024). Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Mesleki Hizmetler Genel Müdürlüğü.
3. Alvarez, A., Meacham, B. J., Dembsey, N. A., & Thomas, J. R. (2013). "20 Years of Performance-Based Fire Protection Design: Challenges Faced and a Look Ahead". *Journal of Fire Protection Engineering* *Journal of Fire Protection Engineering*, 23(4), DOI: 10.1177/1042391513484911.
4. Brunnberg, K. (2021). "The Diminishing Returns of Adding Exits in Crowd Evacuation Simulations". KTH Royal Institute of Technology". School of Electrical Engineering and Computer Science, Stockholm, İsveç.
5. Cotfas, L.-A., Delcea, C., Iancu, L.-D., Ioanăș, C., & Ponsiglione, C. (2022). "Large Event Halls Evacuation Using an Agent-Based Modeling Approach". *IEEE Access*, 10(1):1-1.
6. Cowlard, A., Bittern, A., Abecassis-Empis, C., & Torero, J. (2013). "Fire safety design for tall buildings". *Procedia Engineering*, 62, ss. 169–181.
7. Deng, K., Li, M., Wang, G., Hu, X., Zhang, Y., Zheng, H., Tian, K., & Chen, T. (2022). "Experimental Study on Panic during Simulated Fire Evacuation Using Psycho- and Physiological Metrics". *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(11), 6905; <https://doi.org/10.3390/ijerph19116905>.
8. Feng, Y., Wang, Y., Zhou, Y., Liu, M., Xuan, C., Zhao, X., Feng, J., Yu, T., & Jia, X. (2026). "Impact of classroom exit design on evacuation efficiency of children in kindergarten under orderly evacuation scenarios". *Results in Engineering*, 29, 108572.
9. Jing, M., Zhang, G., Guo, S., & Wang, C. (2025). "Simulation method for fire evacuation safety of teaching buildings in colleges and universities". *Results in Engineering*, 25, 104512.
10. Li, B., Fitzgerald, J., & Schultz, C. (2022). "Modelling the impacts of crowds on occupants in the built environment—A static, rule-based approach to human perception and movement". *Advanced Engineering Informatics*, 51, 101452.
10. URL 1. <https://fsm.how/fire-safety/fire-life-safety-recreational-convention-centers/>

DİNAMİK CEPHE ELEMANLARININ TÜRKİYE’NİN FARKLI GÜNEŞİĞİ KOŞULLARINA SAHİP İLLERİ İÇİN YETERLİ GÜNEŞİĞİNİN SAĞLANMASI VE KAMAŞMA OLASILIĞI AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

Nurbanu DÜZGÜN ATALAY^{1*}

Şensin AYDIN YAĞMUR²

^{1,2} YTÜ, Mimarlık Fakültesi

Yıldız Kampüsü, D Blok, Beşiktaş, İstanbul, 34349

ÖZET

Güneşliğin iç mekân aydınlatmasında etkin bir şekilde kullanılması hem enerji verimliliğini artırmakta hem de kullanıcı konforunu olumlu yönde etkilemektedir. Bu çalışmada, Türkiye'nin farklı çevresel koşullarına sahip bölgelerinde, dinamik camlardan elektrokromik camlar (EC camlar) ve dinamik (hareketli) gölgeleme sistemlerinin bina aydınlatma performansına etkisi ve bu sistemlerin enerji tasarrufu açısından sağlayabileceği katkılar incelenmiştir. Çalışma kapsamında Türkiye'nin değişen güneşliği koşullarını temsil eden farklı medyan dış global aydınlık düzeyine (Ev,g,med) sahip çeşitli illeri seçilmiştir. Seçilen iller için tek cephesinde pencere açıklığına sahip referans bir ofis modeli kullanılmıştır. Güneşliğine bağlı yapay aydınlatma yükleri (kWh/m²) Design Builder yazılımı ile; mekânsal kamaşma kontrolü değerleri ise sDG metriği üzerinden Rhino/Grasshopper ortamında Honeybee eklentisiyle simüle edilmiştir. Bu kapsamda hem dinamik camlar hem de hareketli gölgeleme sistemleri farklı senaryolar için gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın bulguları, Türkiye'nin farklı bölgeleri için uygulanabilir bina cephe stratejileri geliştirmek isteyen tasarımcılara yol gösterici veriler sunmaktadır.

Anahtar kelimeler: Güneşliği, Dinamik Camlar, Gölgeleme Sistemleri, Enerji Etkin Tasarım.

EVALUATION OF ARTIFICIAL LIGHTING AND GLARE PROBABILITY OF DYNAMIC FAÇADE ELEMENTS IN CITIES WITH DIFFERENT DAYLIGHT CONDITIONS IN TÜRKİYE

ABSTRACT

Daylight plays a critical role in enhancing energy efficiency and improving occupant comfort when effectively utilized in indoor lighting design. This study investigates the impact of dynamic glazing systems, specifically electrochromic (EC) glazing, and dynamic shading systems on building lighting performance, as well as their potential contributions to energy savings across regions of Türkiye characterized by diverse environmental conditions. Within the scope of the study, several cities representing different median exterior global illuminance levels (Ev,g,med) were selected to reflect the varying daylight conditions across Türkiye. For the selected locations, a reference office model with a single façade opening was used. Daylight-linked artificial lighting energy consumption (kWh/m²) was simulated using DesignBuilder software, while spatial glare control performance was evaluated using the sDG metric through the Honeybee plugin within the Rhino/Grasshopper environment. In this context, both dynamic glazing systems and movable shading systems were analyzed under multiple scenarios. The findings of this study provide guiding data for designers who aim to develop applicable building façade strategies for different regions of Türkiye.

Keywords: Daylighting, Dynamic Glazing, Shading Systems, Energy Efficient Design.

^{1*}Sorumlu yazar e-posta adresi: nurbanu.duzgun@std.yildiz.edu.tr

1. GİRİŞ

Günişığı, yapay aydınlatma enerjisi tüketiminin azaltılması ve iç mekânda görsel konforun sağlanması açısından doğal bir kaynaktır. Ancak günişığının kontrolsüz kullanımı, özellikle cephede yüksek pencere açıklık oranlarına sahip ofis yapılarında kamaşma ve yüksek ışıklılık kontrastları ile kullanıcı memnuniyetinde azalma sorunlarına yol açabilmektedir. Bu nedenle günişığının etkin kullanımını destekleyen ve aynı zamanda görsel konfor koşullarını dengeleyen dinamik cephe sistemleri giderek daha fazla önem kazanmaktadır [1], [2], [3].

Elektrokromik (EC) camlar dış koşullara göre görünür ışık geçirgenliğini değiştirebilme özelliği sayesinde günişığını doğrudan kontrol edebilmekte ve günişığı kaynaklı rahatsız edici kamaşmayı azaltma potansiyeli sunmaktadır. EC camların farklı kontrol stratejileri altında enerji ve görsel konfor performansını inceleyen çalışmalar, özellikle yüksek güneş ışınlıma koşullarında önemli enerji tasarrufu sağlanabildiğini, ancak kontrol seçiminin kullanıcı konforu açısından belirleyici olduğunu göstermektedir [4], [5], [6]. Benzer şekilde dinamik (hareketli) gölgeleme sistemleri (jaluzi, stor perde vb.) doğrudan günişığını sınırlandırarak kamaşmayı azaltmakta ve iç mekandaki ışıklılık karşıtlıklarını düzenlemektedir. Gölgeleme sistemlerinin optik özellikleri ve çalışma stratejilerinin, enerji performansı ve kamaşma riski üzerinde belirgin etkiler yarattığı literatürde sıklıkla vurgulanmaktadır [7], [8].

Günişığına bağlı yapay aydınlatma kontrol sistemleri, iç mekân aydınlık düzeyini hedef değerlerde tutarken yapay aydınlatma gücünü kademeli olarak azaltarak (continuous dimming) yıllık elektrik enerjisi tüketimini düşürmektedir. Literatürde yapılan çalışmalar, bu sistemin ofis binalarında aydınlatma için kullanılan yıllık enerji tüketimini ciddi oranlarda azaltabildiğini ve bu etkinin binanın konumu, pencere açıklık oranı ve cephe kontrol stratejilerine bağlı olarak önemli ölçüde değiştiğini göstermektedir [9], [10]. Dinamik cephe elemanlarının kullanıldığı durumlarda ise görünür ışınlım geçirgenliğinin değişimi kullanılan enerjiyi azaltabildiği ancak aynı zamanda iç mekandaki aydınlığın yetersizliği sebebiyle bu enerji kazanımlarının sınırlanabildiği görülmektedir [11].

Günişığı ile oluşan kamaşmanın değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılan Günişığı Kamaşma Olasılığı (DGP, Daylight Glare Probability), kamaşma riskini nicel olarak değerlendirmeye olanak sağlayan bir metriktir. Bununla birlikte, tekil bakış noktalarına dayalı değerlendirmeler yerine, mekân genelindeki kamaşma dağılımını temsil edebilen, Mekânsal Rahatsız Edici Kamaşma (sDG, Spatial Disturbing Glare) gibi mekânsal yaklaşımlar da son yıllarda araştırma konusu haline gelmiştir [13]. Bu yaklaşımlar, ofis gibi çok kullanıcıli mekânlarda, kamaşma riskinin mekânsal yayılımını analiz etme açısından önemli avantajlar sunmaktadır.

Farklı bölgelerin sahip olduğu günişığı potansiyelini temsil eden aydınlık düzeyi göstergelerine dayalı karşılaştırmalar giderek önem kazanmaktadır. Dış global yatay aydınlık düzeyi değeri (Ev,g,med), bir bölgenin yıl boyunca maruz kaldığı günişığı seviyesini temsil eden güçlü bir göstergedir. Türkiye'nin güneyden kuzeye doğru farklı Ev,g,med değerlerine sahip iller arasında belirgin günişığı farklılıkları oluşmaktadır [14]. Bu iller arasındaki günişığı potansiyeli farkları, aynı cephe tasarımının ve aynı dinamik kontrol stratejisinin farklı enerji ve görsel konfor performansları üretmesine neden olmaktadır. Bu nedenle, dinamik camlar ve hareketli gölgeleme sistemlerinin performansının, bu bağlamda karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi, günişığı koşullarına duyarlı cephe tasarım stratejilerinin geliştirilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

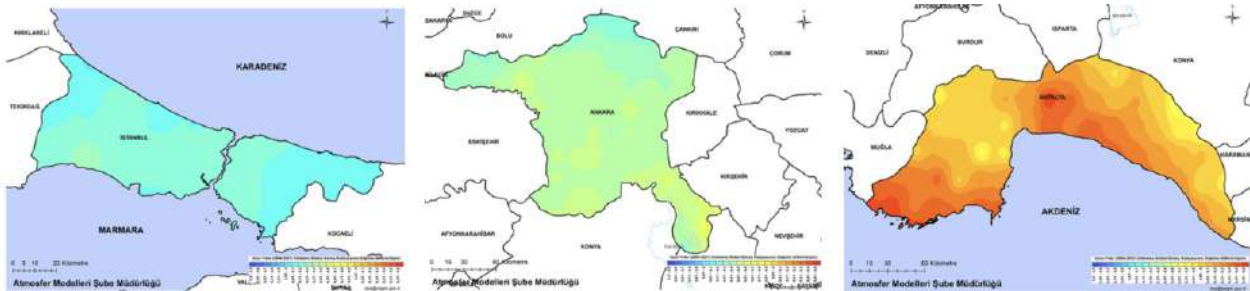
Bu çalışma, Türkiye'nin farklı günışığı koşullarını temsil eden şehirlerde, elektrokromik camlar ve çeşitli dinamik gölgeleme sistemlerinin, günışığına bağlı yapay aydınlatma enerjisi tüketimi ve DGP metriğinden yararlanılarak türetilmiş Mekânsal Rahatsız Edici Kamaşma (sDG, Spatial Disturbing Glare) üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak değerlendirmeyi amaçlamaktadır.

2. YÖNTEM

Bu çalışmada, Türkiye'nin farklı medyan dış global aydınlık düzeylerine (Ev,g,med) sahip bölgelerini temsil edecek şekilde İstanbul, Ankara ve Antalya seçilmiştir. Seçilen şehirler için yalnızca tek cephede pencere açıklığı bulunan referans bir ofis modeli oluşturulmuş ve EN 17037 standardına göre küçük ve büyük açıklık (small-large opening) sınıflarını temsil eden farklı pencere açıklık oranları tanımlanmıştır. Elektrokromik camlar ve dinamik gölgeleme sistemleri (stor ve jaluzi), güneş ışınımına dayalı kontrol stratejileri ile modellenmiş; günışığına bağlı yapay aydınlatma enerjisi tüketimleri (kWh/m²) ile mekânsal kamaşma performansları (sDG_{Room}) yıllık simülasyon yaklaşımı kullanılarak değerlendirilmiştir. Günışığına bağlı aydınlatma enerjisi simülasyonları Design Builder, mekânsal kamaşma hesaplamaları ise Rhino/Grasshopper programlarında yapılmıştır. Uygulanan modelleme adımları, senaryo tanımları ve analiz süreçleri aşağıdaki alt başlıklarda ayrıntılı olarak sunulmaktadır.

2.1. Karşılaştırmalar için Temsili Şehirlerin Seçimi

Türkiye'nin farklı günışığı potansiyellerini temsil eden şehirler, medyan dış global yatay aydınlık düzeyi (Ev,g,med) göstergesi esas alınarak belirlenmiştir. Ev,g,med parametresi, bir konumun yıl boyunca maruz kaldığı günışığı seviyesinin istatistiksel olarak temsil edilmesini sağlayarak, farklı bölgeler arasındaki günışığı koşullarının karşılaştırılmasında yaygın olarak kullanılan bir ölçüttür. Bu yaklaşım, kısa süreli ölçümler yerine, yıllık günışığı niceliğinin bütüncül olarak değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Bu kapsamda, Türkiye'nin kuzey, iç ve güney bölgelerini temsil edecek şekilde çalışmalarda sıkça kullanılan İstanbul, Ankara ve Antalya seçilmiştir. İstanbul, daha yüksek bulutluluk oranları ve görece düşük Ev,g,med değerleri (27861 lx) ile düşük-orta günışığı potansiyeline sahip bölgeleri temsil ederken; Ankara (31097 lx) orta düzey günışığı koşullarını, Antalya (40624 lx) ise yüksek günışığı potansiyeline sahip güney bölgelerini temsil etmektedir. Şekil 1'de bu şehirlerin global güneş ışınımı dağılımlarının görselleri verilmiştir.



Şekil 1. Karşılaştırmalarda kullanılacak temsili şehirlerin global güneş ışınımının dağılımı [15]

Bu üç şehrin seçimi, aynı cephe geometrisi ve kontrol stratejilerinin farklı günışığı koşulları altında nasıl performans gösterdiğinin karşılaştırmalı olarak incelenmesine olanak sağlamaktadır.

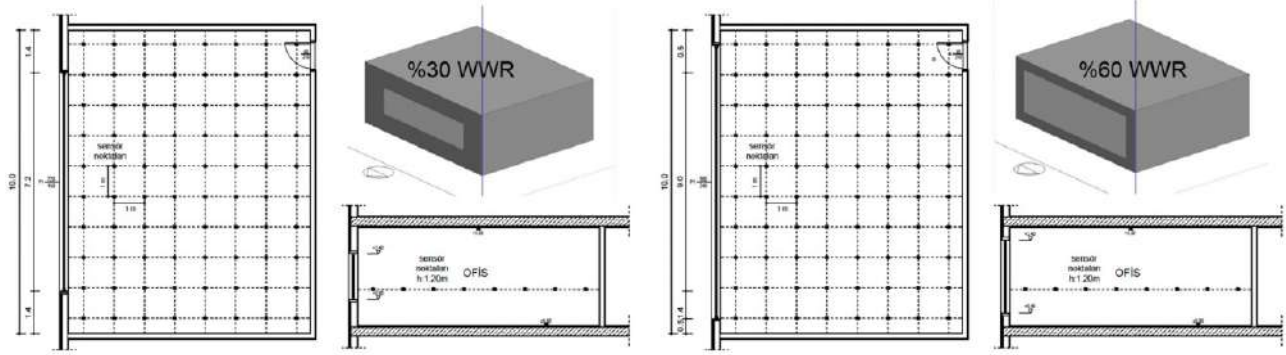
Simülasyonlarda, meteorolojik verilerden türetilmiş iklim dosyaları (EPW formatı) kullanılarak yıllık günışığı koşullarının temsil edilmesi hedeflenmiş ve climate.onebuilding.org platformu aracılığıyla TurTMY (Typical Meteorological Year for Turkey) veri setlerinden seçilerek temin edilmiştir. Böylece simülasyon ortamında gerçekleştirilen analizlerin, gerçek iklim verilerine dayalı ve karşılaştırılabilir sonuçlar üretmesi amaçlanmıştır.

2.2. Referans Hacmin Özellikleri

Çalışmada, farklı şehirler, cephe yönleri ve pencere açıklıkları arasında karşılaştırılabilir sonuçlar elde edebilmek amacıyla tek tip referans bir ofis hacmi kullanılmıştır. Hacmin geometrisi, çok kullanıcı ofis mekânlarını temsil edecek ve mekânsal kamaşmanın değerlendirmesine (sDG) uygun olacak şekilde tanımlanmıştır. Bu doğrultuda referans ofis hacmi, 10 m cephe genişliği, 8 m derinlik ve 3,60 m kat yüksekliği olacak biçimde oluşturulmuş, toplam net alan yaklaşık 80 m² olarak belirlenmiştir (Şekil 2). Ofis hacmi, yalnızca tek cephede pencere açıklığına sahip olacak şekilde kurgulanmış ve açıklık, hacmin uzun cephesinde konumlandırılmıştır. Bu yaklaşım, cephe boyunca günışığı dağılımının ve pencereye olan mesafeye bağlı kamaşma riskinin mekânsal değişiminin karşılaştırılmasına olanak sağlamaktadır. İç mekânda kullanıcı çalışma düzlemi yüksekliği 0,80 m, oturan kullanıcı göz seviyesi ise 1,20 m olarak tanımlanmıştır. Mekânsal kamaşma değerlendirmesi (sDG_{Room}) için analiz noktaları, pencere cephesine paralel doğrultuda ve derinlik boyunca 0,50 m uzaklıktan 1 m aralıklarla yerleştirilerek oluşturulmuştur. Tefrişten bağımsız olarak, genellenebilir sonuçlar elde edilmesi amacıyla iç mekân tefriş düzeni modele detaylı olarak dahil edilmemiştir.

Pencere açıklık oranları, EN 17037 standardında tanımlanan açıklık boyutu (opening size) sınıflarını temsil edecek şekilde iki seviyede ele alınmıştır. %30 saydamlık oranı (WWR) değeri “küçük açıklık”, %60 saydamlık oranı (WWR) değeri ise “büyük açıklık” sınıfını temsil edecek biçimde seçilmiştir. Cephe alanı 36 m² (10 m x 3,60 m) olarak tanımlanmış olup, buna bağlı olarak senaryolarda küçük açıklık için pencere alanı 10,8 m², büyük açıklık için ise 21,6 m² olarak belirlenmiştir.

Küçük açıklıklı senaryolarda pencere yüksekliği 1,50 m ve pencere genişliği 7,20 m olacak şekilde belirlenmiştir. Büyük açıklıklı senaryolarda ise pencere yüksekliği 2,40 m ve pencere genişliği 9,00 m olarak tanımlanmıştır. Her iki durumda da pencere açıklıkları cephe ortasına hizalanarak yerleştirilmiş, açıklık alanının düşey ve yatay bileşenleri EN 17037’nin açıklık sınıflarına ilişkin geometrik önerileriyle uyumlu olacak şekilde kurgulanmıştır. Küçük ve büyük pencere açıklıklı senaryolara ait cephe geometrileri Design Builder görselleri Şekil 2’de gösterilmektedir.



Şekil 2. Farklı cephe açıklık oranlarına sahip referans ofis hacminin planları, analiz noktaları ve Design Builder programında oluşturulmuş modelleri

2.3. Performans Değerlendirme Parametreleri

Çalışmada dinamik cephe sistemlerinin performansı, günışığına bağlı yıllık yapay aydınlatma enerjisi tüketimi (kWh/m^2) ve mekânsal rahatsız edici kamaşma göstergesi (**sDG**) olmak üzere iki temel ölçüt üzerinden değerlendirilmiştir. Bu iki parametre hem enerji verimliliği hem de görsel konfor koşullarının birlikte analiz edilmesine olanak sağlayacak şekilde seçilmiştir.

Aydınlatma kontrolü, iç mekânda hedef aydınlık düzeyi (EN12464-1'e göre 500lx) esas alınarak günışığına bağlı dimmerleme (continuous dimming) prensibi ile modellenmiş ve çalışma düzlemi üzerinde (0,80 m) tanımlanan hedef aydınlık düzeyinin altında kalan durumlarda yapay aydınlatma sisteminin devreye girmesi sağlanmıştır. Bu yaklaşım, günışığı kullanım potansiyelinin aydınlatma enerjisi üzerindeki etkisinin yıllık ölçekte değerlendirilmesine imkân tanımaktadır.

sDG metriği, belirlenen değerlendirme alanı içerisindeki noktalarda, yıl boyunca rahatsız edici kamaşma koşullarının oluştuğu zaman yüzdesini ifade etmektedir. EN17037 standardında, kamaşmadan korunmaya karşı önerilen seviyeler minimum, orta ve yüksek olmak üzere sırasıyla $DGP_e \leq 0.45$, $DGP_e \leq 0.40$ ve $DGP_e \leq 0.35$ eşik değerleri olarak tanımlanmıştır. Her bir sensör noktası için sekiz farklı bakış doğrultusunda belirtilen eşik değerlerinin aşılma oranlarını ifade eden minimum, orta ve yüksek koruma seviyelerine karşılık gelen $DGP_{e,min}$, $DGP_{e,mid}$ ve $DGP_{e,high}$ değerleri hesaplanmıştır. Her sensör noktasında elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması alınarak hacmin mekânsal performansını özetleyen çıktılar türetilmiştir. Buna ek olarak, korunma seviyelerine göre yıllık kullanım saatleri boyunca rahatsız edici kamaşmanın gerçekleşme oranının hacim genelindeki sürekliliğini değerlendirebilmek amacıyla **sDG_{Room}** (Spatial Disturbing Glare, Mekansal Rahatsız Edici Kamaşma) parametresi elde edilmiştir. **sDG_{Room}** ölçütü DGP temelli kamaşma değerlendirmelerinin mekânsal ve yıllık ölçekte genişletilmiş bir türevidir. Bu sayede yalnızca tekil sensör noktalarında oluşan rahatsız edici kamaşma durumları değil, hacmin tamamında yıl boyunca ortaya çıkan görsel rahatsızlık riski de değerlendirilmiştir.

Tüm performans değerlendirmeleri, ofis kullanım senaryosunu temsil edecek şekilde tanımlanan çalışma saatleri (hafta içi 07.00-18.00, yıllık 2868 saat) kapsamında gerçekleştirilmiş ve sonuçlar yalnızca kullanıcıların aktif bulunduğu zaman aralıkları için dikkate alınmıştır. Böylece hem enerji tüketimi hem de kamaşma değerlendirmeleri, gerçek kullanım koşullarını temsil edecek biçimde sınırlandırılmıştır.

2.4. Cephe Elemanları ve Senaryo Tanımları

Çalışmada, farklı cephe kontrol stratejilerinin performans etkilerini değerlendirmek amacıyla sabit cam, dinamik cam ve hareketli gölgeleme sistemlerini kapsayan altı temel cephe sistemi tanımlanmıştır. Low-e cam ve elektrokromik cam çözümleri, çift camlı yalıtım camı ünitesi olarak modellenmiştir. Tanımlanan cephe sistemlerinin görünür ışıyım (ışık) geçirgenliği (VT) değerleri Çizelge 1’de sunulmaktadır. Referans senaryo olarak S0-Low-e çift cam sistemi tanımlanmıştır. Bu senaryo, sabit optik özelliklere sahip geleneksel cephe çözümünü temsil etmektedir. Dinamik cam çözümü olarak S1-Elektrokromik çift cam sistemi kullanılmıştır. EC cam, iki durumlu (saydam-koyu) çalışma prensibine sahip olacak şekilde modellenmiş olup, saydam (clear) durumda yüksek görünür geçirgenlik sağlarken, koyu (tinted) durumda güneş kazançlarını ve kamaşma riskini sınırlandıracak düşük geçirgenlik seviyesine geçmektedir.

Çizelge 1. Cephe elemanları ve görünür ışıyım (ışık) geçirgenliği (VT) değerleri

Senaryo	Sistem Türü	Durum	VT
S0	Low-e cam	Sabit	0.75
S1	Elektrokromik cam	Saydam (Clear)-Koyu (Tint)	0.75-0.11
S2	Low-e cam + Stor perde	Light (açık)	0.70
S3	Low-e cam + Stor perde	Medium (orta)	0.40
S4	Low-e cam + Stor perde	Dark (koyu)	0.10
S5	Low-e cam + Jaluzi	Kapalıyken	0.00

EC cam ve tüm hareketli gölgeleme sistemleri için güneş ışıyımına dayalı otomatik kontrol stratejisi uygulanmıştır. Kontrol eşiği olarak 200 W/m² dış yüzey güneş ışıyım değeri esas alınmış ve bu değerin aşılması durumunda sistemlerin koyu (tinted) veya kapalı moda geçmesi sağlanmıştır.

Hareketli gölgeleme sistemleri kapsamında üç farklı geçirgenlik seviyesine sahip stor perde senaryosu tanımlanmıştır: S2-Light stor (VT = 0.70), S3-Medium stor (VT = 0.40) ve S4-Dark stor (VT = 0.10). Ayrıca opak davranışa sahip yatay jaluzi sistemi S5-Jaluzi (VT = 0.00) senaryosu ile temsil edilmiştir. Bu çeşitlendirme ile farklı optik geçirgenlik seviyelerinin günışığı ve kamaşma performansı üzerindeki etkilerinin sistematik olarak karşılaştırılması hedeflenmiştir.

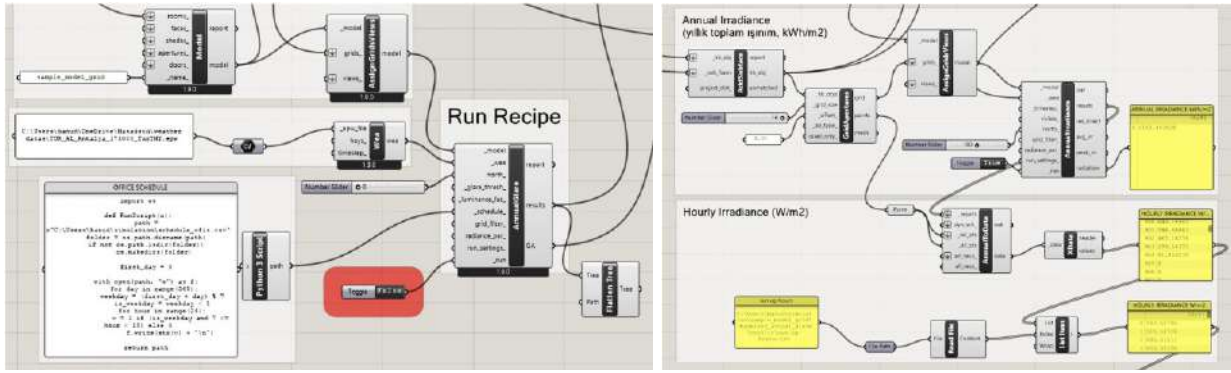
Tüm cephe sistemleri, EN 17037 standardında tanımlanan pencere açıklık sınıflarına bağlı olarak küçük açıklık (Small opening, S) ve büyük açıklık (Large opening, L) olmak üzere iki alt senaryo altında modellenmiştir. Bu doğrultuda senaryolar S0_S, S0_L, S1_S, S1_L, ..., S5_S, S5_L biçiminde adlandırılmıştır.

2.5. Simülasyon Araçları ve Hesaplama Süreci

Çalışmada enerji ve günışığına bağlı aydınlatma performansı ile mekânsal kamaşma değerlendirmeleri, farklı simülasyon motorlarının güçlü yönlerinden yararlanacak şekilde iki ayrı hesap ortamında yürütülmüştür. Günışığına bağlı yapay aydınlatma enerjisi tüketimleri Design Builder yazılımı kullanılarak hesaplanmış, mekânsal kamaşma değerlendirmeleri ise Rhino/Grasshopper ortamında Honeybee eklentisi aracılığıyla Radiance tabanlı simülasyonlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Aydınlatma enerjisi simülasyonlarında, referans ofis modeli için yıllık saatlik zaman adımı kullanılmış ve günışığına bağlı dimmerleme (continious dimming) kontrol stratejisi aktif edilmiştir. İç mekânda tanımlanan hedef aydınlık düzeyi (500 lx) esas alınarak, yeterli günışığı sağlanan saatlerde yapay aydınlatma gücü otomatik olarak azaltılmış ve yıllık toplam elektrik enerjisi tüketimi kWh/m² cinsinden elde edilmiştir. Tüm senaryolar için aynı iç yükler, kullanım profilleri ve kontrol ayarları korunarak karşılaştırılabilirlik sağlanmıştır.

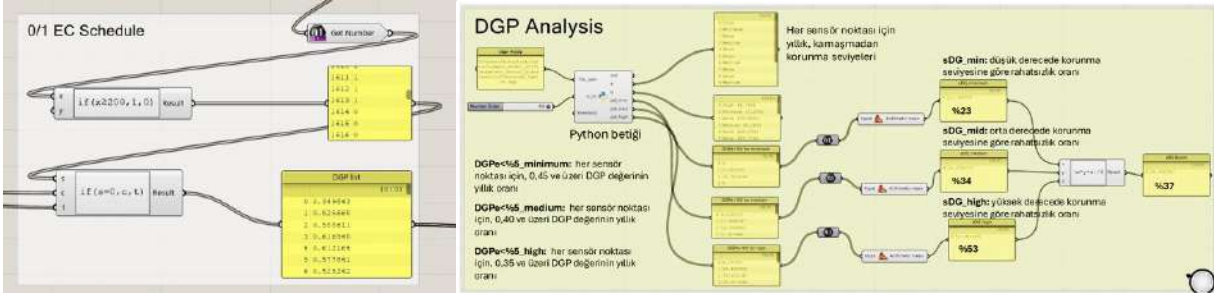
Yıllık günışığı kamaşma analizleri, Honeybee eklentisi içerisinde yer alan HB Annual Glare simülasyon modülü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizlerde kullanılacak iklim verileri ve model bileşenleri ile yıllık DGP hesaplarının gerçekleştirilmesi için gerekli çevresel girdiler tanımlanmıştır. HB Annual Glare bileşene cephe yönelimleri (0-270) ile kamaşma hesaplamalarına ilişkin standart parametreler tanımlanmıştır. Ofis hacminde yıllık kullanım saatlerini yansıtan program (schedule) oluşturulmuştur. Bu program, Grasshopper ortamında Python bileşeni kullanılarak hafta içi günlerde 07.00-18.00 saatlerini kapsayacak şekilde tanımlanmıştır. Elektrokromik cam ve dinamik cephe elemanlarının senaryolarında, camın optik özelliklerinin zamana bağlı olarak (saatlik) değişimini temsil edebilmek amacıyla ışınımaya dayalı bir kontrol stratejisi oluşturulmuştur. Bu kapsamda, pencere camının ortasında bir sensör tanımlanmıştır. Bu sensör üzerinden yıllık toplam ışınlam (kWh/m²) hesaplanmış, ardından saatlik ışınlam değerlerine dönüştürülmüştür (**Şekil 3**). Dinamik cephe elemanları, dış yüzeye gelen ışınlam değerinin 200 W/m² eşik değerini aşması durumunda koyu (tinted) ya da kapalı duruma geçen iki fazlı kontrol mantığı ile modellenmiştir. Bu kapsamda saatlik güneş ışınlamı verileri kullanılarak 0/1 tabanlı bir kontrol zaman çizelgesi oluşturulmuş; 0 değeri camın saydam (clear), 1 değeri ise koyu (tinted) durumunu temsil edecek şekilde tanımlanmıştır.



Şekil 3. Grasshopper'da yıllık DGP analizlerinin elde edilmesi ve saatlik ışınlam değerlerinin alınması kurgusu

Saydam (clear) ve koyu (tinted) durumlar için ayrı ayrı hesaplanan DGP çıktıları, oluşturulan kontrol çizelgesi ile birleştirilerek yıl boyunca dinamik davranışı temsil eden tek bir DGP zaman serisi elde edilmiştir. Bu çıktılar, EN 17037 standardında tanımlanan eşik değerlerine göre değerlendirilmek ve çoklu sensör noktaları ile çoklu bakış doğrultularını birlikte ele alan mekânsal

göstergelerin üretilmesi amacıyla Grasshopper ortamında geliştirilen Python tabanlı bir sonuç işleme aracı kullanılarak analiz edilmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. Grasshopper'da yüzeye gelen saatlik ışınım değerlerinin kontrol çizelgesine dönüştürülmesi ile yıllık DGP sonuçlarının sınıflandırılması ve sDGRoom parametresinin hesaplanmasına yönelik Grasshopper-Python iş akışı

Geliştirilen betik (script) aracılığıyla, her sensör noktası için sekiz farklı bakış doğrultusuna ait DGP zaman serileri birleştirilmiş ve 'her zaman' adımı için 'en olumsuz' durum (worst-case) yaklaşımıyla maksimum DGP değeri seçilmiştir. Elde edilen DGP serileri, EN 17037'de tanımlanan eşik değerlere ($DGP_e \leq 0.45$, 0.40 ve 0.35) göre değerlendirilerek sensör bazında $DGP_{e,min}$, $DGP_{e,med}$ ve $DGP_{e,high}$ çıktıları hesaplanmıştır.

Sensör noktalarına ait yıllık kamaşma yüzdeleri, mekân genelini temsil edecek şekilde aritmetik ortalama yöntemiyle birleştirilmiş ve sDG_min, sDG_med ve sDG_high göstergeleri türetilmiştir. Son aşamada bu üç koruma seviyesini birlikte temsil eden bütüncül mekânsal gösterge olan sDGRoom parametresi hesaplanmıştır. Bu işlem akışı sayesinde, farklı senaryoların görsel konfor performansları karşılaştırılabilir biçimde analiz edilmiştir.

3. BULGULAR

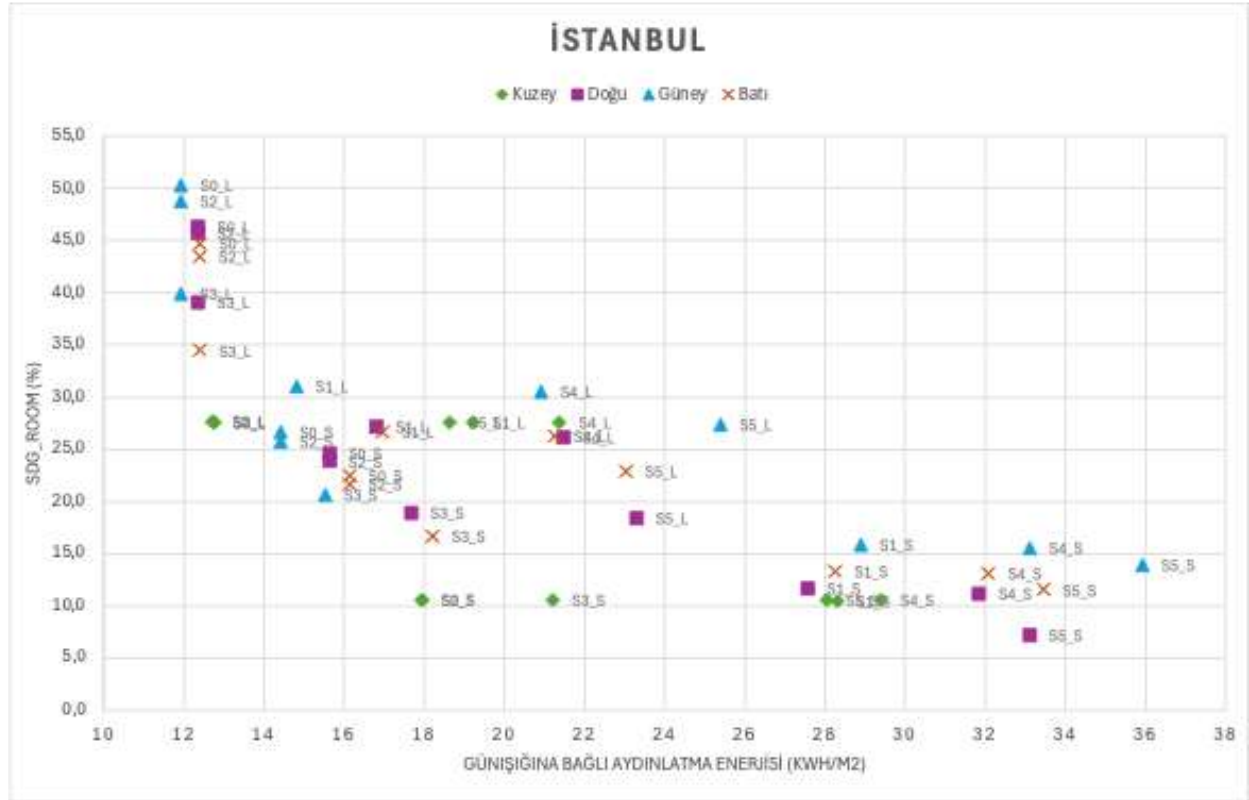
Bu çalışmada farklı günışığı koşullarına sahip İstanbul, Ankara ve Antalya illeri için gerçekleştirilen simülasyon sonuçları; farklı dinamik pencere elemanları, pencere açıklık sınıfları (small-large opening) ve cephe yönleri açısından günışığına bağlı aydınlatma enerjisi tüketimi (kWh/m^2) ile mekânsal rahatsız edici kamaşma göstergesi (sDGRoom) birlikte değerlendirilerek analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, dinamik pencere elemanlarının performansının iklim koşulları, cephe yönü ve pencere açıklık oranı ile etkileşim içerisinde olduğunu göstermektedir (Çizelge 2, 3, 4). İstanbul ili için enerji ve konfor performansı sonuçları Çizelge 2'de ve enerji-konfor dengesi grafiği Şekil 5'te, Ankara için Çizelge 3 ve Şekil 6'da, Antalya için Çizelge 4 ve Şekil 7'de verilmiştir.

İstanbul ili için Çizelge 2 ve Şekil 5 incelendiğinde, Kuzey cephesinde tüm senaryolarda sDGRoom değerleri birbirine oldukça yakındır. Buna karşın cephe sistemleri arasında aydınlatma enerjisi tüketimi açısından belirgin farklar oluşmaktadır. Özellikle elektrokromik cam ve düşük ışık geçirgenliğine sahip sistemlerde (S1_S, S4_S) günışığı miktarının azalmasına bağlı olarak aydınlatma enerjisi tüketimi artmaktadır. Bu durum kuzey yönünde kamaşma riskinin sınırlı olması nedeniyle yüksek günışığı geçirgenliğine sahip sistemlerin enerji açısından daha avantajlı olduğunu göstermektedir. Doğu, güney ve batı cephelerinde, yüksek ışık geçirgenliğine sahip sistemler (S0, S2) daha düşük aydınlatma enerjisi gerektirirken özellikle büyük açıklık oranında

(%60 WWR) daha yüksek kamaşma değerleri oluşturmaktadır. Buna karşılık elektrokromik cam (S1), düşük ve orta geçirgenlikli gölgeleme sistemleri (S3, S4, S5) kamaşmayı azaltmakta ancak aydınlatma enerjisi tüketimini artırmaktadır. Enerji-konfor dengesine göre optimum sonuçlar incelendiğinde küçük açıklık oranında (%30 WWR) S2_S (Stor perde, VT= %70) ve özellikle S3_S (Stor perde, VT= %40) senaryolarının enerji ve görsel konfor açısından dengeli performans sunduğu görülmektedir. Büyük açıklık oranında ise S1_L (Elektrokromik cam) ve S3_L (Stor perde, VT= %40) senaryoları, referans sistemlere göre kamaşmayı azaltırken enerji tüketimini sınırlı düzeyde artırarak daha dengeli çözümler ortaya çıkarmaktadır.

Çizelge 2. İstanbul ili için enerji ve konfor performansı sonuçları

İstanbul	Senaryo	Güneşiğine Bağlı Aydınlatma Enerjisi (kWh/m ²)				sDG _{Room} (%)			
		Kuzey	Doğu	Güney	Batı	Kuzey	Doğu	Güney	Batı
Küçük Açıklık (%30 WWR)	S0 S (Low-e cam)	17,95	15,64	14,42	16,14	10,6	24,7	26,7	22,5
	S1 S (Elektrokromik cam)	28,31	27,58	28,89	28,26	10,5	11,7	15,9	13,3
	S2 S (Stor perde, VT= %70)	17,95	15,63	14,42	16,14	10,5	23,9	25,8	21,7
	S3 S (Stor perde, VT= %40)	21,21	17,69	15,53	18,22	10,5	19,0	20,7	16,7
	S4 S (Stor perde, VT= %10)	29,41	31,85	33,12	32,09	10,5	11,2	15,6	13,1
	S5 S (Jaluzi)	28,05	33,11	35,92	33,46	10,5	7,2	14,0	11,5
Büyük Açıklık (%60 WWR)	S0 L (Low-e cam)	12,75	12,37	11,94	12,41	27,6	46,4	50,3	44,8
	S1 L (Elektrokromik cam)	19,23	16,81	14,82	16,97	27,6	27,2	31,1	26,7
	S2 L (Stor perde, VT= %70)	12,74	12,36	11,94	12,40	27,7	45,8	48,9	43,6
	S3 L (Stor perde, VT= %40)	12,75	12,36	11,94	12,41	27,6	39,2	40,0	34,5
	S4 L (Stor perde, VT= %10)	21,38	21,47	20,92	21,25	27,6	26,2	30,6	26,3
	S5 L (Jaluzi)	18,65	23,30	25,40	23,04	27,6	18,4	27,4	22,9

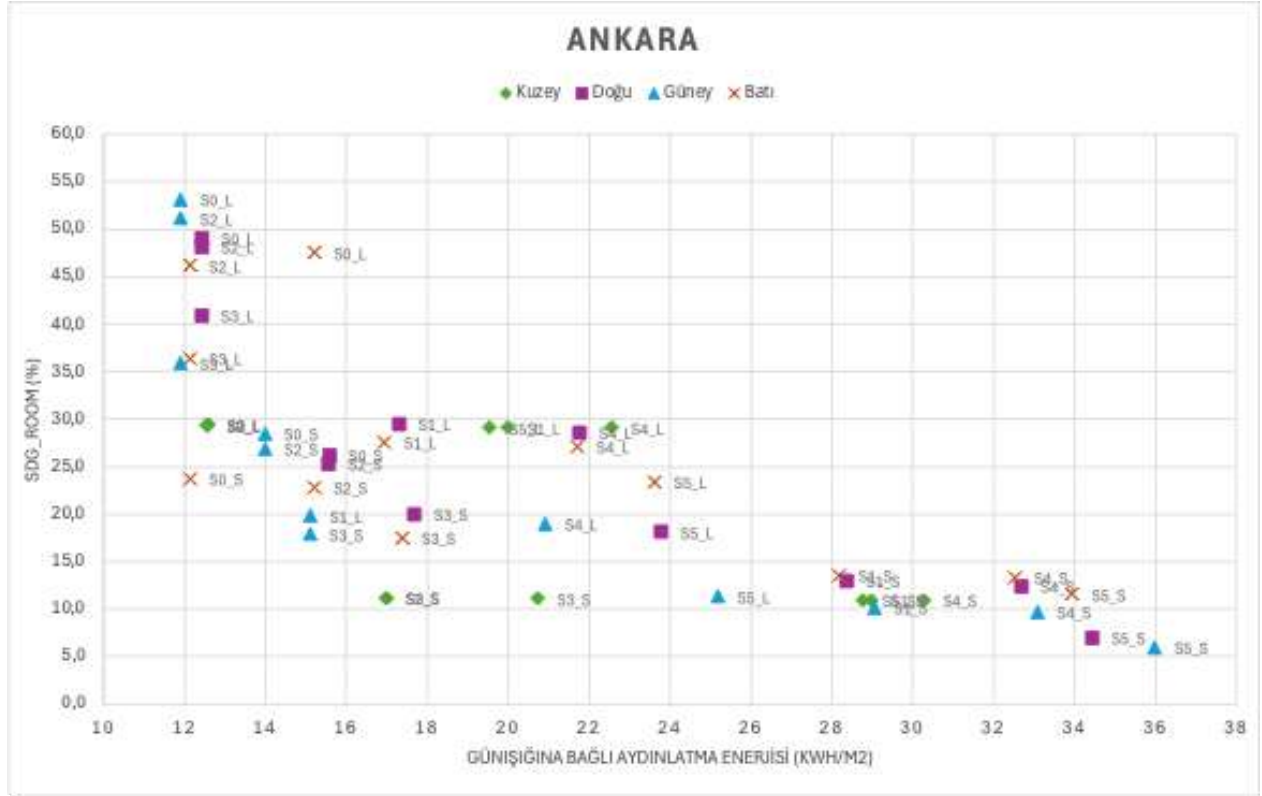


Şekil 5. İstanbul ili için örnek enerji-konfor dengesi (trade-off) grafiği

Genel olarak elde edilen bulgular, kuzey cephelerde dinamik sistemlerin avantajının sınırlı olduğunu; doğu, güney ve batı cephelerinde ise enerji tüketimi ile kamaşma arasında belirgin bir performans dengesi bulunduğunu göstermektedir.

Çizelge 3. Ankara ili için enerji ve konfor performansı sonuçları

Ankara	Senaryo	Güneşine Bağlı Aydınlatma Enerjisi (kWh/m ²)				sDG _{Room} (%)			
		Kuzey	Doğu	Güney	Batı	Kuzey	Doğu	Güney	Batı
Küçük Açıklık (%30 WWR)	S0 S (Low-e cam)	17,00	15,58	13,99	12,14	11,2	26,2	28,4	23,8
	S1 S (Elektrokromik cam)	28,98	28,37	29,06	28,18	11,0	13,0	10,2	13,6
	S2 S (Stor perde, VT= %70)	16,98	15,57	13,99	15,22	11,2	25,3	26,9	22,8
	S3 S (Stor perde, VT= %40)	20,73	17,69	15,11	17,39	11,1	20,0	17,9	17,5
	S4 S (Stor perde, VT= %10)	30,28	32,69	33,09	32,52	11,0	12,4	9,7	13,3
	S5 S (Jaluzi)	28,77	34,44	35,99	33,95	11,0	7,0	6,0	11,6
Büyük Açıklık (%60 WWR)	S0 L (Low-e cam)	12,59	12,44	11,92	15,22	29,4	49,0	53,1	47,5
	S1 L (Elektrokromik cam)	20,00	17,30	15,12	16,95	29,1	29,5	19,8	27,6
	S2 L (Stor perde, VT= %70)	12,58	12,43	11,91	12,13	29,4	48,1	51,1	46,2
	S3 L (Stor perde, VT= %40)	12,58	12,43	11,91	12,14	29,3	40,9	35,9	36,4
	S4 L (Stor perde, VT= %10)	22,56	21,77	20,92	21,71	29,1	28,6	18,9	27,1
	S5 L (Jaluzi)	19,55	23,79	25,19	23,62	29,1	18,1	11,3	23,4



Şekil 6. Ankara ili için örnek enerji-konfor dengesi (trade-off) grafiği

Ankara ili Çizelge 3 ve Şekil 6 incelendiğinde, İstanbul ilindeki sonuçlara benzer olarak kuzey cephesinde tüm senaryolarda sDG_{Room} değerleri birbirine yakın ve aydınlatma enerjisi tüketimleri belirgin olarak farklıdır. Yine düşük ışık geçirgenliğe sahip sistemlerde aydınlatma enerjisi tüketimi daha fazladır. Bu sebeple yüksek ışık geçirgenliğine sahip sistemlerin enerji-konfor dengesi açısından daha avantajlı olduğunu göstermektedir.

Doğu, güney ve batı cephelerinde dinamik cephe sistemleri arasında enerji tüketimi ile kamaşma değerleri açısından belirgin farklılıklar oluşmaktadır. Yüksek ışık geçirgenliğine sahip sistemler (S0, S2) daha düşük aydınlatma enerjisi tüketimi sağlarken, özellikle büyük açıklık oranlarında daha yüksek kamaşma değerleri üretilmektedir. Buna karşılık elektrokromik cam (S1) ile düşük ve orta geçirgenlikli gölgeleme sistemleri (S3, S4, S5) kamaşma değerlerini azaltmakta, ancak günışığı geçirgenliğinin azalmasına bağlı olarak aydınlatma enerjisi tüketimini artırmaktadır. Bu eğilim, İstanbul için elde edilen bulgularla da benzerlik göstermektedir.

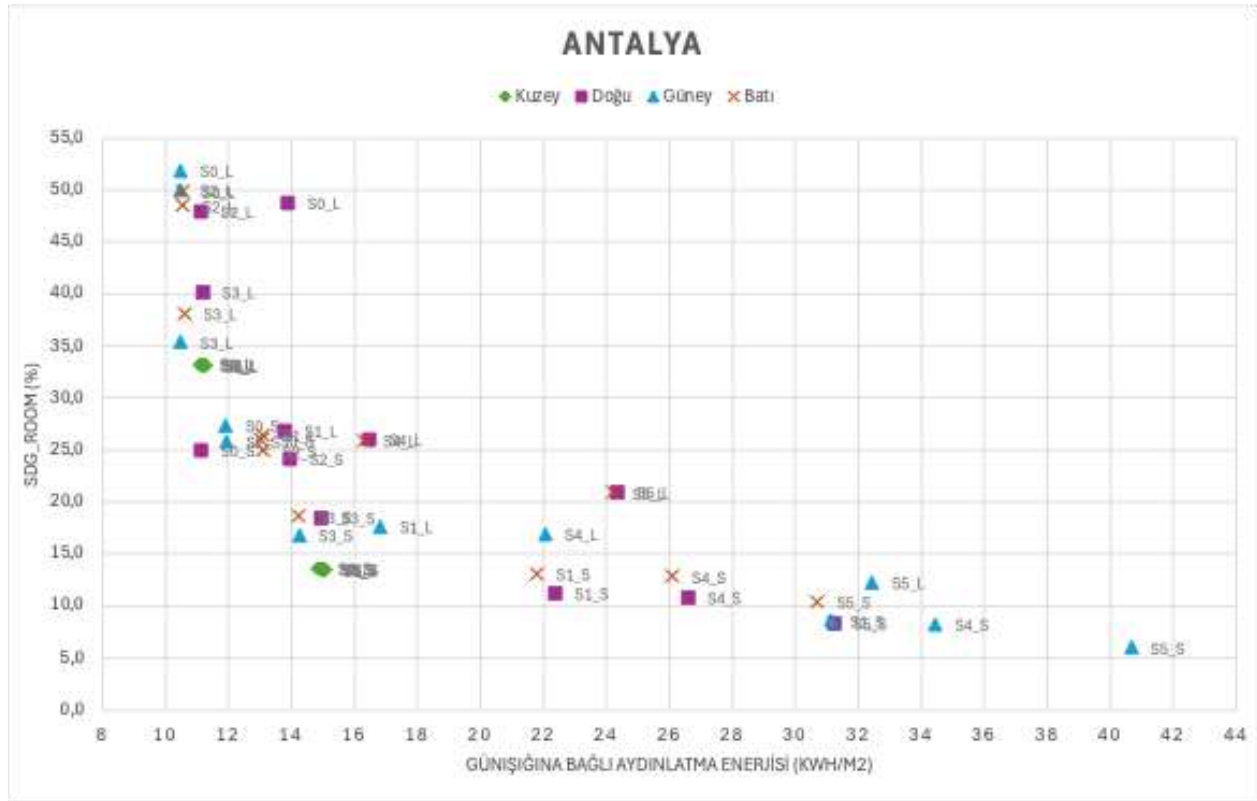
Küçük açıklık oranında (%30 WWR) enerji tüketimi ile görsel konfor arasında dengeli performans sağlayan senaryoların özellikle S3_S (Stor perde, VT=%40) ve kısmen S2_S (Stor perde, VT=%70) olduğu görülmektedir. Büyük açıklık oranında (%60 WWR) ise referans sistemler S0_L ve S2_L (Stor perde, VT=%70) en düşük enerji tüketimini sağlamakla birlikte doğu, güney ve batı cephelerinde yüksek kamaşma değerleri oluşturmaktadır. Optimum sonuçlar incelendiğinde elektrokromik cam (S1_L) ve orta geçirgenlikli stor perde sistemi (S3_L), referans sistemlere kıyasla kamaşmayı azaltırken enerji tüketimini sınırlı düzeyde artırarak daha dengeli performans sunan çözümler olarak öne çıkmaktadır. Bu sonuçlar İstanbul için belirlenen optimum sistemlerle büyük ölçüde örtüşmektedir.

Çizelge 4. Antalya ili için enerji ve konfor performansı sonuçları

Antalya	Senaryo	Günışığına Bağlı Aydınlatma Enerjisi (kWh/m ²)				sDGRoom (%)			
		Kuzey	Doğu	Güney	Batı	Kuzey	Doğu	Güney	Batı
Küçük Açıklık (%30 WWR)	S0_S (Low-e cam)	14,88	11,15	11,94	13,04	13,6	25,0	27,4	26,0
	S1_S (Elektrokromik cam)	15,05	22,39	31,13	21,80	13,5	11,2	8,6	13,1
	S2_S (Stor perde, VT= %70)	14,87	13,97	11,95	13,12	13,6	24,2	25,8	24,9
	S3_S (Stor perde, VT= %40)	14,96	14,97	14,26	14,23	13,5	18,5	16,8	18,6
	S4_S (Stor perde, VT= %10)	15,07	26,60	34,46	26,11	13,5	10,8	8,3	12,8
	S5_S (Jaluzi)	15,07	31,23	40,68	30,71	13,5	8,4	6,0	10,4
Büyük Açıklık (%60 WWR)	S0_L (Low-e cam)	11,13	13,91	10,50	10,57	33,2	48,8	51,9	49,8
	S1_L (Elektrokromik cam)	11,24	13,81	16,85	13,12	33,1	26,8	17,7	26,4
	S2_L (Stor perde, VT= %70)	11,12	11,15	10,49	10,57	33,2	48,0	50,0	48,5
	S3_L (Stor perde, VT= %40)	11,12	11,19	10,50	10,61	33,2	40,2	35,4	38,2
	S4_L (Stor perde, VT= %10)	11,28	16,49	22,07	16,31	33,1	26,0	17,0	25,9
	S5_L (Jaluzi)	11,28	24,37	32,46	24,22	33,1	21,0	12,3	20,9

Antalya ili için Çizelge 4 ve Şekil 7 incelendiğinde, İstanbul ve Ankara'daki sonuçlara paralel olarak kuzey cephesinde tüm senaryolarda sDGRoom değerleri birbirine yakın ve aydınlatma enerjisi tüketimleri farklıdır. Düşük ışık geçirgenliğe sahip sistemlerde aydınlatma enerjisi tüketimi yine daha fazladır. Antalya ilinde de yüksek ışık geçirgenliğine sahip sistemler enerji-konfor dengesi açısından daha avantajlıdır.

Doğu, güney ve batı cephelerinde, cephe sistemleri İstanbul ve Ankara için elde edilen bulgularla benzer şekilde enerji tüketimi ile kamaşma olasılığı değerleri açısından belirgin olarak farklıdır. Büyük açıklık oranında (%60 WWR), yüksek ışık geçirgenliğine sahip sistemler (S0, S2) daha düşük aydınlatma enerjisi tüketirken yüksek kamaşma olasılığına sebep olmaktadır. Bu durum Antalya'nın yüksek günışığı potansiyeline bağlı olarak daha belirgin hale gelmektedir. Buna karşılık elektrokromik cam (S1) ve düşük-orta geçirgenlikli gölgeleme sistemleri (S3, S4, S5) kamaşma değerlerini azaltmakta, ancak günışığı geçirgenliğinin azalmasına bağlı olarak aydınlatma enerjisi tüketimini artırmaktadır.



Şekil 7. Antalya ili için örnek enerji-konfor dengesi (trade-off) grafiği

Optimum sonuçlar incelendiğinde küçük açıklık oranında (%30 WWR) enerji tüketimi ile görsel konfor arasında dengeli performans sağlayan senaryoların özellikle **S3_S** (Stor perde, VT=%40) ve kısmen **S2_S** (Stor perde, VT=%70) olduğu görülmektedir. Buna karşılık **S4_S** (Stor perde, VT=%10) ve **S5_S** (Jaluzi) senaryoları kamaşma değerlerini önemli ölçüde azaltmasına rağmen aydınlatma enerjisi tüketimini belirgin biçimde artırmaktadır. Bu bulgular Antalya’da da optimum cephe sisteminin cephe yönü ve pencere açıklık oranına bağlı olarak değiştiğini ortaya koymaktadır.

4. SONUÇLAR

Bu çalışma, farklı günışığı koşullarına sahip İstanbul, Ankara ve Antalya illerinde dinamik cephe elemanlarının günışığına bağlı aydınlatma enerjisi tüketimi ve mekânsal kamaşma (sDG_{Room}) performansı üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak ortaya koymuştur. Elde edilen sonuçlar cephe sistemlerinin performansının cephe yönü, pencere açıklık oranı ve günışığı koşullarına bağlı olarak değiştiğini göstermektedir. Kuzey cephede tüm senaryolarda kamaşma olasılığının sınırlı değişim gösterdiği ve düşük ışık geçirgenliğine sahip sistemlerin yalnızca aydınlatma enerjisi tüketimini artırdığı belirlenmiştir. Buna karşılık doğu, güney ve batı cephelerinde yüksek ışık geçirgenliğine sahip sistemler daha düşük aydınlatma enerjisi üretirken özellikle büyük açıklık oranlarında daha yüksek kamaşma olasılığı oluşturmuştur. Elektrokromik cam ve düşük ışık geçirgenliğine sahip gölgeleme sistemlerinin ise kamaşma olasılığını azaltırken günışığı geçirgenliğinin azalmasına bağlı olarak aydınlatma enerjisi tüketimini artırdığı görülmüştür.

Üç şehir için elde edilen sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde optimum cephe sistemlerinin büyük ölçüde benzer olduğu belirlenmiştir. Küçük açıklık oranında (%30 WWR) S3_S (stor perde, VT=%40) senaryosu enerji tüketimi ile görsel konfor arasında dengeli bir performans sunarken, büyük açıklık oranında (%60 WWR) S1_L (elektrokromik cam) ve S3_L (stor perde, VT=%40) senaryoları kamaşma olasılığını azaltırken aydınlatma enerjisini sınırlı düzeyde artırarak daha dengeli çözümler ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak cephe yönünün mekânsal kamaşma olasılığını belirleyici bir parametre olduğu, ancak optimum cephe sisteminin belirlenmesinde pencere-duvar oranının daha etkili bir tasarım girdisi olduğu görülmektedir. Bu bulgular, cephe tasarımında sistem seçiminin yalnızca günışığı koşullarına göre değil, aynı zamanda cephe yönü ve pencere-duvar oranı birlikte değerlendirilerek yapılması gerektiğini ortaya koymaktadır.

KAYNAKLAR

1. Reinhart, C. F., Mardaljevic, J., & Rogers, Z. (2006). Dynamic Daylight Performance Metrics for Sustainable Building Design. *LEUKOS*, 3(1), 7–31. <https://doi.org/10.1582/LEUKOS.2006.03.01.001>
2. Wienold, J. (2007). Dynamic simulation of blind control strategies for visual comfort and energy balance analysis. In *Proceedings of Building Simulation 2007: 10th Conference of IBPSA* (pp. 1197 – 1204). IBPSA.
3. Mardaljevic J, Hescong L, & Lee E. (2009). Daylight metrics and energy savings. *Lighting Research & Technology*. 41(3):261-283. doi:10.1177/1477153509339703
4. Dussault, J. M., & Gosselin, L. (2017). Office buildings with electrochromic windows: A sensitivity analysis of design parameters on energy performance, and thermal and visual comfort. *Energy and Buildings*, 153, 50-62.
5. Piccolo, A., Marino, C., Nucara, A., & Pietrafesa, M. (2018). Energy performance of an electrochromic switchable glazing: Experimental and computational assessments. *Energy and Buildings*, 165, 390-398.
6. DeForest, N., Shehabi, A., Selkowitz, S., & Milliron, D. J. (2017). A comparative energy analysis of three electrochromic glazing technologies in commercial and residential buildings. *Applied energy*, 192, 95-109.
7. Lai, K., Wang, W., & Giles, H. (2017). Solar shading performance of window with constant and dynamic shading function in different climate zones. *Solar Energy*, 147, 113-125.
8. Lee, E. S., DiBartolomeo, D. L., & Selkowitz, S. E. (1998). Thermal and daylighting performance of an automated venetian blind and lighting system in a full-scale private office. *Energy and buildings*, 29(1), 47-63.
9. Lu, W. (2024). Dynamic Shading and Glazing Technologies: Improve Energy, Visual, and Thermal Performance. *Energy and Built Environment*, 5(2), 211–229. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2022.09.004>
10. Hee, W.J., Alghoul, M.A., Bakhtyar, B., OmKalthum Elayeb, Shameri, M.A., Alrubaih, M.S. & Sopian, K. (2015). The Role of Window Glazing on Daylighting And Energy Saving in Buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (42), 323-343.
11. Tzempelikos, A., & Athienitis, A.K. (2007). The impact of shading design and control on building cooling and lighting demand. *Solar Energy*, 81(3), 369-382.
12. Wienold, J. (2009). Dynamic Daylight Glare Evaluation. *Eleventh International IBPSA Conference*, Glasgow, 27-30 July 2009, 944-951.

13. Jakubiec, J. A., Reinhart, C. F., & Van Den Wymelenberg, K. (2015). Towards an integrated framework for predicting visual comfort conditions from luminance-based metrics in perimeter daylight spaces. In J. Mathur & V. Garg (Eds.), *Proceedings of Building Simulation 2015: 14th Conference of International Building Performance Simulation Association*, 1189–1196.
14. Konuk Taştan, G. G., İplik, I., Yağmur, Ş., & Uyduran, H. G. (2023). Türkiye’deki tüm illerin medyan dış aydınlık düzeyi değerlerinin hesaplanması. *Anadolu Bil Meslek Yüksekokulu Dergisi*, 18(68), 161-176.
15. T.C. Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (2022). *Uzun yıllar ortalama global güneş radyasyon dağılımı (2004-2021)*. https://mgm.gov.tr/kurumici/radyasyon_iller.aspx

AÇIK OFİS TASARIMINDA AKUSTİK KONFOR VE YANGIN GÜVENLİĞİ PERFORMANS ETKİLEŞİMİ

Nilüfer KIZILKAYA¹

Işın MERİÇ NURSAL²

¹Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Mimarlık Bölümü

²Mezzo Stüdyo Ltd. Şti.

ÖZET

Açık ofis tasarımı, birçok işletme tarafından işbirliğini ve iletişimi artırması, mekân verimliliği sağlaması ve maliyet avantajı sunması gibi nedenlerle günümüz mimari yaklaşımlarında yaygın olarak tercih edilen bir çalışma alanı modeli haline gelmiştir. Açık ofis tasarımlarında kullanılan bölücüler, kullanıcı konforunu doğrudan etkileyen bileşenler olmalarına karşın, çoğu durumda beklenen işlevsel performansı sağlayamamaktadır. Bu durum, tasarım sürecinde akustik, yangın güvenliği ve diğer çevresel kontrol sistemlerinin bütüncül olarak ele alınmamasından kaynaklanmaktadır. Açık ofislerde akustik konfor açısından, rahat iletişimin arzu edildiği bir çalışma ortamında, işitsel mahremiyetin de korunması gereklidir. Kullanılan bölücü sistemlerin bu iki farklı ihtiyaca hizmet etmesi amaçlanmakla birlikte, bu elemanların yangın esnasındaki rolleri de tartışılması gereken önemli konulardan biridir. Yangın performansı açısından dikkate alınması gereken temel ölçütler: malzemenin ısı ve alev yayılım özellikleri, duman üretim miktarı, dumanın görüş mesafesi üzerindeki etkileri ve kullanıcı tahliyesini etkileyen sınır değerler ile ilişkili parametreleridir. Bu bağlamda açık ofis bölmeleri, yalnızca mekânsal düzenleme unsurları değil, aynı zamanda hem risk hem de konfor düzeyini belirleyen teknik bileşenler olarak değerlendirilmelidir. Bu çalışma, açık ofis bölmelerinin yangın ve akustik alanlarındaki temel performans kriterlerini derleyerek, iki disiplin arasındaki etkileşim noktalarını disiplinlerarası bir referans çerçevesi içerisinde tartışmayı amaçlamaktadır.

Anahtar kelimeler: Açık ofis tasarımı, Modüler çalışma istasyonu, Akustik konfor, Yangın güvenliği, Performans temelli tasarım.

INTERACTION BETWEEN ACOUSTIC COMFORT AND FIRE SAFETY PERFORMANCE INTERACTIONS IN OPEN-PLAN OFFICE PARTITIONS

ABSTRACT

Open-plan office design has become a widely adopted workplace model in contemporary architectural practice due to its potential to enhance collaboration and communication, improve spatial efficiency, and reduce operational costs. Despite directly affecting user comfort, partitions used in open-plan office layouts often fail to provide the expected functional performance. This limitation primarily results from the lack of a holistic design approach that integrates acoustics, fire safety, and other environmental control systems. From an acoustic perspective, open-plan offices are required to support a working environment with comfortable communication and ensure speech privacy. Accommodating these two conflicting requirements simultaneously renders partition systems a critical design element. Beyond acoustics, the role of these elements during fire scenarios constitutes another significant issue that requires careful consideration. Key fire performance criteria include heat and flame spread characteristics, smoke production levels, visibility in smoke, and occupant evacuation threshold parameters. In this context, open-plan office partitions should be regarded not merely as spatial organizing elements, but as technical components that directly influence both risk and comfort levels. This study aims to compile the fundamental performance criteria for open-plan office partitions regarding fire safety and acoustics, and discuss the interactions within an interdisciplinary reference framework.

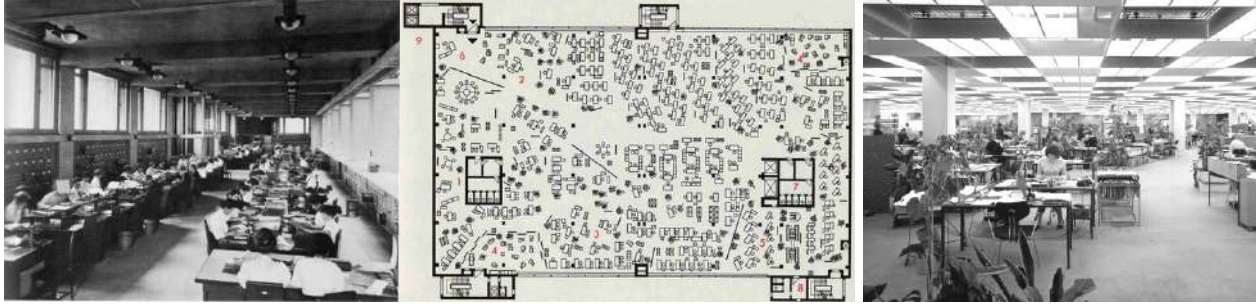
Keywords: Open-plan office design, Modular workstations, Acoustic comfort, Fire safety, Performance-based design

¹ e-posta adresi: knilufer@metu.edu.tr

² e-posta adresi: isin.meric@gmail.com

1. GİRİŞ

Modern mimari yaklaşımlarda açık ofis tasarımları, işbirliğini ve iletişimi artırması, mekân verimliliği ve maliyet avantajı sağlaması nedeniyle mevcut geleneksel çalışma modelini değiştirerek yeni çalışma alanı modeli haline gelmiştir [1, 2]. Dönüşen ihtiyaçlar çerçevesinde, ofis tasarımı yönetim teorileri, teknolojik ilerlemeler ve değişen işgücü ihtiyaçları doğrultusunda şekillenmiştir. Ofis tasarımının sistematikleşmesi, 20. Yy başlarında Frederick Taylor'ın Bilimsel Yönetim İlkeleri ve Sanayi Devrimi'nin ilkeleriyle paralel olarak başlamıştır. Bu dönemde ofisler, kâğıt fabrikalarındaki montaj hattına benzeyen "Bullpen" (Boğa Ağılı) modeli ile tasarlanmaktaydı [3] (Şekil 1a). Bu teorinin mekânsal yansıması, çalışanların uzun sıralar halinde geniş bir alanda oturduğu düzendir. Sanayi tipi ofislere bir tepki olarak geliştirilen "Bürolandschaft" (Büro Peyzajı) ofis modeli, örgütsel ve teknolojik değişimlerle birlikte esneklik kavramının önem kazanmasıyla Almanya'da 1960'ta ortaya çıkmıştır [4]. Bu konsept, fiziksel bariyerlerin kaldırılarak iletişimin hızlandırılmasını amaçlayan organik bir yapıda düzenlenmiştir (Şekil 1b-1c).



Şekil 1. a) Larkin yönetim binası (Frank Lloyd Wright, 1904) [5] b) Bertelsmann Yayınevi kat planı (Quickborner Team, Gütersloh, 1961) [6] c) Bertelsmann Yayınevi ofisi [7]

Büro peyzajı kavramından hemen sonra, Herman Miller mobilya şirketi ofis mobilyalarının yapılan işin türüne göre şekillendirilebilen bir "parça kiti" olması gerektiği fikriyle "Action Office" yaklaşımını tanıttı [4]. Bu süreç daha sonrasında düşük maliyet ve yüksek yoğunluk odaklı "cubicle farm" (küçük tarlalar) modeline dönüştü. İşgücünün daha nitelikli hale gelmesiyle mahremiyet ve etkileşim dengesi önem kazandı. Kombi-Ofis modeli (1977), bireysel konsantrasyon için küçük özel odalar ile ortak alanları birleştirmiştir [8]. 1980'lerde kişisel bilgisayarların ofislere girişi, kâğıt bazlı iletişimi azaltarak ofis geometrisini ve teknik altyapı gereksinimlerini kalıcı olarak değiştirdi. 1990'larda "flex-office" (esnek ofis) modelinde, çalışanların sabit bir masası yoktur; boş bir alanı rezerve ederek çalışırlar (hot-desking). Günümüzde çokça bahsi geçen "aktivite temelli ofis" kavramı ise tüm bu değişim ve gelişmeler neticesinde oluşan, çalışanların farklı faaliyet türlerine bağlı olarak en uygun çalışma alanını seçebildikleri esnek bir ofis yaklaşımıdır.

Bu tarihsel değişimle birlikte, açık ofis mekânları 20. yy ortalarından itibaren hiyerarşik ve hücreli ofis tipolojilerinin yerini alarak, yatay iletişimi ve organizasyonel esnekliği önceleyen bir mekânsal paradigma sunmuştur. Bu planlama modeli, yapı fiziği açısından mekânsal konfor ve güvenliğin sağlanmasında yeni performans gereksinimlerini beraberinde getirmiştir. Hücreli ofis planlamasında tam yükseklikte iç duvarlar aracılığıyla sağlanan akustik kontrol, yangın bölgelendirmesi ve duman sınırlaması gibi pasif mekanizmalar, açık ofis düzeninde yerini masa bölücüler, akustik paneller, asılı tavan sistemleri ve modüler mobilya elemanlarına bırakmıştır [9,10]. Literatürde, açık planlı hacimlerde iç mekân bileşenlerinin yangın gelişimi, duman hareketi

ve kullanıcı tahliyesi üzerindeki etkilerinin belirgin olduğu; aynı zamanda bu elemanların akustik konforun sağlanmasında kritik rol oynadığı vurgulanmaktadır [11, 12]. Akustik konfor ve yangın güvenliği, açık ofis tasarımında ortaya çıkan etkileşimler ve olası karşıtlıklar nedeniyle tasarım kararları bütüncül bir yaklaşımla ele alınmalıdır. Bu çalışmanın amacı, açık ofis bölücü sistemlerini akustik konfor ve yangın güvenliği bağlamında tanımlanan performans kriterleri üzerinden değerlendirmek; bu iki alan arasında ortaya çıkan destekleyici ve karşıt etkileri performans temelli bir çerçevede tartışmaktır.

2. AÇIK OFİS TASARIMINDA PERFORMANS KRİTERLERİ

2.1. Açık Ofislerde Akustik Konforun Değerlendirilmesi

Açık ofis akustiğine odaklanan çalışmalar; akustik parametre ölçümleri, kontrollü ortamlarda gerçekleştirilen bilişsel performans testleri ve kullanıcıların algı ve deneyimlerine dayalı araştırma bulgularını birlikte ele alınarak konuya ilişkin kapsamlı bir bilgi birikimi ortaya koymaktadır. Yapılan çalışmalarda akustik ortamı tanımlamada kullanılan en önemli parametrelerden birisi ortamın gürültü düzeyidir. Çalışma ortamında arka planda yer alan ve kullanıcılara rahatsızlık veren, istenmeyen sesler gürültü olarak algılanmaktadır. Gürültü olarak nitelendirilen seslere, yüksek sesli konuşmalar, telefon, faks, bilgisayar gibi ofis cihazlarından gelen sesler, genel ofis içi insan hareketliliğinden kaynaklı sesler, havalandırma sisteminin oluşturduğu sesler ve bina dışından gelen taşıt trafiği gürültüsü dâhil edilebilir. Türkiye’de ve dünyadaki yönetmelikler ve ofis akustiği ile ilgili standartlarda, bina içine etkiyen çevresel gürültü ve servis ekipmanı kaynaklı gürültü için 35-44 dBA düzeyinde değişen sınır değerleri verilmektedir [13,14,15].

Yapılan araştırmalar ofis içi rahatsızlığın, dışarıdan ofis içine etkiyen trafik gürültüsü, aydınlatma tesisatının gürültüsü veya havalandırma sistemlerinin gürültüsü gibi sürekliliğe sahip, bilgi içermeyen gürültüden ziyade, bilgi içeren ve görev dışı konuşmaların daha fazla rahatsızlığa sebebiyet verdiğini göstermektedir [16,17,18]. Konu ile ilgili, ofis akustiği çalışmalarında akustik mahremiyet, konuşma mahremiyeti olarak adlandırılan kavram çokça ele alınmaktadır. Mahremiyetin sağlanması konuşmanın anlaşılabilirliği ile doğrudan ilintilidir. Konuşmanın anlaşılabilirliğini ölçen ve Amerika kıtasında kullanılan başlıca parametreler Artikülasyon İndeksi (Articulation Index, AI) ve Konuşma Anlaşılabilirlik İndeksidir (Speech Intelligibility Index, SII). Artikülasyon indeksinin 0,15’in ve Konuşma Anlaşılabilirlik İndeksinin ise 0,2 değerinin altında olması ile yeterli işitsel mahremiyet sağlanabilir. [19, 20, 21] Konuşmanın anlaşılabilirliğini gösteren ve kullanımı yaygın olan ölçülebilir bir diğer metrik ise Konuşma İletim İndeksidir (STI). STI konuşma sinyalinin genlik modülasyonlarının, oda akustiği (yankılanma) ve arka plan gürültüsü etkisi altında uğradığı azalımı nicel olarak tanımlayan Modülasyon İletim Fonksiyonu (MTF) yaklaşımına dayanır [22]. STI değişiminin bilişsel performansa etkisini ortaya koymak adına yapılan çalışmalarda, katılımcıların farklı akustik ortam koşulları altında bilişsel testlerdeki başarımları düzeyleri ölçülmüştür [23]. Sonuçlara göre STI değerlerinin 0,5’in altına düşmesi ile birlikte bilişsel performansta kayıplar hızla azalmaya başlamaktadır, 0,2’nin altında STI değerlerinde ise ortamın etkisi bilişsel performansta bir değişime sebep olmamaktadır [23, 24].

Açık planlı ofislerde konuşma mahremiyetinin değerlendirilmesinde kullanılan diğer tek sayılı ölçütler; dikkat dağılma mesafesi (r_D), Konuşma sesinin A-ağırlıklı ses basınç düzeyinin azalma oranı ($D_{2,S}$), 4m uzaklıktaki konuşma sesinin A ağırlıklı ses basınç düzeyidir ($L_{p,A,S,4m}$) [24]. Dikkat

dağılma mesafesi (r_D); STI değerinin 0,5'in üzerine çıktığı mesafedir. Dolayısıyla bu mesafe ne kadar kısa olursa, konuşmanın gizliliğinin hüküm sürdüğü alan da o kadar dar olacaktır. Bu da bellek ve dikkat performansını bozan, görevle ilişkili olmayan konuşmaların anlaşılmasını sınırlandıracaktır. Konuşma sesinin A-ağırlıklı ses basınç düzeyinin azalma oranı ($D_{2,S}$), ise kaynak–alıcı mesafesinin iki katına çıkarılması durumunda düzeyde gözlenen azalışı tanımlar. Bu değer yüksek olması, ses enerjisinin mekân içinde mesafeye bağlı olarak daha hızlı azaldığını ve dolayısıyla sesin yayılımının daha kısa mesafede sönümlendiğini gösterir. ISO 3382-3 standardında bu parametrelere ait değerler için Çizelge 1’de görülen sınıflandırma yapılmıştır.

Çizelge 1. Tek sayılı ölçütlere göre açık ofis akustik ortam sınıflandırması

Açık ofis akustik ortam sınıfı	r_D	$D_{2,S}$	$L_{p,A,S,4\text{ m}}$
Yetersiz	$> 10\text{ m}$	$< 5\text{ dB}$	$> 50\text{ dB}$
İyi	$\leq 5\text{ m}$	$\geq 7\text{ dB}$	$\leq 48\text{ dB}$

Farklı ülkelerdeki açık ofis standartları ISO 3382-3’te yer alan değerlendirme parametrelerinin bir bölümünü veya tümünü kendi derecelendirme sistemi içerisinde kullanmış, ayrıca ek olarak çınlama süresine (T) dair hedef değerler de paylaşmıştır. Larrieu & Harvie-Clark’ın [15] çalışmalarında, ülkelerarası farklı hassasiyetlere göre akustik parametreler için hedef aralıklarının değiştiğini, bazı ülkelerdeki standartlarda yer alan parametrelerin diğer ülke standardında olmayabildiğini belirtmişlerdir. Çeşitli ülkelerde yürütülen çok sayıda çalışmanın bulgularına dayanarak, 2021’de açık ofis ortamlarında akustik kalite şartlarının sunulduğu ISO 22955 [25] standardı yayınlanmıştır. Bu standartta, farklı ofis çalışma düzenlerine göre akustik parametreler için ayrı hedef değerler belirtilmiştir.

Açık ofis ortamlarında konuşma mahremiyetinin sağlanması doğrudan iletilen sesin kontrolünün dışında, arka plan gürültü düzeyi ile yakından ilgilidir. STI parametresinde de dikkate alınan bir unsur olan sinyal-gürültü oranı, konuşma sesinin düzeyi ile arka plan gürültüsünün düzeyi arasındaki farkı ifade eder. Tasarım kararı nedeniyle veya pratik olarak separatör ve ses yutucu malzeme kullanımının sinyal-gürültü oranını değiştirmede yeterli olmadığı durumlarda, ses maskeleye sistemleri kullanılabilir. Maskeleye sistemleri, rahatsız edici olmadan konuşma sesini bastırmak amacıyla uygun düzeyde arka plan sesi üretmek üzere tasarlanmış sistemlerdir [21]. Havalandırma gürültüsüne benzer nitelikte geniş bir frekans aralığında etkin olan bu sesler için 45 dBA düzeyi ideal olarak tanımlanmış, 48 dBA ise rahatsızlığın başlayabileceği üst sınır olarak belirtilmiştir. Açık ofislerde, uygun mekânsal yerleşim, nitelikli malzeme seçimi ve bireysel çalışma alanlarının doğru ebat ve düzen içerisinde kurgulanmasıyla ideal akustik otama ulaşılabilir. Bununla birlikte, söz konusu tasarım kararlarının yangın güvenliği performansı açısından da bütüncül bir yaklaşımla ele alınması önem taşımaktadır.

2.2. Açık Ofislerde Yangın Güvenliği Performans Kriterleri

Geleneksel hücresel ofis düzenlerinden farklı olarak, açık planlı ofislerde yangın mekân içinde heterojen biçimde gelişebilmektedir. Dumanın geniş hacimlerde tabakalaşması, bölücüler ve tavan sistemleri gibi yapı elemanlarının yangın dinamiklerine doğrudan katkı sağlaması nedeniyle, açık planlı ofislerin yangın güvenliği tasarımı performans temelli bir çerçevede ele alınmalıdır [26]. Yangın performans analizlerinde akışkan hareketi CFD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) temelli FDS yazılımı sağlanmaktadır [27]. FDS, duman, ısı ve toksik ürünlerin yayılımına bağlı olarak

ortamın tahliye açısından tolere edilebilir olduğu süre (ASET) hesaplarında yaygın olarak kullanılmaktadır. RSET ise tahliye performans analizleriyle kullanıcıların güvenli bölgeye ulaşması için gerekli süreyi tanımlar [28]. Açık ofislerdeki yangın güvenliği dinamiklerini ve yapıların performansını anlamak amacıyla yapılan literatür araştırmasında, yangın yükü parametreleri, açık plan kompartımanlarda yangın yayılımı, duman hareketi ve tahliye performansı ile aktif söndürme sistemlerinin performansı olmak üzere dört ana çalışma alanı öne çıkmaktadır. İlk çalışma alanında, yangın performans senaryosunun temel parametresi, toplam yanma enerjisini ifade eden ve yangının şiddeti ile süresinin belirlenmesinde kritik rol oynayan yakıt yükü yoğunluğudur (MJ/m^2). Ofis tasarımında yakıt yükü hesaplaması, ofis türüne, kullanıcı yoğunluğuna ve içerik kompozisyonuna bağlı olarak önemli değişkenlik göstermektedir [12]. Ayrıca, modern ofis tasarımlarında elektronik ekipman ve polimer esaslı malzeme oranının artmasıyla birlikte geleneksel referans değerler de güncellenmelidir. Ofis yangın yükü anket çalışmaları, istatistiksel dağılım göstererek ve tasarım değerinin belirlenmesinde ortalama yerine üst yüzdelik dilimlerin dikkate alınmasının tutarlı sonuçlar verdiğini göstermektedir [29, 30]. Ayrıca, açık ofis tasarımında farklı yangın yükü hesaplama yöntemlerinin sonuçlar üzerinde anlamlı fark oluşturabileceği ve ani alevlenme (flashover) süresinin doğrudan yangın yükü ve havalandırma koşullarıyla ilişkili olduğu yapılan çalışmalar arasındadır [31, 32]. Performans temelli açık ofis yangın modellerinde sıklıkla kullanılan t^2 yangın senaryolarında, yangın gücü zamanın karesiyle orantılı olarak artar ve en kritik girdi yangın büyüme katsayısı değeridir [33]. Ofis düzenleri için yapılan tam ölçekli deneyler yangın büyüme hızlarının orta büyüme sınıfına ($0.007\text{--}0.017 \text{ kW/s}^2$) yakın olduğunu raporlamaktadır. Ayrıca, yangın büyümesinin temel belirleyicisinin modern ofislerde yoğun olarak kullanılan polimer esaslı malzemeler olduğu, kâğıt gibi selülozik malzemelerin ise yangının toplam süresini etkilediği ortaya çıkmıştır. Bunun yanında, bölücülerin yangın büyüme hızı üzerinde çok büyük bir etkisi gözlemlenmese de yanıcı malzeme miktarını artırarak ısı yayım hızını (HRR) yükselttiği gözlemlenmiştir [34].

Açık ofis kompartımanlarındaki yangın yayılım davranışları çalışmalarında, yangının gelişimi klasik homojen sıcaklık varsayımından saparak mekân boyunca ilerlediğini (travelling fire) göstermiştir [10]. Bu durumda, açık plan kompartımanlarda yangın yayılımını havalandırma koşulları belirlemekte; açıklık oranı ve hava beslemesi yayılım davranışını tetiklemektedir [35]. Açık tavan sistemlerinde yanıcı malzeme kullanımının yangın evrelerinin geçişlerini hızlandırdığı, büyüme hızını etkileyebildiği ve yalıtımlı (kompozit) tavan malzemelerinin ısı dağılımını değiştirebildiği yapılan güncel çalışmalardır [27, 36].

Tahliye performans analizlerinde tolerans eşiği (tenability), sıcaklık, ısı akışı, toksik gaz maruziyeti (CO) ve duman yoğunluğu üzerinden değerlendirilerek, yangın sırasında oluşan ısı ve toksik koşulların tahliyeyi güvensiz hale getirdiği sınır değeri ifade edilir [37]. Uluslararası standartlarda tanımlanan eşik değerleri: SFPE'ye göre 2.5 kW/m^2 ısı akışı olup yaklaşık 200°C , NFPA 130 standardında 2.5 kW/m^2 ve 120°C , BSI ise 2.0 kW/m^2 ve baş hizasında 115°C sınırındadır [38, 39, 40]. Toksik gaz maruziyeti değerlendirmesinde, doz ve zaman ilişkilerine dayanan $\text{FED}=1.0$ (Fractional Effective Dose) değeri limiti (incapacitation) temsil etmektedir [41]. Diğer yandan, duman hareketinin tahliye performansına etkisi çalışmalarında, 3 m görüş mesafesi eşik değeri (geri dönme) ile ilişkilenebilir, 5 m üzeri ise tahliye için kabul edilebilir sayılmaktadır. Asma tavan sistemlerinde duman sızıntı performansı incelenen çalışmada, panel birleşim detaylarının ve boşluk oranının duman geçişini önemli ölçüde etkilediği ve tavan arası boşlukların duman transferine katkı sağladığı doğrulanmıştır [42]. Duman tabakası kalınlığının tavan yüksekliği ile ilişkisi gözlemlenen çalışmada ise, daha yüksek hacimlerde tabakalaşma davranışının farklılaştığı ortaya

konmuştur [43]. Ayrıca, açık plan kompartımanlarda tavan sıcaklık dağılımının asimetrik açıklıklara bağlı olarak heterojen değişimi de yapılan çalışmalar arasındadır [44].

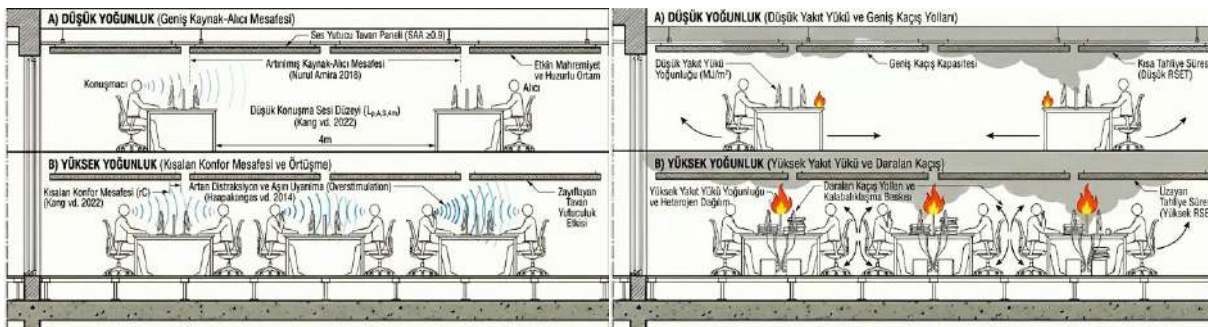
Son olarak, aktif söndürme sistemlerinin yangın gelişimi ve tahliye performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Tam ölçekli ofis yangın testleri, sprinkler sistemlerinin erken aktivasyon durumunda yangın büyümesini etkin biçimde sınırlayabildiğini ve maksimum ısı yayılım hızını kontrol altında tutabildiğini göstermektedir [11]. Ayrıca, FDS ile entegre yangın tahliye simülasyonlarında, tahliye süresinin doğrudan duman yayılım dinamiklerine bağlı olduğunu ve erken duman kontrolünün tahliye başarısını belirleyici bir faktör olduğunu gösterilmiştir [45,46]. Bu bağlamda açık ofislerde performans temelli yangın güvenliği değerlendirmesi, yangın büyümesi, duman tabakası gelişimi, toksik gaz birikimi, algılama ve aktif sistem aktivasyon süresi gibi ölçülebilir parametrelerin bütüncül olarak ele alınmasını gerektirmektedir.

3. KARŞILAŞTIRMALI ANALİZLER

Ofis içi genel kullanım kaynaklı gürültünün kontrolü ve işitsel mahremiyetin sağlanması amacıyla, açık ofis düzenlerinde yapılan aktivitelere göre mekânsal bölünme yapılmakta; bu bölgelerin diğer alanlardan ayrılması için paravan ve masa üzeri bölücülerden yararlanılmaktadır. Ayrıca iç mekânda çoklu yansımalar sonucu ses düzeyinin artmasını sınırlamak üzere tavan, duvar ve zemin yüzeylerinde ses yutucu malzemeler kullanılmaktadır. Yapılan yerinde ölçümler ve kontrollü deneylerde açık ofislerde akustik konfor ölçütlerinde ideal değerleri sağlayan tasarım unsurlarının yangın yayılımı ve kontrolüne olan etkisi bu bölümde tartışılmıştır.

3.1. Kullanıcı sayısı ve yoğunluğu

Geleneksel kapalı ofislerle karşılaştırıldığında, açık ofisler ekonomik ve ergonomik tercihler sebebiyle çalışan sayısı fazla olan mekânlardır. Yadav ve ark., açık ofislerde çalışma istasyonlarının sayısının artmasının artan ses kaynakları nedeniyle arka planda maskeleye etkisini artırarak işitsel mahremiyete katkı sağladığını, diğer yandan çalışma istasyonlarının ofis içerisindeki belli alanlarda yoğunlaşması durumunun ise yakın istasyonlarda konuşmaların daha net anlaşılabilir çalışmalara rahatsızlık verdiğini belirtmişlerdir [47]. Haapakangas ve ark., çalışma istasyonu yoğunluğu arttıkça, dikkat dağınıklığı mesafesi içinde kalan "ses kaynağı" (konuşan kişi) sayısının da arttığını, bunun da mevcut oda akustiği önlemlerinin (yutucu tavan vb.) etkinliğini zayıflattığını vurgulamışlardır [48]. (Şekil 2a). Nurul Amira Abd Jalil çalışma istasyonu boyutunu büyütmenin veya kullanıcı sayısını azaltmanın, kaynak ve alıcı arasındaki mesafeyi artırarak akustik performansı iyileştirdiğini belirtmiştir [49].

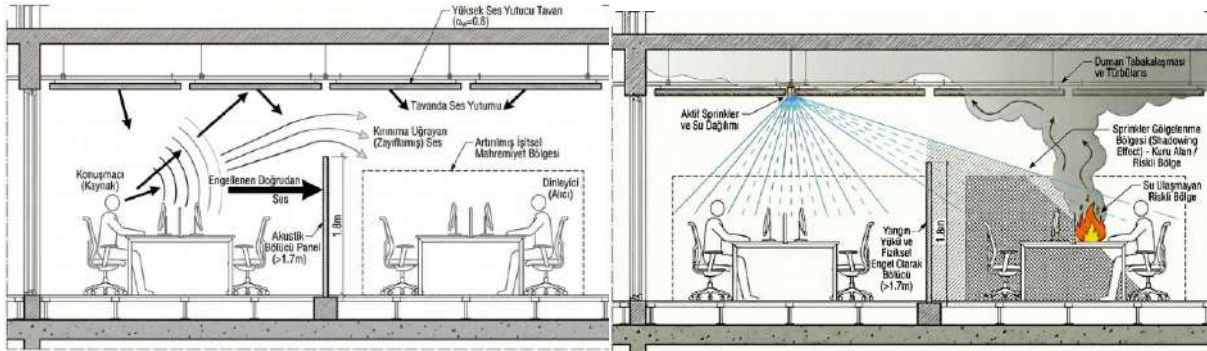


Şekil 2. Açık ofislerde kullanıcı yoğunluğunun a) akustik konfor ve b) yangın davranışına etkisi

Yangın performansı açısından, kullanıcı yoğunluğu arttıkça, masa sayısı ve istasyon başına yanıcı malzeme yoğunluğu da artma eğiliminde olduğundan, kompartımanın yakıt yükü yoğunluğu (MJ/m^2) yükselir ve yakıtın mekânsal dağılımı daha heterojen hale gelir. Tahliye açısından, yoğunluk artışı aynı zamanda hareket öncesi ve hareket süresi (RSET) bileşenlerinde artış yaratır ve çıkış kapasitesi ve kaçış yolu tasarımında önlem alınmazsa, güvenlik marjı küçülür. Yüksek yoğunluklu açık ofislerde, akustik performans müdahaleleri yangın senaryosunda yakıt yükünü ve duman hareketini artırabileceğinden, tasarım sınırları birlikte doğrulanmalıdır (**Şekil 2b**).

3.2. Bölücü panel yüksekliği ve geometrisi

Açık ofis akustiği üzerine yapılan çalışmaların çoğunda masalar arası kullanılan bölücüler konu edinilmiştir. Literatürde, masa üzeri bölücülerin yüksekliği, bölücü kaplamasının ses yutucu özelliği ve bölücülerle şekillenmiş masa gruplarında çalışanların birbirlerine göre olan konumları incelenmiştir. Elde edilen bulgulara göre, masaüstü bölücülerin yüksekliğinin işitsel mahremiyete olan etkisi bölücü yüksekliği 1,5 metrenin üzerinde olduğu durumda sağlanabilmiştir [50, 51, 52]. Ayrıca bölücülerin ses yutucu özellikteki tavan malzemesi ($\alpha_w=0.8$) ile beraber kullanımında daha etkili sonuçlar alınmıştır [50] (**Şekil 3a**). Ek olarak, bölücü kaplamasının yüksek yutuculuğunun komşu iş istasyonunda anlaşılabilirliği azaltmada az düzeyde bir etkisinin olduğu görülmüştür [53]. Lee ve Han çalışma istasyonlarının birbirine göre farklı konumlanışları üzerine bir çalışma yürütmüşlerdir. Çalışmalarında bölücü yüksekliğinin konuşma gizliliğini artırmada çalışma istasyonlarının birbirine göre olan konumlara (yüz yüze, paralel, çapraz konumlu vb.) kıyaslandığında daha belirleyici olduğu sonucuna ulaşmışlardır [54].



Şekil 3. Açık ofislerde bölücü panel kullanımının a) akustik konfor ve b) yangın davranışına etkisi

Yangın performansı açısından, bölücü yüksekliği yangın sırasında hava akışını değiştirerek türbülans oluşturabilir ve tavan altı sıcaklık gradyanını etkileyerek duman tabakalaşmasını ve ısı dağılımını değiştirebilir. Örneğin, daha yüksek bölücü kullanılması yangın yüküne yeni yanıcı katkı ekleyebilir ve dolayısıyla kullanıcıların tahliye tolerans limitlerine ulaşma zamanını etkileyebilir (**Şekil 3b**). Ayrıca, yüksek bölücüler sprinkler su dağılımını kısmen engelleyerek su damlacıklarının doğrudan yangın bölgesine ulaşmasını azaltabilir ve gölgelenme oluşturabilir. Bu etki özellikle 1.7 m ve üzeri bölücülerde daha belirgin hale gelmektedir. Bölücü tasarımında, akustik performans hedefleri ile bölücü malzemesinin yangına tepki sınıfı ve aktif söndürme ve algılama senaryosundaki zamanlaması (örn. sprinkler aktivasyon süresi) birlikte değerlendirilmeli; ASET–RSET güvenlik marjı senaryoya dayalı hesaplarla gösterilmelidir.

3.4. Tavan sisteminin yutuculuğu ve detayları

Açık ofislerin genelde geniş taban alanına sahip ve büyük hacimli olmaları sebebiyle, en baskın yüzeyleri tavan ve döşeme yüzeyleridir. Yapılan çalışmalar tavanda yer alan malzemenin ses yutma özelliğinin, masa arası bölücülerle beraber açık ofislerde akustik konforu sağlamada en önemli unsurlardan biri olduğunu göstermektedir. Bradley, yüksek ses yutuculuğa sahip tavan malzemesi ($SAA \geq 0,9$) ve en az 1,7 m bölücü kullanımı ile açık ofislerde hedeflenen $SII \geq 0,2$ değerine ulaşılabilirliğini belirtmiştir [21]. Benzer şekilde, Jukka Keränen ve ark., tavanın ses yutuculuğu arttıkça konuşma sesinin mekânsal azalma oranının yükseldiğini ve bunun işitsel mahremiyetin iyileşmesine katkı sağladığını göstermiştir [53].

Tavan sistemleri yangında dumanın taşınımında kritik ve sınırlayıcı yapı elemanlarıdır. Asma tavan sistemlerinin düşük frekanslardaki ses yutma performansını artırmak amacıyla arkasında bir miktar boşluk bırakılarak uygulama yapılması durumunda, tavan üstü boşluğun yangın gelişimine etkisi de sorgulanmalıdır. Çalışmalar, asma tavan sistemlerinde duman sızıntısı performansı, dumanın panel birleşim detayları ve boşluk oranı ile anlamlı biçimde değiştiğini göstermiştir. Açık asma tavanlarda, dumanın tavan üstü boşluklara geçmesiyle, hacim içinde dumanın tabakalaşması davranışını değiştirerek, farklı bir güzergâhtan yeniden hacme girerse, sıcaklık ve tahliye görüş koşulları (3-5 m) etkilenebilir. Bu nedenle, tavan akustik panel tasarımında birleşim tipi, boşluk alanı, servis geçişleri vb. detay kararları, yangın senaryosunda duman taşınımını etkileyecek parametreler olarak modellenmeli ve tahliye süresine etkisi sayısal olarak doğrulanmalıdır.

Ayrıca, akustik açıdan yüksek performans sağlayan malzemelerden en geniş frekans aralığında yutum sağlayanlar lifli yapıdaki gözenekli malzemelerdir. Ofislerde tercih edilen yüksek yutuculuğa sahip malzemeler, mineral esaslı (cam yünü vb.) yangın açısından güvenli malzemeler olabildiği gibi, polimer esaslı (polyester keçe, poliüretan sünger vb.) B ve C sınıfı gibi daha düşük yangına tepki sınıfına (TS EN 13501-1) da girebilir. Bu durumda hem akustik konfora katkı sağlayabilecek hem de yangın sırasındaki yangının gelişimine katkı sağlayacak malzemelerin seçimi önemlidir.

4. SONUÇ

Açık ofis tasarımı bir yandan konuşma gürültüsünün kontrolü ve işitsel mahremiyeti sağlarken, diğer yandan akustik performans tasarımı ile yangın anında mekânın yangın yükü dağılımı, duman hareketleri ve tahliye koşulları dolaylı olarak etkilenmektedir. Bu durum, açık ofislerin yalnızca tek bir performans alanı üzerinden değerlendirilmesini yetersiz kılmakta; bu unsurların farklı çevresel performans gereksinimleri arasındaki etkileşimlerin birlikte ele alınmasını gerekli hâle getirmektedir. Bu nedenlerle, açık ofis tasarımı kullanıcı konforu ve güvenliğini eşzamanlı olarak etkileyen çok disiplinli performans bileşenleri olarak değerlendirilmelidir. Bu çalışma, açık ofis tasarımında akustik ve yangın güvenliği disiplinleri arasında ortak bir değerlendirme zemini oluşturarak, gelecekte geliştirilecek entegre tasarım yaklaşımlarına katkı sunmayı amaçlamaktadır.

KAYNAKLAR

1. Gao, X., Yuan, M., Yang, Y., Zhang, S., Ni, J., Zhuang, W., & Geng, Y. (2026). Decoding occupant behavior in shared spaces of open-plan offices: A multi-sensor data fusion and machine learning approach. *Building and Environment*, 291, 114281. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2026.114281>
2. Hassanain, M. A. (2006). Factors affecting the development of flexible workplace facilities. *Journal of Corporate Real Estate*, 8(4), 213-220.
3. Nag, P. K. (2019). *Office Buildings: Health, Safety and Environment*. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-2577-9>
4. Hua, Y. (2007). *Designing Open-plan Workplaces for Collaboration: An Exploration of the Impact of Workplace Spatial Settings Space Perception and Collaboration Effectiveness*. Carnegie Mellon University.
5. INSinsideIDE (n.d.). Larkin Administration Building. Retrieved February 14, 2026, from <https://insideinside.org/project/larkin-administration-building-1906/>
6. Stylepark (n.d.). How the office became what it is today. Retrieved February 14, 2026, from <https://www.stylepark.com/en/news/how-the-office-became-what-it-is-today>
7. Bertelsmann Chronicle (n.d.). Services at Bertelsmann. Retrieved February 14, 2026, from <https://history.bertelsmann.com/en/milestones/view/35>
8. Lindell, V. (2015). Activity-based workplace—One size does not fit all. Chalmers University of Technology.
9. Luo, M., Zeng, Y., Su, L. C., & Huang, X. (2024). Review and application of engineering design models for building fire smoke movement and control. In *Emergency Management Science and Technology* (Vol. 4). Maximum Academic Press. <https://doi.org/10.48130/emst-0024-0001>
10. Rackauskaite, E., Bonner, M., Restuccia, F., Fernandez Anez, N., Christensen, E. G., Roenner, N., Wegrzynski, W., Turkowski, P., Tofilo, P., Heidari, M., Kotsovinos, P., Vermesi, I., Richter, F., Hu, Y., Jeanneret, C., Wadhwani, R., & Rein, G. (2022). Fire Experiment Inside a Very Large and Open-Plan Compartment: x-ONE. *Fire Technology*, 58(2), 905–939. <https://doi.org/10.1007/s10694-021-01162-6>
11. Bennetts, I. D., Moinuddin, K. A. M., Thomas, I. R., & Proe, D. J. (2008). Sprinklered Office Fire Tests. *Fire and Materials*, 32(3), 159–198. <https://doi.org/10.1002/fam.961>
12. Ding, Y., Cheung, W. K., Zhang, Y., & Huang, X. (2024). Digitized fuel load survey in commercial and university office buildings for fire safety assessment. *Fire Safety Journal*, 150. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2024.104287>
13. Binaların Gürültüye Karşı Korunması Hakkında Yönetmelik (2017). <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=23616&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5>
14. Rasmussen, B., & García, T. C. (2019). Acoustic regulations for offices – Comparison between selected countries in Europe. *Internoise 2019*.
15. Larrieu, F., & Harvie-Clark, J. (2017). Contrasting open plan office design implications from emerging French, German and Finnish standards. 24th International Conference on Sound and Vibration 2017, London.
16. Banbury, S. P., & Berry, D. C. (2005). Office noise and employee concentration: Identifying causes of disruption and potential improvements. *Ergonomics*, 48(1), 25-37.
17. Candido, C., Gocer, O., Marzban, S., Gocer, K., Thomas, L., Zhang, F., Gou, Z., Mackey, M., Engelen, L., & Tjondronegoro, D. (2021). Occupants' satisfaction and perceived productivity in open-plan offices designed to support

activity-based working: Findings from different industry sectors. *Journal of Corporate Real Estate*, 23(2), 106–129. <https://doi.org/10.1108/JCRE-06-2020-0027>

18. Kaarlela-Tuomaala, A., Helenius, R., Keskinen, E., & Hongisto, V. (2009). Effects of acoustic environment on work in private office rooms and open-plan offices – longitudinal study during relocation. *Ergonomics*, 52(11), 1423–1444.

19. Long, M., (2006), *Architectural Acoustics*, Elsevier Academic Press, Burlington, MA

20. American Society for Testing and Materials (2021). *Standard Test Method for Objective Measurement of Speech Privacy in Open Plan Spaces Using Articulation Index* (ASTM E1130-16). ASTM International.

21. Bradley, J. S. (2004). *Acoustical design for open-plan offices*. Ottawa, ON: Institute for Research in Construction, National Research Council of Canada

22. Houtgast, T., Steeneken, H. J., Ahnert, W., Braid, L., Drullman, R., Festen, J., & van Wijngaarden, S. (2002). Past, present and future of the Speech Transmission Index, Soesterberg: TNO.

23. Hongisto, V. (2005). A model predicting the effect of speech of varying intelligibility on work performance. *Indoor Air*, 15(6), 458–468. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2005.00391.x>

24. International Organization for Standardization. (2022). *Acoustics - Measurement of room acoustic parameters Part 3: Open plan offices* (ISO Standard No. 3382-3:2022).

25. International Organization for Standardization. (2021). *Acoustics — Acoustic quality of open office spaces* (ISO Standard No. 22955:2021).

26. Nothard, S., Lange, D., Hidalgo, J.P., Gupta, V., McLaggan, M.S., Wiesner, F., Torero, J.L., (2022). Factors influencing the fire dynamics in open-plan compartments with an exposed timber ceiling. *Fire Safety Journal*, 129. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2022.103564>

27. McGrattan, K., Hostikka, S., McDermott, R., Floyd, J., Weinschenk, C., & Overhold, K. (2020). Sixth Edition Fire Dynamics Simulator User's Guide (FDS). NIST Special Publication 1019, Sixth Edit, 402. <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication1019.pdf>

28. Schröder, B., Arnold, L., & Seyfried, A. (2020). A Map Representation of the ASET-RSET Concept. *Fire Safety Journal*, 115(May). <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103154>

29. Khorasani, N. E., Garlock, M., & Gardoni, P. (2014). Fire load: Survey data, recent standards, and probabilistic models for office buildings. *Engineering Structures*, 58, 152–165. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.07.042>

30. Jadon, S., & Kumar, S. (2025). Fire Load Assessment in Office Buildings: A Comparison of Survey Results. *Fire Technology*, 61(5), 3137–3163. <https://doi.org/10.1007/s10694-025-01719-9>

31. Eduful, James. (2012). *Correlation of fire load survey methodologies towards design fires for office buildings*. Library and Archives Canada.

32. Lai, C. M., Ho, M. C., & Lin, T. H. (2010). Experimental investigations of fire spread and flashover time in office fires. *Journal of Fire Sciences*, 28(3), 279–302. <https://doi.org/10.1177/0734904109347165>

33. Quintiere, J.G., 2017. *Principles of Fire Behavior*, Second Edi., CRC Press Taylor & Francis, Florida, USA.

34. Kakegawa, S., Yashiro, Y., Satoh, H., Kurioka, H., Kasahara, I., Ikehata, Y., ... & Turuda, T. (2003). Design fires for means of egress in office buildings based on full-scale fire experiments. *Fire Safety Science*, 7, 975-986.

35. Gupta, V., Hidalgo, J. P., Cowlard, A., Abecassis-Empis, C., Majdalani, A. H., Maluk, C., & Torero, J. L. (2021). Ventilation effects on the thermal characteristics of fire spread modes in open-plan compartment fires. *Fire Safety Journal*, 120. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103072>
36. Chen, C., Wiesner, F., Chu, T., Usmani, A., & Jiang, L. (2025). A conceptual design of timber-insulation mixed slab surface to mitigate large open-plan compartment fire development. *Journal of Building Engineering*, 104. <https://doi.org/10.1016/j.job.2025.112297>
37. Gwynne, S. M. v., & Rosenbaum, E. R. (2016). Employing the Hydraulic Model in Assessing Emergency Movement. In *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (pp. 2115–2151). Springer.
38. Society of Fire Protection Engineers (2019) *SFPE Guide to Human Behavior in Fire*. Second Edi. Gaithersburg, Maryland, USA: Springer. doi: 10.1007/978-3-319-94697-9.
39. National Fire Protection Association (2014) *NFPA 130 Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems, Committee Input Report: Annex B. Ventilation*.
40. British Standards Institution (2019) *BS PD7974-6: 2019: Application of Fire Safety Engineering Principles to the Design of Buildings—Part 6: Human Factors: Life Safety Strategies — Occupant Evacuation, Behaviour and Condition (Sub-system 6)*. London, UK: BSI.
41. Purser, D. A., & McAllister, J. L. (2016). Assessment of Hazards to Occupants from Smoke, Toxic Gases, and Heat. In *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (pp. 2308–2428). Springer.
42. Chou, T. L., Tang, C. H., Chuang, Y. J., & Lin, C. Y. (2020). Study on smoke leakage performance of suspended ceiling system. *Sustainability (Switzerland)*, 12(18), 1–13. <https://doi.org/10.3390/su12187244>
43. Wu, Z., Liu, K., Yang, J., Shao, L., Qin, H., & Wei, X. (2024). Study on the variation law of smoke layer thickness with ceiling structure height in long-narrow space with one end opening. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-70557-6>
44. Shan, X., Li, Y., Jiang, Y., & Hu, Y. (2025). Experimental study and physical modeling of ceiling temperature distribution of fires in a large open-plan compartment with unilateral asymmetric openings. *Case Studies in Thermal Engineering*, 65. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105638>
45. Yan, Z., Wang, Y., Chao, L., & Guo, J. (2024). Study on Evacuation Strategy of Commercial High-Rise Building under Fire Based on FDS and Pathfinder. *Computer Modeling in Engineering and Sciences*, 138(2), 1077–1102. <https://doi.org/10.32604/cmes.2023.030023>
46. Mizuno, M., Harada, K., & Wakamatsu, T. (2004). Analysis on target safety level for egress from a fire room and a fire floor in typical office buildings. *Fire Science and Technology*, 23(5), 402-462.
47. Yadav, M., Kim, J., Hongisto, V., Cabrera, D., & de Dear, R. (2025). Noise disturbance and lack of privacy: Modeling acoustic dissatisfaction in open-plan offices. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 157(5), 3378-3389.
48. Haapakangas, A., Hongisto, V., Hyönä, J., Kokko, J., & Keränen, J. (2014). Effects of unattended speech on performance and subjective distraction: The role of acoustic design in open-plan offices. *Applied Acoustics*, 86, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2014.04.018>
49. Abd Jalil, N. A. B. (2018). *Acoustical Design Strategies for Open-Plan Workstations in Green Office Buildings*. University of Malaya, Faculty of Built Environment.
50. Keränen, J., Hakala, J., & Hongisto, V. (2020). Effect of sound absorption and screen height on spatial decay of speech—Experimental study in an open-plan office. *Applied Acoustics*, 166, 107340.

51. Wang, C., & Bradley, J. S. (2002). Prediction of the speech intelligibility index behind a single screen in an open-plan office. *Applied Acoustics*, 63(8), 867–883.
52. Yüce, M. Y. (2009). An Acoustical Evaluation Model for Open Plan Offices [MSc]. Istanbul Technical University.
53. Virjonen, P., Keränen, J., Helenius, R., Hakala, J., & Hongisto, V. (2007). Speech Privacy Between Neighboring Workstations in an Open Office: A Laboratory Study. *Acta Acustica United With Acustica*, 93, 771–782.
54. Lee, S. M., & Haan, C. H. (2024). Influence of partition layouts on speech privacy in open-plan offices. *Heliyon*, 10(17).

ULUSLARARASI STANDARTLAR BAĞLAMINDA TÜRKİYE'DE NSEB MEVZUATI VE DEVLET TEŞVİKLERİ

Nagihan Küçükönder^{1*}

Atacan Akgün²

Selman Sevindik³

¹ Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı, Kayseri

² Bağımsız Araştırmacı

³ Erciyes Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Kayseri

ÖZET

Sanayileşme, kentleşme ve nüfus artışı ile artan enerji tüketimi, iklim krizini derinleştirmektedir. Bu durum, enerji politikalarının yeniden yapılandırılmasını gerektirmektedir. Binalar, enerji tüketiminin büyük bir bölümünü oluşturduğundan, yapı sektöründeki enerji tüketiminin azaltılması ve enerji verimli binaların yaygınlaştırılması kritiktir. Bu çalışma, Türkiye’de binalarda enerji verimliliğiyle alakalı mevzuatın uluslararası standartlarla karşılaştırılmalı analizini ve devlet teşviklerinin nSEB’in yaygınlaştırılmasındaki rolünü araştırmayı amaçlamaktadır. Çalışma; enerji verimli binaların tarihsel gelişimini, ulusal yönetmeliklerin incelenmesi ve Avrupa Birliği başta olmak üzere farklı koşullara sahip ülkelerdeki enerji politikaları ve devlet teşvik mekanizmalarının karşılaştırılmalı analizini içermektedir. Araştırma yöntemi olarak kapsamlı literatür taraması, kurum raporları, teknik mevzuat analizi kullanılmıştır. Bu doğrultuda, Türkiye’deki düzenlemeler; kapsam, zorunluluk, performans kriterleri, denetim, maliyet ve finansal destek açısından detaylıca analiz edilmiştir. Uluslararası yaklaşımlar incelenirken ise AB, EPDB Direktifi ile genel bir çerçeve oluşturulduktan sonra Almanya, İngiltere, Japonya, Güney Afrika ve ABD gibi farklı koşullardaki ülkelerin enerji politikaları; uygulama süreçleri, kapsam, zorunluluk, performans kriterleri, denetim ve teşvik mekanizmaları üzerinden değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgularla çalışma, Türkiye’de nSEB uygulamalarının uluslararası bağlamda yeterliliğini sorgulayarak; mevzuatın netleştirilmesi, uygulama süreçlerinin güçlendirilmesi ve devlet teşvik mekanizmalarının geliştirilmesi konularında somut öneriler sunmayı hedeflemektedir. Böylece, Türkiye’nin nSEB hedeflerine daha etkin biçimde ulaşmasına destek olmayı ve bu alandaki akademik çalışmalara kapsamlı bir değerlendirme zemini sağlamayı amaçlamaktadır.

Anahtar kelimeler: Neredeyse Sıfır Enerjili Binalar, Bina Enerji Performansı, Enerji Politikaları, Enerji Verimliliği, Sürdürülebilir Bina Tasarımı.

NSEB LEGISLATION AND GOVERNMENT INCENTIVES IN TURKEY AND INTERNATIONAL STANDARDS

ABSTRACT

Increasing energy consumption driven by industrialization, urbanization, and population growth has intensified the climate crisis, making the restructuring of energy policies necessary. As buildings account for a significant share of total energy use, reducing energy consumption in building sector and promoting energy-efficient buildings are of critical importance. This study aims to analyze Turkey’s legislation on energy efficiency in buildings through a comparative assessment with international standards and to examine the role of government incentives in the dissemination of nearly zero-energy buildings (nSEB). The study covers the historical development of energy-efficient buildings, an evaluation of national regulations, and comparative analysis of energy policies and incentive mechanisms in different countries, primarily within the European Union. The research methodology is based on comprehensive literature review, analysis of institutional reports, and technical legislative assessment. Turkey’s regulatory framework is examined in terms of scope, obligations, performance criteria, inspection mechanisms, and

^{1*} nagihankucukonder@erciyes.edu.tr

financial support. International approaches are analyzed through the EU Energy Performance of Buildings Directive (EPBD), followed by a comparison of selected countries with diverse conditions. Based on the findings, the study aims to assess the adequacy of nSEB practices in Turkey and to propose concrete recommendations to improve legislation, implementation processes, and government incentive mechanisms.

Keywords: Nearly Zero-Energy Buildings, Building Energy Performance, Energy Policies, Energy Efficiency, Sustainable Building Design.

1. GİRİŞ

Küresel ölçekte enerji talebinin sanayileşme, kentleşme ve nüfus artışıyla birlikte sürekli artması iklim krizini oluşturan temel sebeplerdendir. Bu süreçte yapı sektörü, enerji tüketimi ve sera gazı emisyonlarındaki yüksek payı sebebiyle enerji politikalarında önemli bir yer bulmuştur [1]. Dolayısıyla binalarda enerji verimliliği politikaları yalnızca çevresel değil aynı zamanda yasal bir gereklilik olarak oluşturulmalıdır.

Avrupa Birliği tarafından yayınlanan Binalarda Enerji Performansı Direkti (EPBD), binaların enerji performansına yönelik çalışmalarda farklı bir boyut ortaya koymuş ve bu bağlamda “Neredeyse Sıfır Enerjili Binalar (nSEB)” yaklaşımı ön plana çıkmıştır. nSEB, enerji ihtiyacı oldukça düşük olan ve bu ihtiyacın büyük bir bölümünü yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılayan binalardır. Düşük enerji tüketimi ve yenilenebilir enerji kullanımını temel alan bu yaklaşım, ülkelerin mevzuatlarına uygun olarak yeniden şekillendirilmiştir [2].

Bu çalışma, Türkiye’de nSEB uygulamalarının mevcut durumu ile uluslararası nSEB uygulamalarını karşılaştırmalı olarak incelemekte, farklı ülkelerde benimsenen uygulama yaklaşımları ve teşvik mekanizmaları ile Türkiye’deki mevcut durum arasındaki benzerlikleri ve farklılıkları ortaya koymayı amaçlamaktadır. Çalışma kapsamında nSEB uygulamalarına yönelik enerji performans standartları, yapı teknolojileri ve yenilenebilir enerji kullanımı, ülke bazında karşılaştırmalı olarak değerlendirilmektedir.

Bu çerçevede çalışma, Türkiye’deki nSEB uygulamalarının ve destek mekanizmalarının uluslararası deneyimler ışığında değerlendirilmesine katkı sağlamayı hedeflemektedir

2. YÖNTEM

Bu çalışmada, Türkiye’deki nSEB uygulamalarının uluslararası standartlar ve teşvik mekanizmaları ile karşılaştırmalı olarak analiz edilebilmesi amacıyla dört aşamalı bir yöntem izlenmiştir. Yöntem kurgusu, hem kavramsal çerçevenin oluşturulmasını hem de teknik ve politika düzeyindeki farklılıkların ortaya konulmasını hedeflemektedir.

İlk aşamada, enerji etkin tasarım yaklaşımlarına yönelik literatür taraması gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda pasif ev, yeşil bina, net sıfır enerjili binalar ve neredeyse sıfır enerjili bina kavramları ele alınmıştır. Akademik çalışmaların yanı sıra uluslararası kurum raporları ve teknik standartlar incelenerek binaların tarihsel gelişimi ve performans kriterleri değerlendirilmiştir. Böylece çalışmanın kavramsal ve teknik altyapısı oluşturulmuştur.

İkinci aşamada, nSEB uygulamalarını farklı bağlamlarda incelemek amacıyla örneklem ülkeler belirlenmiş ve bu ülkelerin mevzuat altyapıları analiz edilmiştir. Ülke seçimi Çizelge 1’de de görüldüğü gibi; mevzuat olgunluğu, temsil edilen ekonomik model ve uygulama statüleri gibi kriterler doğrultusunda yapılmıştır. Bu kapsamda farklı iklim koşullarını temsil eden, bağlayıcı veya gönüllü uygulama sistemlerine sahip ülkeler değerlendirilerek nSEB uygulamalarının farklı boyutları ortaya konulmuştur.

Çizelge 1. Çalışma kapsamında incelenen ülkelerin seçim kriterleri

ÜLKELER	SEÇİM GEREKÇESİ	TEMSİL EDİLEN EKONOMİK MODEL	TEMEL MEVZUAT VE STANDART	UYGULAMA STATÜSÜ (ZORUNLULUK / GÖNÜLLÜLÜK)
Almanya	nSEB ve Pasif Ev standartlarında teknik öncü; AB direktiflerinin en katı uygulayıcısı temsiliyetidir.	Enerji performansına dayalı hiyerarşik hibe ve kredi modeli (KfW).	GEG (2020) / KfW	Zorunlu: nSEB (GEG) standartları yasal yükümlülüktür; Pasif Ev gönüllü sertifikasyondur.
İngiltere	Mevcut yapı stoğunun iyileştirilmesine yönelik bağlayıcı EPC altyapısı temsiliyetidir.	Finansal yükün enerji tedarikçilerine aktarıldığı "Bütçe Dışı" model.	Part L / SAP / ECO4	Zorunlu: Part L mevzuatı zorunludur; BREEAM gönüllü sertifikasyon sistemidir.
ABD	Eyalet bazlı esnek standartlar ve piyasa dinamiklerini vergi sistemiyle fonlama kapasitesi temsiliyetidir.	IRA Yasası kapsamında sunulan doğrudan vergi indirim ve kredileri.	ASHRAE 90.1 / LEED	Karma: ASHRAE minimum sınırları zorunludur; LEED gönüllü ve prestij odaklıdır.
Japonya	Yüksek teknoloji entegrasyonu ve ekipman verimliliği odaklı nSEB yaklaşımı temsiliyetidir.	Yenilenebilir enerji ve depolama teknolojileri başına sabit nakdi destekler.	ZEH Programı / CASBEE	Zorunlu: 2025 itibarıyla nSEB/ZEH standartları yasal zorunluluk kapsamındadır.
Güney Afrika	Türkiye ile benzer gelişmekte olan ekonomi ve yüksek güneş potansiyeli temsiliyetidir.	Enerji tasarrufu birimi (kWh) üzerinden kurumlar vergisi matrah indirimi.	SANS 10400-XA / Sec. 12L	Zorunlu: SANS 10400-XA yeni yapılarda minimum enerji sınırı olarak zorunludur.
Türkiye	nSEB geçiş sürecindeki yasal altyapı ve kentsel dönüşüm odaklı finansman arayışı temsiliyetidir.	EKB sınıfına dayalı, bankacılık sistemi üzerinden sağlanan faiz destekleri.	BEP-TR / YES-TR	Kısmen Zorunlu: EKB zorunludur; nSEB ve YES-TR gönüllülük/teşvik aşamasındadır.

Üçüncü aşamada, seçilen ülkeler ile Türkiye’deki nSEB uygulamaları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Bu analizde enerji performans kriterleri, yapı teknolojileri, yenilenebilir enerji kullanım zorunlulukları, sertifikasyon sistemleri ve devlet teşvik araçları temel değerlendirme başlıkları olarak ele alınmıştır. Ayrıca uygulamaların zorunlu ya da gönüllü olma durumları da dikkate alınarak sistemler arasındaki benzerlik ve farklılıklar ortaya konulmuştur.

Son aşamada, elde edilen bulgular bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmiştir. Yapılan analizler doğrultusunda Türkiye’deki mevcut nSEB uygulamalarının güçlü ve geliştirilmesi gereken yönleri belirlenmiştir. Bu kapsamda, Türkiye’nin sosyo-ekonomik yapısı ve iklimsel özellikleri dikkate alınarak uygulanabilir politika önerileri ve finansal teşvik mekanizmalarına yönelik değerlendirmeler sunulmuştur.

3. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

İklim değişikliği ile mücadele kapsamında yapı sektöründe enerji verimliliği yaklaşımı, tarihsel süreç içerisinde “Pasif Ev”, “Yeşil Bina” ve “Neredeyse Sıfır Enerjili Bina (nSEB)” kavramları üzerinden teknik açıdan giderek olgunlaşan bir düzeye ulaşmıştır. Avrupa Birliği’nin Binalarda Enerji Performansı Direktifi (EPBD) ile yasal bir çerçeveye oturtulan nSEB yaklaşımı, binaların enerji tüketiminin en düşük seviyeye indirilmesini ve kalan enerji ihtiyacının yenilenebilir enerji kaynaklarıyla karşılanmasını hedeflemektedir [3].

Ancak nSEB hedeflerinin uygulamada yaygınlaşması, yalnızca teknik standartlarla alakalı değildir. Günümüzde bu uygulamaların yaygınlaşması teknik gerekliliklerden çok ekonomik koşullarla ilişkilidir. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) verilerine göre, yüksek enerji performansına sahip binalar, geleneksel binalara kıyasla %5 ile %15 arasında değişen oranlarda ek ilk yatırım maliyeti (green premium) gerektirmektedir [4]. Bu durum, nSEB uygulamalarının yaygınlaştırılmasında finansal destek ve teşvik mekanizmalarının önemini artırmaktadır.

3.1. nSEB Projelerinde Maliyet

Geleneksel binalar genellikle daha düşük ilk yatırım maliyetleriyle inşa edilmekte; ancak yetersiz yalıtım ve verimsiz sistemler nedeniyle kullanım süresi boyunca daha yüksek enerji giderlerine yol açmaktadır. Buna karşılık, nSEB standartlarına uygun binalar yüksek performanslı yapı kabuğu, ısı pompaları ve fotovoltaiik sistemler gibi uygulamalar nedeniyle başlangıç aşamasında ek bir maliyet gerektirmekte ve bu durum “yeşil prim” (green premium) olarak tanımlanmaktadır [5]. Bununla birlikte, sağlanan enerji tasarrufu sayesinde söz konusu maliyet farkının zaman içerisinde azalabildiği görülmektedir.

Bu noktada, nSEB uygulamalarının ekonomik boyutunun değerlendirilmesinde yalnızca inşaat aşamasındaki ilk yatırım maliyetlerine odaklanmak yeterli değildir. Binanın kullanım süresi boyunca ortaya çıkan işletme maliyetlerinin de hesaplanması gerekmektedir. Literatürde “Yaşam Döngüsü Maliyeti” (Life Cycle Cost – LCC) olarak tanımlanan bu yaklaşım, enerji verimli binaların uzun vadeli ekonomik etkilerinin anlaşılmasında kullanılan temel yöntemlerden biri olarak öne çıkmaktadır [6].

Ancak yatırım kararları açısından bakıldığında, uzun vadeli avantajlardan ziyade yatırımın geri dönüş süresi daha belirleyici olmaktadır. nSEB standartlarında bina yapmak, başlangıçta geleneksel yapılara kıyasla daha yüksek bir maliyet gerektirdiği için, bu farkın enerji tasarrufu yoluyla ne kadar sürede geri kazanılabildiği yatırımcı açısından önemli bir karar kriteridir. Enerji fiyatlarının görece düşük olduğu ya da teşvik mekanizmalarının sınırlı kaldığı koşullarda geri dönüş süresi uzamakta; bu durum nSEB uygulamalarının tercih edilmemesine neden olmaktadır.

Bu nedenle, nSEB uygulamalarının yaygınlaştırılmasında finansal destek ve teşvik mekanizmaları kritik bir rol oynamaktadır. Teşvikler sayesinde ilk yatırım maliyetinin azaltılması, geri dönüş süresinin kısalmasına katkı sağlamakta ve nSEB standartlarını uygulamada daha erişilebilir hâle getirmektedir. Uluslararası örnekler, teknik olarak mümkün olan çözümlerin, yeterli finansal destek olmadan sahada karşılık bulmasının zorlaştığını göstermektedir.

3.2. Enerji Verimliliğinde Devlet Teşvik Mekanizmaları

Mevcut literatür ve ülke uygulamaları incelendiğinde, nSEB dönüşümünü desteklemek ve yüksek başlangıç maliyetlerini dengelemek amacıyla hükümetler tarafından farklı finansal destekler kullanılmaktadır. Bu mekanizmaların tercihi, ülkelerin ekonomik yapıları, kamu finansman kapasitesi ve inşaat sektörü dinamiklerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Genel olarak, uygulamaların üç ana başlık altında toplandığı söylenebilir:

- Doğrudan Hibe ve Destekler (Direct Grants): Bu mekanizma, yatırımcıya veya bina sahibine enerji verimliliği yatırımları karşılığında geri ödemesiz nakdi destek sağlanmasını içermektedir. Özellikle kamu fonlama kapasitesi yüksek ülkelerde, bu tür desteklerin yatırımın geri dönüş süresini kısaltmaya katkı sunduğu ifade edilmektedir. Almanya'daki uygulamalar bu yaklaşıma örnek olarak gösterilmektedir [7]. Hibe programları çoğunlukla belirli bir enerji performans düzeyine ulaşılması şartına bağlanmaktadır.
- Vergi İndirimleri ve Krediler (Tax Incentives & Green Loans): Bu modelde doğrudan nakdi destek yerine, yatırımcıya vergi indrimi sağlanması veya düşük faizli “yeşil krediler” sunulması söz konusudur. Amerika Birleşik Devletleri'nde yürürlüğe giren Enflasyonu Düşürme Yasası (IRA), bu yaklaşımın güncel örneklerinden biridir. Bu tür mekanizmalarda kamu bütçesinden doğrudan bir ödeme yapılmamakta; bunun yerine uzun vadeli vergi gelirlerinden feragat edilerek yatırım ortamının desteklenmesi hedeflenmektedir [8].
- Yasal Zorunluluklar ve Piyasa Temelli Araçlar: Bazı ülkelerde finansal teşviklerin yanı sıra ya da bunların yerine yasal düzenlemeler ve piyasa temelli araçlar kullanılmaktadır. İngiltere ve Japonya örneklerinde olduğu gibi, belirli bir tarihten sonra nSEB standartlarını karşılamayan binalara ruhsat verilmemesi veya karbon temelli vergilendirme uygulamaları bu kapsamda değerlendirilmektedir [9], [10].

Bu çerçevede, nSEB uygulamalarının yaygınlaştırılmasında teknik standartların tanımlanmasının yanı sıra, ülke koşullarına uygun teşvik ve düzenleme araçlarının seçilmesinin de belirleyici olduğu görülmektedir. Çalışmanın izleyen bölümünde, bu mekanizmaların farklı ülkelerdeki uygulama biçimleri ile Türkiye'nin mevcut finansal yapısı karşılaştırmalı olarak ele alınmaktadır.

4. BULGULAR

Bu bölümde, çalışma kapsamında incelenen ülkelerdeki nSEB uygulamaları ve bu uygulamaları destekleyen finansal teşvik mekanizmalarına ilişkin bulgular verilmektedir. İncelenen uluslararası örnekler, nSEB standartlarının yaygınlaşmasında finansal teşviklerin önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Bu doğrultuda, farklı ekonomik yapılar, gelişmişlik düzeyleri ve teşvik

yaklaşımlarını temsil eden Almanya, Amerika Birleşik Devletleri, Japonya, İngiltere ve Güney Afrika örnekleri seçilerek Türkiye ile karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır. Söz konusu ülkelerin çalışmaya dâhil edilmesinde, nSEB uygulamalarını desteklemek amacıyla kullandıkları farklı finansal araçlar ve teşvik modelleri belirleyici olmuştur.

4.1. Uluslararası Uygulama Örnekleri

Almanya’da bina enerji verimliliğine yönelik teşvikler, “Verimli Binalar için Federal Fonlama” (BEG) programı çerçevesinde yürütülmektedir. Alman Kalkınma Bankası (KfW) tarafından uygulanan bu sistemde, “Verimli Ev (Effizienzhaus)” standartlarını sağlayan projelere enerji performans seviyesine bağlı olarak %20 ile %45 arasında değişen oranlarda geri ödemesiz hibe desteği sağlanmaktadır [7]. Mevcut veriler, bu destek mekanizmasının özel sektör yatırımlarını harekete geçirdiğini göstermekte; 2023 yılı itibarıyla sağlanan her 1 Euro’luk kamu desteğinin yaklaşık 6 Euro’luk özel sektör yatırımıyla ilişkilendirildiği ifade edilmektedir [11].

Amerika Birleşik Devletleri’nde nSEB ve enerji verimli bina uygulamaları, ağırlıklı olarak vergi teşvikleri yoluyla desteklenmektedir. Enflasyonu Düşürme Yasası (IRA) kapsamında, ticari binalar için “Section 179D” maddesi doğrultusunda metrekaşe başına 5,00 ABD Doları’na kadar vergi indirimi uygulanırken, konut projelerinde “Section 45L” maddesi kapsamında sertifikalı her birim için müteahhitlere 5.000 ABD Doları’na kadar vergi kredisi sağlanmaktadır[8]. Bu teşviklerin uzun vadeli bir yasal çerçeveye bağlanmış olması, yatırım kararları açısından öngörülebilirlik sağlamaktadır.

Japonya, “Net Sıfır Enerjili Ev (ZEH)” yaklaşımı kapsamında teknoloji odaklı bir teşvik modeli uygulamaktadır. Çevre Bakanlığı ve METI tarafından yürütülen programlarda, ZEH kriterlerini sağlayan konutlara performans seviyesinden bağımsız olarak kurulan teknolojilere göre 550.000 JPY ile 1.000.000 JPY arasında değişen sabit sübvansiyonlar verilmektedir [12]. Bu destekler, 2025 yılı itibarıyla yürürlüğe girmesi planlanan yasal zorunluluklarla birlikte ele alınarak yapı sektöründe teknolojik dönüşümün teşvik edilmesini amaçlamaktadır [13].

İngiltere’de bina enerji verimliliği politikaları, kamu bütçesinden doğrudan hibe sağlamak yerine enerji şirketlerine yükümlülük getiren bir piyasa modeli üzerinden yürütülmektedir. “Energy Company Obligation (ECO4)” programı kapsamında büyük enerji tedarikçileri, konutların enerji verimliliği iyileştirmelerinin finansmanından sorumlu tutulmaktadır (Ofgem, 2024). Buna ek olarak, “Boiler Upgrade Scheme” aracılığıyla ısı pompası kurulumlarına 7.500 Sterlin’e kadar hibe desteği sunularak mevcut konut stokunun dönüştürülmesi hedeflenmektedir [14].

Gelişmekte olan bir ekonomi olarak Güney Afrika’da, enerji verimliliği yatırımları ağırlıklı olarak vergi teşvikleri yoluyla desteklenmektedir. “Section 12L” düzenlemesi kapsamında işletmelere, sağladıkları onaylanmış enerji tasarrufu miktarı (kWh) üzerinden vergi matrahından indirim imkânı tanınmaktadır [15]. Bu yaklaşım, kamu bütçesinden doğrudan nakit çıkışı gerektirmeden özel sektör yatırımlarının teşvik edilmesini amaçlamaktadır.

4.2. Türkiye’de Mevcut Durum

Türkiye’de nSEB sürecine geçiş kademeli olarak artırılan yasal zorunluluklar üzerinden ilerlemektedir. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından yürütülen düzenlemeler

kapsamında, 1 Ocak 2023 tarihinde toplam inşaat alanı 5.000 m²'nin üzerindeki binalar için başlatılan nSEB zorunluluğu, 1 Ocak 2025 itibarıyla güncellenerek kapsamı genişletilmiştir. Bu düzenleme ile zorunluluk sınırı 2.000 m²'ye düşürülmüş, binalarda yenilenebilir enerji kullanım oranı ise %5'ten %10'a yükseltilmiştir [16]. Ayrıca II. Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı (2024–2030) doğrultusunda, 2026 yılından itibaren belirli büyüklükteki kamu binalarında Yeşil Sertifika (YeS-TR) alınmasının zorunlu hâle getirilmesi hedeflenmektedir [17].

Finansal teşvik mekanizmaları açısından Türkiye’de nSEB uygulamalarına yönelik doğrudan ve kapsayıcı bir hibe programı bulunmamaktadır, mevcut destekler ise büyük ölçüde kentsel dönüşüm odaklı yürütülmektedir. 6306 sayılı Kanun kapsamında riskli yapıların yenilenmesine yönelik olarak uygulanan “Yarısı Bizden” kampanyası, bu alandaki en belirgin finansal araçlardan biridir. 2025 yılı uygulama rehberine göre, hak sahiplerine hibe ve kredi desteği sağlanmaktadır[18]. Buna ek olarak yakın zamanda enerji verimli binaların teşvikinin artırılması amacıyla konut kredilerinde binaların Enerji Kimlik Belgesi (EKB) sınıfına göre farklı oranlar uygulanmaya başlamış, A ve B enerji sınıfına sahip konutların kredi kullanım koşulları diğer konutlara kıyasla daha avantajlı hale getirilmiştir [19]. Bu uygulama doğrudan bir hibe ya da teşvik değil daha çok geri ödemeli kredi üzerinden dolaylı bir destek sağlamaktadır. Bu nedenle güncel uygulamanın nSEB standartlarının yaygınlaşmasına katkısı zaman içerisinde görülecektir.

4.3. Karşılaştırmalı Analiz

nSEB standartlarının ülkeler bazında uygulanma sıklıkları, yalnızca standartlar üzerinden değil; bu standartların nasıl desteklendiği üzerinden de şekillenmektedir. Kamu desteklerinin kapsamı, kullanılan finansman modelleri ve sunulan teşvikler, nSEB dönüşümünün hızını ve yaygınlığını doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle farklı ülkelerde uygulanan teşvik yaklaşımlarının ve uygulama modellerinin karşılaştırılması, nSEB politikalarının mimari ve yapı sektörü üzerindeki etkilerinin daha net biçimde değerlendirilmesini mümkün kılmaktadır. Bu çerçevede seçilen ülkelerdeki temel uygulama ve teşvik yaklaşımları Çizelge 2’de özetlenmektedir.

Çizelge 2. Teşviklerin ülkelere göre karşılaştırılması

Ülke	Temel Yaklaşım	Ana Teşvik Aracı	Finansal Destek Boyutu	Türkiye İçin Çıkarım
Almanya	Entegre Finansman	BEG (Hibe + Kredi)	%45’e varan hibe	Doğrudan maliyet azaltımı kritik
ABD	Vergi Teşviki	IRA (Vergi Kredisi)	\$5.00/sqft + \$5.000/birim	Vergi araçları etkin kullanılabilir
Japonya	Teknoloji Odaklı	ZEH Sübvansiyonu	Sabit nakit destek	Teknoloji bazlı teşvikler önemli
İngiltere	Piyasa Yükümlülüğü	ECO4	Enerji şirketi finansmanı	Kamu dışı finansman modeli

Çizelge 2. Teşviklerin ülkelere göre karşılaştırılması (devamı)

Ülke	Temel Yaklaşım	Ana Teşvik Aracı	Finansal Destek Boyutu	Türkiye İçin Çıkarım
G. Afrika	Tasarruf Bazlı	Section 12L	kWh bazlı vergi indirimi	Performans bazlı teşvik
Türkiye	Yasal Zorunluluk	EKB'ye Dayalı Kredi	Dolaylı finansman desteği	Doğrudan destek eksikliği

Çizelge 2 incelendiğinde, gelişmiş ülkelerde nSEB yaklaşımının “maliyet paylaşımı” prensibi üzerine kurulu olduğu görülmektedir. Almanya örneğinde, yüksek performanslı bir binanın getirdiği ek maliyetin önemli bir kısmı kamu tarafından üstlenilmekte ve bu durum yatırım kararlarını doğrudan teşvik etmektedir. Benzer şekilde Japonya’da teknolojiye yönelik sabit destekler, yatırımcıların belirli sistemlere yönelmesini kolaylaştırmaktadır. ABD ve Güney Afrika’da ise vergi teşvikleri aracılığıyla dolaylı ancak etkili bir finansman sağlanmaktadır.

İngiltere modeli bu yaklaşımlardan ayrılarak finansman yükünü kamu yerine enerji şirketlerine aktarmaktadır. Bu sistem, kamu bütçesi üzerindeki baskıyı azaltırken, piyasa aktörlerini sürece aktif biçimde dahil etmektedir. Bu yönüyle alternatif bir finansman modeli olarak dikkat çekmektedir.

Türkiye’de ise nSEB sürecinin ağırlıklı olarak teknik zorunluluklar ve kredi mekanizmaları üzerinden ilerlediği görülmektedir. Metrekare sınırlarının düşürülmesi ve yenilenebilir enerji oranlarının artırılması, teknik dönüşüm açısından önemli adımlar olmakla birlikte, bu dönüşümün finansal boyutu sınırlı kalmaktadır. Krediye erişimin kolaylaştırılması, yatırım kararını destekleyen bir unsur olsa da, doğrudan maliyet azaltıcı bir etki yaratmamaktadır.

Karşılaştırmalı olarak değerlendirildiğinde, Türkiye’deki mevcut modelin diğer ülkelere kıyasla daha düşük teşvik yoğunluğuna sahip olduğu söylenebilir. Özellikle doğrudan hibe mekanizmalarının bulunmaması, nSEB yatırımlarının yaygınlaşmasını sınırlayan temel faktörlerden biri olarak öne çıkmaktadır. Uluslararası örnekler, nSEB standartlarının etkin biçimde uygulanabilmesi için ilk yatırım maliyetini azaltan araçların kritik olduğunu göstermektedir.

Bu bağlamda, Türkiye’nin mevcut yaklaşımının daha dengeli ve çok boyutlu bir yapıya kavuşturulması gerekmektedir. Hibe, vergi teşviki ve piyasa temelli mekanizmaların birlikte kullanıldığı hibrit modeller, hem yatırımcı açısından daha cazip bir ortam oluşturmakta hem de dönüşüm sürecini hızlandırmaktadır. Aksi durumda, nSEB standartlarının teknik olarak tanımlanmış olsa dahi uygulamada sınırlı kalma riski devam etmektedir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışma, binalarda enerji verimliliği ve neredeyse sıfır enerjili bina (nSEB) uygulamalarının yaygınlaşmasında teknik standartlar ile finansal teşvikler arasındaki ilişkiyi bütüncül bir çerçevede değerlendirmiştir. Elde edilen bulgular, nSEB dönüşümünün yalnızca teknik düzenlemelerle

ilerleyebilecek bir süreç olmadığını; esas belirleyici unsurun ekonomik uygulanabilirlik olduğunu açık biçimde ortaya koymaktadır. Uluslararası örnekler incelendiğinde, nSEB uygulamalarında başarılı olan ülkelerde teknik gerekliliklerin güçlü ve çeşitlendirilmiş finansal teşvik mekanizmalarıyla desteklendiği görülmektedir. Bu ülkelerde, nSEB tasarımının neden olduğu ek ilk yatırım maliyeti büyük ölçüde kamu destekleriyle dengelenmekte, böylece piyasa aktörlerinin dönüşüme katılımı kolaylaştırılmaktadır.

Türkiye’de ise nSEB sürecinin daha çok mevzuat temelli bir yaklaşımla şekillendiği anlaşılmaktadır. BEP Yönetmeliği ve ilgili düzenlemeler ile teknik bir çerçeve oluşturulmuş olmakla birlikte, uygulama aşamasında maliyet azaltıcı doğrudan desteklerin sınırlı kaldığı dikkat çekmektedir. Enerji Kimlik Belgesi sınıfına bağlı olarak farklılaştırılan kredi olanakları, enerji verimli bina yatırımlarını teşvik etme açısından önemli bir adım olmakla birlikte, nSEB’in gerektirdiği ek yatırım maliyetini doğrudan düşürmemektedir. Bu durum, dönüşüm sürecini büyük ölçüde yatırımcıların finansal kapasitesine bağımlı hale getirmektedir.

Bu çerçevede, Türkiye’de nSEB uygulamalarının yaygınlaştırılabilmesi için mevcut kredi odaklı yaklaşımın ötesine geçilmesi gerekmektedir. Özellikle performansa dayalı hibe programlarının geliştirilmesi, vergi teşviklerinin etkin biçimde devreye alınması ve fotovoltaik sistemler ile ısı pompaları gibi kritik teknolojilere yönelik hedefli desteklerin sağlanması önem taşımaktadır. Bunun yanı sıra, hibe, kredi ve vergi teşviklerini bir arada içeren karma finansman modellerinin oluşturulması ve piyasa temelli mekanizmaların sürece dahil edilmesi, hem kamu mali yükünü dengeleyecek hem de yatırımcı açısından daha cazip bir ortam yaratacaktır.

Sonuç olarak, nSEB yaklaşımının Türkiye’de mevzuat düzeyinden uygulama düzeyine taşınabilmesi, çok boyutlu ve doğrudan maliyet azaltıcı teşvik araçlarının geliştirilmesine bağlıdır. İlk yatırım maliyetini düşüren ve riskleri paylaşan bir politika çerçevesi oluşturulmadığı sürece, nSEB uygulamalarının sınırlı ölçekte kalması olası görünmektedir. Buna karşılık, bütüncül ve güçlü bir finansal destek yapısının kurulması, nSEB dönüşümünün hızlanmasında belirleyici bir rol oynayacaktır.

KAYNAKLAR

1. C. Menezes, A. Cripps, D. Bouchlaghem, and R. Buswell, ‘Predicted vs. actual energy performance of non domestic buildings: Using post-occupancy evaluation data to reduce the performance gap’, *Appl. Energy*, vol. 97, pp. 355–364, 2012, doi: 10.1016/j.apenergy.2011.11.075.
2. D. D’Agostino, S. T. Tzeiranaki, P. Zangheri, and P. Bertoldi, ‘Assessing Nearly Zero Energy Buildings (NZEBS) development in Europe’, *Energy Strategy Reviews*, vol. 36, p. 100680, Jul. 2021, doi: 10.1016/J.ESR.2021.100680.
3. D. D’Agostino, ‘Assessment of the progress towards the establishment of definitions of Nearly Zero Energy Buildings (nZEBs) in European Member States’, *Journal of Building Engineering*, vol. 1, pp. 20–32, Mar. 2015, doi: 10.1016/J.JOBE.2015.01.002.
4. IEA, ‘Net Zero by 2050 – Analysis - IEA’. Accessed: Sep. 03, 2025. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
5. M. Maslin, ‘Bill Gates, How to Avoid a Climate Disaster: Solutions We Have and the Breakthroughs We Need’, *Society*, vol. 58, no. 2, pp. 156–158, Apr. 2021, doi: 10.1007/s12115-021-00581-z.

6. EU, 'II of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings by establishing a comparative methodology framework for calculating cost-optimal levels of minimum energy performance requirements for buildings and building elements...', *Official Journal of the European Union*, Mar. 2012.
7. BMWK, 'Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz', 2023. [Online]. Available: www.energie-effizienz-experten.de
8. DOE, 'Energy Efficiency and Renewable Energy FY 2023 Congressional Budget Justification Energy Efficiency and Renewable Energy Proposed Appropriation Language', 2023, Accessed: Jan. 27, 2026. [Online]. Available: <https://www.eia.gov/totalenergy/data/monthly/>.
9. METI (Ministry of the Environment), 'Definition of ZEH and future measures proposed by METI(Ministry of Economy, Trade and Industry)', 2015.
10. GOV.UK, 'The Future Homes and Buildings Standards: 2023 consultation', 2025. [Online]. Available: <https://www.gov.uk/government/consultations/the-future->
11. KfW, 'KfW-Impact-Insights-2024', 2024.
12. METI (Ministry of the Environment), 'Annual Report on the Environment in Japan 2023', 2023.
13. T. IMAMURA, 'Japan's Policy toward Carbon Neutrality in the Housing and Building Sectors AIVC International Workshop Towards high quality, low-carbon ventilation in airtight buildings', 2023.
14. J. Myers and C. Parker, 'BUS Property owner guidance', 2024, Accessed: Jan. 27, 2026. [Online]. Available: www.ofgem.gov.uk.
15. SANEDI, '2L TAX INCENTIVE Turning energy efficiency into profits', 2022.
16. ÇŞİDB, 'Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik', 2022. [Online]. Available: <https://resmigazete.gov.tr/eskiler/2022/02/20220219-2.htm>
17. ETKB, '2030 Stratejisi ve II. Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı Enerji Verimliliği', 2024.
18. ÇŞİDB, 'Kentsel Dönüşüm Başkanlığın Görev ve Yetkileri ile Taşra Teşkilatının Çalışma Usul ve Esasları Hakkında Yönetmelik', 2024.
19. BDDK, 'Bankacılık Düzenleme ve Denetleme Kurulu Kararı', Jan. 2026.

BAFFLE PANELLERİN SES YUTMA PERFORMANSININ ISO 354'E GÖRE ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ AÇISINDAN KARŞILAŞTIRILMASI

Güven Elban¹

Konca Şaher²

Seda Kulak Dalkılıç^{3*}

Feridun Öziş⁴

Suat Vergili⁴

¹BLX Akustik Araştırma Laboratuvarı

²Kadir Has Üniversitesi, Sanat ve Tasarım Fakültesi, İç Mimarlık ve Çevre Tasarımı Bölümü

³İstanbul Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü

⁴Dokuz Eylül Üniversitesi, Güzel Sanatlar Fakültesi, Müzik Teknolojileri Bölümü

ÖZET

Askı tip baffle paneller, büyük hacimli iç mekânlarda reverberasyon süresinin kontrolü ve akustik konforun iyileştirilmesi amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. ISO 354:2003 standardı, reverberasyon odasında ses yutma katsayısının belirlenmesine ilişkin yöntemleri tanımlamakta ve numunelerin kuyu veya derin kuyu düzeninde, tek ya da iki duvara bitişik konfigürasyonlarda ölçülebileceğini belirtmektedir. Ancak bu montaj farklılıkları, ölçüm sonuçlarını önemli ölçüde etkileyebilmekte ve laboratuvar verilerinin gerçek uygulamalara doğrudan aktarılmasını zorlaştırmaktadır. Bu çalışma, 223 m³ hacimli bir reverberasyon odasında ISO 354'e uygun olarak gerçekleştirilen deneysel ölçümlerle, montaj tipi (derin kuyu, kuyu) ve oda içi konumun (tek duvar, çift duvar, merkez) ses yutma performansına etkisini incelemektedir. Ölçümlerde, yüksek yoğunluklu cam yünü ve polyester keçeden üretilmiş 120 × 20 cm boyutlarında baffle paneller kullanılmıştır. Sonuçlar, derin kuyu montaj yönteminin kenar etkilerini azaltarak farklı konumlarda konumdan daha az etkilenen değerler sağladığını göstermiştir. Merkez yerleşimi genellikle daha yüksek yutma değerleri üretirken, iki duvara bitişik konfigürasyon en düşük performansı vermiştir. Bulgular, oda içi konumlandırma koşulları ve montaj tipinin ölçüm güvenilirliğinde belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: Baffle Panel, ISO 354, Ses Yutumu, Kuyu, Derin Kuyu, Kenar Etkisi.

COMPARISON OF THE SOUND ABSORPTION PERFORMANCE OF BAFFLE PANELS IN TERMS OF ISO 354 MEASUREMENT METHODS

ABSTRACT

Suspended baffle panels are widely used in large-volume interiors to control reverberation time and enhance acoustic comfort. ISO 354:2003 defines procedures for determining sound absorption in a reverberation chamber and allows measurements using well or deep-well mounting configurations, positioned adjacent to one or two walls. However, such methodological differences can significantly influence the measured absorption coefficients, limiting the direct transferability of laboratory results to real architectural applications. This study experimentally investigates the effects of mounting type (deep well and well) and room position (single wall, double wall, and center). Measurements were conducted in a reverberation chamber using 120 × 20 cm panels composed of high-density glass wool and polyester felt. Results indicate that the deep-well configuration reduces edge effects and provides more consistent absorption values across positions. Center placement generally yields higher absorption, while the double-wall configuration produces the lowest performance. These findings highlight the critical role of mounting conditions and boundary effects in reliable absorption assessment.

Keywords: Baffle Panel, ISO 354, Sound Absorption, Well, Deep Well, Edge Effect.

*Sorumlu yazar e-posta adresi: sedakulak@istanbul.edu.tr

1. GİRİŞ

Geniş hacimli iç mekanlarda oluşan uzun reverberasyon süreleri hem konuşma anlaşılabilirliğini hem de kullanıcı konforunu olumsuz etkileyebilmektedir. Bu nedenle, son yıllarda askı tip baffle paneller, mekanın işitsel koşullarının iyileştirilmesinde yaygın bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Özellikle yüksek tavanlı ofisler, eğitim yapıları, çok amaçlı salonlar, spor alanları ve endüstriyel tesislerde, tavandan sarkıtılarak uygulanan bu sistemler etkin bir akustik müdahale imkanı sunmaktadır. Düşey yerleşimleri ve her iki yüzeyinin de ses alanına açık olması sayesinde geniş bir frekans aralığında daha verimli bir ses yutma davranışı elde edilmesini desteklemektedir. Ayrıca hafif yapıları ve modüler düzenlenebilme kapasiteleri, mimari tasarıma uyum sağlamalarını kolaylaştırmakta; böylece hem teknik hem de estetik beklentilere cevap verebilen esnek akustik çözümler sunmaktadır.

Avantajlarına rağmen, baffle sistemlerin ses yutma performansının güvenilir ve tekrarlanabilir biçimde ölçülmesi hem araştırma hem de uygulama açısından önemli bir zorluk oluşturmaktadır. Bu panellerin düşey konumda ve ayırık elemanlar halinde yerleştirilmesi, standart koşullar altında test edilen sürekli yüzey tipi yutuculardan belirgin biçimde farklıdır. ISO 354:2003 [1] standardı, reverberasyon odasında malzemelerin ses yutma katsayısının belirlenmesine ilişkin prosedürleri tanımlamakta ve serbest asılı elemanlar için Tip J kapsamında özel montaj konfigürasyonları sunmaktadır. Ancak gerçek uygulamalarda, panel düzenleri ve montaj teknikleri çoğu zaman bu standart koşullardan farklılaşmaktadır. Bu durum, laboratuvar ortamında elde edilen ölçüm sonuçlarının mimari uygulamalara doğrudan aktarılabilirliği konusunda soru işaretleri doğurmaktadır; bu bağlamda kenar kırınımı, hava boşlukları, mekansal değişkenlik ve kuyu çerçevesi gibi etkenler baffle panellerin akustik davranışını önemli ölçüde değiştirebilmektedir.

Birçok çalışma, baffle panellerinin geometrisi, yoğunluğu ve aralıklarının ses yutma performansı üzerindeki etkilerini incelemiş olsa da [2-4], montaj yöntemlerinin ve test ortamındaki konumlandırmanın ses yutma performansı üzerindeki etkilerine ilişkin ampirik bulgular sınırlıdır. Özellikle baffle panellerin kenar koşulları—yansıtıcı panellerle çevrelenmiş ya da serbest bırakılmış olmaları—ölçülen ses yutma değerlerini önemli ölçüde değiştirebilmektedir ve bu durum yanıl ses kırınımını ve numunenin çevresindeki ses alanı ile etkileşimini doğrudan etkilemektedir. Buna ek olarak, reverberasyon odası içindeki mekansal konumlandırma—duvarlara ya da oda merkezine yakınlık gibi—özellikle sınır yansımaları ve mod davranışının baskın olduğu düşük ve orta frekans bantlarında ek değişkenlik oluşturmaktadır. Kawakami ve Sakai [5] ile Shanks [6] tarafından ortaya konan deneysel bulgular, kenar düzenlemeleri ve konumlandırmadaki küçük farklılıkların dahi ölçülen ses yutma katsayılarında belirgin sapmalara yol açabileceğini göstermektedir.

Bu çalışma, literatürdeki bu boşluğu gidermeyi amaçlayarak, düşey askı tip baffle panellerin ölçülen ses yutma katsayıları üzerinde montaj konfigürasyonu ve oda içi konumun etkilerini, ISO 354:2003 [1] standardına uygun yöntemlerle standartlaştırılmış bir reverberasyon odasında sistematik olarak incelemektedir. Çalışma kapsamında iki farklı montaj tipi—derin kuyu ve kuyu—ile üç farklı yerleşim senaryosu—tek duvar, iki duvar (köşe) ve oda merkezi—karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Araştırmanın temel amacı, farklı deneysel koşullar altında elde edilen sonuçların ve değişkenliğini ortaya koymak ve karşılaştırmalı veriler sunmaktır. Bu doğrultuda, kenar kırınımı ve mekansal konumun ölçülen ses yutma performansı üzerindeki etkilerinin açıklığa kavuşturulması hedeflenmiştir. Sonuç olarak, elde edilen bulguların askı tip

yutucu sistemler için ölçüm protokollerinin güvenilirliğini artırarak mimari tasarım süreçlerinde doğru yorumlama ve akustik ürün geliştirme stratejilerine katkı sağlaması amaçlanmaktadır.

2. YÖNTEM

Ölçümler, ISO 354:2003 [1] standardına uygun olarak 223 m³ hacimli reverberasyon odasında gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde, düşey doğrultuda askı sistemi ile tavandan sarkıtılarak kullanılan baffle paneller kullanılmıştır. Paneller, yüksek yoğunluklu cam yünü ve polyester keçeden üretilmiş olup her bir panelin boyutları 120 × 20 cm'dir.

Bu deneysel çalışmada, askı tip baffle panellerin ses yutma performansı üzerinde kuyu derinliği ve ölçüm düzeneğinin konumu parametrelerinin etkileri değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, ISO 354:2003 standardında tanımlanan Tip J montaj esasları temel alınarak iki farklı montaj yaklaşımı uygulanmıştır: derin kuyu (deep well) ve kuyu (well). Her bir montaj tipi için paneller oda içerisindeki üç farklı konumda test edilmiştir: tek duvara bitişik, iki duvara bitişik (köşe) ve merkezde. Baffle paneller, her bir deney koşulunda paralel sıralar halinde düzenlenmiş ve paneller arasındaki aks aralığı 30 cm olarak sabit tutulmuştur.

Ses yutma ölçümleri reverberasyon odası yöntemine dayalı olarak gerçekleştirilmiştir. Kaynak ve mikrofon konumları ISO 354 standardında belirtilen dağılım ve mesafe koşullarına uygun şekilde belirlenmiştir. Oda, çok yönlü (dodecahedron) hoparlörler kullanılarak pembe gürültü ile uyarılmıştır ve odanın farklı noktalarına yerleştirilmiş sekiz adet çok yönlü (omnidirectional) mikrofon aracılığıyla alıcı noktadaki tepkiler ölçülmüştür.

Ölçümlerde, panel yutucuların ses yutma katsayısının belirlenmesi için ISO 354 standardında tanımlanan yöntem izlenmiştir. Her bir deney konfigürasyonu için, boş oda ve numunenin yerleştirildiği oda durumlarına ait reverberasyon süreleri ölçülmüştür. Ses yutma katsayısı (α_s), iki ölçümden elde edilen eşdeğer ses yutuculuk alanları arasındaki farkın, ölçümü yapılan numunenin alanına (kuyu ile çevrelenen alan, S) bölünmesiyle belirlenmiştir. Ölçümler, 50 Hz–10 kHz frekans aralığındaki oktav bantlarında gerçekleştirilmiştir.

2.1. J Tip Montaj

Söz konusu montaj değişkenleri, özellikle kenar yansımaları ve kırınım etkileri nedeniyle ölçüm sonuçları üzerinde belirgin farklılıklara yol açabilmekte olup, bu çalışma kapsamında bu etkilerin incelenmesi amacıyla iki farklı kuyu yaklaşımı karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

2.1.1 Derin kuyu yaklaşımı

Standarta göre bu yöntemde kuyu yüksekliği, ölçümü yapılan numunenin üst kotundan itibaren 0,8 m daha yüksek olmalı; ancak aynı zamanda reverberasyon odasının toplam yüksekliğinin yarısını geçmemelidir. Bu çalışmada baffle paneller, tüm kenarları yansıtıcı panellerle çevrelenmiş ve bu yansıtıcı paneller, baffle üst kotundan 80 cm daha yüksek olacak şekilde (toplam 100 cm yükseklikte) yerleştirilmiştir. Bu montaj düzeni, kenar etkilerini azaltmak ve yanal ses kırınımını kontrol altına almak amacıyla uygulanmıştır. Derin kuyu montajı, frekans bantları boyunca en kararlı ses yutma sonuçlarını sağlayan yerleşim biçimi olarak tanımlanmaktadır.

2.1.2 Kuyu yaklaşımı

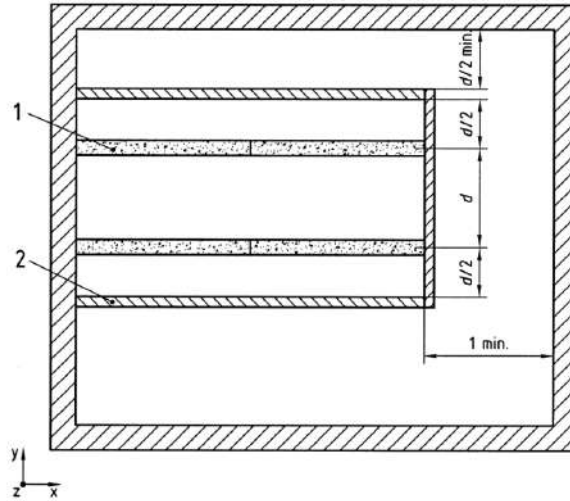
Bu yaklaşımda, standarda göre kuyunun yüksekliği numunenin üst kotu ile aynı seviyeye getirilmektedir. Bu nedenle bu çalışmada, yansıtıcı paneller baffle panellerin üst kotu olan 20 cm'e kadar yerleştirilmiştir. Bu montaj düzeni yanal yansımalar üzerinde kısmi bir kontrol sağlamakla birlikte, özellikle yüksek frekanslarda kenar kırınımını azaltmada derin kuyu yaklaşımına kıyasla daha sınırlı etkiye sahiptir.

2.2. Ölçüm Düzenineğin Oda İçindeki Konumu

Baffle tipi panellerin ses yutumu ölçümleri için ISO 354 standardı, reverberasyon odası içindeki konumlarına bağlı olarak iki farklı yaklaşım tanımlamaktadır: tek duvar ve iki duvar. Ancak karşılaştırma amacıyla oda merkezi konumu da bu çalışmaya dahil edilmiştir.

2.2.1 Tek duvar yaklaşımı

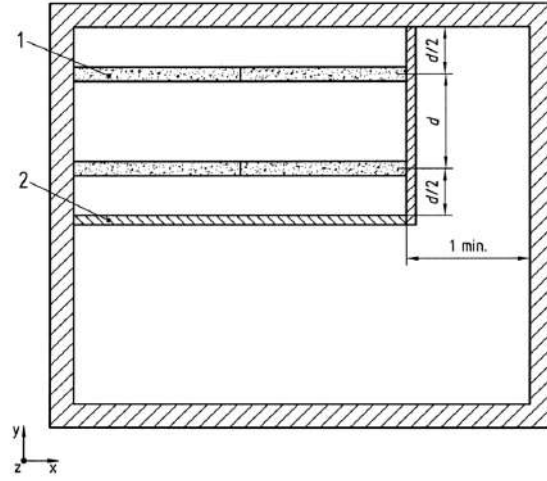
Ölçüm düzeneği Şekil 1'de ifade edildiği gibi, baffle paneller bir yansıtıcı duvara bitişik olacak şekilde yerleştirilmiş ve açıkta kalan diğer üç kenarı yansıtıcı panellerle çevrelenmiştir. Baffle panelleri ile çevreleyici paneller arasındaki mesafe, aks aralığı olan d 'nin yarısı ($d/2$) olacak şekilde düzenlenmiştir. Ayrıca, düzenek sınırının en yakın oda duvarına olan uzaklığı en az 1 m olacak şekilde sağlanmıştır.



Şekil 1. J tipi montajda numunelerin tek duvara bitişik yerleşim örneği (1-ölçümü yapılan numune, 2- kuyunun çerçevesini oluşturan eleman, d-aks aralığı) [1]

2.2.2 İki duvar yaklaşımı

Ölçüm düzeneği Şekil 2'de ifade edildiği gibi, baffle paneller bitişik iki yansıtıcı duvarın köşelerine yerleştirilmiş ve açıkta kalan iki kenar ise yansıtıcı panellerle kapatılacak biçimde çevrelenmiştir. Bu yerleşimde de aynı mesafe kuralları geçerli olup, yansıtıcı panellere olan uzaklık $d/2$, düzenek kenarlarından diğer yüzeylere olan mesafe ise en az 1 m olacak şekilde sağlanmıştır.



Şekil 2. J tipi montajda numunelerin iki duvara bitişik yerleşim örneği(1-ölçümü yapılan numune, 2- kuyunun çerçevesini oluşturan eleman, d-aks aralığı) [1]

2.2.3 Merkez yaklaşımı

Baffle paneller, odanın ortasına, tüm duvarlara eşit mesafede olacak şekilde konumlandırılmış ve dört kenarı yansıtıcı panellerle çevrelenmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

ISO 354 standardına uygun olarak gerçekleştirilen ses yutma ölçümlerine ait sonuçlar, 50 Hz – 10 kHz frekans aralığı için Şekil 3'te ve Çizelge 1'de karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Bu bölümde, montaj konfigürasyonu ile oda içi konumun ölçülen ses yutma katsayıları üzerindeki etkileri ayrıntılı biçimde ortaya konulmaktadır.

3.1. J Tip Montaj Kuyu Derinliğinin Etkisi

Elde edilen veriler, kuyu derinliğinin baffle panellerin ses yutma performansı üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Kuyu yaklaşımı, özellikle 200 Hz ve üzerindeki frekanslarda daha yüksek ses yutma katsayıları üretmekte olup yüksek frekanslarda da makul düzeyde bu durumu devam ettirmektedir. Bununla birlikte, kuyu yaklaşımının oda içindeki konuma daha duyarlı olduğu ve özellikle düşük frekanslarda konuma bağlı farklılıkların arttığı gözlenmiştir.

Derin kuyu yaklaşımı, oda içi konum değişimlerinden daha az etkilenmekte ve frekans bantları boyunca daha kararlı bir davranış sergilemektedir. Bu durum, derin kuyu düzeninin kenar etkilerini sınırlandırarak ölçüm sonuçlarında daha kontrollü bir sınır koşulu oluşturduğunu göstermektedir.

3.2. Ölçüm Düzeninin Oda Konumu Etkisi

Baffle panellerin oda içindeki konumu ses yutma performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Merkez yerleşim özellikle kuyu yaklaşımında, orta ve yüksek frekans bantlarında daha yüksek ses

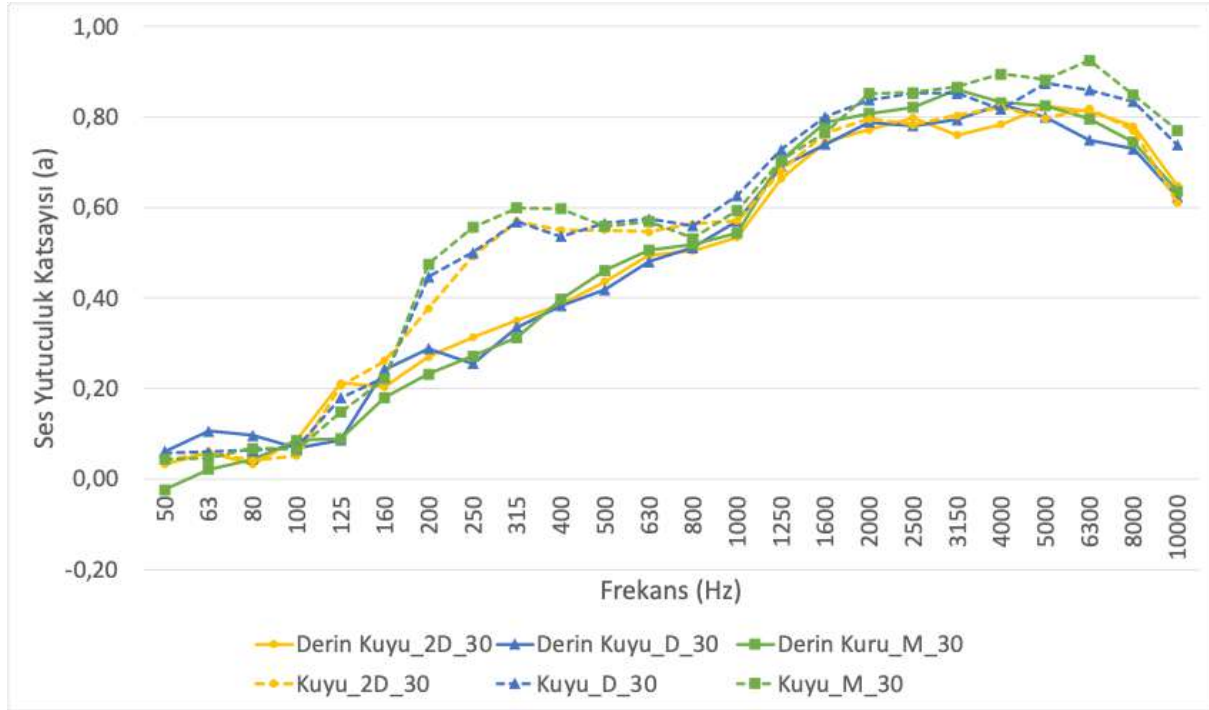
yutma katsayıları üretme eğilimindedir. Bununla birlikte, derin kuyu yaklaşımında yüksek frekanslarda belirgin bir merkez üstünlüğü gözlenmemekte ve bazı bantlarda iki duvar veya tek duvar yerleşimi benzer ya da daha yüksek değerler vermektedir. Bu durum, konum etkisinin kuyu tipine bağlı olarak değiştiğini göstermektedir.

Tek duvara bitişik yerleşimlerde, her iki kuyu yaklaşımında da orta düzeyde ses yutma değerleri elde edilmiştir. Bu konfigürasyonda derin kuyu yaklaşımı, özellikle 250–1250 Hz aralığında daha düzenli ve kararlı bir artış eğilimi sergilemektedir. Kuyu yaklaşımında ise 250 Hz ve üzerindeki frekans bantlarında daha yüksek ses yutma katsayıları elde edilmekte, ancak frekans arttıkça dalgalanma miktarı artabilmektedir.

Çizelge 1. 2 kuyu konfigürasyonu ve 3 farklı oda konumunda ölçülen ses yutum değerleri (2D: 2 duvar, D: tek duvar, M: oda merkezi)

Aks Aralığı / Frekans	Derin Kuyu_2D_30	Derin Kuyu_D_30	Derin Kuyu_M_30	Kuyu_2D_30	Kuyu_D_30	Kuyu_M_30
50	0,03	0,06	-0,02	0,04	0,06	0,04
63	0,06	0,11	0,02	0,06	0,06	0,05
80	0,03	0,10	0,04	0,04	0,06	0,07
100	0,09	0,07	0,09	0,05	0,07	0,07
125	0,21	0,09	0,09	0,21	0,18	0,15
160	0,20	0,24	0,18	0,26	0,22	0,22
200	0,27	0,29	0,23	0,38	0,45	0,48
250	0,31	0,26	0,27	0,49	0,50	0,56
315	0,35	0,34	0,31	0,57	0,57	0,60
400	0,39	0,38	0,40	0,55	0,54	0,60
500	0,44	0,42	0,46	0,55	0,57	0,56
630	0,49	0,48	0,51	0,55	0,58	0,57
800	0,50	0,51	0,52	0,56	0,56	0,53
1000	0,53	0,57	0,54	0,57	0,63	0,59
1250	0,66	0,69	0,70	0,68	0,73	0,70
1600	0,74	0,74	0,79	0,76	0,80	0,77
2000	0,77	0,79	0,81	0,80	0,84	0,85
2500	0,80	0,78	0,82	0,78	0,85	0,85
3150	0,76	0,79	0,86	0,80	0,85	0,87
4000	0,78	0,83	0,83	0,82	0,82	0,89
5000	0,82	0,80	0,82	0,80	0,87	0,88
6300	0,81	0,75	0,80	0,82	0,86	0,92
8000	0,78	0,73	0,74	0,77	0,83	0,85
10000	0,65	0,62	0,64	0,61	0,74	0,77

İki duvara bitişik (köşe) yerleşim, genel olarak daha düşük ses yutma katsayılarının elde edildiği konfigürasyon olmuştur. Bu durum sınır koşullarının yansımaların etkin yutumunu sınırlamasıyla ilişkili olduğu değerlendirilmektedir ve bu etki özellikle düşük ve orta frekans bantlarında daha belirgindir. Yüksek frekanslarda performansta kısmi bir artış gözlenmekle birlikte, çoğu durumda merkez yerleşimde elde edilen değerlere ulaşılammaktadır.



Şekil 3. Montaj tipi ve oda içi konuma göre tüm baffle ölçümlerinin karşılaştırılması (2D: 2 duvar, D: tek duvar, M: oda merkezi)

4. SONUÇ

Bu çalışma kapsamında, askı tip baffle panellerin ses yutma performansı üzerinde kuyu derinliği ve ölçüm düzeneğinin oda içi konumunun etkileri ISO 354 standardına uygun olarak deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, J tip montaj kuyu yönteminin ve oda içindeki konumun ölçülen ses yutma katsayıları üzerinde anlamlı farklılıklar ortaya çıkardığını göstermektedir. J-tipi montaj konfigürasyonunda kuyu yaklaşımı, özellikle 200 Hz ve üzerindeki frekans bantlarında diğer düzeneklere kıyasla daha yüksek ses yutma katsayıları üretmiştir. Buna karşın, derin kuyu yaklaşımının farklı oda konumlarında daha düşük varyans sergileyerek daha kararlı sonuçlar sunduğu gözlemlenmiştir. Oda içi konum açısından değerlendirildiğinde, merkez yerleşim özellikle kuyu montajında orta ve yüksek frekanslarda avantaj sağlamakta; iki duvara bitişik yerleşim ise çoğu durumda daha düşük performans değerleri vermektedir. Sonuç olarak, ISO 354'e göre gerçekleştirilen reverberasyon odası ölçümlerinde kuyu tipi ve oda içi yerleşim birlikte değerlendirilmelidir. Kuyu yaklaşımı ve oda içinde yerleşim koşulları, ölçülen ses yutma katsayılarını doğrudan etkilemekte ve laboratuvar sonuçlarının uygulama koşullarına aktarımında kritik rol oynamaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Dokuz Eylül Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimince Desteklenmiştir. Proje Numarası: SBA-2025-3701

KAYNAKLAR

1. ISO 354:2003, Acoustics – Measurement of Sound Absorption in a Reverberation Room, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2003.
2. Cops, A., "Evaluation of absorptive performance of baffles in reverberant rooms," Journal of Acoustical Materials Research, 1985.
3. Klippel Filho, J., Martins, H., and Almeida, R., "Performance evaluation of baffle panel configurations with varying densities and spacings," Building Acoustics, 2023.
4. Rebke, R., "Density effects on sound absorption performance of suspended panels," Proc. Int. Congress on Acoustics, 1987.
5. Kawakami, S., and Sakai, H., "Effects of edge conditions on absorption measurements in reverberation chambers," Applied Acoustics, 55(4), 327–338, 1998.
6. Shanks, R., "Numerical simulation of baffle arrangements and their effects on measured absorption coefficients," Acoustics Simulation Review, 2016.

ISIL PERFORMANS VE GÖMÜLÜ ENERJİ İÇİN MAKİNE ÖĞRENMESİ TABANLI HİBRİT MALZEME SEÇİM MODELİ

Berfin YILDIZ^{1*}

¹ Bilkent Üniversitesi, Güzel Sanatlar, Tasarım ve Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü,
Üniversiteler, Çankaya, Ankara, 06800

ÖZET

Artan küresel ısınma etkileri ve enerji kaynaklarının azalması, yapı sektöründe enerji etkin tasarım ve malzeme seçimini kritik bir konu haline getirmiştir. Dıştan yalıtımlı kompozit duvar sistemleri, malzeme üretimindeki gömülü enerji ile kullanım sürecindeki ısı performans arasındaki ilişki nedeniyle çok boyutlu bir karar verme problemi oluşturmaktadır. Bu çalışma, malzeme kombinasyonlarını değerlendirirken ısı performans ve gömülü enerji kriterlerini birlikte ele alan çok amaçlı bir optimizasyon yaklaşımı önermektedir. Geleneksel bina enerji simülasyonları, her bir tasarım alternatifinin ayrı ayrı analiz edilmesini gerektirdiğinden özellikle erken tasarım aşamalarında zaman ve iş yükünü artırmaktadır. Bu çalışmada bu yükü azaltmak amacıyla makine öğrenmesi (ML) tabanlı bir tahmin modeli önerilmiştir. Araştırmada, malzeme kombinasyonları, katman kalınlıkları ve sıraları, malzeme türleri, iklim bölgeleri ve yüzey alanı gibi tasarım değişkenlerini içeren bir veri kümesi oluşturulmuştur. Bu girdilere dayanarak, ısı performans değerlerini eşzamanlı olarak tahmin edebilen bir regresyon modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen ML modeli çok amaçlı optimizasyon sürecine entegre edilerek hesaplama verimliliği artırılmıştır. Optimizasyon sonuçları, düşük gömülü enerji ve yüksek ısı performans arasında denge kuran çeşitli malzeme kombinasyonları sunmakta; özellikle gazbeton ve cam yünü seçeneklerinin öne çıktığını göstermektedir. Bulgular, malzeme seçimi süreçlerinde ML tabanlı tahmin modellerine dayalı yaklaşımların mimari tasarım ve yapı fiziği alanlarında güçlü bir karar destek aracı olabileceğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Makine öğrenmesi, Malzeme seçimi, Isı performans, Gömülü enerji.

A MACHINE LEARNING-BASED HYBRID MATERIAL SELECTION MODEL FOR THERMAL PERFORMANCE AND EMBODIED ENERGY

ABSTRACT

The increasing effects of global warming and the depletion of energy resources have made energy-efficient design and material selection a critical issue in the building sector. Exterior insulated composite wall systems constitute a multi-dimensional decision-making problem due to the relationship between embodied energy during material production and thermal performance during the operational phase. This study proposes a multi-objective optimization approach that simultaneously considers thermal performance and embodied energy criteria while evaluating material combinations. Conventional building energy simulations require each design alternative to be analyzed separately, increasing time and workload, especially during the early design stages. To reduce this burden, a machine learning (ML)-based prediction model is proposed. A dataset was created, including design variables such as material combinations, layer thicknesses and sequences, material types, climate zones, and surface area. Based on these inputs, a regression model capable of simultaneously predicting thermal performance values was developed. The proposed ML model was integrated into the multi-objective optimization process to improve computational efficiency. The optimization results provide various material combinations that balance low embodied energy and high thermal performance, highlighting aerated concrete and glass wool as prominent options. The findings demonstrate that ML-based prediction approaches can serve as powerful decision-support tools in architectural design and building physics.

Keywords: Machine learning, Material selection, Thermal performance, Embodied energy.

^{1*} berfin.yildiz@bilkent.edu.tr

1. GİRİŞ

Yapı sektörü, küresel ölçekte toplam enerji tüketiminin ve sera gazı salımlarının önemli bir bölümünden sorumludur. Binaların yaşam döngüsü boyunca ortaya çıkan çevresel etkiler, yalnızca kullanım aşamasındaki enerji tüketimiyle sınırlı olmayıp, yapı malzemelerinin üretim, taşıma ve uygulama süreçlerini de kapsamaktadır. Bu nedenle sürdürülebilir yapı tasarımı yaklaşımları, operasyonel enerji performansının yanı sıra gömülü enerji kavramını da bütüncül biçimde ele almak durumundadır. Bu bağlamda, binaların enerji performansını belirleyen başlıca unsurların tanımlanması kritik önem taşımaktadır. Yapıların kullanım aşamasındaki enerji tüketimi; iklim koşulları, kullanıcı davranışları, mekanik sistemler ve mimari tasarım kararları gibi çok sayıda parametreden etkilenmektedir. Bu parametreler arasında yapı kabuğunun iç ve dış çevre arasındaki ısı ve enerji alışverişini doğrudan düzenlemesi nedeniyle bina ölçeğinde enerji etkinliğinin sağlanmasında belirleyici bir role sahiptir. Özellikle dıştan yalıtımlı kompozit duvar sistemleri, farklı malzeme türleri, katman kalınlıkları ve katman sıraları aracılığıyla çok sayıda tasarım alternatifine olanak tanımaktadır. Ancak bu çeşitlilik, tasarım sürecinde değerlendirilmesi gereken seçeneklerin sayısını artırmakta ve malzeme seçimini çok boyutlu bir karar verme problemine dönüştürmektedir.

Geleneksel yaklaşımlarda bu tür problemlerin çözümü, ısı transferi ve enerji tüketimi hesaplarına dayanan bina enerji simülasyonları ile yapılmaktadır. Bu yöntemlerde her bir tasarım alternatifi ayrı ayrı analiz edildiği için, özellikle erken tasarım aşamalarında süre ve işlem yükü önemli ölçüde artmaktadır. Bu durum, tasarımcıların sınırlı sayıda alternatifi değerlendirmesine ve potansiyel olarak daha iyi çözümlerin göz ardı edilmesine yol açabilmektedir. Son yıllarda makine öğrenmesi tabanlı yöntemler, mimarlık ve yapı fiziği alanlarında bu sınırlamaları aşmaya yönelik güçlü araçlar olarak öne çıkmaktadır. Makine öğrenmesi modelleri, geçmiş verilerden karmaşık ve doğrusal olmayan ilişkileri öğrenerek hızlı ve güvenilir tahminler üretebilmekte, böylece geniş tasarım uzaylarının kısa sürede taranmasına olanak tanımaktadır. Bu bağlamda, birden fazla performans kriterini aynı anda ele alabilen çoklu çıktı veren modeller, sürdürülebilir tasarım kararlarının desteklenmesinde önemli bir potansiyel sunmaktadır. Bu çalışmanın amacı, dıştan yalıtımlı kompozit duvar sistemleri için ısıl performans ve gömülü enerji kriterlerini birlikte ele alan, makine öğrenmesi tabanlı çoklu tahmin modeli ile desteklenen çok amaçlı bir malzeme seçimi yaklaşımı geliştirmektir. Önerilen yöntem hem hesaplama verimliliğini artırmayı hem de tasarımcılara daha geniş ve dengeli bir çözüm havuzu sunmayı hedeflemektedir.

2. MEVCUT YAKLAŞIMLAR

Yapı kabuğu tasarımında enerji performansının artırılması ve çevresel etkilerin azaltılması, son yıllarda mimarlık ve yapı fiziği literatüründe yoğun biçimde ele alınan konular arasında yer almaktadır. Özellikle yalıtım malzemelerinin ısıl performans, enerji tüketimi ve yaşam döngüsü çevresel etkileri üzerindeki rolü hem deneysel hem de hesaplamalı çalışmalarla kapsamlı biçimde incelenmiştir [1], [2]. Bu bağlamda literatürde, ısı transferi ve enerji tüketimi hesaplarına dayanan EnergyPlus [3] ve TRNSYS gibi fiziksel tabanlı bina enerji simülasyonları [4], yaşam döngüsü değerlendirmesine dayalı yöntemler ve son dönemde giderek artan biçimde makine öğrenmesi destekli karar destek sistemleri ön plana çıkmaktadır [5], [6]. Yalıtım malzemelerinin değerlendirilmesine yönelik çalışmalar, başlangıçta ağırlıklı olarak fiziksel tabanlı simülasyonlar ve tekil performans göstergeleri üzerinden ilerlemiş; zamanla gömülü enerji, karbon salımı ve

maliyet gibi çoklu kriterlerin birlikte ele alındığı yaklaşımlar geliştirilmiştir. Ancak tasarım değişkenlerinin ve malzeme kombinasyonlarının artması, değerlendirilmesi gereken alternatif çözüm sayısını önemli ölçüde artırmaktadır. Her bir alternatif için ayrı hesaplama yapılması gerekliliği, analiz süresini ve işlem yükünü artırmakta; bu durum farklı malzeme türleri, katman kalınlıkları ve katman sıralarının kombinasyonlarından oluşan çok sayıdaki yapı kabuğu alternatifinin etkin biçimde değerlendirilmesini zorlaştırmaktadır. Bu sınırlamalar, literatürde simülasyonların yerini kısmen alan makine öğrenmesi tabanlı tahmin modellerinin ve bu modellerle bütünleştirilen çok amaçlı optimizasyon yaklaşımlarının gelişmesine zemin hazırlamıştır. Bu bölümde, öncelikle simülasyon tabanlı yöntemlere alternatif olarak geliştirilen makine öğrenmesi tabanlı performans tahmin modelleri ele alınmakta, ardından bu modellerin çok amaçlı optimizasyon süreçleriyle birlikte kullanıldığı hibrit yaklaşımlar incelenmektedir.

2.1. Makine Öğrenmesi ile Performans Tahmini

Yalıtım malzemelerinin yapı kabuğu performansı üzerindeki etkileri uzun süredir literatürde incelenmektedir. Erken dönem çalışmalar, değerlendirmeleri büyük ölçüde kullanım enerjisi ve ısı geçirgenlik katsayısı ile sınırlı tutmuş, analizler çoğunlukla fiziksel tabanlı simülasyonlara dayandırılmıştır. Roberts ve arkadaşları [7], farklı yalıtım malzemelerini ısı performans ve çevresel etkiler açısından karşılaştırarak malzeme seçiminin enerji performansı üzerindeki belirleyici rolünü ortaya koymuştur. Ancak bu tür çalışmalar, sınırlı sayıda önceden tanımlanmış tasarım alternatifinin değerlendirilmesiyle kısıtlı kalmıştır. Zamanla, yalıtım malzemelerinin çevresel etkilerinin yaşam döngüsü perspektifinden ele alındığı çalışmalar artış göstermiştir. Carreras ve arkadaşları [8], [9], yapı kabuğu bileşenleri için yaşam döngüsü çevresel etkiler ve maliyeti birlikte değerlendiren yaklaşımlar önermiştir. Bununla birlikte, her bir tasarım alternatifinin ayrıntılı simülasyon ve LCA hesaplarıyla analiz edilmesi, bu yöntemlerin yüksek hesaplama maliyetine sahip olmasına ve geniş tasarım uzayları için ölçeklenebilirliğinin sınırlı kalmasına neden olmuştur.

Bu sınırlamaları aşmak amacıyla, son yıllarda makine öğrenmesi tabanlı vekil (surrogate) modeller literatürde öne çıkmıştır. Sharif ve arkadaşları [10], yapay sinir ağları kullanarak enerji tüketimi, yaşam döngüsü maliyeti ve LCA çıktıları için hızlı tahmin modelleri geliştirmiştir. Abdolvand ve arkadaşları [11] ise enerji yükleriyle birlikte gömülü enerji tahminlerini içeren bütünsel bir ML modeli önermiştir. Chen ve arkadaşları [12], BIM tabanlı bir sistem aracılığıyla yalıtım malzemelerinin ısı performans ve gömülü enerji değerlerini birlikte tahmin etmiştir. Benzer şekilde Zhou ve arkadaşları [13], erken tasarım aşamasında gömülü ve kullanım kaynaklı karbon salımları arasındaki dengeyi incelemiş ve enerji etkin binalarda gömülü karbonun toplam yaşam döngüsü etkileri içindeki payının arttığını göstermiştir. Bu çalışmalar, makine öğrenmesinin simülasyon tabanlı yöntemlere kıyasla önemli bir hesaplama avantajı sunduğunu ortaya koymaktadır.

2.2. Çok Amaçlı Optimizasyon ve Makine Öğrenmesi Tabanlı Hibrit Yaklaşımlar

Yapı kabuğu tasarımında birden fazla performans kriterinin birlikte değerlendirilmesi gerekliliği, çok amaçlı optimizasyon yöntemlerinin kullanımını beraberinde getirmiştir. Enerji tüketimi, karbon salımı, maliyet ve kullanıcı konforu gibi hedefler arasındaki çelişkili ilişkiler, Pareto tabanlı optimizasyon yaklaşımlarıyla ele alınmaktadır. Bu bağlamda NSGA-II ve NSGA-III algoritmaları, yapı performansı optimizasyonunda en yaygın kullanılan yöntemler arasında yer almaktadır. Duan

ve diğ. [14], enerji, karbon ve termal konfor hedeflerini birlikte optimize eden bir çerçeve sunmuştur. Fan ve diğ. [15] ise derin öğrenme tabanlı tahmin modellerini NSGA-III ile entegre ederek enerji, konfor ve karbon salımlarını eş zamanlı olarak ele almıştır. Bu çalışmalar, makine öğrenmesi ile çok amaçlı optimizasyonun birlikte kullanımının tasarım sürecini önemli ölçüde hızlandırdığını göstermektedir. Ancak bu yaklaşımların büyük bir bölümünde gömülü enerji veya yaşam döngüsü değerlendirmeleri ya sınırlı kapsamda ele alınmış ya da yalıtım malzemelerine özgü ayrıntılı bir modelleme sunulmamıştır. Son dönemde çizge (graph) sinir ağları gibi gelişmiş makine öğrenmesi mimarileri, yalıtım sistemlerinin katmanlı ve ilişkisel yapısını modellemek amacıyla kullanılmaya başlanmıştır. Wang ve diğ. [16], gömülü karbon ve ısı performansını birlikte tahmin edebilen GNN tabanlı bir vekil model önermiştir. Ancak bu yaklaşım, belirli yapı tipleri ve sınırlı veri setleriyle test edilmiş olup, farklı malzeme kombinasyonları ve iklim koşulları için genellenebilirliği henüz yeterince ortaya konmamıştır. Bu çalışma, makine öğrenmesi tabanlı çoklu çıktı veren bir tahmin modelini çok amaçlı optimizasyon süreciyle bütünleştirerek, literatürdeki bu boşluğu hedef almaktadır. Önerilen hibrit yaklaşım, simülasyon yerine ML tabanlı tahminlerin kullanılmasıyla hesaplama maliyetini önemli ölçüde azaltmakta ve geniş bir malzeme tasarım uzayının etkin biçimde taranmasına olanak tanımaktadır.

3. YÖNTEM

Bu çalışma, dıştan yalıtımlı kompozit duvar sistemlerinde malzeme seçimine ilişkin çok boyutlu karar problemini ele almak üzere, veri tabanlı tahmin ve çok amaçlı optimizasyon yaklaşımlarını bütünleştiren bir metodoloji önermektedir. Önerilen yöntem, geleneksel simülasyon tabanlı hesaplamaların yüksek hesaplama maliyeti ve sınırlı tasarım uzayı kapsama sorunlarını aşmayı hedeflemekte; erken tasarım aşamalarında hızlı, güvenilir ve ölçeklenebilir değerlendirmelere olanak tanımaktadır. Bu kapsamda, yapı kullanım aşamasına ilişkin ısı performans göstergeleri ile malzeme üretim aşamasına ait çevresel etki göstergeleri birlikte ele alınmıştır. Bu metodolojik çerçeve, üç ana aşamadan oluşmaktadır: (i) dıştan yalıtımlı kompozit duvar sistemlerine ait veri setinin oluşturulması, (ii) ısı performans değerlerini eş zamanlı tahmin edebilen makine öğrenmesi tabanlı modelin geliştirilmesi ve (iii) geliştirilen modelin çok amaçlı optimizasyon sürecine entegre edilmesi. Özellikle, gömülü enerji ve karbon salımı değerleri, yaşam döngüsü değerlendirmesinin A1–A3 (beşikten kapıya) aşamalarını temsil eden EPD verilerine dayandırılmış ve optimizasyon sürecinde doğrudan hedef fonksiyonlar olarak kullanılmıştır.

3.1. Veri Setinin Oluşturulması

Çalışma kapsamında oluşturulan veri kümesi, dıştan yalıtımlı kompozit duvar sistemlerini temsil eden çok sayıda malzeme ve katman kombinasyonunu içermektedir. Çalışmada incelenen yapı kabuğu kesitleri, dış kaplama, ana gövde elemanı ve ısı yalıtım katmanlarından oluşmaktadır. Taşıyıcı katman olarak gaz beton ve tuğla alternatifleri, yalıtım katmanı olarak ise cam yünü, taş yünü, XPS, EPS gibi farklı ısı iletkenlik değerlerine sahip malzemeler değerlendirilmiştir. Kullanılan malzeme verileri, sektörde yaygın olarak kullanılan farklı üreticilere ait ürünlerden (örneğin Ytong ve AKG gaz beton, ODE cam yünü, Dalsan ve Rigips kaplama/sıva sistemleri) elde edilmiştir. Her bir katman için farklı kalınlık senaryoları oluşturularak kombinatoriyal olarak elde edilmiştir. Veri kümesinin oluşturulmasında, yapı kabuğunun enerji performansını etkilediği bilinen tasarım değişkenleri dikkate alınmıştır. Bu değişkenler: ana gövde elemanı türü, ısı yalıtım malzemesi türü, kaplama ve sıva katmanları, katman kalınlıkları, katman sıraları, TS 825'e göre

tanımlanan iklim bölgeleri ve duvar yüzey alanı olarak belirlenmiştir. Her bir tasarım alternatifi, bu değişkenlerin farklı kombinasyonlarıyla tanımlanmış ve veri kümesi içerisinde ayrı bir örnek olarak temsil edilmiştir. Buna ek olarak, veri kümesinde yer alan her bir malzeme için, üretim aşamasına ilişkin gömülü enerji ve karbon salımı göstergeleri de girdi değişkenleri olarak tanımlanmıştır. Bu göstergeler, üretici firmalar tarafından yayımlanan Çevresel Ürün Beyanı (Environmental Product Declaration – EPD) belgelerinden elde edilmiştir.

Çalışmada gömülü enerji, EPD belgelerinde yer alan A1–A3 yenilenebilir olmayan birincil enerji kaynaklarının toplam kullanımı (PENRT - Total use of non renewable primary energy resource / MJ) göstergesi üzerinden temsil edilmiştir. Bu gösterge, hammaddenin temini (A1), taşınması (A2) ve üretim süreçlerini (A3) kapsayan beşikten kapıya birincil yenilenemez enerji tüketimini ifade etmektedir. Karbon salımı ise, aynı yaşam döngüsü aşamalarına karşılık gelen A1-A3 Küresel Isınma Potansiyeli (GWP-Total / kg CO₂ eq.) göstergesi kullanılarak tanımlanmıştır. Bu yaklaşım, farklı malzemelerin üretim kaynaklı çevresel etkilerinin standartlaştırılmış ve karşılaştırılabilir bir temelde değerlendirilmesini sağlamaktadır. EPD verilerinde yer alan birim değerler, duvar sisteminde kullanılan malzeme miktarlarıyla ilişkilendirilerek her bir tasarım alternatifi için toplam gömülü enerji ve karbon salımı değerleri hesaplanmıştır. Malzeme miktarlarının belirlenmesinde katman kalınlıkları, malzeme yoğunlukları ve duvar yüzey alanı dikkate alınmıştır. Bu sayede, veri kümesi hem fiziksel performans hem de çevresel etki boyutlarını kapsayan bütüncül bir temsil sunmaktadır.

3.2. Isıl Performans Hesapları

Isıl performans değerlendirmeleri, Türkiye’de yürürlükte olan TS 825 “Binalarda Isı Yalıtım Kuralları” standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, her bir duvar sistemi için toplam ısı direnç hesaplanmış ve buna bağlı olarak ısı geçirgenlik katsayısı (U-değeri) elde edilmiştir. U-değeri, duvarın birim alanından birim zamanda geçen ısı miktarını ifade etmekte olup, düşük U-değerleri daha iyi ısı performansı temsil etmektedir. Hesaplamalarda, her bir katmana ait ısı iletkenlik katsayıları ve katman kalınlıkları dikkate alınmış; böylece farklı malzeme kombinasyonlarının ve katman düzenlemelerinin ısı performans üzerindeki etkileri nicel olarak karşılaştırılabilmiştir. Bu çalışmada yoğunlaşma ve buhar difüzyonu etkileri kapsam dışında bırakılmış olup, analizler yalnızca ısı geçirgenlik üzerinden gerçekleştirilmiştir. Ancak bu parametrelerin özellikle farklı iklim bölgelerinde yapı kabuğu performansı üzerinde önemli etkileri olduğu bilinmektedir.

3.3. Gömülü Enerji Hesapları

Bu çalışmada gömülü enerji, yapı kabuğunu oluşturan malzemelerin üretim sürecinde tüketilen birincil enerji miktarı olarak tanımlanmıştır. Gömülü enerji hesapları, yaşam döngüsü değerlendirmesi yaklaşımı çerçevesinde ele alınmış ve “beşikten kapıya” (cradle-to-gate) sınırlarıyla sınırlandırılmıştır. Nakliye, uygulama, kullanım süreci ve kullanım sonrası aşamalar kapsam dışında bırakılmıştır. Bu sınırlandırma, çalışmanın erken tasarım aşamasında malzeme seçiminin etkilerine odaklanmasıyla ilişkilidir. Hesaplamalarda, yapı malzemelerine ait Çevresel Ürün Beyanı (Environmental Product Declaration – EPD) verilerinden yararlanılmıştır. EPD belgeleri, ISO 14040 ve ISO 14044 standartlarına uygun olarak hazırlanmış ve üçüncü taraflarca doğrulanmış olduğundan, güvenilir ve karşılaştırılabilir bir veri kaynağı olarak kabul edilmiştir.

Her bir malzemenin birim kütle veya hacim başına düşen gömülü enerji değeri, ilgili katmanda kullanılan malzeme miktarı ile çarpılarak toplam gömülü enerji değeri hesaplanmıştır. Malzeme miktarlarının belirlenmesinde katman kalınlıkları, malzeme yoğunlukları ve duvar yüzey alanı dikkate alınmıştır. Bu yaklaşım, farklı malzeme türleri ve katman kalınlıkları arasındaki çevresel etki farklarının tutarlı ve nicel bir temelde karşılaştırılmasına olanak tanımaktadır.

3.4. Makine Öğrenmesi Tabanlı Tahmin Modeli

Çalışmada, dıştan yalıtımlı kompozit duvar sistemlerine ait ısı performans değerlerini eş zamanlı olarak tahmin edebilen makine öğrenmesi tabanlı bir regresyon modeli geliştirilmiştir. Bu yaklaşım, kullanım aşamasına ilişkin ısı performans ile malzeme üretim sürecine bağlı çevresel etkiler arasındaki ilişkilerin tek bir model süreci içerisinde temsil edilmesini amaçlamaktadır. Model girdileri; malzeme, geometri ve çevresel bağlamı temsil edecek şekilde tanımlanmıştır. Bu kapsamda taşıyıcı duvar, yalıtım ve kaplama katmanlarına ait malzeme türleri ile bu malzemelere ait ısı iletkenlik katsayısı, yoğunluk değerleri girdi değişkenleri olarak kullanılmıştır. Ayrıca her bir katmanın kalınlığı, katman sıraları, toplam katman sayısı, duvar yüzey alanı ve TS 825'e göre tanımlanan iklim bölgeleri modele dâhil edilmiştir. Model, denetimli öğrenme yaklaşımıyla eğitilmiş; veri kümesi eğitim ve test alt kümelerine ayrılarak genelleme yeteneği değerlendirilmiştir. Eğitim sürecinde, tahmin edilen değerler ile referans hesap sonuçları arasındaki hata minimize edilmiştir. Bu bağlamda model, geleneksel simülasyon tabanlı hesaplamaların yerine geçen bir surrogate model olarak konumlandırılmıştır.

3.5. Çok Amaçlı Optimizasyon Entegrasyonu

Makine öğrenmesi tabanlı tahmin modeli, çalışmanın ikinci aşamasında çok amaçlı bir optimizasyon çerçevesine entegre edilmiştir. Optimizasyon sürecinin temel amacı, düşük gömülü enerji ve yüksek ısı performans gibi birbiriyle çelişebilen hedefler arasında dengeli çözümler üretebilmektir. Bu nedenle problem, tek bir optimum çözümün aranmasından ziyade, farklı tasarım önceliklerini temsil eden pareto optimal çözümler kümesi üzerinden ele alınmıştır. Optimizasyon sürecinde karar değişkenleri, makine öğrenmesi modelinin girdilerini oluşturan malzeme türleri, katman kalınlıkları, katman sıraları ve çevresel parametreler olarak tanımlanmıştır. Hedef fonksiyonlar ise ısı geçirgenlik katsayısının minimize edilmesi ve toplam gömülü enerji değerinin minimize edilmesi şeklinde belirlenmiştir. Bu yapı, yapı kabuğu tasarımında sıkça karşılaşılan performans–çevresel etki dengelerinin açık biçimde analiz edilmesine olanak tanımaktadır. Geleneksel optimizasyon yaklaşımlarında, her bir iterasyonda ayrıntılı fiziksel hesaplamaların veya simülasyonların yapılması gerekmektedir. Ancak bu çalışmada, geliştirilen makine öğrenmesi modeli, söz konusu hesaplamaların yerine kullanılarak her iterasyonda performans değerlerinin hızlı biçimde tahmin edilmesini sağlamıştır. Bu entegrasyon, optimizasyon sürecinin hesaplama maliyetini önemli ölçüde azaltmış ve çok daha geniş bir tasarım uzayının etkin biçimde taranabilmesine olanak tanımıştır. Optimizasyon sonucunda elde edilen pareto çözüm kümesi, tasarımcıya tek bir en iyi çözüm sunmak yerine, farklı önceliklere göre değerlendirilebilecek çok sayıda alternatif sunmaktadır. Bazı çözümler düşük gömülü enerji değerleriyle öne çıkarken, bazı çözümler daha yüksek ısı performans sağlamaktadır. Bu durum, mimari tasarım sürecinin bağlamsal ve çok ölçütlü doğasıyla uyumlu bir karar ortamı oluşturmaktadır. Makine öğrenmesi tabanlı tahmin modeli ile çok amaçlı optimizasyonun bütünselik kullanımı, sürdürülebilir yapı kabuğu tasarımı için hesaplama verimliliği yüksek, esnek ve ölçeklenebilir bir metodolojik çerçeve

sunmaktadır. Bu yaklaşım, yalnızca performans odaklı değil, aynı zamanda çevresel etkileri de gözeten bilinçli tasarım kararlarının alınmasına katkı sağlamaktadır.

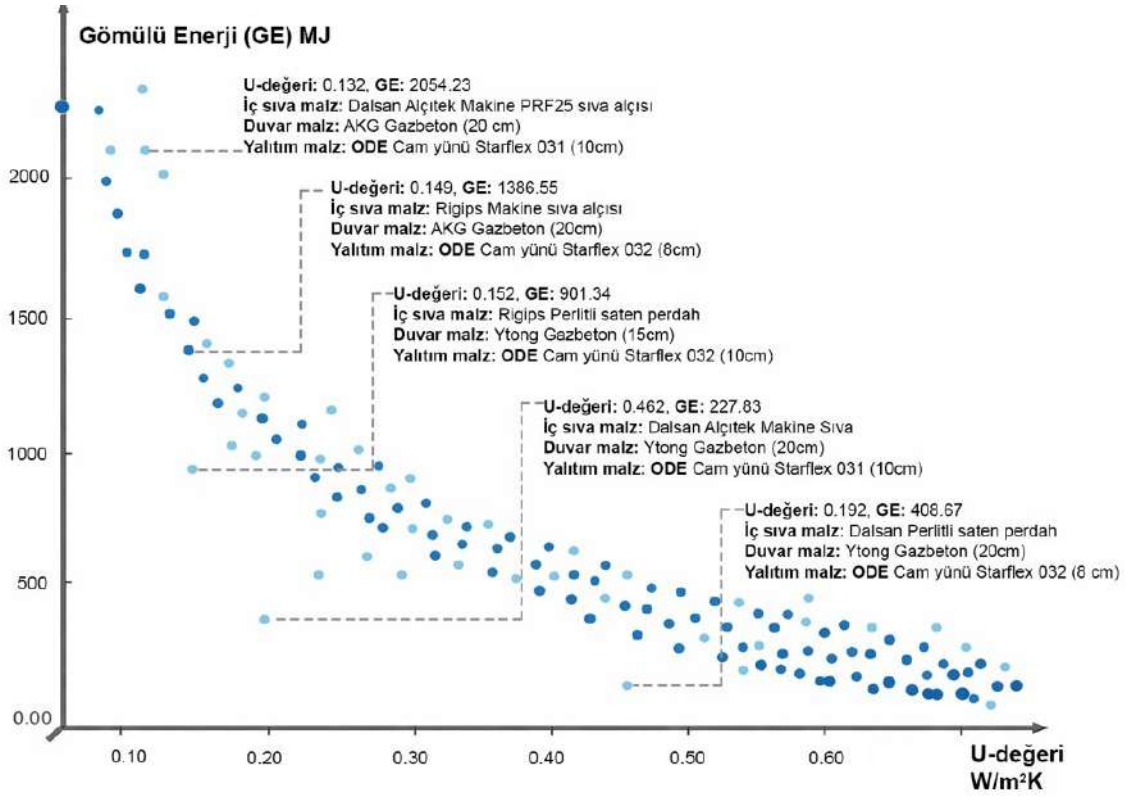
3. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Optimizasyon süreci sonucunda elde edilen Pareto optimal çözüm kümesi, ısı performans ve gömülü enerji kriterleri arasında belirgin bir denge ilişkisi bulunduğunu açık biçimde ortaya koymaktadır. **Şekil 1**'de, farklı malzeme kombinasyonlarına ait Pareto çözümleri sunulmaktadır. Bu çözümler, tek bir “en iyi” alternatif yerine, farklı performans önceliklerine göre değerlendirilebilecek çok sayıda tasarım seçeneği sunarak karar verme sürecini esnek hâle getirmektedir.

Bulgular incelendiğinde, gaz beton taşıyıcı duvar malzemesi ile cam yünü yalıtım malzemesinin birlikte kullanıldığı sistemlerin, düşük gömülü enerji değerleri ile kabul edilebilir düzeyde ısı performansı bir arada sağlayabildiği görülmüştür. Bu durum, özellikle erken tasarım aşamalarında hem çevresel etkiyi hem de enerji etkinliğini gözetin dengeli çözümlerin üretilebileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, farklı iklim bölgeleri için optimum çözümlerin değişiklik gösterebildiği gözlemlenmiş; iklim koşullarının malzeme kalınlıkları ve katman kombinasyonları üzerindeki belirleyici etkisi bir kez daha ortaya konmuştur. Bu bulgu, yapı kabuğu tasarımında bağlamsal parametrelerin göz ardı edilmemesi gerektiğini vurgulamaktadır. Ayrıca yoğuşma riski ve nem transferi gibi fiziksel süreçlerin de iklimle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Elde edilen sonuçlar, literatürde yer alan sürdürülebilir yapı kabuğu ve enerji etkin malzeme seçimi çalışmalarını destekler niteliktedir. Özellikle makine öğrenmesi tabanlı çoklu tahmin modellerinin, yüksek hesaplama maliyetine sahip simülasyonlara alternatif olarak, erken tasarım aşamalarında hızlı ve kapsamlı değerlendirmeler yapılmasına olanak tanıdığı görülmektedir. Bu bağlamda önerilen yaklaşım, geniş bir tasarım uzayının etkin biçimde taranmasını sağlayarak potansiyel olarak daha iyi çözümlerin keşfedilmesine katkıda bulunmaktadır.

Bu çalışma, belirli malzeme türleri ve sabit varsayımlar altında gerçekleştirilmiştir. Yoğuşma etkileri, nem transferi, kullanıcı davranışları ve dinamik iklim verileri modele dahil edilmemiştir. Ayrıca yaşam döngüsü değerlendirmesi yalnızca A1–A3 aşamaları ile sınırlandırılmıştır. Gelecek çalışmalarda, yoğuşma analizi, dinamik enerji simülasyonları ve kullanıcı davranışlarının modele entegre edilmesiyle daha gerçekçi ve kapsamlı değerlendirmeler yapılması hedeflenmektedir.



Şekil 1. Pareto optimal sonuçlar

Bu çalışma, dıştan yalıtımlı kompozit duvar sistemleri için ısı performans ve gömülü enerji kriterlerini birlikte ele alan, makine öğrenmesi tabanlı çok amaçlı bir malzeme seçimi modeli önermektedir. Geliştirilen yöntem, sürdürülebilir yapı tasarımı süreçlerinde hesaplama verimliliğini artırmakta ve tasarımcıların çevresel etkileri daha bilinçli biçimde değerlendirmesine olanak tanımaktadır. Gelecek çalışmalarda, modele karbon salımı, su tüketimi ve maliyet gibi ek performans kriterlerinin dâhil edilmesi hedeflenmektedir. Ayrıca, farklı iklim senaryolarının, kullanıcı davranışlarının ve kullanım süresi varsayımlarının modele entegre edilmesiyle yaklaşımın kapsamının ve gerçekçilik düzeyinin daha da artırılması planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

1. Dickson, T., & Pavia, S. (2021). Energy performance, environmental impact and cost of a range of insulation materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 140, 110752.
2. Pargana, N., Pinheiro, M. D., Silvestre, J. D., & de Brito, J. (2014). Comparative environmental life cycle assessment of thermal insulation materials of buildings. *Energy and Buildings*, 82, 466–481.
3. Crawley, D. B., Lawrie, L. K., Winkelmann, F. C., Buhl, W. F., Huang, Y. J., Pedersen, C. O., Strand, R. K., Liesen, R. J., Fisher, D. E., Witte, M. J., & Glazer, J. (2001). EnergyPlus: Creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and Buildings*, 33(4), 319–331.
4. 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.

5. Kim, S., & Hammad, A. (2024). Decision support system (DSS) for selecting sustainable insulation material using Pareto search and novel fuzzy-modified technique for order of preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) approach. *International Journal of Construction Management*, 24(7), 734–747.
6. Rahman, A. A., et al. (2025). Machine learning approaches for the prediction of thermal performance of multilayer insulation materials at low temperatures. *Applied Thermal Engineering*, 264, 125527.
7. Roberts, B. C., Webber, M. E., & Ezekoye, O. A. (2015). Development of a multi-objective optimization tool for selecting thermal insulation materials in sustainable designs. *Energy and Buildings*, 105, 358–367.
8. Carreras, J., Boer, D., Cabeza, L. F., Jiménez, L., & Guillén-Gosálbez, G. (2016). Systematic approach for the life cycle multi-objective optimization of buildings combining objective reduction and surrogate modeling. *Energy and Buildings*, 130, 506–518.
9. Carreras, J., Boer, D., Cabeza, L. F., Jiménez, L., & Guillén-Gosálbez, G. (2016). Eco-costs evaluation for the optimal design of buildings with lower environmental impact. *Energy and Buildings*, 119, 189–199.
10. Sharif, S. A., & Hammad, A. (2019). Developing surrogate ANN for selecting near-optimal building energy renovation methods considering energy consumption, LCC and LCA. *Journal of Building Engineering*, 25, 100790.
11. Abdolvand, M. M. (2024). *A ML-assisted climate-responsive framework for sustainable building envelope design from preliminary phases* (Doctoral dissertation, The University of Sydney), <https://ses.library.usyd.edu.au/handle/2123/32804>
12. Chen, Z., Hammad, A. W. A., Kamardeen, I., & Akbarnezhad, A. (2020). Optimising embodied energy and thermal performance of thermal insulation in building envelopes via an automated building information modelling (BIM) tool. *Buildings*, 10(12), 218.
13. Chen, Y., Zhou, Y., Feng, W., Fang, Y., & Feng, A. (2022). Factors that influence the quantification of the embodied carbon emission of prefabricated buildings: A systematic review, meta-analysis and the way forward. *Buildings*, 12(8), 1265.
14. Duan, Z., Li, B., Zi, Y., & Yao, G. (2025). Building retrofit multiobjective optimization using neural networks and genetic algorithm three for energy, carbon and comfort. *Scientific Reports*, 15(1), 38076.
15. Valladares, W., et al. (2019). Energy optimization associated with thermal comfort and indoor air control via a deep reinforcement learning algorithm. *Building and Environment*, 155, 105–117.
16. Wang, B., Lu, W., Li, X., & Jin, F. (2026). A graph neural network-enhanced surrogate model for rapid optimization of carbon-efficient building thermal insulation systems. *Journal of Building Engineering*, 115234.

MİMARİ PROJELERİN ERKEN AŞAMALARINDA KULLANILACAK BIM TABANLI ÇOK KATMANLI YANGIN RİSKİ DEĞERLENDİRME MODELİ: KAVRAMSAL BİR ÇERÇEVE

Şafak Beşiroğlu^{1*}

Nuri Serteser²

^{1,2} İTÜ Mimarlık Fakültesi

Taşkışla, Şişli, İstanbul, 34367

ÖZET

Mimari tasarım süreçlerinde yangın emniyeti, çoğunlukla normatif kurallara (yönetmeliklere) dayalı, "başarılı/başarısız" ikilemine sıkışmış statik bir kontrol mekanizması olarak ele alınmaktadır. Bu yaklaşım, tasarımın ilerleyen aşamalarında fark edilen riskler için maliyetli ve zaman alıcı revizyonlara yol açmaktadır. Öte yandan, Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) teknolojileri, geometrik verinin ötesinde zengin bir semantik veri seti barındırma potansiyeline sahiptir. Ancak bu potansiyel, yangın emniyeti gibi dinamik ve karmaşık yapı fiziği problemleriyle entegre bir şekilde yeterince kullanılmamaktadır. Bu bildiri, mevcut reaktif ve kural-temelli yaklaşımların sınırlılıklarını aşmayı hedefleyen kavramsal bir model mimarisi önermektedir. Önerilen model, BIM platformundan beslenen çok katmanlı, parametrik bir yangın riski değerlendirme çerçevesi sunar. Bu mimari dört ana katmandan oluşur: (1) Veri Çekirdeği (BIM'den geometrik ve semantik verilerin otomatik çıkarımı), (2) Analiz Çekirdeği (Basitleştirilmiş yapı fiziği modülleri ile yangın yükü, duman yayılımı ve tahliye performansının değerlendirilmesi), (3) Risk Sentezi Motoru (Parametrelerin bir araya getirilerek bütüncül bir risk skorunun hesaplanması) ve (4) Karar Destek Arayüzü (Risk haritaları aracılığıyla mimarlara anlık görsel geribildirim). Bu çalışmanın temel katkısı, yangın emniyetini bir "son kontrol" olmaktan çıkarıp, tasarımın en erken aşamalarına entegre edilen "dinamik bir tasarım parametresi" haline getirecek teorik altyapıyı tanımlamasıdır.

Anahtar kelimeler: Yapı Bilgi Modelleme (BIM), Yangın emniyeti, Yapı fiziği, Risk değerlendirmesi, Karar destek sistemleri, Kavramsal model.

A BIM-BASED MULTI-LAYER FIRE RISK ASSESSMENT MODEL FOR USE IN EARLY STAGES OF ARCHITECTURAL DESIGN: A CONCEPTUAL FRAMEWORK

ABSTRACT

In architectural design processes, fire safety is predominantly handled as a static control mechanism based on prescriptive regulations, often confined within a "pass/fail" dichotomy. This reactive approach leads to costly and time-consuming revisions for risks identified only during the advanced stages of design. Although Building Information Modeling (BIM) technologies possess the potential to encompass rich semantic datasets beyond mere geometric information, this capacity remains underutilized in an integrated manner with complex and dynamic building physics problems such as fire safety. This paper proposes a conceptual model architecture aimed at overcoming the limitations of current rule-based approaches by offering a multi-layered, parametric fire risk assessment framework fed by the BIM platform. The proposed architecture consists of four primary layers: a Data Core for the automated extraction of geometric and semantic data from BIM; an Analysis Core for evaluating fire load, smoke propagation, and evacuation performance via simplified building physics modules; a Risk Synthesis Engine for calculating a holistic risk score through parameter integration; and a Decision Support Interface providing instantaneous visual feedback to architects via risk maps. The fundamental contribution of this study is the definition of a theoretical infrastructure that transforms fire safety from a "final check" into a "dynamic design parameter" integrated into the earliest stages of design.

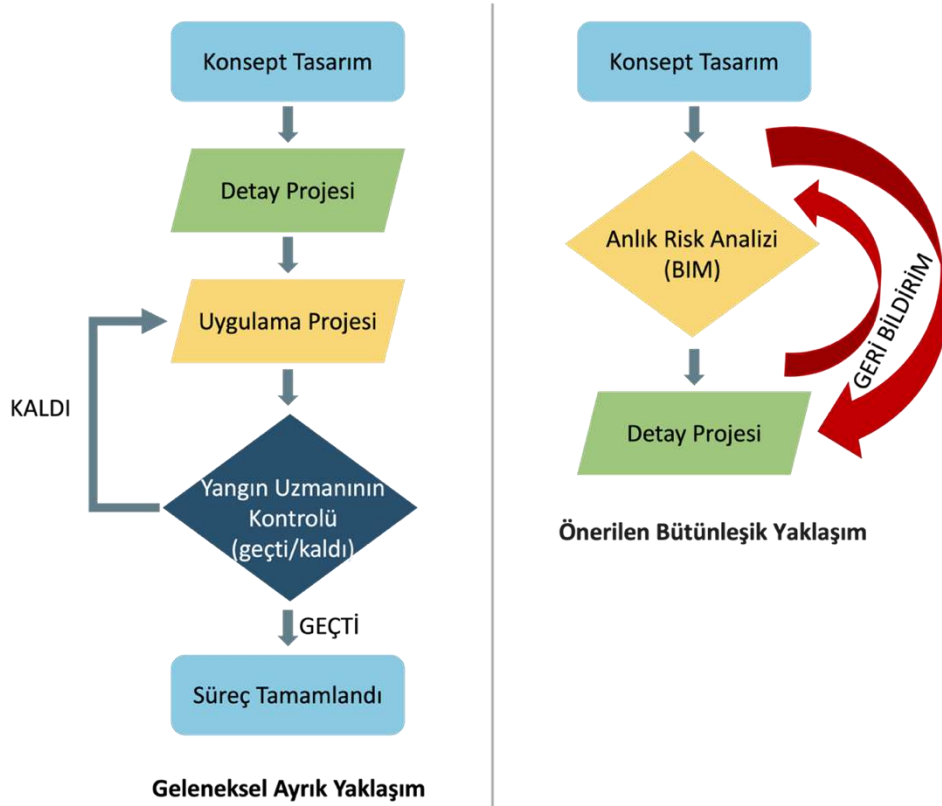
Keywords: Building Information Modeling, Fire safety, Building physics, Risk assessment, Decision support systems, Conceptual modeling.

^{1*}Sorumlu yazar e-posta adresi: besiroglu18@itu.edu.tr

1. GİRİŞ

Mimarlık, mühendislik ve inşaat (AEC) sektörü, son yirmi yılda dijitalleşmenin öncülük ettiği köklü bir dönüşümün içerisinde. Bu dönüşümün merkezinde, sadece üç boyutlu (3D) bir geometrik temsilden ibaret olmayan, aynı zamanda bir binanın tüm yaşam döngüsüne (tasarım, inşaat, işletme ve yıkım) ait semantik veriyi de barındıran Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) paradigması yer almaktadır [1]. BIM'in sağladığı koordinasyon, çakışma analizi, metraj hesabı ve maliyet yönetimi gibi faydalar, sektörde verimliliği artıran ve hataları minimize eden kanıtlanmış değer önerisi sunmaktadır [2]. Ancak, kritik öneme sahip bir alan olan yangın emniyeti bu dijital araçların kullanımında görece zayıf kalmıştır.

Yangın emniyeti, mimari tasarım sürecinin en temel ve taviz verilemez gerekliliklerinden biri olmasına rağmen, mevcut BIM odaklı iş akışlarındaki entegrasyonu reaktif ve ayrık bir yapıda kalmaktadır. Geleneksel yaklaşımda yangın emniyeti, çoğunlukla kural-temelli (prescriptive-based) bir yaklaşımla, ulusal veya yerel yönetmeliklerin (Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik [3]) belirlediği normatif şartların (kaçış yolu uzunlukları, yangına dayanım süreleri) pasif bir kontrol listesi (checklist) şeklinde uygulanmasıyla ele alınır [4]. Bu yaklaşım, tasarımın ilerleyen, hatta son aşamalarında bir son kontrol mekanizması olarak çalışır (Şekil 1). Bu durum, tasarımın erken aşamalarında fark edilmeyen bir yangın riski probleminin, projenin ilerleyen fazlarında maliyetli ve zaman alıcı revizyonlara yol açması gibi ciddi bir verimsizlik yaratmaktadır [5].



Şekil 1. Geleneksel ayırık yaklaşım ve önerilen bütünsel yaklaşım

Kural-temelli yaklaşımın bir alternatifi olan performans-temelli tasarım (Performance-Based Design - PBD), binaların yangın emniyetini önceden tanımlanmış performans hedeflerine göre analiz etmektedir. Bu analizlerde, Yangın Dinamikleri Simülatörü (FDS) veya tahliye simülasyonları gibi güçlü yapı fiziki araçları kullanılmaktadır [6]. Ancak bu araçlar, yüksek düzeyde uzmanlık gerektirmeleri, hesaplama sürelerinin uzun olması ve en önemlisi BIM platformları ile standartlaşmış birlikte çalışabilirlik (interoperability) protokolüne sahip olmamaları nedeniyle birer tasarım aracı olmaktan çok, "doğrulama aracı" olarak kalmaktadır [7].

İşte tam bu noktada yapı bilgisi ile yapı fiziki arasında kritik bir araştırma boşluğu ortaya çıkmaktadır (Şekil 2). Bir BIM modeli, bir duvarın mimari katmanlarını ve maliyetini bilirken FDS gibi bir fizik motoru, o duvarın termal iletkenliğini, yoğunluğunu veya özgül ısı kapasitesini bilmeye ihtiyaç duymaktadır. Bu semantik verinin BIM'den analiz yazılımına otomatik ve anlamlı bir şekilde aktarılamaması, performans-temelli analizin hızını ve verimliliğini baltalayan temel bir engeldir.



Şekil 2. Yapı bilgisi ve yapı fiziki arasındaki semantik veri kopukluğu

Bu bildiri, mevcut kural-temelli yaklaşımların katı sınırlılıkları ile tam kapsamlı performans simülasyonlarının yavaşlığı arasında kalan bu tasarım-analiz boşluğunu doldurmayı hedeflemektedir. Literatür, mimarlara tasarımın erken aşamalarında yaptıkları değişikliklerin (örn. bir atrium eklemenin veya bir malzemeyi değiştirmenin) yangın riski üzerindeki etkisini nicel olarak gösterebilecek, hızlı ve entegre bir karar destek aracına şiddetle ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir.

Bu bağlamda, bu çalışmanın temel amacı, henüz bir prototip veya nihai bir ürün sunmak değil; mimari tasarımın erken aşamaları için BIM tabanlı, çok katmanlı bir yangın riski değerlendirme modelinin teorik altyapısını ve kavramsal çerçevesini önermektir. Önerilen model, yangın emniyetini projenin sonunda bir sonuç olarak değil, tasarım sürecinin başında dinamik bir girdi (input) olarak ele almayı amaçlamaktadır. Bildirinin devam eden bölümlerinde, mevcut literatürün

bir eleştirisi yapılacak, ardından önerilen kavramsal modelin dört ana katmanı (Veri Çekirdeği, Analiz Çekirdeği, Risk Sentezi Motoru ve Karar Destek Arayüzü) detaylandırılacak ve son olarak modelin potansiyel katkıları ve gelecekteki araştırma zorlukları tartışılacaktır.

2. MEVCUT YÖNTEMLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Mimari tasarımda yangın emniyetinin sağlanması süreci, dijitalleşme potansiyeline rağmen büyük ölçüde parçalı ve reaktif bir yapıda kalmıştır. Bu bölümde, mevcut temel yaklaşımlar olan kural-temelli (prescriptive) yaklaşım, performans-temelli tasarım (PBD) simülasyonları ve bu ikisinin dijital türevleri sistematik bir eleştiriye tabi tutulacak ve bu eleştiriler ışığında mevcut araştırma boşluğu tanımlanacaktır.

2.1. Kural-Temelli Yaklaşımların Katılığı ve Yüzeyselliği

Mevcut uygulamada yangın emniyetine dair yasal uygulama, kural-temelli yönetmeliklerdir. Bu yönetmelikler, yılların tecrübesiyle oluşturulmuş, minimum emniyet standartlarını (kaçış mesafesi, koridor genişliği, yapı elemanları için dayanım süreleri) tanımaktadır [5]. Bu yaklaşımın temel avantajı, denetiminin basit ve net olmasıdır; bir tasarım ya "uygundur" ya da "değildir". Ancak bu "başarılı/başarısız" ikili mantığı, aynı zamanda yaklaşımın en büyük zafiyeti haline gelmektedir. Kural-temelli sistemler, doğası gereği tek-tip mantığa dayanır ve modern mimarinin sunduğu karmaşık geometrilere (açık plan ofisler, organik formlar) cevap vermekte yetersiz kalmaktadır [8]. Bir tasarım, yönetmelik maddelerini harfiyen yerine getirirse dahi, farklı tasarım bileşenlerinin etkileşimi sonucu ortaya çıkan beklenmedik riskleri öngöremez. Bu yaklaşım, riski yönetmez sadece minimum uyumu denetler; emniyetli olanı değil, yasal olanı hedeflemektedir.

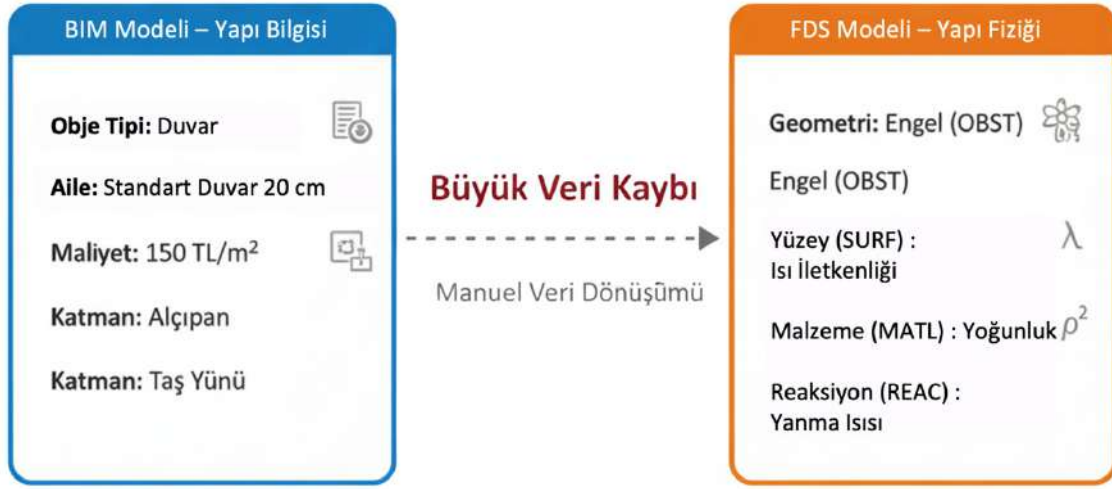
Dijital çağda bu yaklaşımın evrildiği nokta ise Otomatik Kural Denetimi (Automated Code Checking) olmuştur. BIM'in semantik verisinden yararlanan yazılımlar, bir modelin yönetmelik kurallarına uygunluğunu saniyeler içinde denetleyebilmektedir [9]. Mekanizma, verimlilik açısından ileri bir adım olsa da temeldeki felsefeyi değiştirmez. Otomatik kural denetimi, yapı fiziğini (duman nasıl hareket eder?) anlamaz; sadece yapı bilgisindeki (kapı ile oda arasındaki mesafe nedir?) geometrik ve mantıksal kuralları denetlemektedir. Bu durum kural-temelli yaklaşımı, dijital ortama taşımaktan öteye geçemeyen yüzeyselliği sebebiyle verimsiz çalışmalar yaratmaktadır.

2.2. Temelli Tasarım (PBD) ve Birlikte Çalışabilirlik

Kural-temelli yaklaşımın kısıtlayıcılığına bir yanıt olarak geliştirilen Performans Temelli Tasarım (PBD), "Bu tasarım yasalara uygun mu?" sorusu yerine, "Bu tasarım, tanımlanan yangın senaryosu yaşamsal emniyeti sağlıyor mu?" sorusuna odaklanmaktadır [10]. Bu yaklaşım, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) temelli Yangın Dinamikleri Simülatörü (FDS) ve Ajan-temelli tahliye modelleri (Pathfinder, FDS+Evac) gibi gelişmiş yapı fiziği araçlarını kullanmaktadır [6]. PBD, mimarlara yenilikçi tasarımlar yapma özgürlüğü sunmaktadır. Çünkü yangın emniyet önlemleri, katı kurallarla değil, analitik olarak kanıtlanmış performansla ölçülmektedir.

Ancak performans temelli tasarımın avantajı, tasarımın erken aşamalarını elverişsiz kılan üç temel zorluğu taşımaktadır. Bunlar:

1. Uzmanlık Gerekсинimi: CFD simülasyonları, yüksek düzeyde mimarlık/mühendislik bilgisi gerektiren, karmaşık ve hataya açık süreçlerdir. Erken aşamada çalışan bir meslek profesyonelinin bu araçları etkin kullanması zorluk teşkil etmektedir.
2. Hesaplama Yüğü: Tek bir yangın senaryosunun analizi, modelin karmaşıklığına bağlı olarak saatler, hatta günler sürebilmektedir. Bu durum, tasarımın "ne olur-eğer" (what-if) senaryolarıyla hızla iterasyona girmesi gereken erken aşamaları için kabul edilemez bir yavaşlık haline gelmektedir.
3. Semantik Birlikte Çalışabilirlik (Semantic Interoperability): Performans temelli tasarımın BIM ile entegrasyonundaki en kritik engel, birlikte çalışabilirliktir. BIM platformları (Revit, ArchiCAD vb.) ile FDS gibi analiz araçları arasında standartlaşmış, pürüzsüz bir veri akışı yoktur (Şekil 3). Bir BIM modeli, bir duvarı "Mimari Duvar Tipi-01, 20 cm Kalınlık" olarak tanımlarken; FDS motoru, o duvarı fiziksel özelliklerle (ısı iletkenliği, yoğunluk, özgül ısı kapasitesi, Yanma Isısı) tanımlanmış bir "Yüzey" (SURF) ve "Malzeme" (MATL) olarak görmek ister [7].



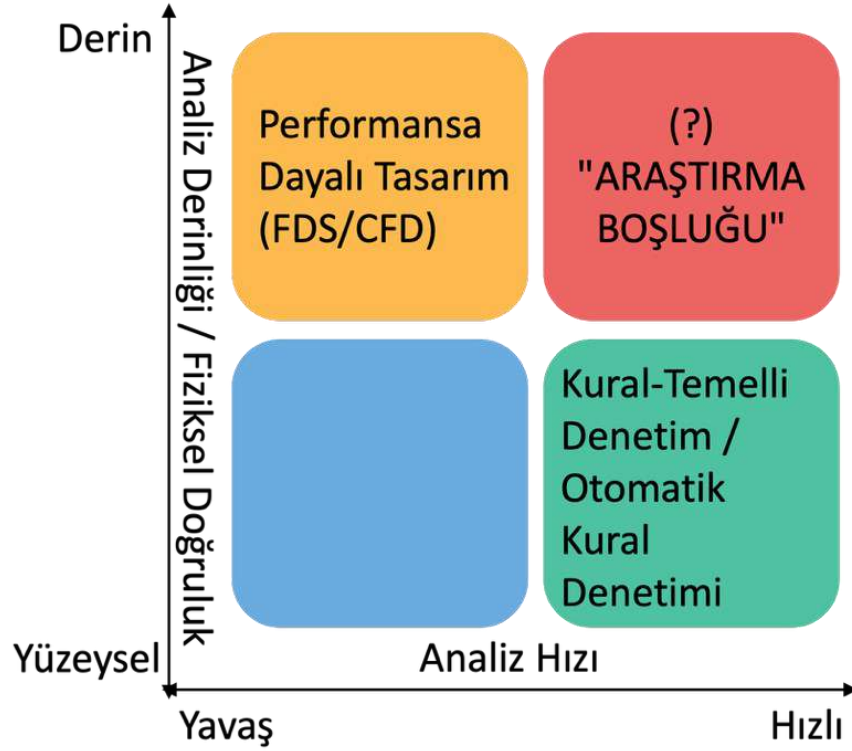
Şekil 3. BIM ve FDS arasındaki semantik birlikte çalışabilirlik

Bu veri kaybı ve manuel dönüşüm zorunluluğı, PBD analizlerini BIM iş akışının dışına iter. PBD, bir tasarım aracı olmaktan çıkar, tasarım bittikten sonra kullanılan, yavaş ve hantal bir doğrulama aracı (validation tool) haline gelir [11].

2.3. Araştırma Boşluğunun Tanımlanması

Mevcut yöntemler iki başlıkta incelenebilir (Şekil 4).

- Hızlı ama Yüzeysel (Kural-Temelli): Yönetmeliklere ve otomatik kural denetimine dayanan, fiziksel gerçekliği modellemeyen, "pass/fail" odaklı sistemler.
- Derin ama Yavaş ve Ayrık (Performans-Temelli): CFD simülasyonlarına dayanan, yüksek doğruluklu ancak tasarım sürecine entegre olamayan, uzmanlık gerektiren sistemler.



Şekil 4. Mimari yangın emniyeti analiz yöntemlerinin konumlanması

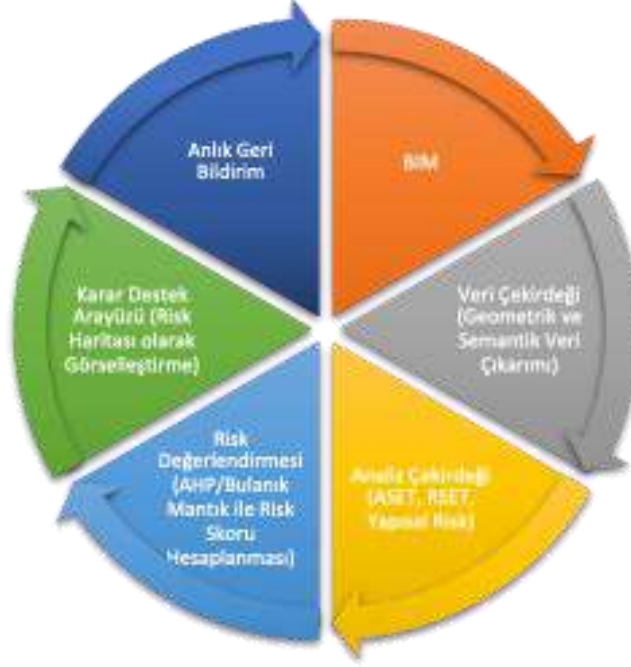
Açıkça görülen araştırma boşluğu, tam da bu sağ-üst kadranda. AEC sektörünün; mimarın yaratıcı sürecini kesintiye uğratmadan, tasarımın en erken aşamalarında, "ne olur-eğer" (what-if) senaryolarını hızla test etmesine olanak tanıyan bir metodolojiye ihtiyacı vardır. Bu metodoloji, FDS kadar detaylı hesaplama yükü gerektirmemeli (hızlı olmalı), ancak kural denetimi kadar yüzeysel de kalmamalıdır (fizik-temelli olmalı).

Bu boşluk, ancak yapı bilgisini (BIM'den gelen zengin semantik ve geometrik veri) ve yapı fizliğini (yangın yükü, duman yayılımı, tahliye süresi gibi parametrelerin basitleştirilmiş ancak analitik temelli modelleri) doğrudan entegre eden bir sistemle doldurulabilir. İhtiyaç; mimari kararların yangın riski üzerindeki etkisini anlık veya anlığa-yakın olarak nicelleştiren ve bu riski doğrudan BIM modeli üzerinde görselleştiren dinamik bir karar destek sistemidir. Bu çalışmada önerilen kavramsal model, tam da bu boşluğu doldurmayı hedeflemektedir.

3. ÖNERİLEN KAVRAMSAL MODEL

Ortaya konan araştırma boşluğu—yani kural-temelli denetimin hızı ile performans-temelli simülasyonun analitik derinliği arasında kalan, tasarım sürecine entegre, hızlı ve fizik-temelli bir karar destek aracının eksikliği—önerilen kavramsal model mimarisi ile giderilmesi hedeflenmektedir. Bu model, yangın emniyetini tasarım sürecinin sonunda bir doğrulama (validation) adımı olmaktan çıkarıp, sürecin en başına entegre bir girdi (input) parametresine dönüştürmeyi amaçlayan bütüncül bir yaklaşımdır.

Önerilen model, yapı bilgi modelini (BIM) bir veri omurgası olarak kullanan ve birbiriyle iletişim halindeki dört temel katmandan oluşan bir çerçeve sunmaktadır: (1) Veri Çekirdeği, (2) Analiz Çekirdeği, (3) Risk Sentezi Motoru ve (4) Karar Destek Arayüzü (Şekil 5).



Şekil 5. Önerilen katmanlı bütünleşik model

3.1. Katman 1: Veri Çekirdeği (BIM-Tabanlı Veri Çıkarımı)

Modelin ilk katmanı, gerekli girdileri doğrudan BIM modelinden çeken bir veri çıkarım motorudur. Bu katman, Bölüm 2'de tanımlanan semantik birlikte çalışabilirlik engelini aşmak için kritik bir rol oynamaktadır. Veriler iki ana kategoride toplanmaktadır.

1. Geometrik Veri (Otomatik Çıkarım): Modelden doğrudan türetilen, çoğunlukla açık verilerdir. Mekân hacimleri, kat alanları, kapı ve pencere açıklıklarının boyutları, koridor genişlikleri ve mekânlar arası bağlantısalılığı kullanarak hesaplanan kaçış yolu uzunluklarını içermektedir [12].
2. Semantik Veri (Zenginleştirilmiş Çıkarım): Modelin yapı fiziği ile konuştuğu dildir. Standart bir BIM objesi, yangın analizi için gereken fiziksel özellikleri doğal olarak barındırmamaktadır. Bu nedenle, verinin semantik olarak zenginleştirilmesi gerekir. Bu, IFC (Industry Foundation Classes) şemasına özel Nitelik Setleri (Property Sets - Pset) eklenmesi veya modelleme yazılımı içinde paylaşılan parametreler aracılığıyla yapılmaktadır.
 - a. Malzeme Özellikleri: Yüzey kaplamalarının yanıcılık sınıfı, malzemenin yoğunluğu ve termal iletkenliği.
 - b. Bileşen Özellikleri: Duvar, döşeme ve kapıların yangın dayanım süreleri.
 - c. Kullanım Verisi: Mekânların kullanım amacı ve bu amaca bağlı olarak standartlarda tanımlanan kullanıcı yükü yoğunluğu [13].

3.2. Katman 2: Analiz Çekirdeği

Bu katman modelin beynidir ve Bölüm 2'deki hız-derinlik ikilemini çözmektedir. Tam kapsamlı CFD analizinin hesaplama yükünden kaçınarak tasarımın erken aşamaları için yeterli doğrulukta sonuçlar üreten, analitik ve ampirik fizik modellerini kullanmaktadır [14].

Bu çekirdek, temeldeki ASET ve RSET gibi iki kritik zaman metriğini hesaplamaya odaklanmaktadır.

- ASET (Available Safe Egress Time - Mevcut Emniyetli Kaçış Süresi): Bir yangın senaryosunda, ortam koşullarının (duman seviyesi, sıcaklık vb.) yaşamsal emniyet için kabul edilemez hale gelmesine kadar geçen süredir [10]. Bu modül, Katman 1'den gelen yangın yükü ve mekân geometrisi verilerini kullanarak;
 - Bir yangın büyüme eğrisi belirler.
 - Alpert, 1975 [15] tarafından geliştirilen tavan jet akışı ampirik formülleri veya basitleştirilmiş iki-bölge modelleri (CFAST) kullanarak duman tabakasının alçalma süresini hesaplar.
- RSET (Required Safe Egress Time - Gerekli Emniyetli Kaçış Süresi): Bina sakinlerinin yangını fark edip emniyetli bir alana ulaşmaları için gereken toplam süredir. Bu modül, Katman 1'den gelen kaçış yolu uzunluklarını, kişi yükünü ve standart yürüme hızlarını kullanarak hareket süresi değerini hesaplamaktadır.
 - $RSET = \text{algılama} + \text{ön-hareket/reaksiyon} + \text{hareket/tahliye}$ [11].

3.3. Katman 3: Risk Sentezi Motoru (Algoritmik Değerlendirme)

Bu katman, Katman 2'den gelen farklı metrikleri birleştirerek mimarın anlayabileceği bütüncül bir "risk skoru" veya "emniyet marjı" üretmektedir. Temel performans kriteri $ASET > RSET$ koşuludur [16]. Ancak risk, bundan daha karmaşıktır. Örneğin ASET RSET'den büyük olsa bile, bir mekânın yangın yükünün çok yüksek olması mülk koruması açısından yüksek risk teşkil edebilmektedir.

Bu nedenle bu motor, farklı parametreleri (Emniyet Marjı [ASET - RSET], Toplam Yangın Yüğü, Yapı Elemanlarının Yangın Dayanımı, Aktif Sistemlerin Varlığı vb.) ağırlıklandırmak ve birleştirmek için Çok Kriterli Karar Verme (MCDM) metodolojilerini kullanmaktadır. Bu noktada, parametrelerin göreceli önemini tanımlamak için Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) veya belirsizlikleri yönetmek için Bulanık Mantık (Fuzzy Logic) gibi tekniklerin kullanılması önerilmektedir [8]. Bu motorun çıktısı, her mekân veya kat için 0 (düşük risk) ile 100 (yüksek risk) arasında nicel bir değerdir.

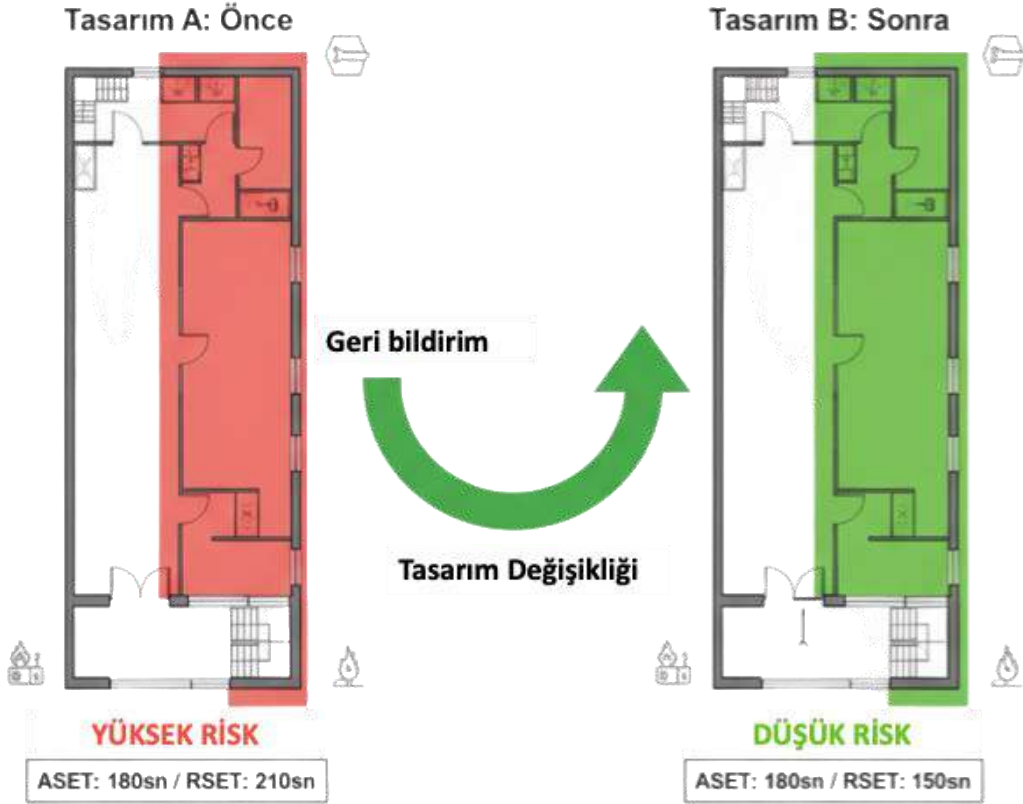
3.4. Katman 4: Karar Destek Arayüzü (Görselleştirme)

Modelin son katmanı, karar destek arayüzü katmanıdır. Katman 3'te üretilen soyut risk skorunu alarak, bunu mimari tasarım aracına, yani doğrudan BIM modeline işlemektedir. Bu, tasarımcının "ne olur-eğer" (what-if) senaryolarını test etmesine olanak tanıyan bir anlık geribildirim mekanizmasıdır. İki şekilde gerçekleşir.

- Risk Haritalaması: BIM modeli üzerindeki kat planları, risk skoruna göre renklendirilebilir (Şekil 6). Yüksek riskli alanlar (örn. $ASET < RSET$ olan veya yangın yükü kritik seviyede olan) kırmızı, orta riskli alanlar sarı ve emniyetli alanlar yeşil olarak gösterilebilir.

- **Dinamik İterasyon:** Tasarımcı, projede bir değişiklik yaptığında (örn. bir duvarın kaplama malzemesini değiştirdiğinde [Katman 1 değişikliği] veya bir koridorun sonuna bir kapı eklediğinde [geometri değişikliği]), model mimarisi saniyeler içinde yeniden çalışır (Katman 2 ve 3) ve risk haritası (Katman 4) anında güncellenir.

Bu model, BIM'i statik bir veri deposu olmaktan çıkarıp, yangın emniyeti performansını proaktif olarak şekillendiren dinamik bir tasarım ortağına dönüştürmektedir.



Şekil 4. Önerilen karar destek arayüzü (katman 4) örneği

4. TARTIŞMA: MODELİN KATKISI VE GELECEK ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada sunulan kavramsal çerçeve, yangın emniyeti alanında yerleşik olan reaktif ve kural-temelli paradigmayı, proaktif ve performans-temelli bir yaklaşıma dönüştürme potansiyeli taşımaktadır. Bu bölümde, önerilen modelin literatüre ve pratiğe sunduğu katkılar, modelin doğasından kaynaklanan kısıtlar ve bu kısıtların aşılmasına yönelik gelecek araştırma rotaları tartışılmaktadır.

Önerilen modelin en temel teorik katkısı, yapı bilgisi (BIM) ile yapı fiziği (yangın dinamiği) arasındaki kopukluğu gidermesidir. Literatürde BIM, genellikle statik verinin (geometri, metraj) yönetimi için kullanılırken; yangın emniyeti, tasarım bittikten sonra devreye giren harici bir denetim süreci olarak ele alınmıştır. Bu çalışma, yangın riskini tasarımın bir sonucu değil, tasarım sürecini yönlendiren bir girdi parametresi olarak yeniden tanımlamaktadır.

Pratik açıdan bakıldığında, modelin sunduğu anlık görsel geribildirim mekanizması, tasarımcının karar verme süreçlerini kökten değiştirme potansiyeline sahiptir. Geleneksel CFD simülasyonlarının (FDS vb.) günler süren hesaplama yükü, bu araçların tasarım aracı olarak kullanılmasını zorlaştırmaktadır [7]. Ancak bu çalışmada önerilen, basitleştirilmiş fizik modüllerine dayalı analitik çekirdek, doğruluktan ödün vermeden hızı optimize etmektedir. Bu sayede tasarımcı, bir koridorun genişliğini değiştirdiğinde veya bir malzemenin türünü güncellediğinde, bu değişikliğin ASET/RSET dengesine etkisini saniyeler içinde görebilmektedir. Bu durum, hataların tasarımın en başında, maliyeti en düşükken çözülmesini sağlamaktadır [1]. Önerilen modelin başarısı, kaçınılmaz bazı kısıtlamalara sahiptir ve bu kısıtların tartışılması gereklidir.

- **Veri Kalitesi ve Standardizasyon Sorunu:** Modelin güvenilirliği BIM verisinin kalitesine doğrudan bağlıdır. Mevcut IFC şemaları, yangın parametrelerini (ısı yayılım hızı, duman üretim katsayısı gibi) standart olarak barındırmamaktadır. Bu verilerin manuel olarak girilmesi veya standart dışı parametrelerle tanımlanması, sektör genelinde uygulanabilirliği zorlaştıran bir engeldir [17].
- **Basitleştirmenin Getirdiği Belirsizlik:** Modelin analiz çekirdeğinde, hesaplama hızını artırmak için CFD yerine ampirik formüller ve alan modelleri kullanılmaktadır. Bu yaklaşım, çok karmaşık geometrilerde duman hareketini tam bir doğrulukla yansıtmayabilir. Ortaya çıkan durum modelin kesin bir doğrulama aracı değil bir karar destek ve yönlendirme aracı olduğu gerçeğini değiştirmemektedir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, mimari tasarım süreçlerinde geleneksel olarak sonradan gelen eklemlenen ve kural-temelli bir denetim mekanizması olarak işleyen yangın emniyeti olgusunun, önerilen dört katmanlı kavramsal çerçeve ile tasarıma entegre ve performans-odaklı bir karar destek sistemine dönüştürülmesi hedeflenmiştir. Araştırma, mevcut BIM teknolojilerinin sunduğu zengin semantik veri potansiyeli ile yangın mühendisliğinin analitik araçları arasındaki birlikte çalışabilirlik (interoperability) sorununu merkeze almış ve bu soruna bir çözüm önerisi getirmektedir.

Elde edilen teorik bulgular ve kurgulanan model mimarisi göstermektedir ki yangın risk analizi, projenin son aşamasına bırakılan statik bir uygunluk kontrolü olmaktan çıkarılmalıdır. Bunun yerine, tasarımın erken aşamalarında, mimari kararların (geometri, malzeme, mekân organizasyonu) fiziksel sonuçlarını anlık olarak simüle eden dinamik bir tasarım parametresi haline gelmelidir. Önerilen model, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) simülasyonlarının yüksek doğruluk ancak düşük hız kısıtı ile yönetmelik kontrol listelerinin yüksek hız ancak düşük fiziksel gerçeklik kısıtı arasındaki araştırma boşluğunu dolduracağı öngörülmektedir.

Modelin sunduğu Veri - Analiz - Sentez - Görselleştirme döngüsünün, tasarımcılara sadece "bu tasarım hatalı" demenin dışında aynı zamanda "bu tasarımın ASET/RSET dengesi nerede bozuluyor?" ve "hangi malzeme değişimi riski optimize eder?" sorularına yanıt verecek nicel veriler sunması planlanmaktadır. Bu yaklaşım mimarlık, mühendislik ve inşaat sektörlerinde hata maliyeti kavramını minimize etmekle kalmayıp, yapıların yangın gibi felaketlere karşı direncini artıran performans temelli tasarım (PBD) paradigmasının tabana yayılmasını sağlayacaktır.

Sonuç olarak bu çalışmada sunulan kavramsal çerçeve, yangın emniyetini bir mühendislik uzmanlığı tekelinden çıkarıp, mimari ortamda anlaşılır ve yönetilebilir bir veri seti haline getirmektedir. Gelecek çalışmaların bu teorik çerçeveyi somut yazılım prototipleriyle desteklemesi ve doğrulama süreçlerini tamamlamasıyla, dijital araçlar ve yapı fiziğinin sentezlendiği yangın açısından daha emniyetli bir yapma çevre mümkün olacaktır.

KAYNAKLAR

1. 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.). John Wiley & Sons.
2. 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.
3. BYKHY. (2015). Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik, T. C. Resmi Gazete, Sayı:26735, 19.12.2007. (Değişik: Resmî Gazete, 09.07.2015, Sayı:2015/7401).
4. Beşiroğlu, Ş., Serteser, N. (2025). Binalarda Yangın Risk Değerlendirmesi: Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik Örneği, *Mimarlık ve Yangın Sempozyumu 2025 Bildiriler Kitabı*, 197-206, İstanbul: İTÜ Yayınevi.
5. Cote, A. E. (Ed.). (2008). Fire protection handbook (20th ed.). National Fire Protection Association.
6. McGrattan, K., Hostikka, S., Floyd, J., & Baum, H. (2013). Fire Dynamics Simulator technical reference guide. National Institute of Standards and Technology (NIST).
7. Wang, S. H., Wang, W. C., Shou, K. C., & Wang, H. Y. (2015). Fire safety assessment of a high-rise building: A case study in Taiwan. *Procedia Engineering*, 118, 887-894.
8. Hadjisophocleous, G. V., & Benichou, N. (2009). Performance criteria used in fire safety design. *Automation in Construction*, 18(8), 1034-1044.
9. Eastman, C., Lee, J., Jeong, Y., & Lee, J. (2009). Automatic rule-based checking of building designs. *Automation in Construction*, 18(8), 1011-1033.
10. National Fire Protection Association (NFPA). (2018). NFPA 101: Life safety code. National Fire Protection Association.
11. Ronchi, E., & Nilsson, D. (2013). Fire evacuation in high-rise buildings: A review of human behaviour and modelling research. *Fire Technology*, 49(3), 735-770.
12. Lee, S., Lee, J., Park, J., & Kim, J. (2017). Automated regeneration of BIM-based fire safety checking rules for super-tall buildings. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 16(3), 577-584.
13. Omer, A. M. (2011). Energy, environment and sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4), 2278-2296.
14. Karlsson, B., & Quintiere, J. G. (2000). Enclosure fire dynamics. CRC Press.
15. Alpert, R. L. (1975). Calculation of response time of ceiling-mounted fire detectors. *Fire Technology*, 11(3), 181-195.

16. Bukowski, R. W. (2008). Performance-based fire safety design. In A. E. Cote (Ed.), *Fire protection handbook* (20th ed.). National Fire Protection Association.
17. Borrmann, A., Beetz, J., Koch, C., & Liebich, T. (Eds.). (2018). *Industry Foundation Classes: A common language for Building Information Modeling*. Springer.

YAPMA ÇEVRE TASARIM YAKLAŞIMLARININ NÖROBİLİM ÇERÇEVESİNDEN İNCELENMESİ

H. Merve Yanardağ Erdener^{1*}

Şefik Evren Erdener²

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, İstanbul

² Hacettepe Üniversitesi, Nörolojik Bilimler ve Psikiyatri Enstitüsü, Ankara

ÖZET

Yapı fiziği, binaların oluşturduğu fiziksel çevreyi incelerken, nörobilim beynimizin bu çevreyi mimari bağlamda nasıl algıladığını ve deneyimlediğini araştıran bir disiplindir. Nörobilimsel bulgular, mimarın kontrolünde olan termal konfor, iç mekân hava kalitesi ve diğer çevresel parametrelerin, insan beyninin işlevleri, davranışları, bilişsel performansı ve baş ağrısı gibi rahatsızlıkların görülme sıklığı üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir. Ancak mevcut literatürün büyük çoğunluğu tıp disiplini bakış açısıyla yürütüldüğünden, bu etkilerin mimari bağlamda anlaşılması sınırlı kalmaktadır. Mevcut çalışmaların mimari tasarım kriterlerini sınırlı oranda dikkate aldığı görülmekle birlikte, yapı fiziği ile doğrudan ilişkili bu kriterler, iç mekân çevre kalitesinin (İMÇK) temel belirleyicilerini oluşturmakta ve bina tasarımında merkezi bir öneme sahiptir.. Bu multidisipliner araştırma, mimari kararlarla belirlenebilecek fiziksel parametreleri—ısı konfor, iç mekân hava kalitesi, akustik koşullar, aydınlatma unsurları çerçevesinde ele almakta ve bunların nöropsikiyatrik rahatsızlıklarla ilişkili etkilerini incelemektedir. Derleme yöntemiyle yürütülen araştırma, nörobilimsel bir perspektifle yapma çevreyi, özellikle iç mekân çevre kalitesini belirleyen aydınlatma, hava kalitesi, akustik ve ısı konfor gibi bileşenlerin nörobiyolojik süreçlerini ve insan davranışlarındaki yansımalarını ortaya koymayı hedeflemektedir. Ayrıca çalışma, bilişsel açıdan sağlıklı mekânların oluşturulabilmesi amacıyla, iç mekân çevre kalitesinin iyileştirilmesine yönelik biyofilik tasarım ilkeleri başta olmak üzere çeşitli tasarım stratejilerinin ortaya konulmasını hedeflemektedir.

Anahtar kelimeler: Nöromimarlık, Çevresel nörobilim, Mimarlık ve zihin sağlığı

AN INVESTIGATION OF BUILT ENVIRONMENT DESIGN APPROACHES FROM A NEUROSCIENTIFIC PERSPECTIVE

ABSTRACT

Building physics examines the physical environment created by buildings, while neuroscience explores how the brain perceives and experiences this environment within an architectural context. Neuroscientific findings indicate that environmental factors largely shaped by architects—such as thermal comfort, indoor air quality, acoustic conditions, and lighting—have direct effects on brain function, behavior, cognitive performance, and the prevalence of symptoms such as headaches. However, since most existing research has been conducted from a medical perspective, these effects remain insufficiently interpreted within an architectural framework. Although some studies address architectural design criteria, those directly related to building physics constitute the fundamental determinants of indoor environmental quality and hold central importance in building design. This multidisciplinary review focuses on physical parameters that can be shaped through architectural decisions and examines their associations with neuropsychiatric disorders. From a neuroscientific perspective, the study aims to clarify the neurobiological processes underlying key components of indoor environmental quality—particularly lighting, air quality, acoustics, and thermal comfort—and to explore their reflections on human behavior. Furthermore, it proposes design strategies, especially biophilic design principles, to enhance indoor environmental quality and support the creation of cognitively healthy spaces.

Keywords: Neuroarchitecture, Environmental neuroscience, Architecture and mental health

^{1*}yanardaghmerve@gmail.com

1.GİRİŞ

Nörobilim, sinir sisteminin yapısını ve işlevini inceleyerek davranış ve bilişsel süreçlerin altında yatan mekanizmaları açıklamayı amaçlayan bilim dalıdır. İnsan davranışı ve bilişsel durumu, içinde bulunduğu mimari çevreden doğrudan etkilenir; bu nedenle yapma çevre ile nörobilim arasında güçlü bir ilişki bulunmaktadır. Beyin, mekanik, termal, kimyasal, kokusal, görsel ve işitsel uyaranlarla sürekli etkileşim hâlinindedir ve bu uyaranlar beyin işlevlerini doğrudan şekillendirir. Günümüzde büyük ölçüde yapma çevrede yaşayan insan için doğal öğelerle yeniden etkileşim kurma gereksinimi olarak tanımlanacak biyofilik tasarım, nörobilimsel bulgularla da desteklenen temel bir ihtiyaçtır. Bu nedenle, yapma çevrenin doğal tasarım özellikleri bilişsel ve davranışsal süreçleri destekleyebileceği gibi, doğal öğelerden uzaklaşılan koşullar nörolojik ve psikiyatrik bozukluklara yatkınlığı da arttırabilir. Olumsuz çevresel koşullar, yani kronik ve istenmeyen fiziksel uyaranlar, kökenlerine bağlı olarak farklı özgül etkiler gösterse de, ortak mekanizma genellikle anormal stres yanıtında birleşmektedir. Stresli uyaranlar, kısa vadede beynin korku merkezi olarak da bilinen amigdalayı aktive eder ve vücudun istemsiz otonom süreçlerini kontrol eden hipotalamusun paraventriküler çekirdeğini (PVN) uyarır; bu da sempatik sinir sistemini devreye alarak nabızı, kan şekerini ve kan basıncını yükselten adrenalin hormonunun salınımına yol açar. Stresli uyaranlar, daha yavaş ve uzun vadeli olarak ise, yine PVN'den kortikotropin salıcı hormon (CRH), hipofizden adrenokortikotropik hormon (ACTH) ve ardından adrenal korteksten kortizol salgılanmasını tetikleyerek hipotalamus-hipofiz-adrenal (HPA) aksını aktive eder. Normal şartlarda HPA aksının aktivasyonu vücudu tehlikeli koşullara karşı metabolik olarak hazırlayan ve zor koşullarla daha etkin baş etmesini sağlayan adaptif bir süreçtir. İnsan beyninin çevresel koşullara duyarlı yapısı, yapma çevrenin stres ve sağlık üzerindeki etkilerini inceleyen nöromimarlık alanının ortaya çıkmasına zemin hazırlamış; ancak mimarlık ve sağlık bilimleri arasındaki ortak kavramsal çerçeve eksikliği, bu etkileşimleri bütüncül biçimde ele alan çalışmaların sayısını sınırlamıştır.

Bu çalışma, iç mekân çevre kalitesini (İMÇK) belirleyen aydınlatma, hava kalitesi, akustik ve ısı konfor bileşenlerinin nörobiyolojik ve davranışsal etkilerini inceleyerek, nöro-davranışsal açıdan sağlıklı mekân tasarımına yönelik yol gösterici parametreler ortaya koymayı amaçlamaktadır. Bu kapsamda, toplumda yaygın olarak görülen baş ağrısı, depresyon ve anksiyete gibi rahatsızlıklar nörobilimsel çerçevede ele alınmış; söz konusu durumlarla ilişkili olabilecek İMÇK bileşenleri incelenmiştir. Ayrıca, İMÇK'ni destekleyebileceği düşünülen biyofilik tasarım unsurları değerlendirilmiş; son olarak, elde edilen bulgular doğrultusunda nörobilim temelli daha sağlıklı tasarımlar için önerilebilecek temel ilkeler özetlenmiştir.

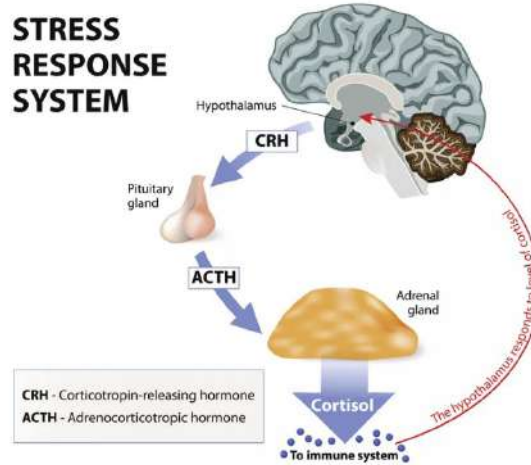
2. YAPMA ÇEVREDE 'NÖROBİLİM' KAVRAMI

Yapma çevre, bilişsel ve davranışsal işlevleri destekleyebileceği gibi, olumsuz koşullarda kronik stres yanıtını tetikleyerek nöropsikiyatrik rahatsızlıklara yatkınlığı artırabilmektedir; Bu bağlamda, oluşabilecek nöropsikiyatrik rahatsızlıklar, yapma çevrenin İMÇK'yı belirleyen unsurlar açısından değerlendirilecek ve biyofilik tasarım kavramı açıklanacaktır.

2.1.Yapma Çevrenin Neden Olabileceği Nöropsikiyatrik Rahatsızlıklar

Çevresel etkenlerden köken alan stres sonucu vücut bir savunma yanıtı oluşturur ve HPA aksının (Şekil 1) aktivasyonu sonucu salınan kortizol ve adrenalin gibi hormonlar vücudu yukarıda söz edildiği gibi 'savaş ya da kaç' yanıtına hazırlar. Ama bu süreç, özellikle sürekli hale geldiğinde,

beyinde de doğrudan bazı etkiler çıkarır. Örneğin kortizol, kandan beyin dokusuna geçerek nöronlarla ve nöronlara yardımcı glia hücreleriyle etkileşir ve beyinde özellikle prefrontal korteks, hipokampus, amigdala ve nükleus akkumbens gibi davranışsal ve bilişsel süreçlerden sorumlu kritik alanların çalışmasını değiştirir. Çevresel tasarım unsurları (ışık, akustik, hava kalitesi ve mekânsal düzen gibi), serebral kortekste gerçekleşen bilgi işleme süreçlerini düzenleyen noradrenerjik, serotonerjik, dopaminerjik ve kolinerjik nörotransmitter sistemlerini etkileyerek bireyin dikkat, duygu durumu, motivasyon ve öğrenme performansını etkileyebilir [1]. Yapma çevredeki olumsuz uyaranlar ise bu bilişsel süreçleri bozarak migren, anksiyete ve depresyon gibi nöropsikiyatrik sorunlara zemin hazırlayabilir.



Şekil 1. Çevresel strese karşı yanıt sistemi (HPA aksı ve mekanizması) [2]

Çevresel stres etkenleri, hafıza ve dikkat sorunları, yürütücü işlevlerde performans düşüşü ile duygudurum ve anksiyete bozukluklarına yol açabilir. Uzun vadede ise bu duygusal düzensizlikler, uygunsuz duygusal tepkilerle karakterize olup depresif bozukluk şeklinde ortaya çıkabilmektedir. Depresyon, çevresel stresörlerin bilişsel ve duygusal düzenleme mekanizmaları üzerinde oluşturduğu kronik nörobiyolojik etkilerin klinik düzeyde işlev kaybına ve yaşam kalitesinde belirgin düşüşe yol açabilmesi nedeniyle halk sağlığı açısından önemlidir. Anksiyete bozuklukları ise yersiz kaygı, endişe, huzursuzlu, gerginlik ve buna eşlik eden çarpıntı, terleme gibi fiziksel belirtilerle karakterizedir; yaygın anksiyete bozukluğu ve panik bozukluğu toplumda sık görülen formlarıdır. Ayrıca, çevresel uyaranlardan rahatsızlık duyan kişilerde, migren veya baş ağrısı ataklarında sıklaşma veya şiddetlenme oldukça sık gözlenen bir durumdur [3]. İlerleyen bölümlerde, farklı iç mekân çevre koşullarının baş ağrısı, depresyon ve anksiyete gibi nöropsikiyatrik rahatsızlıklarla olası ilişkileri ve bu ilişkilerin altında yatan mekanizmalar ele alınarak, buna yönelik mimari çözüm yaklaşımları tartışılacaktır.

2.2. Nörobilim Yönüyle İç Mekan Çevre Kalitesinin (İMÇK) Belirlenmesi:

Yapma çevrede oluşturulan tasarım kararları kullanıcının hem fiziksel hem de ruh sağlığını olumlu ya da olumsuz etkileyebilmektedir. Bu bölümde, İMÇK'ni oluşturan etmenler nörobilim açısından incelenecek ve bu kapsamda alternatif olarak kullanılacak biyofilik tasarım etmenleri tanıtılacaktır.

2.2.1. Aydınlatma

Aydınlatma, mekân algısını belirleyen temel çevresel bir unsur olup, uygun tasarım görsel konfor, güvenlik ve performansı artırırken; renk sıcaklığı, parlaklık ve zamansal özellikleri üzerinden nörobiyolojik süreçleri etkileyerek beyin işlevlerini de düzenler.

Gözde ışığı algılayan sinir tabakası olan retina, beyinde görme merkezi dışındaki bölgelere de sinyaller göndererek doğrudan görme algısı dışındaki bilinç dışı etkilerin ortaya çıkmasını sağlar. Retinadan, beyindeki biyolojik saat merkezi olan suprakiazmatik nükleusa (SCN) ulaşan sinyaller [4], 24 saatlik döngüler halinde tekrarlayan bir ritmik faaliyeti oluşturur (sirkadien ritm). Bu mekanizma, uyku–uyanıklık döngüsünü senkronize eder; sabah saatlerinde kortizol artışını, gece ise epifiz bezinden melatonin salınımını düzenler. Özellikle kısa dalga boylu (mavi tonlu) ışık bu süreçlerde daha etkilidir. Melatonin hem uyku başlangıcını, hem de duygudurum ve bilişsel süreçleri etkileyebilmektedir [5]. Ayrıca ışık, retina-beyin sapı bağlantıları üzerinden serotonerjik ve noradrenerjik sistemleri doğrudan aktive ederek [6] uyanıklık, dikkat ve ruh hâli üzerinde belirleyici olur. Yeterli ve uygun zamanlanmış ışık maruziyeti artmış serotonin düzeyleriyle birlikte daha olumlu duygudurum ve azalmış depresyon–anksiyete riskiyle ilişkilidir. Buna karşılık, ışık–karanlık döngüsünün bozulması, sirkadiyen ritmi sekteye uğratarak kortizol, melatonin ve serotonin salınım zamanlamasını değiştirir. Özellikle akşam saatlerinde yüksek parlaklığa veya uygun olmayan dalga boylarına maruziyet, kortizol düzeylerinde artışa ve depresyon ile anksiyete riskinde yükselmeye yol açabilir [7]. Sabahları gün ışığıyla uyumlu parlak ışık dikkat ve bilişsel performansı desteklerken ve kortizol seviyelerini düşürürken, karanlıktan ani ve aşırı parlak ortama geçiş gibi fizyolojik zamanlamayla uyumsuz durumlar stres yanıtını tetikleyebilir [8]. Aşırı parlak, titreşimli ya da değişken ışık kaynakları, retinadan beyin sapına iletilen yoğun uyarılar aracılığıyla baş ağrısı mekanizmalarını tetikleyebilir [9]. Sonuç olarak, Gün ışığı döngüsüyle uyumlu, dinamik ve zamanlanmış aydınlatma tasarımı, sirkadiyen ritmin 24 saatlik doğal döngüyle senkronizasyonunu destekleyerek nörobiyolojik ve davranışsal açıdan daha sağlıklı iç mekânlar oluşturulmasına katkı sağlar [10]. Sirkadyen ritme göre insan odaklı aydınlatma gereksinimine göre değişen renk sıcaklığı ve parlaklıkları Şekil 2.'de görülmektedir.



Şekil 2. a) Sirkadyen ritme göre insan odaklı aydınlatma gereksinimi b) Güneşin konumuna bağlı olarak gün boyunca değişen renk sıcaklığı ve parlaklığı [11]

Yetersiz gün ışığı, görsel konforun yanı sıra öğrenme, görsel performans ve iyilik hâlini de olumsuz etkilemektedir. Konutlardaki düşük aydınlatma düzeyleri, klinik ölçeklerle değerlendirilen depresif belirtilerde artışla ilişkilendirilmiştir. Üç boyutlu modellenen iç mekan

çalışmalarında, mevsimsel ve meteorolojik değişkenlerin ışığa maruziyeti etkilediğinden; pencere boyutu ve konumlandırmasının ruh hali açısından belirleyici olduğu görülmektedir [4].

Yapay aydınlatmanın kapalı mekânlarda kullanımında, güneş ışığının zamansal değişimini taklit edecek, biyolojik ritimle uyumlu biçimde düzenlenmesi önerilmektedir. Gün doğumu ve batımında 2000–3000 K arası sıcak tonlar, öğle saatlerinde ise 4000–6500 K arası soğuk ve parlak tonlar tercih edilmelidir. Sabah saatlerinde gün ışığıyla senkronize edilen aydınlatma, biyolojik saati aktive ederek serotonin, kortizol ve adrenalin salınımını artırmakta; buna bağlı olarak metabolizma ve vücut sıcaklığını yükseltmektedir [12]. Gece saatlerinde ise 550–700 nm dalga boyunda, düşük renk sıcaklıklı (<2000 K) kırmızı ağırlıklı ışık kullanımı, melatonin baskılanmasını önleyerek uykuya geçişi desteklemekte ve sirkadiyen ritimle daha uyumlu bir aydınlatma stratejisi sunmaktadır [12].

2.2.2.Akustik Konfor

Gürültü, beyin bilgi işleme süreçlerini ve sinir sistemi fonksiyonlarını etkileyen önemli bir çevresel etken olup sessiz ortamların dikkati ve bilişsel performansı artırdığı bilinmektedir. Bina ölçeğinde akustik yalıtımı yetersiz duvar ve pencerelerde daha belirgin hissedilen gürültü rahatsızlığı en sık yorgunluk (%23,1), ardından baş ağrısı (%8,5) ve konsantrasyon güçlüğü (%5,5) gibi semptomlarla ilişkilendirilmektedir [13].

DeneySEL çalışmalar, hafıza oluşumunda kritik rol oynayan hipokampal nöronların istenmeyen seslere duyarlı olduğunu; ani ve rahatsız edici ses maruziyetinin bazı hassas bölgelerde nöron ve glia hücrelerinde olumsuz değişikliklere yol açabildiğini göstermektedir [14]. Uzun süreli gürültü maruziyeti ise prefrontal kortekste hacim azalması ile nöronal dallanma ve sinaptik bağlantı sayısında düşüşe neden olabilmektedir [15]. Bu bulgularla uyumlu olarak insanlarda kronik gürültü stresi yürütücü işlev bozuklukları ve depresif belirtilerle ilişkilendirilmiş, ayrıca gürültünün migren hastalarında zihinsel stresi artırarak baş ağrısını tetikleyebildiği bildirilmiştir [16]. Bununla beraber, gürültü üzerinde kontrol sahibi olamama hissi kronik stres ve kalıcı kortizol yüksekliği ile ilişkili olduğundan; fiziksel stresörler karşısında kontrol kaybı, dopaminle düzenlenen ve psikiyatride “öğrenilmiş çaresizlik” olarak tanımlanan ve depresyonla ilişkilendirilen duruma neden olabilir [17].

İnsan için rahatsız edici gürültü; ani ve kısa süreli yüksek frekanslı seslerden ya da ani ve/veya sürekli, uzun süreli yüksek ve düşük frekanslı seslerden oluşabilir. Mimari açıdan özellikle 20–200 Hz aralığındaki düşük frekanslı sesler (LFN) önem taşımaktadır. Araştırmalar, 25–80 Hz aralığındaki yüksek ses düzeylerinin, infrasound veya yüksek frekanslara kıyasla daha belirgin öznel rahatsızlık oluşturabildiğini göstermektedir [18]. İşitsel olarak zor algılanan bu frekanslar, uğultu ve titreşim şeklinde hissedilmekte; uzun dalga boyları nedeniyle yapı elemanlarından kolayca geçebilmektedir. Klasik gürültü ölçümlerinde düşük görünmelerine karşın, stres, huzursuzluk, dikkat dağınıklığı, uyku bozukluğu ve baş ağrısı gibi nörolojik semptomlarla ilişkilendirilmiştir [19]. EPA (Energy Protect Agency) kılavuzları, düşük frekanstaki seslerin daha yüksek desibel seviyelerini tolere edebilmeleri sebebiyle eşik seviyelerin frekansa bağlı olarak değiştiğini ve frekans arttıkça izin verilen ses basınç seviyelerinin azaldığını göstermektedir [20] Binalarda LFN genellikle iklimlendirme sistemleri, asansörler, dikey sirkülasyon elemanları ve rüzgâr kaynaklı cephe titreşimlerinden kaynaklanmakta olup, titreşim yalıtımı ve akustik ayırıştırma gibi mimari tedbirleri gerektirir.

2.2.3.Termal Konfor

İklim değişikliğine bağlı aşırı sıcaklık dalgalanmaları, iç mekân sıcaklığı ile ruh sağlığı arasındaki ilişkiyi daha kritik hâle getirmiştir. Çalışmalar, dış ortam sıcaklıklarına bağlı olarak depresyon başta olmak üzere duygu durum bozuklukları, uyku bozuklukları ve anksiyete sıklığının artabildiğini göstermektedir [21]. Özellikle yaşlı bireyler, azalan termoregülasyon kapasiteleri ve iç mekânlarda daha uzun süre bulunmaları nedeniyle sıcaklık değişimlerine karşı daha savunmasızdır. Bu durum insomni (uyku güçlüğü), duygudurum dalgalanmaları ile depresyon ve anksiyete belirtilerinde artışla ilişkilidir [22].

Soğuk ve sıcaklığın depresyon üzerindeki etkilerini açıklamak üzere çeşitli mekanizmalar öne sürülebilir. Yüksek ortam sıcaklığı ve neminin, fonksiyonel manyetik rezonans görüntüleme çalışmalarında gösterildiği üzere, beynin kritik devrelerini doğrudan etkileyerek kısa süreli hafıza sorunlarına yol açabildiği [23], ayrıca depresyon ve anksiyete ile ilişkili olabileceği bildirilmektedir [24]. Yapılmış olan az sayıdaki kontrollü iç mekân çalışmalarında ise hem soğuk hem sıcak ortamların uyku kalitesini bozduğu ve artan depresif semptomlarla ilişkili olduğu gösterilmiştir. Örneğin Lan ve ark.'nın 11, 21 ve 28 °C koşullarında gerçekleştirdiği çalışmada, optimumdan sapmaların nörodavranışsal performansı düşürdüğü ve termal rahatsızlık altında beynin performansı sürdürmek için daha fazla çaba harcadığı ortaya konmuştur [25].

İç mekândaki yüksek sıcaklıkların etkilerini inceleyen bir çalışmada, Ağustos ayında oturma ve yatak odası sıcaklıkları referans haftaya göre ~5 °C artınca katılımcıların çoğu ortamı “çok sıcak” olarak algılamış; susuzluk (%42,7), uyku bozukluğu (%40,6) ve aşırı terleme (%39,6) bildirilmiştir. İç mekân sıcaklığındaki her 1 °C artış, ısıya bağlı rahatsızlığı %33, uyku bozukluğunu %24 artırırken, dış sıcaklık artışı daha düşük etki göstermiştir (%13 ve %11). Bu, iç mekân sıcaklığının sağlık sorunlarında dış ortam sıcaklığından daha belirleyici olabileceğini göstermesi nedeniyle önemlidir [26]. Dış ortamda düşük sıcaklık depresyon ve şizofreni riskini artırırken, yüksek sıcaklık yalnızca anksiyete ile ilişkilendirilmiştir [27]. Üniversite öğrencileri üzerinde yapılan bir çalışmada, nötr veya hafif soğuk ortam stres düzeyini azaltırken, hafif sıcak ortam anksiyeteyi artırmıştır. Bulguların elektroensefalografi (EEG) ile de desteklendiği çalışmada sonuç olarak, PMV=2 olan sıcak ortamdaki stres, PMV=-2 olan soğuk ortamdaki stresten belirgin şekilde daha yüksektir [28].

İç mekan ortam sıcaklığının düşük olduğu durumun incelendiği, Japonya'dan bir çalışmada, yatak odası sıcaklıkları oturma odasından ~4 °C daha düşük tutulduğunda uyku bozuklukları ve depresif belirtiler gözlemlenmiştir [27]. Soğuk iklimlerde migren ataklarının arttığı görülse de, hava kalitesi, ışıklandırma, ses, nem ve iç mekan sıcaklığı gibi faktörler bir bütün olarak etkili olup, mevcut çalışmalar yalnızca sıcaklığı yeterince bağımsız olarak ele almamıştır [29]. Yaklaşık 10 °C'lik soğuk hava maruziyeti, çalışma belleği, yürütücü işlevler ve reaksiyon sürelerini olumsuz etkiler ve bu etki ısıtılmış ortamda bile bir süre devam edebilmektedir [30]. İç mekan ortam sıcaklığı için beklenen ideal sıcaklık, %60 RH koşullarında, metabolik enerji üretim hızına (met) bağlı olmakla beraber 2,0 met için 16-21°C, 1,3 met için ise 21-25°C olarak belirtilmektedir [31]. Fakat iç ortamdaki elde edilmek istenen bu sıcaklık değerinde sürdürülebilirliğin sağlanabilmesi, uygun ısıl geçirgenliğe sahip yapı elemanları ve yüksek ısıl kütleli malzeme kullanımının önemini ortaya çıkarmaktadır. Sonuç olarak, iç mekân sıcak algısı özellikle yaşlı yetişkinlerde uzun vadeli depresif semptomlarla ilişkili olabilir. Termal ortamın yalıtım ve mimari

düzenlemelerle iyileştirilmesi zihinsel sağlığa olumlu katkı sağlayabilir, ancak konuya ilişkin araştırmaların yetersizliği dikkat çekmektedir.

2.2.4. İç Mekan Hava Kalitesi

İç mekân hava kalitesi, kapalı ortamlardaki fiziksel, kimyasal ve biyolojik bileşenlerin insan sağlığı ve bilişsel performans üzerindeki etkilerini belirleyen önemli bir çevresel faktördür. Migren, bilişsel performans düşüşü, depresyon ve anksiyete ile ilişkili olduğu bilinen PM2.5, PM10, uçucu organik bileşikler, CO₂, NO₂, nem ve mikrobiyal alerjenler başlıca kirleticilerdir [32]. Bu nedenle yapı malzemesi kaynaklı emisyonların kontrolü önem taşımaktadır

Yapı malzemelerinden uçucu ve yarı uçucu organik bileşikler (VOC ve SVOC) önemli iç mekân hava kirleticileridir. Formaldehit, toluen, benzen, etil asetat ve ftalatlar başlıca bileşenler olup; formaldehit ahşap levhalarda bağlayıcı reçinelerde ve yüzey kaplamalarında, toluen boya ve yapıştırıcılarda solvent olarak, benzen ise solvent bazlı ürünlerde eser miktarda bulunabilmektedir. Bu bileşiklerin iç mekân hava kalitesini etkilediği ve zihinsel sağlık üzerinde sonuçlar doğurabileceği bildirilmektedir. Ofis ortamlarında VOC düzeyleri ile stratejik karar verme performansı arasında ilişki saptanmıştır [33]. Deneysel çalışmalar, uzun süreli formaldehit maruziyetinin kortizol artışı, sinaptik fonksiyon bozulması ve nörotrofik faktörlerde azalma ile ilişkili olduğunu; gebelikte maruziyetin bilişsel riskleri artırabileceğini göstermektedir [34]. PM2.5, çapı 2,5 µm'den küçük partikülleri ifade etmekte olup yapı malzemelerinde doğrudan bulunmamakla birlikte, özellikle alçı, çimento, beton, ahşap esaslı levhalar, boyalar ve lifli yalıtım malzemelerinin üretim ve uygulama süreçlerinde açığa çıkabilmektedir. Nörobilimsel bulgular, PM2.5 ve daha küçük partiküllerin beyinde protein bozulması ve inflamasyona yol açarak alzheimer gibi nörodejeneratif süreçleri destekleyebileceğini göstermektedir [35]. NO₂, trafik ve yanma kaynaklı önemli bir hava kirleticisi olup, kısa süreli maruziyetin reaktif oksijen türleri üretimi ve TRPV1 aktivasyonu yoluyla migren ve baş ağrısını tetikleyebileceği bildirilmektedir [36]. CO₂ ise dış emisyonlar ve iç mekân kullanıcı yoğunluğu sonucu birikerek serotonerjik sistem üzerinden depresyon, panik bozukluğu ve migrenle ilişkilendirilmektedir [37]. Yetersiz havalandırma ise, iç mekânda nem ve küf oluşumunu artırarak sağlık riskleri yaratabileceği; özellikle küf maruziyetinin merkezi sinir sistemi ve bağışıklık sistemi üzerindeki etkileri yoluyla bilişsel, duygusal ve davranışsal semptomlarla ilişkili olabileceği belirtilmektedir [38].

Enerji verimli yapılarda artan hava sızdırmazlığı ve azalan hava değişim oranları, iç mekân kirleticilerinin birikmesine, nem ve küf oluşumuna yol açarak iç mekân hava kalitesini olumsuz etkileyebilmekte; ayrıca sıcaklık ve nem değişimleri ile yetersiz havalandırma, zararlı kirleticilerin oluşumunu artırdığından, bu sorunların bütüncül bina tasarım yaklaşımlarıyla ele alınmasını gerektirmektedir.

2.2.5. Biyofilik Tasarım Etmenleri:

İnsan beyni evrimsel olarak doğal çevreye uyumlu biçimde geliştiğinden, beton yapılar, yapay aydınlatma ve kapalı mekân koşulları nörobiyolojik açıdan ek yük oluşturabilmektedir. Yoğun kentsel yaşamın, korku ve kaygı ile ilişkili amigdala ile anterior singulat korteks aktivitesini etkileyerek stres duyarlılığını artırdığı; yalnızca şehirde yaşamının dahi stres tepkilerini yükselttiği nörogörüntüleme çalışmalarıyla gösterilmiştir [39]. Biyofilik tasarım, insanların doğaya karşı doğuştan gelen yatkınlık eğilimine dayanarak, insanların doğayla olan evrimsel bağını (biophilia) yapıları çevre içinde yeniden kurmayı amaçlayan bir tasarım yaklaşımıdır. Bilişsel performansın

arttırılması ve daha iyi bir ruh halinin hedeflendiği bu yaklaşım doğrultusunda büyük pencereler ile gün ışığının kullanımı, bitkilendirmenin sağlanması, ahşap gibi doğal malzemelerin kullanımı, doğal yüzeyler ve eğrisel formların uygulanmasının kullanıcıların zihin sağlığına faydalı olacağını, kullanıcının beyin-sinir mekanizmalarını farklı etkileyebileceğini ortaya koymaktadır [40]. Bu nedenle, doğayı ve iç mekanları birbirine bağlayan yenilikçi tasarımların, insanların fiziksel ve ruh sağlığını iyileştirebileceği düşünülmektedir.

2.3. İMÇK’ni Artırmaya Yönelik Nörobilim Odaklı Mimari Tasarım Yaklaşımları

Bina içi aydınlatma tasarımında biyolojik tasarıma uygunluk esas alınmalıdır; bu kapsamda sabahları yukarıdan ve dik açılı aydınlatma, öğle saatlerinde homojen ve güçlü ışık, akşamları ise daha düşük seviyede ve sıcak renk tonları uygulanmalı, gün boyu sabit ışık seviyelerinden kaçınılmalıdır [12]. Kamaşmayı önlemek için çıplak LED aydınlatma kullanılmamalı, difüz ışık sağlayan gizli lineer aydınlatma tercih edilmelidir. Tam homojen aydınlatma tasarımından kaçınılmalı; mekan içinde ışık farklılıkları sağlanarak monoton ışığın dopamin düzeyini düşürmesinin önüne geçilmelidir. Akşam saatlerinde mavi ışık seviyeleri azaltılmalı ve genel aydınlatma düzeyi düşürülmelidir [12]. Ayrıca doğal ışığın maksimum düzeyde kullanılmasına özen gösterilmeli; bunun için geniş pencereler kullanılmalı, ışık rafları, iç cam bölmeler ve açık renkli yansıtıcı yüzeyler tercih edilmelidir. Örneğin işyerlerinde, kaplama malzemeleri için tavsiye edilen yansıtıcılık değerleri tavanda 0.7-0.9, duvarda 0.5-0.8, zeminde ise 0.2-0.6 aralığındadır [41]. Ayrıca, işyerlerindeki faaliyet alanlarında yapay aydınlatmanın homojenliğinin en az 0,1 oranında olması beklenmesine rağmen, gün ışığından faydalanan durumlarda günışığının ek faydaları sebebiyle aydınlatmada homojenlik beklenmemektedir [42].

Binalarda ısı konforu nörobilim perspektifinden ele alındığında, yalnızca ortalama hava sıcaklığının değil, kullanıcı deneyimini şekillendiren çevresel ve algısal değişkenlerin de dikkate alınmasını gerektirir. Bu kapsamda, iç mekânda hafif çevrimsel değişimlere izin veren farklı mikroklimlerin oluşturulması (örneğin pencere kenarlarında daha serin veya güneş alan bölgelerde daha sıcak alanlar) beynin adaptif kapasitesini destekleyerek anksiyete düzeyini azaltıcı etki gösterebilir. Kullanıcının kontrol hissini güçlendiren açılabilir pencereler, güneş kırıcılar ve ayarlanabilir termostatlar gibi elemanlar psikofizyolojik konforu artırır [43]. Işınımın filtrelenerek istenmeyen ısı kazançlarının saçak ve güneş kırıcılarla sınırlandırılması, ayrıca yapı kabuğunda uygun U değerlerinin sağlanması ve düşük emisyonlu (low-e) cam kullanımıyla yüzey sıcaklıklarının iç hava sıcaklığına yaklaştırılması önemlidir. Pencereye çok yakın konumlanan kullanıcılar için termal konforun sağlanması, düşük güneş geçirgenlikli cam, sınırlı SHGC ve etkili gölgeleme ile kullanıcı-pencere mesafesinin birlikte değerlendirilmesini gerektirir [31]. Bununla birlikte, beyin yalnızca hava sıcaklığını değil yüzey sıcaklığını da algıladığından, malzeme seçiminde termal dokunsallık özellikleri gözetilmeli; sıcak ortamlarda seramik gibi serin yüzeyler, soğuk ortamlarda ise ahşap gibi doğal polimer esaslı malzemeler tercih edilmelidir.

Binalarda iç mekân hava kalitesi, yalnızca fiziksel parametreler üzerinden değil, beynin çevreyi “güvenlik” ya da “tehdit” sinyali olarak algılama biçimi üzerinden değerlendirilmelidir. Hareketsiz hava anksiyeteyi artırabileceğinden, karşılıklı açılabilir pencereler, farklı kotlarda açıklıklar, atrium ve hava bacaları ile çapraz doğal havalandırma sağlanarak hafif hava akımı oluşturulmalıdır. Açılabilir pencere kullanımı, kontrol algısını güçlendirerek amigdala aktivasyonunu azaltır ve rahatlama sağlar [44]. Bu nedenle mekanik olarak havalandırma sağlansa

bile açılabilir pencere kullanımı beklenmektedir [45]. Fakat, iç mekandaki hava hızının ise en fazla 0,2 m/sn olması istenir [31]. Çok düşük VOC'lu boya ve kaplamalar (VOC için 300 µg/m³, formaldehid için 30 µg/m³), ile doğal, düşük emisyonlu malzemeler kullanılmalı; kimyasal salınımlar dikkate alınmalıdır. CO₂ seviyesini düşürmek için kişi başına yeterli hacim ve temiz hava akışı sağlanmalı (20 lt /(s /kişi) ve gerektiğinde taze hava takviyeli HVAC sistemleri uygulanmalıdır [45].

Binalarda akustik tasarımında, işitsel uyaranların stres ve dikkat üzerindeki etkileri dikkate alınmalıdır. Öncelikle yankı kontrolü sağlanmalı; delikli yüzeyler, kumaş kaplı paneller ve halı gibi ses yutucu malzemeler kullanılmalı, paralel yüzeylerin neden olduğu yansımalar eğrisel formlar, farklı tavan kotları veya duvar nişleriyle azaltılmalıdır [46]. İç mekândaki gürültü kaynakları yaşam alanlarından ayrıştırılmalı; asansör ve şaftlar izole edilmeli, sessiz alanlar sirkülasyon alanlarından ayrılmalıdır. Düşük frekanslı seslerin kontrolü için düşük desibelli HVAC sistemleri tercih edilmeli, kazan ve benzeri ekipmanlar yalıtılmalı ve titreşim kesici bağlantılar kullanılmalıdır. Trafik gürültüsü açısından ise önerilen sınır değerler gündüz 53 dB, akşam 45 dB olarak belirtilmektedir [47]. Bu kapsamda dış gürültünün azaltılması için pencere yerleşimleri gürültü kaynaklarından uzak konumlandırılmalı, cephelerde ses kırıcı elemanlar ve çift cam sistemleri kullanılabilir.

Ayrıca biyofilik tasarım kriterlerini de göz önünde bulundurarak, doğayı doğrudan görebilme olanağı sağlayan pencere tasarımları ve bakış aksında konumlandırılan bitkisel öğeler kullanılmalıdır. Doğal malzemeler, eğrisel formlar ve fraktal desenler (ahşap damarları, taş dokuları, yumuşatılmış köşeler ve organik plan akışı gibi) beyindeki alfa dalgalarını artırarak görsel ve duyuşsal rahatlama sağlar [48]. Düşük debili su sesi, arka plan işitsel düzenleme yoluyla dinlenme anı beyin aktivitesine katkıda bulunabilir [49].

3. SONUÇ

Bu çalışma, nörobilimsel bir çerçevede yapma çevreyi ele alarak, İMÇK'yı belirleyen aydınlatma, hava kalitesi, akustik ve ısı konfor gibi temel bileşenlerin altında yatan nörobiyolojik mekanizmaları ve bu mekanizmaların bireysel davranış örüntüleri ile psikofizyolojik süreçler üzerindeki etkilerini derlemektedir. Bulgular, enerji performansı, akustik düzenlemeler ve havalandırma stratejileri gibi İMÇK parametrelerinin, nörobilimsel açıdan zaman zaman birbiriyle çelişebilen sonuçlar doğurabildiğini ve bu nedenle zihinsel sağlık üzerinde belirleyici tasarım kararları niteliği taşıdığını göstermektedir. Literatür incelemesi, mevcut çalışmaların büyük ölçüde anket ve gözlemsel yöntemlere dayandığını; klinik veriler ile özellikle nörogörüntüleme temelli bulguların sınırlı olduğunu, ilgili standart ile kılavuzların konuyu sağlık açısından ele almalarına rağmen, nörobilimsel açıdan yeterince kapsamlı değerlendirilmediğini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, gelecekte yürütülecek araştırmalarda İMÇK parametrelerinin ayrı ayrı ve kontrollü biçimde ele alınması; özellikle ısı konfor ile bina yalıtımı arasındaki ilişkinin nörogörüntüleme yöntemleri aracılığıyla değerlendirilmesi önem arz etmektedir. Bu tür disiplinlerarası çalışmaların, sağlık odaklı mimari tasarım yaklaşımlarının bilimsel temellerini güçlendireceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

1. T. Chaves, C.L. Fazekas, K. Horváth, P. Correia, A. Szabó, B. Török, K. Bánrévi, D. Zelena, Stress Adaptation and the Brainstem with Focus on Corticotropin-Releasing Hormone., *Int. J. Mol. Sci.* 22 (2021). <https://doi.org/10.3390/ijms22169090>.
2. Adrienne Dellwo, What is cortisol?, (2026). <https://www.verywellhealth.com/cortisol-what-it-is-its-functions-associated-conditions-5208916>.
3. A.C. Johnson, B. Greenwood-Van Meerveld, Stress-induced pain: a target for the development of novel therapeutics., *J. Pharmacol. Exp. Ther.* 351 (2014) 327–35. <https://doi.org/10.1124/jpet.114.218065>,
4. I. Provencio, I.R. Rodriguez, G. Jiang, W.P. Hayes, E.F. Moreira, M.D. Rollag, A novel human opsin in the inner retina., *J. Neurosci.* 20 (2000) 600–5. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.20-02-00600.2000>.
5. bsi standards publication, Light and lighting — Integrative lighting — Non-visual effects, 2022.
6. K. Vitkute, F. Borghese, R.A. Hut, R. Havekes, P. Meerlo, Shedding Light on Brain Function and Mood: A Role for the Retinoraphe Pathway in Regulating Serotonin., *Biol. Psychiatry* (2025). <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2025.06.029>.
7. A. Deprato, P. Haldar, J.F. Navarro, B.N. Harding, P. Lacy, R. Maidstone, S. Moitra, A. Palomar-Cros, H. Durrington, M. Kogevinas, S. Moitra, A. Adan, Associations between light at night and mental health: A systematic review and meta-analysis., *Sci. Total Environ.* 974 (2025) 179188. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179188>.
8. L. Wang, M.J. Witte, Integrating building energy simulation with a machine learning algorithm for evaluating indoor living walls' impacts on cooling energy use in commercial buildings, *Energy Build.* 272 (2022) 112322. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112322>.
9. D.I. Friedman, T. De ver Dye, Migraine and the environment., *Headache* 49 (2009) 941–52. <https://doi.org/10.1111/j.1526-4610.2009.01443.x>.
10. International WELL Building Institute (IWBI), WELL, 2024.
11. D. lighting Systems, Bring the daylight and feel better, (n.d.). <https://d-tec.se/en/insights/bring-the-daylight-and-feel-better/>.
12. S. KÜÇÜK, Aydınlatma ve Işığın İnsan Yaşam ve Sağlığı Üzerindeki Etkileri, *Istanbul Yeni Yuzyil Univ. Yeni Yuzyil J. Med. Sci.* (2023). <https://doi.org/10.46629/JMS.2023.123>.
13. J. Wang, D. Norbäck, Home environment and noise disturbance in a national sample of multi-family buildings in Sweden-associations with medical symptoms, *BMC Public Health* 21 (2021) 1989. <https://doi.org/10.1186/s12889-021-12069-w>.
14. K. Frenis, M. Kuntic, O. Hahad, M.T. Bayo Jimenez, M. Oelze, S. Daub, S. Steven, T. Münzel, A. Daiber, Redox Switches in Noise-Induced Cardiovascular and Neuronal Dysregulation., *Front. Mol. Biosci.* 8 (2021) 784910. <https://doi.org/10.3389/fmolb.2021.784910>.
15. A.F. Arnsten, P.S. Goldman-Rakic, Noise stress impairs prefrontal cortical cognitive function in monkeys: evidence for a hyperdopaminergic mechanism., *Arch. Gen. Psychiatry* 55 (1998) 362–8. <https://doi.org/10.1001/archpsyc.55.4.362>.
16. P.R. Martin, J. Reece, M. Forsyth, Noise as a trigger for headaches: relationship between exposure and sensitivity., *Headache* 46 (2006) 962–72. <https://doi.org/10.1111/j.1526-4610.2006.00468.x>.
17. M. Dohmen, E. Braat-Eggen, A. Kemperman, M. Hornikx, The Effects of Noise on Cognitive Performance and Helplessness in Childhood: A Review., *Int. J. Environ. Res. Public Health* 20 (2022). <https://doi.org/10.3390/ijerph20010288>.
18. S.K. Chiu, S.E. Brueck, D.M. Wiegand, H.L. Free, H. Echt, Evaluation of Low-Frequency Noise, Infrasound, and Health Symptoms at an Administrative Building and Men's Shelter: A Case Study, *Semin. Hear.* 44 (2023) 503–520. <https://doi.org/10.1055/s-0043-1769497>.

19. C. Baliatsas, I. van Kamp, R. van Poll, J. Yzermans, Health effects from low-frequency noise and infrasound in the general population: Is it time to listen? A systematic review of observational studies, *Sci. Total Environ.* 557–558 (2016) 163–169. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.065>.
20. U.S.E.P. EPA, Guidance for assessing low frequency noise, 2025. <https://www.epa.vic.gov.au/guidance-assessing-low-frequency-noise>.
21. D. Dey, H.A. Lateef, A. Leroux, V. Zipunnikov, K. Merikangas, Associations between daily outdoor temperature and subjective real-time ratings of emotional states and sleep in mood disorder subtypes., *J. Affect. Disord.* 397 (2026) 120918. <https://doi.org/10.1016/j.jad.2025.120918>.
22. M.K. Park, B. Kang, D. Hong, S. Yoon, M. Kim, Y. Kim, Z. Ni, E.S. McConnell, Association of Indoor Temperature Level and Mental Health Among Community-Dwelling Older Adults: Systematic Review, *JMIR Public Heal. Surveill.* 11 (2025) e78257–e78257. <https://doi.org/10.2196/78257>.
23. Q. Jiang, X. Yang, K. Liu, B. Li, L. Li, M. Li, S. Qian, L. Zhao, Z. Zhou, G. Sun, Hyperthermia impaired human visual short-term memory: an fMRI study., *Int. J. Hyperthermia* 29 (2013) 219–24. <https://doi.org/10.3109/02656736.2013.786141>.
24. S.S. Wahid, W.A. Raza, I. Mahmud, B.A. Kohrt, Climate-related shocks and other stressors associated with depression and anxiety in Bangladesh: a nationally representative panel study., *Lancet. Planet. Heal.* 7 (2023) e137–e146. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(22\)00315-1](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(22)00315-1).
25. L. Lan, Z. Lian, L. Pan, Q. Ye, Neurobehavioral approach for evaluation of office workers' productivity: The effects of room temperature, *Build. Environ.* 44 (2009) 1578–1588. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.10.004>.
26. J.A.F. van Loenhout, A. le Grand, F. Duijm, F. Greven, N.M. Vink, G. Hoek, M. Zuurbier, The effect of high indoor temperatures on self-perceived health of elderly persons, *Environ. Res.* 146 (2016) 27–34. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.12.012>.
27. W. Umishio, T. Ikaga, Y. Fujino, S. Ando, T. Kubo, Y. Nakajima, T. Hoshi, M. Suzuki, K. Kario, T. Yoshimura, H. Yoshino, S. Murakami, Disparities of indoor temperature in winter: A cross-sectional analysis of the Nationwide Smart Wellness Housing Survey in Japan, *Indoor Air* 30 (2020) 1317–1328. <https://doi.org/10.1111/ina.12708>.
28. Y. Yang, Y. Bai, R. Zhang, X. Zhu, The effect of thermal environment on stress and thermal comfort of college students under acute stress, *Indoor Built Environ.* 31 (2022) 2226–2239. <https://doi.org/10.1177/1420326X221086193>.
29. I. Cioffi, M. Farella, P. Chiodini, L. Ammendola, R. Capuozzo, C. Klain, S. Vollaro, A. Michelotti, Effect of weather on temporal pain patterns in patients with temporomandibular disorders and migraine., *J. Oral Rehabil.* 44 (2017) 333–339. <https://doi.org/10.1111/joor.12498>.
30. M.D. Muller, J. Gunstad, M.L. Alosco, L.A. Miller, J. Updegraff, M.B. Spitznagel, E.L. Glickman, Acute cold exposure and cognitive function: evidence for sustained impairment., *Ergonomics* 55 (2012) 792–8. <https://doi.org/10.1080/00140139.2012.665497>.
31. R. and A.-C.E. American Society of Heating, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy (ashrae 55), 2017.
32. WHO, WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide, 2021.
33. J.G. Allen, P. MacNaughton, U. Satish, S. Santanam, J. Vallarino, J.D. Spengler, Associations of Cognitive Function Scores with Carbon Dioxide, Ventilation, and Volatile Organic Compound Exposures in Office Workers: A Controlled Exposure Study of Green and Conventional Office Environments, *Environ. Health Perspect.* 124 (2016) 805–812. <https://doi.org/10.1289/ehp.1510037>.
34. J. Sun, X. Zhou, C. Xiao, Z. Li, C. Xu, X. Qin, J. Lu, Y. Wu, J. Cheng, S. Chen, J. Zhao, K. Sun, Prenatal exposure to indoor VOCs impairs synaptic plasticity and cognitive function in mouse offspring via retinol metabolism disorder., *J. Hazard. Mater.* 501 (2026) 140688. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.140688>.
35. L. Calderón-Garcidueñas, J. Hernández-Luna, M. Aiello-Mora, R. Brito-Aguilar, P.A. Evelson, R. Villarreal-Ríos, R. Torres-Jardón, A. Ayala, P.S. Mukherjee, APOE Peripheral and Brain Impact: APOE4 Carriers Accelerate

- Their Alzheimer Continuum and Have a High Risk of Suicide in PM2.5 Polluted Cities., *Biomolecules* 13 (2023). <https://doi.org/10.3390/biom13060927>.
36. S. Ye, Y. Gao, Y. Lin, J. Wang, I.X. Wu, F. Xiao, Ambient nitrogen dioxide, temperature exposure, and migraine incidence: A large prospective cohort study., *Headache* 65 (2025) 1318–1330. <https://doi.org/10.1111/head.15037>.
 37. S.D. Lowther, S. Dimitroulopoulou, K. Foxall, C. Shrubsole, E. Cheek, B. Gadeberg, O. Sepai, Low Level Carbon Dioxide Indoors—A Pollution Indicator or a Pollutant? A Health-Based Perspective, *Environments* 8 (2021) 125. <https://doi.org/10.3390/environments8110125>.
 38. C.F. Harding, C.L. Pytte, K.G. Page, K.J. Ryberg, E. Normand, G.J. Remigio, R.A. DeStefano, D.B. Morris, J. Voronina, A. Lopez, L.A. Stalbow, E.P. Williams, N. Abreu, Mold inhalation causes innate immune activation, neural, cognitive and emotional dysfunction, *Brain. Behav. Immun.* 87 (2020) 218–228. <https://doi.org/10.1016/j.bbi.2019.11.006>.
 39. A. Richter, M. Al-Bayati, F. Paraskevopoulou, B. Krämer, J.C. Pruessner, E.B. Binder, O. Gruber, Interaction of FKBP5 variant rs3800373 and city living alters the neural stress response in the anterior cingulate cortex., *Stress* 24 (2021) 421–429. <https://doi.org/10.1080/10253890.2020.1855420>.
 40. M. Roskams, B. Haynes, A randomised field experiment to test the restorative properties of purpose-built biophilic “regeneration pods,” *J. Corp. Real Estate* 22 (2020) 297–312. <https://doi.org/10.1108/JCRE-05-2020-0018>.
 41. BSI, BS ISO/CIE 8995-1:2025-Light and lighting. Lighting of work places - Indoor, (2025).
 42. British standards, BS EN 12464-1:2021-Light and lighting. Lighting of work places - Indoor work places, 2021.
 43. L. Lin, P. He, X. Qiu, S. Qiu, J. Chen, J. Wang, Study on the relationship between indoor ventilation frequency and anxiety and depression symptoms in older persons: based on the data of 2018 CLHLS., *BMC Geriatr.* 25 (2025) 55. <https://doi.org/10.1186/s12877-025-05710-5>.
 44. K. Bhui, J.B. Newbury, R.M. Latham, M. Ucci, Z.A. Nasir, B. Turner, C. O’Leary, H.L. Fisher, E. Marczylo, P. Douglas, S. Stansfeld, S.K. Jackson, S. Tyrrel, A. Rzhetsky, R. Kinnersley, P. Kumar, C. Duchaine, F. Coulon, Air quality and mental health: evidence, challenges and future directions, *BJPsych Open* 9 (2023) e120. <https://doi.org/10.1192/bjo.2023.507>.
 45. BSI, BS EN 16798 - Energy performance of buildings. Ventilation for buildings, 2019.
 46. J. Martínez-Soto, R. Adityavarman, F.A. Barrios, L. Gonzales-Santos, Biophilic Design from a Psychology and Neuroscience Perspective, in: *Routledge Handb. Inter. Archit. Res.*, Routledge, London, 2026: pp. 258–268. <https://doi.org/10.4324/9781003475057-27>.
 47. World Health Organization, Compendium of WHO and other UN guidance on health and environment, 2024. <https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/2fc937fc-f7fd-4275-9ce9-a4ed7b9da92a/content>.
 48. C.M. Hagerhall, T. Laike, M. Küller, E. Marcheschi, C. Boydston, R.P. Taylor, Human physiological benefits of viewing nature: EEG responses to exact and statistical fractal patterns., *Nonlinear Dynamics. Psychol. Life Sci.* 19 (2015) 1–12. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25575556>.
 49. J. Li, L. Maffei, A. Pascale, M. Masullo, Effects of spatialized water-sound sequences for traffic noise masking on brain activities., *J. Acoust. Soc. Am.* 152 (2022) 172. <https://doi.org/10.1121/10.0012222>.

HASTA ODALARINDA YAPI ELEMANI BİTİRME MALZEMELERİNİN UÇUCU ORGANİK BİLEŞİK EMİSYONLARI BAKIMINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

Hilal Çıkrıklar^{1,2*}

Fatih Yazıcıoğlu³

¹ İstanbul Aydın Üniversitesi, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Küçükçekmece, İstanbul, 34295

² İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı, Yapı Bilimleri Doktora Programı

³ İTÜ Mimarlık Fakültesi, Taşkışla, Şişli, İstanbul, 34367

ÖZET

Uçucu organik bileşikler, iç mekân koşullarında kolayca buharlaşarak havaya karışan ve maruziyet süresine bağlı olarak insan sağlığı üzerinde olumsuz etkiler oluşturabilen başlıca iç ortam kirleticileri arasında yer almaktadır. Hasta odaları gibi hassas kullanıcı gruplarının geçici olarak bulunduğu mekânlarda, emisyon kaynaklarını dikkate alan tasarım kararları önem taşımaktadır. Bu çalışma, hasta odalarında yaygın kullanılan döşeme, duvar ve tavan bitirme malzemelerini VOC/TVOC emisyonları açısından karşılaştırmalı olarak değerlendirmektedir. Yöntem kapsamında önce VOC'lerin kaynakları, salınım mekanizmaları ve sağlık etkilerine ilişkin literatür incelenmiş; ardından sağlık yapıları literatüründe karşılaşılan ve alan başına TVOC emisyon verisine sayısal olarak ulaşılabilen malzemeler belirlenmiştir. Bulgular, yaygın kullanılan malzemelerin her zaman en düşük emisyonlu seçenekler olmadığını; buna karşın hijyen, dayanıklılık, bakım kolaylığı, uygulama pratiği ve işletme gereklilikleri gibi nedenlerle tercih edildiklerini göstermektedir. Bu yönüyle çalışma, hasta odalarında yaygın kullanılan malzemelerin emisyon açısından hangi düzeyde konumlandığını ve mevcut tercihlerin hangi işlevsel gerekçelerle sürdürüldüğünü ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: Uçucu organik bileşikler (VOC), İç hava kalitesi, Hasta odası, Bitirme malzemeleri.

A SCENARIO-BASED APPROACH TO EVALUATING BUILDING ELEMENT FINISHING MATERIALS IN PATIENT ROOMS IN TERMS OF VOLATILE ORGANIC COMPOUND EMISSIONS

ABSTRACT

Volatile organic compounds are among the major indoor pollutants that can easily evaporate and mix into the air under indoor conditions, and may cause adverse effects on human health depending on the duration of exposure. In spaces such as patient rooms, where vulnerable user groups are temporarily present, design decisions that take emission sources into account are important. This study comparatively evaluates the commonly used floor, wall, and ceiling finishing materials in patient rooms in terms of VOC/TVOC emissions. Within the scope of the method, first, the literature on the sources, emission mechanisms, and health effects of VOCs was reviewed; subsequently, materials encountered in the healthcare building literature and for which numerical data on area-specific TVOC emissions were available were identified. The findings show that commonly used materials are not always the lowest-emission options; nevertheless, they continue to be preferred for reasons such as hygiene, durability, ease of maintenance, practicality of application, and operational requirements. In this respect, the study reveals the emission levels at which commonly used materials in patient rooms are positioned and the functional reasons underlying the continuation of current preferences.

Keywords: Volatile organic compounds (VOC), Indoor air quality, Patient room, Finishing materials.

^{1*} e-posta adresi: hilalcikrikklar@aydin.edu.tr

1. GİRİŞ

Hasta odaları, hassas kullanıcı gruplarının iyileşme süreci boyunca vakit geçirdiği ve çevresel koşullara duyarlılığın yüksek olduğu mekânlardır. Bu mekânlarda fiziksel koşullar, yalnızca klinik bakımın gerçekleştiği bir arka plan değil, aynı zamanda kullanıcı konforunu, algısını ve mekânsal deneyimini biçimlendiren önemli bir bileşendir. Dolayısıyla hasta odalarının çevresel performansı, sağlık yapılarında tasarım kararlarının önemli bir boyutunu oluşturmaktadır.

Hasta odalarında çevresel performansı belirleyen temel başlıklardan biri iç mekân hava kalitesidir. Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı'na (United States Environmental Protection Agency, EPA) göre iç mekân hava kalitesi, binalar ve yapılar içindeki havanın, içeride bulunan kişilerin sağlık, konfor, performans ve üretkenliklerini etkileyebilen özelliklerini ifade etmektedir [1]. Bu kaliteyi belirleyen etmenler arasında, yapı elemanı bitirme malzemelerinden kaynaklanan uçucu organik bileşik (volatile organic compounds, VOC) emisyonları önemli bir yer tutmaktadır.

İç mekânda bulunan yapı elemanı bitirme malzemeleri, mobilyalar, kullanılan temizlik ürünleri ve çeşitli kimyasal içerikli uygulamalar, uçucu organik bileşik emisyonlarının başlıca kaynakları arasında yer almaktadır. Bu kaynaklardan salınan VOC'ler, iç havada koku ve irritasyon algısına neden olabilmekte; bazı türleri ise kısa ve uzun vadeli sağlık etkileri bakımından risk oluşturmaktadır. Buna karşın hasta odalarında malzeme kararları çoğu zaman dayanım, hijyen ve bakım kolaylığı gibi ölçütler üzerinden verilirken, VOC emisyon potansiyeli ikincil planda kalabilmektedir. Bu durum, hasta odalarında yapı elemanı bitirme malzemelerinin VOC emisyonları açısından değerlendirilmesini, iç mekân hava kalitesi odağında önemli bir araştırma alanı hâline getirmektedir.

Kullanıcıların kapalı ortamlarda uzun süre bulunması, iç ortam kaynaklı kirleticilerin önemini artırmakta; özellikle yapı elemanlarıyla ilişkili malzeme kararları bu bağlamda dikkat çekmektedir. Duvar, döşeme ve tavan gibi geniş yüzey alanlarına sahip yapı elemanlarında kullanılan bitirme malzemeleri, iç ortamla doğrudan temas hâlinde olmaları nedeniyle, iç hava kalitesini etkileyebilecek başlıca emisyon kaynakları arasında değerlendirilmektedir.

Literatürde, iç mekân hava kalitesi ve VOC emisyonlarının çoğunlukla konut ve ofis gibi farklı işlevlere sahip bina tipleri üzerinden ele alındığı; sağlık yapılarındaki çalışmaların ise daha çok genel iç ortam kalitesi, havalandırma stratejileri veya farklı birimlerin çevresel performansına odaklandığı görülmektedir. Buna karşılık hasta odası ölçeğinde, yapı elemanı bitirme malzemelerinin VOC emisyonları açısından karşılaştırmalı olarak değerlendirildiği çalışmalar sınırlı kalmaktadır. Bu çalışma, hasta odalarında yaygın kullanılan bitirme malzemelerinin VOC emisyon düzeylerini alternatifleriyle karşılaştırmalı olarak incelemeyi, yaygın tercih edilen malzemelerin emisyon açısından hangi düzeyde konumlandığını ortaya koymayı ve malzeme seçiminde VOC emisyonlarının ne ölçüde belirleyici olduğunu tartışmayı amaçlamaktadır. Ayrıca, daha düşük emisyonlu ya da VOC yaymayan alternatiflerin neden yaygın tercih edilmediği ve hangi koşullarda tercih edilebilir hâle gelebileceği de çalışmanın ikincil tartışma alanını oluşturmaktadır.

Çalışma, hasta odasında geniş yüzey alanlarına sahip duvar, döşeme ve tavan gibi yapı elemanlarının bitirme malzemeleriyle sınırlandırılmıştır. Kapı ve pencere gibi doğrama elemanları, görece sınırlı yüzey alanları nedeniyle; mobilya/eşyalar ile temizlik ve bakım kimyasalları gibi

diğer iç mekân VOC kaynakları ise değerlendirmenin odak alanını genişletmemek amacıyla kapsam dışında bırakılmıştır.

2. YÖNTEM

Bu çalışma, hasta odalarında yapı elemanı bitirme malzemelerinden kaynaklanan VOC emisyonlarını değerlendirmek üzere iki aşamalı bir yöntem kurgusu üzerine kurulmuştur. İlk aşamada, VOC'lerin iç mekân hava kalitesiyle ilişkisi, başlıca kaynakları, salınım mekanizmaları ve sağlık etkilerine ilişkin literatür taranmış; böylece değerlendirmede kullanılacak kavramsal ve teknik çerçeve belirlenmiştir.

İkinci aşamada ise sağlık yapıları literatüründe ve ilgili teknik kaynaklarda hasta odaları için karşılaşılan döşeme, duvar ve tavan bitirme malzemeleri derlenmiştir. Bu çalışmada karşılaştırmalı değerlendirme, farklı malzemeler için ortak ve sayısal bir gösterge sunması nedeniyle TVOC (toplam uçucu organik bileşikler) verileri üzerinden yürütülmüştür. Bilimsel kataloglar, laboratuvar deneyleri, saha ölçümleri veya teknik raporlar incelenerek, bu malzemeler arasından alan başına emisyon değerine ($\mu\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{h}$) sayısal olarak ulaşılabilen seçenekler belirlenmiş; malzemeler temel özellikleri, uygulama yöntemleri ve emisyon profilleri açısından karşılaştırılmıştır. Böylece, her yapı elemanında yaygın kullanılan çözümlerin alternatifleri karşısındaki emisyon düzeyi ile tercih gerekçeleri birlikte değerlendirilmiştir.

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI VE KARŞILAŞTIRMALI ANALİZ

İnsanlar zamanlarının yaklaşık %90'ını kapalı ortamlarda geçirmektedir [2]. Bu durum, iç mekân hava kalitesini kullanıcı sağlığı, konforu ve performansı açısından önemli bir çevresel ölçüt hâline getirmektedir. Akal'a (2013) göre sağlıklı iç mekân hava kalitesi, “bilinen kirleticilerin tehlikeli konsantrasyon düzeylerinde bulunmadığı ve bu havaya maruz kalan kullanıcıların en az %80'inin hava kalitesine ilişkin bir memnuniyetsizlik hissetmediği hava” olarak tanımlanmaktadır [3]. Önceleri, iç mekân hava kirleticilerinin ağırlıklı insan kaynaklı biyolojik atıklardan oluştuğu varsayımıyla, iç mekân hava kalitesinin göstergesi olarak karbondioksit (CO_2) öne çıkarken; günümüzde yapı elemanları ve malzemeler, eşyalar ile temizlik ve bakım ürünleri gibi çok sayıda kaynağın uçucu organik bileşik (VOC) salabilmesi, iç havayı kirleterek sağlık ve konforu olumsuz etkileyebilmektedir. Bu nedenle iç mekân hava kalitesinin değerlendirilmesi, tek bir göstergeyle sınırlı olmayan çok parametrelili bir yaklaşıma evrilmiş; iç mekân kaynaklı VOC emisyonları da bu çerçevede başlıca değerlendirme ölçütleri arasında yerini almıştır [4,5]

3.1. Uçucu Organik Bileşikler

VOC'ler, normal iç mekân sıcaklık ve basınç koşullarında dahi gaz fazına geçerek havaya karışabilen kimyasal maddelerdir ve iç mekân havasında farklı tür ve miktarlarda bulunabilmektedir [6-8]. İç mekânda VOC varlığını belirleyen temel unsur, bu bileşiklerin kaynaklardan ortama hangi mekanizmalar aracılığıyla salındığıdır. VOC emisyon mekanizması, fiziksel ve kimyasal süreçlerin bir kombinasyonu olarak tanımlanmakta olup, genel olarak aşağıdaki süreçler üzerinden açıklanmaktadır [9,10]:

- **İçsel göç (migration):** Kimyasalların malzeme içinden yüzeye doğru hareket ederek iç ortama salınması,
- **Adsorpsiyon ve ikincil emisyon:** Bazı malzemelerin kirleticileri önce emip ardından yeniden havaya salması,
- **Kimyasal reaksiyonlar/hidroliz:** Özellikle ahşap bazlı malzemelerde (MDF, yonga levha vb.) uzun vadeli emisyonların, örneğin formaldehit salımının, sürmesi,
- **Gözenekli yapıdan geçiş ve difüzyon:** Malzemenin gözenekli yapısının difüzyonu kolaylaştırması ve malzemedeki hava içeriği (aerasyon) arttıkça difüzyon hızının yükselmesi.

Bu mekanizmalar çerçevesinde, iç mekânda potansiyel VOC kaynaklarını oluşturan yapı malzemeleri ve bu malzemeleri içeren ürün grupları çeşitli kılavuzlarda sınıflandırılmaktadır. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından 2021 yılında yayımlanan *Yeşil Sertifika Bina Değerlendirme Kılavuzu*'nda, potansiyel VOC kaynağı niteliğindeki yapı malzemeleri, bu malzemeleri içeren ürün grupları ve bunlara ilişkin ulusal/uluslararası test standartları aşağıdaki başlıklar altında ele alınmaktadır [11]:

- **Yapıştırıcılar ve dolgu malzemeleri:** Halı, elastomer ve ahşap döşeme kaplama yapıştırıcıları, dolgu tutkalları, seramik plaka yapıştırıcıları, duvar panel tutkalları, aerosol (sprey) tutkallar, yapıştırıcı astarları, akustik contalar, yangın kesici contalar, HVAC kanalı contaları, conta astarları ve dolgu macunları.
- **Boyalar ve kaplamalar:** Anti-pas kaplamalar, bodrum kata özel kaplamalar, beton ve duvar sızdırmazlık kaplamaları, beton kürleme bileşikler, suni bitirme malzemesi kaplamaları, yangına dayanıklı kaplamalar, düz veya pürüzlü son kat kaplamalar, döşeme son kat kaplamaları, endüstriyel tabanlı bakım kaplamaları, metal pigmentli kaplamalar, vernikler, pigmentli vernikler, taş sağlamlaştırıcıları, yüzme havuzu kaplamaları, su yalıtım membranları, ahşap koruyucuları, ahşap kaplamaları ve çinko astarlar.
- **Döşeme kaplama malzemeleri:** Halılar ve sert yüzeyli kaplamalar.
- **Kompozit ahşap, taşıyıcı ahşap paneller ve tarımsal lifli paneller:** Ahşap kompozitler, ahşap yonga levha, ahşap lif levha (MDF, HDF, LDF), saman ve buğday lifli paneller, panel altlıkları, kapı çekirdekleri, OSB, çimentolu lif levha, kontrplak, masif ahşap plaka ve hafif akustik lif levha.
- **Tavan ve duvar sistemleri:** Tavan ve duvar yalıtımı, akustik tavan panelleri, kendinden yapışkanlı duvar panelleri, alçı paneller ve duvar kaplamaları.

İç mekânda kullanılan yapı malzemeleri ve mobilyalar, toplam uçucu organik bileşik düzeylerine önemli ölçüde katkıda bulunabilen kalıcı emisyon kaynakları arasında değerlendirilmektedir [12–16]. İç mekânda VOC kaynağı oluşturan bu malzeme ve ürün gruplarından yayılan başlıca bileşikler, literatürde aşağıdaki VOC türleri üzerinden özetlenmektedir [9]:

- **Formaldehit (HCHO):** Emisyon konsantrasyonu yüksek seviyelerde seyredebilen ve Kategori-I kanserojen olarak sınıflandırılan bir bileşiktir.
- **BTEX serisi:** Benzen, toluen, etilbenzen ve ksilen (o-ksilen ile p,m-ksilen) bileşiklerini kapsayan bu grup, potansiyel kanserojenler arasında değerlendirilmektedir. Bu grup içinde özellikle benzen, formaldehit gibi Kategori-I kanserojenler arasında yer almaktadır.
- **Neopentil glikol (NPG):** Modern yapı malzemesi emisyon çalışmalarında tanımlanan ve özellikle çimento bazlı ürünlerde baskın olarak görülen bir bileşiktir. Doğrudan toksik

olarak sınıflandırılmamakla birlikte, cilt, göz ve solunum yolu tahrişine neden olabildiği raporlanmaktadır.

- **Geleneksel çözücüler:** Modern üretim süreçlerinde kullanımları azalmış olmakla birlikte, geçmişte yaygın biçimde kullanılan stiren gibi bileşikler kapsamaktadır.

Yapı elemanı bitirme malzemelerinde yaygın olarak karşılaşılan VOC türleri arasında formaldehit ve benzer sağlık riski bakımından öne çıkarken, yeni nesil inşaat malzemelerinde NPG'nin baskın kirleticilerden biri olarak dikkat çektiği görülmektedir. Bu bileşiklere maruziyetin sağlık üzerindeki etkileri, maruziyetin düzeyi ve süresine bağlı olarak değişmekle birlikte; göz ve üst solunum yolu irritasyonu, baş ağrısı, bulantı ve baş dönmesi gibi akut semptomlarla ilişkilendirilmektedir [2].

3.2. Hasta Odalarında Yaygın Kullanılan Yapı Elemanı Bitirme Malzemelerinin Karşılaştırmalı Analizi

Günümüzde iç mekân bitirme malzemeleri, teknik, işlevsel ve çevresel özellikleri bakımından geniş bir çeşitlilik göstermektedir. Sağlık yapılarında ve özellikle hasta odalarında kullanılan bitirme malzemelerinin yalnızca estetik nitelikler taşıması yeterli olmayıp; kolay temizlenebilir, suya dayanıklı, aşınmaya dirençli, sık onarım gerektirmeyen, döşeme yüzeylerinde kayma riskini azaltan ve hijyen koşullarını destekleyen özellikler göstermesi beklenmektedir. NHS Health Building Note rehberlerinde de sağlık yapılarında yüzey bitişlerinin enfeksiyon önleme ve kontrol uygulamalarını destekleyecek; düzgün, gözeneksiz, suya dayanıklı, temizlenebilir ve bakım yapılabilir nitelikte olması gerektiği vurgulanmaktadır [17,18]. Bununla birlikte, malzeme seçimi yalnızca kullanım ve bakım performansı üzerinden değil, iç mekân hava kalitesi üzerindeki etkileri bakımından da değerlendirilmelidir. Bu bağlamda VOC emisyonları, hasta odasında farklı bitirme malzemelerinin karşılaştırılmasında önemli bir ölçüt olarak öne çıkmaktadır.

Bu bölümde, hasta odasında geniş yüzey alanlarına sahip duvar, döşeme ve tavan yapı elemanlarında kullanılabilecek bitirme malzemeleri VOC emisyon değerleri açısından karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada karşılaştırmalı değerlendirme, farklı malzemeler için ortak ve sayısal bir gösterge sunması nedeniyle TVOC (total verileri üzerinden yürütülmüştür. Tablolarda yer verilen malzemeler, sağlık yapıları literatüründe karşılaşılan ve alan başına TVOC emisyon değerlerine bilimsel kataloglar, laboratuvar deneyleri, saha ölçümleri veya teknik raporlar aracılığıyla sayısal olarak ulaşılabilen seçenekler arasından seçilmiştir. Böylece oluşturulan malzeme envanteri, yaygın kullanılan malzemelerin alternatifleri karşısındaki emisyon düzeyini görünür kılmış ve malzeme tercihinin emisyon değerinin yanı sıra hijyen, dayanıklılık, bakım ve uygulama kolaylığı gibi ölçütlerle birlikte değerlendirilmesine imkân tanımıştır. Bununla birlikte, tabloda yer alan emisyon verileri yalnızca malzemenin kendi özelliklerinden değil; havalandırma koşulları, sıcaklık, bağıl nem ve uygulama bileşenleri gibi çevresel ve kullanım koşullarından da etkilenmektedir. Bu nedenle söz konusu değerler, sabit ve değişmez veriler olarak değil, belirli koşullar altında elde edilmiş temsili emisyon göstergeleri olarak değerlendirilmelidir.

Sağlık yapılarında yapılan araştırmalar ve tesis yöneticileriyle gerçekleştirilen anketler, vinil/PVC esaslı döşemelerin — özellikle homojen rulo vinil ve LVT türlerinin — bu malzemeler arasında en yaygın ve popüler tercih olduğunu göstermektedir [19,22]. Ancak **Çizelge 1**'de bu malzemelerin aynı zamanda en yüksek TVOC emisyon değerlerini gösterebildiği de görülmektedir. Buna karşılık doğal taş ve seramik gibi düşük emisyonlu seçenekler, derz detaylarının hijyen kontrolünü

zorlaştırması ve kayma riski oluşturabilmesi nedeniyle; ahşap esaslı malzemeler ise yoğun kullanım ve bakım koşulları altında sınırlı kalmaktadır. Linolyum ise doğal içeriğiyle sağlıklı bir alternatif sunmasına rağmen, sert dezenfektanlar, asidik gıda maddeleri ve vücut sıvıları gibi etkenlere karşı yeterli dayanıklılığı her durumda sağlayamaması nedeniyle daha sınırlı ölçüde tercih edilmektedir [22,23,26]. Bu nedenle döşeme elemanında vinil/PVC esaslı sistemler, yüksek emisyon potansiyeline rağmen işlevsel ve işletmesel üstünlükleri sayesinde yaygın kullanımını sürdürmektedir.

Çizelge 1. Döşeme bitirme malzemeleri

	Temel Özellikleri	Uygulama Yöntemi	TVOC Emisyon Değeri	Ek Açıklama
Homojen Rulo Vinil (PVC)	Antibakteriyel, derzsiz, hijyenik [19-21]	Yapıştırma ve sıcak kaynak [19,22]	Laboratuvar: 65 µg/m ² ·h [23] Saha: 930 µg/m ² ·h [24]	Sahada yapıştırıcı ve tesviye şapı ile birleştğinde emisyonun 30 kata kadar artabildiği gözlenmiştir [24,25].
Linolyum	Doğal içerik, antibakteriyel, [26-28]	Su bazlı yapıştırıcı ile yapıştırma [23,27]	220 µg/m ² ·h [23]	-
Masif Meşe	Doğal, biyofilik, nem dengeleyici [29]	Mekanik montaj veya yapıştırma [30,31]	129 µg/m ² ·h [31]	-
LVT (Lüks Vinil Karo)	Kolay temizlenebilir, estetik [19]	Yapıştırma [23]	-	"LVT" özel ismine dair spesifik bir laboratuvar çıktısı bulunmamakla birlikte, PVC değerleri referans alınır [19,13,31].
Doğal taş / seramik karo	İnorganik yapı, gözeneksiz yüzey [26,32]	Düşük emisyonlu harç ve derz dolgusu ile yapıştırma [33]	-	"Doğası gereği emisyon yaymayan" olarak değerlendirilir [32].

Sağlık yapılarında gerçekleştirilen saha analizleri ve teknik standartlar, boyalı alçı duvar sistemlerinin – standart veya suya dayanıklı alçı levhalar ile son kat akrilik lateks boya kombinasyonunun – hasta odası duvar yüzeylerinde en yaygın ve standart uygulama olduğunu göstermektedir [19,20,26]. **Çizelge 2'**de görüldüğü üzere bu sistem, emisyon açısından en düşük değerli seçeneklerden biri olmamakla birlikte, tekstil duvar kaplamasının ulaştığı yüksek üst sınırların altında; akrilik lateks boya gibi daha düşük emisyonlu yüzeylerin ise üzerinde, orta düzeyde bir TVOC aralığında konumlanmaktadır. Standart ve suya dayanıklı alçı levhalar daha yüksek emisyon değerleri gösterebilirken, vinil duvar kâğıdı darbe dayanımı ve dekoratif niteliği sayesinde işlevsel bir alternatif sunmaktadır. Buna karşılık tekstil duvar kaplamaları hem yüksek emisyon potansiyelleri hem de gözenekli yapıları nedeniyle hijyenin öncelikli olduğu hasta odalarında sınırlı kalmaktadır. Bu nedenle boyalı alçı duvar sistemleri, başlangıçta görece yüksek emisyon gösterebilse de pürüzsüz yüzey standardı, yangın dayanımı, bakım kolaylığı ve hijyen koşullarına uyumu sayesinde hasta odalarında temel tercih olmayı sürdürmektedir.

Çizelge 2. Duvar bitirme malzemeleri

	Temel Özellikleri	Uygulama Yöntemi	TVOC Emisyon Değeri	Ek Açıklama
Akrilik Lateks Boya (Son Kat)	Hijyenik, düşük VOC opsiyonlu [26,34,35]	Alçı üzerine rulo/fırça uygulaması [26,36]	165 µg/m ² ·h [31]	-
Alçı Levha (Standart)	Yangın geciktirici, pürüzsüz [26]	Vidalama ve derz dolgusu [31]	647 µg/m ² ·h [31]	-
Alçı Levha (Suya Dayanıklı)	Islak hacimlere uygun [26,31]	Vidalama ve derz dolgusu [31]	395 µg/m ² ·h [31]	-
Vinil Duvar Kâğıdı	Darbe dayanımı yüksek, dekoratif [26]	Duvar yapıştırıcısı ile yapıştırma [23,33]	Vinil Kaplı: 21,67 µg/m ² ·h Vinil ve Cam Elyafı: 300 µg/m ² ·h	Aynı katalogdaki farklı vinil içerikli duvar kaplama alt türlerinin emisyon profillerindeki değişikliği yansıtmaktadır [23].
Tekstil Duvar Kaplaması	Dokulu, estetik [26]	Özel yapıştırıcı ile yapıştırma [33]	Minimum değer: 40 µg/m ² ·h Maksimum değer: 1600 µg/m ² ·h	Ürün basit yapısından karmaşık katmanlı hale geçtikçe ve üzerindeki kimyasal işlemler ağırlaştıkça emisyon değeri yükselmektedir [23].
Boyalı Alçı Duvar	Yangın geciktirici, küf/mantar engelleyici, pürüzsüz saten yüzeyli [26]	Katmanlı uygulama [20,26]	Taze uygulama: 230 µg/m ² ·h 6-12 ay sonunda: 20 µg/m ² ·h	İlk uygulamanın ardından; kuruma, havalanma ve yaşlanma süreciyle emisyon değeri düşmektedir [37].

Sağlık yapılarında tavan malzemeleri üzerine yapılan saha analizleri ve teknik değerlendirmeler, boyalı alçıpan tavan veya sıvalı ve boyalı alçı levha asma tavan sistemlerinin hasta odalarında en yaygın ve standart tercih olduğunu göstermektedir [19,20,26]. Çizelge 3'te görüldüğü üzere bu sistemler, emisyon açısından en düşük değerli seçeneklerden biri olmamakla birlikte, özellikle ilk uygulama döneminde daha yüksek TVOC değerleri gösterebilmekte; buna karşılık zamanla daha düşük ve kararlı seviyelere inmektedir. Toz boyalı metal tavanlar emisyon ve hijyen açısından en güvenli seçenek olarak öne çıkarken, akustik tavan çözümlerinde selüloz bazlı panellerin perlit bazlı olanlara kıyasla daha düşük emisyon değeri sunduğu görülmektedir. Bununla birlikte hasta odalarında boyalı alçıpan sistemler, tesisatı gizleme kabiliyeti, kesintisiz ve pürüzsüz yüzey sağlaması, bakım kolaylığı ve yangın dayanımı gibi işletmesel üstünlükleri nedeniyle yaygın kullanımını sürdürmektedir.

Sonuç olarak; döşemede vinil/PVC esaslı sistemler yüksek emisyon potansiyeline rağmen derzsiz yapı ve enfeksiyon kontrolüne katkıları nedeniyle; duvarda boyalı alçı sistemler orta düzey emisyon profiline rağmen pürüzsüz yüzey ve bakım avantajları nedeniyle; tavanda ise boyalı alçıpan sistemler başlangıçtaki yüksek emisyonlarına rağmen tesisatı gizleme ve yüzey bütünlüğü sağlamaları nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır.

Çizelge 3. Tavan bitirme malzemeleri

	Temel Özellikleri	Uygulama Yöntemi	TVOC Emisyon Değeri	Ek Açıklama
Toz Boyalı Metal Tavan	Yüksek hijyen, sterilizasyona uygun [20]	Klipsli/oturmali metal konstrüksiyon [20]	-	“Doğası gereği emisyon yaymayan” olarak değerlendirilir [32].
Akustik Tavan (Perlit Bazlı)	Akustik yutuculuk, tesisat erişimi [26]	T-taşıyıcı sisteme yerleştirme, asma sistem [31]	726 $\mu\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{h}$ [31]	-
Akustik Tavan (Selüloz Bazlı)	Hafif, ekonomik [23,26]	Mekanik montaj/yerleştirme [31]	116 $\mu\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{h}$ [31]	-
Asma Tavan (Sıvalı ve Boyalı Alçı Levha Sistemi)	Tesisat gizleme, hijyenik bitiş [26]	Karışık sistem uygulama [20,26]	İyi havalandırma: 200 $\mu\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{h}$ Zayıf havalandırma: 1350 $\mu\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{h}$	Havalandırma sisteminin etkinliği ve yüzeyin gözenekli yapısı gibi koşullar emisyon farklılıklarına sebep olabilmektedir [37].
Alçıpan Tavan (Boyalı)	Kesintisiz yüzey, antibakteriyel boyalı [20,26]	Vidalama, derz ve boya [20,26]	Taze uygulama: 200 $\mu\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{h}$ Bir yıl sonunda: 40-50 $\mu\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{h}$	İlk uygulamanın ardından; kuruma, havalanma ve yaşlanma süreciyle emisyon değeri düşmektedir [37].

4. SONUÇLAR

Bu çalışmanın temel sorusu, hasta odalarında yaygın kullanılan yapı elemanı bitirme malzemelerinin TVOC emisyonları açısından alternatifleri karşısında nerede konumlandığı ve neden tercih edildikleridir. Elde edilen bulgular, yaygın kullanılan malzemelerin her zaman en düşük emisyonlu seçenekler olmadığını; buna karşılık hijyen, dayanıklılık, bakım kolaylığı, uygulama pratiği, yangın dayanımı ve işletme gereklilikleri gibi ölçütler nedeniyle tercih edilmeye devam ettiklerini göstermektedir.

Çalışma ayrıca, yapı elemanı bitirme malzemelerinden kaynaklanan VOC emisyonlarının;

- Sabit bir değerde seyretmediğini, özellikle boya, yapıştırıcı ve cila gibi ıslak uygulama içeren malzemelerde ilk dönemde yüksek olduğunu ve zamanla azalarak daha kararlı bir düzeye ulaştığını,
- Yaklaşık 6 ay içinde belirgin biçimde azaldığını ve 12. ay civarında malzemenin normal kullanım ömrünü daha iyi temsil eden daha kararlı bir emisyon düzeyine yaklaştığını,
- Malzemenin kimyasal içeriği ve fiziksel yapısından doğrudan etkilendiğini; aynı malzemenin ek katmanlar, yüzey işlemleri ve yardımcı bileşenlerle daha karmaşık hâle gelmesi durumunda emisyon düzeyinin artabildiğini,
- Yalnızca malzemenin kendisine değil, çevresel koşullara da bağlı olduğunu; havalandırma, sıcaklık ve bağıl nem gibi etkenlerin emisyon düzeylerini doğrudan etkilediğini göstermektedir.

Bu çerçevede, hasta odalarında malzeme seçiminde VOC emisyonlarının tek başına belirleyici bir ölçüt olmadığı; ancak iç mekân hava kalitesi açısından göz ardı edilmemesi gereken önemli bir değerlendirme boyutu oluşturduğu anlaşılmaktadır. Bu emisyonların güvenli düzeyde tutulabilmesine yönelik çeşitli uluslararası standart ve düzenlemeler bulunmakla birlikte, mevcut kullanım pratiğinde teknik ve hijyenik gerekçelerle bazı yüksek emisyonlu malzemeler yaygınlığını korumaktadır. Bu nedenle, daha düşük emisyonlu ya da emisyonsuz alternatiflerin tercih edilebilirliğini artıracak tasarım, ürün geliştirme ve uygulama stratejilerinin teşvik edilmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

1. U.S. Environmental Protection Agency. (2025a, Temmuz). *Factsheet: What is indoor air quality?* U.S. Environmental Protection Agency. Erişim Tarihi (09/02/2026) <https://www.epa.gov/air-emissions-inventories/what-definition-voc>
2. U.S. Environmental Protection Agency. (2025b). *Improving your indoor environment*. U.S. Environmental Protection Agency. Erişim Tarihi (09/02/2026) <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/improving-your-indoor-environment>
3. Akal, D. (2013). İç ortam hava kirliliği ve çalışanlara olumsuz etkileri. *ÇSGB Çalışma Dünyası Dergisi*, 1(1), 112–119.
4. Brown, S. K., Sim, M. R., Abramson, M. J., & Gray, C. N. (1994). Concentrations of volatile organic compounds in indoor air: A review. *Indoor Air*, 4, 123–134.
5. Mølhave, L., Clausen, G., Berglund, B., De Ceaurriz, J., Kettrup, A., Lindvall, T., Maroni, M., Pickering, A. C., Risse, U., Rothweiler, H., Seifert, B., & Younes, M. (1997). Total volatile organic compounds (TVOC) in indoor air quality investigations. *Indoor Air*, 7(4), 225–240.
6. U.S. Environmental Protection Agency. (2026). *What is the definition of VOC?* Erişim Tarihi (09/02/2026) <https://www.epa.gov/air-emissions-inventories/what-definition-voc>
7. Ni, J. Q., Robarge, W. P., Xiao, C., & Heber, A. J. (2012). Volatile organic compounds at swine facilities: A critical review. *Chemosphere*, 89(7), 769–788.
8. Khidirov, B. K. (2020). *İç mekânlardaki LED lambaların iç hava kalitesi üzerindeki etkisi* (Doktora tezi). Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi.
9. Wang, H., Zhang, R., Kong, H., Wang, K., Sun, L., Yu, X., & Balasubramanian, R. (2024). Long-term emission characteristics of VOCs from building materials. *Journal of Hazardous Materials*, 480, 136337.
10. Katsoyiannis, A., Leva, P., Barrero-Moreno, J., & Kotzias, D. (2012). Building materials: VOC emissions, diffusion behaviour and implications from their use. *Environmental Pollution*, 169, 230–234.
11. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2021). *Yeşil bina değerlendirme kılavuzu*. Erişim Tarihi (09/02/2026) https://webdosya.csb.gov.tr/db/meslekihizmetler/menu/yesilbina-degerlendirme-kilavuzu_20210611120321.pdf
12. Wolkoff, P., Wilkins, C. K., Clausen, P. A., & Nielsen, G. D. (2006). Organic compounds in office environments—Sensory irritation, odor, measurements, and the role of reactive chemistry. *Indoor Air*, 16, 7–19.
13. Wolkoff, P. (1995). Volatile organic compounds: Sources, measurements, emissions, and the impact on indoor air quality. *Indoor Air*, 5, 35–49.

14. Yu, C., & Crump, D. R. (1998). A review of the emission of VOCs from polymeric materials used in buildings. *Building and Environment*, 33, 357–374.
15. Lunderberg, D. M., Misztal, P. K., Liu, Y., Arata, C., Tian, Y., Kristensen, K., ve diğerleri. (2021). High-resolution exposure assessment for volatile organic compounds in two California residences. *Environmental Science & Technology*, 55, 6740–6751.
16. You, B., Zhou, W., Li, J., Li, Z., Sun, Y., & diğerleri. (2022). A review of indoor gaseous organic compounds and human chemical exposure: Insights from real-time measurements. *Environment International*, 170, 107611.
17. NHS England. (2013a). *Health Building Note 00-01: General design guidance for healthcare buildings*.
18. NHS England. (2013b). *Health Building Note 00-10 Part B: Walls and ceilings*.
19. Amasyalı, Y. K. (2022). *Aile sağlığı merkezleri, tasarım ilkeleri ve iç mekân tasarımında planlamaya etki eden faktörlerin yeni modeller üzerinden değerlendirilmesi* (Doktora Tezi). Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
20. Eberliköşe, Ö. (2007). *Hastanelerde Hijyenik Ortamların Mimari Tasarımı*. VIII. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi Bildirisi, 467-473.
21. Sungur Ergenoğlu, A. ve Tanrıtanır, A. (2013). Genel Hastanelerde Kullanıcı Memnuniyeti Açısından Hasta Odalarında Mimari Mekan Kalitesinin İrdelenmesi: Gaziantep İlinde Bir Alan Çalışması. *Megaron*, 8(2), 61-75.
22. Singh, J. P., Sahu, P. K. ve Sahu, D. K. (2023). Floor Finish Selection in Hospital Design: A Survey of Facility Managers. *International Journal of Research Publication and Reviews*, 4(8), 2352-2356.
23. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (1993). *Catalog of Materials as Potential Sources of Indoor Air Emissions, Volume 1* (Report No. EPA-600/R-93-108a). Research Triangle Park, NC.
24. Järnström, H. (2007). *Reference values for building material emissions and indoor air quality in residential buildings* (VTT Publications 672). Espoo: VTT Technical Research Centre of Finland.
25. Järnström, H., Saarela, K., Kalliokoski, P., & Pasanen, A.-L. (2008). Comparison of VOC and ammonia emissions from individual PVC materials, adhesives and from complete structures. *Environment International*, 34(3), 420-427.
26. Özgen, E. (2020). *Sağlık Yapıları İç Mekan Tasarımında Malzeme Kullanımı*. Mimarlık ve Yaşam, 5(2), 603-614.
27. NC (Dünya Yapı ve Zemin Malzemeleri). (2013). *Zemin Kaplamalarında Kimyasal Emisyon (VOC) Rehberi*.
28. Munir, M. T. vd. (2021). *Hygienic perspectives of wood in healthcare buildings*. Hygiene, 1(1), 12-23.
29. Üçüncü, K., Acar, H. H., & Barışık, T. (2025). Ergonomik iç mekan tasarımında kullanılan ahşap malzemelerin ortam kalitesine ve insan refahına etkileri. *Sürdürülebilir Mühendislik Uygulamaları ve Teknolojik Gelişmeler Dergisi*, 1(1), 17-30.
30. İnce Gayberi, Ş., & Dalkılıç, N. (2021). Geleneksel Urfa evlerinin ahşap tavan yapım teknikleri ve süslemeleri. *Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10(2), 133-146.
31. Won, D. Y., vd. (2003): *A Comprehensive VOC emission database for commonly-used building materials*. National Research Council Canada.
32. United States Gypsum Company. (2016). *Defining VOCs* (Green Clips: Sustainability Technical Documents, Rapor No. SUST004). USG Corporation.

33. Kozicki, M., & Guzik, K. (2021). Comparison of VOC emissions produced by different types of adhesives based on test chambers. *Materials*, 14(8), 1924. <https://doi.org/10.3390/ma14081924>.
34. Çimen, A., & Çimen, S. (2024). Modern hastaneler: İnovatif malzemelerle sağlık ve sürdürülebilirlik. *Sürdürülebilir Mühendislik Uygulamaları ve Teknolojik Gelişmeler Dergisi*, 7(1), 70-75.
35. Sarah, B., (2020). How Healthcare Facilities Use Paint To Enhance Services. Erişim Tarihi (05/03/2026) <https://refabpro.com/how-healthcare-facilities-use-paint-to-enhance-services/>
36. Avrupa Komisyonu. (2007). *Organik solventlerin kullanımı ile yapılan yüzey işlemlerindeki mevcut en iyi teknikler referans dokümanı* (Ö. Temizöz, Çev.). Avrupa Komisyonu.
37. Järnström, H., Saarela, K., Pasanen, A.-L., & Kalliokoski, P. (2007). Reference values for structure emissions measured on site in new residential buildings in Finland. *Atmospheric Environment*, 41(11), 2290-2302.

KAMPÜS ÖLÇEĞİNDE BİYOKLİMATİK KONFOR KOŞULLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ: VAN YYÜ ÖRNEĞİ

Nilay ÖZELER KANAN^{1*}

Onur ŞATIR²

^{1,2} Van YYÜ Mimarlık ve Tasarım Fakültesi

Zeve Kampüsü, Tuşba, Van, 65080

ÖZET

Kampüs içi yollar, otoparklar, yeşil alanlar ve binaların öğrenci odaklı kullanımına yönelik mimari, kentsel, peyzaj tasarımlarının konfor parametrelerine uygun olarak tasarlanması kampüs yerleşkelerinin planlanması açısından oldukça önemlidir. Özellikle dış mekan kullanımına yönelik ısı konforunun belirlenmesi, açık alan planlamasına yönelik strateji oluşturmak için gereklidir. Bu çalışma, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi kampüs yerleşkesinin açık hava rekreasyon planlaması için biyoiklimli konfor alanlarının tespit edilmesi amaçlanmıştır. Isıl konforun bir ölçüsü olarak Fizyolojik Eşdeğer Sıcaklık (PET) indeksinin mekânsal dağılımı, meteorolojik veri seti kullanılarak Van YYÜ kampüsü için elde edilmiştir. PET'in hesaplanması için hava sıcaklığı, bağıl nem ve rüzgar hızı verileri kullanılmıştır. 2021-2026 yılları arası boyunca 19353 kodlu Tuşba/YYÜ adlı meteoroloji istasyonundan alınan saatlik veriler ile RayMan aracı kullanılarak aylık PET hesaplanması yapılmıştır. PET değerleri ile ArcGIS 10.5'de PET mekânsal dağılım haritaları oluşturulmuştur. Van YYU kampüsü için Temmuz ve Ağustos aylarının sıcak, Ocak ve Şubat aylarının çok soğuk olarak termal konfor etkisinin olduğu görülmektedir. En konforlu ayların Mayıs ve Ekim aylarında olduğu görülmüştür. Çalışmada yapı ve doğal çevre unsurlarının etkisinin kentsel ölçek ile mimari (insan ölçeği) arasında değerlendirme safhasında önemli farklılıklar olduğu değerlendirilmektedir.

Anahtar kelimeler: Kampüs, Biyoklimatik konfor, CBS, PET, RayMan.

EVALUATION OF BIOCLIMATIC COMFORT CONDITIONS ON A CAMPUS SCALE: THE CASE OF VAN YYÜ

ABSTRACT

The design of campus roads, parking lots, green spaces, and buildings for student-focused use, in accordance with comfort parameters, is crucial for campus planning. Determining thermal comfort for outdoor use is particularly important for developing strategies for open-space planning. This study aims to identify bioclimatic comfort zones for open-air recreation planning at the Van Yüzüncü Yıl University campus. The spatial distribution of the Physiological Equivalent Temperature (PET) index, as a measure of thermal comfort, was obtained for the Van YYÜ campus using a meteorological data set. Air temperature, relative humidity, and wind speed data were used to calculate PET. Monthly PET calculations were performed using the RayMan tool, with hourly data from the meteorological station Tuşba/YYÜ (code 19353) for the period 2021-2026. PET spatial distribution maps were created in ArcGIS 10.5 using PET values. It was observed that thermal comfort was high in July and August and very low in January and February at the Van YYU campus. The most comfortable months were found to be May and October. The study suggests significant differences in the assessment phase between the urban scale and the architectural (human) scale when evaluating the impact of built and natural environmental elements.

Keywords: Campus, Bioclimatic comfort, GIS, PET, RayMan.

^{1*} e-posta adresi: nilayozelerkanan@yyu.edu.tr.

1. GİRİŞ

Kampüs kavramı 18.yüzyılda şehirlerin dışında manzaralı arazilerde inşa edilmiştir [1]. Princeton Üniversitesi, 1774 yılında kampüs kelimesini kullanan ilk üniversitedir [2, 3]. Kampüs terimi, binalar alanlar ve yeşil alanlarla sınırlar tanımlamaktadır [4]. Fakat kampüsü küçük bir şehir [5], hatta kentsel morfoloji unsurlarını taşıyan alan olarak tanımlayan çalışmalar da vardır [6]. Bu sebeple kampüs alanları, kent merkezlerinin prototipi şeklinde değerlendirilebilir.

İklim parametreleri ve koşullar, orta ve mikro ölçekte doğal çevre ve yapılı çevre morfolojileri ile hem zamansal hem de mekansal değişime maruz kalmaktadır. Bu değişim kentsel planlamaların farklı düzeylerinde binalar, rekreasyon alanları, parklar v.b. tasarıma dayalı çözümler için önemlidir. Bu nedenle bu değişimlerin olabildiğince insan ölçeğinde biyokonfor çalışmaları için kullanılan yöntemlerle uygulanabilir olması sağlanabilir. Termal konfor termal ortamdan memnuniyeti ifade eden ve öznel değerlendirme ile değerlendirilen zihin durumu; termal ortam ise bir kişinin ısı kaybını etkileyen termal çevre koşulları olarak tanımlanmaktadır [7]. Termal biyoklimatik koşulları hesaplamak için hava sıcaklığı, hava nemi, rüzgar hızı gibi meteorolojik standart iklim verilerin yanı sıra insan yaş, boy, aktivite, giysi gibi termofiziksel verilerde gerekmektedir [8, 9]. Ayrıca, açık alan termal konfor analizlerinde kullanılan termal indislerin hesaplanabilmesi için temel parametrelerden biri, kısa ve uzun dalga radyasyon bileşenlerinin birlikte değerlendirilmesiyle elde edilen ortalama radyant sıcaklıktır (T_{mrt}) verisidir [10].

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Çalışma Alanı

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi (Van YYÜ), Van Gölüne kıyısı olan bir kampüs yerleşkesi olup Van il merkezinin kuzeybatısında yer almaktadır. Enlem ($38^{\circ} 33' 54.67''$ K) ve boylam ($43^{\circ} 16' 45.56''$ D) arasında bulunmaktadır. Van YYÜ yüz ölçümü $6\,909\,397\text{ m}^2$ 'dir (Şekil 1 ve Şekil 2). Şekil 1 ve Şekil 2 arasında bazı farklar vardır, bunun sebebi 2011 yılı Van depremi sonrasında geçici barınma ve yeni binaların yapımı için kampüse ait yerlerden bazı alanların inşaat alanlarına ayrılmasıdır. Günümüzde geçici barınma için yapılan prefabrik yapılar, lojman, derslik/stüdyo, yurt, öğrenci kulüp odaları, idari birimler gibi işlevler için kullanılmaya devam edilmektedir. Buna göre kampüsteki binaların zeminde kapladığı alan $153\,082\text{ m}^2$ olup toplam kampüs bina alanı $401\,351,79\text{ m}^2$ 'dir. Kampüs %97,7 oranında açık alana sahiptir. Kampüste ormanlık alan bulunmamakla birlikte sonradan ağaçlandırılmış alan miktarı toplam alanın %15,3'üdür ($1\,060\,980\text{ m}^2$). Kampüste 30 762 kişi kullanıcı olarak yer almaktadır. Buna göre, kampüsteki kişi başına düşen açık alan miktarı $70\text{ m}^2/\text{kişi}$ 'dir [11].

Çalışma alanı, TS825'e göre 5.derece gün bölgesi-çok soğuk iklim bölgesi [13] olarak ifade edilirken Köppen iklim sınıflandırmasına göre kışı ılık, yazı çok sıcak ve kurak iklim ile karakterize edilen Akdeniz iklimi (Csa) olduğu belirtilmektedir [14]. Son 80 yılın en yüksek sıcaklığı 37.5°C ile Temmuz ayında görülürken, en düşük sıcaklığı -28.7°C ile Ocak ayında görülmüştür. Bugüne kadar en yüksek günlük yağış miktarı 122 mm; günlük en hızlı rüzgar 46 m/sn; en yüksek kar miktarı 120 cm olarak kaydedilmiştir [15]. İklim ve çevre değişiklikleri nedeniyle son yıllarda yağış miktarları azalmıştır. Van YYU Kampüsü yaz ve kış mevsimlerine ait hava fotoğrafları Şekil 3 ve Şekil 4'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Van YYY kampüs sınırları [12]



Şekil 2. Van YYY kampüs sınırları-halihazır dwg



Şekil 3. Van YYY kampüsü yaz dönemi [16]



Şekil 4. Van YYY kampüsü kış dönemi [16]

Van YYÜ 2025 yılı verilerine göre öğrenci sayısı 29 893 (18-25 arasında yaş); akademik personel sayısı 1 680 (25-67 arasında yaş); idari personel sayısı 1 597 (25-65 arasında yaş); sözleşmeli personel 371 (25-65 arasında yaş); sürekli ve geçici işçi 1 396 (25-65 arasında yaş)'dır [17]. Van ili genç bir nüfus yapısına sahiptir [18]. Van ili 2023 nüfusunun %50,2'si 25 yaşın altındadır. Ortanca yaş 24,9 olup 34 yaş olan Türkiye ortanca yaş verisinden oldukça düşüktür [19]. Buna göre kampüse dışarıdan kullanıcı olarak ziyaret edenler ile kampüsün ana kullanıcı yoğunluğunu yaklaşık 25 yaşındaki kişilerin kullanma oranı daha yüksek çıkacağı öngörülebilmektedir. Ayrıca 2025 yılı verilerine göre kampüs içindeki hastane hizmetinden faydalanan kişi sayısı 922 000; ağız ve diş sağlığı hizmetinden yararlanan hasta sayısı 107 996'dır [17]. Sağlık hizmetlerinin kampüs içinde yürütülmesi sebebiyle yıl içinde sabit (devamlı kullanan) kullanıcı yoğunluğunun yaklaşık 29,5 katı kadar hareketli (hasta olarak gelip giden) kullanıcı yoğunluğu olduğu görülmektedir. Bu bağlamda dış mekan kullanıcılarının kampüs sınırları içindeki hareketliliğine yönelik mikroiklimden kaynaklı konforu önemli hale gelmektedir.

2.2. Veri Toplama-Girdi Veri Temini

Bu çalışmada, Van ili Meteoroloji 14. Bölge Müdürlüğü'nden temin edilen ve 2021–2025 yıllarını kapsayan 5 yıllık döneme ait, 19353 istasyon numaralı Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi meteorolojik istasyon verileri kullanılmıştır. İstasyonun konum ve yükseklik bilgileri, The World Topographic Map web haritası [20] aracılığıyla karşılıklı olarak doğrulanmış ve sonuçlar Çizelge 1'de

sunulmuştur. Bu çalışma için seçilen istasyonda 5 yıllık küresel güneş radyasyonu, buhar basıncı, nispi nem, rüzgar hızı, maksimum-minimum hava sıcaklığı, toplam küresel radyasyon miktarı verileri mevcuttur. Ayrıca Van YYU Kampüsü doğal çevre arazi yükseklik haritası ile yapılı çevre arazi+bina yükseklik haritası aralıkları **Şekil 5**'te ve **Şekil 6**'da gösterilmiştir. Van ilinde Van Gölü sahil kotu 1650 m rakım kabul edilerek kent ve kıyı planlaması yapılmaktadır.

Çizelge 1. Çalışmada kullanılan hava istasyonlarının konumu ve yüksekliği

Hava İstasyonu	Enlem	Boylam	Yükseklik (m)-Rakım
19353 (OMNİ)	38° 34' 4.29" K	43° 17' 22.13" D	1669

Çizelge 2. Van YYU istasyonu (2021-2025) ortalama aylık rüzgar hızı, nem ve sıcaklık değerleri.

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi İklim İstasyonu Verileri

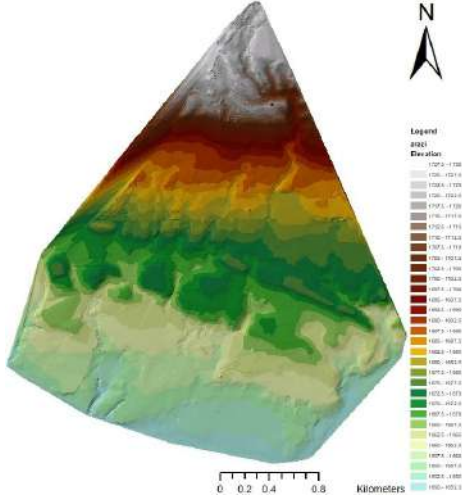
Aralık	C° Nem % Rüzgar m/s	7.22 76.5 2.5	Ocak	C° Nem % Rüzgar m/s	3.92 74.58 2.62	Şubat	C° Nem % Rüzgar m/s	3.95 73.85 2.775
Mart	C° Nem % Rüzgar m/s	9.475 72.025 2.6	Nisan	C° Nem % Rüzgar m/s	16.6 62.64 2.78	Mayıs	C° Nem % Rüzgar m/s	20.52 61.06 2.7
Haziran	C° Nem % Rüzgar m/s	27.68 46.34 2.72	Temmuz	C° Nem % Rüzgar m/s	31.46 43.28 3.04	Ağustos	C° Nem % Rüzgar m/s	33.36 37.84 2.68
Eylül	C° Nem % Rüzgar m/s	28.08 44.76 2.54	Ekim	C° Nem % Rüzgar m/s	20.26 59.46 2.32	Kasım	C° Nem % Rüzgar m/s	13.06 71.56 2.3

Çizelge 3. Termofiziksel, iklim, konum verileri

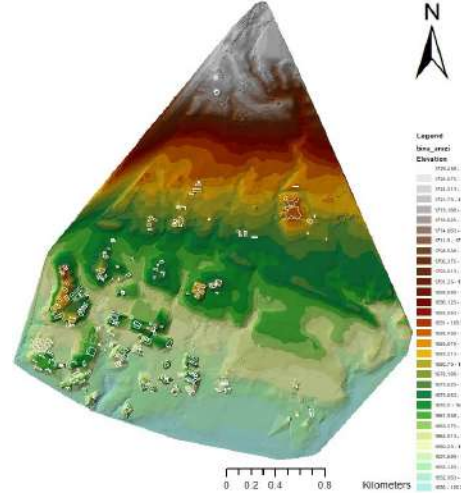
İnsana ait fiziksel veriler	Değerler	İklim verileri	Birimler
Yükseklik (m)	1.75	Hava Sıcaklığı	°C
Kilo (kg)	75	Nispi Nem	%
Yaş	25	Rüzgar Hızı	m/s
Cinsiyet	erkek	Bulutluluk Oranı	octas
Giyim ve aktivite	Değerler	Konum verileri	Birimler
Giysi (clo)	0.9	Rakım (Yükseklik)	m
Aktivite (W)	80	Enlem	derece dakika
Eylem	ayakta (dış mekan)	Boylam	derece dakika
		timezone	UTC+3

Çizelge 2'de yer alan iklim verileri Meteoroloji 14.Bölge Müdürlüğünden temin edilmiştir. Van ilinde yılın 120 günü güneşli, 200 günü ise bulutlu ve 45 günü kapalıdır [21]. Bulutluluk oranı, Van'da yıllık ortalama onda 4 (3.2 octas) bulutlu geçmektedir. En fazla bulutluluk onda 5.8 (4.64 octas) ile Mart, en az bulutluluk ise onda 1.5 (1.2 octas) ile Ağustos aylarıdır. Aralık, Ocak, Şubat, Mart ve Nisan ayları bulutluluk ortalaması 5'in (4 octas'ın) üzerinde, geri kalan diğer aylarda onda

1-5 (0.8-4 octas) arasında olmaktadır [22]. Buna göre, ondalık dilimle ifade edilen bulutluluk değerleri octas olarak ifade edilen 8'li dilime dönüştürülmüştür. Çizelge 3'de insana ait termofiziksel veriler için Rayman programı içindeki veriler (yaş dışında) varsayılan olarak kabul edilerek uygulanmıştır. Verilerin doğrulanması amacıyla standart üzerinden kontrol sağlanmıştır [23]. Yaş verisi çalışma alanı başlığı altında yer alan nüfus ve kullanıcı profili araştırmasına göre 25 alınmıştır.



Şekil 5. Van YYU kampüsü doğal çevre-arazi DEM haritası



Şekil 6. Van YYU kampüsü yapıli çevre-arazi+bina DEM haritası

2.3. Rayman Modeli ve Aracı

RayMan modeli, kısa ve uzun dalga radyasyon bileşenlerini hesaplayarak, bulutluluk koşulları ile kentsel morfolojiyi oluşturan kütleli engellerin (örneğin bina ve ağaçlar) özellikle kısa dalga radyasyon üzerindeki etkilerini tahmin etmektedir. Bu modelin nihai çıktısı, enerji dengesi modelinde insanlar için gerekli olan hesaplanan ortalama radyant sıcaklık (T_{mrt})'dir. T_{mrt} , kentsel biyoklimanın ve Predicted Mean Vote (PMV), Physiologically Equivalent Temperature (PET), Standard Effective Temperature (SET*) [10], Universal Thermal Climate Index (UTCI), Perceived Temperature (pT) ve mPET [24] gibi termal endekslerin değerlendirilmesi için gerekmektedir. Model, Alman Mühendisler Birliği (Verein Deutscher Ingenieure-VDI)-Kılavuzları 3789 Kısa ve uzun dalga radyasyonunun hesaplanması ile VDI-3787 Kentsel ve bölgesel planlama için iklim ve hava kalitesinin insan-biyometeorolojik değerlendirmesi için yöntemlerin yer aldığı kılavuzlar esas alınarak geliştirilmektedir [25, 26].

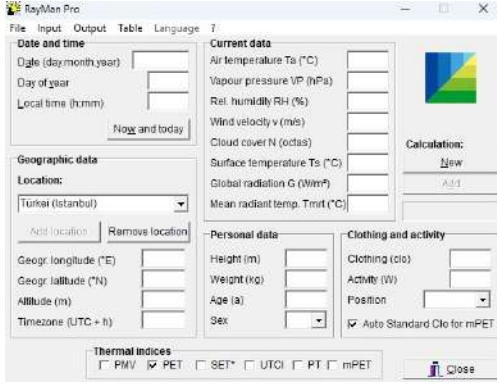
Çalışma kapsamında literatürdeki genel eğilimi görmek için Web of Science verilerine göre bibliyometrik analiz yöntemi kullanılarak yazar anahtar kelimeleri arasında sorguda belirlenen kelimelerin yoğunluğunun tespiti ve görsel okunaklılığı arttırmak için kelime bulutu analizi yapılmıştır (Şekil 7). Çalışma sorgusu olarak "Rayman" AND "UTCI" OR "Universal Thermal Climate Index" OR "PET" OR "Physiologically Equivalent Temperature" OR "PMV" OR "Predicted Mean Vote" kullanılarak sadece tam metin makale sınırlandırması yapılmıştır. Sonuçta 175 makale, bilimsel haritalama için eş-kelime yoluyla incelenmesine karar verilmiştir. Verilerin görselleştirilmesi sürecinde R Stüdio yazılım aracı tercih edilmiştir. Şekil 7'de 175 makale içinde geçen 50 farklı yazar anahtar kelimeleri (Author's keywords) sınırlandırmasına ait diyagram yer almaktadır. Bu anahtar kelimelerin %22.54'ünde PET; %8.15'inde RayMan; %1.68'inde UTCI;

%0.72'sinde PMV anahtar kelimeleri kullanılmıştır. Buna göre Rayman yazılımı ile PET termal konfor indeksine ait çalışmaların en fazla yapıldığı görülmüştür. Bu çalışmada PET indeksinin kullanılmasındaki tercih nedeni kıyaslama imkanı sağlayan pekçok literatür çalışması yapılmış olmasıdır.



Şekil 7. Termal konfor ve termal indekslere odaklı WoS veri tabanlı makalelere ait yazar anahtar kelimelerinin kelime bulutu ile yoğunluk dağılımı diyagramı

Şekil 8’de Rayman yazılım aracı ana ekranında PET indeksi belirlenmesi için girilmesi gereken meteorolojik ve termofiziksel özellik verileri gösterilmektedir. Höppe tarafından geliştirilen Fizyolojik Eşdeğer Sıcaklık (PET) indeksi, Münih Bireysel Enerji Dengesi Modeli (Munich Energy Balance Model for Individuals—MEMI) temeline dayanmaktadır [8]. PET, değerlendirilen dış mekân koşullarının insan üzerinde oluşturduğu termal gerilime eşdeğer bir etkiyi, standartlaştırılmış bir iç ortamda meydana getirecek hava sıcaklığı olarak tanımlanmaktadır (Çizelge 4). Başka bir ifadeyle PET, dış ortamın algılanan termal etkisini tek bir sıcaklık değeri üzerinden ifade eden bütünleşik bir göstergedir. PET’in hesaplanmasında başlıca meteorolojik girdiler olarak hava sıcaklığı, bağıl nem (ve/veya su buharı basıncı), rüzgâr hızı ve güneş ışınlamı / ortalama ışınlam sıcaklığı (T_{mrt}) dikkate alınır. Bu çok değişkenli yaklaşım, PET’in farklı iklim tiplerinde ve çeşitli ölçeklerde yürütülen biyoklimatolojik ve dış mekân termal konfor çalışmalarında yaygın biçimde tercih edilmesine neden olmuştur. Bunlardan bazıları istasyon verileriyle şehir ölçeğinde PET türetilerek termal konfor/ısı stresi haritaları üretilmesi [27]; kampüs ve kentsel açık alanlarda PET diğer indekslerle birlikte ölçüm ve kullanıcı değerlendirmeleriyle sınırlanarak mikro-ortamlar arası farkların incelenmesi [28]; planlama-tasarım odaklı çalışmalarda PET/mPET ile kritik risk bölgeleri ve gölgeleme/yeşil altyapı gibi müdahalelerin etkisi nicel olarak raporlanması [29]; ya da sağlık alanında ısı stresi konusunun incelenmesidir [30]. Şekil 9’da çalışmanın akış diyagramı ile çalışma adımları basit bir şekilde gösterilmiştir.



Şekil 8. Rayman yazılımı ana ekranı (örnek ekrandır)



Şekil 9. Çalışmanın akış diyagramı

Çizelge 4. Termal konfor ve Fizyolojik Eşdeğer Sıcaklık İndeksi (PET) [31, 32] ve renk kodları ile gösterimi

PET (°C)	Termal Algılama	Fizyolojik Stres Seviyeleri	Renk kodları
< 4	Çok Soğuk	Çok Şiddetli Üşüme Stresi	Dark Blue
4,0-8,0	Soğuk	Şiddetli Üşüme Stresi	Blue
8,1-13,0	Serin	Orta Dereceli Üşüme Stresi	Light Blue
13,1-18,0	Hafifçe Serin	Hafifçe Üşüme (Ürperme)	Cyan
18,1-23,0	Konforlu	Isı Stresi Yok	Light Green
23,1-29,0	Hafifçe Ilık	Hafifçe Isınma Stresi	Yellow
29,1-35,0	Ilık	Orta Derecede Isınma Stresi	Orange
35,1-41,0	Sıcak	Şiddetli Isınma Stresi	Red
>41	Çok Sıcak	Çok Şiddetli Isınma Stresi	Dark Red

3. BULGULAR ve TARTIŞMA

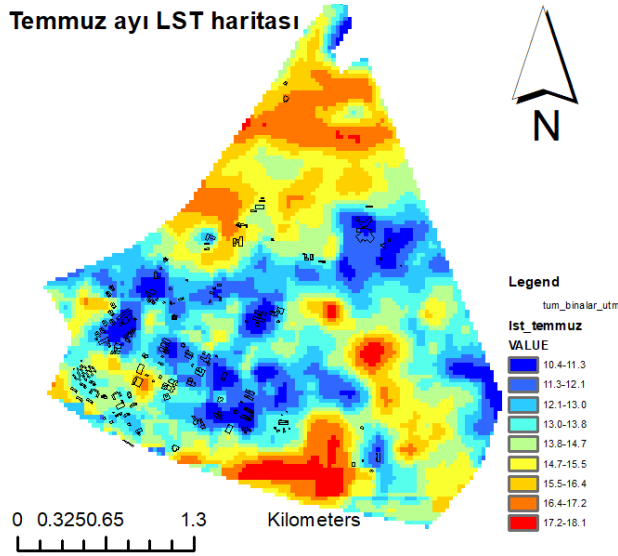
Aylık PET değerleri, 19353 istasyonu için ortalama aylık hava sıcaklığı, bağıl nem ve rüzgar hızı verileri kullanılarak Rayman modeli ile hesaplanmıştır. Çizelge 5’de PET değerleri, aylara ve istasyona göre termal stresi yansıtacak şekilde renk kodlaması ile ifade edilmiştir. Aylık ortalama iklim verilerine göre tespit edilen PET sonuçlarına göre Van YYU alanı içerisinde hafifçe ılık ve çok sıcak sınıflandırma bulunmamaktadır. Temmuz ve Ağustos aylarının sıcak, Ocak ve Şubat aylarının çok soğuk olarak termal konfor etkisi görülmektedir. En konforlu ayların Mayıs ve Ekim aylarında olduğu görülmüştür.

Ayrıca yeryüzü yüzey sıcaklık (Land Surface Temperature-LST) haritalarından da faydalanılmıştır. LST, yeryüzü yüzeylerinin (toprak, asfalt, beton, bitki örtüsü vb.) yaydığı termal kızılötesi spektrumda yaydığı radyasyondan türetilen kinetik sıcaklıktır. Hava sıcaklığından farklı olarak, yüzey malzemesi, bitki yüzeyi, albedo, nem ve gölgeleme gibi faktörlere duyarlı olup kentsel mikroklim analizlerinde önemli bir gösterge olarak kullanılmaktadır [33]. Sınır termal konforun belirlendiği Temmuz ve Ocak aylarına ait Landsat 8-Band 10 günlük görüntü verileri temin edilmiştir. ArcGIS 10.5 yazılım aracı kullanılarak Şekil 10 ve Şekil 11 haritalar hazırlanmıştır. Haritalarda insan ölçeğinde yakın çevre termal konfor değerlendirilmesi yapılabilmesi için mimari yapılar eklenmiştir. PET sonuçları ile yüzey sıcaklığı haritalarının aylık bazda karşılaştırılabilirliğini artırmak amacıyla, tüm haritalarda ortak bir lejant kullanılmıştır. LST Ocak ayı haritası sıcaklık aralığı -0.2 °C ile -7.3 °C arası; LST Temmuz ayı haritası sıcaklık aralığı

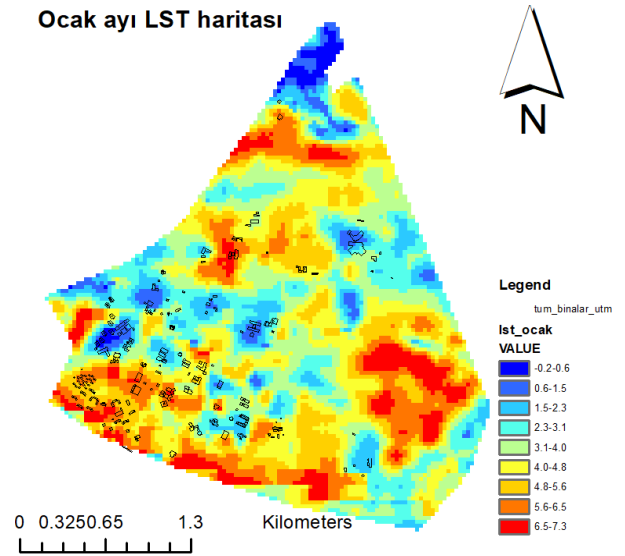
ise 10.4 °C ile 18.1 °C arasındadır. Haritalarda, PET sınıflandırmasına uygun olması açısından 9 sınıflandırma düzenlenmiştir ve Temmuz ayı için her renk değişimi aralığı yaklaşık 0.86 °C'ye, Ocak ayı için her renk değişimi aralığı yaklaşık 0.83 °C'ye denk gelmektedir. Kış koşullarında yeryüzü yüzey sıcaklığının görece yüksek değerler göstermesi, kampüsün güney yönelimli olması ve doğrudan güneş ışınımına maruz kalması ile açıklanabilir. Ancak Temmuz ayına ait LST haritasında kampüs içerisindeki yüzey sıcaklıklarının görece düşük değerler göstermesi, çalışma alanının Van Gölü kıyısında ve açık rüzgâr akışına sahip bir konumda bulunması ile açıklanabilir. Göl-kara meltemi etkisi gündüz saatlerinde yüzey sıcaklıklarını düşürücü bir mekanizma oluşturabilir, ayrıca kampüs alanındaki yoğun bitki örtüsü ve sulanan yeşil alanlar evapotranspirasyon yoluyla yüzey ısınmasını sınırlandırabilir. 30 m mekânsal çözünürlüklü Landsat piksel yapısı da bina, gölge ve bitki örtüsünü aynı piksel içinde temsil edebildiğinden, bina alanlarının düşük LST değerleri göstermesi yüzey ortalamasının bir sonucu olarak değerlendirilebilir. Bu durum kampüs alanının çevresel ölçekte bir “park cool island” etkisi sergilediği düşünülebilir. Park ve kampüs gibi yoğun bitki örtüsüne sahip yeşil alanların, çevrelerindeki yoğun yapılaşmış kentsel alanlara kıyasla daha düşük yüzey ve hava sıcaklıkları göstermesi “park cool island (PCI)” etkisi olarak tanımlanmakta olup, bu etki özellikle yaz aylarında gölgeleme, evapotranspirasyon ve sulanan yeşil alanların varlığı nedeniyle daha belirgin hâle gelmektedir [34].

Çizelge 5. Van YYU alanı için renk kodlu PET sınıflandırması

	Aralık	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım
Van YYU	5	1.3	2	9.2	17.2	22.5	32.8	37.8	40.7	33.4	22	12.5



Şekil 10. Van YYU kampüsü Temmuz ayı anlık yüzey sıcaklık haritası



Şekil 11. Van YYU kampüsü Ocak ayı anlık yüzey sıcaklık haritası

Bu çalışmada PET değerleri meteoroloji istasyonundan elde edilen aylık ortalama veriler kullanılarak hesaplanırken, yüzey sıcaklığı (LST) verileri Landsat uydu görüntüsünün alındığı tek bir zamana ait anlık yüzey koşullarını temsil etmektedir. Bu nedenle PET ve LST haritaları

arasındaki karşılaştırma doğrudan zamansal eşleşme değil, mekânsal termal örüntülerin karşılaştırılması olarak değerlendirilmelidir. LST verisi kampüs içerisindeki binalar ve yapı çevre içinde göreceli yüzey ısıtma farklılıklarını ortaya koyarak mikro ölçekte termal dağılımın yorumlanmasına katkı sağlamaktadır.

4. SONUÇLAR

LST haritasına PET eşik değerlerinin doğrudan uygulanması, bazı alanların termal konfor açısından gerçekte olduğundan daha soğuk ve konforsuz olarak yorumlanmasına neden olabilmektedir. Bu durum, LST'nin insan biyoklimatik konforunu doğrudan temsil eden bir parametre olmamasından kaynaklanmaktadır. Nitekim LST, yüzeylerin anlık termal durumunu yansıtırken; PET, hava sıcaklığı, bağıl nem, rüzgâr hızı ve radyasyon bileşenlerini birlikte değerlendiren bütüncül bir termal konfor göstergesidir. Bu nedenle çalışmada LST verisi, PET değerlerinin birebir karşılığı olarak değil, kampüs içerisindeki göreceli yüzey ısıtma örüntülerini ve mekânsal termal farklılıkları ortaya koyan destekleyici bir gösterge olarak değerlendirilmiştir.

Çalışmada aylık PET değerleri ile LST günlük haritaları değerlendirmesi bir sınırlılıktır. PET değerlerinin günlük olarak hesaplanması ve LST haritalarının ilgili aynı ay için günlük olarak daha çok üretilerek karşılaştırmanın yapılması gelecek çalışmalar için önerilebilir. Ayrıca insan ölçeğinde termal konforu değerlendirmek için sadece bina değil mevcut ağaç dokusunun da harita üzerine işlenerek yapı ve doğal çevre unsurlarının etkisi daha net ortaya koyulabilir.

Sonuç olarak çalışmadaki LST ve PET ilişkisi, aynı zaman dilimi ve aynı mekânsal referans baz alınarak yapılmaya çalışılmıştır. İstasyon verilerine göre aylık ortalama meteorolojik koşullar esas alınırken, Landsat görüntülerinde aylık bulutluluk oranı en az olan-en temiz görüntü esas alınmıştır. Bu çalışmada Van YYÜ alanında bulunan tek istasyon verisine göre analiz yapmak bir sınırlılıktır. Sonraki çalışmalarda daha fazla istasyon verisi ile çalışıp istasyonlar arasındaki PET dağılımı yapılarak (ArcGIS'e aktarılıp IDW, Kriging ya da başka uygun bir enterpolasyonla sürekli yüzeye dönüştürülerek) doğrudan noktasal PET dağılım haritaları çıkarılması planlanmaktadır.

Ayrıca PET hesaplaması sonucuna göre en konforlu ayların Ekim ve Mayıs ayları olduğu, LST haritaları üzerinde en konforlu alanların doğal çevre topografyanın olduğu yerler olduğu görülmüştür. Haritalarda konforlu diye değerlendirilen çevrelerin yapı çevrelerin hemen yakınında yer alması dikkati çekmiştir. Bu durumun yapı çevrelerdeki bina ve ağaç gibi dokuların rüzgarın yönünü etkin bir şekilde pozitif basınç çevirmesinden ve yapı çevre unsurlarının etrafından dağılmasından kaynaklı olduğu değerlendirilmektedir. **Şekil 6**'da binaların DEM yüksekliği olarak haritalandırılması ile topografyanın doğal ve yapı çevre dokusu ile birlikte rüzgar yönlerini etkileyebileceği öngörülebilir. DEM haritalarına yapı çevre dokusunun işlenmesi ile LST haritaları ile örtüştüğü görülmektedir. Bu sebeple gelecek çalışmalar için bina, yoğun ağaç dokusu ve otopark gibi büyük ve açık alanlı sert zemin yüzeylerin etrafında yerinde ölçümler yapılarak çalışma geliştirilebilir. Bu bağlamda yeni yapılacak olan bina ve ağaçlandırma alanlarının seçiminde sadece arazi analizi değil, arazi+yapı çevre analizini kapsayan mevcut binaların ve yetişkin ağaç gruplarının termal etkilerinin analizleri yapılarak belirlenmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

TEŞEKKÜR ve YAZAR KATKILARI

Bu çalışmada istasyon verilerini temin eden Meteoroloji 14.Bölge Müdürlüğüne, Van YYU kampüs yerleşkesi doğal ve yapılı çevre DEM haritalarının hazırlanmasında yardımcı olan Harita Yüksek Mühendisi Emre GÜRAY'a içtenlikle teşekkür ederiz.

1.yazar: iklim verilerini Rayman Modelinde analiz etmek, ArcGIS 10.5 yazılımında LST haritalarını oluşturmak, makaleyi yazmak. 2.yazar: iklim verilerinin temin edilmesi, haritalandırma için verilerin temin edilmesi, verilerin düzenlenmesi, makaleyi gözden geçirmek.

KAYNAKLAR

1. Hebbert, M. (2018). The campus and the city: A design revolution explained. *Journal of Urban Design*, 23(6), 883–897.
2. Fadeeva, M. (2011). Kampus. *Proekt Rossiya*, 61, 1–91.
3. Goloshubin, V., & Pavlova, V. (2022). Campus: University or a modern urban structure? *Civil Engineering and Architecture*, 10(3), 913–922. <https://doi.org/10.13189/cea.2022.100313>
4. Dober, R. P. (2000). *Campus landscape: Functions, forms, features*. John Wiley & Sons.
5. Ar-Rifai, T. D. E. D. (1983). *The new university environment: A 20th century urban ideal (Europe, America)*. University of Pennsylvania.
6. Al-Saaidy, H. J. E. (2020). Urban morphological studies (Concepts, techniques, and methods). *Journal of Engineering*, 26(8), 100–111. <https://doi.org/10.31026/j.eng.2020.08.08>
7. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2023). *ANSI/ASHRAE Standard 55-2023: Thermal environmental conditions for human occupancy*. ASHRAE.
8. Höppe, P. (1999). The physiological equivalent temperature—A universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology*, 43(2), 71–75. <https://doi.org/10.1007/s004840050118>
9. Matzarakis, A. (2001). *Die thermische Komponente des Stadtklimas* (Berichte des Meteorologischen Instituts der Universität Freiburg No. 6). Universität Freiburg.
10. Matzarakis, A., & Rutz, F. (2006). RayMan: A tool for research and education in applied climatology. In *Proceedings of the 8th Conference on Meteorology, Climatology and Atmospheric Physics*.
11. Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi. (2024). *UI GreenMetric ranking raporu*. Erişim tarihi 1 Ocak 2026, https://www.yyu.edu.tr/images/files/rapor_%2B_kanit_dosyasi.pdf
12. OpenStreetMap. (2026). *OpenStreetMap* [Harita]. Erişim tarihi 15 Şubat 2026, <https://www.openstreetmap.org>
13. Türk Standartları Enstitüsü. (2024). *TS 825: Binalarda ısı yalıtım kuralları*. Türk Standartları Enstitüsü.
14. Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (2023). *Köppen iklim sınıflandırmasına göre Türkiye iklimi*. Erişim tarihi 1 Ocak 2026, https://www.mgm.gov.tr/files/iklim/iklim_siniflandirmalari/koppen.pdf

15. Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (2024). *Resmî iklim istatistikleri*. Erişim tarihi 1 Ocak 2026, <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=A&m=VAN>
16. Wikimapia. (2019). *Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Zeve Yerleşkesi Kampüsü* [Fotoğraf]. Erişim tarihi 1 Ocak 2026, <https://wikimapia.org/8518174/tr/Van-Y%C3%BCz%C3%BCnc%C3%BC-Y%C4%B1l-%C3%9Cniversitesi-Zeve-Yerle%C5%9Fkesi-Kamp%C3%BCs%C3%BC#/photo/7425521>
17. Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi. (2026). *2026–2030 stratejik planı*. <https://yyu.edu.tr/img/strateji/2026-2030StratejikPlani.pdf>
18. Doğu Anadolu Kalkınma Ajansı. (2024). *Van ili sosyoekonomik analiz raporu*. <https://www.daka.org.tr/panel/files/files/yayinlar/van-sosyoekonomik-analiz-raporu.pdf>
19. Türkiye İstatistik Kurumu. (2024). *Bölgesel istatistikler*. Erişim tarihi 11 Temmuz 2024, <https://biruni.tuik.gov.tr/bolgeselistatistik/anaSayfa.do?dil=tr>
20. Topographic-map.com. (n.d.). *The world: Topographic map* [Interactive map]. Erişim tarihi 15 Şubat 2026, <https://en-gb.topographic-map.com/map-4d9jnh/The-World/>
21. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2025). *Van ili 2024 yılı çevre durum raporu*. <https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/van-2024-yili-cdr-2-20250807144409.pdf>
22. Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (1977). *Van iklimi* (E.A. 86). Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü. Erişim tarihi 15 Şubat 2026, <https://www.mgm.gov.tr/FILES/genel/kitaplar/vaniklimi.pdf>
23. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2023). *ANSI/ASHRAE Standard 55-2023: Thermal environmental conditions for human occupancy*. ASHRAE.
24. Matzarakis, A. (2025). RayMan and thermal bioclimate: History, development and applications. In *Proceedings of the 12th International Conference on Urban Climate*. <https://doi.org/10.5194/icuc12-43>
25. VDI. (1994). *VDI 3789 Part II: Environmental meteorology—Interactions between atmosphere and surfaces; calculation of short- and long-wave radiation*. VDI Verlag.
26. VDI. (1998). *VDI 3787 Part I: Climate methods for the human biometeorological assessment of climate and air hygiene for urban and regional planning*. VDI Verlag.
27. Yılmaz, M., Kara, Y., Toros, H., & Incecik, S. (2024). Analysis of the summer thermal comfort indices in İstanbul. *International Journal of Biometeorology*, 68, 1327–1342. <https://doi.org/10.1007/s00484-024-02669-7>
28. Jing, W., Qin, Z., Mu, T., Ge, Z., & Dong, Y. (2024). Evaluating thermal comfort indices for outdoor spaces on a university campus. *Scientific Reports*, 14, 21253. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71805-5>
29. Mendes, P. T., Nouri, A. S., & Matzarakis, A. (2025). Evaluating outdoor human thermal comfort through climate-resilient adaptation: A case study at School of Science and Technology (NOVA FCT) campus. *Atmosphere*, 16(6), 677. <https://doi.org/10.3390/atmos16060677>
30. Aghababaeian, H., Sharafkhani, R., Mazaheri, M., Gharaee, M., Nouri, M., & Hamidipour, N. (2025). Physiological equivalent temperature and hospitalized due to respiratory and cardiovascular diseases in Dezful, Iran. *Heliyon*, 11(4), e42763. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42763>
31. Matzarakis, A., Mayer, H., & Iziomon, M. G. (1999). Applications of a universal thermal index: Physiological equivalent temperature. *International Journal of Biometeorology*, 43(2), 76–84.
32. Yuca, N., Alp, Ş., & Irmak, M. A. (2025). Kentsel ve kırsal yerleşim alanlarında rüzgâr koridorlarının termal konfora etkisi. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 62(4), 493–509. <https://doi.org/10.20289/zfdergi.1677528>

33. Tan, K. C., Lim, H. S., & Mat Jafri, M. Z. (2013). *Land cover changes and their relationship with land surface temperature using remote sensing technique*. Penerbit Universiti Sains Malaysia.
34. Spronken-Smith, R. A., & Oke, T. R. (1998). The thermal regime of urban parks in two cities with different summer climates. *International Journal of Remote Sensing*, 19(11), 2085–2104. <https://doi.org/10.1080/014311698214884>

ÇOK İŞLEVİLİ ESNEK OFİS KURGULARINDA AYDINLATMA TASARIMI: BIM TABANLI PERFORMANS ODAKLI YAKLAŞIM

Sevda Şeko^{1*}

Feride Şener Yılmaz²

¹ İTÜ, Lisansüstü Enstitüsü, Çevre Kontrolü ve Yapı Teknolojisi Yüksek Lisans Programı

² İTÜ, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü

Taşkışla, Şişli, İstanbul, 34367

ÖZET

Değişen çalışma kültürü, ofis mekânlarını esnek ve çok amaçlı yapılara dönüştürmektedir. Aydınlatma tasarımlarının kullanıcı ihtiyaçlarına uyumu ve sürdürülebilirliğinin yanı sıra, Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) süreçlerine entegrasyonu da üzerine düşünülmesi gereken güncel bir konu olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışma, sürdürülebilir ve adaptif aydınlatma çözümleri geliştirilmesi amacıyla BIM odaklı bir yaklaşım önerisi sunmayı hedeflemektedir.

Araştırma kapsamında, 35 m²'lik örnek bir ofis alanındaki farklı kullanım senaryoları üzerinden aydınlatma gereksinimleri irdelenmiştir. DIALux Pro ve BIM tabanlı Revit + ElumTools yazılımları ile gerçekleştirilen simülasyonlar, TS EN 12464-1 standartları çerçevesinde görsel konfor ve raporlama açısından karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, esnek aydınlatma stratejilerinin ve dijital entegrasyonun hem proje süreçleri hem de kullanıcı konforu açısından geleceğin tasarım anlayışına katkı sağlayabileceğine işaret etmektedir.

Anahtar kelimeler: Sürdürülebilir Aydınlatma, Esnek Ofis Mekanları, Görsel Konfor, Aydınlatma Simülasyonu, BIM, Dijitalleşme, DIALux Pro, Revit + ElumTools

LIGHTING DESIGN IN MULTI-FUNCTIONAL FLEXIBLE OFFICE CONFIGURATIONS: A BIM-BASED PERFORMANCE-ORIENTED APPROACH

ABSTRACT

Changing work culture is transforming office spaces into flexible and multi-purpose structures. In addition to user compatibility and sustainability, the integration of lighting designs into Building Information Modeling (BIM) processes emerges as a current topic requiring consideration. This study aims to propose a BIM-oriented approach for developing sustainable and adaptive lighting solutions. Within the scope of the research, lighting requirements were examined through various usage scenarios in a 35 m² sample office space. Simulations performed with DIALux Pro and BIM-based Revit + ElumTools software were comparatively analyzed regarding visual comfort and reporting, within the framework of TS EN 12464-1 standards. The findings suggest that flexible lighting strategies and digital integration may contribute to future design paradigms in terms of both project processes and user comfort.

Keywords: Sustainable Lighting, Flexible Office Spaces, Visual Comfort, Lighting Simulation, BIM, Digitalization, DIALux Pro, Revit + ElumTools

^{1*}Sorumlu yazar e-posta adresi: sekos@itu.edu.tr

1. GİRİŞ

Ofis mekanlarının ilk örnekleri hız ve verimliliği esas alan büyük hacimli çalışma alanlarından oluşurken zaman içinde bireysel çalışma mekanlarına doğru evrilmiştir, bununla beraber bağımsız ofis binaları kentlerin belli alanlarında yoğunlaşarak iş merkezlerini oluşturmaya başlamıştır.

Günümüzde ise çalışma kültürü ve ekip yapıları köklü bir dönüşüm geçirmekte; geleneksel, sabit ofis düzenlerinde fiziksel olarak bir araya gelen ekiplerin yerini, farklı lokasyonlardan çevrimiçi platformlar aracılığıyla çalışan esnek yapılar almaktadır. Bu dönüşüm, ofis mekanlarının tasarımını da doğrudan etkilemekte; bu durum çalışma alanlarının daha esnek, çok amaçlı ve dönüştürülebilir biçimde planlanması ihtiyacını arttırmaktadır. Kullanıcıların mekân içindeki hareketliliği, değişken konumları ve farklı bakış doğrultuları, mimari aydınlatma tasarımında da esnek çözümler geliştirilmesini gerekli kılmakta; görsel konforun bütüncül bir yaklaşımla ele alınmasını ve kamaşma kontrolünün etkin biçimde sağlanmasını zorunlu hale getirmektedir [1].

İnşaat sektörünün dijitalleşmesi, küresel ölçekte giderek önem kazanan bir araştırma ve uygulama alanı haline gelmiştir. Bu bağlamda, BIM (*Yapı Bilgi Modellemesi - Building Information Modeling*), tüm proje paydaşlarının dijital bir platformda entegre biçimde iş birliği yapmasına olanak tanıyan bir sistem olarak öne çıkmaktadır [2]. Bu sistemde yapı yalnızca 3 boyutlu bir model olarak temsil edilmez aksine fiziksel ve işlevsel özelliklerinin tümü dijital olarak temsil edilir ve yapının yaşam döngüsü boyunca verilecek kararlara güvenilir bir temel oluşturulur [3].

Aydınlatma tasarımı, mimari tasarımın tamamlayıcısı niteliğinde olan ve uzmanlık gerektiren bir alt disiplindir. Dolayısıyla inşaat sektöründeki dijital dönüşüm sürecinin, aydınlatma tasarım süreçlerini de kapsamı beklenmektedir. Bu bağlamda, geleneksel aydınlatma tasarım süreçlerinin BIM sistemleriyle entegrasyonuna ilişkin mevcut durumun, potansiyelin, avantajların ve dezavantajların araştırılması önemli bir ihtiyaç olarak ortaya çıkmaktadır.

Çalışmada, aydınlatma tasarım sürecinde geleneksel olarak yaygın şekilde kullanılan DIALux Pro yazılımı ve BIM tabanlı tasarım sürecine entegre biçimde çalışan Revit + ElumTools yazılımları kullanılarak esnek bir ofis kurgusunda aydınlatma senaryoları incelenmiştir. Bu incelemede Türkiye'deki aydınlatma tasarımcılarının ve aydınlatma ürünü üreticilerinin BIM sistemleriyle olan ilişkisini analiz edebilmek BIM farkındalığını, BIM'e geçiş motivasyonlarını, BIM kullanımının aydınlatma tasarım süreçlerine getirdiği avantaj ve dezavantajları ortaya koyabilmek için aydınlatma tasarımında Türkiye'deki aydınlatma üreticilerinin fotometrik veri kütüphaneleri ve Türkiye'deki aydınlatma tasarımcılarının yaygın olarak kullandığı aydınlatma tasarımı yazılımları kullanılmıştır.

2. METODOLOJİ

Bu çalışma, belirlenen metodoloji çerçevesinde üç temel aşamada yürütülmüştür. Birinci aşamada; seçilen ofis mekanının iki boyutlu (2B) .dwg altlıkları referans alınarak DIALux Pro 13.2 yazılımında üç boyutlu (3B) modeli oluşturulmuş ve malzeme atamaları tamamlanmıştır [4]. Aydınlatma tasarımı konsept kararları doğrultusunda, Türkiye'de üretim ve satış faaliyetinde bulunan firmaların web tabanlı kütüphanelerinden temin edilen fotometrik veri dosyaları (.ies / .ldt) kullanılarak armatür yerleşimi yapılmıştır. Bu yerleşim planına istinaden aydınlatma

simülasyonları gerçekleştirilmiş; hesaplama ve raporlama süreçlerinde güncel TS EN 12464-1:2021 standardı kriterleri esas alınmıştır [5].

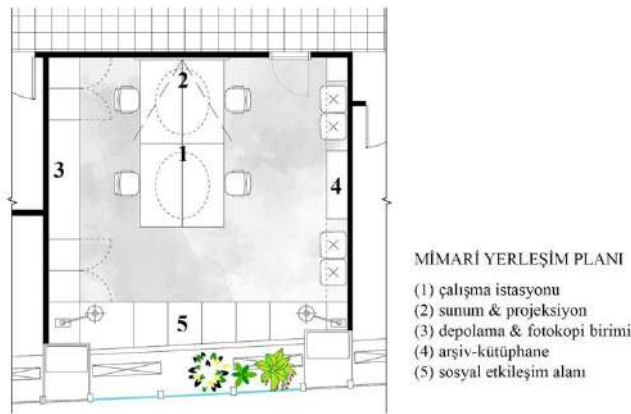
Çalışmanın ikinci aşamasında, aynı ofis mekanı Autodesk Revit 2022 yazılımında üç boyutlu modellenerek, iç mekanda kullanılan ilgili malzeme bilgileri tanımlanmıştır. Yerel üreticilerin aydınlatma ürünlerine ait özelleşmiş Revit familya (family) dosyalarının bulunmaması nedeniyle, üretici web sitelerinden alınan .ies/.ldt uzantılı fotometrik veriler, Revit yazılımı içerisindeki temsili modellere entegre edilmiştir. Aydınlatma tasarımına ilişkin gerçekleştirilen analizler, bu aşamada ElumTools (Revit 2022) eklentisi aracılığıyla gerçekleştirilmiş olup; eklentinin hesaplama altyapısı gereği elde edilen sonuçlar, TS EN 12464-1:2011 standardı uyarınca raporlanmıştır [6-8].

Çalışmanın üçüncü aşamasında ise DIALux Pro ve Revit modellerinin IFC formatı aracılığıyla dışa ve içe aktarımı sağlanarak, yazılımlar arası birlikte çalışabilirlik (Interoperability) süreçleri test edilmiştir. Bu kapsamda Revit ortamında oluşturulan üç boyutlu model, hem armatür yerleşimi yapılmış haliyle hem de yalın (armatürsüz) haliyle IFC formatında dışa aktarılmıştır. DIALux Pro yazılımına IFC formatında aktarılan model üzerinde armatür yerleşimi ve hesaplamalar yapıldıktan sonra, elde edilen veriler tekrar IFC formatında dışa aktarılacak süreç tamamlanmıştır.

2.1. Ofis Mekanı

Çalışma kapsamında, İstanbul'da yer alan, 7 kişilik bir ekibin kullanımına ayrılmış 35 m² büyüklüğünde bir ofis mekanı seçilmiştir. Mekan, 4 kişilik çekirdek kadronun sürekli kullanımına, diğer 3 personelin ise esnek katılım sağladığı faaliyetlere uygun şekilde kurgulanmıştır. Ekip, ofisi bireysel çalışma, formal ve informal toplantılar, dinlenme, sosyalleşme, belge arşivleme ve misafir ağırlama gibi farklı etkinlikler için kullanılmaktadırlar. Ofis 7 gün 24 saat açık olup çalışma sistemleri bazen uzaktan bazen yüz yüze olabilen bir hibrit çalışma sistemidir.

Ofis alanında, merkezde bir çalışma istasyonu, çalışma istasyonu ile sunum alanını çevreleyen, depolama-fotokopi birimi, arşiv-kütüphane ve sosyal etkileşim (oturma-dinlenme misafir ağırlama) bölümleri mevcuttur (Şekil 1).



Şekil 1. Seçilen ofis mekanı, mimari yerleşim planı

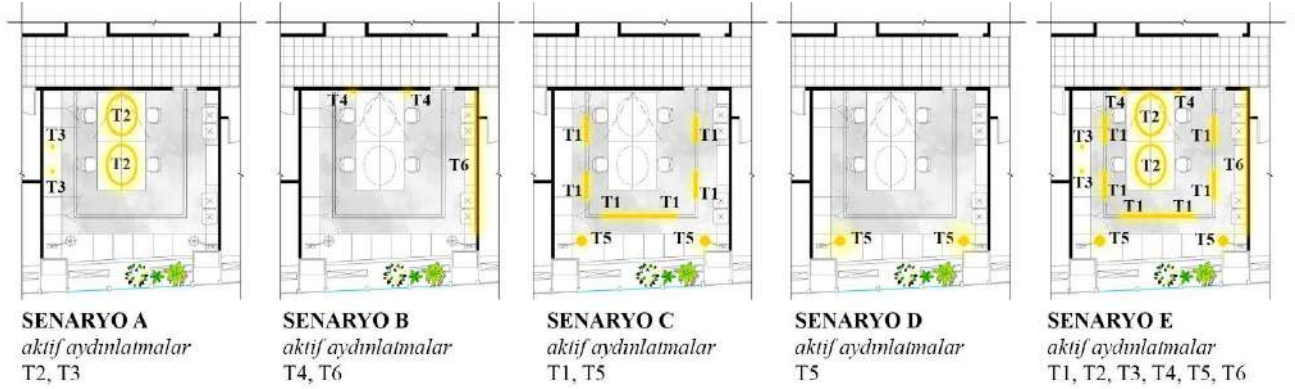
Tavan, duvar, döşeme ve sabit mobilyalarda kullanılan malzemeler ve ışık yansıtıcılık değerleri Çizelge 1'de verilmiştir (Çizelge 1).

Çizelge 1. Seçilen malzemeler ve ışık yansıtıcılık değerleri

Mahal	Malzeme	Yansıtıcılık
Duvar	Beyaz & Yeşil & Gri Boya	%86 -%32-%35
Tavan	Beyaz Boya	%86
Döşeme	Açık Gri Halı	%20
Sabit Mobilya 1-kütüphane	Ahşap	%6
Sabit mobilya 2-depolama & arşiv	Ahşap & Beyaz Boya	%6-%86
Sabit mobilya 3-Projeksiyon duvarı	Ahşap	%6

2.2. Aydınlatma senaryoları

Ofis alanının farklı kullanım ihtiyaçlarına göre entegre edilmiş aydınlatma senaryoları oluşturulmuştur. Buna göre Senaryo A, 4 kişilik çekirdek ekibin ofisi kullanım durumunu temsil etmekte olup bu senaryoda masa üstü odak aydınlatması ve fotokopi alanı aydınlatması aktif durumdadır. Senaryo B’de 7 kişilik ekibin toplantı için bir araya gelmiş olması durumu ele alınmakta olup projeksiyon alanında vurgu aydınlatması ve kütüphane alanında vurgu aydınlatmasına destek olacak dekoratif aydınlatmaların aktif olduğu durum temsil edilmektedir. Senaryo C’de ofiste aktif bir çalışmanın gerçekleştirilmediği durum göz önünde bulundurularak, misafir ağırlama veya sosyal aktivitelerin yapıldığı genel aydınlatma aktiftir. Senaryo D’de akşam saatlerindeki koşulları temsilen çalışma odaklı olmayan ve sadece dinlenme amaçlı kullanım için kullanılan dekoratif aydınlatmalar aktif olması ele alınmıştır. Senaryo E’de ise tüm aydınlatma sisteminin aktif olması durumu esas alınmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. Aydınlatma armatür yerleşimi ve senaryolar

Çalışma kapsamında gerekli aydınlatma konsepti oluşturulduktan sonra aydınlatma ürün tipleri seçilmiş ve bu tiplere uygun ürünler Türkiye’de üretimi ve satışı mevcut olan aydınlatma üreticilerinin web sitelerindeki .ies (Illuminating Engineering Society), .ldt (lichtstärkeverteilungskurve) ve .rfa (revit family file) dosya formatlarında fotometrik veri kütüphanelerinde taranmıştır. Toplamda 209 üreticinin web kütüphaneleri taranmış, 24 firmanın web sitelerinde bu verileri paylaşımına açtığı görülmüştür. Bu taramada erişilen sonuçlara göre sadece .ies veya .ldt formatında fotometrik veriyi web kütüphanesinde erişime açan 22 firma, hem .ies veya .ldt formatında hem de .rfa formatında fotometrik veriyi erişimi açan ise 2 firma

mevcuttur. Seçilen armatürler ve armatürlerin teknik özellikleri ve erişilen fotometrik dosya formatı Çizelge 2’de özetlenmiştir.

Çizelge 2. Seçilen aydınlatma ürünleri ve özellikleri

AYDINLATMA TİPİ	ŞEMATİK GÖRSEL	TEKNİK ÖZELLİKLER	AKTİF OLDUĞU SENARYO
TİP1(T1)-genel aydınlatma Sıva altı lineer aydınlatma		Adet:6 Işık Akısı: 3619 lm Renk Sıcaklığı:3500K Lamba Türü:LED	SENARYO C SENARYO E
TİP2(T2) -çalışma istasyonu Sarkıt aydınlatma		Adet:2 Işık Akısı:4742 lm Renk Sıcaklığı:4000K Lamba Türü:LED	SENARYO A SENARYO E
TİP3(T3)- fotokopi alanı Sıva altı spot aydınlatma		Adet:2 Işık Akısı:898 lm Renk Sıcaklığı:4000K Lamba Türü:LED	SENARYO A SENARYO E
TİP4(T4)-projeksiyon art alan Dekoratif aydınlatma		Adet:2x260cm Işık Akısı:147 lm Renk Sıcaklığı:4000K Lamba Türü:LED	SENARYO B SENARYO E
TİP5(T5)-sosyal etkileşim alanı Lambader		Adet:2 Işık Akısı:1709 lm Renk Sıcaklığı:3500K Lamba Türü:LED	SENARYO C SENARYO D SENARYO E
TİP6(T6)-kütüphane Dekoratif aydınlatma		Adet:5x450cm Işık Akısı:378 lm Renk Sıcaklığı:3500K Lamba Türü:LED	SENARYO B SENARYO E

3. DIALUX PRO VE REVİT YAZILIMLARI ARACILIĞIYLA AYDINLATMA TASARIMI

Aydınlatma tasarım süreci; planlama ve şematik tasarım aşamaları ile başlayıp, tasarım geliştirme, dokümantasyon ve uygulama süreçlerinin yönetimi ile devam eden, nihayetinde kullanım aşamasıyla tamamlanan bütünlük bir döngüdür [9]. Bu çalışma kapsamında, belirlenen aydınlatma konsepti ve mekânda hedeflenen nihai atmosfer kararları sabit tutularak; DIALux Pro ve Revit (ElumTools eklentisi entegrasyonu) yazılımlarında oluşturulan iki ayrı model üzerinden tasarım süreci irdelenmiştir. Söz konusu bağımsız değerlendirmelerin ardından, yazılımlar arası veri aktarımı ve birlikte çalışabilirlik olanakları da çalışmada ayrıca ele alınmıştır.

3.1. DIALux Pro Yazılımı ile Aydınlatma Tasarımı

Çalışmanın bu aşamasında, aydınlatma tasarım sürecinin, tasarımcıya iletilen iki boyutlu (2B) CAD çizimleri ve üç boyutlu (3B) SketchUp referans görselleri üzerinden yürütüldüğü bir senaryo esas alınmıştır. Süreç, .dwg formatındaki mimari altlıkların DIALux Pro arayüzüne aktarılmasıyla başlatılmıştır. Ofis hacmi, bu altlıklar referans alınarak yazılım içerisinde yeniden modellenmiş;

konsept aşamasında belirlenen malzeme özellikleri ve yansıtma çarpanları, ilgili yüzeylere manuel olarak tanımlanmış, ardından teknik gereksinimlere ve tasarım kararlarına uygun armatürlere ilişkin fotometrik veriler, üretici veri tabanlarından temin edilerek modele entegre edilmiştir. Kurgulanan her bir tasarım senaryosu için aydınlatma simülasyonları ayrı ayrı gerçekleştirilmiş ve elde edilen hesaplama sonuçları, yazılımın standart dokümantasyon formatında raporlanmıştır.

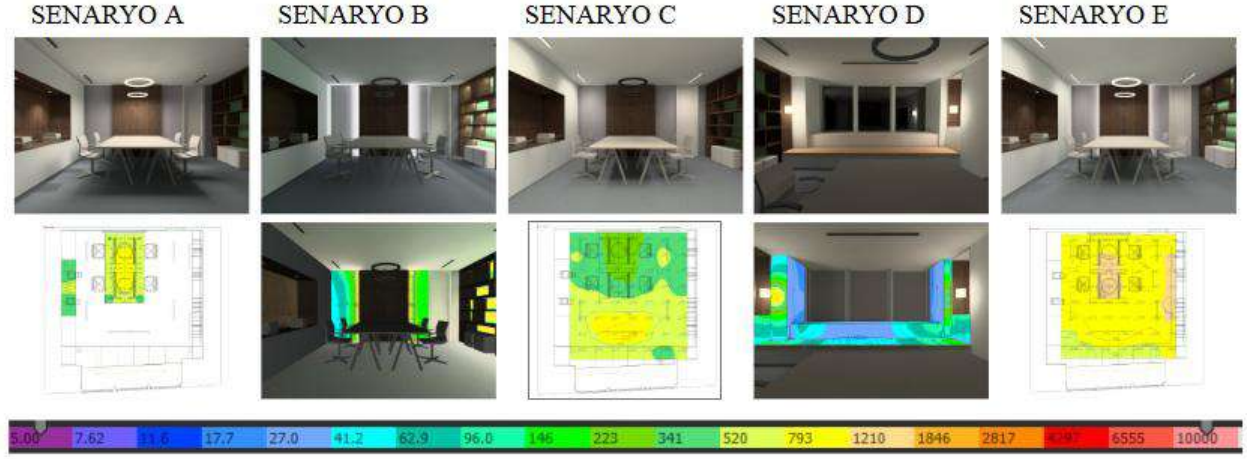
Senaryo A (Aktif Çalışma)' da görsel konfor gereksinimlerini karşılamak amacıyla; çalışma istasyonları üzerinde ortalama aydınlık düzeyi (E_m) 700 lüks, düzgünlük oranı (U_o) ise 0.68 olarak hesaplanmıştır. Fotokopi alanında ise bu değerler sırasıyla 464 lüks (E_m) ve 0.76 (U_o) olarak gerçekleşmiştir. Armatür montaj yükseklikleri; çalışma masaları üzerindeki sarkıt elemanlar için döşemeden 210 cm, fotokopi alanındaki sabit mobilyalara entegre ankastre elemanlar için ise 208 cm olarak belirlenmiştir. Aktif çalışma senaryosunda kullanıcı konsantrasyonunu ve odaklanmayı desteklemek amacıyla, her iki armatür grubunda da 4000 K renk sıcaklığı (CCT) tercih edilmiştir. Çalışma istasyonlarında konumlandırılan aydınlatma armatürleri; farklı senaryo kurgularına adaptasyon sağlayabilmesi, gün ışığına duyarlı otomasyon sistemleri ile entegre çalışabilmesi ve kullanıcıların sirkadiyen ritmini desteklemesi amacıyla, DALI (Digital Addressable Lighting Interface) kontrol protokolüne sahip ve 'Tunable White' (Dinamik Beyaz) teknolojisini barındıran ürünlerden seçilmiştir.

Senaryo B (Toplantı) 'de, sunum izleme eylemi sırasında görsel konfor koşullarının optimize edilmesi hedeflenmiştir. Ekran kontrastını desteklemek amacıyla konumlandırılan gizli aydınlatma stratejisi ile 4000 K renk sıcaklığında (CCT) bir aydınlatma sağlanmıştır. İlgili düşey yüzeyde ortalama aydınlık düzeyi (E_m) 269 lüks, parıltı düzeyi ise 29.7 cd/m² olarak hesaplanmıştır. Mekân genelinde sunum işlevini destekleyen düşük seviyeli bir çevresel aydınlatma oluşturulması ve raflardaki dokümanların görünürlüğünün korunması adına, kütüphane ünitesindeki vurgu aydınlatmaları sisteme dahil edilmiştir. Bu uygulama sonucunda kütüphane duvar yüzeyinde 57.3 cd/m² parıltı düzeyi elde edilmiştir.

Senaryo C (Genel Aydınlatma &Sosyalleşme)'de, yüksek görsel dikkat gerektirmeyen, ekip içi iletişim, misafir ağırlama ve sosyal etkileşime dayalı eylemler için görsel konfor şartları optimize edilmiştir. Bu senaryoda, mekanın genel atmosferini yumuşatmak amacıyla tavandaki sıva altı spot (downlight) armatürler ve oturma alanındaki dekoratif aydınlatma elemanları devreye alınmıştır. Bu senaryoda aktif olan sıva altı ve dekoratif armatürlerin tümünde 3500 K (CCT) renk sıcaklığı tercih edilmiş olup; mekân genelinde 558 lüks (E_m) ortalama aydınlık düzeyi ve 0.42 (U_o) düzgünlük oranı sağlanmıştır.

Senaryo D (Dinlenme-Bireysel Kullanım); kullanıcıların çalışma stresinden uzaklaşabileceği, ev atmosferi konforunda (home-like) bir ortam yaratmak amacıyla kurgulanmıştır. Düşük aydınlık seviyeleri ve dekoratif aydınlatma elemanlarının kullanımıyla sakin bir atmosfer hedeflenmiş olup; dinlenme alanındaki ortalama aydınlık düzeyi (E_m) 40.9 lüks olarak hesaplanmıştır.

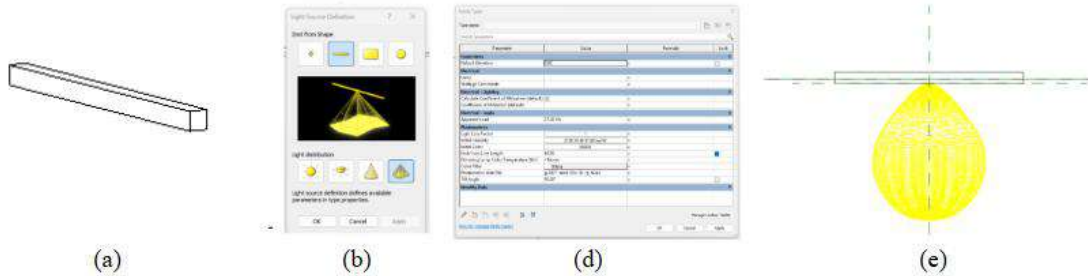
Senaryo E (Tüm aydınlatmalar aktif) spesifik bir eylemden ziyade, sistemin tam kapasite performansını ve maksimum aydınlık değerlerini denetlemek amacıyla oluşturulmuştur. Tüm armatürlerin devrede olduğu bu durumda, ortalama aydınlık düzeyi (E_m) 1024 lüks, düzgünlük oranı (U_o) ise 0.6 olarak hesaplanmıştır. Ele alınan tüm senaryolara ilişkin DIALux Pro ile gerçekleştirilen modelleme ve simülasyon görselleri Şekil 3'te özetlenmiştir.



Şekil 3. DIALux Pro yazılımı ile modelleme ve simülasyon görselleri

3.2. Revit Yazılımı + Elumtools Eklentisi ile Aydınlatma tasarımı

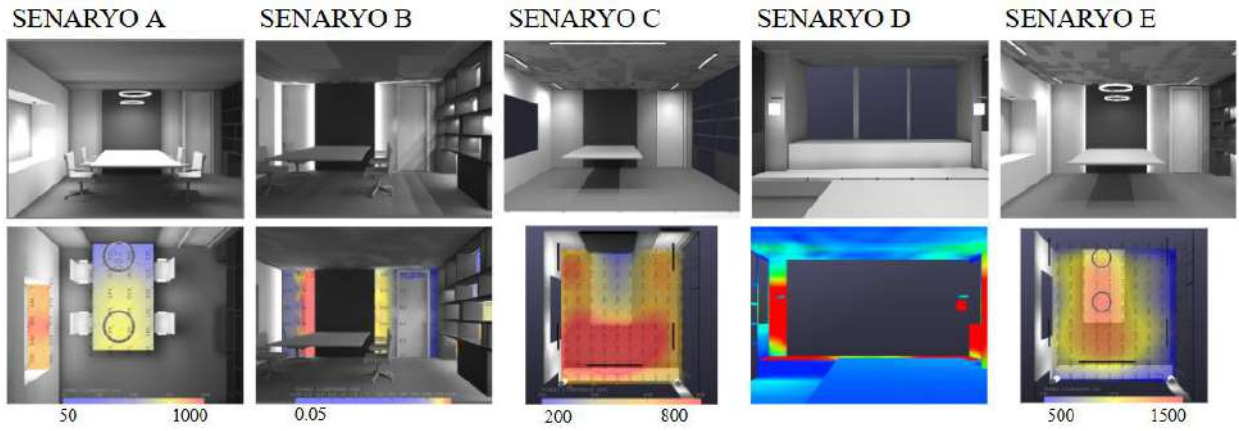
Aydınlatma tasarım sürecinin, tasarımcıya iletilen üç boyutlu (3B) model ile başladığı varsayılan bu senaryoda, aydınlatma tasarımcısı ofis hacmini ilk aşamadan itibaren (2 boyuttan 3 boyuta) modellemek durumunda kalmamış, 3 boyutlu modelde malzeme bilgilerinin tanımlı olmasından ötürü, ele alınan malzemeleri manuel şekilde yeniden atamaya ihtiyaç olmamıştır. Bu avantajlar sayesinde, kurgulanan aydınlatma senaryoları için seçilen ürünlerin üç boyutlu modele yerleştirilmesi aşamasına doğrudan geçilmiştir. Ancak web sitelerindeki fotometrik veri tabanları taranan firmaların hiçbirinde kullanılan ürünlerin .rfa uzantılı (revit family file) formatlı indilebilir kütüphanelerine erişilememiştir. Bu yüzden seçilen ürünlerin .ies ve .ldt uzantılı formatlarda fotometrik verileri derlenmiş ve bu veriler Revit programı içerisinde manuel olarak modellenen jenerik aydınlatma armatürlerine gömülmüştür (embedding). Teknik bilgiler firmaların web sitesindeki teknik dökümanlara bağlı alınarak yine manuel olarak Revit familya dosyasına eklenmiştir (Şekil 4). Bu çalışmada, armatürler LOD (level of development) 200-300 seviyesinde ele alınmıştır [10]. Üst gelişim düzeylerine (LOD, level of development) erişim daha kapsamlı bir modelleme derinliği ile mümkündür ancak bu durum aydınlatma tasarımcısının, ilgili armatürü 3B ortamında modellemek hedefiyle zaman harcamasına neden olmaktadır. Bu zamanı kaybetmemek için ilgili armatür jenerik modeller üzerinden temsil edildiğinde ise armatürlerin 3B modelleri tasarımcıya sunulamamaktadır.



Şekil 4. Armatürün temsilinin Revit yazılımda modellenmesi ve fotometrik verinin eklenmesi
(a)-şematik armatür model, (b)-fotometrik (.ies) verinin eklenmesi, (c)-teknik bilgilerin ve parametrelerin girilmesi,
(d)-fotometrik verinin eklendiği armatür familya dosyası (.rfa)

Oluşturulan senaryoların konsept kurgusu korunarak (mimari yerleşim, armatür tipi, armatür teknik verileri) Revit yazılımında Elumtools aydınlatma tasarımı eklentisi ile erişilen simülasyon sonuçları sırasıyla:

- Senaryo A’da masa yüzeyinde ortalama aydınlık düzeyi 337 lüks (Em), düzgünlük değeri 0.3 (Uo), fotokopi alanında ortalama aydınlık düzeyi 742 lüks (Em), düzgünlük değeri 0.9 (Uo);
- Senaryo B’de projeksiyon duvarında ortalama aydınlık düzeyi 311 lüks (Em), parıltı düzeyi 44 (cd/ m²), kütüphane duvarında parıltı düzeyi 71 (cd/ m²),
- Senaryo C’de ortalama aydınlık düzeyi 650 lüks (Em), düzgünlük değeri 0.4 (Uo),
- Senaryo D’de ortalama aydınlık düzeyi 46 lüks (Em),
- Senaryo E’de ortalama aydınlık düzeyi 897 lüks (Em), düzgünlük değeri 0.4 (Uo) olarak hesaplanmıştır (Şekil 5).



Şekil 5. Revit+Elumtools yazılımı ile modelleme ve simülasyon görselleri

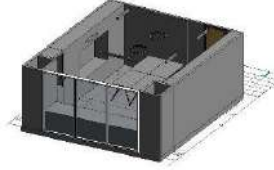
3.1. IFC model içe aktarma dışa aktarma

Birlikte çalışabilirlik bulguları çalışma kapsamında oluşturulan 3 boyutlu IFC dosya formatında kaydedilerek, yazılımlar arasında dosya paylaşımı gerçekleştirilmiştir.

Revit modelinin armatürsüz olarak IFC formatında DIALux Pro’ya aktarımında, oda tanımları ve malzeme bilgileri veri kaybı olmaksızın başarıyla işlenmiştir. Bu akış, aydınlatma tasarımcısının modelleme yükünü ortadan kaldırmakta ve doğrudan aydınlatma tasarımına başlamasına olanak sağlamaktadır.

Armatür içeren modellerin Revit’ten DIALux Pro’ya IFC4 formatında transferinde; geometrik verilerin korunduğu (Lighting Fixture), ancak fotometrik (.ies) verilerin okunamadığı görülmüştür. Armatür içeren modelin DIALux Pro’dan Revit’e standart IFC şemalarıyla transferinde ise armatür modelleri Revit içinde Aydınlatma armatürü (Lighting Fixture) olarak doğru okunduğu ancak fotometrik verinin hem Revit içinde hem de Elumtools eklentisi arayüzünde okunamadığı görülmüş ve yeniden her armatür için .ies uzantılı fotometrik verilerin yüklenmesi gerekmiştir (Çizelge 4).

Çizelge 4. Birlikte çalışabilirlik IFC formatlı model içe-dışa aktarma

<i>REVIT IFC-DIALUX PRO İÇE AKTARMA</i>	<i>DIALUX PRO IFC-REVIT İÇE AKTARMA</i>
	

4. DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR

DIALux Pro tabanlı tasarım süreçlerinde, yerel üreticilerin web tabanlı fotometrik veri (IES/LDT) kütüphanelerine erişim olanaklarının genişliği ve yazılımın güncel TS EN 12464-1:2021 standardını desteklemesi önemli avantajlar olarak öne çıkmaktadır. Sektörel aşinalığın yüksek olduğu bu yöntemde en temel kısıt, mimari modelin 2 boyutlu çizimler üzerinden 3 boyutlu olarak yeniden oluşturulması ve malzeme atamalarının manuel yapılması gerekliliğidir. Bu durum, yinelenen iş yükünü arttırmakta ve tasarım sürecinde verim kaybına yol açabilmektedir.

Buna karşın, Revit ve ElumTools entegrasyonunda mimari modelleme ve malzeme tanımlama süreçlerinin elimine edilmesi, tasarımcıya önemli ölçüde zaman kazandırmaktadır. Ancak bu yöntemin darboğazı, yerel pazarda uluslararası BIM standartlarına uygun, optimize edilmiş (dosya boyutu < 1MB) ve nitelikli parametrik veri içeren .rfa (Revit Family) dosyalarının teminindeki güçlülüdür. Mevcut üretici dosyalarındaki veri olgunluğu eksikliği, tasarımcıyı manuel familya oluşturmaya ve fotometrik verileri modele gömmeye zorlamaktadır. Buna ek olarak DIALux Pro hem .ies hem de .ldt uzantılı fotometrik dosyaları okuyabilirken, Revit+Elumtools eklentisi yalnızca .ies dosyalarını okumaktadır. Bu da aydınlatma üreticileri tarafından sağlanan .ldt uzantılı fotometrik dosyaların .eis uzantılı formata çevrilebilmesi için ek dönüştürme yazılımı kullanmayı gerektirmektedir. Ayrıca ElumTools eklentisinin raporlamada bir önceki standart olan TS EN 12464-1:2011 sürümünü baz alması, güncel gerekliliklerin sağlanması adına sürecin manuel kontrollerle ilerletilmesini zorunlu kılmaktadır.

IFC4 formatı üzerinden yapılan veri aktarım testlerinde; Revit mimari modelinin (duvar, oda, malzeme) DIALux Pro ortamına kayıpsız aktarılabilirdiği ve modelleme sürecini hızlandırdığı görülmüştür. Ancak, armatür içeren modellerin Revit'ten DIALux Pro'ya transferinde geometrik veriler korunurken, fotometrik verilerin okunamadığı; DIALux Pro'dan Revit'e transferinde ise armatür dosyalarının aydınlatma familyası olarak doğru okunduğu ancak fotometrik verinin kaybolduğu tespit edilmiştir. Buna rağmen armatürün teknik verileri doğru olarak Revit modele aktarılabilmiş ve armatürler Revit yazılımı içinde doğru şekilde listelenebilmiştir. Mevcut veri kaybı sorunu, farklı metodolojilerle yeniden ele alınmaya açıktır. Çalışma kapsamında, IFC veri transferi standart ayarlar ile test edilmiştir. Bu bağlamda, harici eklenti ve ara yazılımların

kullanımıyla, birlikte çalışabilirlik performansının geliştirilme potansiyeli, geleceğe yönelik bir araştırma alanı olarak tanımlanmıştır.

Sonuç olarak aydınlatma tasarımı; konsept geliştirilmesi aşamasından bina işletme aşamasına kadar mimari sürecin ayrılmaz bir parçasıdır. İnşaat sektöründeki dijitalleşme hedefleri, yalnızca tasarımcıların BIM süreçlerine entegrasyonu ile değil; aydınlatma armatürü üreticilerinin de nitelikli ve uluslararası standartlara uygun dijital ürün kütüphaneleri geliştirerek sürece dahil olmasıyla mümkündür.

KAYNAKLAR

1. Pan, J. (2024). Reinventing hybrid office design through a people-centric lens. *Building and Environment*, 252(3).
2. Namlı, O. (2024). *Investigation of governmental bodies for building information modeling (BIM) transformation: An institutional work perspective* (Yüksek lisans tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Türkiye.
3. National Institute of Building Sciences. (2007). *Frequently asked questions about the National BIM Standard-United States*. <https://www.nationalbimstandard.org/faqs>
4. DIALux. (t.y.). *DIALux download*. Erişim Tarihi (01/01/2026) <https://www.dialux.com/en-GB/download>
5. Türk Standartları Enstitüsü. (2021). *TS EN 12464-1:2021 Light and lighting – Lighting of workplaces – Part 1: Indoor workplaces*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
6. Autodesk. *ElumTools for Revit*. Erişim Tarihi (06/02/2026) <https://apps.autodesk.com/RVT/en/Detail/Index?id=1200298096691465122&appLang=en&os=Win64>
7. ElumTools. (2021). *Cylindrical illuminance and modeling effect*. Erişim Tarihi (25/01/2026) <https://www.elumtools.com/docs/2021/Content/Using%20ElumTools/Cylindrical%20Illuminance%20and%20Modeling%20Effect.htm>
8. Türk Standartları Enstitüsü. (2011). *TS EN 12464-1:2011 Light and lighting – Lighting of workplaces – Part 1: Indoor workplaces*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
9. Illuminating Engineering Society. (2011). *The lighting handbook* (10th ed.). Illuminating Engineering Society.
10. Autodesk. *BIM levels of development*. Erişim Tarihi (29/01/2026) <https://www.autodesk.com/solutions/bim-levels-of-development>

İSTANBUL'DA YENİ TOPLU KONUTLARIN KONUMSAL ÇEŞİTLİLİĞİNE BAĞLI ÇEVRESEL ETKİ YÜKLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

İkranur Sena Akkaya^{1*}

Caner Göçer²

¹ İZÜ Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi

Halkalı Kampüsü, Eğitim Fakültesi Binası, Küçükçekmece, İstanbul, 34303

² İTÜ Mimarlık Fakültesi

Taşkışla Kampüsü, Şişli, İstanbul, 34367

ÖZET

İstanbul'da beklenen deprem riski ve artan nüfusa bağlı barınma ihtiyacı, son yıllarda toplu konut üretimini hızlandırmış; bu süreçte inşa edilen konut bloklarında plan düzlemindeki konumsal farklılıkların enerji tüketimi ve buna bağlı operasyonel karbon salımı üzerinde belirgin etkiler oluşturduğu görülmüştür. Bu çalışmada, toplu konut bloklarının serbest, köşe ve ara konum olarak sınıflandırılan plan tiplerine göre yıllık ısıtma-soğutma yüklerindeki değişim analiz edilmiş; konumsal çeşitliliğe bağlı dış duvar oranı, bina kompaktlığı ve cephe saydamlığının operasyonel karbon üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda bina konumuna bağlı cephe alanı ve saydamlık oranı temel parametreler olarak ele alınmış, pencere düzeninin etkisini incelemek amacıyla parapetli ve parapetsiz cephe varyantları karşılaştırılmıştır. Yıllık enerji tüketimleri DesignBuilder ile hesaplanmış ve One Click LCA kullanılarak operasyonel karbon değerlerine dönüştürülmüştür. Bulgular, dış yüzey alanının azalmasına bağlı olarak kompaktlığın arttığını ve buna paralel biçimde operasyonel karbonun anlamlı düzeyde düştüğünü göstermekte; ara konum en düşük, serbest konum ise en yüksek değerlere ulaşarak konumsal tasarım kararlarının enerji temelli çevresel performansta güçlü bir belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: Toplu konut, Konumsal çeşitlilik, Operasyonel karbon, Enerji tüketimi, Sürdürülebilir tasarım.

ASSESSMENT OF ENVIRONMENTAL IMPACT LOADS ASSOCIATED WITH PLAN-BASED SPATIAL CONFIGURATION DIVERSITY IN RECENT MASS HOUSING DEVELOPMENTS IN ISTANBUL

ABSTRACT

The anticipated earthquake risk in Istanbul and increasing housing demand have accelerated mass housing production, where plan-based positional differences of residential blocks significantly affect energy use and operational carbon emissions. This study examines annual heating and cooling loads of mass housing blocks classified as detached, corner, and intermediate, and evaluates the impacts of external wall ratio, building compactness, and façade transparency on operational carbon. Façade area and transparency are treated as primary parameters, while parapeted and non-parapeted façades are compared to assess window-layout effects. Annual energy demands are simulated using DesignBuilder and converted to operational carbon via One Click LCA. Results show that increased compactness due to reduced external surface area significantly lowers operational carbon; intermediate blocks perform best, while detached blocks exhibit the highest values, highlighting the critical role of positional design decisions in energy-based environmental performance.

Keywords: Mass housing, Spatial configuration, Operational carbon, Energy consumption, Sustainable design.

^{1*} e-posta adresi: ikranur.akkaya@izu.edu.tr

1. GİRİŞ

Kentsel alanlar, küresel enerji tüketiminin yaklaşık %65–75’ini oluşturmakta ve sera gazı emisyonlarının önemli bir bölümünden sorumlu olmaktadır. Bu bağlamda, konut sektörü, özellikle bina kullanım aşamasında ortaya çıkan operasyonel enerji tüketimi ve buna bağlı karbon salımı nedeniyle, iklim değişikliğiyle mücadelede kritik bir role sahiptir [1, 2]. Son yıllarda yapılan çalışmalar, operasyonel karbonun azaltılmasında erken tasarım aşamasında alınan kararların özellikle bina geometrisi, kompaktlık düzeyi ve cephe düzenine ilişkin seçimlerin belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır [3, 4].

İstanbul’da beklenen deprem riskine bağlı olarak mevcut konut stokunun yenilenmesi ve artan nüfusun barınma ihtiyacının karşılanması amacıyla son yıllarda toplu konut üretimi hız kazanmıştır. Bu süreçte geliştirilen toplu konut projelerinde, bina bloklarının plan düzlemindeki konumsal farklılıkları serbest, köşe ve ara konum gibi yapı kabuğunun dış çevreyle temas koşullarını değiştirerek enerji tüketimi ve operasyonel karbon salımı üzerinde belirgin etkiler oluşturmaktadır. Ancak mevcut literatürde, toplu konut bloklarının bu tür konumsal çeşitliliğinin enerji performansı üzerindeki etkilerini sistematik ve karşılaştırmalı biçimde ele alan çalışmalar sınırlıdır [5, 6].

Bina kompaktlığı ile enerji performansı arasındaki ilişki, özellikle A/H (yüzey alanı/hacim) oranı konusunda yapılan çalışmalarda sıklıkla vurgulanmaktadır. Daha kompakt bina geometrilerinin, dış yüzey alanını azaltarak enerji tüketimini düşürdüğü ve operasyonel karbonu sınırladığı birçok araştırmada ortaya koyulmuştur [1, 4]. Bununla birlikte, bu ilişkilerin toplu konut bloklarında plan düzlemindeki konumsal farklılıklar bağlamında nasıl şekillendirildiğine yönelik araştırmaların yapılması yararlı olacaktır.

Bu çalışmanın amacı, İstanbul’da son dönemde inşa edilen toplu konut projelerinde bina bloklarının plan düzlemindeki konumsal çeşitliliğine bağlı olarak ortaya çıkan enerji tüketimi ve operasyonel karbon salımı farklılıklarını nicel ve karşılaştırmalı biçimde ortaya koymaktır. Bu doğrultuda, bloklar serbest, köşe ve ara konum olarak sınıflandırılmış; her bir konum türü için yıllık ısıtma ve soğutma enerji tüketimleri analiz edilmiştir. Konumsal farklılıklara bağlı olarak değişen dış duvar oranı ve bina kompaktlık düzeyinin operasyonel karbon üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

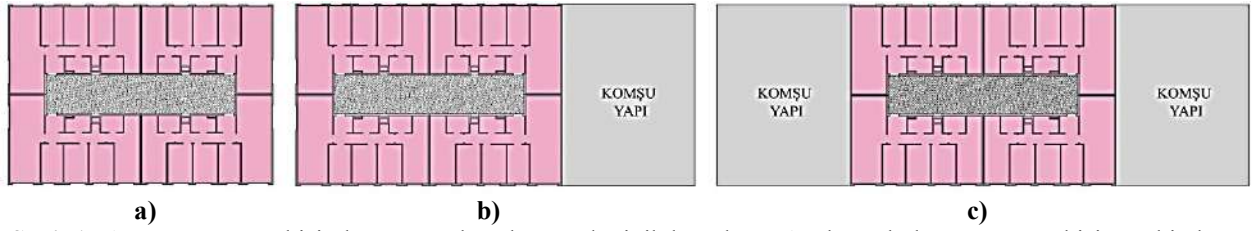
Konumsal çeşitliliğe ek olarak, cephe düzeninin saydamlık oranı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla parapetli ve parapetsiz cephe düzenleri her bir konum senaryosu için ayrı ayrı ele alınmıştır. Böylece bina konumuna bağlı saydamlık değişimi ile pencere düzenine bağlı saydamlık değişiminin operasyonel karbon üzerindeki etkileri birlikte değerlendirilmiştir.

Yıllık ısıtma ve soğutma enerji tüketimleri DesignBuilder yazılımı kullanılarak hesaplanmış, elde edilen değerler One Click LCA platformu aracılığıyla operasyonel karbon (B6) salımlarına dönüştürülmüştür. Çalışma, toplu konut bloklarında plan düzlemindeki konumsal çeşitlilik ve cephe açıklık oranlarının operasyonel karbon üzerindeki etkilerini İstanbul iklim koşullarında sistematik biçimde ele alarak literatüre katkı sunmayı amaçlamaktadır. Elde edilen bulguların erken tasarım aşamasında alınan konumsal ve geometrik kararların enerji temelli çevresel performansın iyileştirilmesine yönelik etkin bir tasarım aracı olarak kullanılmasına katkı sağlaması hedeflenmektedir.

2. YÖNTEM

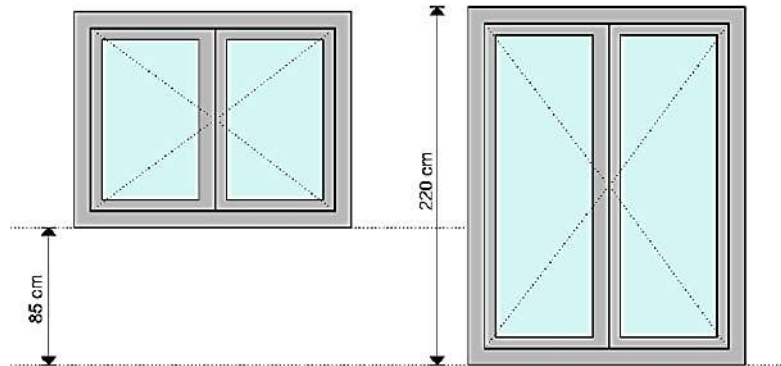
Bu çalışmada, toplu konut bloklarının plan düzlemindeki konumsal farklılıklarının (serbest, köşe ve ara konum) yıllık ısıtma ve soğutma enerji performansı ile buna bağlı operasyonel karbon salımı üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla sayısal simülasyon temelli bir yöntem izlenmiştir. Yöntem, bina enerji performansı analizi ile yaşam döngüsü değerlendirmesini bir araya getiren bütüncül bir yaklaşım üzerine kurgulanmıştır.

Bu çalışmada, toplu konut bloklarının plan düzlemindeki konumsal farklılıklarının yıllık ısıtma ve soğutma enerji tüketimleri üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, bina konumuna bağlı farklı plan tipolojileri tanımlanmıştır. Bu kapsamda üç farklı plan tipolojisi tanımlanmıştır: serbest konum, köşe konum ve ara konum. Serbest konum, binanın tüm cephelerinin dış çevreyle temas ettiği durumu; köşe konum, binanın tek bir yan cephesinin komşu yapıyla bitişik olduğu durumu; ara konum ise binanın iki yan cephesinin komşu yapılarla sınırlandırıldığı durumu temsil etmektedir (**Şekil 1**).



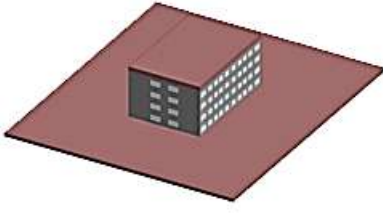
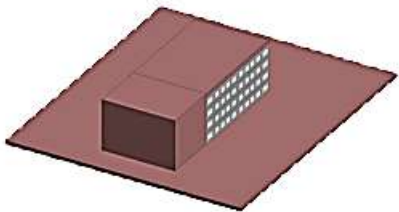
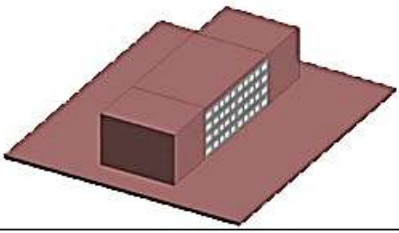
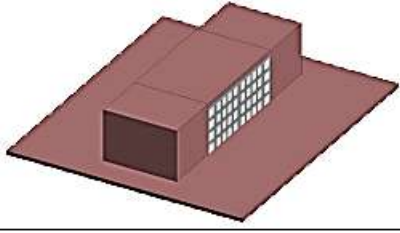
Şekil 1. a) Komşu yapı etkisi olmayan serbest konumda tipik kat planı, b) tek yönlü komşu yapı etkisine sahip köşe konumda tipik kat planı ve c) çift yönlü komşu yapı etkisine sahip ara konumda tipik kat planı

Plan tipolojileri oluşturulurken, iç mekân organizasyonu, kat planı kurgusu, ısıtılan alanlar, pencere yerleşimleri ve bina boyutları tüm senaryolarda sabit tutulmuştur. Böylece, enerji tüketimindeki farklılıkların yalnızca plan düzlemindeki konumsal çeşitlilikten ve buna bağlı olarak değişen dış cephe temas koşullarından kaynaklanması hedeflenmiştir. Tüm senaryolarda bina yüksekliği dört kat olarak sabitlenmiş ve yapılar güney yönelimli olarak konumlandırılmıştır (**Çizelge 1**). Bina konumuna ek olarak, cephe açıklık oranının enerji tüketimi üzerindeki etkisini değerlendirebilmek amacıyla, her bir konum senaryosu parapetli ve parapetsiz olmak üzere iki farklı cephe düzeni ile ele alınmıştır (**Şekil 2**). Bu yaklaşım ile, plan düzlemindeki konumsal çeşitliliğin yanı sıra, saydamlık oranındaki değişimin enerji tüketimine olan etkisinin birlikte izlenmesi amaçlanmıştır.



Şekil 2. Pencere düzeni senaryoları: parapetli ve parapetsiz durum

Çizelge 1. Çalışmada tanımlanan bina konum tipolojileri ve model verileri

Boyutlar	Toplam Alan	Isıtılan Alan	Bina Yönelim	Serbest Konum	
				Parapetli Pencere Düzeni	Parapetsiz Pencere Düzeni
29x20 m	580 m ²	492 m ²	Güney		
Boyutlar	Toplam Alan	Isıtılan Alan	Bina Yönelim	Köşe Konum	
				Parapetli Pencere Düzeni	Parapetsiz Pencere Düzeni
29x20 m	580 m ²	492 m ²	Güney		
Boyutlar	Toplam Alan	Isıtılan Alan	Bina Yönelim	Ara Konum	
				Parapetli Pencere Düzeni	Parapetsiz Pencere Düzeni
29x20 m	580 m ²	492 m ²	Güney		

Konum türüne bağlı olarak dış cephe alanı ve saydamlık oranı değişmekte; buna paralel olarak bina kompaktlığı farklılaşmaktadır. Tanımlanan plan tipolojileri ve cephe düzenleri, kompaktlık ve saydamlık düzeylerindeki değişimin yıllık ısıtma-soğutma enerji tüketimleri ve buna bağlı operasyonel karbon salımı üzerindeki etkilerinin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesine olanak sağlayan referans modeller olarak kullanılmıştır. Konum türlerine ait bu geometrik farklılıkların nicel olarak ortaya konabilmesi amacıyla, her bir plan tipolojisi için saydamlık oranları ve kompaktlık göstergeleri hesaplanmış ve **Çizelge 2**'de sunulmuştur. Bu göstergeler, plan düzlemindeki konumsal çeşitliliğin enerji tüketimi ve buna bağlı operasyonel karbon salımı üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesinde temel referans veriler olarak kullanılmıştır.

Çizelge 2: Konum türlerine göre saydamlık oranı ve A/H oranları

Bina Konumu	Saydamlık Oranı (%)		Bina kabuğu Alanının Hacme Oranı (1/m)
	Parapetli	Parapetsiz	
Serbest	20	33	0,17
Köşe	23	37	0,13
Ara	26	43	0,10

Bu çalışmada, toplu konut bloklarının plan düzlemindeki konumsal farklılıklarının enerji performansı ve buna bağlı operasyonel karbon salımı üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla DesignBuilder ve One Click LCA yazılımları birlikte kullanılmıştır. DesignBuilder, EnergyPlus tabanlı dinamik simülasyon altyapısı sayesinde bina kabuğu, iklim verileri ve kullanım senaryolarını bütüncül biçimde değerlendirerek yıllık ısıtma ve soğutma enerji gereksinimlerini yüksek doğrulukla hesaplayabilmesi nedeniyle tercih edilmiştir. Bu özellik, özellikle konumsal farklılıkların bina enerji davranışı üzerindeki etkilerinin güvenilir biçimde analiz edilmesine olanak sağlamaktadır.

Çizelge 3: Bina enerji simülasyonunda kullanılan girdi verileri

Veri Grubu	Tür	Birim	
İklim Verisi	EPW	-	İstanbul Atatürk Havalimanı
Yapı Kabuğu	Toplam Isıl Geçirgenlik		
	Duvar		0.35
	Çatı		2.93
	Döşeme	W/m ² °K	2.92
	Saydam Alanlar/Pencere		1.8
	Pencere SHGF		0.60
Aktivite, ekipman ve Aydınlatma	Toplam İç Kazançlar (Aydınlatma)	W/m ²	-
	Toplam İç Kazançlar (Ekipman)		
	İşletme Zamanlaması	W/m ²	08:00-18:00: %100 18:00-08:00: %0
	İşletme Programı İç Kazançlar	-	
İklimlendirme ve Isıtma/Soğutma Sistemi	Isıtma Ayarı Noktası (Sıcaklık)	°C	22
	Soğutma Ayarı Noktası (Sıcaklık)	°C	25
	Sistem Türü		4 Borulu Fan-Coil Sistemi
	Isıtma Sistemi		Doğalgaz (merkezi sistem)
	Soğutma Sistemi		Elektrik (merkezi sistem)

One Click LCA ise, EN 15978 standardına dayalı yaşam döngüsü değerlendirme yaklaşımı, geniş EPD veri tabanı ve enerji tüketimlerini doğrudan karbon emisyonlarına dönüştürebilen hesaplama altyapısı sayesinde tercih edilmiştir. Platform, operasyonel karbonu (B6) enerji tüketimi ile enerji kaynağına ait emisyon faktörlerinin çarpımı üzerinden hesaplayarak, enerji performansı sonuçlarının çevresel etkilere dönüştürülmesini mümkün kılmaktadır. Bu kapsamda ısıtma için doğal gaz, soğutma için ise elektrik enerji kaynağı olarak tanımlanmıştır. Doğal gaz için kullanılan emisyon faktörü One Click LCA veri tabanında yer alan ve yaşam döngüsü boyunca ısı üretimini temsil eden LCA envanterine dayalı olup yaklaşık 0,20 kgCO₂e/kWh doğrudan emisyon değerine karşılık gelmektedir. Elektrik için ise Türkiye'ye özgü elektrik üretim karmasını temsil eden ve IEA verilerine dayalı olarak oluşturulmuş ülke spesifik LCA veri seti kullanılmıştır; bu veri setinde elektrik üretimine karşılık gelen emisyon faktörü yaklaşık 0,65 kgCO₂e/kWh düzeyindedir.

Çalışmanın kapsamı yalnızca bina kullanım aşamasına ait operasyonel etkiler ile sınırlandırılmış; gömülü karbon bileşenleri değerlendirme dışı bırakılmıştır. Tüm senaryolarda yapı kabuğu özellikleri ve kullanım koşulları sabit tutulduğundan, elde edilen sonuçların doğrudan plan düzlemindeki konumsal çeşitlilik ve cephe saydamlık oranındaki değişimlerden kaynaklandığı kabul edilmiştir. Bu yaklaşım, konumsal ve geometrik tasarım kararlarının enerji performansı ve

operasyonel karbon üzerindeki etkilerinin karşılaştırılabilir ve izole edilmiş biçimde analiz edilmesine olanak sağlamaktadır.

Bu doğrultuda enerji simülasyonunda kullanılan temel model girdi parametreleri **Çizelge 3**'te sunulmuştur. Bu girdiler, tüm senaryolarda sabit tutularak enerji tüketimindeki farklılıkların yalnızca konumsal ve cepheye bağlı değişkenlerden kaynaklanması sağlanmıştır.

3. İSTANBUL'DA KONUTUN VE KONUT YERLEŞİMİNİN GELİŞİMİ

Konut, insanın barınma ihtiyacını karşılamasının yanı sıra, toplumsal yapı, yaşam biçimi ve ekonomik koşulların mekânsal yansıması olarak tarih boyunca farklı biçimlerde üretilmiştir [7]. İstanbul'da konut ve konut yerleşimlerinin gelişimi, Tanzimat Dönemi'nden günümüze uzanan süreçte toplumsal, ekonomik ve siyasal dönüşümlerle paralel olarak şekillenmiştir.

19. yüzyıl başlarında İstanbul'un konut dokusu, geleneksel Osmanlı yaşam biçimini yansıtan ahşap meskenler, yalılar ve köşklerin hâkim olduğu bir yapı sergilemekteydi. Bu dönemde konut mimarisi, sosyal statüye bağlı mekânsal organizasyonlarla karakterize edilmiştir. Tanzimat Fermanı (1839) sonrasında başlayan modernleşme süreciyle birlikte, Batı etkili planlama anlayışları, yeni yapı teknikleri ve çok katlı konut tipleri İstanbul konut dokusunda görülmeye başlanmıştır [8].

19. yüzyıl sonu ve 20. yüzyıl başında apartman tipi konutların yaygınlaşması, geleneksel mesken anlayışından modern, çok birimli konut düzenine geçişin önemli bir göstergesi olmuştur [9]. Cumhuriyet'in ilanı ile birlikte konut politikaları modernleşme hedefleriyle ilişkilendirilmiş; fonksiyonel planlama, düzenli imar ve modernist mimari yaklaşımlar öne çıkmıştır [10].

İkinci Dünya Savaşı sonrasında hızlanan sanayileşme ve kırdan kente göç, İstanbul'da konut ihtiyacını keskin biçimde artırmış; bu süreçte gecekondular yerleşimleri ve plansız büyüme yaygınlaşmıştır [11]. 1960'lı yıllardan itibaren Kat Mülkiyeti Yasası ve kooperatifleşme süreçleriyle birlikte, apartman blokları ve tekrarlı konut şemalarına dayalı daha büyük ölçekli yerleşimler ortaya çıkmıştır [7].

1980'li yıllardan sonra toplu konut politikaları ağırlık kazanmış; 1984 tarihli Toplu Konut Kanunu ve sonrasında TOKİ'nin etkin rolüyle büyük ölçekli konut projeleri yaygınlaşmıştır. 1990'lı yıllarda özel sektörün ve kurumsal yatırımcıların konut üretimine katılımı artmış; site tipi, yüksek yoğunluklu ve standartlaşmış konut yerleşimleri kentsel çevrede belirgin hale gelmiştir [12].

1999 Marmara Depremi ve sonrasında, yapı güvenliği ve kentsel risk kavramları konut üretiminde öncelikli gündem haline gelmiştir. 2000'li yıllarla birlikte kentsel dönüşüm politikaları, büyük ölçekli toplu konut projeleri ve parsel bazlı yenileme uygulamaları İstanbul konut üretiminde belirleyici olmuştur [13,14]. Bu dönemde yaygınlaşan büyük ölçekli konut yerleşimleri, tekrarlı blok tipolojileri ve artan yapı yoğunluğu, aynı yerleşke içerisinde serbest, köşe ve ara konumların birlikte görülmesine yol açmıştır.

Günümüzde İstanbul'da deprem riski, nüfus artışı ve barınma ihtiyacına bağlı olarak hız kazanan toplu konut üretimi, çoğunlukla standartlaşmış plan şemalarına sahip yüksek yoğunluklu bloklar

üzerinden gerçekleşmekte; bu bağlamda konumsal ve geometrik tasarım kararları, enerji etkinliği ve sürdürülebilirlik açısından kritik bir değerlendirme parametresi olarak öne çıkmaktadır. Bu durum, erken tasarım aşamasında alınan planlama kararlarının bina ölçeğindeki enerji davranışını belirlemedeki rolünü güçlendirmekte ve konumsal farklılıkların nicel olarak değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır. Dolayısıyla, blok konumlarının karşılaştırmalı olarak ele alınması, operasyonel enerji ve karbon azaltımına yönelik tasarım stratejeleri geliştirilmesi açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır.



Şekil 3. İstanbul'daki konut tipolojilerinin geleneksel ahşap konutlardan güncel yüksek yoğunluklu toplu konutlara uzanan tarihsel dönüşümünü gösteren fotoğraflar

4. İSTANBUL'DA SON DÖNEMDE İNŞA EDİLEN KONUTLAR

İstanbul'da 2000'li yıllardan itibaren hız kazanan kentsel dönüşüm ve artan konut talebi, toplu konut üretiminde yüksek yoğunluklu ve çoğunlukla standartlaşmış blok tipolojilerini öne çıkarmıştır. Güncel projelerde yüksek katlı yapılaşma eğilimi, cephe kurgularını ve modern cephe sistemlerini yaygınlaştırırken; plan düzleminde serbest, köşe ve ara konum gibi farklı blok konumlanışları aynı yerleşke içinde birlikte görülebilmektedir. Bu bölümde, son dönem toplu konutların cephe düzeni, cephe malzemesi eğilimleri ve plan düzenine bağlı konumsal çeşitlilik, literatür ve güncel proje örnekleri çerçevesinde özetlenmektedir.

4.1. Cephe Düzeni

Son dönem toplu konutlarda cephe düzeni, pencere–duvar oranı ve pencere açıklıklarının düşey organizasyonu üzerinden şekillenmektedir. Pencere–duvar oranı, binanın enerji performansını doğrudan etkileyen temel parametrelerden biri olup, saydamlık oranındaki artış güneş kazançlarını yükselterek özellikle soğutma döneminde enerji talebini artırabilmektedir [15].

İstanbul'daki güncel toplu konut projelerinde parapetli ve parapetsiz cephe düzenleri, pencere açıklıklarının yüksekliği ve cephede kapladığı alan açısından belirgin biçimde farklılaşmaktadır. Parapetli düzenlerde pencere alt kotu yükselmekte ve düşey açıklık sınırlandırarak cephe saydamlığı azalırken; parapetsiz düzenlerde pencere açıklıkları döşeme kotuna kadar devam edebilmekte ve bu durum cam oranını artırmaktadır. Son yıllarda parapetsiz pencere düzenleri, minimal cephe anlayışı ve kesintisiz cam yüzeylere yönelik mimari eğilimler doğrultusunda yaygınlaşmaktadır. Bu yaklaşım gün ışığı erişimini artırsa da, yükselen saydamlık oranı güneş kazançlarını artırarak iç mekânın termal davranışını ve özellikle yaz dönemindeki soğutma yüklerini belirgin biçimde

etkilemektedir. Bu nedenle parapetli ve parapetsiz cephe düzenleri, estetik tercihlerle birlikte enerji performansını doğrudan etkileyen kritik tasarım kararları olarak değerlendirilmelidir.

4.2. Dış Cephe Kaplama Malzemesi

İstanbul'daki güncel toplu konut projelerinde dış cephe ısı yalıtım sistemleri (mantolama), yapı kabuğunun temel bileşeni olarak yaygın biçimde kullanılmaktadır. Cephe kimliğini belirleyen ana kaplama katmanlarında ise alüminyum ve kompozit paneller, seramik kaplamalar ile cam ağırlıklı sistemler öne çıkmaktadır. Bu malzemelerin tercih edilmesinde, sıva ve boya gibi geleneksel çözümlere kıyasla daha düşük bakım gereksinimi, uzun ömürlü yüzeyler sunmaları, hızlı uygulama imkânı sağlamaları ve modern cephe estetiğine olanak vermeleri etkili olmaktadır. Son dönem projelerinde ayrıca hava boşluklu cephe sistemlerinin kullanımının arttığı gözlemlenmektedir. Bu sistemlerde dış kaplama ile taşıyıcı duvar arasında oluşturulan hava boşluğu, ısı ve nem kontrolüne katkı sağlayarak cephe performansını iyileştirmeyi hedeflemektedir.

Bu çalışma kapsamında cephe malzemeleri, estetik veya gömülü karbon etkilerinden bağımsız olarak, yapı kabuğunun termofiziksel özelliklerini tanımlayan birer katman olarak ele alınmıştır. Yıllık ısıtma ve soğutma enerji tüketimleri, belirlenen duvar tipi ve katman kurgusu üzerinden gerçekleştirilmiş; tüm senaryolarda aynı yapı kabuğu özellikleri kullanılarak enerji tüketimindeki farklılıkların yalnızca plan düzlemindeki konumsal çeşitlilik ve cephe açıklık oranlarından kaynaklanması hedeflenmiştir.

4.3. Plan düzenine bağlı konumsal çeşitlilik

Türkiye'de son yıllarda yaygınlaşan kentsel dönüşüm uygulamaları, mevcut parsel sınırlarının büyük ölçüde korunması, arsa büyüklüklerinin sınırlı olması ve yapı yoğunluğunu artırmaya yönelik planlama kararları nedeniyle çoğunlukla bitişik nizam ya da birbirine çok yakın konumlanan yapılaşma biçimleriyle gerçekleşmektedir. Bu mekânsal yakınlık, yapıların dış çevreyle kurduğu ilişkiyi doğrudan etkileyerek güneşlenme koşulları, doğal havalandırma olanakları ve dış hava ile temas eden cephe alanlarının niteliğini belirleyen temel bir faktör haline gelmektedir. Bitişik nizam yapılaşma düzeninde cephelerin bir veya birden fazla yönden komşu yapılarla sınırlandırılması, dışa açık cephe sayısını azaltarak bina kabuğu üzerinden gerçekleşen ısı kazanç ve kayıplarını doğrudan etkilemektedir. Bu durum, yıllık ısıtma ve soğutma enerji gereksinimlerini ve buna bağlı çevresel performansı belirleyici hale getirmektedir.

Toplu konut projelerinde bina bloklarının plan düzlemindeki konumsal farklılıkları serbest, köşe ve ara konumlar bu bağlamda enerji tüketimi, doğal aydınlatma ve havalandırma potansiyeli üzerinde belirgin etkiler oluşturmaktadır. İncelenen İstanbul örneklerinde, özellikle büyük ölçekli projelerde farklı konum türlerinin aynı yerleşke içerisinde bir arada yer aldığı görülmekte; bu durum, konumsal kararların enerji performansı üzerindeki etkilerinin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

5. HESAP VERİLERİ

Bu bölümde, plan düzleminde tanımlanan konum türleri (A1 serbest, A2 köşe, A3 ara) ve cephe düzenine (parapetli–parapetsiz) bağlı olarak elde edilen yıllık enerji tüketimi ve buna karşılık gelen

operasyonel karbon verileri sunulmaktadır. Hesaplamalar, bina kullanım aşamasında ortaya çıkan ısıtma ve soğutma kaynaklı enerji tüketimlerine odaklanmakta olup, tüm değerler karşılaştırılabilirlik sağlamak amacıyla birim alan başına (kWh/m² ve kgCO₂e) ifade edilmiştir.

Çizelge 4'de, her bir konum türü için parapetli ve parapetsiz cephe düzenlerine bağlı yıllık ısıtma ve soğutma enerji tüketimi değerleri yer almaktadır. Bu değerler, DesignBuilder yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen yıllık bina enerji simülasyonları sonucunda elde edilmiştir. Tabloda sunulan enerji tüketimi verileri, bina geometrisi, kullanım senaryoları ve iç konfor koşulları sabit tutularak oluşturulan modellerin çıktılarını temsil etmektedir.

Çizelge 4: Konum türü ve cephe düzenine bağlı ısıtma ve soğutma enerji tüketimleri (kWh/m²)

Konum Türü	Yıllık Isıtma Enerji Tüketimi (kWh/m ²)		Yıllık Soğutma Enerji Tüketimi (kWh/m ²)		Yıllık Toplam Enerji Tüketimi (kWh/m ²)	
	Cephe Düzeni		Cephe Düzeni		Cephe Düzeni	
	Parapetli	Parapetsiz	Parapetli	Parapetsiz	Parapetli	Parapetsiz
Serbest	24,85	21,28	23,14	35,17	47,99	56,45
Köşe	24,47	21,05	20,22	30,56	44,69	51,61
Ara	24,52	21,29	16,79	25,11	41,31	46,40

Çizelge 5'de ise, **Çizelge 4'**de verilen yıllık ısıtma ve soğutma enerji tüketimleri esas alınarak hesaplanan operasyonel karbon salımı değerleri sunulmaktadır. Isıtma ve soğutma kaynaklı enerji tüketimleri, yakıt türlerine bağlı emisyon faktörleri ile ilişkilendirilmiş ve yıllık ısıtma kaynaklı, yıllık soğutma kaynaklı ve toplam operasyonel karbon değerleri ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bu değerler, bina kullanım aşamasına ait operasyonel karbon (B6) kapsamındaki çevresel etki yüklerini temsil etmektedir.

Çizelge 5: Konum türü ve cephe düzenine bağlı yıllık operasyonel karbon değerleri (kgCO₂e)

Konum Türü	Yıllık Isıtma Kaynaklı Operasyonel Karbon (kgCO ₂ e)		Yıllık Soğutma Kaynaklı Operasyonel Karbon (kgCO ₂ e)		Toplam Gömülü Karbon (kgCO ₂ e)	
	Cephe Düzeni		Cephe Düzeni		Cephe Düzeni	
	Parapetli	Parapetsiz	Parapetli	Parapetsiz	Parapetli	Parapetsiz
Serbest	310,72	266,06	756,09	1149,35	1067,00	1415,00
Köşe	305,71	263,15	660,34	999,25	966,00	1262,00
Ara	306,57	266,06	548,49	821,23	855,00	1087,00

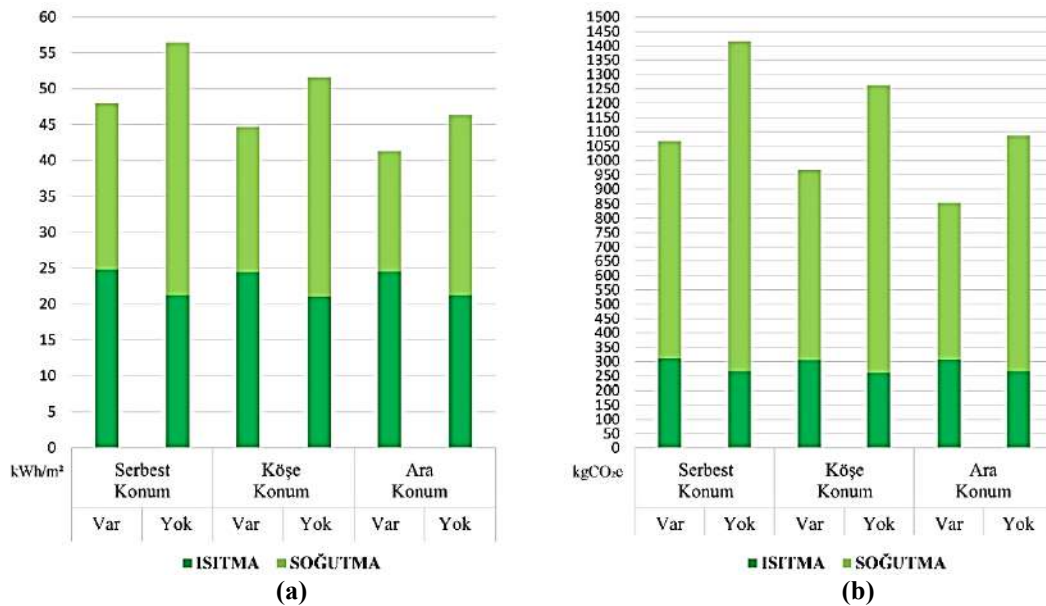
Sunulan enerji tüketimi ve operasyonel karbon verileri, farklı konum türleri ve cephe düzenleri arasında karşılaştırma yapılmasına olanak sağlayan temel hesap çıktılarıdır. Bu veriler, bir sonraki bölümde konumsal çeşitliliğin ve cephe düzeninin enerji performansı ve operasyonel karbon üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesinde kullanılmıştır.

6. DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada elde edilen bulgular, konumsal farklılıklar ile parapet durumunun, yıllık ısıtma–soğutma enerji tüketimleri ve buna bağlı operasyonel karbon salımı üzerinden değerlendirilmiştir.

Şekil 4 incelendiğinde, bina kompaktlığı arttıkça toplam enerji tüketiminin sistematik biçimde azaldığı görülmektedir. Parapetli cephe düzeninde serbest konumdan ara konuma geçildiğinde toplam yıllık enerji tüketimi yaklaşık %14 azalırken, parapetsiz durumda bu azalma yaklaşık %18 düzeyindedir. Parapetli cephe düzenlerinde ısıtma ve soğutma yükleri görece dengeli bir dağılım sergilerken, parapetsiz düzenlerde soğutma yükleri tüm konum türlerinde baskın hale gelmektedir. Parapetin kaldırılmasıyla soğutma enerjisi serbest konumda yaklaşık %52, ara konumda %47 oranında artmaktadır. Buna karşılık, ısıtma enerjisi tüm konumlarda yaklaşık %15–20 düzeyinde azalmaktadır. Bu bulgular, artan saydamlık oranının özellikle yaz döneminde enerji talebini belirgin biçimde yükselttiğini, kompakt geometrinin ise yüksek saydamlık koşullarında dahi toplam enerji ihtiyacını kısmen dengeleyebildiğini göstermektedir. Enerji tüketimlerine bağlı olarak hesaplanan operasyonel karbon değerleri, enerji sonuçlarıyla paralel bir eğilim sergilemektedir. İstanbul koşullarında soğutmanın elektrikle, ısıtmanın ise doğal gazla karşılanması nedeniyle, soğutma kaynaklı karbon salımı toplam operasyonel karbon içerisinde baskın bileşen haline gelmektedir. Parapetsiz cephe düzenlerinde, soğutma kaynaklı karbon emisyonlarının tüm konum türlerinde belirgin biçimde arttığı görülmektedir.

Operasyonel karbon salımının bina kompaktlığı ve cephe saydamlık oranı tarafından birlikte belirlendiğini ortaya koymaktadır. Daha kompakt plan çözümleri operasyonel karbonu azaltırken, artan saydamlık oranı özellikle soğutma kaynaklı karbon salımını yükseltmektedir. Bu bağlamda, İstanbul gibi soğutma yüklerinin belirginleştiği iklim koşullarında, kompakt plan kurguları ve kontrollü saydamlık oranlarına sahip cephe düzenlerinin enerji temelli çevresel performans açısından daha avantajlıdır.



Şekil 4. a) Konum türü ve parapet (var/yok) durumuna bağlı yıllık ısıtma ve soğutma enerji tüketimleri (kWh/m²) ve **b)** yıllık ısıtma ve soğutma kaynaklı operasyonel karbon değerleri (kgCO₂e)

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma, toplu konut bloklarında plan düzlemindeki konumsal farklılıkların ve cephe açıklık oranlarını etkileyen tasarım kararlarının, yıllık enerji tüketimi ve buna bağlı operasyonel karbon salımı üzerinde belirleyici bir rol oynadığını ortaya koymuştur. Serbest, köşe ve ara konum olarak tanımlanan plan tipolojileri karşılaştırıldığında, bina kompaktlığının artmasına bağlı olarak toplam enerji tüketiminin ve operasyonel karbonun sistematik biçimde azaldığı belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, iki cephesi dış çevreyle temas eden ara konum, hem parapetli hem de parapetsiz senaryolarda en düşük operasyonel karbon değerlerine sahip olurken; tüm cepheleri açık olan serbest konum en yüksek değerlere ulaşmıştır. Bu durum, dış yüzey alanının azalmasına bağlı olarak ısı kayıplarının sınırlandırılmasının enerji performansını doğrudan iyileştirdiğini göstermektedir. Cephe düzenine bağlı saydamlık oranındaki değişimlerin özellikle soğutma enerjisi üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir. Parapetsiz cephe düzenlerinde artan saydamlık oranı, tüm konum türlerinde soğutma enerji tüketimini ve buna bağlı karbon salımını yaklaşık %50 civarında artırmıştır. Buna karşılık, ısıtma kaynaklı karbon salımlarındaki değişim daha sınırlı düzeyde kalmıştır. İstanbul iklim koşullarında soğutmanın elektrikle karşılanması nedeniyle, soğutma kaynaklı emisyonların toplam operasyonel karbon içerisindeki baskın rolü bu çalışmada açık biçimde ortaya konulmuştur. Bu bağlamda, sonuçlar, enerji temelli çevresel performansın iyileştirilmesinde yalnızca malzeme ya da sistem seçimlerinin değil, bina konumu, kompaktlık düzeyi ve cephe açıklık oranları gibi erken tasarım kararlarının da kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir. Toplu konut tasarımında, konumsal ve geometrik kararların operasyonel karbonun azaltılmasına yönelik etkin bir tasarım parametresi olduğu söylenebilir. Bu çalışma, toplu konut tasarımında konumsal ve geometrik değişkenlerin enerji ve karbon performansı üzerindeki etkilerini nicel olarak ortaya koyarak, erken tasarım aşamasında alınacak kararlar için karşılaştırılabilir bir değerlendirme çerçevesi sunmaktadır. Elde edilen bulguların, farklı iklim bölgeleri, farklı bina tipolojileri ve değişken cephe sistemleri ile genişletilerek gelecekte yapılacak çalışmalar için temel veri ve yöntemsel bir referans oluşturabileceği; ayrıca kentsel ölçekte konum-enerji ilişkisini inceleyen çok ölçekli araştırmalara temel bir çerçeve sunmaktadır.

KAYNAKLAR

1. Erdemir Kocagil, İ., & Koçlar Oral, G. (2021). Enerji etkin yerleşme dokusu ve bina tasarımına yönelik parametrik bir model önerisi: Ilımlı-nemli iklim bölgesi. *Megaron*, 16(4), 735–750. <https://doi.org/10.14744/MEGARON.2021.89990>
2. Gan, J., Li, K., Li, X., Mok, E., Ho, P., Law, J., Lau, J., Kwok, R., & Yau, R. (2023). Parametric BIM-based lifecycle performance prediction and optimisation for residential buildings using alternative materials and designs. *Buildings*, 13(4), 904. <https://doi.org/10.3390/buildings13040904>
3. Samuelson, H., Claussnitzer, S., Goyal, A., Chen, Y., & Romo-Castillo, A. (2016). Parametric energy simulation in early design: High-rise residential buildings in urban contexts. *Building and Environment*, 101, 19–31. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.02.018>
4. Gauch, H. L., Dunant, C. F., Hawkins, W., & Cabrera Serrenho, A. (2023). What really matters in multi-storey building design? A simultaneous sensitivity study of embodied carbon, construction cost, and operational energy. *Applied Energy*, 333, 120585. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120585>

5. Mangan, S. D., Koçlar Oral, G., Erdemir Kocagil, İ., & Sozen, İ. (2021). The impact of urban form on building energy and cost efficiency in temperate-humid zones. *Journal of Building Engineering*, 33, 101626. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101626>
6. Rodrigues, E., Fernandes, M. S., Gomes, Á., Gaspar, A. R., & Costa, J. J. (2019). Performance-based design of multi-story buildings for a sustainable urban environment: A case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 113, 109243. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109243>
7. Taştırmır, İ. A. (2020). Farklı iklim bölgelerinde yapı kabuğunda ısı kütlenin bina enerji etkinliğine ve ısı konforuna olan etkisi (Yüksek lisans tezi). Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
8. Sarıkaya, Ö. (2002). İstanbul'da üst gelir grubu konut alanlarının çağdaş planlama ve tasarım yaklaşımları çerçevesinde değerlendirilmesi (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
9. Eren, T. (2014). İstanbul'daki çok katlı konut yapılarında mekânsal değişim sürecinin analizi (Yüksek lisans tezi). İstanbul Kültür Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
10. Düzenli, H. İ. (2017). Realizm-ütopizm kısıcında şehir ve İstanbul: Ev ve Şehir Vakfı, Deprem Çalışma Grubu ve Yeni Şehirler Projesi üzerine. *İdealkent: Kent Araştırmaları Dergisi*, 8(22), 597-640.
11. Karasu, M. A. (2009). Devletin değişim sürecinde belediyelerin konut politikalarında farklılaşan rolü. *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 14(3), 245-264. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/194637>
12. Tural, G. Ş., & Koç, C. (2023). Sosyal konut çalışmalarında Toplu Konut İdaresi (TOKİ)'nin yerini incelemede bir yöntem denemesi. *İstanbul Aydın Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 15(1), 15-40.
13. Kuyucu, T. (2018). Türkiye'de kentsel dönüşümün dönüşümü: Kurumsal bir açıklama denemesi. *İdealkent: Kent Araştırmaları Dergisi*, 9(24), 364-386. <https://doi.org/10.31198/idealkent.447526>
14. Tunc, A., Sezgin, E., & Yomralıoğlu, T. (2022). The development of a holistic and inclusive model for disaster priority regeneration area (DPRA): The case of Istanbul, Turkey. *Land*, 11(12), 2150. <https://doi.org/10.3390/land11122150>

İÇ HAVA KALİTESİ AÇISINDAN YEŞİL BİNA SERTİFİKASYON SİSTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

Dilruba Yurtseven^{1*}

Şule Filiz Akşit^{2*}

^{1,2} İTÜ Mimarlık Fakültesi

Taşkışla Kampüsü, Şişli, İstanbul, 34367

ÖZET

Günümüzde insanların zamanlarının %80- %90'ını iç mekânlarda geçirmesi, İç Hava Kalitesini (İHK) halk sağlığı ve iş gücü verimliliği açısından kritik bir çevresel faktör haline getirmiştir. Bu çalışma, İHK'nin insan sağlığı üzerindeki etkilerini, kirlenici kaynaklarını ve yeşil bina sertifikasyon sistemlerinin bu konudaki rolünü incelemektedir. Literatürde "Hasta Bina Sendromu" (HBS) olarak adlandırılan sağlık sorunlarının temelinde yatan biyolojik, fiziksel ve kimyasal kirleniciler (TVOC, NO_x, PM, CO₂ vb.) detaylı olarak ele alınmıştır. Çalışmada, bina özelliklerinin, havalandırma stratejilerinin ve kullanıcı davranışlarının İHK üzerindeki belirleyici rolü vurgulanmaktadır. Ayrıca, uluslararası LEED, BREEAM, CASBEE ve ulusal YeS-TR yeşil bina sertifikasyon sistemlerinin İHK açısından karşılaştırmalı olarak analizi yapılmıştır. Sonuç olarak, çevre dostu tasarımın tek başına sağlıklı bir iç ortam sağlamakta yetersiz kaldığından; İHK yönetiminde sürekli izleme ve kullanıcı odaklı işletmenin gerekli olduğu görülmektedir.

Anahtar kelimeler: İç Hava Kalitesi, Hasta Bina Sendromu, Yeşil Bina Sertifikasyon Sistemleri, İç Mekan Kirlenicileri, Sürdürülebilir Mimarlık

A COMPERATIVE ANALYSIS OF GREEN BUILDING CERTIFICATION SYSTEMS IN TERMS OF INDOOR AIR QUALITY

ABSTRACT

Today, people spend approximately 80–90% of their time indoors, making Indoor Air Quality (IAQ) a critical environmental factor for public health and workforce productivity. This study examines the effects of indoor air quality on human health, the sources of indoor pollutants, and the role of green building certification systems in this context. Biological, physical, and chemical pollutants underlying health issues referred to in the literature as Sick Building Syndrome (SBS)—including TVOC, NO_x, particulate matter (PM), and CO₂—are discussed in detail. The study emphasizes the significant influence of building characteristics, ventilation strategies, and occupant behavior on IAQ. Furthermore, a comparative analysis of the international LEED, BREEAM, and CASBEE certification systems, along with the national YeS-TR green building certification, is conducted with respect to IAQ criteria. The findings indicate that environmentally friendly design alone is insufficient to ensure a healthy indoor environment; therefore, continuous monitoring and occupant-oriented operation are essential for effective indoor air quality management.

Keywords: Indoor Air Quality, Sick Building Syndrome, Green Building Certifications, Indoor Air Pollutants, Sustainable Architecture

^{1*} e-posta adresi: yurtsevend@itu.edu.tr

1. GİRİŞ

Modern toplumlarda insanlar zamanlarının yaklaşık %80-%90'ını konutlar, ofisler, okullar ve diğer ticari binalar gibi iç mekânlarda geçirmektedir [1]. Bu durum, İHK'nin insan sağlığı, refahı ve üretkenliği üzerinde doğrudan etkisi olan kritik bir faktör haline getirmiştir [2]. İç ortamlar, dış ortamlara kıyasla kirleticilerin birikme eğiliminde olduğu alanlardır ve yetersiz havalandırma, yapı malzemelerinden kaynaklanan emisyonlar ve insan aktiviteleri bu kirliliği artırmaktadır [3]. Günümüzde enerji verimliliğini artırma çabaları, binaların daha sızdırmaz hale getirilmesine yol açmış, bu da taze hava değişim oranlarını düşürerek iç mekân kirleticilerinin yoğunlaşmasına neden olmuştur [2].

Sürdürülebilir bina tasarımı ve yeşil bina sertifikasyon sistemleri (LEED, BREEAM, DGNB ve CASBEE), enerji tasarrufunun yanı sıra sağlıklı iç ortamlar yaratmayı hedeflemektedir [4]. Ancak literatürdeki çalışmalar, sertifikalı yeşil binaların her zaman kullanıcı memnuniyetini veya üstün İHK'yi garanti etmediğini, hatta bazı durumlarda mekanik havalandırma sistemlerinin yetersiz işletilmesi veya malzeme seçimleri nedeniyle "Hasta Bina Sendromu" (HBS) semptomlarını tetikleyebildiğini göstermektedir [5]. Bu çalışma, iç mekan kirleticilerini ve sağlık etkilerini irdelerek; yeşil bina sertifikasyon sistemlerini karşılaştırmalı olarak değerlendirmeyi ve İHK için mevcut standartların ötesine geçen, daha kapsamlı bir yaklaşımın gerekliliğini ortaya koymayı amaçlamaktadır.

2. İÇ HAVA KALİTESİ

Bu bölümde; İHK'nin insan sağlığı üzerindeki doğrudan etkileri ve önemi irdelenmiş, ortam kalitesini şekillendiren temel unsurlar tanımlanmış, ayrıca iç ortamı tehdit eden fiziksel ve kimyasal kirleticiler açıklanmıştır.

2.1. İç Hava Kalitesinin Önemi ve İnsan Sağlığı Üzerindeki Etkisi

İç hava kirliliği, dünya genelinde her yıl milyonlarca ölüme neden olan ciddi bir halk sağlığı sorunudur ve kısa veya uzun vadeli maruziyetlerde çeşitli hastalıklara yol açabilmektedir. İHK'nin istenilen şartları sağlamadığı durumlarda, özellikle çocuklar, yaşlılar ve kronik rahatsızlığı olan bireyler gibi savunmasız gruplar için büyük risk oluşturmaktadır [6,7]. Literatürde, bina kullanıcılarının binalarda geçirdikleri zamanla ilişkili olarak ortaya çıkan baş ağrısı, yorgunluk, göz ve boğaz tahrişi gibi semptomlar "Hasta Bina Sendromu" (HBS) olarak tanımlanmaktadır [8]. Bu sendromun en ayırt edici özelliği, belirtilerin bina içerisinde geçirilen süreyle artış göstermesi ve bina terk edildiğinde genellikle hafiflemesi veya tamamen kaybolmasıdır. Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından da kategorize edilen HBS semptomları; mukoza zarı tahrişleri (göz, burun ve boğazda yanma), nörotoksik etkiler (baş ağrısı, zihinsel yorgunluk, baş dönmesi, mide bulantısı), astım benzeri şikayetler (göğüste sıkışma) ve cilt problemleri (kuruluk, kaşıntı, kızarıklık) olmak üzere geniş bir yelpazede kendini göstermektedir [6].

Genel sağlık etkilerinin ötesinde, İHK; iş yerlerinde çalışan sağlığı ve performansı üzerinde kritik bir belirleyicidir. İHK'nin istenilen şartları sağlamadığı durumlarda, çalışanlar üzerinde sadece fiziksel rahatsızlıklar yaratmakla kalmaz, aynı zamanda çevresel huzursuzluk gibi psikolojik etkilere de neden olarak iş gücü verimliliğini düşürmektedir [9]. Özellikle ofis ortamlarında ve

eğitim binalarında, yetersiz havalandırma sonucu artan kirletici konsantrasyonları, bireylerin akademik ve zihinsel fonksiyonlarını doğrudan etkilemektedir [10]. Yapılan araştırmalar, yüksek CO₂ seviyelerinin varlığının; yorgunluk, uyku hali ve konsantrasyon eksikliğine yol açtığını göstermektedir [6]. Daha da önemlisi, iç ortamdaki hava kalitesinin istenilen şartlardan uzaklaşması, insanların karar verme yetisi gibi üst düzey bilişsel kabiliyetlerini olumsuz yönde etkilemektedir [2]. Bu durum, modern binalarda sadece konforun değil, aynı zamanda zihinsel performansın ve refahın korunması için İHK yönetiminin hayati bir gereklilik olduğunu ortaya koymaktadır.

2.2. İç Hava Kalitesini Belirleyen Temel Unsurlar

İHK; dış hava kalitesi, havalandırma stratejileri, yapı malzemeleri ve mobilyalar ile kullanıcı dinamikleri ve aktiviteleri nedeniyle etrafa yayılan emisyonların karmaşık etkileşimi sonucunda oluşmaktadır [2, 6].

2.2.1 Dış Hava Kalitesi

Binanın bulunduğu çevredeki dış hava kalitesi, iç mekân havasını belirleyen ve dış çevre ile binanın konumuna göre değişen en temel dış faktörlerden biridir [12]. Trafik yoğunluğu ve karayollarına olan mesafe, özellikle azot dioksit (NO₂) ve partikül madde (PM) sızıntıları açısından iç mekân seviyelerini doğrudan etkilemektedir. Yer altı otoparkları ve metro istasyonları gibi kapalı alanlarda iç ortam partikül madde (PM) seviyeleri genellikle dış ortama göre daha yüksek seyretmektedir. Dış ortamdaki PM_{2.5} seviyeleri, özellikle doğal havalandırılan binalarda iç mekân hava kalitesini doğrudan ve anlamlı şekilde etkilemektedir [13]. Öte yandan, ozon (O₃) seviyeleri, iç mekânda spesifik bir kaynak bulunmadığı sürece dış ortama kıyasla genellikle daha düşük kalmaktadır [7].

2.2.2 Havalandırma Stratejileri

Havalandırma sistemlerinin tasarımında, iç mekândaki kirleticilerin seyreltilmesi ve taze hava sağlanması en önemli amaçtır. Literatürde havalandırma stratejileri; pencerelerin manuel kullanımına dayanan doğal havalandırma, fanlar aracılığıyla sağlanan mekanik havalandırma ve her iki sistemin avantajlarını birleştiren hibrit sistemler olarak sınıflandırılmaktadır [2, 6]. Enerji tasarrufu odaklı sızdırmaz binalarda yeterli havalandırma sağlanmaması, karbondioksit (CO₂) seviyelerinin artmasına ve HBS riskinin yükselmesine neden olmaktadır [1, 5].

2.2.3 Yapı Malzemeleri ve Mobilyalar

Yapı malzemeleri ve mobilyalar; iç mekândaki formaldehit (CH₂O) ve uçucu organik bileşiklerin (VOC) birincil kaynaklarıdır [2, 3]. Duvar kâğıtları, yer döşemeleri ve mobilyalarda kullanılan yapıştırıcılar, binanın ömrü boyunca sürekli gaz çıkışı yoluyla toksik bileşikler salabilmektedir. Araştırmalar, çevre dostu malzemelerin kullanılmasının, özellikle inşaat sonrası ilk aşamalarda toplam VOC emisyonlarını genel malzemelere kıyasla yaklaşık 1,7 kat azaltabildiğini göstermektedir [8]. Taş, beton ve tuğla gibi kagir malzemeler ise iç ortamdaki radyoaktif radon gazı salımının temel kaynağı olarak dikkat çekmektedir [6].

2.2.4 Kullanıcı Dinamikleri ve Aktiviteleri

Bina kullanıcılarının varlığı ve günlük aktiviteleri, kirletici konsantrasyonlarını anlık olarak değiştiren dinamik faktörlerdir [6]. Ayrıca insan vücudu, solunum yoluyla CO₂ salımı yaparken, deri lipidlerinin ozonla reaksiyona girmesi iç ortamdaki VOC yükünün %40'ına kadarını oluşturabilmektedir. Kullanıcıların bina içindeki hareketleri ve yürüme faaliyetleri, zemin yüzeylerine çökmüş partiküllerin tekrar havaya karışmasına (resüspansiyon) neden olarak PM seviyelerini yükseltmektedir [14].

2.3. İç Hava Kirleticileri

İç hava kalitesini etkileyen kirleticiler genel olarak organik, inorganik, biyolojik ve radyoaktif olarak sınıflandırılmaktadır [6]. Bu kirleticilerin konsantrasyonları; dış ortam hava kalitesi, bina kullanıcılarının aktiviteleri ve binada kullanılan malzemelerin emisyon oranlarına bağlı olarak değişkenlik gösterir [2]. Aşağıda bazı kirleticilerle ilgili genel bilgi verilmiştir:

• TVOC (Toplam Uçucu Organik Bileşikler)

Toplam uçucu organik bileşikler (TVOC), iç mekânlarda en yaygın bulunan organik kirleticilerdir ve genellikle temizlik ürünleri, yapıştırıcılar, boyalar ve mobilyalardan yayılırlar [6, 8]. TVOC konsantrasyonları iç mekânlarda dış ortamda olduklarından 10 kat daha yüksek olabilmektedir. Bu bileşiklere maruziyet; göz ve solunum yolu tahrişine, baş ağrısına ve uzun vadede merkezi sinir sistemi hasarına yol açabilmektedir [6, 9]. Yeşil bina standartları TVOC seviyelerini kontrol etmek için çeşitli limitler belirlemiştir; örneğin LEED v4 rehberinde bu sınır 500 µg/m³ olarak kabul edilmektedir [15].

• Partikül Madde (PM)

Partikül maddeler, aerodinamik çaplarına göre PM₁₀ (kaba), PM_{2.5} (ince) ve PM_{0.1} (ultra ince) olarak kategorize edilir. İç mekândaki PM kaynakları arasında pişirme, sigara kullanımı ve dış ortamdan sızan partiküllerin yanı sıra insan hareketine bağlı olarak çökmüş tozların tekrar havalanması (resüspansiyon) yer almaktadır [6, 14]. İnce partiküller (PM_{2.5}), akciğerlerin derinliklerine kadar nüfuz edebildiği için kardiyovasküler hastalıklar ve solunum yolu enfeksiyonları ile doğrudan ilişkilidir [6, 13].

• Karbondioksit (CO₂)

İnorganik bir kirletici olan karbondioksit, temel olarak insan solunumu ve fosil yakıtların yanması sonucunda oluşur ve iç mekânda havalandırma yeterliliğinin ana göstergesi olarak kullanılır [10]. Yüksek CO₂ konsantrasyonları doğrudan zehirli olmasa da 1000 PPM seviyesinin üzerine çıktığında uyuşukluk, baş ağrısı ve konsantrasyon kaybına neden olarak çalışan performansını düşürür [6]. ASHRAE standartları, iç mekân sağlığı için CO₂ seviyesinin 1000 PPM'in altında tutulmasını önermektedir [15].

• Azot Oksitler (NO_x)

Azot oksitler (NO_x), güneş ışığı etkisiyle gerçekleşen fotokimyasal reaksiyonlar sürecinde, ikincil bir kirletici olan troposferik ozonun (O₃) oluşumunu sağlayan temel öncül (prekürsör) inorganik bileşiklerdir. NO_x emisyonlarının dolaylı bir ürünü olan ozonun iç ortamdaki varlığı, hava kalitesi dinamikleri açısından kritik bir öneme sahiptir. Sağlık üzerindeki etkileri açısından ozon; solunum yollarında tahriş, akciğer fonksiyonlarında azalmaya, astım belirtilerinin şiddetlenmesine ve baş ağrısına neden olabilmektedir. İç mekândaki ozon seviyeleri büyük ölçüde dış ortamdan gelen sızıntılara, havalandırma oranlarına ve fotokopi makineleri, lazer yazıcılar veya hava temizleme

cihazları gibi ozon yayan elektrikli ekipmanların varlığına bağlıdır [1, 6]. Ozon ayrıca, yüksek reaktivitesi nedeniyle diğer iç mekân kirleticileriyle etkileşime girme eğilimindedir; örneğin, temizlik ürünlerinde bulunan terpenler ve terpenoidler ile reaksiyona girerek ikincil organik aerosollerin (SOA) ve ultra ince partiküllerin (PM) oluşumuna yol açabilir [1, 14].

• İç Ortam Sıcaklığı

İç ortam sıcaklığı, sadece bina sakinlerinin ısı konforunu sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda yapı malzemelerinden kaynaklanan kirleticilerin emisyon oranlarını doğrudan etkileyerek İHK'yi belirleyen önemli bir fiziksel faktördür. Araştırmalar, iç mekândaki TVOC konsantrasyonunun sıcaklık artışıyla doğru orantılı olduğunu ve yüksek sıcaklıkların bu maddelerin yapı malzemelerinden salımını (gaz çıkışını) hızlandırdığını göstermektedir [8]. Benzer şekilde, havadaki mantar gibi biyolojik kirleticilerin yoğunluğu da sıcaklık artışıyla pozitif bir ilişki sergilemektedir [15]. Sıcaklık ve bağıl nemin kontrol altında tutulması, İHK sorunlarının çözümünde temel bir strateji olarak önerilmekte olup; yeşil bina standartları da bu bağlamda genellikle ASHRAE 55 gibi uluslararası rehberleri referans alarak, iç ortam sıcaklığının mevsimsel koşullara göre insan sağlığı ve konforu için ideal aralıklarda (örneğin 20°C – 26°C) tutulmasını şart koşmaktadır [5].

• Bağıl Nem

Bağıl nem hem kirletici algısını hem de biyolojik kirleticilerin gelişimini etkileyen önemli bir parametredir [6]. Yüksek nem seviyeleri küf, mantar ve bakteri üremesini teşvik ederken; %30-%60 aralığının dışındaki nem değerleri solunum yolu konforunu ve malzeme emisyon dinamiklerini olumsuz etkilemektedir [5, 15].

3. İÇ HAVA KALİTESİ AÇISINDAN YEŞİL BİNA SERTİFİKASYON SİSTEMLERİ ve KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

Bu bölümde öncelikle, ele alınan yeşil bina sertifikasyon sistemlerinden bahsedilmiş ve İHK açısından bu sistemlerin karşılaştırmalı analizi yapılmıştır.

3.1. Yeşil Bina Sertifikasyon Sistemleri

Yeşil bina sertifikasyon sistemleri, binaların çevresel etkilerini azaltmak ve kullanıcı sağlığını korumak amacıyla geliştirilmiş kapsamlı değerlendirme araçlarıdır. Bu çalışma kapsamında en yaygın kullanılan yeşil bina sertifikasyon sistemleri olarak, LEED (ABD), BREEAM (İngiltere), CASBEE (Japonya) uluslararası düzeyde ve YeS-TR (Türkiye) ulusal düzeyde ele alınmıştır.

• LEED (Leadership in Energy and Environmental Design)

1998'de ABD Yeşil Bina Konseyi (USGBC) tarafından geliştirilen dünya genelinde en yaygın tanınan yeşil bina sertifikasyon sistemidir. Binaları; tasarım, inşaat ve işletme aşamalarında enerji verimliliği ve iç mekan kalitesi gibi kriterlere göre puanlayarak Sertifikalı (40-49 puan), Gümüş (50-59 puan), Altın (60-79 puan) ve Platin (80+ puan) olmak üzere dört seviyede derecelendirmektedir. LEED sisteminde İHK, "İç Mekan Çevresel Kalitesi (EQ)" kategorisi altında değerlendirilmektedir. Bu kategori, bina kullanıcılarının sağlığını ve konforunu iyileştirmeyi amaçlamaktadır. [4].

• BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method)

1990'da İngiltere'de kurulan dünyanın ilk sürdürülebilir bina değerlendirme yöntemidir. Bina yaşam döngüsü performansını ölçmek için bilimsel temelli standartlar kullanılmakta ve daha çok

bütünsel sürdürülebilirlik ile enerji yönetimine odaklanmaktadır. BREEAM'de İHK, "Sağlık ve Refah (Hea 02)" kategorisi altında incelenmekte ve bina kullanıcılarının sağlığını, güvenliğini ve konforunu artırmayı hedeflemektedir [16].

- **CASBEE (Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency)**

Japonya'ya özgü sosyal ve kültürel koşulları dikkate alan bir sistemdir. Bina çevresel verimliliğini (BEE) temel alarak, bina içindeki yaşam kalitesini artırırken dış çevresel yükleri azaltmayı hedefleyen CASBEE sisteminde İHK, Bina Çevresel Kalitesi (Q) ana kategorisi altındaki "İç Ortam (Q1)" başlığında değerlendirilmektedir. [17].

- **YeS-TR (Ulusal Yeşil Sertifika Sistemi)**

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından oluşturulan "Ulusal Yeşil Sertifika Sistemi"dir. Türkiye'nin yerel koşullarına ve ihtiyaçlarına uygun olarak geliştirilmiştir. YeS-TR sertifikası; Geçer, İyi, Çok İyi ve Ulusal Üstünlük olmak üzere dört seviyede verilmektedir. YeS-TR Bina Değerlendirme Kılavuzu'na göre İHK, ana modüllerden biri olan İç Ortam Kalitesi (İOK) altında özel bir tema olarak ve Bütünleşik Bina Tasarım, Yapım ve Yönetimi (BBT) modülü altında tasarım süreci kriteri olarak incelenmektedir [18, 19].

3.2. İHK Açısından Yeşil Bina Sertifikasyon Sistemlerinin Karşılaştırmalı Analizi

Yeşil bina sertifikasyon sistemleri, İHK yönetimi için çeşitli standartlar ve limit değerler geliştirmiştir. Ancak, her sertifikasyon sisteminin enerji verimliliği ile iç mekan konforu arasında kurduğu denge, İHK parametrelerine atadığı puan ağırlıkları ve zorunlu tuttuğu teknik kriterler farklılık göstermekte olup; bu çalışmada söz konusu sistemlerin İHK yaklaşımlarının karşılaştırmalı bir analizi sunulmaktadır.

3.2.1.İHK Başlıkları ve Kategorileri Açısından Karşılaştırmalı Analizi

LEED, BREEAM, CASBEE ve YeS-TR sertifikasyon sistemleri; İHK'yi kullanıcı sağlığı ve konforunun ayrılmaz bir parçası olarak görerek kendi değerlendirme sistemlerinde ana kategoriler altında yapılandırmışlardır. Ele alınan tüm sertifikasyon sistemleri doğrultusunda düşük emisyonlu malzeme kullanımı konusunda ortak bir paydada buluşurken, uygulama ve denetim süreçlerinde farklılaşmaktadırlar. LEED ve BREEAM inşaat sürecindeki hava kalitesi yönetimi açısından benzer özellikler göstermektedir ve bu sertifikasyon sistemlerinde bina teslim edilmeden önce İHK ölçümleri/testleri yapılması puan kazandırıcı bir kriterdir. CASBEE ve YeS-TR inşaat aşamasına doğrudan kriter getirmeyip, işletme sürecinde ise zorunlu testler yerine yönetim planları, bakım prosedürleri ve tesis yönetimi stratejilerine ağırlık vermektedir.

Çizelge 1. İHK başlıkları ve kategorileri

	İHK'nin Bulunduğu Ana Kategori	İHK'nin Bulunduğu Alt Kategoriler	Malzeme Seçimi	İnşaat Sürecinde Hava Kalitesi	Test Süreci ve İşletme
LEED (v4/v5)	İç Mekan Çevre Kalitesi (Indoor Environmental Quality – EQ)	İç Mekan Çevre Kalitesi Kategorisindeki 6 kredi	Düşük emisyonlu malzemeler kredisi vardır.	İnşaat sürecinde iç mekan hava kalitesi yönetimi kredisi vardır.	İskan öncesi kirletici giderimi veya doğrulama testleri yapılır. İşletme sürecinde ise CO ₂ seviyesi ve filtre durumu izlenir.
BREEAM	Sağlık ve Sosyal Etki (Health and Social Impact)	Sağlık ve Refah (Health and Wellbeing) Hea 02 kategorisindeki 4 kredi.	VOC Emisyon Düzeyleri (ürünler) ve VOC Emisyon Düzeyleri (inşaat sonrası) olarak iki kredi vardır.	Yönetim Ana Kategorisindeki Sorumlu İnşaat Uygulamaları (Man 03) kredisinde inşaat sahasının çevreye ve şantiye çalışanlarına olan hava kirliliği etkilerini yönetmeyi hedefler.	İskan öncesi İHK'ya yönelik testler/ölçümler yapılır. Yönetim Ana Kategorisindeki Bakım ve Takip (Man 05) kredisinde bina teslimi yapıldıktan sonrası için ilgili maddeler bulunur. İşletme sürecinde ek olarak CO ₂ seviyesi ve filtre durumu izlenir
CASBEE	Yapılı Çevre Kalitesi (Built Environment Quality – Q)	İç Ortam (Indoor Environment Q1) Hava Kalitesi (Air Quality Q1 -4)	Kaynak Kontrolü (Source Control - Q1 - 4.1) kriterinde iç mekan hava kirliliğinin kaynağında önlenmesini hedefler.	Doğrudan bir kategori ya da kriter yoktur.	İskan öncesi zorunlu test ölçümleri yoktur. İşletme Planında (Management Plan Q1-4.3) CO ₂ (Karbondioksit) İzleme, Sigara İçimi ve Duman Kontrolü, Havalandırma Sistemi Temizlik ve Bakımı maddeleri vardır.
YeS-TR	İç Ortam Kalitesi (İOK), Bütünleşik Bina Tasarım, Yapım ve Yönetimi (BBT) ve Yapı Malzemesi ve Yaşam Döngüsü (YMD)	İOK O4 ve BBT 02 K8	Yapı Malzemesi ve Yaşam Döngüsü (YMD) Kategorisinde yer verilmiştir.	Doğrudan bir kategori ya da kriter yoktur.	İskan öncesi zorunlu test ölçümleri yoktur. CO ₂ sensörleri ve BBT 06 İşletme, Bakım, Ölçüm ve Tesis Yönetimi kriteriyle test ve işletme yönelik içerik vardır.

3.2.2.İHK Maddeleri ve Puanlama Sistemleri Açısından Karşılaştırmalı Analizi

LEED, BREEAM, CASBEE ve YeS-TR sertifikasyon sistemleri; İHK'yi sadece seçmeli bir özellik değil, minimum havalandırma performansı veya yönetim planları gibi zorunlu ön koşullara bağladıkları temel bir standart olarak ele almaktadır. Seçmeli İHK maddelerinde ise, tüm sertifikasyon sistemleri düşük emisyonlu malzeme kullanımı ve iyileştirilmiş havalandırma stratejileri üzerinde ortaklaşırken, toplam ağırlık ve puan yaklaşımı bakımından belirgin farklılıklar göstermektedir. LEED tütün dumanı kontrolü zorunluluğu ve yaklaşık %7'lik toplam puan ağırlığı sunarken; BREEAM ve YeS-TR birer zorunlu maddenin yanı sıra %3-4 gibi daha düşük bir oransal ağırlıkla benzerlik göstermektedir. CASBEE diğerlerinden tamamen farklı olarak, doğrudan puan

toplama yerine Bina Çevresel Verimliliği (BEE) oranı hesaplayarak İHK puanları verimlilik katsayısını yükseltmeye yönelik bir yaklaşım kullanmaktadır.

Çizelge 2. İHK maddeleri ve puanlama sistemleri

	Zorunlu [Ön Koşul] İHK Maddeleri	Seçmeli [Kredi] İHK Maddeleri	Toplam Ağırlık / Puan Yaklaşımı
LEED [v4/v5]	-Minimum İHK performansı [havalandırma] -Çevresel tütün dumanı kontrolü	-Düşük emisyonlu malzemeler -İHK değerlendirmesi -İnşaat İHK yönetim planı	Toplam sistem ağırlığının yaklaşık %7'sini oluşturur.
BREEAM	-İç hava kalitesi planı	-Havalandırma -VOC Emisyon Düzeyleri (ürünler) -VOC Emisyon Düzeyleri (inşaat sonrası)	Toplam sistem ağırlığının yaklaşık %3-4'ünü oluşturur.
CASBEE	- Yasal sınırlara uygun malzemeler kullanmak - Minimum mekanik havalandırma	-İleri düzey havalandırma -Düşük emisyonlu malzemeler -İç mekan kimyasal ve kirletici kaynak kontrolü	Puan sistemi yerine BEE (Bina Çevresel Verimliliği) oranı hesaplanır bu nedenle İHK puanları verimlilik katsayısını yükseltir.
YeS-TR	-Hava kalitesi yönetimi	-Düşük emisyonlu malzeme seçimi -Artırılmış havalandırma kapasitesi	Toplam sistem ağırlığının yaklaşık %4'sini oluşturur.

3.2.3.İHK Parametreleri Açısından Karşılaştırmalı Analizi

İç hava kalitesi (İHK) parametrelerinin karşılaştırmalı analizinde sertifikasyon sistemlerinin termal konfor koşulları (sıcaklık ve bağıl nem) söz konusu olduğunda, büyük ölçüde küresel standartlar ekseninde uzlaştığını göstermektedir. Bu bağlamda, CASBEE haricindeki sistemler genel olarak 20–26 °C aralığını konfor bölgesi olarak tanımlarken; CASBEE daha geniş bir yelpazede, 17–28 °C aralığını belirlemiştir. İç hava kirleticilerin yönetiminde ise sistemler arasında metodolojik farklılıklar mevcuttur. CASBEE; TVOC, PM 2.5 ve CO₂ parametreleri için net sayısal eşik değerler tanımlayan kuralcı bir yaklaşım benimsemiştir. LEED TVOC ve PM 2.5 için net sınır değerler sunarken, BREEAM sadece TVOC için değer belirlemiş; ancak bu parametrede incelenen sistemler arasındaki en katı limite sahiptir. Yerel sistem olan YeS-TR'de ise söz konusu kirleticiler için henüz net bir limit değer tanımlanmadığı görülmektedir. Ayrıca CO₂ parametresinde CASBEE dışındaki sistemler kesin limitler yerine referans değerler sunarken, NO_x (azot oksitler) için hiçbir sertifikasyon sisteminde doğrudan İHK odaklı bir limit değer tanımlanmamıştır.

Çizelge 3. İHK parametreleri

	TVOC (µg/m ³)	PM 2.5 (µg/m ³)	CO ₂ (PPM)	NO _x (µg/m ³)	Sıcaklık (°C)	Bağıl Nem (%)
LEED (v4/v5)	<500 (sağlık yapılarında <200)	<12-15 PM 10 (µg/m ³) < 50-20	Belirtilmemiş (Dış ortamdan en fazla +700 ppm daha yüksek olmalıdır referansı alınır)	Belirtilmemiş	20 – 26 (genel) (ASHRAE 55)	%30 – %60 (genel) (ASHRAE 55)
BREEAM	≤ 300	Belirtilmemiş	Belirtilmemiş (Yaklaşık 1000 ppm veya dış ortamdan +600–700 ppm)	Belirtilmemiş	20 – 26 (genel) (Genellikle, ISO 7730 ve EN 15251)	%40 – %70 (genel) (Genellikle, ISO7730)
CASBEE	<400	<15 (yıllık)	<1000 (Yasal zorunluluk)	Belirtilmemiş	17 – 28 (Yasal aralık)	%40 – %70 (Yasal aralık)
YES-TR	Belirtilme miş	Belirtilmemiş	Belirtilmemiş (1000 ppm seviyesini aşmaması beklenir)	Belirtilmemiş	20 – 26 (genel) (TS EN 16798 -1 ve TS EN ISO 7730)	%30 – %70 (genel) (TS EN 16798 -1)

4. SONUÇ ve ÖNERİLER

Sonuç olarak, incelenen tüm sertifikasyon sistemlerinde İHK'ne yer verilmekle birlikte; değerlendirme kapsamı, denetim yaklaşımı ve puanlama metodolojileri bakımından farklılıklar bulunduğu görülmektedir. Sistemlerin ortaklaştığı temel nokta düşük emisyonlu malzeme kullanımının teşvik edilmesi olsa da zorunlu İHK kriterlerinin seçmeli kredilere kıyasla daha sınırlı kaldığı dikkat çekmektedir. Ayrıca yalnızca LEED ve BREEAM'ın inşaat süreci ve kullanım sonrası İHK ölçümlerini değerlendirme sürecine dahil etmesi, performans doğrulaması açısından daha kapsamlı bir yaklaşım sunduklarını göstermektedir. Buna karşın, sertifikalı binaların her zaman yüksek düzeyde iç hava kalitesi sağlayamadığı; kullanım sürecindeki işletme, bakım ve denetim eksikliklerinin Hasta Bina Sendromu gibi sorunlara yol açabileceği anlaşılmaktadır. CASBEE'nin toplam puan yerine Bina Çevresel Verimliliği (BEE) oranını esas alan yapısı onu diğer sistemlerden metodolojik olarak ayırırken, YES-TR ve CASBEE'nin yerel ve ulusal standartlarla daha bütünleşik bir yapı sergilediği görülmektedir. Ancak YES-TR'de İHK parametrelerine ilişkin net limit değerlerin henüz tanımlanmamış olması, sistemin gelişime açık yönlerinden biri olarak değerlendirilebilir.

Sonuçlar incelendiğinde;

- Sertifikasyon sistemlerinin etkinliğinin artırılması adına, inşaat sürecindeki kirlilik önleme kriterleri ile işletme dönemi yönetim planlarının bütünleşik bir yapıda ve zorunlu krediler olarak ele alınması,
- Tüm sertifikasyon sistemlerinde bina ömrü boyunca devam edecek zorunlu parametrik ölçüm, sürekli takip ve düzenli kullanıcı memnuniyeti değerlendirmelerinin standartlara entegre edilmesi ve

- İşletme sürecinde gerçekleşecek mobilya değişimi, boya ve tadilat gibi iç ortam emisyonlarını doğrudan etkileyen müdahalelerde, sertifikasyon sistemi ile koordinasyonun zorunlu kılınması ve malzeme seçim kriterlerinin sürekliliğinin sağlanması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

1. Wei, G., Yu, X., Fang, L., Wang, Q., Tanaka, T., Amano, K., & Yang, X. (2022). A review and comparison of the indoor air quality requirements in selected building standards and certifications. *Building and Environment*, 226, 109709.
2. Mannan, M., & Al-Ghamdi, S. G. (2021). Indoor air quality in buildings: A comprehensive review on the factors influencing air pollution in residential and commercial structure. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(6), 3276.
3. Chang, T., Wang, J., Lu, J., Shen, Z., Huang, Y., Sun, J., Xu, H., Wang, X., Ren, D., & Cao, J. (2019). Evaluation of indoor air pollution during the decorating process and inhalation health risks in Xi'an, China: A case study. *Aerosol and Air Quality Research*, 19, 854–864.
4. U.S. Green Building Council. (n.d.). *LEED rating system*. <https://www.usgbc.org/leed>
5. Elnaklah, R., Walker, I., & Natarajan, S. (2021). Moving to a green building: Indoor environment quality, thermal comfort and health. *Building and Environment*, 191, 107592.
6. Tran, V. V., Park, D., & Lee, Y. C. (2020). Indoor air pollution, related human diseases, and recent trends in the control and improvement of indoor air quality. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(8), 2927.
7. Hwang, S. H., & Park, W. M. (2019). Indoor air quality assessment with respect to culturable airborne bacteria, total volatile organic compounds, formaldehyde, PM10, CO₂, NO₂, and O₃ in underground subway stations and parking lots. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 12, 435–441.
8. Jung, C., Mahmoud, N. S. A., Al Qassimi, N., & Elsamanoudy, G. (2023). Preliminary study on the emission dynamics of TVOC and formaldehyde in homes with eco-friendly materials: Beyond green building. *Buildings*, 13(11), 2847.
9. Wu, P., Fang, Z., Luo, H., Zheng, Z., Zhu, K., Yang, Y., & Zhou, X. (2021). Comparative analysis of indoor air quality in green office buildings of varying star levels based on the grey method. *Building and Environment*, 195, 107690.
10. Schibuola, L., & Tambani, C. (2020). Indoor environmental quality classification of school environments by monitoring PM and CO₂ concentration levels. *Atmospheric Pollution Research*, 11(2), 332–342.
11. Al Mindeel, T., Spentzou, E., & Eftekhari, M. (2024). Energy, thermal comfort, and indoor air quality: Multi-objective optimization review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 202, 114682.
12. Fernández-Agüera, J., Dominguez-Amarillo, S., Fornaciari, M., & Orlandi, F. (2019). TVOCs and PM2.5 in naturally ventilated homes: Three case studies in a mild climate. *Sustainability*, 11(22), 6225.
13. Liu, Z., Yin, H., Ma, S., Jin, G., Gao, J., & Ding, W. (2019). On-site assessments on variations of PM2.5, PM10, CO₂ and TVOC concentrations in naturally ventilated underground parking garages with traffic volume. *Environmental Pollution*, 247, 626–637.

14. Palmisani, J., Di Gilio, A., Viana, M., de Gennaro, G., & Ferro, A. (2021). Indoor air quality evaluation in oncology units at two European hospitals: Low-cost sensors for TVOCs, PM_{2.5} and CO₂ real-time monitoring. *Building and Environment*, 205, 108237.
15. Bayani, M., Mirhoseini, S. H., Koolivand, A., Sarlak, H., Moradzadeh, R., Ghamari, F., Sheykhani, A., & Taheri, A. (2021). Indoor air quality in wards of dental school clinic: Variations of VOCs, CO₂ and airborne particle levels. *Journal of Air Pollution and Health*, 6(3), 171–180.
16. BRE Global Ltd.. (n.d.). *BREEAM certification for sustainable buildings*. <https://www.breeam.com>
17. Institute for Built Environment and Carbon Neutral for SDGs. (n.d.). *CASBEE: Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency*. <https://www.ibecs.or.jp/CASBEE/english/>
18. YeS-TR. (n.d.). *YeS-TR national green building certification system*. <https://www.yes-tr.com>
19. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2021). *Yeşil sertifika bina değerlendirme kılavuzu* (Sürüm 1). T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı.

HACİM İÇİ GÜNEŞİĞİ PERFORMANSINA CAMIN IŞIK GEÇİRME ÇARPANININ ETKİSİ- İSTANBUL OFİS YAPILARI ÖRNEĞİ

Pınar Aydın^{1*}
F. Rengin Ünver²
^{1,2} YTÜ Mimarlık Fakültesi Mimarlık Bölümü
Yıldız Kampüsü, Beşiktaş, İstanbul, 34349

ÖZET

Çağımızda, giderek azalan enerji kaynakları, yükselen enerji maliyetleri ve enerji tüketiminin çevreye olan olumsuz etkileri, özellikle gün boyu kullanılan yapılarda aydınlatma için harcanan yapay enerji açısından mimaride sürdürülebilirlik ve aydınlatmada doğal ışığın daha çok kullanımı konularını gündeme getirmiştir. Nitekim, doğal aydınlatma tasarımlarına yönelik "TS EN 17037+A1:2021: Binalarda Güneşiği" Standardı ile hacimdeki güneşiğin performansı, değişik ölçütler aracılığı ile belirlenebilmektedir. Doğal aydınlatma tasarımında, hacim içi güneşiği performansını etkileyen değişkenlerden biri olan "hacim dışı engeller" yapı yüksekliği yol genişliği ilişkisi açısından, çoğu kez kentin/yerleşimin imar planı/yönetmeliği vb. yasalarla sınırlandırılır. Bu bağlamda, Ülkemizde yürürlükte olan "Planlı Alanlar Tip İmar Yönetmeliği"nden yararlanılarak, İstanbul'da yeni tasarlanacak ofis mekanlarındaki güneşiği özelliklerinin değişimini inceleyen bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bildiride, söz konusu yönetmelik verileri doğrultusunda iki farklı yol genişliği için bitişik nizam yapılaşmalı bir yerleşimde, farklı yükseklikteki iki ofis yapısının, tüm katlarındaki aynı boyutlardaki çalışma mekanları "iki saydamlık oranı, pencerenin dört ana yöne bakma ve üç farklı cam ışık geçirme çarpanı" senaryoları ile güneşiği özellikleri açısından, TS EN 17037 Binalarda Güneşiği Standardı'nın ölçütleri bakımından incelenmiştir. Pencere ışık geçirme çarpanlarının, ofis güneşiği performansına etkisine ilişkin optimum sonuç veren senaryolar belirlenmiştir. Böylelikle, ofis mekanları için hacme giren güneşiğin performansının binanın mimari tasarım aşamasında belirlenerek yapay aydınlatmada harcanacak enerjinin azaltılması konusuna katkı sağlayacak bilgiler ortaya konulmuştur.

Anahtar kelimeler: Ofis, Güneşiği, TS EN 17037+A1:2021, Planlı Alanlar Tip İmar Yönetmeliği, Işık Geçirme Çarpanı.

THE EFFECT OF LIGHT TRANSMITTANCE FACTOR ON THE PERFORMANCE OF DAYLIGHT IN OFFICE BUILDINGS, ISTANBUL

ABSTRACT

In today's world, the decreasing availability of energy resources, rising energy costs and the detrimental environmental effects of energy consumption have brought the importance of sustainability in architecture and the increased use of natural light to the forefront, particularly regarding the artificial energy expended for lighting in buildings that are used throughout the day. Indeed, the TS EN 17037+A1:2021: Daylight in Buildings' standard for natural lighting design allows daylight performance in a space to be determined by various criteria. One of the variables affecting daylight performance inside a space is external obstructions, which are often limited by laws such as city/settlement zoning plans/regulations in terms of the relationship between building height and road width. In this context, a study was conducted to examine changes in daylight characteristics in newly designed office spaces in Istanbul, using the "Municipal Type Town Planning Code" currently in force in Turkey. The paper examined the daylight characteristics of two office buildings of different heights, with workspaces of the same size on all floors, in a settlement with adjacent buildings. It was based on the data in the regulations mentioned above and the criteria of TS EN 17037 Daylight

^{1*} pinarsanli@gmail.com ^{2*} renginunver@gmail.com

Standard in Buildings. The paper used scenarios of "two transparency ratios, windows facing four main directions, and three different glass light transmission factors." The effect of window light transmission coefficients on office daylight performance was found to be optimised in certain scenarios. Thus, information was presented that will contribute to reducing energy consumption for artificial lighting by determining daylight performance in office spaces during the architectural design phase.

Keywords: Daylight, TS EN 17037+A1:2021, Municipal Type Town Planning Code, Office, Light Transmittance Factor.

1. GİRİŞ

Günümüzde, genelde 25-65 yaş aralığında çok geniş bir kullanıcı kitlesi, gününün önemli bir bölümünü ofislerde geçirmektedir. Günışığının etkin olduğu saatlerde yoğun olarak kullanılan ofisler tasarlanırken aydınlatma başta olmak üzere tüm fizik ortam öğelerine (ışık, ısı, ses vb.) ilişkin konfor koşulları, sürdürülebilirlik ve etkin enerji kullanımı da göz önünde tutulmalıdır. Mimari aydınlatmada pasif sistem olarak doğal aydınlatmanın kullanımı, binalarda gerekli görsel konfor koşullarının sağlanması ve bina yapay aydınlatma enerjisi gereksinimlerinin en aza indirgenmesi açılarından son derece önemlidir [1]. Binalarda pasif sistem olarak günışığı kullanımına yönelik performans ölçütlerinin tanımlandığı standart **(TS EN:17037+A1: 2021)**, binalarda günışığı performansının değerlendirilmesi hedefiyle belirlenen ölçütleri ve günışığı performans değerlendirmesinde kullanılabilecek yöntemleri içermektedir [2]. Günışığı performansını etkileyen önemli bir değişken olan “hacim dışı engeller” boyut ve konumlarına bağlı olarak dolaysız güneş ve gök ışığının hacme girmesini engelleyerek günışığı aydınlık düzeyinin düşmesine yol açarken, güneş, gök ve yerden üzerlerine gelen ışıkları yansıtarak hacim içi aydınlık düzeyine belli oranda katkıda bulunurlar. Hacim dışı engeller ve hacmin içinde yer aldığı binanın boyut ve konumu çoğu kez kentin/ yerleşimin imar planı/yönetmeliği vb. yasalarla sınırlandırılır [3]. Bu bağlamda İstanbul’da bitişik nizam bir yerleşimde yer alan ofis yapıları için farklı bina yükseklikleri, engel uzaklıkları, saydamlık oranları, pencere yönleri ve cam özelliklerinin hacme giren günışığı performansına etkisini saptamak amacıyla bir çalışma gerçekleştirilmiştir [4]. Bu bildiride özellikle ofis işlevli mekân pencerelerinde farklı **ışık geçirme çarpanına** sahip camların kullanılması durumu ele alınmış ve **TS EN:17037+A1: 2021** uyarınca günışığı performansının bulguları sunulmuştur. Söz konusu çalışmanın yöntem ve kabulleri aşağıdaki bölümde sunulmuştur.

2. ÇALIŞMANIN YÖNTEMİ VE KABULLER

Ülkemizde yürürlükte olan **Planlı Alanlar Tip İmar Yönetmeliği** doğrultusunda, bitişik nizam yapılaşma koşullarında İstanbul’da yeni tasarlanacak ofis yapılarındaki mekânların günışığı performansının, pencere camı ışık geçirme çarpanına bağlı değişiminin **TS EN 17037+A1:2021 “Binalarda Günışığı Standardı”** uyarınca incelenmesi ve değerlendirilmesi amaçlayan çalışmanın yöntemi aşağıdaki gibi sıralanmış ve Şekil 1’de akış şeması ile gösterilmiştir.

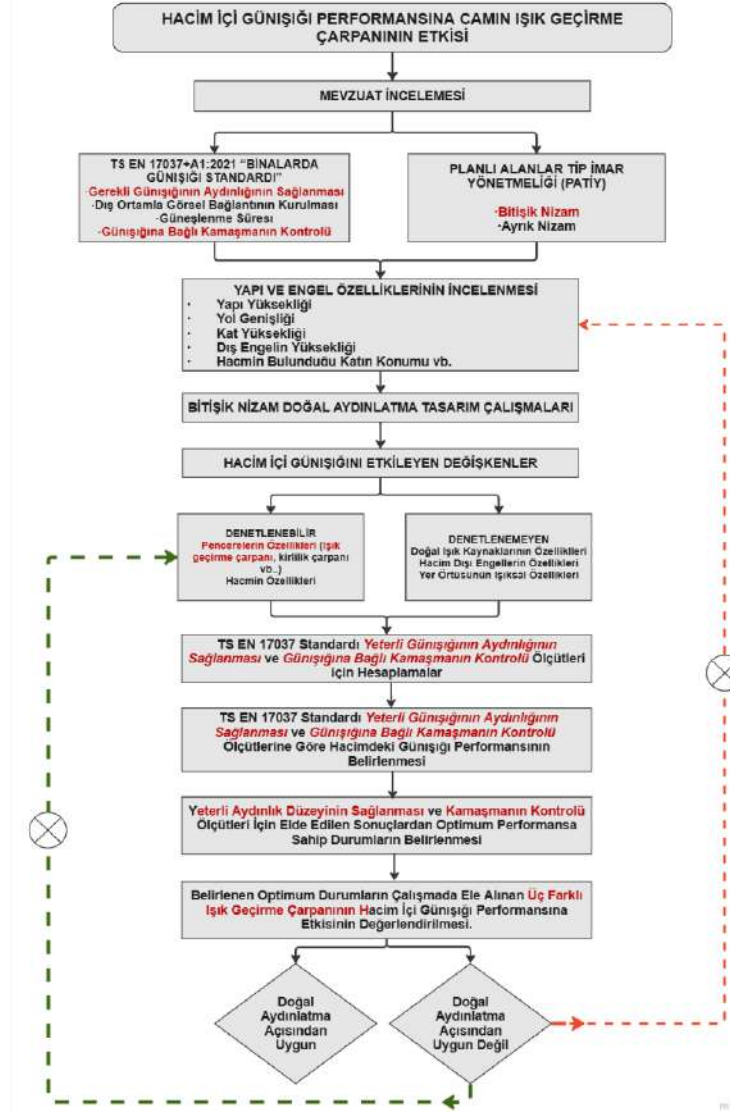
- ✓ İmar yönetmeliğinde verilen yol genişliği ve bina yükseklikleri aracılığı ile yapı dışı engel boyut ve konumlarının belirlenmesi,
- ✓ Ofis mekanının boyut, iç yüzey ışık yansıtma çarpanı vb. özelliklerinin sınırlandırılması,
- ✓ Ofis mekanındaki pencerelerin yön ve özelliklerinin tanımlanması,
- ✓ Yapılan belirleme, sınırlandırma ve tanımlanmalar doğrultusundaki kabuller için hacimdeki günışığı performansının “TS EN 17037+A1:2021 Binalarda Günışığı” standardında yer alan

“Yeterli Aydınlık Düzeyinin Sağlanması” ve “Kamaşmanın Kontrolü” ölçütlerine göre belirlenmesi,

✓ “Yeterli Aydınlık Düzeyinin Sağlanması” ve “Kamaşmanın Kontrolü” ölçütleri için elde edilen sonuçlardan optimum performansa sahip durumların belirlenmesi,

✓ Belirlenen optimum durumların çalışmada ele alınan üç farklı ışık geçirme çarpanının hacim içi günışığı performansına etkisinin değerlendirilmesi.

Şekil 1. Ofis yapılarında hacim içi günışığı performansına camın ışık geçirme çarpanının etkisi akış diyagramı



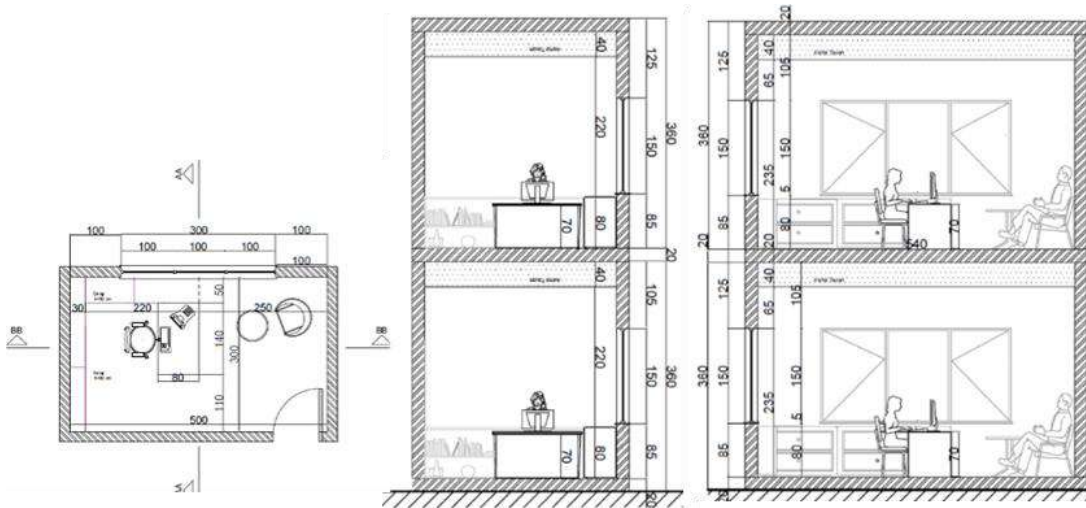
Türkiye ve uluslararası örneklerdeki bitişik nizam cadde genişlikleri ile yapı yüksekliklerinin karşılaştırmalı incelenmesi sonucunda, ticaret aksı niteliğindeki işlek yolların “cadde” olarak tanımlandığı, bu yolların genişliklerinin genellikle 20–25 m aralığında olduğu, 30 m’yi aşanların ise “bulvar” olarak nitelendirildiği belirlenmiştir. Bu bilgiler ile ülkemizde yürürlükte olan “Planlı Alanlar Tip İmar Yönetmeliği” (PATİY)’de bitişik nizam yapılar için azami yol genişliği azami-yapı yüksekliği ilişkisine ait bilgiler incelenmiştir [4]. Çalışma kapsamında, yol genişliği (engel uzaklığı), yapı yüksekliği (katsayısı) değerlerinin “Planlı Alanlar Tip İmar Yönetmeliği” nde yer

alan yol genişliğine ilişkin sınırlamalar bağlamında 2 engel uzaklığı (EU:7.00 m ve 25.00 m) ve 2 engel yüksekliği (EH: 7.2 m ve 28.8 m) olarak kullanılmasına karar verilmiştir [5].

Ofis yapısındaki çalışma mekanlarının genişliği (OG) 5.00 m, derinliği (OD) 3.00 m, döşeme üstü ile tavan altı arası uzaklığı 3.60 m, asma tavan yüksekliği 0.40 m ve net kat yüksekliği 3.00 m olarak kabul edilmiştir. Hacimdeki iç yüzeylerin ışıksal özellikleri, ışık yansıtma biçimi açısından mat, renksel özellik açısından tırsüz, tavan ışık yansıtma çarpanı (RT) 0.70, duvar ışık yansıtma çarpanı (RD) 0.50, döşeme ışık yansıtma çarpanı 0.20 (RDO) olarak varsayılmıştır [3]. Güneş kontrol elemanı bulunmayan alüminyum doğramalı pencerede ışık geçirme çarpanı değişik üç ayrı çift cam (IGÇ; 0.4, 0.6 ve 0.8) yer almaktadır. Ofis yapısı ve yapı dışı engellerin birbirine paralel, sürekli ve eşit yüksekte olduğu kabul edilmiştir. Şekil 2’ de görüldüğü üzere, ele alınan ofis hacminde, 3.00 m genişliğinde 1.50 m yüksekliğinde, saydamlık oranı (SO) 0.30 olan, hacim eksenine göre simetrik bir adet pencere bulunduğu varsayılmıştır. Pencere parapet yüksekliği 0.85 m, duvar kalınlığı (DK) 0.20 m dir. Pencerelemlerin Kuzey, Doğu, Güney ve Batı olmak üzere dört ana yöne baktığı durumlar incelenmiştir.

Hacim içi aydınlık dağılımının belirlenmesine yönelik olarak gözleme noktası konumları için döşemeden 0.85 m yükseklikteki yatay çalışma düzleminde TS EN 17037+A1:2021 ve TS EN 12464-1’te belirtilen ızgara sistemi kullanılmıştır. Hesaplamalarda kamaşma kontrolü ölçütü için 3m*5m ofis için 3 adet olarak belirlenen gözlemcilerin konum açısından döşemeden 1.2 m yükseklikte ve 4 ana yöne (Kuzey, Güney, Doğu, Batı) baktığı, dış engellerin ışık yansıtma çarpanının (RE) 0.30 olduğu kabul edilmiştir. Çalışma kapsamında ele alınan ve hesaplamalarda kullanılan temel kabuller toplu olarak Çizelge 1’de sunulmuştur.

Bildiri kapsamında, tüm katlardaki çalışma mekânlarının incelenmesi amacıyla toplam 120 senaryo oluşturulmuştur. Senaryoların çok sayıda parametre ve farklı kombinasyonlar içermesi, analiz sürecinde kavramsal ve sayısal karmaşıklığın yönetilmesini gerekli kılmıştır. Bu nedenle, senaryoların sistematik biçimde tanımlanması, karşılaştırılması ve değerlendirilmesi amacıyla yapılandırılmış bir kısaltma ve kodlama sistemi geliştirilmiştir. Bu kapsamda kullanılan kısaltma ve kodlamalara ilişkin bilgiler Çizelge 2’te sunulmuştur.



Şekil 2. Ofis çalışma mekanına ilişkin plan ve kesitler

Çizelge 1. Çalışma kapsamında ele alınan ve hesaplamalarda kullanılan temel kabuller

KULLANILAN TEMEL KABULLER	Şehir	İstanbul	Güneş Kontrol Elemanı	Yok	Döşeme Işık Yansıtma Çarpanı (RDO)	0,3
	Engel Yüksekliği (EH)	7,2 m 28.8 m	Oda Yüksekliği (OH)	3m	Tavan Yansıtma Çarpanı (Rt)	0,7
	Yön	K, G, D, B	Saydamlık Oranı (SO)	0,3	Duvar Yansıtma Çarpanı (RD)	0,5
	Engel Uzaklığı (EU)	7m ,25m	Pencere Yüksekliği (PH)	1,5m	Cam Işık Geçirme Çarpanı (IGÇ)	0.8,0.6,0.4 (6mm çift cam+13mm hava boş.)
	Engel Işık Yansıtma Çarpanı (RE)	0,3	Pencere Genişliği (PG)	3m	Cam Kirlilik Çarpanı (CK)	0,8
	Yer Örtüsü Işık Yansıtma Çarpanı (RY)	0,2	Parapet Yüksekliği	0,85m	Çalışma Düzlemi Yüksekliği (EH)	0,85m ve 1,2m
	Oda Genişliği/Derinliği (OG/OD)	5mx3m	Lento Yüksekliği (LH)	0,65 m ve 0,15 m	Çalışma Düzlemi Izgara Aralığı	0,67 m X 0,44 m
	Duvar Kalınlığı (DK)	0.2	Doğrama Kalınlık Çarpanı (DC)	0.85	İç Yüzeyler Kirlilik Çarpanı (BKK)	0.9

Çizelge 2. Çalışmada kullanılan kısaltma ve kodlamalar.

ŞEHİR	YÖN			IŞIK GEÇİRME ÇARPANI (IGÇ)	SAYDAMLIK ORANI (SO)	YAPININ KAT KAT SAYISI, ENGEL UZAKLIK VE YÜKSEKLİĞİNE GÖRE KODU		KAT KONUM KODU	
İSTANBUL	İST	KUZEY	K	0.8	0.3	2 KATLI YAPI: 7m Yol Genişliği/7,2 m Engel Yüksekliği	Y2	GİRİŞ KAT	K0
		GÜNEY	G	0.6				1.KAT	K1
		DOĞU	D	0.4		8 KATLI YAPI: 25m Yol Genişliği/28,8 m Engel Yüksekliği	Y8	2.KAT	K2
		BATI	B					3.KAT	K3
KODLAMAYA İLİŞKİN ÖRNEK AÇILIMLAR/SENARYOLAR								4.KAT	K4
İST-K-IGÇ 0.8-SO 0.3-Y2-K0: İstanbul -Kuzey Cephe-Işık Geçirme Çarpanı 0.8-Saydamlık Oranı 0.3 -2 Katlı Yapı Y2 -Giriş Kat K0								5.KAT	K5
İST-D-IGÇ 0.4- SO 0.3-Y8-K4: İstanbul- Doğu Cephe-Işık Geçirme çarpanı 0.4 -Saydamlık Oranı 0.3- 8 Katlı Yapı Y8 4.Kat K4								6.KAT	K6
								7.KAT	K7

3. ARAŞTIRMA VE ANALİZ

“TS EN 17037+A1:2021 Binalarda Güneşli Standardı”nda yer alan güneşli aydınlığı konusu, çalışmada ülkemizde yürürlükte olan “Planlı Alanlar İmar Yönetmeliği/Bitişik Nizam Yapılar” uyarınca İstanbul gök koşulları için ofis işlevi bağlamında ele alınmıştır. Söz konusu ofis mekanlarında hacim içine giren güneşli performansında farklı ışık geçirme çarpanına ait pencerelerin durumunun etkisini inceleyebilmek adına pencerelerin Kuzey, Doğu, Güney ve Batı olmak üzere dört ana yöne baktığı durumlar standartta yer alan,

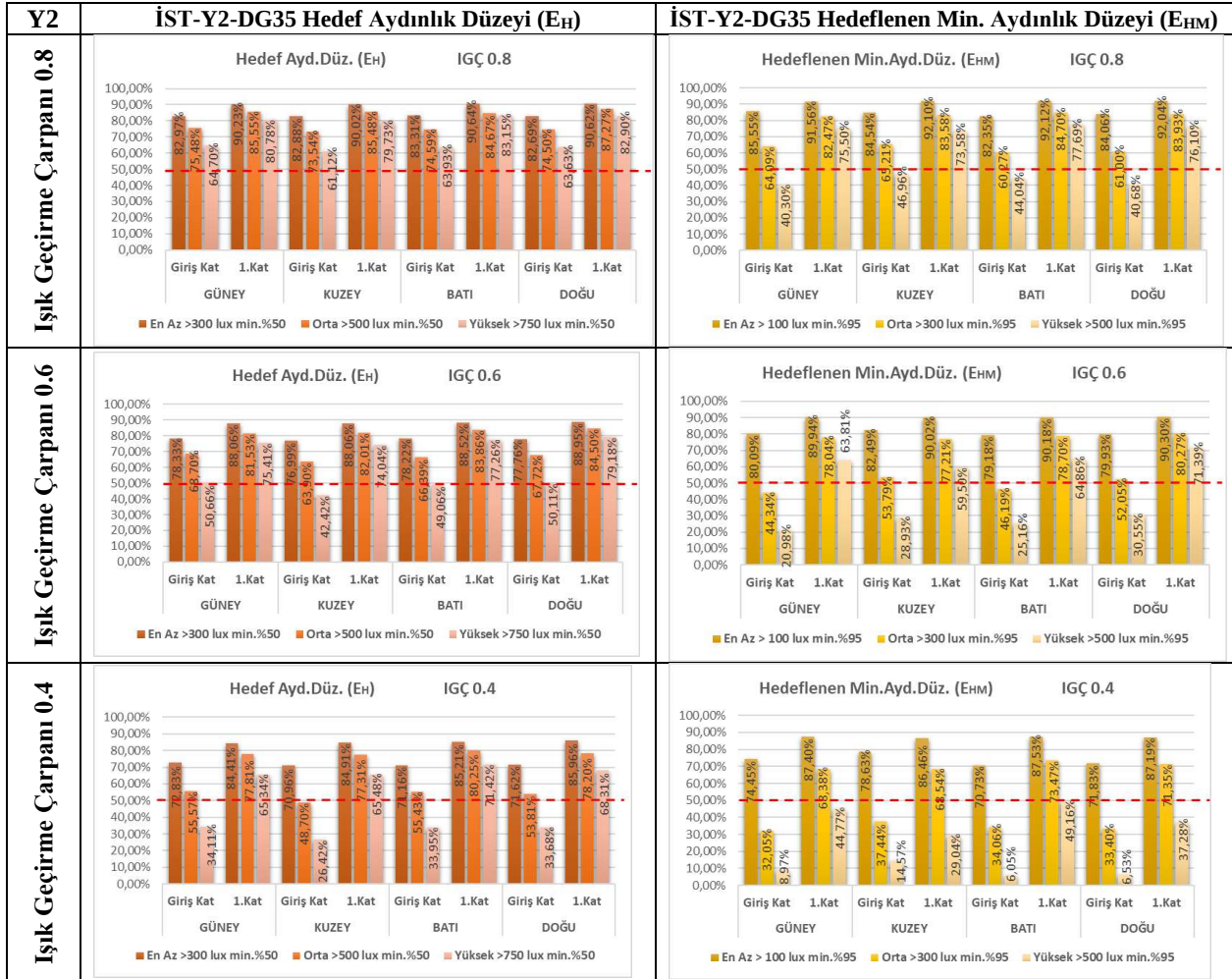
- Yeterli güneşli aydınlığının sağlanması,
- Güneşliye bağlı kamaşmanın kontrolü

başlıklı iki ölçüt için incelenmiştir. Bu bağlamda, İstanbul koşullarındaki ofis yapısında Y2 (2 katlı) yapı için 24, Y8 (8 katlı) yapı için ise 96 olmak üzere toplam 120 senaryo oluşturulmuştur [5].

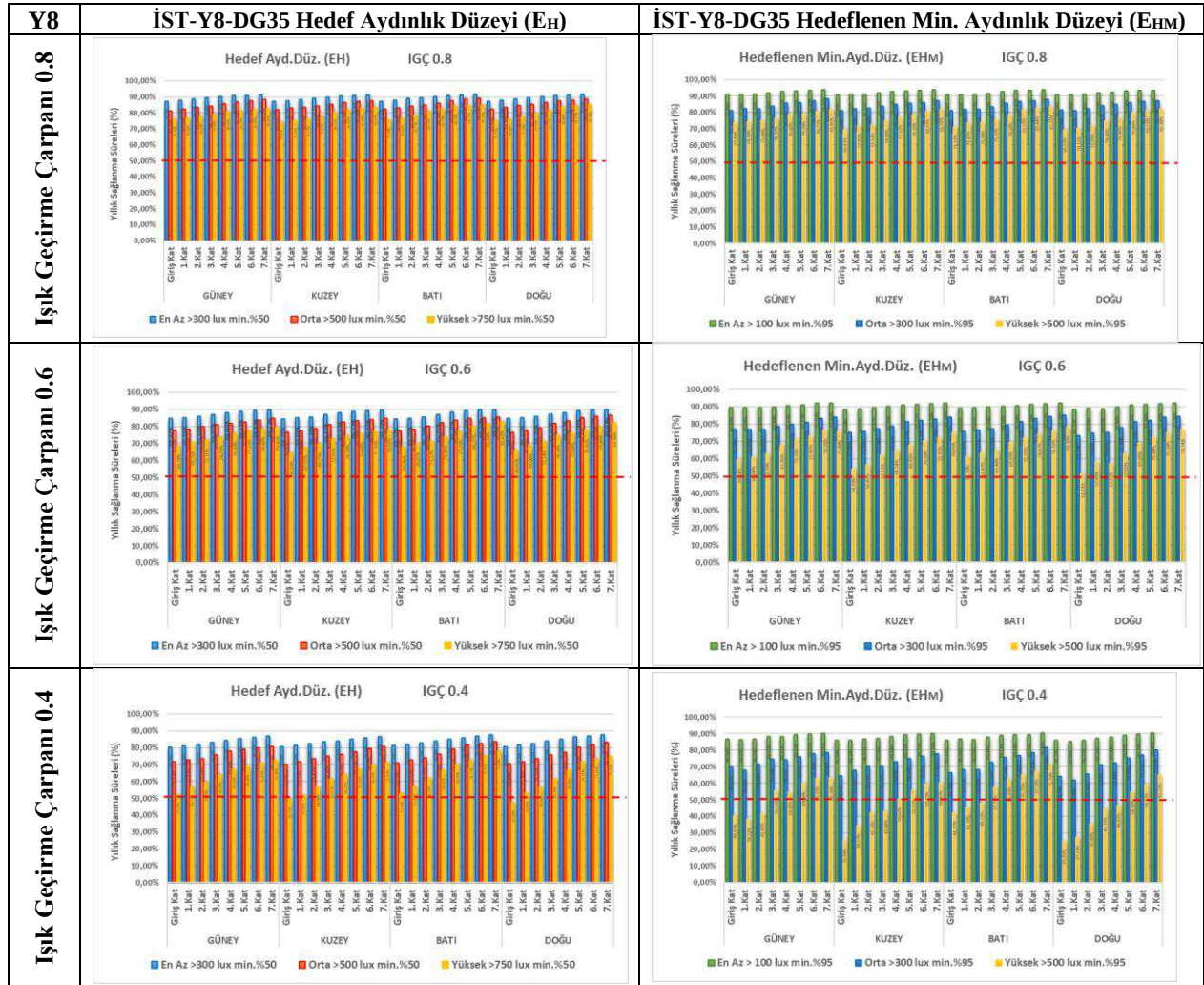
3.1. Yeterli Güneşli Aydınlığının Sağlanması

İstanbul’da bitişik nizam, 2 ve 8 katlı (Y2 ve Y8) yapıların 3m*5m (DG35) hacim boyutlarındaki ofis çalışma mekanlarının dört pencere yönü (K, D, G, B) ve bir saydımlık oranı (SO; 0.3) durumları ele alınarak, **üç farklı ışık geçirme çarpanı (IGÇ: 0.8, 0.6, 0.4)** için, hacim içi hedef (E_H) ve hedeflenen minimum aydınlık düzeylerinin (E_{HM}) mekânda yıllık sağlanma süreleri, İstanbul’un meteorolojik verilerini dikkate alan Rhinoceros 3D ortamında çalışan Climate Studio [7] [8] simülasyon aracı kullanılarak Çizelge 1 ‘de yer alan temel kabuller bağlamında hesaplamalar gerçekleştirilmiştir [4]. Sonuçlar Y2 (2 Katlı yapı) için Çizelge 3’ de Y8 (8 Katlı yapı) için ise Çizelge 4’te gösterilmiştir.

Çizelge 3. Hedef (E_H) ve hedeflenen minimum (E_{HM}) aydınlık düzeylerinin İST-DG35-Y2- G, K, B, D için her kattaki çalışma mekânlarında yıllık sağlanma süresinin IGÇ 0.8, 0.6 ve 0.4’e göre değişimi (%)



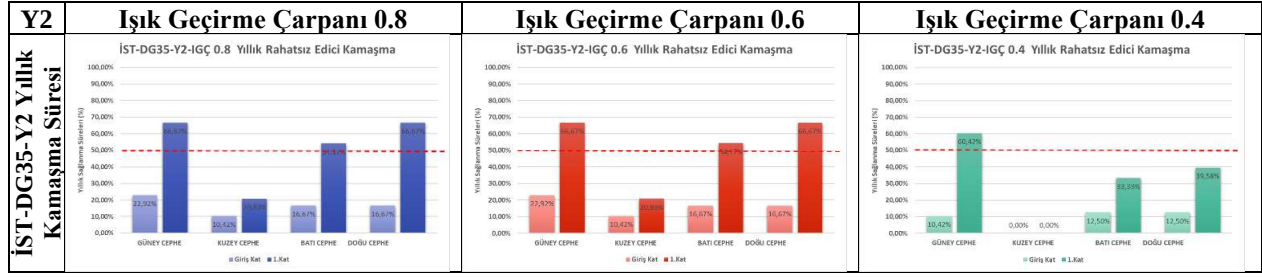
Çizelge 4. Hedef (E_H) ve hedeflenen minimum (E_{HM}) aydınlık düzeylerinin İST-DG35-Y8- G,K,B,D için her kattaki çalışma mekânlarında yıllık sağlanma süresinin IGÇ 0,8,0,6 ve 0,4'e göre değişimi (%)



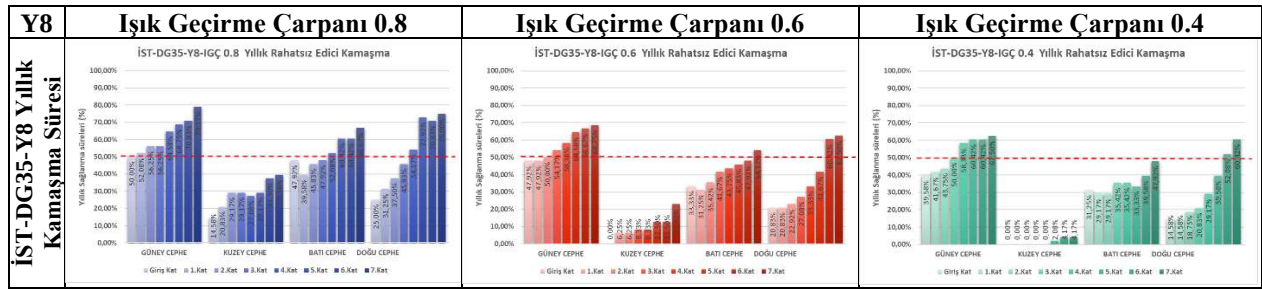
3.4. Güneşliğine Bağlı Kamaşmanın Kontrolü

İstanbul da bitişik nizam konumlanmış, 2 (Y2) ve 8 katlı (Y8) yapıların 3m*5m (DG35) hacim boyutlarındaki ofis çalışma mekânlarının , dört pencere yönü (K, D, G, B) , bir saydımlık oranı (SO, 0,3) durumları ele alınarak, **üç farklı ışık geçirme çarpanı (IGÇ 0,8, 0,6, 0,4)** için, güneşliği kamaşma olasılığı değerleri, İstanbul'un meteorolojik verilerini (TMY 2004-2018) dikkate alan Rhinoceros 3D ortamında çalışan Climate Studio simülasyon aracı kullanılarak Çizelge 1 'de yer alan temel kabuller bağlamında hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. simülasyon programı kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplamalarda haftanın beş iş günü 8:00-18:00 saatleri (10 saat/gün, 2600 saat/yıl) baz alınarak, referans sürenin en fazla 130 saatinde (referans sürenin %5 i) DGP > %38 (rahatsız edici kamaşma) değerini aşan ve aşmayan durumlar belirlenmiştir [7]. Bu sebeple güneşliğine bağlı kamaşmanın kontrolü ölçütü için, $DGP \leq 38$ olduğu durumlar rahatsız edici kamaşmaya sebebiyet vermediğinden olumlu olan her durum için orta derece kabul edilmiştir. Belirlenen yıllık güneşliği kamaşma olasılığı değerlerinin, her kattaki çalışma mekânlarında yıllık sağlanma süresi (%) 2 katlı yapı (Y2) için Çizelge 5'de 8 katlı yapı (Y8) için ise Çizelge 6'da sunulmuştur.

Çizelge 5. Yıllık Güneşli Kamaşma Olasılığı Değerlerinin İST-DG35-Y2- K, D, G, B İçin Her Kattaki Çalışma Mekanlarında Yıllık Sağlanma Süresinin IGÇ 0.8,0.6,0.4'e Göre Değişimi (%)



Çizelge 6. Yıllık Güneşli Kamaşma Olasılığı Değerlerinin İST-DG35-Y8- K, D, G, B İçin Her Kattaki Çalışma Mekanlarında Yıllık Sağlanma Süresinin IGÇ 0.8,0.6,0.4'e Göre Değişimi (%)



4. BULGULAR

Bildiri kapsamında ele alınan kabuller doğrultusunda, “TS EN 17037+A1:2021 Binalarda Güneşli Standardı” nda verilen “Yeterli Aydınlık Düzeyinin Sağlanması” ve “Kamaşmanın Kontrolü” ölçütleri uyarınca **pencere camı ışık geçirime çarpanının 0.8** olduğu durumlarda Y2 (2 katlı yapı) için 8 adet, Y8 (8 katlı yapı) için ise 32 adet olmak üzere toplam 40 senaryo değerlendirilmiştir. Değerlendirmeler söz konusu 40 senaryonun hiçbirinde her iki ölçütü sağlayan “optimal sonuç” veren durum olmadığını göstermektedir.

İstanbul’da yer alan ofis binası mekanları (Y2-DG35 ve Y8-DG35) için oluşturulan toplam 120 senaryodan, TS EN 17037+A1:2021 “Yeterli Güneşli Aydınlanmanın Sağlanması” ve “Güneşli Bağı Kamaşmanın Kontrolü” ölçütlerine, uygunluk gösteren/optimum olan 20 senaryonun durumları belirlenmiş ve Çizelge 7’de sağlanma dereceleri sunulmuştur.

Çizelge 7. Ofis yapıları için TS EN 17037+A1:2021 “Binalarda Güneşli Standardı” “Yeterli Aydınlık Düzeyinin Sağlanması (E_{HM}, E_H)” ve “Kamaşmanın Kontrolü (DGP)” ölçütleri uyarınca Belirlenen Optimum 20 Senaryo

İstanbul Y2 ve Y8 DG35 İçin Belirlenen Optimum 20 Senaryo			Yeterli Aydınlık Düzeyinin Sağlanması/		Güneşli Bağı Kamaşmanın Kontrolü (DGP)
			Hedeflenen Min. Ayd. Düzeyi; E _{HM}	Hedef Aydınlik Düzeyi; E _H	
Y2 (2 Katlı Yapı)	IGÇ 0.6	1. İST-DG35-K-SO 0,3-IGÇ 0,6-Y2-K0	En Az	Yüksek	Rahatsız Edici Kamaşma Yok
		2. İST-DG35-K-SO 0,3-IGÇ 0,6-Y2-K1	En Az	Yüksek	Rahatsız Edici Kamaşma Yok
		3. İST-DG35-D-SO 0,3-IGÇ 0,6-Y2-K0	Orta	Yüksek	Rahatsız Edici Kamaşma Yok
		4. İST-DG35-B-SO 0,3-IGÇ 0,6-Y2-K0	Orta	Orta	Rahatsız Edici Kamaşma Yok
	IGÇ 0.4	5. İST-DG35-K-SO 0,3-IGÇ 0,4-Y2-K1	Orta	Yüksek	Rahatsız Edici Kamaşma Yok
		6. İST-DG35-K-SO 0,3-IGÇ 0,4-Y2-K0	En Az	En Az	Rahatsız Edici Kamaşma Yok
		7. İST-DG35-G-SO 0,3-IGÇ 0,4-Y2-K0	En Az	Orta	Rahatsız Edici Kamaşma Yok
		8. İST-DG35-D-SO 0,3-IGÇ 0,4-Y2-K0	En Az	Orta	Rahatsız Edici Kamaşma Yok
		9. İST-DG35-B-SO 0,3-IGÇ 0,4-Y2-K0	En Az	Orta	Rahatsız Edici Kamaşma Yok
		10. İST-DG35-B-SO 0,3-IGÇ 0,4-Y2-K1	Orta	Yüksek	Rahatsız Edici Kamaşma Yok
Y8 (8 Katlı Yapı)	IGÇ 0.6	11. İST-DG35-K-SO 0,3-IGÇ 0,6-Y8-K0	Yüksek	Yüksek	Rahatsız Edici Kamaşma Yok
		12. İST-DG35-K-SO 0,3-IGÇ 0,6-Y8-K1	Yüksek	Yüksek	Rahatsız Edici Kamaşma Yok
		13. İST-DG35-K-SO 0,3-IGÇ 0,6-Y8-K2	Yüksek	Yüksek	Rahatsız Edici Kamaşma Yok
	IGÇ 0.4	14. İST-DG35-K-SO 0,3-IGÇ 0,4-Y8-K0	Orta	Orta	Rahatsız Edici Kamaşma Yok
		15. İST-DG35-K-SO 0,3-IGÇ 0,4-Y8-K1	Orta	Yüksek	Rahatsız Edici Kamaşma Yok
		16. İST-DG35-K-SO 0,3-IGÇ 0,4-Y8-K2	Orta	Yüksek	Rahatsız Edici Kamaşma Yok
		17. İST-DG35-K-SO 0,3-IGÇ 0,4-Y8-K3	Orta	Yüksek	Rahatsız Edici Kamaşma Yok
		18. İST-DG35-K-SO 0,3-IGÇ 0,4-Y8-K4	Yüksek	Yüksek	Rahatsız Edici Kamaşma Yok
		19. İST-DG35-K-SO 0,3-IGÇ 0,4-Y8-K5	Yüksek	Yüksek	Rahatsız Edici Kamaşma Yok
		20. İST-DG35-K-SO 0,3-IGÇ 0,4-Y8-K6	Yüksek	Yüksek	Rahatsız Edici Kamaşma Yok

5.GENEL DEĞERLENDİRME

Bildiride, ülkemizde yürürlükte olan "Planlı Alanlar Tip İmar Yönetmeliği" doğrultusunda, bitişik nizam yapılaşma durumunda, İstanbul’da yeni tasarlanacak ofis yapısı mekanlarındaki güneşli performansının, pencere cam ışık geçirme çarpanına göre değişiminin TS EN 17037+A1:2021 "Binalarda Güneşli Standardı" nın yeterli güneşli aydınlığının sağlanması ve güneşli bağı kamaşmanın kontrolü ölçütleri uyarınca incelenmesi ve değerlendirilmesini amaçlayan bir çalışma ele alınmıştır. Çalışmada İST-Y2-DG35 ve İST-Y8-DG35 için yapılan hesaplamalara ilişkin değerlendirmeler, pencerelerin üç farklı ışık geçirme çarpanına sahip olma durumuna göre gerçekleştirilmiştir. Yeterli güneşli toplamda kaç senaryoda hangi derecede sağlandığı üç farklı ışık geçirme çarpanına göre 2 katlı yapı (Y2) için Çizelge 8’de, 8 katlı yapı (Y8) için ise

Çizelge 9 'da gösterilmiştir. Rahatsız edici kamaşmanın kontrolünün sağlanan ve sağlanmayan toplam senaryolar ise Çizelge 10'da sunulmuştur.

Çizelge 8. İST-Y2-DG35 İçin Üç Farklı Işık Geçirme Çarpanı (t; IGÇ) 0.8, 0.6 ve 0.4'e Göre Yeterli Günişliğinin Hangi Derecede Sağlandığını Gösteren Toplam Senaryo Sayıları

YETERLİ GÜNIŞİĞİNİN SAĞLANMASI		t= 0.8 (IGÇ 0.8)	t= 0.6 (IGÇ 0.6)	t= 0.4 (IGÇ 0.4)
Hedeflenen minimum aydınlık düzeyi (E_{HM}) ve hedef aydınlık düzeyi (E_H) dereceleri				
$E_{(HM)}+E_{(H)}$ En Az	İST-Y2-DG35 (Toplam 24 Senaryo)	0	0	1
$E_{(HM)}+E_{(H)}$ Orta		0	2	0
$E_{(HM)}+E_{(H)}$ Yüksek		4	3	0
$E_{(HM)}$ En Az + $E_{(H)}$ Orta		0	0	3
$E_{(HM)}$ En Az + $E_{(H)}$ Yüksek		0	2	0
$E_{(HM)}$ Orta + $E_{(H)}$ Yüksek		4	1	4
$E_{(HM)}$ Sağlanmıyor + $E_{(H)}$ En Az		0	0	0
$E_{(HM)}$ En Az + $E_{(H)}$ Sağlanmıyor		0	0	0
$E_{(HM)} + E_{(H)}$ Sağlanmıyor		0	0	0

Çizelge 9. İST-Y8-DG35 İçin Üç Farklı Işık Geçirme Çarpanı (IGÇ) 0.8, 0.6 ve 0.4'e Göre Yeterli Günişliğinin Hangi Derecede Sağlandığını Gösteren Toplam Senaryo Sayıları

YETERLİ GÜNIŞİĞİNİN SAĞLANMASI		t= 0.8 (IGÇ 0.8)	t= 0.6 (IGÇ 0.6)	t= 0.4 (IGÇ 0.4)
Hedeflenen minimum aydınlık düzeyi (E_{HM}) ve hedef aydınlık düzeyi (E_H) dereceleri				
$E_{(HM)}+E_{(H)}$ En Az	İST-Y8-DG35 (Toplam 96 Senaryo)	0	0	0
$E_{(HM)}+E_{(H)}$ Orta		0	0	2
$E_{(HM)}+E_{(H)}$ Yüksek		32	32	17
$E_{(HM)}$ En Az + $E_{(H)}$ Orta		0	0	0
$E_{(HM)}$ En Az + $E_{(H)}$ Yüksek		0	0	0
$E_{(HM)}$ Orta + $E_{(H)}$ Yüksek		0	0	13
$E_{(HM)}$ Sağlanmıyor + $E_{(H)}$ En Az		0	0	0
$E_{(HM)}$ En Az + $E_{(H)}$ Sağlanmıyor		0	0	0
$E_{(HM)} + E_{(H)}$ Sağlanmıyor		0	0	0

Çizelge 10. İST-Y2-DG35 ve İST-Y8-DG35 için, ışık geçirme çarpanına (IGÇ: t) göre rahatsız edici kamaşmanın kontrolünü (DGP) sağlanan ve sağlanmayan toplam senaryo sayıları.

GÜNIŞİĞİNA BAĞLI KAMAŞMANIN KONTROLÜ		t= 0.8 (IGÇ 0.8)	t= 0.6 (IGÇ 0.6)	t= 0.4 (IGÇ 0.4)
İST-Y2-DG35 (Toplam 24 Senaryo)	Rahatsız Edici Kamaşma Yok ($DGP \leq 38$)	0	4	6
	Rahatsız Edici Kamaşma Var ($DGP > 38$)	8	4	2
İST-Y8-DG35 (Toplam 96 Senaryo)	Rahatsız Edici Kamaşma Yok ($DGP \leq 38$)	0	3	7
	Rahatsız Edici Kamaşma Var ($DGP > 38$)	32	29	17

Bildiride ele alınan İstanbul koşullarında yer alan iki ve sekiz katlı (Y2, Y8) ofis yapılarının TS EN 17037+A1:2021 Standardındaki “Yeterli Günişliği Aydınlığının Sağlanması” ve “Günişliğine Bağlı Kamaşmanın Kontrolü” ölçütleri açısından incelenen ve Çizelge 7-9'da mutlak olarak değerlendirme sonuçları verilen çalışma mekânlarında sonuçlar ışık çarpanına, kat sayısına ve yönlere göre olmak üzere üç ayrı bölümde değerlendirilmiştir.

Işık Geçirme Çarpanına (IGÇ) Göre

- ✓ IGÇ $t=0,8$ olan senaryolarda optimum durum elde edilmemiştir.
- ✓ Optimum senaryolar yalnızca IGÇ $t=0,6$ ve IGÇ $t=0,4$ değerlerinde gerçekleşmiştir.
- ✓ IGÇ değerinin düşürülmesi, yıllık rahatsız edici kamaşma oranlarında ciddi bir azalma sağlamaktadır.
- ✓ Buna karşılık IGÇ' nin azalması, iç mekânda sağlanan aydınlık düzeyini ve hedeflenen aydınlık düzeylerinin yıllık sağlanma süresini azaltmaktadır.
- ✓ En düşük kamaşma değerleri IGÇ $t=0,4$ koşulunda elde edilmiştir.
- ✓ IGÇ hem kamaşma kontrolü hem de yeterli aydınlık düzeyinin sağlanması açısından önemli bir tasarım parametresidir.

Kat Sayısına/Bina Yüksekliğine Göre

- ✓ 2 (Y2) ve 8 katlı (Y8) ofis yapılarında her biri için 10'ar adet olmak üzere toplam 20 optimum senaryo elde edilmiştir.
- ✓ 2 katlı (Y2) ofis yapılarında optimum senaryo sayıları yönler göre değişiklik göstermektedir. Yönler göre dağılım; Kuzey 4, Batı 3, Doğu 2 ve Güney 1 senaryo şeklindedir.
- ✓ 8 katlı (Y8) ofis yapılarında ise optimum senaryolar yalnızca Kuzey cephede elde edilmiştir.
- ✓ Engel yapılar 2 katlı yapılarda (Y2), özellikle alt katlarda, kamaşmanın azalmasına katkı sağlarken 8 katlı (Y8) yapılarda ise bu etki daha sınırlı kalmıştır.

Yönlenmeye Göre

- ✓ Yıllık rahatsız edici kamaşma değerleri Kuzey cephede en düşük, Güney cephede en yüksektir.
- ✓ Hedef minimum aydınlık düzeyi (E_{HM}) ve hedef aydınlık düzeyinin (E_H) yıllık sağlanma süreleri Güney ve Batı cephelerde Kuzey cepheye göre daha yüksektir.
- ✓ Cephe yönlenmesi de yıllık rahatsız edici kamaşma ile aydınlık düzeyi konusunda önemli bir tasarım parametresidir. Kuzey cephede düşük kamaşma değerleri gözlenirken, aydınlık düzeylerinin (E_{HM} ve E_H) yıllık sağlanma süreleri diğer yönler orana azalmaktadır.
- ✓ Güney cephede ise hedef aydınlık düzeylerinin (E_H) sağlanma süreleri artmakta; ancak buna paralel olarak yıllık rahatsız edici kamaşma (DGP) oranları yükselmektedir.
- ✓ Güney yönlü cephelerde kamaşma kontrolüne yönelik iyileştirmeye yönelik yeni tasarımların yapılmasının gerekli olduğu ortaya çıkmıştır.
- ✓ Elde edilen bulgular topluca ele alındığında aşağıdaki genel değerlendirmelere ulaşılmıştır.
- ✓ Hacme giren günışığı performansının tek bir ölçüt üzerinden açıklanamayacağı görülmektedir. Işık geçirme çarpanı, yönlenme ve kat sayısı birlikte ele alındığında kamaşma kontrolü ile yeterli aydınlık düzeyi ölçütlerinin farklı davranış gösterdiği belirlenmiştir.
- ✓ Işık geçirme çarpanının (IGÇ), kamaşma kontrolü ve yeterli aydınlık düzeyi üzerinde doğrudan etkili parametrelerden biri olduğu görülmektedir. IGÇ'nin azalması kamaşma değerlerini düşürürken, aydınlık düzeylerinin (E_{HM} ve E_H) sağlanma sürelerini azaltmaktadır.
- ✓ 8 katlı (Y8) yapılarda optimum senaryoların yalnızca Kuzey cephede elde edilmesi, yüksek katlı yapılarda yönlenmenin belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır.
- ✓ İki katlı (Y2) yapılarda ise Kuzey cephe dışındaki yönlerde de optimum senaryolar elde edilmiştir. Y2 yapılarda engellerin özellikle alt katlarda oluşturduğu gölgeleme etkisi, yıllık rahatsız edici kamaşma düzeylerini azaltarak olumlu sonuçlar sağlamıştır.

6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında Türkiye’de yürürlükte olan “Planlı Alanlar Tip İmar Yönetmeliği” doğrultusunda İstanbul’da belli yol genişlikleri ve bitişik nizam durumuna göre farklı cam ışık geçirime çarpanına sahip pencereli ofis mekânları ele alınarak, “TS EN 17037+A1:2021 Binalarda Günişığı Standardı” ölçütlerine göre hacme giren günişığı performansları değerlendirilmiştir. Bu bağlamda elde edilen bulgular, gün boyu kullanılan ofis yapılarında görsel konfor ve enerji etkinliği açısından doğal aydınlatmanın önemini vurgulamakta; pencere camı ışık geçirime çarpanının tasarım sürecindeki belirleyici rolünü ortaya koymaktadır. Bu doğrultuda, değerlendirme sonuçları aracılığıyla gün boyu kullanılan ofis yapıları için görsel konfor, standartlara uygunluk ve etkin enerji kullanımı açısından doğal aydınlatma sistemi tasarım alternatiflerinin saptanması ve gereksinimlere uygun aydınlatma tasarımı kararlarının elde edilmesi sürecine katkı sağlayacaktır. Doğal aydınlatma kadar mimari tasarımı da etkileyen bir karar olan uygun pencere camı seçimine doğrudan katkı sağlayarak konuyla ilgili çözüm önerileri geliştirilebilecektir. Böylece, farklı ışık geçirime çarpanına sahip pencereli hacimlere giren günişığının performansı tasarım aşamasında belirlenebilecek ve yapay aydınlatmada harcanacak enerjinin azalması da sağlanabilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] Yılmaz, F. Ş. (2014). *Sürdürülebilir çevre için mimari aydınlatma sistemi tasarımında kullanılabilecek bir yaklaşım* (Doktora tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [2] Yılmaz, F. Ş. (2019). Binalarda günişığı performans ölçütlerine güncel bir bakış: EN 17037 standardı ve uygulaması. In *X. Ulusal Aydınlatma Sempozyumu*. İzmir.
- [3] Ünver, R. (2002). *Yapı dışı engellerin hacim içi günişığı aydınlığına etkisi: İstanbul örneği*. Y.T.Ü. Basım Yayın Merkezi.
- [4] Aydın, P. (2024). *Ofislerde sürdürülebilirlik bağlamında doğal aydınlatma tasarımına yönelik bir yaklaşım: Planlı Alanlar Tip İmar Yönetmeliği Uygulaması* (Doktora tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [5] Planlı Alanlar İmar Yönetmeliği. (2018). *Planlı Alanlar İmar Yönetmeliği* (3/5/1985 tarihli ve 3194 sayılı İmar Kanunu; 10/7/2018 tarihli ve 30474 sayılı Resmi Gazete). <http://www.mevzuat.gov.tr>
- [6] Türk Standartları Enstitüsü. (2021). *TS EN 17037+A1:2021 Binalarda Günişığı Standardı*. TSE.
- [7] Robert McNeel & Associates. (2023). *Rhinoceros 3D* [Bilgisayar yazılımı]. <https://www.rhino3d.com>
- [8] Solemma LLC. (2023). *Climate Studio* [Bilgisayar yazılımı]. <https://www.solemma.com>
- [9] Ünver, R., & Aydın, P. (2025). Ofis yapılarında pencere yönünün hacim içi günişığı performansına etkisi – Planlı alanlar tip imar yönetmeliği örneği. In *EMO-AYSEM XII. Aydınlatma Sempozyumu*. İzmir.
- [10] Ünver, R., & Aydın, P. (2024). Daylight performance in office buildings with different depths – The case of the municipal type town planning code. In *Balkanlight 2024*, İstanbul.
- [11] Ünver, R., & Aydın, P. (2025). Planlı alanlar tip imar yönetmeliği’ne göre saydamlık oranının hacim içi günişığı performansına etkisi – Adana örneği ofis yapıları. In *14. ATMK Ulusal Aydınlatma Kongresi*. İstanbul.

BİYOBAZLI YALITIM MALZEMELERİNDE YANGIN EMNİYETİ VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK

Gökçe Saadet Arpacı Coşkun¹
Nuri Serteser²
^{1,2} İTÜ Mimarlık Fakültesi
Taşkışla Kampüsü, Şişli, İstanbul, 34367

ÖZET

Biyobazlı yalıtım malzemeleri; düşük karbon ayak izi, yenilenebilir kaynaklara dayalı üretim süreçleri ve yaşam döngüsü boyunca sağladıkları çevresel avantajlar nedeniyle sürdürülebilir yapı tasarımında giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bununla birlikte, bu malzemelerin hücresel yapıları gereği yanıcılığa eğilimli olmaları ve özellikle Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik (BYKHY) kapsamında kritik değerlendirme gerektiren bir dizi performans belirsizliğini beraberinde getirmektedir. Bu çalışmada, biyobazlı yalıtım ürünlerinin yangına tepki davranışları, farklı alev geciktirici (FR) kimyasalların performans ve çevresel etkileri ile çeşitli kaplama ve mimari detay çözümlerinin sistem ölçeğindeki katkıları BYKHY'nin temel gereklilikleri çerçevesinde literatür odaklı olarak analiz edilmiştir. Bulgular, bor ve fosfor esaslı FR katkılarının belirli kullanım sınıflarında alev yayılımını azaltmakla birlikte yaşam döngüsü değerlendirmelerinde çevresel yük oluşturabildiğini; halojenli sistemlerin ise yüksek yangın performansı sağlamasına rağmen sürdürülebilirlik ve insan sağlığı kriterleriyle belirgin biçimde çeliştiğini göstermektedir. Ayrıca LEED, BREEAM ve DGNB gibi yaygın yeşil bina sertifika sistemlerinin FR toksisitesini bütüncül şekilde değerlendirmemesi, biyobazlı malzemelerin gerçek sürdürülebilirlik profilinin tasarımcılar tarafından eksik yorumlanmasına neden olabilmektedir. Sonuç olarak, biyobazlı yalıtım malzemelerinde yangın emniyetinin sağlanması, BYKHY koşulları ile sürdürülebilirlik hedefleri arasında kurulan çok katmanlı bir dengeyi; malzeme kökeni, FR kimyasal profili, kaplama sistemleri, mimari detay kararları ve yaşam döngüsü etkilerinin bütüncül biçimde ele alınmasını gerektirmektedir.

Anahtar kelimeler: Biyobazlı yalıtım, Yangın emniyeti, Alev geciktiriciler

FIRE SAFETY AND SUSTAINABILITY IN BIO-BASED INSULATION MATERIALS

ABSTRACT

Bio-based insulation materials have gained increasing prominence in sustainable building design due to their low carbon footprint, reliance on renewable resources, and favorable life-cycle performance. However, their combustible lignocellulosic microstructure introduces significant fire-related uncertainties, particularly regarding the performance requirements defined in the Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik (BYKHY), Türkiye's fire protection regulation. This study provides a literature-based analysis of the fire reaction behavior of commonly used bio-based insulation products, the performance and environmental implications of various flame-retardant (FR) chemicals, and the contribution of cladding strategies and architectural detailing solutions at the system scale within the framework of BYKHY's mandatory criteria. Findings indicate that boron- and phosphorus-based FR additives can reduce flame spread in specific applications but may introduce environmental burdens in life-cycle assessments, while halogenated systems, although highly effective in improving fire performance, show clear inconsistencies with sustainability and human-health principles. Moreover, widely used green building rating systems such as LEED, BREEAM, and DGNB do not comprehensively assess FR toxicity, potentially leading design professionals to misinterpret the sustainability profile of these materials. Overall, ensuring adequate fire safety performance in bio-based insulation materials requires balancing BYKHY's regulatory constraints with sustainability objectives through an integrated evaluation of material origin, FR chemical profile, cladding strategies, architectural detailing, and life-cycle impacts.

Keywords: Bio-based insulation, Fire safety performance, Flame retardants

^{1*} arpacil7@itu.edu.tr

1.GİRİŞ

Sürdürülebilirlik, yapı endüstrisinde malzeme seçimi ve üretim süreçlerini yeniden biçimlendiren önemli parametrelerden biri hâline gelmiştir. Bu bağlamda doğal ve yenilenebilir kaynaklara dayalı biyobazlı yalıtım malzemeleri; düşük çevresel ayak izi, geri dönüştürülebilirlik ve karbon tutulum potansiyelleri nedeniyle sürdürülebilir yapı tasarımında giderek daha fazla tercih edilmektedir. Bununla birlikte, bu malzemelerin temelini oluşturan lignoselülozik lifler yüksek organik içerikleri nedeniyle yanıcılık, duman üretimi ve ısıl bozunma davranışı bakımından mineral ve sentetik alternatiflerden farklı performans göstermektedir. Yangın dayanımını artırmak amacıyla kullanılan bor tuzları, fosfor bazlı bileşikler ve halojenli katkıları kısa vadede etkili olsa da toksisite ve bertaraf süreçleri açısından çevresel sorunlara yol açabilmektedir. Bu durum, sürdürülebilirlik özellikleri ile yangın emniyeti gereklilikleri arasında önemli bir gerilim yaratmaktadır. Yeşil bina sertifika sistemlerinin büyük bölümü (LEED, BREEAM, DGNB) malzeme performansını ağırlıklı olarak yaşam döngüsü ve karbon ayak izi üzerinden değerlendirmekte, yangın dayanımını sürdürülebilirlik kriterlerinin ayrılmaz bir bileşeni olarak ele almamaktadır. Bu çalışmada biyobazlı yalıtım malzemelerinin yangın performansına ilişkin literatür sistematik olarak incelenmiş, performans artırıcı katkıların çevresel etkileri ve sürdürülebilir tasarım bağlamındaki metodolojik tartışmalar değerlendirilmiştir.

2. YÖNTEM

Bu çalışma, biyobazlı yalıtım malzemelerinin yangın performansına ilişkin mevcut akademik araştırmaları sistematik biçimde değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiş bir literatür taramasıdır. Literatür taraması Scopus, Web of Science ve ScienceDirect veri tabanlarında gerçekleştirilmiş, Google Scholar destekleyici kaynak olarak kullanılmıştır. Arama sürecinde “bio-based insulation”, “natural fibre insulation”, “fire resistance”, “sustainable insulation fire performance” ve “flame retardant natural materials” anahtar sözcükleri ile Türkçe karşılıkları kullanılmıştır. 2000–2025 yılları arasında yayımlanmış, biyobazlı yalıtım malzemelerinin yangına tepki davranışı, alev geciktirici uygulamalar ve yaşam döngüsü değerlendirmelerini inceleyen hakemli çalışmalar değerlendirmeye alınmıştır. Seçim sürecinde ilk taramada 412 yayın belirlenmiş, başlık ve özet incelemesi sonucunda 147 çalışma ön elemeye alınmış, tam metin değerlendirmesi sonunda dahil etme kriterlerini karşılayan 34 yayın detaylı olarak analiz edilmiştir.

3. LİTERATÜR BULGULARI

Literatürde biyobazlı yalıtım malzemelerinin yangın performansı farklı araştırma perspektifleriyle incelenmiştir. Bazı çalışmalar doğal lif esaslı yalıtım malzemelerinin yanma davranışı, ısı transferi özellikleri ve çok katmanlı yapı elemanlarındaki performansına odaklanmıştır [1-2-3-4]. Bu çalışmalar doğal liflerin yoğunluk, nem içeriği ve lif yapısının yangın sırasındaki malzeme davranışına etkilerini incelemektedir. Diğer araştırmalar biyobazlı polimerler ve doğal lif takviyeli malzemelerde yangın performansını iyileştirmek amacıyla geliştirilen biyobazlı alev geciktirici katkılara odaklanmıştır [5-6-7]. Bu çalışmalar, biyobazlı katkı sistemlerinin geleneksel halojenli alev geciktiricilere alternatif oluşturma potansiyelini değerlendirmektedir. Bazı çalışmalar tarımsal atıklar ve hızlı büyüyen biyokütle kaynaklarının yalıtım malzemesi olarak kullanılabilirliğini inceleyerek yeni hammaddeler önermektedir [8-9-10]. Bu araştırmalar ayrıca biyobazlı

malzemelerin karbon depolama potansiyeli ve çevresel faydalarına dikkat çekmektedir. Öte yandan bazı çalışmalar geleneksel alev geciktirici kimyasalların sağlık ve çevresel etkilerini inceleyerek alternatif yangın emniyeti yaklaşımlarını tartışmaktadır [11-12]. Bu bağlamda uluslararası kuruluşlar tarafından yayımlanan raporlar da kimyasal alev geciktiricilerin potansiyel risklerine dikkat çekmektedir [13-14-15].

3.1. Biyobazlı Yalıtım Malzemelerinde Yangın Davranışı

Biyobazlı yalıtım malzemeleri selüloz ve lignin içerikleri nedeniyle yanıcı organik yapıdadır ve ilk tutuşma sıcaklıkları genellikle 250–350 °C aralığındadır [16]. Yanma sırasında oluşan kömürleşme tabakası (char layer) ısı iletimi kısmen sınırlandırırsa da bu mekanizma mineral liflere kıyasla daha sınırlı koruma sağlamaktadır [17]. Doğal lif panelleri çoğu durumda kaplama ve kimyasal katkı olmaksızın EN 13501-1 kapsamında E–F sınıfında kalmaktadır. Ancak alçı levha kaplaması, fosfor bazlı katkılar veya mineral dolgulu kompozit yapılar kullanıldığında yangın sınıfının C–B seviyelerine kadar iyileşebildiği belirtilmektedir [18]. Kenevir ve keten paneller, düşük ısı iletkenliği sağlamalarına rağmen yüksek yanıcı yüzey alanları nedeniyle yangın yayılım hızının mineral yün gibi inorganik yalıtım malzemelerine göre daha yüksek olabildiği ifade edilmektedir [19]. Selüloz bazlı yalıtım malzemeleri (örneğin püskürtme selüloz sistemleri) en yaygın incelenen biyobazlı yalıtım türlerinden biridir ve yangın performansları büyük ölçüde bor türevleri gibi alev geciktirici katkılara bağlıdır [1]. Deneysel çalışmalar, kaplama ve kimyasal katkılarla yangın performansının belirgin şekilde iyileşebildiğini ve bazı durumlarda polimer bazlı yalıtım malzemelerine yakın davranış gösterebildiğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte bu malzemelerin yangın dayanımı açısından mineral lifli yalıtım ürünleri kadar stabil performans sergilemediği vurgulanmaktadır [18]. Saman balyası ve ahşap lifli dolgu sistemleri gibi biyobazlı yalıtım uygulamaları sıkıştırılmış lignoselülozik liflerden oluşmakta ve kaplamasız durumda yüksek ısı salımı ile hızlı alev ilerlemesi gösterebilmektedir. Araştırmalar, saman balyası duvar sistemlerinde yangın performansının büyük ölçüde yüzey kaplamasına bağlı olduğunu; özellikle sıva veya mineral esaslı kaplamaların alev ilerlemesini sınırlandırarak sistemin yangın dayanımını artırabildiğini göstermektedir [20]. Mantar tabanlı kompozitler ise hücresel yapıları ve doğal polimer bileşimleri nedeniyle diğer lif esaslı malzemelerden farklı yanma davranışı sergilemektedir. Literatürde mantar esaslı ürünlerin düşük ısı iletkenlik ve yüksek boyutsal kararlılık özellikleri nedeniyle yapı uygulamalarında dikkat çektiği; kompozit sistemlerde yangın davranışının kaplama ve katkı türüne bağlı olarak iyileştirilebildiği belirtilmektedir [21-22]. Bu durum, mantar esaslı yalıtım ürünlerinin yangın emniyeti açısından tekil malzeme yerine sistem performansı içinde değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

3.2. Mineral ve Sentetik Malzemelerle Karşılaştırmalı Performans

Çizelge 1, en sık kullanılan yalıtım türlerinin karşılaştırmasını içermektedir. Çizelgede verilen değerler literatürde raporlanan tipik aralıklara dayanmaktadır. EN 13501-1 yangına tepki sınıflandırması malzemenin yoğunluğu, kimyasal katkı içeriği ve kaplama sistemi gibi parametrelere bağlı olarak değişebilmektedir [16-18-26].

Çizelge 1: Yalıtım Malzemelerinde Yangın Performansına İlişkin Karşılaştırmalı Özellikler.

Malzeme	Isıl İletkenlik (W/mK)	EN 13501-1 Tipik Sınıf Aralığı	Duman / Toksisite	Literatürde Genel Değerlendirme
Taş yünü	0.033–0.040	A1	Çok düşük	Mineral esaslı yapısı nedeniyle yanmaz kabul edilir
EPS / XPS	0.030–0.035	E–B (FR katkılı ürünlerde)	Yüksek duman ve toksik gaz oluşumu	Yangın yükü oluşturabilen polimer bazlı malzeme
Ahşap lif paneller	0.038–0.045	E–C	Orta	Organik yapı nedeniyle kaplama ile korunması önerilir
Kenevir / keten	0.038–0.045	E–D	Orta–yüksek	Lifli yapı nedeniyle sistem tasarımı belirleyicidir
Selüloz (FR katkılı)	0.034–0.040	C–B	Orta	Yangın performansı alev geciktirici katkılara bağlıdır
Mantar	0.038–0.045	C–B (ürüne bağlı)	Görece düşük	Kömürleşme tabakası oluşturarak yanmayı sınırlayabilir

3.3. Bulguların Mimari Tasarıma Yansıması

Literatür bulguları, biyobazlı yalıtım malzemelerinde yangın emniyeti performansının tekil malzeme özelliklerinden ziyade yalıtım katmanı, kaplama elemanları ve detay çözümlerini içeren sistem tasarımı tarafından belirlendiğini göstermektedir. Alçı levha ve magnezyum oksit paneller gibi mineral esaslı kaplama katmanlarının biyobazlı yalıtımın yangına tepki davranışını iyileştirdiği; buna karşın alev geciktirici katkıların yangın performansını artırırken yaşam döngüsü çevresel etkilerini olumsuz etkileyebildiği görülmektedir. Özellikle çatı ve yatay uygulamalarda alev ilerleme hızının kritik hâle gelmesi, biyobazlı malzemelerin bu bölgelerde kompozit sistemler içerisinde değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır. Literatürde cephe sistemlerinde düşey yangın yayılımına odaklanılırken binalar arası yangın sıçrama riskinin ikincil planda kaldığı dikkat çekmektedir. Türkiye’de yürürlükte olan mevzuatın EN 13501-1 sınıflandırmasına dayanması, biyobazlı yalıtım ürünlerinin uygun kaplama ve yangın bariyerleriyle tasarlanması durumunda mevzuatla uyumlu çözümler üretilebileceğini göstermektedir. Biyobazlı yalıtım malzemeleri, mimari tasarım sürecinde bağımsız ürünler yerine farklı malzemelerle çalışan kompozit yapı sistemlerinin bir bileşeni olarak ele alınmalı; sürdürülebilirlik değerlendirmeleri yangın emniyeti gerekliliklerinden ayrıştırılmadan bütüncül yaklaşımla yapılmalıdır.

4. ALEVGEÇİKTİRİCİ KATKILARIN ÇEVRESEL ETKİSİ

4.1. Biyobazlı Yalıtım Malzemelerinde Kullanılan Alev Geciktiricilerin Karşılaştırılması

Biyobazlı yalıtım malzemelerinin yangına tepkisi genellikle yetersiz olduğundan, performansı artırmak amacıyla çeşitli alev geciktirici (fire retardant-FR) katkıları uygulanmaktadır. Ancak bu katkıların önemli bir bölümü sürdürülebilirlik, toksisite ve yaşam döngüsü etkileri bakımından tartışmalıdır. **Çizelge 2’de** biyobazlı yalıtım malzemelerinde en sık kullanılan dört temel alev geciktirici grubunun yangın performansı, çevresel etki ve sürdürülebilirlik açısından karşılaştırılması sunulmaktadır. Halojenli FR’lar yangın dayanımında en yüksek etkiyi gösterirken sürdürülebilirlik açısından en sorunlu grup olarak değerlendirilmektedir. Bor ve fosfor bazlı

sistemler güncel endüstride en yaygın seçeneklerdir; ancak bor türevlerinin toksikolojik etkileri, fosfor bazlı sistemlerin ise VOC ve biyobozunurluk problemleri sürdürülebilirlik tartışmalarını sürdürmektedir. Yeni nesil biyopolimer katkılar düşük toksisite avantajıyla gelecek için umut verici bir alan oluşturmakla birlikte henüz endüstriyel ölçekli üretime geçmemiştir.

Çizelge 2: Biyobazlı Yalıtım Malzemelerinde Kullanılan Başlıca Alev Geciktiricilerin Karşılaştırılması.

Alev Geciktirici Türü	Yangın Performansı	Avantajları	Çevresel / Sağlık Riskleri	Sürdürülebilirlik Açısından Değerlendirme
Bor Türevleri	Selüloz yalıtımda C-B sınıfına kadar iyileştirme sağlar; kömürleşmeyi artırır.	Ucuz, etkili, kolay uygulanır, yaygın kullanılır.	Suda çözünme → toprağa/suya sızıntı; üreme toksisitesi, uzun dönem maruziyet riskleri.	<i>Orta düzey sürdürülebilirlik.</i> Performans iyi ancak toksisite problemi vardır.
Fosfor Bazlı FR'lar	Kömürleşme tabakası güçlenir; duman yoğunluğu azalır, ahşap/lif ile uyumlu.	Halojenlilere göre daha düşük toksisite; güçlü performans, geniş çalışma alanı.	VOC salımı; üretim sürecinde çevresel etki, kalıntıların biyobozunmazlığı.	<i>Görece sürdürülebilir.</i> Alternatifler içinde en dengeli seçenek.
Halojenli FR'lar	Çok yüksek etkinlik; tutuşmayı belirgin şekilde geciktirir.	Az miktarla yüksek performans sağlar.	Çok toksik duman; biyobirikim; endokrin bozucu etkiler, birçok ülkede yasaklı.	<i>Sürdürülebilir değil.</i> Yangın emniyeti sağlasa da çevresel maliyet çok yüksek.
Yeni Nesil Biyopolimer FR'lar	Orta düzey etkinlik; bazı çalışmalarda geleneksel FR'lara yaklaşan sonuçlar.	Doğal kaynaklı; düşük toksisite, biyobozunur; yenilikçi.	Endüstriyel ölçek yok; maliyet yüksek, performans her malzemede istenen düzeyde değil.	<i>Gelecek vaat ediyor.</i> Araştırma düzeyinde; potansiyeli yüksek.

4.2. Alev Geciktirici Katkıların Sürdürülebilirlik ile Çelişkisi

Araştırma bulguları, biyobazlı yalıtım malzemelerinin çevresel avantajlarının çoğu zaman yangın emniyeti için eklenen kimyasal katkılar nedeniyle zayıfladığını göstermektedir. Bu durum literatürde sıkça vurgulanan temel bir çelişkiye işaret etmektedir: Malzeme bileşenleri yenilenebilir kaynaklardan elde edildiği için sürdürülebilir kabul edilirken, yangın dayanımını artırmak amacıyla kullanılan katkılar toksisite, ekotoksik kalıcılık ve VOC salımı gibi etkiler nedeniyle sistem düzeyinde sürdürülebilirliği geriletebilmektedir. Biyobazlı ürünler düşük karbon ayak izi ve gömülü enerji değerleriyle avantajlı görünürken, bor ve fosfor bazlı katkıların çevresel etkileri yaşam döngüsü performansının bütüncül değerlendirilmesini zorlaştırmaktadır. Halojenli FR sistemleri ise yüksek yangın performansına karşın toksisite, kalıcılık ve biyobirikim riskleri nedeniyle sürdürülebilirlik ilkeleriyle çelişmektedir.

4.3. Biyobazlı Yalıtımda Sürdürülebilir Alev Geciktirici Geliştirme Gereksinimi

Gelecekteki araştırmalar, biyobazlı yalıtım malzemelerinde yangına tepki performansını artırırken çevresel etkileri azaltan sürdürülebilir alev geciktirici çözümlere odaklanmalıdır. Bu kapsamda fitik asit, lignin türevleri, kitosan bazlı kaplamalar ve nano-kil hibritleri gibi biyopolimer esaslı alev geciktiricilerin endüstriyel uygulanabilirliğinin artırılması önem taşımaktadır. Bu katkılar

geleneksel bor ve halojen bazlı sistemlere kıyasla çevresel avantajlar sunsa da performans ve maliyet açısından geliştirme gerektirmektedir. Yangın dayanımı yalnızca kimyasal katkılarla değil, pasif yangın emniyeti stratejileriyle de güçlendirilebilir. Alçı levha ve magnezyum oksit (MgO) paneller ile mineral bileşenli kompozit tasarımlar, biyobazlı yalıtım sistemlerinde etkili bir koruyucu bariyer oluşturarak güvenli kullanım olanaklarını artırmaktadır. Malzeme performansının değerlendirilmesinde Yaşam Döngüsü Analizi (LCA) süreçlerinin alev geciktirici katkıları da kapsamı gerektirmektedir. Mevcut yeşil bina sertifika sistemlerinin FR kimyasallarının çevresel etkilerini sınırlı biçimde ele alması, malzeme seçimlerinde eksik değerlendirmelere yol açabilmektedir. Bu nedenle biyobazlı yalıtım sistemlerinin sürdürülebilirliği, organik lif yapısının yanı sıra katkı maddelerinin çevresel etkileri ve yapı sisteminin bütüncül tasarımı kapsamında değerlendirilmelidir.

5. YEŞİL BİNA SERTİFİKA SİSTEMLERİ VE MEVZUAT

Sürdürülebilirlik odaklı yapı tasarımında malzeme seçimleri, yaşam döngüsü performansı, karbon ayak izi, üretim süreçleri ve sağlıklı yapı bileşenleri gibi kriterlere dayanmaktadır. Ancak bu kriterlerin değerlendirilmesinde yangın emniyeti boyutunun çoğu zaman sürdürülebilirlik söyleminin dışında kaldığı görülmektedir. Biyobazlı yalıtım malzemeleri, yeşil bina sertifikasyon sistemlerinde çoğunlukla olumlu puanlanırken, ulusal yangın emniyeti mevzuatı açısından ciddi sınırlamalara tabi olabilmektedir. Bu bölüm, Türkiye’deki yangın emniyeti düzenlemeleri ile uluslararası sertifika sistemlerinin yaklaşımını ele almaktadır.

5.1. Türkiye Yangın Mevzuatı: EN 13501-1 ve Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik (BYKHY)

Türkiye’de yapı malzemelerinin yangına tepki performansı TS EN 13501-1 standardı kapsamında A1’den F’ye uzanan sınıflarla tanımlanmaktadır. Bu sınıflandırma yalnızca malzemenin yanıcılık özelliğini değil, duman üretimi (s) ve alev damlama davranışını (d) da içeren çok parametrelili bir değerlendirme sunmaktadır. Literatürde yaygın kullanılan biyobazlı yalıtım malzemelerinin önemli bir bölümü katkısız hâlde EN 13501-1’e göre D–E aralığında sınıflandırılmakta; bu durum söz konusu ürünlerin yapı kabuğunda doğrudan kullanımının sınırlı olduğunu göstermektedir.

Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik (BYKHY), yapı bileşenlerinin yangına tepki özelliklerini yapı türü, kullanım amacı ve mekânsal konum bağlamında ele almakta; özellikle dış cepheler, yangın duvarları, kaçış koridorları ve yangın güvenlik holleri gibi kritik alanlarda minimum performans düzeyleri tanımlamaktadır. Yönetmelik, yalıtım malzemesini tekil bir ürün olarak değil; taşıyıcı sistem, kaplama katmanları ve detay çözümleriyle değerlendirilen bir yapı sistemi bileşeni olarak ele almaktadır. Biyobazlı yalıtım malzemelerinin kullanımı çoğu durumda mineral esaslı kaplamalar, alçı levhalar veya yangın bariyerleri gibi pasif önlemlerle desteklenmeden mümkün olamamaktadır. BYKHY’nin performans temelli yaklaşımı, biyobazlı yalıtımın özellikle dış cephelerde ve düşey yangın yayılımı riski bulunan bölgelerde doğrudan uygulanmasını sınırlandırmakta; malzeme seçiminin cephe kompozisyonu, katlar arası yangın durdurucu detaylar ve kaplama sürekliliğiyle birlikte ele alınmasını zorunlu kılmaktadır. Bu durum, sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda tercih edilen biyobazlı ürünlerin yangın emniyeti gerekliliklerini karşılayabilmesi için mimari detay ölçeğinde yeniden kurgulanmasını gerekli kılmaktadır. BYKHY, biyobazlı yalıtım malzemelerinin kullanımını bağımsız bir tasarım

değişkeni olarak değil, yapı kabuğu bütünlüğü içinde değerlendirilmesi gereken teknik bir sınır koşulu olarak tanımlamaktadır. Bu nedenle sürdürülebilirlik ve yangın emniyeti arasındaki denge, malzeme kökeninden çok sistem kurgusu, kaplama sürekliliği ve detay çözümleri üzerinden kurulmalıdır. **Çizelge 3'**te BYKHY kapsamında yalıtım malzemelerine ilişkin temel maddeler ve mimari etkileri ele alınmaktadır.

Çizelge 3: BYKHY Kapsamında Yalıtım Malzemelerine İlişkin Temel Maddeler ve Mimari Etkileri [25].

Yapı Bileşeni / Alan	İlgili BYKHY Maddeleri	Yönetmelik Yaklaşımı (Özet)	Biyobazlı Yalıtım Açısından Anlamı	Mimari Tasarıma Etkisi
Dış Cephe Sistemleri	Md. 27/1–2; Md. 21/5	Cephelerde yüksekliğe bağlı olarak en az zor alevlenici malzeme şartı, katlar arası yangın atlamasını önleyici düşey bariyer zorunluluğu	D–E sınıfı biyobazlı yalıtımlar tek başına yeterli değildir	Cephe kompozisyonu, mineral kaplama ve yangın bariyerleriyle tasarlanmalıdır
Giydirme Cepheler	Md. 27/3	Havalandırılmalı veya derzli cephelerde yalıtım ve cephe elemanlarının en az zor yanıcı olması gerekir	Açık derzli cephelerde biyobazlı yalıtımlar ciddi sınırlamalara tabidir	Cephe boşlukları ve kat birleşimleri yangın kesici detaylarla çözülmelidir
Kaçış Koridorları ve Yangın Güvenlik Holleri	Md. 25; Md. 26	Kaçış yollarında duman üretimi ve yangın yükü sınırlandırılır	Organik esaslı yalıtımlar çoğunlukla doğrudan kullanılamaz	İç yüzeylerde mineral esaslı kaplamalar ön plana çıkar
Katlar Arası Döşemeler	Md. 26; Md. 24; Ek -3/B; Ek-2/Ç	Döşemelerde zor alevlenici malzeme, tesisat geçişlerinde yangın ve duman sızdırmazlığı zorunludur	Biyobazlı yalıtımlar yalnızca kapalı sistem içinde uygulanabilir	Döşeme detaylarında yangın durdurucu süreklilik gerekir
Çatı Sistemleri	Md. 28; Md. 21/5; Ek-2/Ç	Çatı kaplamalarında BROOF sınıfı ve dış alev yayılımına dayanım aranır	Yalıtım doğrudan değil, sistem olarak değerlendirilir	Çatı kaplaması–yalıtım ilişkisi birlikte çözülmelidir
Yüksek Yapılar (>28.50 m)	Md. 27/1; Md.29/3-4	Cephelerin zor yanıcı olması zorunludur	Biyobazlı yalıtım çoğu durumda dışlanır	Tasarım erken aşamada mineral sistemlere yönelir
Döşeme Üzeri Isı Yalıtımı	Md. 26/3	Kolay alevlenen yalıtımlar yalnızca üzeri şap ile kaplanırsa kabul edilir	Açıkta biyobazlı yalıtım mümkün değildir	Katmanlı detay zorunlu hale gelir

5.2. Yeşil Bina Sertifika Sistemlerinde Yangın Emniyetinin Konumu

Uluslararası sertifikasyon sistemleri (LEED, BREEAM, DGNB), sürdürülebilirlik değerlendirmesine malzeme kaynağı, karbon ayak izi, VOC düzeyi, geri dönüştürülebilirlik ve yaşam döngüsü analizi gibi parametreleri dahil ederken, yangın emniyeti doğrudan bir sürdürülebilirlik ölçütü olarak ele alınmamaktadır. **Çizelge 4'**te sunulan karşılaştırma, uluslararası düzeyde yaygın kullanılan üç sertifika sisteminin—LEED, BREEAM ve DGNB—yangın emniyetini sürdürülebilirlik değerlendirmesi içinde ne ölçüde ele aldığını göstermektedir.

Çizelge 4: Yeşil Bina Sertifika Sistemlerinde Yangın Emniyetinin Değerlendirilmesi [23-24-27].

Sertifika Sistemi	Yangın Emniyetinin Değerlendirilme Düzeyi	Alev Geciktiriciler (FR) Hakkındaki Yaklaşım	Malzeme Kriterleri ile İlişki	Sürdürülebilirlik Açısından Sonuç
LEED v4.1 (ABD – USGBC)	Yangın emniyeti bağımsız bir kredi olarak yer almaz; yalnızca dolaylı etkiler üzerinden değerlendirilir.	FR toksisitesi değerlendirme dışıdır; kimyasal katkıların çevresel etkileri puanlamaya dahil edilmez.	Önemli ağırlık: LCA, EPD, geri dönüşüm, VOC, ürün şeffaflığı.	Yüksek sürdürülebilirlik puanı alan bir malzeme, yangın açısından düşük performans gösterebilir.
BREEAM International (İngiltere)	Yangın emniyeti sınırlı ve dolaylı; “Health & Wellbeing” ve “Safety” başlıklarında yer yer ilişkilidir, ancak bağımsız değerlendirme yoktur.	FR kimyasallarına yönelik özel bir kriter yoktur.	Mat 01 ve Hea 02 kategorilerinde malzeme çevrimi ve iç mekân kalitesi değerlendirilir.	Yangın emniyeti sürdürülebilirlik kriteri olarak görünmez durumdadır.
DGNB (Almanya)	En kapsamlı yaklaşım; yangının yaşam döngüsü etkileri kısmen LCA içinde tartışılır, diğer sistemlere göre daha güçlü bir entegrasyon vardır.	FR kimyasallarına ilişkin değerlendirme sınırlıdır ancak toksik etkiler LCA tartışmalarında ele alınabilir.	Çok geniş LCA kriterleri, toksisite ve malzeme bileşeni analizi içerir.	Yangın-sürdürülebilirlik ilişkisini en fazla dikkate alan sistemdir; yine de FR’lar tam kapsamla değerlendirir

Genel olarak bu üç sistem de sürdürülebilirliği; karbon ayak izi, malzeme döngüsü, yaşam döngüsü analizi (LCA), VOC emisyonları, ürün şeffaflığı ve iç mekân sağlığı gibi parametreler üzerinden tanımlamakta, yangın emniyetini doğrudan bir sürdürülebilirlik kriteri olarak değerlendirmemektedir. LEED ve BREEAM, yangın performansını tamamen mevzuata bırakırken, alev geciktirici (FR) katkıların toksisite ve çevresel etkilerini puanlama sistemine dahil etmemektedir. Bu durum, yangına tepki sınıfı düşük veya kimyasal FR katkısına bağımlı malzemelerin, yüksek sürdürülebilirlik puanları alarak yanlış bir çevresel üstünlük algısı yaratabilmesine zemin hazırlamaktadır. Üç sistem arasında yangın emniyetini değerlendirme açısından en kapsamlı yaklaşım DGNB’de görülmekte; DGNB’nin yaşam döngüsü analizine yangının çevresel etkilerini kısmen entegre etmesi, diğer sistemlere göre daha bütüncül bir yöntem sunmaktadır. Ancak DGNB dahi FR kimyasallarını tam kapsamlı bir değerlendirme kriterine dönüştürmemektedir. Bu bağlamda, uluslararası sertifika sistemleri sürdürülebilirlik değerlendirmesinde güçlü çerçeveler sunsa da yangın emniyeti boyutunun değerlendirme dışında kalması, mimari pratikte sürdürülebilir malzeme seçimi ile emniyet gereklilikleri arasında önemli bir kopukluğa işaret etmektedir.

6. SONUÇ

Bu çalışma, biyobazlı yalıtım malzemelerinin sürdürülebilirlik açısından sunduğu avantajların, mimari uygulama ölçeğinde özellikle yangın emniyeti üzerinden ciddi sınırlamalarla karşılaştığını göstermektedir. Biyobazlı malzemeler düşük karbon ayak izi ve yenilenebilir kaynak kullanımına

dayalı çevresel üstünlükleriyle sürdürülebilir yapı tasarımında önemli bir potansiyel taşısa da yanıcılık özellikleri ve kimyasal katkı gereksinimi, mimari tasarım kararlarını doğrudan etkileyen kritik bir problem alanı yaratmaktadır.

Mimari açıdan en belirgin sorunlardan biri, biyobazlı yalıtım malzemelerinin çoğunun kaplamasız hâlde BYKHY'nin minimum yangın sınıflarını karşılamamasıdır. Bu durum, özellikle dış cephe ısı yalıtımı, çatı altı uygulamaları, kaçış koridorları ve yangın duvarı gibi kritik yapı bileşenlerinde, malzemenin kullanımını ya tamamen dışlamakta ya da ek kaplama, yoğun mineral bariyer veya kimyasal FR uygulamalarını zorunlu kılmaktadır. Bunun mimari açıdan doğrudan sonucu, sürdürülebilir olduğu düşünülen bir malzemenin uygulama detaylarında daha fazla katman, daha fazla maliyet ve daha fazla kimyasal müdahale ile kullanılmak zorunda kalmasıdır. Dolayısıyla malzeme, “doğal ve çevre dostu bir bileşen” olarak projeye dahil edilse bile, nihai sistem performansı bu iddiadan uzaklaşabilmektedir.

Bir diğer önemli mimari problem, biyobazlı yalıtım malzemelerinin yangın davranışının sadece malzeme bazında değil, sistem bazında değişkenlik göstermesidir. Örneğin keten, kenevir veya selüloz yalıtım panellerinin yangın davranışı; kullanılan kaplama tipi, duvarın hava boşluğu, taşıyıcı sistemin malzemesi, yalıtımın montaj şekli ve FR uygulamasının yoğunluğu gibi parametrelere son derece duyarlıdır. Bu durum mimarlar için, tasarım aşamasında hem yapı fiziki hem de yangın mühendisliği açısından daha fazla teknik veri ihtiyacı ve daha karmaşık bir karar mekanizması doğurmaktadır. Oysa literatürde biyobazlı malzemelerin gerçek yapı detayları içerisinde, katmanlar arası etkileşim de dikkate alınarak incelendiği çalışma sayısı oldukça sınırlıdır. Bu eksiklik, mimarların projelerinde bu malzemeleri emniyetle konumlandırabilmesini zorlaştırmaktadır. Sertifika sistemleri ile mevzuat arasındaki durum, mimari tasarımda bir başka önemli problem alanı oluşturmaktadır. LEED ve BREEAM gibi sertifikasyonlar, malzeme sürdürülebilirliğini büyük ölçüde çevresel göstergeler üzerinden puanlamakta ve yangın emniyetini sertifika sisteminin kapsamında değerlendirmemektedir. Bunun sonucunda sürdürülebilirlik puanı yüksek bir ürünün gerçek projede mevzuata uyumsuz olması sık karşılaşılan bir durumdur. Bu uyumsuzluk, mimarları çoğu zaman şu ikilemle karşı karşıya bırakmaktadır: Ya sürdürülebilirlik hedeflerinden ödün verilecek ya da sürdürülebilir bir malzeme kullanılabilmek için mevzuatın gerektirdiği ek kimyasal ve kaplama çözümleri uygulanacak, böylece malzemenin çevresel avantajı azalacaktır.

Tüm bu bulgular, biyobazlı yalıtım malzemelerinin mimari uygulamalarda emniyetli ve tutarlı biçimde kullanılabilmesi için “malzeme–katkı–kaplama–detay” bütünlüğünün sürdürülebilirlik değerlendirmesinin ayrılmaz bir parçası olması gerektiğini göstermektedir. Bir malzemenin tek başına sürdürülebilir olması, mimari pratikte yeterli değildir; malzemenin sisteme entegre edilme biçimi, yangın dayanımı için yapılan müdahaleler, kaplama türü, havalandırma boşluğu düzeni ve hatta bakım gereksinimleri dâhil olmak üzere tüm yapı bileşenlerinin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Dolayısıyla gelecekte yapılacak araştırmaların, biyobazlı yalıtım malzemelerinin yalnızca kimyasal özelliklerine değil, gerçek yapı detayları içinde yangın davranışını etkileyen tüm parametrelere odaklanması büyük önem taşımaktadır.

Sonuç olarak, biyobazlı yalıtım malzemeleri sürdürülebilirlik hedefleri açısından önemli bir fırsat sunarken, yangın emniyeti açısından ciddi tasarım ve uygulama sınırlamaları yaratmaktadır. Bu sınırlamaların aşılabilmesi için hem yeni nesil toksik olmayan alev geciktirici malzemelerin geliştirilmesi hem de mevcut sertifika sistemlerinin yangın emniyeti boyutunu sürdürülebilirlik

çerçevesine entegre etmesi gerekmektedir. Mimarlar açısından ise en anlamlı yaklaşım, sürdürülebilirlik ve emniyet arasında denge kuran sistem tasarımları geliştirmek, biyobazlı malzemeleri yapı fiziği, mevzuat ve yangın mühendisliği ile ele alan bütünleşik bir tasarım anlayışı oluşturmaktır.

KAYNAKLAR

1. Korjenic, A., Petráněk, V., Zach, J., & Hroudová, J. (2011). Development and performance evaluation of natural thermal-insulation materials composed of renewable resources. *Energy and Buildings*, 43(9), 2518–2523. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.06.012>
2. Kymäläinen, H., & Sjöberg, A. M. (2008). Flax and hemp fibres as raw materials for thermal insulations. *Building and Environment*, 43(7), 1261–1269. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.03.006>
3. Dalmais, M., Colson, V., Le Cunff, T., Jadeau, O., & Lanos, C. (2019). Behaviour of bio-based material in multilayer wall during fire test. *Academic Journal of Civil Engineering*, 37(2), Special Issue ICBM 2019.
4. Makovičká Osvaldová, L., Gašpercová, S., & Peťko, M. (2015). Natural fiber thermal insulation materials from fire prevention point of view. *International Symposium on Material, Energy and Environment Engineering (ISM3E 2015)*, 58–60
5. Hobbs, C. E. (2019). Recent advances in bio-based flame retardant additives for synthetic polymeric materials. *Polymers*, 11(2), 224. <https://doi.org/10.3390/polym11020224>
6. Wang, M., Yin, G.-Z., Yang, Y., Fu, W., et al. (2022). Bio-based flame retardants to polymers: A review. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 6(2). <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2022.07.003>
7. Ye, F., Wei, H., Xiao, Y., Berardi, U., Quaranta, G., & Demartino, C. (2025). Bio-based insulation materials in sustainable constructions: A review of environmental, thermal and acoustic insulation, durability, and mechanical performances. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 223, 115872. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115872>
8. Binici, H., Eken, M., Dolaz, M., Aksogan, O., & Kara, M. (2014). An environmentally friendly thermal insulation material from sunflower stalk, textile waste and stubble fibres. *Construction and Building Materials*, 51, 24–33. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.038>
9. Palumbo, M., Avellaneda, J., & Lacasta, A. M. (2015). Availability of crop by-products in Spain: New raw materials for natural thermal insulation. *Resources, Conservation and Recycling*, 99, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.03.012>
10. Pittau, F., Krause, F., Lumia, G., & Habert, G. (2018). Fast-growing bio-based materials as an opportunity for CO₂ sequestration in buildings. *Building and Environment*, 129, 117–129.
11. Babrauskas, V., & Stapleton, H. M. (2015). Halogenated flame retardant use in residential settings—Are they safe for our health? *Fire Safety Science Proceedings*, 11, 11–22.
12. Shaw, S. D., Blum, A., et al. (2010). Halogenated flame retardants: Risks and alternatives. *Reviews on Environmental Health*, 25(4), 261–305. doi: 10.1515/reveh.2010.25.4.261
13. WHO. (2011). Boron in drinking-water. World Health Organization.
14. U.S. EPA. (2017). PBDEs: Polybrominated Diphenyl Ethers Action Plan. Environmental Protection Agency.
15. ECHA. (2020). Substances of Very High Concern (SVHC) Candidate List. European Chemicals Agency.

16. Papadopoulos, A. M. (2005). State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments. *Energy and Buildings*, 37(1), 77–86. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.05.006>
17. Bourbigot, S., & Duquesne, S. (2007). Fire retardant polymers: Recent developments and opportunities. *Journal of Materials Chemistry*, 17(22), 2283–2300. <https://doi.org/10.1039/B702511D>
18. Schiavoni, S., D'Alessandro, F., Bianchi, F., & Asdrubali, F. (2016). Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 988–1011. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.045>
19. Asif, M. (2016). Growth and sustainability trends in the buildings sector in the GCC region with particular reference to the KSA and UAE. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 1267–1273. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.042>
20. Dzidic, S. (2017). Fire resistance of the straw bale walls. 5th International Conference Contemporary Achievements in Civil Engineering, Subotica. https://www.researchgate.net/publication/316463900_Fire_Resistance_of_the_Straw_Bale_Walls erişim tarihi 02.02.26
21. Gil, L. (2009). Cork composites: A review. *Materials*, 2(3), 776–789. DOI:10.3390/ma2030776
22. Knapic, S., Oliveira, V., Machado, J. S., & Pereira, H. (2016). Cork as a building material: A review. DOI:10.1007/s00107-016-1076-4
23. BRE Global. (2016). BREEAM International New Construction Technical Manual. Building Research Establishment.
24. DGNB. (2018). DGNB System Criteria Set for Buildings. German Sustainable Building Council.
25. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2015). Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik (BYKHY).
26. TS EN 13501-1. (2018). Yapı ürünleri ve yapı elemanlarının yangına tepki deney verilerine göre sınıflandırılması.
27. USGBC. (2020). LEED v4.1 Building Design and Construction Guide. U.S. Green Building Council.

TS 825 2013-2024 BİNA KABUĞU SINIR DEĞERLERİNİN ISITMA VE SOĞUTMA TÜKETİMLERİ ÜZERİNE ETKİSİ

Mehmet Akif Aydın^{1*}

Gül Koçlar Oral²

^{1,2} İTÜ Mimarlık Fakültesi

Taşkışla Kampüsü, Şişli, İstanbul, 34367

ÖZET

Dünya’da çevresel sorunların ve iklim değişikliğinin artan etkileri enerji verimliliği ve karbon azaltımı stratejilerinin politika araçları ile kontrol altına alınmasını zorunlu kılmaktadır. Binalar toplam nihai enerji tüketimindeki büyük payı sebebiyle stratejilerin odak noktasındadır. Türkiye’nin karbonsuzlaşma ve bina enerji verimliliğini artırma hedefleri doğrultusunda güncellenen TS 825 standardı, iklim bölgelerini yeniden ele almış ve bina kabuğu için daha düşük U-değeri sınır değerleri öngörmüştür. Ancak bu değişikliklerin ısıtma ve soğutma yükleri üzerindeki niceliksel etkileri sınırlı biçimde incelenmiştir. Çalışmada, tipik bir konut binası, altı farklı iklim bölgesi ve belirlenen referans şehirlerde, senaryolar, TS 825 2013 ve TS 825 2024 standartlarında tanımlanan bina kabuğu gereklilikleri temel alınarak oluşturulmuştur. Enerji modelleri hazırlanarak ısıtma ve soğutma yüklerinin değişimi karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. DesignBuilder ile yürütülen dinamik simülasyonlar, TS 825 2024 standardının soğuk, çok soğuk ve aşırı soğuk iklim bölgelerinde ısıtma enerjisi tüketimini önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Buna karşın, çok sıcak ve sıcak iklimlerde artan yalıtım seviyeleri ısıtma ve soğutma enerjisi tüketimlerinde daha sınırlı değişikliklere sebep olmuştur. Bulgular, standardın ısıtma enerjisi tüketiminin ağırlıklı bölgelerde daha yüksek performans sunduğunu, sıcak bölgelerde ise iklim duyarlı ek tasarım stratejilerinin gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: Bina Enerji Performans Standartları, Isıtma-Soğutma Enerjisi Tüketimi, İklimle Dengeli Tasarım

THE IMPACT OF TS 825 2013-2024 BUILDING ENVELOPE LIMIT VALUES ON HEATING AND COOLING ENERGY CONSUMPTION

ABSTRACT

The escalating impacts of climate change and environmental degradation necessitate the implementation of policy-driven strategies for enhancing energy efficiency and reducing carbon emissions. Buildings, due to their substantial share in total final energy consumption, remain central to these efforts. Aligned with Türkiye’s decarbonization and building energy-efficiency objectives, the revised TS 825 standard redefines climate zones and introduces more stringent U-value limits for building envelopes. However, the quantitative impacts of these revisions on heating and cooling loads have been only partially explored. In this study, a representative residential building was modeled across six climate zones and selected reference cities, generating scenarios based on the envelope requirements of TS 825 2013 and TS 825 2024. DesignBuilder simulations were used to comparatively evaluate the changes in heating and cooling consumptions. The results indicate that TS 825 2024 substantially reduces heating energy consumptions in cold, very cold, and severe cold climates. In contrast, in hot and very hot climates, increased insulation levels result in more limited changes in both heating and cooling energy consumption. Overall, the findings demonstrate that the updated standard performs more effectively in heating-dominated regions, while highlighting the need for additional climate-responsive design strategies in warmer zones.

Keywords: Building Energy Performance Policy, Heating-Cooling Energy Consumption, Climate-Responsive Design

^{1*}Sorumlu yazar e-posta adresi: aydinm17@itu.edu.tr

1. GİRİŞ

Binalar, küresel nihai enerji tüketimi ve sera gazı emisyonlarındaki yüksek payları nedeniyle enerji verimliliği ve karbonsuzlaşma politikalarının merkezinde yer almaktadır [1,2]. Isıtma ve soğutma enerjisi talebi, bina enerji tüketiminin en büyük bileşenlerinden birini oluşturmaktadır ve bu talebin düzeyi, bina kabuğunun ısıl özelliklerindeki değişimlere önemli ölçüde bağlıdır. Bu nedenle kabuk bileşenlerinin U-değerlerinin iyileştirilmesi, enerji performansını artırmaya yönelik en temel pasif stratejilerden biridir. Literatürde birçok çalışma, iklim koşullarındaki değişimlerin ısıtma-soğutma enerji tüketimlerini önemli ölçüde etkilediğini ve bina kabuğunun enerji performansının bu etkilerin belirleyici unsuru olduğunu ortaya koymuştur [3,4].

Dünyanın farklı bölgelerinde uygulanan bina enerji performansı yönetmelikleri de benzer şekilde U-değerleri temel alınarak geliştirilmiştir. Optimal U-değeri seviyeleri, ısıtma ve soğutma gereksinimlerine bağlı olarak iklim bölgelerine göre değişmektedir. Geniş iklim çeşitliliğine sahip ülkeler, bu farklılığı yönetmek için iklim bölgesine özgü limit değerler belirlemektedir. Çin'in beş iklim bölgesi için farklılaştırılmış yalıtım gereklilikleri [5], ABD'de ASHRAE 90.1'in bölgesel R-değeri ve güneş ısı kazanç katsayısı sınırları [6] ve Avustralya Ulusal Bina Yönetmeliğinde iklime göre değişen minimum yalıtım gereklilikleri [7] bu uygulamalara örnek teşkil etmektedir. Avrupa Birliği'nde ise EPBD çerçevesinde 2008-2014 döneminde U-değerlerinde belirgin sıkılaştırmalar yapılmış, enerji performansının iyileştirilmesi için iklim-temelli yaklaşım güçlendirilmiştir [8]. Bu küresel uygulamalar, U-değeri sınırlandırmalarının ısıtma ve soğutma tüketimlerinin azaltılmasında belirleyici bir rol oynadığını ortaya koymaktadır.

Türkiye'de bina kabuğuna ilişkin U-değerleri, TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Standardı ile belirlenmektedir. İlk olarak 2000'de yürürlüğe giren standart, 2008 ve 2013 güncellemeleriyle geliştirilmiş; son olarak TS 825 2024 revizyonu ile kapsamlı değişikliklere uğramıştır [9–11]. Yeni düzenleme hem iklim bölgesi sınıflandırmalarını hem de duvar, çatı, döşeme ve pencere U-değerlerini yeniden tanımlamakta ve gereklilikleri önceki versiyona kıyasla önemli ölçüde sınırlandırmaktadır [12]. Bu durumun özellikle ısıtma enerjisi tüketiminin ağırlıklı daha yüksek enerji tasarrufu potansiyeli yaratması beklenmektedir. Ancak Türkiye gibi geniş iklim çeşitliliğine sahip olan bir ülkede, artan yalıtım seviyelerinin, farklı iklimlerde ısı kazançlarını nasıl etkilediği ve ısıtma, soğutma enerjisi üzerindeki sonuçları literatürde henüz yeterince kapsamlı biçimde ele alınmamıştır.

Türkiye'de geçmiş çalışmalar optimum yalıtım kalınlıkları [13], bölgesel iklim etkileri ve enerji tasarrufu potansiyelleri [14] üzerine yoğunlaşsa da TS 825'in 2013 ve 2024 versiyonlarının ısıtma ve soğutma yükleri üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak değerlendiren çalışma sayısı oldukça sınırlıdır [15]. Oysa yalıtım seviyesindeki değişimlerin, Türkiye'nin geniş iklim çeşitliliği göz önünde bulundurulduğunda, bölgesel enerji tüketimi üzerinde iklim bölgelerine bağlı olarak değişken etkiler yaratması beklenmektedir.

Bu çalışma, bir konut binası örneği üzerinden TS 825 2013 ve TS 825 2024 versiyonlarının ısıtma ve soğutma tüketimleri üzerindeki bölgesel etkilerini, bina enerji simülasyonları ile inceleyerek bu araştırma boşluğunu gidermeyi amaçlamaktadır. Elde edilen bulgular, yeni standardın bölgesel enerji performansı üzerindeki etkilerine ilişkin nicel bir değerlendirme sunmakta ve Türkiye'nin bina enerji verimliliği politikalarının teknik uygulama sonuçlarına ışık tutmaktadır.

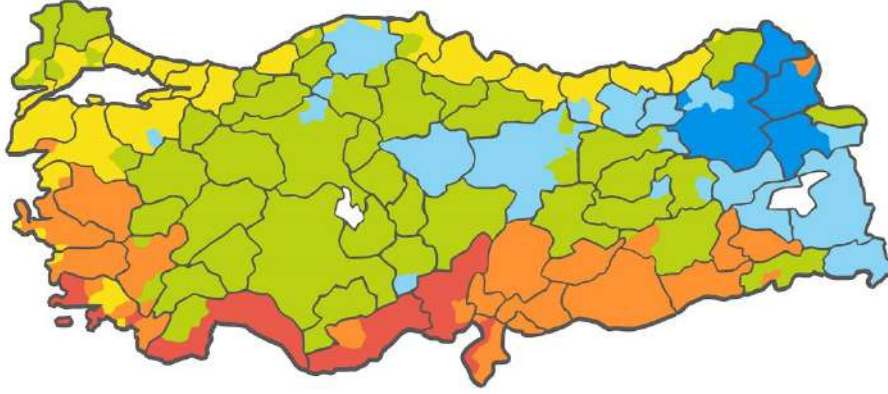
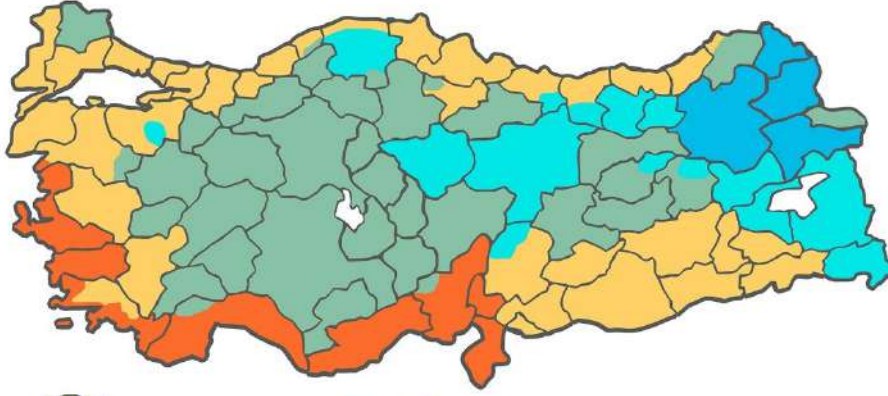
2. YÖNTEM

Bu çalışmada, TS 825 2013 ve TS 825 2024 versiyonlarında tanımlanan bina kabuğu U-değeri limitlerinin bölgesel olarak ısıtma ve soğutma tüketimleri üzerindeki etkilerini nicel olarak değerlendirmek amacıyla, farklı senaryolar için bina enerji simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar, EnergyPlus hesap motorunu kullanan DesignBuilder yazılımı aracılığıyla yürütülmüştür. Yöntem, TS 825 limit değerlerinin incelenmesi, iklim bölgesi ve pilot illere göre senaryoların belirlenmesi, referans binanın tanımlanması, bina kabuğu senaryolarının oluşturulması ve enerji simülasyon sonuçlarının değerlendirilmesi olmak üzere beş adımdan oluşmaktadır. Standart değişikliklerinin farklı iklim bölgelerinde ısıtma ve soğutma tüketimleri üzerindeki etkileri sistematik bir yöntemle değerlendirilmiştir.

2.1. TS 825 Limit Değerlerinin İncelenmesi

Çalışmanın ilk bölümünde, TS 825 2013-2024 versiyonları, iklim bölgeleri ve bina kabuğu sınır U-değerleri kapsamında incelenmiştir. TS 825 2013 versiyonunda Türkiye, yalnızca ısıtma derecesi (HDD) değerlerine dayalı olarak beş iklim bölgesine ayrılmıştır. Bu versiyonda pencereler için sabit bir U-değeri sınırı belirlenirken, duvar, çatı ve zemin bileşenleri için bölgeye göre değişen limit değerler tanımlanmıştır. TS 825 2024 ile birlikte iklim bölgesi sistemi yeniden düzenlenmiş ve bölge sayısı altıya çıkarılmıştır. Sınıflandırma yöntemi HDD temeline bağlı kalmakla birlikte, bölge sınırlarında değişiklikler olmuş ve çok sayıda yerleşim farklı bölgelerde konumlandırılmıştır. Bu durum, 2013 ve 2024 versiyonlarındaki aynı numaralandırmayı taşıyan iklim bölgelerinin coğrafi kapsamlarının farklılaştığı anlamına gelmektedir. Ayrıca 2024 sınıflandırmasında, mikroklimatik çeşitliliğe sahip daha küçük ölçekli yerleşimlerin sayısı arttırılmıştır. **Şekil 1** yeni iklim bölgesi dağılımı ve iki versiyon arasındaki değişimleri gösterilmektedir.

U-değeri limit değerlerinde 2024 versiyonu, duvar, çatı ve döşeme bileşenleri için önemli ölçüde sınırlandırılmış gereklilikler getirmiştir. U değerleri üst sınırları bileşene ve iklim bölgesine bağlı olarak yaklaşık %10 ile %50 arasında düşürülmüştür. Pencereler için U-değeri sınırı önceki versiyonda olduğu gibi 1,8 W/m²K olarak korunmuştur; ancak güneş ışıınımı kazanç katsayısı (SHGC) değerleri tanımlanarak pencere bileşenleri için ek bir sınırlandırma getirilmiştir. Bu yenilik, soğutma yüklerinin önemli olduğu sıcak yaz dönemi ısı koşullarının daha etkin biçimde kontrol edilmesini hedeflemektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde, TS 825 2024 versiyonu hem iklim bölgesi kapsamını hem de bina kabuğu performans gerekliliklerini yeniden tanımlayan yapısal bir değişimi temsil etmektedir. Bu bağlamda, bu çalışmada, sözü edilen değişikliklerin ısıtma ve soğutma yükleri üzerindeki etkileri, enerji simülasyonları yoluyla ayrıntılı biçimde ortaya konulmaktadır.



2013 Bölgeler	Duvar U_D (W/m ² K)	Çatı U_T (W/m ² K)	Zemin Döşeme U_i (W/m ² K)	Pencere U_p (W/m ² K)
1.Bölge	0,66	0,43	0,66	1,8
2.Bölge	0,57	0,38	0,57	1,8
3.Bölge	0,48	0,28	0,43	1,8
4.Bölge	0,38	0,23	0,38	1,8
5.Bölge	0,36	0,21	0,36	1,8

2024 Bölgeler	Duvar U_D (W/m ² K)	Çatı U_T (W/m ² K)	Zemin Döşeme U_i (W/m ² K)	Pencere U_p (W/m ² K)	g
1.Bölge	0,45	0,35	0,4	1,8	$\leq 0,45$
2.Bölge	0,4	0,3	0,35	1,8	$\leq 0,45$
3.Bölge	0,4	0,3	0,35	1,8	$\leq 0,45$
4.Bölge	0,35	0,25	0,3	1,8	$\leq 0,55$
5.Bölge	0,25	0,2	0,25	1,8	$\leq 0,55$
6.Bölge	0,25	0,2	0,25	1,8	$\leq 0,55$

Şekil 1. TS 825 2013 ve 2024 versiyonlarında iklim bölgelerinin dağılımı ve bina kabuğu limit değerleri

2.2. İklim Bölgesi ve Pilot İllere Göre Senaryoların Belirlenmesi

TS 825 2024 versiyonun iklim bölgesi ve limit değer düzenlemelerinin ısıtma ve soğutma yükleri üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak değerlendirebilmek amacıyla altı pilot il seçilmiştir. Bu iller, hem TS 825 2024 versiyonunda tanımlanan altı iklim bölgesini temsil etmekte hem de TS 825 2013 versiyonundaki beş bölgeyi sınıflandırma ile karşılaştırma olanağı sağlamaktadır. Pilot iller ilgili iklim bölgesinin gelişmişlik düzeyi yüksek kentsel merkezlerinden seçilmiştir. Bu yaklaşım, seçilen illerin nüfus, yapı stoğu ve iklimsel temsil etme potansiyeli açısından bölgenin karakteristik özelliklerini yansıtmalarını amaçlamaktadır [16].

Çalışmada, her bir pilot il için TS 825 2013 ve TS 825 2024 versiyonlarında tanımlanan iklim bölgeleri dikkate alınarak toplam 12 senaryo oluşturulmuştur. Böylece her il için iki farklı standart kapsamında enerji performansının karşılaştırılması amaçlanmıştır. TS 825 2024 versiyonu, iklim bölgelerini “çok sıcak”tan “aşırı soğuk” a uzanan altı sınıfta tanımlarken, 2013 versiyonunda sadece

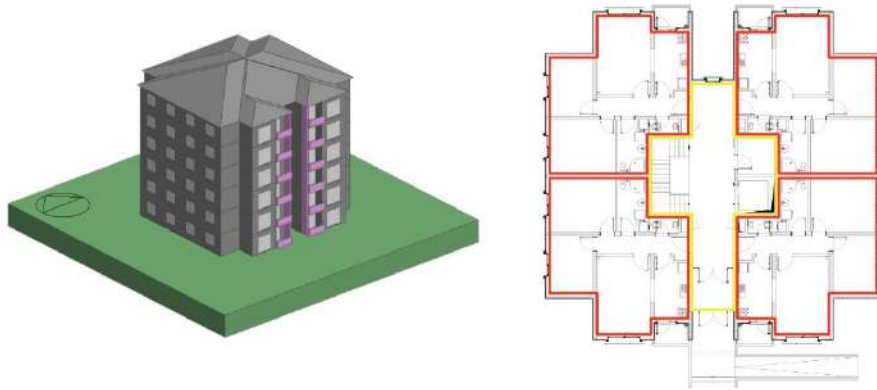
bölge numaraları bulunmakta ve herhangi bir niteliksel tanımlama yapılmamaktadır. **Çizelge 1**, her iki versiyon için pilot illerin bölgelere dağılımını ve 2024 sınıflandırması kapsamında karşılık gelen iklim tiplerini göstermektedir.

Çizelge 1. Belirlenen senaryo kodları, pilot iller, ilişkili standart ve iklim tanımlamaları

Senaryo Kodu	Pilot İl	TS 825 Versiyon-Bölge	TS 825 İklim Sınıfı
S13-1	ANTALYA	2013 - 1.Bölge	-
S13-2	İZMİR	2013 - 1.Bölge	-
S13-3	İSTANBUL	2013 - 2.Bölge	-
S13-4	ANKARA	2013 - 3.Bölge	-
S13-5	SİVAS	2013 - 4.Bölge	-
S13-6	ERZURUM	2013 - 5.Bölge	-
S24-1	ANTALYA	2024 - 1.Bölge	Çok Sıcak
S24-2	İZMİR	2024 - 2.Bölge	Sıcak
S24-3	İSTANBUL	2024 - 3.Bölge	Ilıman
S24-4	ANKARA	2024 - 4.Bölge	Soğuk
S24-5	SİVAS	2024 - 5.Bölge	Çok Soğuk
S24-6	ERZURUM	2024 - 6.Bölge	Aşırı Soğuk

2.3. Referans Binanın Tanımlanması

Türkiye’de bina enerji performansı hesaplamalarında ulusal ölçekte tanımlanmış resmi bir referans bina bulunmamaktadır. Bu nedenle çalışmada, mevcut konut üretim uygulamalarını yansıtan ve güncel ulusal mevzuat ile yaygın yapı teknolojilerinin etkisini taşıyan, 2006 sonrası Türkiye’de konut sektörünü belirgin biçimde şekillendiren Toplu Konut İdaresi (TOKİ) uygulamaları incelenmiş ve ülke genelinde yaygın olarak inşa edilen B1 tipi konut blokları referans tipoloji olarak seçilmiştir [17]. Referans bina, her biri 375 m² kat alanına sahip altı katlı bir toplu konut bloğudur. Her katta dört bağımsız konut birimi bulunmakta olup kat yüksekliği 3 m’dir. Enerji simülasyonlarında her daire ayrı bir termal bölge olarak modellenmiş; ayrıca merdiven boşluğu, asansör shaftı ve giriş holünü kapsayan merkezi bir dolaşım bölgesi tanımlanmıştır (**Şekil 2**).



Şekil 2. Referans bina modeli ve kat planı.

Bina kabuğunun optik ve ısısal özellikleri TS 825 kapsamında yaygın kullanılan malzemeler esas alınarak belirlenmiştir. Dış duvarların taşıyıcı kısımlarında betonarme perde elemanlar yer almakta dolgu duvarlar olarak da tuğla duvarlar kullanılmıştır. Çatı ve döşeme bileşenleri de Türkiye genelinde sık kullanılan katman yapıları dikkate alınarak tanımlanmıştır. Isı yalıtım ürünleri içinde pazar payı en yüksek olan malzemelerden EPS ve mineral yün esas alınmıştır [18]. Pencere için iki farklı sistem kurgulanmış, böylece farklı iklim bölgelerine uygun uygulamalar temsil edilmiştir. Yapı bileşenlerinin özellikleri **Çizelge 2**'de özetlenmiştir.

Çizelge 2. Referans bina yapı bileşenlerinin detayları ve termal özellikleri

Yapı Elemanı	Malzemeler	Kalınlık (m)	Isı İletim Katsayısı (W/m·K)	Yoğunluk (kg/m ³)
Beton Duvar	Kireç-çimento harcı	0,02	1	1800
	Betonarme perde	0,25	2,5	2400
	Çimento esaslı sıva	0,03	1,6	2000
	EPS levha	*Çizelge 3	0,035	25
	Mineral esaslı sıva	0,01	0,35	900
Tuğla Duvar	Kireç-çimento harcı	0,02	1	1800
	Yatay delikli tuğla	0,25	0,36	700
	Çimento esaslı sıva	0,03	1,6	2000
	EPS levha	*Çizelge 3	0,035	25
	Mineral esaslı sıva	0,01	0,35	900
Çatı	Kireç-çimento harcı	0,02	1	1800
	Betonarme döşeme	0,15	2,5	2400
	Mineral esaslı camyünü	*Çizelge 3	0,04	100
Zemin Döşeme	Laminat kaplama	0,01	0,15	800
	Çimento esaslı şap	0,03	1,4	2000
	EPS levha	*Çizelge 3	0,035	25
	Tesviye şapı	0,02	1,4	2000
	Betonarme temel betonu	0,6	2,5	2400
	Donatısız beton	0,1	1,1	1800
Pencere	4 mm Low-E kaplamalı cam	0,004	1,8	SHGC 0.45 / 0.55
	16 mm hava boşluğu	0,016		
	4 mm cam	0,004		
	PVC doğrama	0,07		

Binaya ilişkin iç çevre koşulları yaygın kullanıma uygun olarak tanımlanmıştır. Isıtma ve soğutma ayar sıcaklıkları sırasıyla 20°C ve 26°C olarak belirlenmiştir. HVAC sistemi, doğalgaz yakıtlı kazan ile beslenen radyatör ısıtması ve elektrikle çalışan bir soğutma sistemi üzerine kuruludur (ısıtma COP: 0.85; soğutma COP: 4.5).

2.4. Bina Kabuğu Senaryolarının Oluşturulması

Referans bina temel alınarak, TS 825 2013 ve TS 825 2024 versiyonlarının iklim bölgesi farklılıklarını ve bina kabuğu toplam ısı geçirme katsayısı sınır değerlerini yansıtacak şekilde toplam 12 bina kabuğu senaryosu oluşturulmuştur. Bu senaryolarda, yapı sistemleri ve malzeme

katmanları sabit tutulmuş; yalnızca ilgili standardın gerektirdiği U-değeri sınırlarını karşılamak amacıyla yalıtım kalınlıkları iklim bölgesine göre yeniden düzenlenmiştir. Çalışmada, betonarme dış duvar, tuğla dış duvar, çatı ve zemin döşemesi için gerekli yalıtım kalınlıkları bölgesel U-değeri sınırlarını sağlayacak şekilde belirlenmiştir ve **Çizelge 3**'te sunulmaktadır.

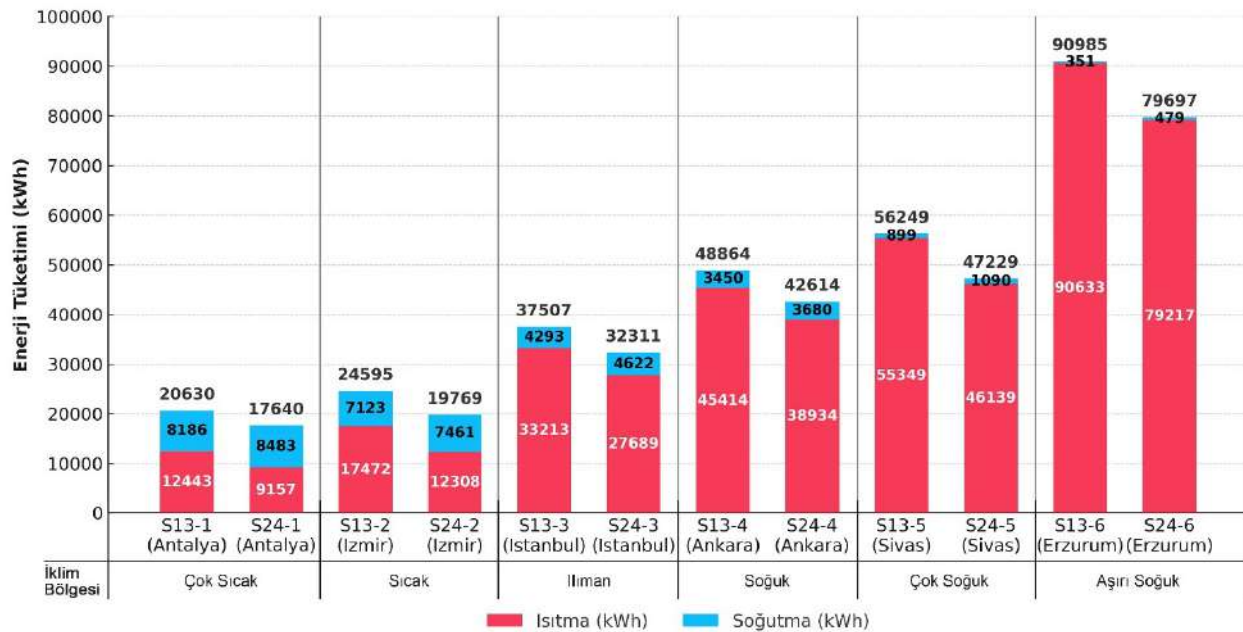
Referans binada dış duvarlar betonarme perde duvarlar ve tuğla dolgu duvarlar olmak üzere iki farklı konstrüksiyondan oluşmaktadır. Bu nedenle, TS 825'e uygun bütüncül bir toplam ısı geçirme katsayısı elde edilebilmesi için duvar U-değeri alan ağırlıklı ortalama yöntemi ile hesaplanmıştır. Her iki duvar tipinin toplam yüzey alanı içerisindeki payları dikkate alınarak tek bir eşdeğer U-değeri oluşturulmuştur.

Çizelge 3. Senaryolarda limit değerlere göre belirlenen yalıtım kalınlıkları

Yapı Elemanı		Senaryo											
		S13-1	S13-2	S13-3	S13-4	S13-5	S13-6	S24-1	S24-2	S24-3	S24-4	S24-5	S24-6
Dış Duvar	Beton Duvar U Değeri	0,73	0,73	0,63	0,52	0,41	0,38	0,49	0,43	0,43	0,37	0,26	0,26
	Tuğla Duvar U Değeri	0,51	0,51	0,46	0,40	0,33	0,31	0,38	0,34	0,34	0,31	0,23	0,23
	Yalıtım Kalınlığı	3,6	3,6	4,4	5,5	7,4	8,0	6,0	7,0	7,0	8,2	12,2	12,2
	Ortalama U Değeri	0,65	0,65	0,57	0,48	0,38	0,36	0,45	0,40	0,40	0,35	0,25	0,25
	Limit U Değeri	0,66	0,66	0,57	0,48	0,38	0,36	0,45	0,40	0,40	0,35	0,25	0,25
Çatı	Çatı U Değeri	0,43	0,43	0,38	0,28	0,23	0,21	0,35	0,30	0,30	0,25	0,20	0,20
	Yalıtım Kalınlığı	8,0	8,0	9,2	12,9	16,0	17,7	10,1	12,0	12,0	14,6	18,6	18,6
	Limit U Değeri	0,43	0,43	0,38	0,28	0,23	0,21	0,35	0,30	0,30	0,25	0,20	0,20
Zemin Döşeme	Zemin Döşeme U Değeri	0,65	0,65	0,57	0,43	0,38	0,36	0,40	0,35	0,35	0,30	0,25	0,25
	Yalıtım Kalınlığı	3,1	3,1	3,9	5,9	7,0	7,5	6,5	7,8	7,8	9,4	11,8	11,8
	Limit U Değeri	0,66	0,66	0,57	0,43	0,38	0,36	0,40	0,35	0,35	0,30	0,25	0,25
Pencere	Pencere U Değeri	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80
	Limit U Değeri	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80
	Pencere SHGC	0,45	0,45	0,45	0,55	0,55	0,55	0,45	0,45	0,45	0,55	0,55	0,55
	Limit SHGC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

2.5. Enerji Simülasyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bu bölümde, TS 825 2013 ve TS 825 2024 versiyonlarına göre oluşturulan bina kabuğu senaryoları için yürütülen yıllık enerji simülasyonlarının sonuçları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Analizlerde, her pilot il için iki standart karşılaştırılmış ve ısıtma, soğutma enerjisi tüketimlerindeki değişimler odak noktası olarak ele alınmıştır. Sonuçlar, TS 825 2024 ile getirilen daha düşük U-değeri sınırlarının, farklı oranlarda olsa da tüm iklim bölgelerinde ısıtma enerjisi ihtiyacını azalttığını göstermektedir. Bununla birlikte, artan yalıtım seviyeleri soğutma enerjisi tüketimlerinde küçük oranlarda artış göstermiştir (**Şekil 3**).



Şekil 3. Altı farklı pilot il ve iklim bölgesinde, TS 825 2013-2024'e uygun limit değerlerle, ısıtma ve soğutma enerjisi tüketimleri

Çok sıcak iklim bölgesinde yer alan Antalya'da S24-1 senaryosu, 2013 versiyonuna kıyasla ısıtma enerjisi %26,4 oranında azaltarak 3.287 kWh düşürmüş, buna karşılık soğutma enerjisi %3,6 oranında artırarak 297 kWh yükseltmiştir. Sıcak iklim bölgesini temsil eden İzmir'de ısıtma enerjisi %29,5 oranında bir azalma (-5.164 kWh) gerçekleşirken soğutma enerjisi %4,7 oranında (+337 kWh) artmıştır. Ilımlı iklim bölgesindeki İstanbul'da ısıtma enerjisi tüketimi %16,6 oranında azalmış (-5.524 kWh), buna karşın soğutma tüketimi %7,6 oranında artmıştır (+328 kWh). Soğuk iklim bölgesinde yer alan Ankara'da ısıtma enerjisi %14,3 oranında azalmış (-6.480 kWh) ve soğutma enerjisi %6,7 oranında artmıştır (+230 kWh). Çok soğuk iklim bölgesindeki Sivas'ta ısıtma enerjisi tüketimi %16,6 oranında azalmış (-9.210 kWh), buna karşılık soğutma enerjisi tüketimi %21,1 oranında artmıştır (+190 kWh). Aşırı soğuk iklim koşullarını temsil eden Erzurum'da ise ısıtma enerjisi tüketimi %12,6 oranında düşmüş (-11.416 kWh), ancak soğutma enerjisi %36,2 oranında artarak 127 kWh yükselmiştir. TS 825 2024 ile sağlanan yalıtım iyileştirmeleri ısıtma yüklerini azaltmakta, buna karşın soğutma yüklerini iklim bölgesine bağlı olarak çeşitli oranlarda artırmaktadır.

Toplam enerji tüketimine bakıldığında, TS 825 2024 versiyonunun tüm pilot illerde belirgin azalma sağladığı görülmektedir. Antalya’da toplam enerji tüketimi %14,5 oranında azalarak 2.990 kWh düşmüş, İzmir’de %19,6 oranında azalarak 4.827 kWh, İstanbul’da %13,8 oranında azalarak 5.196 kWh, Ankara’da %12,8 oranında azalarak 6.250 kWh, Sivas’ta %16,0 oranında azalarak 9.020 kWh, Erzurum’da ise %12,4 oranında azalarak 11.288 kWh düşüş gerçekleşmiştir. Bu iyileşmelerin büyüklüğü, özellikle ısıtma enerjisi tüketiminin toplam enerji tüketiminde baskın olduğu soğuk ve çok soğuk iklim bölgelerinde daha belirgindir (**Çizelge 4**).

Çizelge 4. Her bir iklim bölgesi için TS825 2013(*) standardına kıyasla TS825 2024 standardı kapsamında ısıtma, soğutma ve toplam enerji tüketimi miktar ve yüzdesel değişimleri

İklim Bölgesi	Senaryolar	Isıtma Enerjisi Tüketimi Değişimi (kWh)	Soğutma Enerjisi Tüketimi Değişimi (kWh)	Toplam Enerji Tüketimi Değişimi (kWh)
Çok Sıcak (ANTALYA)	S13-1 * S24-1	-%26,4 / -3287	%3,6 / +297	-%14,5 / -2990
Sıcak (İZMİR)	S13-2 * S24-2	-%29,5 / -5164	%4,7 / +337	-%19,6 / -4827
Ilıman (İSTANBUL)	S13-3 * S24-3	-%16,6 / -5524	%7,6 / +328	-%13,8 / -5196
Soğuk (ANKARA)	S13-4 * S24-4	-%14,3 / -6480	%6,7 / +230	-%12,8 / -6250
Çok Soğuk (SİVAS)	S13-5 * S24-5	-%16,6 / -9210	%21,1 / +190	-%16,0 / -9020
Aşırı Soğuk (ERZURUM)	S13-6 * S24-6	-%12,6 / -11416	%36,2 / +127	-%12,4 / -11288

Genel olarak, TS 825 2024 versiyonunun uygulanması tüm bölgelerde enerji performansını farklı oranlarda iyileştirmiştir. Isıtma enerjisindeki düşüş özellikle ısıtma öncelikli iklim bölgelerinde belirgindir; buna karşın sıcak bölgelerde ısıtma ve soğutma enerjisindeki artış ve azalışlar düşük miktarlarda olup verimliliğin iklim duyarlı ek tasarım stratejilerine odaklanması ve çeşitlendirilmesini işaret etmektedir.

3. SONUÇLAR

Bu çalışma, TS 825 2024 standardında güncellenen U-değeri üst sınır değerlerinin Türkiye’nin farklı iklim bölgelerinde ısıtma ve soğutma enerjisi tüketimleri üzerindeki etkilerini incelemiş ve güncel standardın ısıtma performansa olan etkilerini karşılaştırmalı olarak ortaya koymuştur. Simülasyon sonuçları, tüm iklim bölgelerinde ısıtma enerjisi tüketiminin farklı oranlarda azaldığını göstermektedir. Bu iyileşme, özellikle soğuk, çok soğuk ve aşırı soğuk iklim bölgelerinde daha yüksek oranlarda gerçekleşmiş ve güncel standardın ve yalıtım uygulamalarının bu bölgelerde etkin bir enerji verimliliği aracı enerji tüketimlerini azaltmada etkili olduğunu göstermiştir.

Diğer bir taraftan, soğutma enerjisi tüketimleri tüm bölgelerde daha düşük miktarlarda artış göstermiştir. Artış oranları iklim tipine göre değişmekte olup, özellikle sıcak ve çok sıcak bölgelerde daha belirgin hale gelmiştir.

Isıtma ve soğutma yükleri birlikte değerlendirildiğinde, toplam enerji tüketiminde tüm pilot illerde azalma elde edilmiştir. Ancak sıcak iklim bölgelerinde bina kabuğunda yalıtım uygulamalarının tek başına yeterli olmadığını; gölgeleme, yönlenme, doğal havalandırma ve güneş kontrol stratejileri gibi iklim duyarlı tasarım ilkeleriyle desteklenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Özellikle güncel yalıtım uygulamalarının gerektirdiği yatırım maliyetleri dikkate alındığında, Türkiye gibi kısıtlı ekonomik koşullara sahip ülkelerde öncelikle iklim bölgelerine özgü stratejilerin geliştirilmesi daha etkin enerji performansı sağlayabilir.

Sonuç olarak, bina enerji performansının artırılmasında bina kabuğu iyileştirmelerinin ötesinde iklim bölgelerine özgü bütüncül ve iklim duyarlı tasarım yaklaşımlarının benimsenmesi kritik önem taşımaktadır. Bu yaklaşımın benimsenmesi, enerji tüketiminin azaltılmasının yanı sıra yatırım kaynaklarının daha etkin kullanılmasına katkı sağlayarak ülke ekonomisi açısından da önemli kazanımlar yaratabilir.

KAYNAKLAR

1. International Energy Agency. (2025). Developing a Global Energy Efficiency Workforce in the Buildings Sector.
2. Bertoldi, P., Cuniberti, B., Labanca, N., Toleikyte, A., Tsemekidi-Tzeiranaki, S., & Zangheri, P. (2019). Analysis of the annual reports 2018 under the Energy Efficiency Directive: Summary report. Publications Office of the European Union.
3. D'Agostino, D., Congedo, P. M., Albanese, P. M., Rubino, A., & Baglivo, C. (2024). Impact of climate change on the energy performance of building envelopes and implications on energy regulations across Europe. *Energy*, 288, 129886.
4. Wang, H., & Chen, Q. (2014). Impact of climate change heating and cooling energy use in buildings in the United States. *Energy and Buildings*, 82, 428–436.
5. Zhao, M., Künzeli, H. M., & Antretter, F. (2015). Parameters influencing the energy performance of residential buildings in different Chinese climate zones. *Energy and Buildings*, 96, 64–75.
6. Hossei, H., & Kim, K. H. (2024). Comprehensive analysis of energy and visual performance of building-integrated photovoltaics in all ASHRAE climate zones. *Energy and Buildings*, 317, 114369.
7. Kuru, A., Lyu, K., Gocer, O., Brambilla, A., & Prasad, D. (2024). Climate risk assessment of buildings: An analysis of operating emissions of commercial offices in Australia. *Energy and Buildings*, 315, 114336.
8. Congedo, P. M., Baglivo, C., D'Agostino, D., & Albanese, P. M. (2024). Overview of EU building envelope energy requirement for climate neutrality. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 202, 114712.
9. Türk Standartları Enstitüsü. (1998). TS 825: Binalarda ısı yalıtım kuralları. TSE.
10. Türk Standartları Enstitüsü. (2008). TS 825: Binalarda ısı yalıtım kuralları. TSE.
11. Türk Standartları Enstitüsü. (2013). TS 825: Binalarda ısı yalıtım kuralları. TSE.
12. Türk Standartları Enstitüsü. (2024). TS 825: Binalarda ısı yalıtım kuralları. TSE.
13. Sağlam, N. G., Yılmaz, A. Z., Becchio, C., & Corgnati, S. P. (2017). A comprehensive cost-optimal approach for energy retrofit of existing multi-family buildings: Application to apartment blocks in Turkey. *Energy and Buildings*, 150, 224–238.

14. Köse Özturan, M., & Kurnuç Seyhan, A. (2024). Determination of optimum insulation thickness of building walls according to four main directions by accounting for solar radiation: A case study of Erzincan, Türkiye. *Energy and Buildings*, 304, 113871.
15. Aydın, M. A., & Oral, G. K. (2025). Environmental impact assessment of building envelope insulation standards for decarbonization efforts in a developing country: A case study for Türkiye. *Energy and Buildings*, 116537.
16. Türkiye İstatistik Kurumu. (2021). Nüfus İstatistik Portalı, Bina İstatistikleri. <https://www.tuik.gov.tr>
17. Toplu Konut İdaresi Başkanlığı. (2025). TOKİ Resmi Web Sitesi. Erişim Tarihi: 22/05/2025. <https://www.toki.gov.tr/en/>
18. İZODER – Isı Yalıtım Sanayicileri Derneği. (2023). Thermal Insulation Report of Turkey – Izodergi. <https://www.izoder.org.tr>.

OFİS BİNALARI İÇİN CEPHE SEÇENEKLERİNİN ENERJİ TÜKETİMİ VE KARBON SALIMI AÇISINDAN İNCELENMESİ: ANTALYA ÖRNEĞİ

Ebru ÜNVER KARAER^{1*}
Gül KOÇLAR ORAL²
^{1,2} İTÜ Mimarlık Fakültesi
Taşkışla Kampüsü, Şişli, İstanbul, 34367

ÖZET

Birleşmiş Milletler Çevre Programı'nın 2024 raporunda, dünyada tüketilen toplam enerjinin ve enerji kaynaklı karbon salımının/emisyonunun yaklaşık üçte birinden binaların sorumlu olduğu belirtilmektedir. Nitekim ülkeler, konuya ilişkin önlemler almakta; binaların enerji tüketimi ile karbon salımının azaltılmasına yönelik mevzuat geliştirmektedir. Türkiye'de çalışmalar, 2015 Paris Anlaşması'na paralel olarak ilerlemiş, Eylül 2025'te "Türkiye Cumhuriyeti İkinci Ulusal Katkı Beyanı" hazırlanmıştır. Böylece, emisyonların 2035 yılı itibarıyla azaltılması ve 2053 yılında ise net sıfır emisyonu ulaşılması hedeflenmektedir. Bu bildiride, ülkemizdeki güncel mevzuat çerçevesinde yeni yapılacak binaların enerji performansını iyileştirme ve karbon salımını azaltmada etkili cephe seçeneklerinin belirlenmesine yönelik geliştirilen bir yaklaşım ile uygulama örneği ele alınmıştır. Yaklaşımın uygulaması, Antalya ilinde yeni yapılacak ofisler için TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Standardı doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, standardın 2013 ve 2024 versiyonları da karşılaştırılmıştır. Bu bağlamda, gün boyu kullanılan, konfor gereksinimi yüksek, ofis gibi binalar için cephe/bina seçenekleri örneklenmiş, enerji tüketimi ile karbon salımının azaltılmasına yönelik senaryolar ortaya konularak mimari tasarım sürecine katkı sağlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Enerji verimliliği, Karbon salımı, Ofis binaları, Cephe, Antalya.

ASSESSMENT OF FACADE ALTERNATIVES FOR OFFICE BUILDINGS IN TERMS OF ENERGY CONSUMPTION AND CARBON EMISSIONS: A CASE STUDY OF ANTALYA

ABSTRACT

According to the 2024 report by the United Nations Environment Programme, buildings account for approximately one-third of global energy consumption and energy-related carbon emissions. In response, countries have developed regulations to reduce energy use and carbon emissions in the building sector. In line with global measures and the 2015 Paris Agreement, Türkiye prepared its "Second Nationally Determined Contribution" in September 2025, aiming for emission reductions by 2035 and net-zero by 2053. This paper presents an approach for identifying effective façade alternatives to improve the energy performance of new buildings and reduce carbon emissions under current regulations, together with a case study application. The methodology includes data collection, design development, scenario creation, calculations, and result evaluation. The approach was applied to office buildings in Antalya in accordance with the TS 825 Thermal Insulation Requirements for Buildings. In addition, the 2013 and 2024 versions of the standard were compared. Consequently, facade alternatives for office buildings were evaluated, and scenarios for reducing energy consumption and carbon emissions were determined, thereby contributing to the architectural design process.

Keywords: Energy efficiency, Carbon emission, Office buildings, Facade, Antalya.

^{1*} ebru@iltay.com.tr

1. GİRİŞ

İnsanoğlunun yaşamını sürdürmek için enerjiye olan bağımlılığı ve enerji tüketimi, nüfusun çoğalması, teknoloji ve yaşam standartlarının gelişmesine paralel olarak artmıştır. 1970’li yıllarda başlayan petrol krizi, enerji fiyatlarındaki artış, enerji üretiminin ve tüketiminin doğal çevre üzerindeki olumsuz etkilerinin farkına varılması, enerji etkin bina tasarımı yaklaşımlarının yaygınlaşmasına yol açmıştır. Bu bağlamda, yaşam döngüsü için gerekli olan enerjiyi en verimli şekilde kullanan ve karbon salımı düşük olan binalar gündeme gelmiştir. Birleşmiş Milletler Çevre Programı’nın 2024 yılında yayınladığı raporda dünyada kullanılan toplam enerji tüketiminin ve enerji kaynaklı karbon salımının yaklaşık üçte birinden “binaların” sorumlu olduğu belirtilmektedir.

Enerji etkinliği bakımından iç ve dış çevreyi ayırması açısından en önemli ögenin, bina ölçeğinde bina kabuğu olduğu bilinmektedir. Bina kabuğu, sahip olduğu bileşen ve malzeme özelliklerine bağlı olarak, bina enerji performansını önemli ölçüde artırmakta; enerji tüketimini, gömülü ve operasyonel karbon salımlarını azaltmada kritik bir rol oynamaktadır. Böylece, yalnızca binanın çevresel etkilerinin azaltılmasıyla sınırlı kalmayıp, aynı zamanda işletme maliyetlerinin düşürülmesi yoluyla ekonomik açıdan da önemli kazanımlar elde edilebilir. Bu çerçevede, dünya ülkeleri, yapılarda enerjinin etkin kullanılması, karbon salımının az olması konusunda 1990’lı yıllardan bu yana çeşitli sözleşmeler, protokoller yapmışlardır. Türkiye’de de aynı hedeflere yönelik mevzuat çalışmaları bulunmaktadır.

Küresel çalışmalardan 2015 Paris Anlaşması’na paralel olarak Türkiye’de 2021 yılında “Ulusal Katkı Beyanı” hazırlanmış, Nisan 2023’de “Güncellenmiş Birinci Ulusal Katkı Beyanı” yayınlanmış, Eylül 2025’de ise Türkiye Cumhuriyeti İkinci Ulusal Katkı Beyanı Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (BMİDÇS) Sekretaryasına sunulmuştur. Yeni beyan kapsamında, sera gazı emisyonlarının 2035 yılı itibarıyla azaltılması ve sınırlandırılması amaçlanarak, Türkiye’nin ekonomik kalkınma hedefleri, ulusal koşulları ve sürdürülebilir büyüme vizyonu doğrultusunda adil, kapsayıcı ve mümkün olan en yüksek düzeyde bir azaltım öngörülmektedir. 2053 yılında ise net sıfır emisyonu ulaşılması hedeflenmektedir.

Bu bildiride, ülkemizdeki mevzuat bağlamında yeni yapılacak ve tipolojisi ofis olan binaların enerji performanslarının iyileştirilmesi ve karbon salımının azaltılmasında etkili olan cephe seçeneklerinin belirlenmesine yönelik bir yaklaşım, yaklaşımın uygulandığı bir çalışma ve sonuçları ele alınmıştır. Çalışma Antalya ili için ülkemizde yürürlükte olan TS 825 Binalarda Isı Yalıtımı Kuralları Standardı’ndaki bilgiler doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular ile "ofis binaları" gibi gün boyu kullanılan, ısısal ve görsel konforun önemli olduğu mekanları barındıran binaların mimari tasarım aşamasında, hacmin kullanım amacına göre sistemler kurgulanarak, uygun cephe seçeneklerinin oluşturulması, enerji tüketiminin ve karbon salımının azaltılmasına ilişkin senaryolar ortaya konulması hedeflenmiştir.

2. ÇALIŞMANIN YÖNTEMİ ve KABULLER

Çalışmada, yeni yapılacak binaların enerji performanslarının iyileştirilmesi ve karbon salımının azaltılmasında etkili olan cephe seçeneklerinin belirlenmesine yönelik olarak geliştirilen yaklaşımın adımları uygulanmıştır. Söz konusu yaklaşımın yöntemi,

- veri toplanması,
- tasarım kararlarının alınması,
- cephelere yönelik senaryolarının hazırlanması,
- senaryolar için enerji tüketimi ve karbon salımı hesaplamalarının yapılması ve
- hesaplama sonuçlarının değerlendirilerek uygun senaryoların belirlenmesi

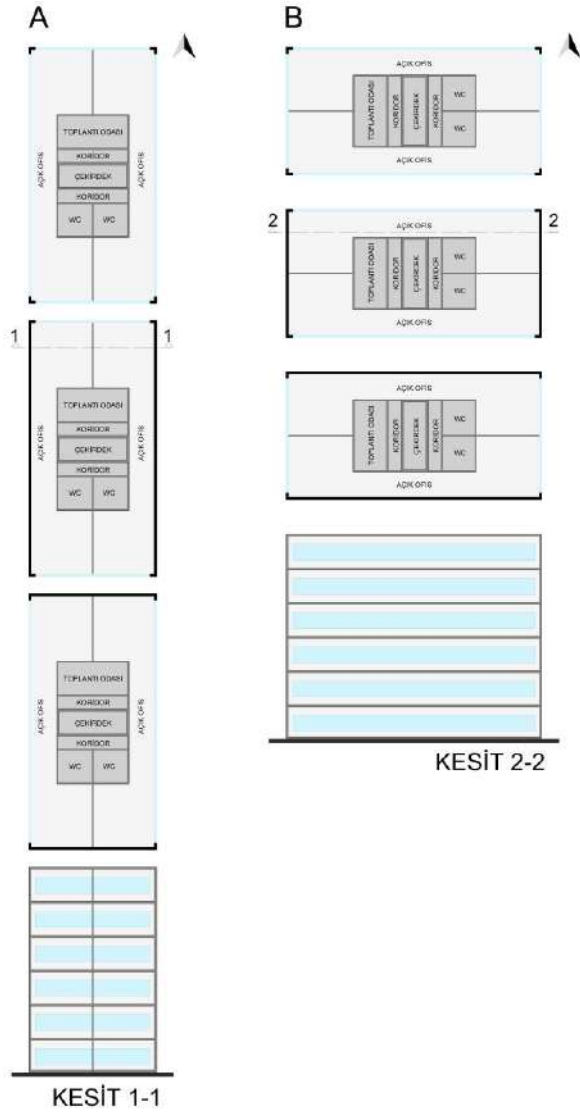
olmak üzere beş temel adımdan oluşturulmuştur [1].

Yukarıda verilen yöntem uyarınca Antalya ilinde yeni yapılacak ofis binalarına yönelik olarak, çevre, iklim, bina, kullanıcı ve mevzuat verileri toplanmış, pasif ve aktif tasarım kararları alınmış, cephe/bina senaryoları oluşturulmuştur. Kışları ılık ve yağışlı, yazları sıcak ve kurak geçen Akdeniz iklim kuşağında bulunan Antalya, “TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları” standardının “2013 versiyonu” nda, Türkiye’nin “1. Derece Gün Bölgesi”, “2024 versiyonu” nda ise Türkiye’nin “1. Derece Gün Bölgesi-Çok Sıcak” iklim bölgesinde yer almaktadır [2], [3].

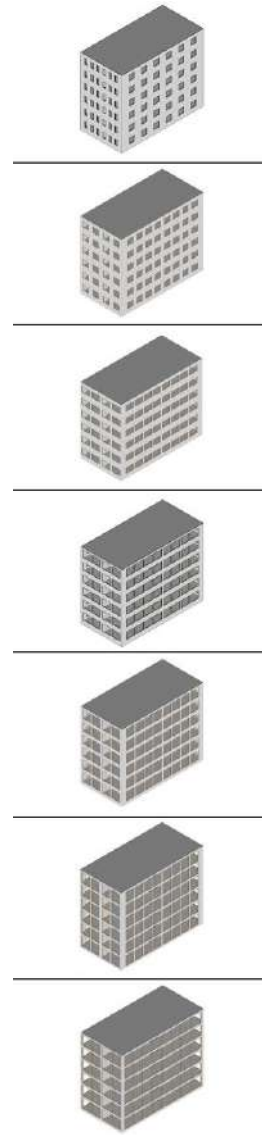
Tasarım kararları bakımından bina özellikleri konusunda Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerinden yola çıkılarak, açık plan tipindeki ofis binasının 24 m yüksekliğinde, altı katlı ve toplam inşaat alanının 2700 m² olduğu kabul edilmiştir. Binanın düz bir arazide ayrık nizam olarak konumlandığı, çevresinde doğal ya da yapay engellerin bulunmadığı, binanın Kuzey-Güney ve Doğu-Batı doğrultusunda yönlendirildiği varsayılmıştır.

Ofis binasının her katında 24 kişilik iki adet hacim bulunduğu ve bir katta 48 kişinin çalıştığı kabul edilmiştir. Bina kullanıcılarının 25-65 yaş grubunda olduğu, masa başında, haftanın beş iş günü, 08.00-17.00 saatleri arasında çalıştıkları ön görülmüş ve iç iklim koşulları için hava sıcaklığının ısıtma istenen dönemde 21°C, soğutma istenen dönemde 24°C olduğu varsayılmıştır. Bina biçim faktörü ve boyutları açısından A (1/2 Düşey Dikdörtgen; 15m x 30m) ve B (2/1 Yatay Dikdörtgen; 30m x 15m) olmak üzere iki adet “Cephe/Bina formu” oluşturulmuş ve **Şekil 1**’de örneklenmiştir [1]. Bina kabuğu malzemeleri toprak temaslı döşeme, üzeri açık tavan (çatı) ve cephe malzemeleri (opak ve saydam) olarak üç bölümde ele alınmıştır. Bina cephesinin duvar (opak) ve PVC doğramalı pencerelerden (saydam) oluştuğu varsayılmıştır.

Opak malzemeler için iki (tuğla ve gaz beton), saydam malzemeler için iki (düşük emisyonlu/low-e kaplamalı çift cam) ve saydamlık oranı için ise yedi (SO; %20, %30, %40, %50, %60, %70, %80) alternatif belirlenmiştir. Saydamlık oranı alternatiflerine ilişkin bina perspektifleri **Şekil 2**’de örneklenmiştir. Tüm bina tipleri için ara kat döşeme ve iç duvar malzemeleri aynı özellikte seçilmiştir. Pencerelerde iç ve dış güneş kontrol elemanı bulunmadığı kabul edilmiştir. Bina kabuğunda kullanılan malzemelerin toplam ısı geçirme katsayıları (U; W/m²K) için, ülkemizde yürürlükte olan “TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Standardı” kullanılmıştır (Çizelge 1, 2).



Şekil 1. A ve B tipi ofis binalarının plan ve kesitleri.



Şekil 2. Bina perspektifleri.

Çizelge 1. TS 825:2013 ve TS 825:2024'e göre bina kabuğu saydam bileşen özellikleri.

Pencere (P)	Toplam Isı Geçirime Katsayısı (U; W/m ² K)	P 1, UP1: 1,8 P 2, UP2: 1,4
	Düşük emisyonlu (Low-E) Çift Cam Kombinasyonu	C 1: 6mm-12mm (Hava)-6mm C 2: 6mm-16mm (Hava)-6mm
Pencere Camı (C)	Toplam Isı Geçirime Katsayısı (U; W/m ² K)	C 1, UC: 1,6 C 2, UC: 1,3
	Toplam Güneş Enerjisi Geçirgenliği (g _n)	C 1, g _n : 0,37 C 2, g _n : 0,37

Çizelge 2. TS 825:2013 ve TS 825:2024’e göre bina kabuğu opak bileşen özellikleri.

TS 825:2013				TS 825:2024			
Bileşen Adı		Katmanlar	Toplam Isı Geçirime Katsayısı U (W/m²K)	Bileşen Adı		Katmanlar	Toplam Isı Geçirime Katsayısı U (W/m²K)
Toprak Temaslı Döşeme (Dz)	Toprak Temaslı Döşeme (Dz 1)	PVC yer döşemesi Çimento dozlu şap Betonarme döşeme Koruma betonu Isı yalıtım levhası-XPS Hafif beton	0,66	Toprak Temaslı Döşeme (Dz)	Toprak Temaslı Döşeme (Dz 3)	PVC yer döşemesi Çimento dozlu şap Betonarme döşeme Koruma betonu Isı yalıtım levhası-XPS Hafif beton	0,40
	Toprak Temaslı Döşeme (Dz 2)	PVC yer döşemesi Çimento dozlu şap Betonarme döşeme Koruma betonu Isı yalıtım levhası-XPS Hafif beton	0,50		Toprak Temaslı Döşeme (Dz 4)	PVC yer döşemesi Çimento dozlu şap Betonarme döşeme Koruma betonu Isı yalıtım levhası-XPS Hafif beton	0,30
Ara Kat Döşeme (Da)	Ara Kat Döşeme (Da)	PVC yer döşemesi Çimento dozlu şap Betonarme döşeme Alçı sıva	0,36	Ara Kat Döşeme (Da)	Ara Kat Döşeme (Da)	PVC yer döşemesi Çimento dozlu şap Betonarme döşeme Alçı sıva	0,36
Üzeri Açık Tavan (T)	Üzeri Açık Tavan 1 (T1)	Mozaik Koruma betonu Isı yalıtım levhası-XPS Eğim şapı Betonarme döşeme Alçı sıva	0,43	Üzeri Açık Tavan (T)	Üzeri Açık Tavan 3 (T3)	Mozaik Koruma betonu Isı yalıtım levhası-XPS Eğim şapı Betonarme döşeme Alçı sıva	0,35
	Üzeri Açık Tavan 2 (T2)	Mozaik Koruma betonu Isı yalıtım levhası-XPS Eğim şapı Betonarme döşeme Alçı sıva	0,32		Üzeri Açık Tavan 4 (T4)	Mozaik Koruma betonu Isı yalıtım levhası-XPS Eğim şapı Betonarme döşeme Alçı sıva	0,26
Dış Duvar (DU)	Dış Duvar (DU 1A)	Alçı sıva Tuğla Isı yalıtım levhası-Taş Yünü Anorganik esaslı dış sıva	0,66	Dış Duvar (DU)	Dış Duvar (DU 3A)	Alçı sıva Tuğla Isı yalıtım levhası-Taş Yünü Anorganik esaslı dış sıva	0,45
	Dış Duvar (DU 1B)	Alçı sıva Tuğla Isı yalıtım levhası-Taş Yünü Anorganik esaslı dış sıva	0,50		Dış Duvar (DU 3B)	Alçı sıva Tuğla Isı yalıtım levhası-Taş Yünü Anorganik esaslı dış sıva	0,34
Dış Duvar (DU 2A)	Alçı sıva Gaz Beton Isı yalıtım levhası-Taş Yünü Anorganik esaslı dış sıva	0,66	Dış Duvar (DU 4A)	Alçı sıva Gaz Beton Isı yalıtım levhası-Taş Yünü Anorganik esaslı dış sıva	0,45		
Dış Duvar (DU 2B)	Alçı sıva Gaz Beton Isı yalıtım levhası-Taş Yünü Anorganik esaslı dış sıva	0,50	Dış Duvar (DU 4B)	Alçı sıva Gaz Beton Isı yalıtım levhası-Taş Yünü Anorganik esaslı dış sıva	0,34		
İç Duvar (DU iç)	İç Duvar (DU iç 1)	Alçı sıva Alçı karton plaka Isı yalıtım levhası-Taş Yünü Alçı karton plaka Alçı sıva	0,37	İç Duvar (DU iç)	İç Duvar (DU iç 1)	Alçı sıva Alçı karton plaka Isı yalıtım levhası-Taş Yünü Alçı karton plaka Alçı sıva	0,37
	İç Duvar (DU iç 2)	Alçı sıva Betonarme duvar Alçı sıva	2,18		İç Duvar (DU iç 2)	Alçı sıva Betonarme duvar Alçı sıva	2,18

Tasarım kararları doğrultusunda, altı katlı açık planlı ofis binasında iki cephe/bina formu (biçim faktörü), üç pencere yönü, yedi saydımlık oranı, dört duvar, iki toprak temaslı döşeme, iki üzeri açık tavan, iki pencere camı tipi için kabuller yapılmıştır. Bina formu biçim faktörü ile tanımlanmış olup, biçim faktörü bina genişliğinin derinliğine oranıdır. Bu bağlamda, bir adet bina biçim faktörü için üç adet pencere yönü ve yedi adet saydımlık oranı dikkate alınarak “21 adet bina modeli” hazırlanmıştır. Bina modelleri dikkate alınarak bir biçim faktörü için 126, iki biçim faktörü için 252 adet bina kabuğu senaryosu kurgulanmıştır. TS 825:2013 ve TS 825:2024’e göre kurgulanan toplam senaryo sayısı 504’tür. **Çizelge 3**’te TS 825:2013 ve TS 825:2024’e göre bir biçim faktörü için oluşturulan senaryolar örneklenmiştir.

Çizelge 3. TS 825:2013 ve TS 825:2024’e göre bir biçim faktörüne ilişkin senaryo örnekleri.

TS 825:2013’e göre senaryolar.

Senaryo No (SN)		Saydamlık Oranı % (SO)	Pencere Tipi (P)	Toprak Temash Düşeme Tipi (Dz)	Üzeri Açık Tavan Tipi (T)	Dış Duvar Tipi (DU)	
KGDB-01-U1	KG-01-U1	DB-01-U1	20	P 1	Dz 1	T 1	DU 1A
KGDB-02-U1	KG-02-U1	DB-02-U1	30	P 1	Dz 1	T 1	DU 1A
KGDB-03-U1	KG-03-U1	DB-03-U1	40	P 1	Dz 1	T 1	DU 1A
KGDB-04-U1	KG-04-U1	DB-04-U1	50	P 1	Dz 1	T 1	DU 1A
KGDB-05-U1	KG-05-U1	DB-05-U1	60	P 1	Dz 1	T 1	DU 1A
KGDB-06-U1	KG-06-U1	DB-06-U1	70	P 1	Dz 1	T 1	DU 1A
KGDB-07-U1	KG-07-U1	DB-07-U1	80	P 1	Dz 1	T 1	DU 1A
KGDB-08-U1	KG-08-U1	DB-08-U1	20	P 2	Dz 1	T 1	DU 1A
KGDB-09-U1	KG-09-U1	DB-09-U1	30	P 2	Dz 1	T 1	DU 1A
KGDB-10-U1	KG-10-U1	DB-10-U1	40	P 2	Dz 1	T 1	DU 1A
KGDB-11-U1	KG-11-U1	DB-11-U1	50	P 2	Dz 1	T 1	DU 1A
KGDB-12-U1	KG-12-U1	DB-12-U1	60	P 2	Dz 1	T 1	DU 1A
KGDB-13-U1	KG-13-U1	DB-13-U1	70	P 2	Dz 1	T 1	DU 1A
KGDB-14-U1	KG-14-U1	DB-14-U1	80	P 2	Dz 1	T 1	DU 1A
KGDB-15-U1	KG-15-U1	DB-15-U1	20	P 2	Dz 2	T 2	DU 1B
KGDB-16-U1	KG-16-U1	DB-16-U1	30	P 2	Dz 2	T 2	DU 1B
KGDB-17-U1	KG-17-U1	DB-17-U1	40	P 2	Dz 2	T 2	DU 1B
KGDB-18-U1	KG-18-U1	DB-18-U1	50	P 2	Dz 2	T 2	DU 1B
KGDB-19-U1	KG-19-U1	DB-19-U1	60	P 2	Dz 2	T 2	DU 1B
KGDB-20-U1	KG-20-U1	DB-20-U1	70	P 2	Dz 2	T 2	DU 1B
KGDB-21-U1	KG-21-U1	DB-21-U1	80	P 2	Dz 2	T 2	DU 1B
KGDB-22-U1	KG-22-U1	DB-22-U1	20	P 1	Dz 1	T 1	DU 2A
KGDB-23-U1	KG-23-U1	DB-23-U1	30	P 1	Dz 1	T 1	DU 2A
KGDB-24-U1	KG-24-U1	DB-24-U1	40	P 1	Dz 1	T 1	DU 2A
KGDB-25-U1	KG-25-U1	DB-25-U1	50	P 1	Dz 1	T 1	DU 2A
KGDB-26-U1	KG-26-U1	DB-26-U1	60	P 1	Dz 1	T 1	DU 2A
KGDB-27-U1	KG-27-U1	DB-27-U1	70	P 1	Dz 1	T 1	DU 2A
KGDB-28-U1	KG-28-U1	DB-28-U1	80	P 1	Dz 1	T 1	DU 2A
KGDB-29-U1	KG-29-U1	DB-29-U1	20	P 2	Dz 1	T 1	DU 2A
KGDB-30-U1	KG-30-U1	DB-30-U1	30	P 2	Dz 1	T 1	DU 2A
KGDB-31-U1	KG-31-U1	DB-31-U1	40	P 2	Dz 1	T 1	DU 2A
KGDB-32-U1	KG-32-U1	DB-32-U1	50	P 2	Dz 1	T 1	DU 2A
KGDB-33-U1	KG-33-U1	DB-33-U1	60	P 2	Dz 1	T 1	DU 2A
KGDB-34-U1	KG-34-U1	DB-34-U1	70	P 2	Dz 1	T 1	DU 2A
KGDB-35-U1	KG-35-U1	DB-35-U1	80	P 2	Dz 1	T 1	DU 2A
KGDB-36-U1	KG-36-U1	DB-36-U1	20	P 2	Dz 2	T 2	DU 2B
KGDB-37-U1	KG-37-U1	DB-37-U1	30	P 2	Dz 2	T 2	DU 2B
KGDB-38-U1	KG-38-U1	DB-38-U1	40	P 2	Dz 2	T 2	DU 2B
KGDB-39-U1	KG-39-U1	DB-39-U1	50	P 2	Dz 2	T 2	DU 2B
KGDB-40-U1	KG-40-U1	DB-40-U1	60	P 2	Dz 2	T 2	DU 2B
KGDB-41-U1	KG-41-U1	DB-41-U1	70	P 2	Dz 2	T 2	DU 2B
KGDB-42-U1	KG-42-U1	DB-42-U1	80	P 2	Dz 2	T 2	DU 2B

TS 825:2024’e göre senaryolar.

Senaryo No (SN)		Saydamlık Oranı % (SD)	Pencere Tipi (P)	Toprak Teması Düşeme Tipi (Dz)	Üzeri Açık Tavan Tipi (T)	Dış Duvar Tipi (DU)
KGDB-01-U2	KG-01-U2	DB-01-U2	20	P 1	Dz 3	T 3 DU 3A
KGDB-02-U2	KG-02-U2	DB-02-U2	30	P 1	Dz 3	T 3 DU 3A
KGDB-03-U2	KG-03-U2	DB-03-U2	40	P 1	Dz 3	T 3 DU 3A
KGDB-04-U2	KG-04-U2	DB-04-U2	50	P 1	Dz 3	T 3 DU 3A
KGDB-05-U2	KG-05-U2	DB-05-U2	60	P 1	Dz 3	T 3 DU 3A
KGDB-06-U2	KG-06-U2	DB-06-U2	70	P 1	Dz 3	T 3 DU 3A
KGDB-07-U2	KG-07-U2	DB-07-U2	80	P 1	Dz 3	T 3 DU 3A
KGDB-08-U2	KG-08-U2	DB-08-U2	20	P 2	Dz 3	T 3 DU 3A
KGDB-09-U2	KG-09-U2	DB-09-U2	30	P 2	Dz 3	T 3 DU 3A
KGDB-10-U2	KG-10-U2	DB-10-U2	40	P 2	Dz 3	T 3 DU 3A
KGDB-11-U2	KG-11-U2	DB-11-U2	50	P 2	Dz 3	T 3 DU 3A
KGDB-12-U2	KG-12-U2	DB-12-U2	60	P 2	Dz 3	T 3 DU 3A
KGDB-13-U2	KG-13-U2	DB-13-U2	70	P 2	Dz 3	T 3 DU 3A
KGDB-14-U2	KG-14-U2	DB-14-U2	80	P 2	Dz 3	T 3 DU 3A
KGDB-15-U2	KG-15-U2	DB-15-U2	20	P 2	Dz 4	T 4 DU 3B
KGDB-16-U2	KG-16-U2	DB-16-U2	30	P 2	Dz 4	T 4 DU 3B
KGDB-17-U2	KG-17-U2	DB-17-U2	40	P 2	Dz 4	T 4 DU 3B
KGDB-18-U2	KG-18-U2	DB-18-U2	50	P 2	Dz 4	T 4 DU 3B
KGDB-19-U2	KG-19-U2	DB-19-U2	60	P 2	Dz 4	T 4 DU 3B
KGDB-20-U2	KG-20-U2	DB-20-U2	70	P 2	Dz 4	T 4 DU 3B
KGDB-21-U2	KG-21-U2	DB-21-U2	80	P 2	Dz 4	T 4 DU 3B
KGDB-22-U2	KG-22-U2	DB-22-U2	20	P 1	Dz 3	T 3 DU 4A
KGDB-23-U2	KG-23-U2	DB-23-U2	30	P 1	Dz 3	T 3 DU 4A
KGDB-24-U2	KG-24-U2	DB-24-U2	40	P 1	Dz 3	T 3 DU 4A
KGDB-25-U2	KG-25-U2	DB-25-U2	50	P 1	Dz 3	T 3 DU 4A
KGDB-26-U2	KG-26-U2	DB-26-U2	60	P 1	Dz 3	T 3 DU 4A
KGDB-27-U2	KG-27-U2	DB-27-U2	70	P 1	Dz 3	T 3 DU 4A
KGDB-28-U2	KG-28-U2	DB-28-U2	80	P 1	Dz 3	T 3 DU 4A
KGDB-29-U2	KG-29-U2	DB-29-U2	20	P 2	Dz 3	T 3 DU 4A
KGDB-30-U2	KG-30-U2	DB-30-U2	30	P 2	Dz 3	T 3 DU 4A
KGDB-31-U2	KG-31-U2	DB-31-U2	40	P 2	Dz 3	T 3 DU 4A
KGDB-32-U2	KG-32-U2	DB-32-U2	50	P 2	Dz 3	T 3 DU 4A
KGDB-33-U2	KG-33-U2	DB-33-U2	60	P 2	Dz 3	T 3 DU 4A
KGDB-34-U2	KG-34-U2	DB-34-U2	70	P 2	Dz 3	T 3 DU 4A
KGDB-35-U2	KG-35-U2	DB-35-U2	80	P 2	Dz 3	T 3 DU 4A
KGDB-36-U2	KG-36-U2	DB-36-U2	20	P 2	Dz 4	T 4 DU 4B
KGDB-37-U2	KG-37-U2	DB-37-U2	30	P 2	Dz 4	T 4 DU 4B
KGDB-38-U2	KG-38-U2	DB-38-U2	40	P 2	Dz 4	T 4 DU 4B
KGDB-39-U2	KG-39-U2	DB-39-U2	50	P 2	Dz 4	T 4 DU 4B
KGDB-40-U2	KG-40-U2	DB-40-U2	60	P 2	Dz 4	T 4 DU 4B
KGDB-41-U2	KG-41-U2	DB-41-U2	70	P 2	Dz 4	T 4 DU 4B
KGDB-42-U2	KG-42-U2	DB-42-U2	80	P 2	Dz 4	T 4 DU 4B

Antalya’da yapılacak yeni ofis binaları için kurgulanan senaryoların yıllık enerji tüketimi, yıllık operasyonel karbon ve gömülü karbon hesaplamaları için “Autodesk Revit” yazılımı kullanılarak Yapı Bilgi Modellemesi (YBM) oluşturulmuştur. Oluşturulan bina modellerinin yıllık ısıtma, soğutma, iç yapay aydınlatma ve çeşitli ekipmanların operasyonel enerji tüketim değerlerinin belirlenmesi için Autodesk Revit üzerinden EnergyPlus simülasyon programı kullanılmıştır. Simülasyonlardan elde edilen enerji tüketim değerleri üzerinden Türkiye için tüketilen yakıt cinsine ilişkin CO₂ dönüşüm katsayıları aracılığı ile operasyonel karbon salım miktarı hesaplanmıştır. Gömülü karbon salım miktarları binalar için oluşturulan yapı bilgi modeli üzerinden “Autodesk Insight-Tech” programı ile hesaplanmış ve “Embodied Carbon in Construction Calculator (EC3)” programının veri tabanından yararlanılmıştır. Programda üretilen analitik enerji modellemesi üzerinden, yapı malzemelerinin üretim aşamasında oluşan gömülü karbon salım miktarları dikkate alınmıştır [1]. Bilindiği üzere, yapı malzemelerinin üretim süreci malzeme hammaddesinin sağlanması, hammaddelerin üreticiye taşınması, malzemelerin imalatı, yani beşikten kapıya kadar tüm iş akış süreçleri olarak ifade edilmektedir.

3. BULGULAR ve DEĞERLENDİRMELER

Çalışmada yapılan kabuller doğrultusunda, Antalya ili için TS 825 Binalarda Isı Yalıtımı Kuralları Standardı’nın 2013 ve 2024 versiyonlarına ilişkin hesap bulguları, pencere yönü ve biçim faktörüne göre yıllık enerji tüketimi, yıllık operasyonel karbon ve gömülü karbon salımı bakımından ele alınmıştır. Bu bağlamda, en az yıllık enerji tüketimi, yıllık operasyonel karbon ve gömülü karbon salımını sağlayan senaryolar **Çizelge 4**’te gösterilmiştir.

Çizelge 4. TS 825:2013 ve TS 825:2024'e göre pencere yönü ve biçim faktörü için en az yıllık enerji tüketimi, yıllık operasyonel karbon ve gömülü karbon salımına sahip senaryolar.

TS 825: 2013'e göre senaryolar.

Pencere Yönü	Enerji (Kwh/Yıl)		Operasyonel Karbon (kgCO ₂ e/Yıl)		Gömülü Karbon (kgCO ₂ e)	
	Cephe/ Bina Formu	Senaryo No (SN)	Cephe/ Bina Formu	Senaryo No (SN)	Cephe/ Bina Formu	Senaryo No (SN)
KGDB	2/1	15-U1	2/1	15-U1	1/2 2/1	22-U1 29-U1
KG	1/2	15-U1	1/2	15-U1	1/2 2/1	22-U1 29-U1
DB	2/1	15-U1	2/1	15-U1	1/2 2/1	22-U1 29-U1

TS 825: 2024'e göre senaryolar.

Pencere Yönü	Enerji (Kwh/Yıl)		Operasyonel Karbon (kgCO ₂ e/Yıl)		Gömülü Karbon (kgCO ₂ e)	
	Cephe/ Bina Formu	Senaryo No (SN)	Cephe/ Bina Formu	Senaryo No (SN)	Cephe/ Bina Formu	Senaryo No (SN)
KGDB	2/1	15-U2	2/1	15-U2	1/2 2/1	28-U2 35-U2
KG	1/2	15-U2	1/2	15-U2	1/2 2/1	28-U2 35-U2
DB	2/1	15-U2	2/1	15-U2	1/2 2/1	28-U2 35-U2

TS 825:2013 standardı için elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, en az yıllık enerji tüketimi ve operasyonel karbon salımı açısından 15-U1 nolu senaryo, en az gömülü karbon salımı bakımından 22-U1, 29-U1 nolu senaryolar olumlu bulunmuştur. TS 825:2024 standardı için elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde ise, en az yıllık enerji tüketimi ve operasyonel karbon salımı açısından bir 15-U2 nolu senaryo, gömülü karbon salımı bakımından 28-U2, 35-U2 nolu senaryolar olumlu bulunmuştur. Bu bağlamda, Antalya ili için TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Standardı'nın 2013 ve 2024 versiyonlarına ilişkin senaryo karşılaştırmaları, pencere yönü ve biçim faktörüne göre **Çizelge 5-7'**de gösterilmiştir.

Çizelge 5. En az yıllık enerji tüketimine sahip senaryolar.

Pencere Yönü	Cephe/Bina Formu		Senaryo No (SN)		Enerji (Kwh/Yıl)	
	TS 825 2013	TS 825 2024	TS 825 2013	TS 825 2024	TS 825 2013	TS 825 2024
KGDB	2/1	2/1	15-U1	15-U2	173.883	172.114
KG	1/2	1/2	15-U1	15-U2	161.031	158.269
DB	2/1	2/1	15-U1	15-U2	161.669	158.881

Çizelge 6. En az yıllık operasyonel karbon salımına sahip senaryolar.

Pencere Yönü	Cephe/Bina Formu		Senaryo No (SN)		Operasyonel Karbon (kgCO ₂ e/Yıl)	
	TS 825 2013	TS 825 2024	TS 825 2013	TS 825 2024	TS 825 2013	TS 825 2024
KGDB	2/1	2/1	15-U1	15-U2	72.103	71.690
KG	1/2	1/2	15-U1	15-U2	66.858	66.020
DB	2/1	2/1	15-U1	15-U2	67.005	66.234

Çizelge 7. En az gömülü karbon salımına sahip senaryolar.

Pencere Yönü	Cephe/Bina Formu		Senaryo No (SN)		Gömülü Karbon (kgCO ₂ e)	
	TS 825 2013	TS 825 2024	TS 825 2013	TS 825 2024	TS 825 2013	TS 825 2024
KGDB	1/2	1/2	22-U1 29-U1	28-U2 35-U2	739.212	763.030
KGDB	2/1	2/1	22-U1 29-U1	28-U2 35-U2	739.212	763.030
KG	1/2	1/2	22-U1 29-U1	28-U2 35-U2	736.051	763.127
KG	2/1	2/1	22-U1 29-U1	28-U2 35-U2	737.632	763.078
DB	1/2	1/2	22-U1 29-U1	28-U2 35-U2	737.632	763.078
DB	2/1	2/1	22-U1 29-U1	28-U2 35-U2	736.051	763.127

Bu çalışmada ele alınan kabuller çerçevesinde, TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Standardı'nın 2013 versiyonu ile 2024 versiyonu karşılaştırıldığında, en az yıllık enerji tüketimi ve operasyonel karbon salım miktarı 2024 sonuçlarının 2013'e göre daha düşük olduğu belirlenmiştir. Buna karşın, en az gömülü karbon salım miktarı açısından 2024 sonuçlarının 2013'e göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

4. SONUÇ

Bu bildiride, yeni yapılacak binaların enerji performanslarının iyileştirilmesi ve karbon salımının azaltılmasında etkili olan cephe seçeneklerinin belirlenmesine ilişkin geliştirilen yöntemin temel adımları açıklanmıştır. Yöntemin uygulaması olarak Türk Standardları Enstitüsü'nün "TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları: 2024" standardına göre 1. Derece Gün Bölgesi-Çok Sıcak özellikte olan Antalya ilinde yeni yapılacak ofis binalarının enerji tüketimi ve karbon salımı durumu incelenmiştir. Çalışmada ayrıca, söz konusu standardın 2013 ile 2024 yılı versiyonu arasındaki farklılıkların incelemesi, enerji tüketimi ve karbon salımı üzerindeki etkileri de ele alınmıştır. Bu bağlamda, Antalya'da yeni yapılacak ofis binası için çalışmada yapılan kabuller çerçevesinde kurgulanan senaryolar pasif tasarım parametrelerinden pencere yönü ile biçim faktörüne göre değerlendirilmiş ve yıllık enerji tüketimi, yıllık operasyonel karbon ve gömülü karbon salımının en düşük olduğu senaryolar belirlenmiştir.

Yukarıdaki bölümde verilen çalışma sonuçları ofis binalarının kabuklarına ilişkin tasarım parametreleri değerlerinin enerji tüketimi ve karbon salımlarındaki etkilerini açıkça ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, çevre ve enerji problemlerinin giderilmesi için enerji tüketimi ve karbon salımlarının azaltılmasının gerekli olduğu göz önünde bulundurulduğunda, uzun süreli kullanım ve yüksek enerji tüketimi gerektiren binaların, enerjiyi etkin ve verimli kullanan, çevresel etkisi düşük, karbon salımları en aza indirgenmiş yapılar olarak tasarlanması zorunlu olmaktadır. Başka bir anlatımla, cephe tasarımına ilişkin kararlar alınırken yalnızca enerji tüketimi değil, operasyonel ve gömülü karbon salımları da dikkate alınmalıdır. Bu durum sağlanmadığında, enerji açısından olumlu görünen çözümler, toplam karbon ayak izi bakımından olumsuz sonuçlar doğurabilecektir. Nitekim bildiride yer verilen yaklaşım uygulama çalışması, cephe kabuğuna ilişkin kararların yalnızca enerji verimliliğine değil, aynı zamanda operasyonel ve gömülü karbon salımlarının azaltılmasına da katkı sağlayabileceğini göstermektedir. Bu tür yaklaşımların mimari tasarım sürecinde uygulanması, ulusal mevzuatın öngördüğü sürdürülebilirlik ve iklim eylem hedeflerine ulaşmada önemli bir adım olacaktır. Dolayısıyla çalışma, ülkemizin 2053 yılı net sıfır emisyon vizyonuna giden yolda tasarım temelli azaltım stratejilerinin oluşturulması için bilimsel bir altyapı sunmaktadır.

Bilindiği üzere, yapma çevre tasarımının amacı hem kullanıcıların gereksinim ve isteklerini karşılamak hem de insanlığın ve doğanın sürekliliğini sağlamak olarak açıklanabilir. Bu bağlamda, bina cephe tasarım parametreleri (cephelerin bulunduğu yer, cephenin konumu, cephe formu, cephe malzemelerinin özellikleri vb.) için oluşturulacak uygun kombinasyonlar ile en az enerji tüketimi ve en az karbon salımı olan, kullanıcılarına gerekli konforu sağlayabilen binaların kurgulanması olanaklıdır.

KAYNAKLAR

- [1] Ünver Karaer, E., (2025). *Cephe Tasarımında Enerji Tüketimi Ve Karbon Salımı Açısından Uygun Seçeneklerin Belirlenmesine Yönelik Bir Yaklaşım*. (Doktora Tezi). İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, Mimarlık Anabilim Dalı.
- [2] TS 825. (2013). *Binalarda Isı Yalıtım Kuralları*. Ankara: Türk Standardları Enstitüsü, TSE.
- [3] TS 825. (2024). *Binalarda Isı Yalıtım Kuralları*. Ankara: Türk Standardları Enstitüsü, TSE.

OFİS BİNALARINDA RADYANT SOĞUTMA İLE SOĞUTMA YÜKLERİNİN AZALTILMASINA YÖNELİK BİR ÇALIŞMA

Yasemin Kılıçoğlu^{1*}

Gülten Manioğlu²

^{1,2} İTÜ Mimarlık Fakültesi

Taşkışla Kampüsü, Şişli, İstanbul, 34367

ÖZET

Dünya genelinde artan enerji talebi ve küresel ısınmanın etkileri, özellikle ofis binalarında soğutma kaynaklı enerji tüketimini önemli bir sorun haline getirmektedir. Bu çalışma, sıcak-nemli iklim koşullarında yer alan ofis binalarında soğutma yüklerinin azaltılmasına yönelik tasarım stratejilerini incelemektedir. Çalışmada bina kabuğu türleri, cam seçenekleri, saydamlık oranları, gölgeleme elemanları ve farklı mekanik sistemler birlikte değerlendirilerek soğutma enerjisi tüketimi üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçları, cephedeki opak-saydam oranı ile mekanik sistem seçiminin soğutma yükleri üzerinde bütünlük bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Yüksek ısı kütleye sahip beton esaslı bina kabuğu (BK2), düşük güneş ısı kazanç katsayısına sahip cam türü (C4) ve düşük saydamlık oranı (%30) ile birlikte kullanıldığında en düşük soğutma enerjisi tüketimi elde edilmiştir. Mekanik sistemler arasında soğutulmuş tavan sistemi, fan-coil sistemine kıyasla daha düşük enerji tüketimi sağlamıştır. Ayrıca gölgeleme elemanlarının tüm sistemlerde enerji tüketimini azalttığı, ancak etkisinin saydamlık oranı azaldıkça düştüğü belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, sıcak iklim bölgelerinde tasarım değişkenlerinin bütüncül değerlendirilmesinin enerji verimliliği açısından kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Radyant Soğutma, Bina Kabuğu, Gölgeleme Elemanı, Mekanik Sistemler, Saydam Bileşenler.

A STUDY ON REDUCING COOLING ENERGY LOADS IN OFFICE BUILDINGS IN HOT CLIMATE REGIONS

ABSTRACT

The increasing global energy demand and the impacts of global warming have made cooling-related energy consumption in office buildings a significant issue. This study investigates design strategies aimed at reducing cooling loads in office buildings located in İzmir-Bayraklı, a region characterized by a hot and humid climate. Building envelope types, glazing options, transparency ratios, shading elements, and different HVAC systems were evaluated together, and their effects on cooling energy consumption were comparatively analyzed. Simulation results indicate that the ratio of opaque to transparent façade components and the selection of the mechanical system have an integrated effect on cooling loads. The lowest cooling energy consumption was achieved when a high thermal mass concrete-based envelope (BK2) was combined with a low solar heat gain coefficient glazing type (C4) and a low transparency ratio (30%). Among the mechanical systems, the chilled ceiling system demonstrated lower energy consumption compared to the fan-coil system. Additionally, shading elements reduced cooling energy consumption in all systems; however, their effectiveness decreased as the transparency ratio decreased. The findings highlight that a holistic evaluation of design variables plays a critical role in improving energy efficiency in office buildings located in hot climate regions.

Keywords: Radiant Cooling, Building Envelope, Shading Devices, Mechanical Systems, Transparent Components.

^{1*}Sorumlu yazar e-posta adresi-posta adresi: kilicoglu23@itu.edu.tr

1. GİRİŞ

Küresel ısınmanın etkisiyle artan ortalama sıcaklıklar, binalarda soğutma ihtiyacını ve buna bağlı enerji kullanımını önemli ölçüde artırmaktadır. Ofis binalarındaki yoğun kullanıcı sayısı, ekipmanlardan kaynaklanan iç ısı kazançları ve modern mimaride yaygın olarak kullanılan cam cephe yüzeylerinin artması özellikle soğutma enerji verimliliği üzerinde olumsuz bir etki yaratmaktadır. Sıcak iklim alanlarında bu yüksek ısı kazançları, iç mekan konforunu sağlamak için aktif soğutma sistemlerine ihtiyacı artırmaktadır. Dünya genelinde toplam enerji tüketiminin yaklaşık yüzde 38'inin soğutma gereksinimleri için harcandığı ve bina sektöründeki enerjinin %66'sından fazlasının HVAC sistemleri ile aydınlatmaya ayrıldığı bilinmektedir [1]. Ayrıca, aktif soğutma sistemleri binaları soğutmak için binadan aldıkları ısıyı bina dışına yaydıklarından kentsel alanlarda ısı adası etkisinin artmasına da neden olmaktadır.

Bu çerçevede, Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri doğrultusunda, özellikle "Erişilebilir ve Temiz Enerji" (SDG 7) hedefi kapsamında enerji tasarruflu ve sürdürülebilir çözümler geliştirilmesi teşvik edilmektedir [1]. Geleneksel hava bazlı HVAC sistemleri yerine değerlendirilen radyant sistemler, suyun yüksek ısı kapasitesinden faydalanarak ısı iletimini daha etkin hale getirmektedir. Su, ısı enerjisi havaya oranla yaklaşık yedi kat daha etkili bir şekilde iletildiğinden, bu sistemlerin verimliliği artmakta ve enerji tüketimi azalmaktadır. Bu sistemlerde havalandırma ve nem kontrolü genellikle DOAS (Dedicated Outdoor Air System) aracılığıyla sağlanmakta ve ısı transferinin en az %40-50'si radyasyon yolu ile gerçekleşmektedir [2]. Soğutma için tavan tipi radyant soğutma sistemleri, daha düşük hava akışı ve daha homojen sıcaklık dağılımı ile ısı konfor sağlayarak geleneksel sistemlere göre daha az enerji tüketimiyle etkili bir seçenek olarak öne çıkmaktadır [3].

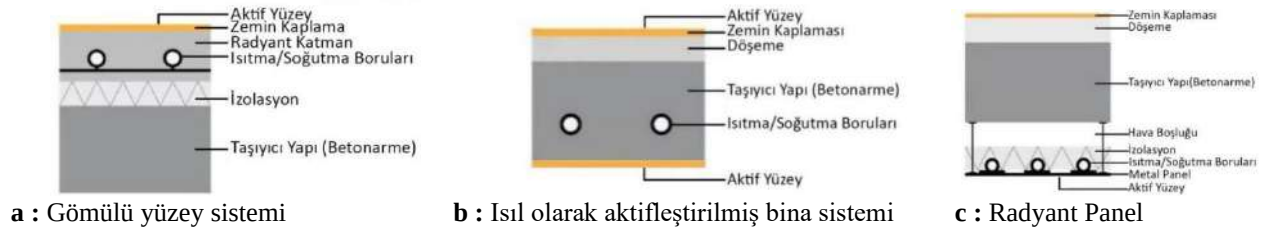
2. RADYAN-RADİATİF SOĞUTMA

ASHRAE- Standard 55'e göre ısı transferinin yarısından fazlasının radyasyon yolu ile gerçekleştiği sistemler, radyant ısıtma ve soğutma sistemi olarak tanımlanır [4]. Bu tür sistemlerde ısıtma veya soğutma suyu, yapı elemanlarına (döşeme, tavan veya duvar) entegre edilmiş borularla taşınır ve mekânla büyük ölçüde ışıyım yoluyla ısı alışverişi gerçekleştirilir. Bunun yanı sıra, sistemde konveksiyon yoluyla da belli bir miktarda ısı transferi gerçekleşmektedir.

Radyant soğutma, mekândaki sıcak yüzeylerden yayılan ısıya doğrudan emilmesine dayanmaktadır. Bu sistemler, suyun yüksek ısı kapasitesi ile çalışır. Su, ısı iletkenlik bakımından havadan yaklaşık 20 kat daha etkili, özgül ısıya ise yaklaşık 4 kat daha fazladır ve yoğunluğu da havaya göre oldukça yüksektir. Bu nedenle, suyun ısı taşıyıcı akışkan olarak kullanımı, havaya oranla daha az hacim ve daha düşük akış hızı ile ısı transferine imkân tanır. Bu durum, sistemin verimliliğini artırır ve enerji tüketimini azaltır. Ayrıca, geleneksel hava bazlı sistemlerle kıyaslandığında mekâna sağlanan hava miktarı da önemli ölçüde düşmektedir. Tavan tipi radyant soğutma sistemleri, mimari açıdan avantajlar sunmaktadır; yüksek tavan gereksinimi olmamakta ve yalnızca taze hava sağlamak amacıyla bir havalandırma sistemine ihtiyaç duyulmaktadır.

Radyant soğutma sistemleri; gömülü yüzey sistemleri, ısı olarak aktifleştirilmiş bina sistemleri (TABS) ve radyant panel sistemleri olmak üzere üç sınıfa ayrılmaktadır (Şekil 1). Gömülü yüzey çözümlerinde, borular yüzeye yakın bir konumda ve yalıtım katmanından ayrı bir şekilde yerleştirilir; böylece ısı doğrudan iç mekâna yönlendirilir ve sistem, düşük ısı kütlesi sayesinde hızlı bir

şekilde tepki verir [5]. Isıl olarak aktifleştirilmiş bina sistemlerinde (TABS) ise borular doğrudan betonarme elemanların içine yerleştirilir ve yalıtım yoktur; ısı, hem iç mekâna hem de yapı kütle-sine iletilerek daha stabil ve dengeli bir iç mekân ortamı oluşturur. Radyant panel sistemleri ise yapıya entegre edilmek yerine tavandan bağımsız paneller olarak monte edilir; soğutulmuş suyun akışı ile ortamdan ısıyı alarak konforu artırır ve özellikle kuru iklimlerde daha etkilidir [5].



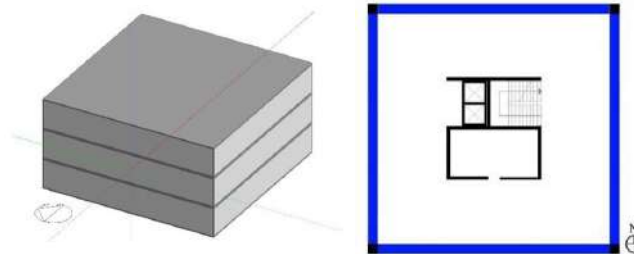
Şekil 1: Radyant panel sistemleri şematik gösterimi [5]

3. OFİS BİNALARINDA RADYANT SOĞUTMA İLE SOĞUTMA YÜKLERİNİN AZALTILMASI

Bu araştırma, sıcak iklim bölgelerindeki ofis binalarının soğutma ihtiyacını azaltmayı hedeflemektedir. Bu amaçla, pasif tasarım unsurları ile HVAC sistemleri birlikte incelenmiştir. Çalışma yeri, cam cephesi olan yüksek katlı ofis binalarının yoğunluklu olduğu İzmir-Bayraklı bölgesidir. Analizlerde, 2007–2021 yıllarına ait EPW-TMY iklim verileri kullanılmış ve simülasyon işlemleri DesignBuilder programı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir [6]. Açık plan ofis binası için çalışma saatleri hafta içi 08:00–18:00 olarak belirlenmiş, konfor sıcaklık aralığı ise 26–28°C olarak tanımlanmıştır; sızdırmazlık 0.5 h⁻¹ ve aydınlatma güç yoğunluğu 7.10 W/m² olarak kabul edilmiştir. Bina düz bir arazide, gölgeleme etkisi olmaksızın modellenmiş ve simülasyonlar yalnızca 15 Mayıs ile 15 Eylül arasındaki soğutma dönemi için yapılmıştır.

3.1. Bina Formu, Hacim Organizasyonu ve Binanın Yönlendiriliş Durumlarının Belirlenmesi

Çalışmada ele alınan yapı, 20 m × 20 m boyutlarında, 400 m² taban alanına sahip, üç katlı ve kare tabanlı bir ofis binasıdır. Her bir kat, açık ofis olarak planlanmış ve binanın çekirdek kısmı (ıslak hacimler, asansör ve merdivenler) ayrı bir ısıl zon olarak oluşturulmuştur. Ofis binası cepheleri, kuzey, güney, doğu ve batı yönlerinde açıklıklar olacak şekilde düzenlenmiştir (Şekil 2).

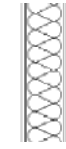
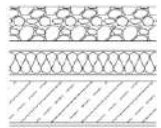


Şekil 4 : Çalışmada ele alınan binanın modeli ve binanın kat planı.

Bina kabuğunun optik ve termo-fiziksel özellikleri, cephedeki opak ve saydam yüzeylerde gerçekleşen ısı transferini ve dolayısıyla soğutma yüklerini belirlemektedir. Bu çalışmada opak bileşenler,

TSE 825 (2013) İklim Bölgesi 1 için önerilen maksimum U değerlerine göre tanımlanmıştır (dış duvar: 0.66 W/m²K, zemin: 0.66 W/m²K, çatı: 0.43 W/m²K, saydam bileşen: 1.80 W/m²K). Soğutma yüklerini düşürmek amacıyla çeşitli alternatifler geliştirilmiştir [7]. Bu kapsamda, modern ofis binalarında sıkça tercih edilen malzemelerle 3 farklı bina kabuğu seçeneği belirlenmiştir. Tüm bina kabuğu U değerleri 0.62–0.65 W/m²K arasında tutulmuş; zemin (0.64 W/m²K) ve çatı (0.42 W/m²K) bileşenleri ise bütün senaryolar için sabit alınmıştır (Çizelge 1).

Çizelge 1 : Ele alınan ofis binasına ait TS825'e (2013) uygun opak bina kabuğu seçeneklerine ilişkin katmanlaşma detayları.

	Opak Bileşen	Malzeme	Isıl İletkenlik (W/mk)	Kalınlık (m)	U (W/m ² K)
Bina Kabuğu 1		1. Boyalı Cam 2. Cam Yünü 3. Alçıpan	1,4 0,085 1	0,035 0,12 0,015	0,62
Bina Kabuğu 2		1. Çimento harçlı sıva 2. Ekstrüde polistiren 3. Beton 4. Alçı sıva	1,4 0,029 2,1 0,35	0,02 0,035 0,28 0,015	0,65
Bina Kabuğu 3		1. Seramik 2. Hava Boşluğu 3. Cam elyafı 4. Seramik	1,2 0,029 0,085 1,2	0,01 0,1 0,12 0,01	0,64
Zemine Oturan Döşeme		1. PVC 2. Şap 3. Isı yalıtımı 4. Tesviye şapı 5. Hafif Beton	0,23 1,4 0,035 1,4 0,16	0,005 0,03 0,02 0,03 0,12	0,64
Çatı		1. Çakıl 2. Şap 3. XPS 4. Şap 5. Betonarme 6. Sıva	0,81 1,4 0,035 1,4 2,5 0,035	0,1 0,03 0,07 0,02 0,12 0,01	0,42

Ele alınan modelde cephelerdeki saydam bileşenlerin soğutma yükleri üzerindeki etkisini değerlendirebilmek amacıyla hem saydamlık oranlarında hem de saydam bileşen türünde seçenekler oluşturulmuştur. Buna göre ofis binası modeli için saydamlık oranları %90 ve %30 olarak belirlenmiş ve Çizelge 2' de verilen farklı saydam bileşen türleri hesaplamalara katılmıştır.

Çizelge 2 : Ele alınan ofis binasına ait saydam bileşen seçeneklerinin özellikleri.

Saydam Bileşen	Cam Türü	U Değeri	Güneş ısı kazancı katsayısı	Işık geçirgenliği
C1	Çift cam	1,609	0,629	0,698
C2	Low-E temperli cam	1,4	0,64	0,55
C3	Low-E çift cam 6 / 13 hava boşluklu	1,616	0,426	0,634
C4	Low-E selektif cam 6 / 13 hava boşluklu	1,628	0,2911	0,408

3.2. Gölgeleme Elemanı Seçimi

DesignBuilder kütüphanesinden seçilen 1.5 m derinliğinde saçak tipi gölgeleme elemanı, farklı bina kabukları, cam türleri, saydamlık oranları ve HVAC sistemleriyle birlikte analiz edilmiş ve güneş kazançlarına bağlı olan soğutma enerjisi yükleri değerlendirilmiştir.

3.3. Binanın Mekanik Isıtma, Soğutma ve Havalandırma Sistemine Ait Değişkenlerin Belirlenmesi

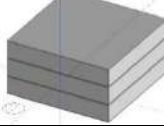
Bu çalışmada, İzmir-Bayraklı bölgesinin sıcak-nemli iklim koşulları göz önünde bulundurularak, bir makine mühendisliği firmasıyla yapılan görüşme sonucunda (M. Rodop, kişisel iletişim, 2024), İzmir’deki ofis binalarında yaygın olarak bulunan HVAC sistemlerinin özellikleri belirlenmiştir [8]. Çalışmada, İzmir–Bayraklı’nın sıcak ve nemli iklimine uygun olarak standart bir sistem olarak hava soğutmalı chiller ve dört borulu fan-coil (FCU) tercih edilmiştir. DesignBuilder programında ise "detailed HVAC" modunda ek bir klima ünitesi (AHU) ile modellenmiştir [9]. Fan-coil sistemi için 11°C’lik bir ön soğutma, 18°C’lik üfleme sıcaklığı, COP=5. 5 ve 6. 67°C olarak tanımlanan soğutulmuş su sıcaklığı belirlenmiştir; yoğuşma kontrolü için su sıcaklığı 6–7°C aralığında tutulmuştur.

Kıyaslama yapmak amacıyla, betonarme içinde yer alan borulara sahip değişken debili bir soğutulmuş tavan sistemi tasarlanarak sistemde boru çapı 0. 013 m olarak ayarlanmıştır. Otomatik kapasite hesaplaması ile $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ modülasyon aralığında operatif sıcaklık baz alınarak kontrol edilmiştir.

3.3.1. Ele alınan ofis binası için soğutma enerjisi hesaplamalarının yapılması

Tüm simülasyonlar, EnergyPlus 9.0.1 motoru kullanılarak DesignBuilder V7.2.0.032 arayüzünde gerçekleştirilmiştir [10]. Analizler İzmir’in sıcak-nemli iklimi için soğutma sistemlerinin sıklıkla kullanıldığı 15 Mayıs–15 Eylül tarihleri arasındaki soğutma yüklerine odaklanmıştır. Model açık ofis planında oluşturulmuş; ana kullanım alanları ile servis hacimleri arasındaki iç bölmeler ısı geçişine izin verecek şekilde “partition”, katlar arası tavanlar ise ısı geçişi sıfır kabul edilerek “adiyabatik ($q=0$)” olarak tanımlanmıştır. Farklı bina kabuğu, cam türü, HVAC sistemi, gölgeleme ve saydamlık oranı kombinasyonlarıyla toplam 2 farklı bina modeli oluşturulmuş (Çizelge 3) ve elde edilen bulgular Bölüm 4’te değerlendirilmiştir.

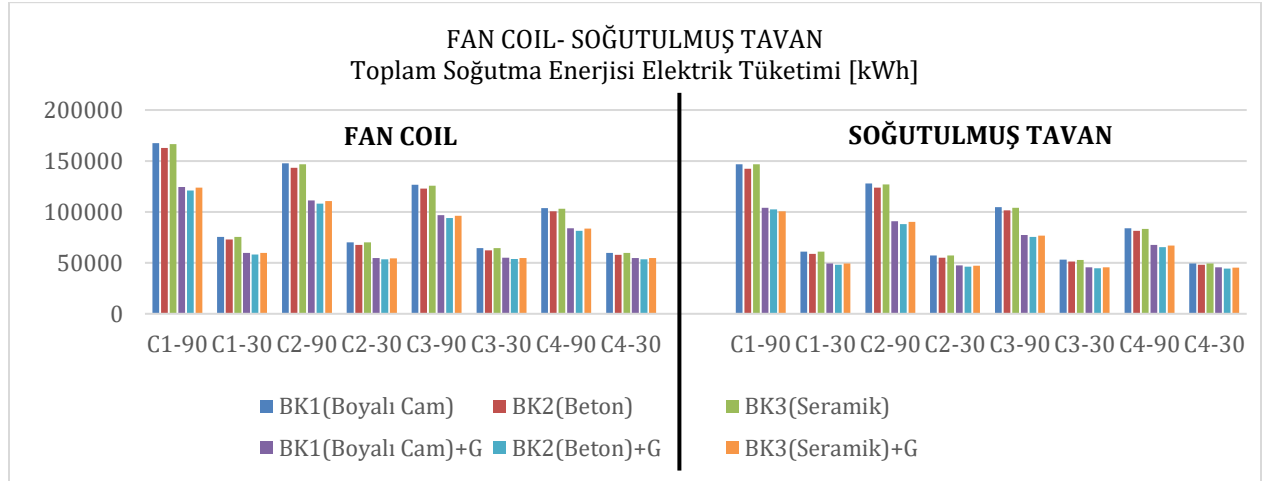
Çizelge 3 : Ele alınan ofis binasına ait saydam bileşen seçeneklerinin özellikleri.

	Saydamlık Oranı %90	Saydamlık Oranı %30
Yönlendirme: N-S-E-W		

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu bölümde, farklı mekanik sistemlerin, bina kabuğu tipleri, cam türleri, saydamlık oranları ve gölgeleme elemanı kombinasyonlarının soğutma enerjisi tüketimi üzerindeki etkileri karşılaştırılmalı olarak analiz edilmiştir [8].

4.1. Sonuçların değerlendirilmesi



Şekil 5 : Fan-Coil ve Soğutulmuş tavan toplam soğutma enerjisi elektrik tüketimi.

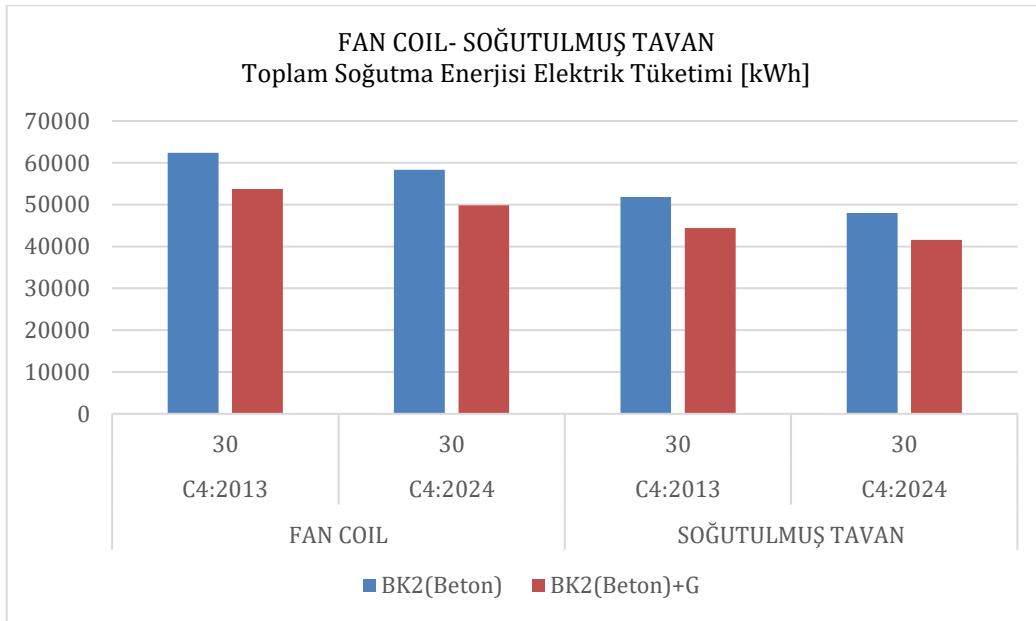
- Tüm analizlerde soğutulmuş tavan kullanıldığında elde edilen soğutma yükleri, fan coil kullanıldığında elde edilen soğutma yüklerinden her zaman daha düşük çıkmıştır.
- Tüm HVAC sistemlerinde; saydamlık oranı arttıkça soğutma yükleri artmıştır. Bina kabuğu seçenekleri arasında BK2 her zaman en düşük, BK1 ise en yüksek soğutma yüklerini vermiştir. Cam türlerinde ise C4 en düşük, C1 en yüksek soğutma yüklerinin oluşumuna neden olmuştur.
- Tüm HVAC sistemlerinde, gölgeleme elemanın hem kullanıldığı hem de kullanılmadığı durumlarda, fan-coil sistemi uygulandığında gerçekleşen en yüksek soğutma enerjisi harcamaları, soğutulmuş tavan uygulandığında yaklaşık %17-20 oranında azaltılabilmiştir.
- Fan-coil ve Soğutulmuş Tavan sistemlerinde gölgeleme elemanı kullanıldığında ve kullanılmadığında gerçekleşen minimum soğutma yüklerinin (C4-BK2) farkları %90 saydamlık oranında Fan coil ve Soğutulmuş Tavan için %19, %30 saydamlık oranında ise %7-8 oranında değişmektedir.

- Minimum soğutma enerjisi harcayan kombinasyon (BK2-C4-30) ele alındığında, fan-coil ile soğutulmuş tavan sistemi arasındaki farkın gölgeleme elemanı kullanıldığında yaklaşık %17 oranında azaldığı görülmüştür.
- Her zaman minimum soğutma yükü tüketimi gerçekleştiren soğutulmuş tavan BK2-C4 kombinasyonunun %90 saydamlık oranıyla %30 saydamlık oranı arasındaki fark gölgeleme elemanı kullanılmadığında %41, gölgeleme elemanı kullanıldığında ise %32'dir.
- Bina kabuğu performansı değerlendirildiğinde soğutma enerjisi tüketimi en yüksekten düşüğe doğru BK1 (Boyalı Cam), BK3 (Seramik Kaplama) ve BK2 (Beton) şeklinde gerçekleşmiştir.
- Her zaman en yüksek soğutma yükü tüketiminin gerçekleştiren BK1 bina kabuğu ile diğer bina kabukları, minimum yükler (Soğutulmuş tavan-C4-30) bakımından karşılaştırıldığında; soğutma yükleri arasındaki farkın gölgeleme elemanı kullanılmadığında %0,02-3,07 oranında, gölgeleme elemanı kullanıldığında ise %0,01-2,36 oranında azaldığı görülmektedir. Bu koşulların %30 saydamlık oranı ile gerçekleşmesi nedeniyle gölgeleme elemanının etkisinin azaldığı ve toplam ısı geçirme katsayısı değerleri çok yakın olan bina kabuğu seçenekleri arasında çok düşük farkların oluşabildiği gözlemlenmiştir.
- Tüm bina kabuğu seçeneklerinde, gölgeleme elemanın hem kullanıldığı hem de kullanılmadığı durumlarda, %90 saydamlık oranı uygulandığında ortaya çıkan en yüksek soğutma enerjisi harcamalarının gerçekleştiği C1 camı için, saydamlık oranı %30 olduğunda, Fan-coil uygulamalarında yaklaşık %52–%55, soğutulmuş tavan uygulamalarında ise yaklaşık %51–%59 oranında azaltılabilmektedir. En düşük soğutma enerjisi harcamalarının gerçekleştiği C4 camı için ise, saydamlık oranı %30 olduğunda, Fan-coil uygulamalarında yaklaşık %35–%42, soğutulmuş tavan uygulamalarında ise yaklaşık %32–%41 oranında azalma sağlanmıştır.
- Cam türlerine göre en yüksekten en düşüğe soğutma enerjisi tüketimi sırasıyla C1, C2, C3 ve C4 şeklinde gerçekleşmiştir. C1-C2-C3-C4 cam türlerine göre Fan-coil-BK1-90 kombinasyonu ile elde edilen en yüksek soğutma yükü ile, Soğutulmuş Tavan-BK2-30 kombinasyonu ile elde edilen en düşük soğutma yükü arasındaki fark; gölgeleme elemanı kullanılmadan %54–65, gölgeleme elemanı kullanıldığında %47–61 aralığındadır.
- Cam performansı iyileştikçe ve saydamlık oranı azaldıkça gölgeleme elemanının etkisi de azalmaktadır. Minimum soğutma yükü sağlayan Soğutulmuş Tavan-BK2-C4-30 kombinasyonu, C1, C2 ve C3'e göre sırasıyla %18, %13 ve %6 daha düşük soğutma yükü üretmiş; gölgeleme elemanı kullanıldığında bu farklar %8, %4 ve %1'e düşmüştür.
- Güneş ısı kazanç katsayısı değeri azaldıkça soğutma yükleri düşmüş; gölgeleme elemanı kullanılmadığında camın termo-fiziksel özelliklerinin etkisi artmış ve yük farkları büyümüştür.
- En yüksek soğutma enerjisi tüketiminin gerçekleştiği BK1-C1-Fan-coil seçenekleri için saydamlık oranı %90'dan %30'a düşürüldüğünde yaklaşık %55 oranında, gölgeleme elemanı kullanıldığında ise yaklaşık %51 oranında azalma sağlanmıştır. En düşük soğutma enerjisi tüketiminin gerçekleştiği BK2-C4- Soğutulmuş Tavan seçenekleri için de saydamlık oranı %90'dan %30'a düşürüldüğünde yaklaşık %41 oranında, gölgeleme elemanı kullanıldığında ise %32 oranında azalma sağlamıştır.

- Saydamlık oranı %90'dan %30'a düşürüldüğünde ve gölgeleme elemanları kullanıldığında, en yüksek ve en düşük tüketimin olduğu koşullarda yaklaşık %33–%52 oranında azalma sağlanmıştır.
- Tüm HVAC sistemlerinde gölgeleme elemanı kullanımı enerji tüketimini yaklaşık %12–15 oranında düşürmüştür. %90 saydamlık oranında gölgeleme elemanı ile yaklaşık %19–20, %30 saydamlık oranında ise %7–8 azalma sağlanmıştır; saydamlık oranı azaldıkça gölgelemenin etkisi azalmıştır.
- Tüm sistemlerde gölgeleme elemanı enerji tüketimini azaltmış; en düşük değerler özellikle BK2-C4-30-G kombinasyonunda elde edilmiştir. Ancak gölgelemenin etkisi saydamlık oranı azaldıkça düşmüş; %90 saydamlık oranı kullanıldığında %10–30, %30 saydamlık oranı kullanıldığında ise %0.03–8.6 aralığında azalma sağlanmıştır.
- Tasarım değişkenleri (bina kabuğu, cam türü ve saydamlık oranı) kararlarına bağlı olarak soğutma enerjisi tüketiminde yaklaşık %57–67 oranında azalma sağlanabilmektedir.

4.2. En Düşük Soğutma Yüklerini Sağlayan Alternatife İlişkin Hesaplamaların TSE 825:2024 Standardına Uygun Sınır Değerlerle Tekrarlanması

Bu çalışmadaki hesaplamalar TS 825:2013'te önerilen U değerleri esas alınarak yapılmıştır. Ancak standardın 2024'te güncellenmesiyle TSE 825:2024 yürürlüğe girmiş ve U değerleri revize edilmiştir. Bu nedenle, en iyi sonucu veren BK2-C4-30 ve BK2-C4-30-G alternatiflerinin güncel TSE 825:2024 koşullarındaki performansını belirlemek amacıyla bina kabuğu detayları yeniden oluşturulmuş (Çizelge 4) ve hesaplamalar Fan-Coil ve Soğutulmuş Tavan performansını karşılaştırmalı olarak değerlendirecek şekilde yeniden yapılmıştır (Şekil 6) [11].



Şekil 6 : Fan coil ve soğutulmuş tavan TS 825:2013, TS 825:2024 soğutma enerjisi tüketimleri (kWh).

Çizelge 4 : TS825:2024'e göre opak bina bileşenleri.

Opak Bileşen	Malzeme	Isıl İletkenlik (W/mk)	Kalınlık (m)	U (W/m ² K)
Bina Kabuğu 2	1. Çimento harçlı sıva	1,4	0,02	0,4
	2. Ekstrüde polistiren	0,029	0,05	
	3. Beton	2,1	0,2	
	4. Alçı sıva	0,35	0,02	
Zemine Oturan Döşeme	1. PVC	0,23	0,005	0,35
	2. Şap	1,4	0,03	
	3. Isı yalıtımı	0,035	0,045	
	4. Tesviye şapı	1,4	0,03	
	5. Hafif Beton	0,16	0,2	
Çatı	1. Çakıl	0,81	0,1	0,3
	2. Şap	1,4	0,02	
	3. XPS	0,035	0,1	
	4. Şap	1,4	0,2	
	5. Betonarme	2,5	0,1	
	6. Sıva	0,035	0,01	

En düşük soğutma enerjisi yüklerinin gerçekleştiği BK2-C4-30 seçeneği TS825:2013 ve TS825:2024'e göre karşılaştırıldığında fan coil sisteminde hem gölgelendirmeli hem de gölgelendirmesiz %7, soğutulmuş tavan için ise %8 oranında fark olduğu ve TS825:2013 referans alınarak oluşturulmuş bina bileşenlerinin daha fazla soğutma enerjisi tüketimine neden olduğu değerlendirilmiştir. TS825:2024 ile revize edilen BK2-C4-30-soğutulmuş tavan seçeneği fan coil sistemine göre gölgelendirmeli ve gölgelendirmesiz olarak %16- %18 oranında daha düşük soğutma yüklerinin gerçekleştiği seçenek olmuştur.

5. SONUÇLAR

- Bina kabuğunun termofiziksel özellikleri ve HVAC sisteminin soğutma yükleri üzerinde bütünlük bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Bina kabuğu, benzer U değerlerine sahip olsa dahi farklı termo-fiziksel özellikleri nedeniyle farklı ısı transfer davranışları sergilemiş ve bu durum soğutma yüklerinde farklılıklar oluşturmuştur.
- Düşük ısıal kütleyle sahip BK1 ve BK3 hızlı ısı geçişine neden olarak yüksek tüketim oluştururken, yüksek yoğunluklu ve 28 cm kalınlıktaki beton esaslı BK2 ısı depolama kapasitesi sayesinde sıcaklık dalgalanmalarını azaltmış, yükleri hafifletmiş ve en düşük soğutma enerjisi tüketimini sağlamıştır.
- Mekanik sistemler arasında Fan Coil en yüksek, Soğutulmuş Tavan sistemi ise en düşük soğutma enerjisi tüketimini gerçekleştirmiştir.
- Cam türü de önemli bir değişken olup, özellikle SHGC değeri belirleyici olmuştur.

- Saydamlık oranı arttıkça soğutma yükleri artmış; en yüksek tüketim %90, en düşük tüketim %30 saydamlık oranında gerçekleşmiştir. Saydamlık oranı düşürülemiyorsa, düşük güneş ısı kazancı katsayısına sahip cam seçimiyle soğutma yükleri azaltılabilmektedir.
- Tüm sistemlerde gölgeleme elemanı enerji tüketimini azaltmış; en düşük değerler özellikle BK2-C4-30-G kombinasyonunda elde edilmiştir. Ancak gölgelemenin etkisi saydamlık oranı azaldıkça düşmüştür.
- Hem Fan Coil hem de Soğutulmuş Tavan sistemlerinde en düşük soğutma enerjisi tüketimi BK2-C4-30 kombinasyonunda elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

1. Villar-Ramos, M. M., Hernández-Pérez, I., Aguilar-Castro, K. M., Zavala-Guillén, I., Macias Melo, E. V., Hernández-López, I., & Serrano-Arellano, J. (2022). A review of thermally activated building systems (TABS). *Energies*, 15(17), 6179. <https://doi.org/10.3390/en15176179>
2. Vivek, T., & Balaji, K. (2023). Heat transfer and thermal comfort analysis of thermally activated building system in warm and humid climate – A case study in an educational building. *International Journal of Thermal Sciences*, 183, 107883. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2022.107883>
3. Fairconditioning. (n.d.). Radiant cooling. <https://fairconditioning.org/knowledge/sustainable-cooling-technologies/radiant-cooling/>
4. ASHRAE. (2020). *ANSI/ASHRAE Standard 55: Thermal environmental conditions for human occupancy*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
5. Roa, C. D., et al. (2025). Determining the warmest supply water temperature for high thermal mass radiant systems in buildings. *Energy and Buildings*, 287, 112345.
6. DesignBuilder Software Ltd. (2024). *DesignBuilder help manual*. <https://designbuilder.co.uk/help>
7. TS-825. (2013). *Binalarda ısı yalıtım kuralları*. Türk Standardları Enstitüsü.
8. Kılıçoğlu, Y. (2026). *Sıcak iklim bölgelerinde ofis binalarında soğutma enerjisi yüklerinin azaltılmasına yönelik bir çalışma* (Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi).
9. DesignBuilder Software Ltd. (n.d.). *DesignBuilder help: HVAC – Fresh air and ventilation settings*. Retrieved March 2025 from https://designbuilder.co.uk/helpv7.0/Content/_HVAC_model_detail.htm
10. U.S. Department of Energy. (2023). *EnergyPlus engineering reference: The reference to EnergyPlus calculations*. <https://energyplus.net/documentation>
11. TS-825. (2024). *Binalarda ısı yalıtım kuralları*. Türk Standardları Enstitüsü.

[illegible]

NOTLAR

[illegible]

Düzenleyenler



Sponsorlar

Platin Sponsor:



Altın Sponsorlar:

