5. Ulusal
Yapı Fiziği ve Çevre Kontrolü Kongresi

7-8 Mayıs 2026
İTÜ Mimarlık Fakültesi, İstanbul

BİNA PERFORMANS ÇALIŞMALARINDA TEST BİNALARININ ROLÜNÜN İNCELENMESİ

Simin Pakakar[1*]
Suzi Dilara Mangan[2]
[1,2] YTÜ Mimarlık Fakültesi, Yıldız Kampüsü, Beşiktaş, İstanbul, 34349

ÖZET

Bina sektörü için belirlenen sürdürülebilirlik hedeflerinin başarılabilmesinde 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

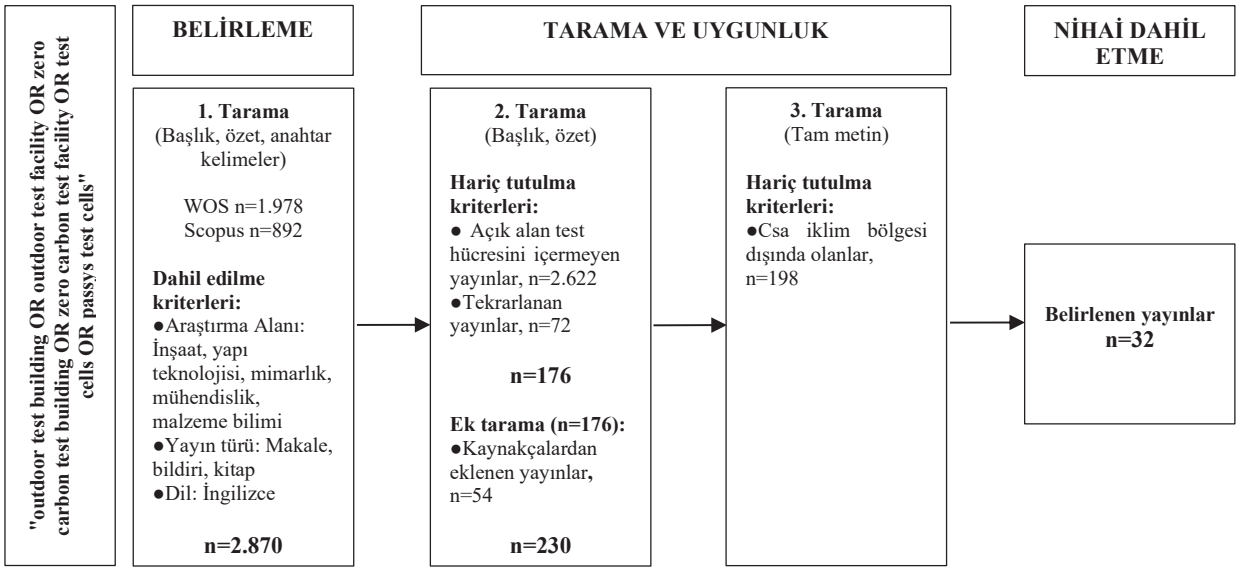
1. GİRİŞ

Bina sektörünün küresel enerji tüketimi ve bu enerji tüketimine dayalı CO_2 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 CO_2 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 CO_2 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 adımında irdelenecek toplam yayın sayısı, 2.870 adet yayın olarak belirlenmiştir.

Tarama ve Uygunluk

Belirleme adımında 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 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.



a b c

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 irdeleme 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 güçlüğü, v) simülasyonlar aracılığıyla elde edilen veriler ile deney sonuçlarının birebir eşleştirilememesi olarak sıralanmaktadır. Öte yandan, 32 adet test hücresi içerisinden 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.jobe.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., Scorpio, 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.jobe.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 Downdraft 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., Sébastian, 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

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

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., Sciurpi, 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.jobe.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., Asproulias, 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

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

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/