TÜRKİYE'DE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNE UYUMLU YEŞİL CEPHE SİSTEMLERİ VE TASARIM ÖNERİLERİ

Keziban Türk [1]
Ezgi Korkmaz [2]

[1] Mimar Keziban Türk, YTÜ, FBE, Mimarlık Bölümü, Yapı Bilgisi, Beşiktaş/İstanbul
Tel: +90(212) 219 26 17, keziban.turk@std.yildiz.edu.tr
[2] Doç. Dr. Ezgi Korkmaz, YTÜ, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Yapı Bilgisi, Beşiktaş/İstanbul
Tel: +90(212) 219 26 17, korkmaze@yildiz.edu.tr

ÖZET

Sanayileşmenin etkisiyle artan kent nüfusu beraberinde birçok sorunu da getirmiştir. İnsanlar, kaynaklara erişim kolaylığı ve istihdam olanakları nedeniyle kentlere göç etmiş; bu durum kent nüfusunun artmasına yol açmıştır. Bu süreç, mevcut kentsel dokunun yoğunlaşmasının yanı sıra yeni yapılı çevrelerin zorunlu olarak genişlemesine neden olmaktadır. Geleceğe yönelik projeksiyonlarda kent nüfusunun artmaya devam etmesi beklenmektedir. Artan nüfusun tüketim baskısı, doğal kaynakların kendini yenileme hızının üzerine çıkmakta; böylece ekosistem dengesi bozulmakta ve çevresel sorunların şiddeti artmaktadır. Bu kapsamda hava, su ve enerji kaynaklarının hızla azalması dikkat çekmektedir.

Özellikle 2010 ve sonrası yapılan çalışmalarda yeşil sistemler; kentsel ısı adası etkisi, hava kirliliği ve su yönetimi gibi çevresel sorunlara çözüm üretme kapasitesiyle öne çıkmaktadır. Literatürde yapılan çalışmalar, yeşil cephe ve dikey bitkilendirme uygulamalarının iklim değişikliğinin etkilerini azaltmada önemli bir araç olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada Türkiye iklim projeksiyonlarının bölgesel olarak incelenmesi ve IPCC'nin 2050 ve 2100 senaryoları doğrultusunda artan sıcaklık, değişen yağış rejimleri ve rüzgâr karakteristikleri dikkate alınarak yeşil cephe sistemlerinin iklimsel ve ısıl performans, bitkisel sistem direnci, yapısal ve mekanik performans, su yönetimi ve bakım performansı ile enerji ve karbon performansı başlıkları altında sürdürülebilirlik bağlamında değerlendirilmesi amaçlanmaktadır. Belirlenen performans ölçütleri doğrultusunda Türkiye'nin iklim bölgeleri karşılaştırılacak, bölgesel farklılıklar analiz edilerek yeşil cephelerin iklim uyum kapasitesi tartışılacaktır. Elde edilen bulgular doğrultusunda, iklime duyarlı tasarım yaklaşımlarına yönelik değerlendirmeler sunulmaktadır.

Çalışmada iklim projeksiyonları, "risk → performans ölçütü → sistem seçimi" zinciriyle mimari tasarım girdisine dönüştürülmüştür.

Anahtar kelimeler: İklim değişikliği, Yeşil cephe sistemleri, Performans ölçütleri, İklime duyarlı tasarım

ABSTRACT

The increase in urban population driven by industrialization has brought along numerous challenges. People have migrated to cities due to easier access to resources and employment opportunities, leading to significant population growth. This process has resulted not only in the densification of existing urban fabric but also in the inevitable expansion of newly built environments. Future projections indicate that urban populations will continue to grow. The consumption pressure generated by this increase exceeds the regenerative capacity of natural resources, thereby disrupting ecosystem balance and intensifying environmental problems. In this context, the rapid depletion of air, water, and energy resources has become particularly notable.

Studies conducted especially after 2010 highlight green systems for their capacity to address environmental issues such as the urban heat island effect, air pollution, and water management. Research in the literature demonstrates that green facade and vertical greening applications constitute an important tool for mitigating the impacts of climate change. This study aims to evaluate the thermal, environmental, and mechanical performance of green facade systems within the framework of sustainability by examining regional climate projections for Türkiye and considering the increasing temperatures, changing precipitation regimes, and wind characteristics outlined in the IPCC 2050 and 2100 scenarios. The evaluation is conducted under the headings of climatic and thermal performance, plant system resilience, structural and mechanical performance, water management and maintenance performance, and energy and carbon performance. Based on defined performance criteria, Türkiye's climate regions will be compared, regional differences will be analyzed, and the climate adaptation capacity of green facades will be discussed. Based on the findings, evaluations of climate-responsive design approaches are presented.

Within the scope of the study, climate projections have been transformed into architectural design inputs through a "risk → performance criterion → system selection" chain.

Keywords: Climate change, Green façade systems, Performance criteria, Climate-responsive design

1. Giriş

Küresel ölçekte ivme kazanan kentleşme süreci, çevresel sorunları da beraberinde getirmiştir. 2010'lu yılların başına ait verilere göre kentler, küresel enerji kullanımından kaynaklanan CO_2 emisyonlarının yaklaşık %71 ila %76'sından ve küresel enerji kullanımının %67 ila %76'sından sorumludur [1, 2]. Yapılı çevre, küresel enerjiye bağlı CO_2 emisyonlarının yaklaşık %39'unu oluşturmakta, toplam su tüketiminin yaklaşık %33'ünü ve çıkarılan hammaddelerin yaklaşık %50'sini temsil ederek iklim değişikliği üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır [3]. Özellikle binalarda kullanılan malzemelerin üretim ve işletme süreçleri, karbon ayak izini derinleştirmekte; bu durum ekosistem dengesini bozarak küresel ısınmayı tetiklemektedir [4].

Artan yeşil alan ihtiyacını karşılamak amacıyla başvurulan ilk yöntemlerden biri olan çatı bahçeleri, yüksek katlı binalarda nüfus yoğunluğuna oranla yetersiz kalmaktadır. Buna karşın, yapı cephelerine entegre edilen yeşil sistemler, yapının taban alanına oranla daha fazla yeşil yüzey alanı sağlama potansiyeline sahiptir [5]. Bu sistemler, bina ölçeğinde mikroiklimi düzenleyerek ve enerji gereksinimini azaltarak, "kendine yetebilen yapı" modeline katkı sunmaktadır. Literatür taraması sonucunda, Türkiye özelinde iklim projeksiyonları ile yeşil cephe sistemlerinin ısıl, çevresel ve mekanik performanslarını bütüncül biçimde ilişkilendiren karşılaştırmalı çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir; bu çalışma, söz konusu boşluğu IPCC senaryoları doğrultusunda bölgesel ölçekte değerlendirme yaparak ele almayı amaçlamaktadır.

Çalışma kapsamında ilk olarak yeşil cephe sistemlerinin teknik sınıflandırması ele alınmıştır. Çalışmanın ikinci aşamasında, Türkiye'nin farklı iklim bölgeleri için 2050 ve 2100 dönemlerine ait iklim projeksiyonları, ulusal ve bölgesel iklim raporları ile Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) değerlendirmeleri doğrultusunda analiz edilerek sistematik biçimde derlenmiştir. Literatür taraması sonucunda, bölgesel ölçekte tasarıma en fazla etki eden iklime bağlı performans ölçütleri belirlenmiş; bu ölçütler iklimsel–ısıl performans, bitkisel direnç, yapısal–mekanik güvenlik, su yönetimi–bakım ve enerji–karbon başlıkları altında tanımlanmıştır. Bu bağlamda, bölgelere göre tanımlanan iklimsel riskler her bölge için tasarım kararlarının oluşturulmasında temel bir girdi olarak ele alınmış ve risk → performans ölçütü → sistem seçimi zinciri üzerinden bölgesel öneriler geliştirilmiştir.

2. Yeşil Cephe Sistemleri

Dikey yeşil sistemler, yapı kabuğunun bitki katmanlarıyla bütünleşik biçimde örtülmesini amaçlayan ve bina–iklim etkileşimini doğrudan etkileyen strüktürel tasarım bileşenleridir. Literatürde bu sistemler; bitkilerin toprak, yapı yüzeyi ya da yapay yetişme ortamları üzerinde köklenmesiyle oluşturulan düşey yüzeyler olarak tanımlanmakta; yapı performansı, mikroiklim düzenlemesi ve enerji dengesi üzerinde belirleyici rol oynamaktadır [6, 7]. Bu bağlamda dikey yeşil sistemler, bu çalışmada yalnızca ekolojik yüzeyler değil; iklim projeksiyonlarına karşı farklı düzeylerde performans üreten yapı kabuğu bileşenleri olarak ele alınmıştır.

Çalışma kapsamında yeşil cephe sistemleri; cephe ile kurdukları ilişki ve yapım tekniği bakımından Yeşil Cepheler ve Yaşayan Duvarlar olarak iki ana grupta ele alınmıştır.

Yeşil cepheler, bitkilerin yapı yüzeyine doğrudan tutunarak ya da yönlendirici elemanlar aracılığıyla cepheden ayrışarak geliştiği sistemlerdir [8]. Bu sistemler, düşük yapısal müdahale gereksinimi ve görece düşük maliyetleri nedeniyle özellikle mevcut yapıların iklimsel iyileştirilmesinde önemli bir araç olarak öne çıkmaktadır [8]. Bitki–cephe ilişkisine göre iki alt gruba ayrılır:

- **Doğrudan yeşil cepheler,** tırmanıcı bitkilerin herhangi bir yardımcı taşıyıcı olmaksızın doğrudan yapı yüzeyinde geliştiği sistemlerdir. Yüzey sıcaklıklarını düşürme ve güneş ışınımına karşı pasif gölgeleme sağlama potansiyeli yüksektir; ancak kontrolsüz büyüme, bakım güçlüğü ve yüzey hasarı riski nedeniyle uzun dönemli işletme ve bakım gerektiren cephe çözümleri için sınırlı tasarım esnekliği sunmaktadır [8, 10]. Bu nedenle bu sistemlerin, yüksek iklimsel stres altındaki bölgelerde ikincil veya tamamlayıcı çözümler olarak değerlendirilebileceği düşünülmektedir.
- **Dolaylı yeşil cepheler,** bu sistemlerde bitkiler, yapı yüzeyinden ayrıştırılmış taşıyıcı elemanlar üzerinde gelişir. Kablo–tel ağ sistemleri ve modüler kafes sistemleri olmak üzere iki alt gruba ayrılır. Bu yaklaşım; cephe yüzeyini korurken, hava boşluğu sayesinde ısıl tampon bölge oluşturarak enerji performansını iyileştirir. Özellikle yüksek ve geniş cephelerde iklimsel kontrol açısından daha kontrol edilebilir ve yapısal olarak izlenebilir çözümler sunar [10, 11]. Bu özellikler ile, dolaylı yeşil cephelerin rüzgâr, don ve bakım kısıtlarının baskın olduğu bölgelerde daha uygun bir aday olabileceği değerlendirilmektedir.

Yaşayan duvarlar, bitki kök sisteminin yapıdan tamamen ayrılarak yapay bir yetişme ortamına entegre edildiği yüksek performanslı dikey yeşil sistemlerdir. Bu sistemler; çok katmanlı yapıları, sürekli bakım gereksinimi ve ileri teknoloji altyapılarıyla, özellikle sıcaklık düzenleme, evaporatif soğutma ve ısı yalıtım performansının artırılmasında belirleyici rol üstlenmektedir [12]. Bu nedenle yaşayan duvarlar, çalışma kapsamında "yüksek ısıl ve mikroiklim performansı sağlayan, ancak altyapı ve işletme sürekliliğine bağımlı sistemler" olarak tanımlanmıştır.

- **Ön üretimli yaşayan duvar sistemleri**, fabrika ortamında standartlaştırılmış modüler panellerin cepheye ankrajlanması esasına dayanmakta; hızlı montaj, kalite denetimi ve uzun dönem bakım sürekliliği açısından özellikle iklimsel belirsizliklerin arttığı bölgelerde yapısal güvenilirlik sağlamaktadır [10, 11]. Ön üretimli sistemlerin iklimsel performansı, alt katman türüne bağlı olarak birbirinden ayrılmaktadır:
    - **Modüler saksılı sistemler,** kök hacmi yüksek çok yıllık bitkilerin kullanımına olanak tanıyarak yüksek sıcaklık ve kuraklık koşullarında bitki direncini artırmakta; cephe ile saksı arasında oluşan hava boşluğu sayesinde ısı akışını yavaşlatan iklimsel tampon katman oluşturarak, sıcak ve yarı kurak iklim bölgelerinde öne çıkmaktadır [13].
    - **Köpük katmanlı sistemler,** düşük yapısal ağırlıkları sayesinde özellikle yüksek katlı yapılarda statik yük sınırları altında etkin çözümler sunarken, gözenekli yapılarıyla su–hava dengesini optimize ederek sıcak hava dalgalarına karşı bitki ömrünü uzatmakta, düşük su tutma kapasitesi nedeniyle uzun süreli kuraklık koşullarında sınırlı performans göstermektedir [11, 14].
    - **Mineral yünü katmanlı sistemler,** ise yüksek su tutma kapasitesi ve buhar geçirgenliği sayesinde yağış rejimi düzensiz bölgelerde nem dengesini stabilize etmekte, aynı zamanda cephe yüzeyinde ısı dalgalanmalarını dengeleyici bir mikroiklim katmanı oluşturarak yüksek nem ve yoğun yağış rejimine sahip bölgelere uyum sağlayabilmektedir [11, 13, 14].

Sistemler arasındaki yapısal ve malzeme temelli farklılıklar, ön üretimli yaşayan duvar sistemlerinin bölgesel iklim koşullarına göre değişen gereksinimlere yanıt verebilecek esneklikte olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla sistem seçimi, iklimsel bağlam dikkate alınarak ele alınması gereken bir tasarım kararı olarak ortaya çıkmaktadır.

- **Yerinde yapım yaşayan duvarlar,** uygulama alanında şekillendirilen ve karmaşık mimari geometrilere uyum sağlayabilen sistemlerdir. Patrick Blanc'ın geliştirdiği keçe katmanlı sistem yaşayan duvarların en bilinen örneğidir. İnce kesitli yapıları sayesinde düşük cephe yükü oluşturur ve kesintisiz bitki dokusuyla yüksek evaporatif soğutma potansiyeli sağlar; ancak hassas sulama ve nem kontrolü gerektirir [8, 11, 15]. Sistemin özellikleri göz önünde bulundurulduğunda yüksek ısıl performans gerektiren ancak bakım ve altyapı sürekliliğinin sağlanabildiği durumlarda çözüm olarak tercih edilebilmesinin uygun olacağı anlaşılmaktadır.

3. Türkiye'de İklim Değişikliği Projeksiyonları ve Yapı Kabuğuna Etkileri

Küresel ölçekte iklim değişikliğiyle mücadele, 1988 yılında kurulan Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) öncülüğünde bilimsel temelde kurumsallaşmış; süreç Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi, Kyoto Protokolü ve halen yürürlükte olan Paris Anlaşması ile uluslararası hukuki çerçeveye kavuşmuştur [16]. Paris Anlaşması, küresel sıcaklık artışını 2°C'nin oldukça altında ve mümkünse 1,5°C ile sınırlamayı temel hedef olarak benimsemiş; azaltım hedeflerinin belirlenmesini ülkelere bırakmıştır [16].

IPCC Altıncı Değerlendirme Raporu'na göre günümüzde atmosferdeki CO_2 yoğunluğu en az son iki milyon yılın en yüksek düzeyine ulaşmıştır [16]. Mevcut emisyon politikalarının sürmesi halinde 1,5°C ve hatta 2°C hedeflerinin aşılması yüksek olasılıklı bir risk olarak değerlendirilmektedir. Küresel sıcaklık kayıtları, 1850'den bu yana her on yılın bir öncekinden daha sıcak gerçekleştiğini ve 1970 sonrası 50 yıllık ısınma hızının son 2000 yılın en yükseği olduğunu ortaya koymaktadır [16]. Sanayi Devrimi öncesine kıyasla günümüzde küresel ortalama sıcaklık yaklaşık 1,1°C artmış olup, bu artışın yüzyıl sonunda yaklaşık 3°C'ye ulaşması beklenmektedir [17].

1990–2021 döneminde Türkiye'nin toplam sera gazı emisyonları %138,4 artmış; emisyonların %70,2'si enerji sektörü, %78,9'u ise doğrudan CO_2 kaynaklı gerçekleşmiştir [19]. Yapı sektörü, 2020 itibarıyla toplam enerji tüketiminin %33'ünden ve sera gazı emisyonlarının %12'sinden sorumludur [19]. Türkiye, 2021 yılında Paris Anlaşması'na taraf olmuş; 2030'a kadar referans senaryoya göre %21 azaltım hedefi ve 2053 net sıfır emisyon vizyonunu ilan etmiştir [16].

Türkiye; üç tarafının denizlerle çevrili olması ve karmaşık topoğrafyası nedeniyle Marmara, Ege, Akdeniz, Karadeniz, İç Anadolu, Doğu Anadolu ve Güneydoğu Anadolu olmak üzere yedi ana coğrafi bölgeye ayrılmaktadır (Şekil 1) [18, 19]. 2024 yılı, sıcaklıkların 1991–2020 normallerinin %1,7 üzerine çıkmasıyla Meteoroloji Genel Müdürlüğü uzun dönem dizisine göre son 54 yılın en sıcak yılı olarak kaydedilmiştir [20]. Aynı yıl ülke genelinde yağışlar %6,3 azalırken; Doğu Karadeniz ve Doğu Anadolu'da %20–40 artış, Marmara ve Ege'de ise %35'e varan düşüşler gözlenmiştir [20]. Yaz günleri ve tropik gecelerdeki artışlar, Türkiye'nin iklimsel olarak değişiklik sürecine girdiğini göstermektedir [21].



Şekil 1. Türkiye'nin coğrafi bölgeleri ve iklim değerlendirmesinde kullanılan mekânsal bölgeleme [19]

İklim projeksiyonları; geçmiş iklim normalleri ile emisyon senaryolarının (RCP) birleştirilmesiyle oluşturulan sayısal öngörülerdir [16]. Türkiye ölçeğinde projeksiyonlar RCP4.5 (ılımlı) ve RCP8.5 (yüksek emisyon) senaryoları kapsamında, 10 km çözünürlüklü bölgesel modellerle yürütülmektedir [19, 21]. IPCC AR6'da senaryo çerçevesi ağırlıkla Paylaşılan Sosyoekonomik Yollar (Shared Socioeconomic Pathways, SSP) setleriyle raporlansa da, Türkiye'ye yönelik ulusal/bölgesel projeksiyonların önemli bir kısmı RCP4.5/RCP8.5 formatında yayımlandığı için bu çalışma, ulusal verilerle doğrudan uyum sağlamak amacıyla bu gösterimi korumaktadır.

IPCC Altıncı Değerlendirme Raporu'nda tanımlanan RCP8.5 yüksek emisyon senaryosu temel alınarak hazırlanan Tablo 1, 2050 ve 2100 projeksiyon dönemlerinde Türkiye'nin farklı iklim bölgelerinde öngörülen en belirgin iklimsel değişimleri ve bu değişimlerin yapı kabuğu üzerindeki doğrudan etkilerini ortaya koymaktadır. Daha ılımlı senaryolar yerine RCP8.5'in seçilmesi, cephe ve bina kabuğu tasarımında karşılaşılabilecek üst sınır iklim baskılarının dikkate alınmasını amaçlamaktadır. Sıcaklık artışı, yağış rejimi, kuraklık, nemlilik–kuruluk dengesi, rüzgâr karakteristiği ve ekstrem olaylar 1991–2020 referans dönemi ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş; her bölge için yapı kabuğunu etkileyen ısı yükleri, nem ve yoğuşma riski ile rüzgâr ve yağışa bağlı zorlanmalar bu çerçevede sınıflandırılmıştır. Yapılan sınıflama ile bir sonraki bölümde incelenecek olan performans ölçütlerinin bölgelere göre detaylandırılmasını sağlayan verilerin elde edilmesi amaçlanmaktadır.

Tablo 1. RCP8.5 Yüksek Emisyon Senaryosu Altında Türkiye'de Bölgesel İklim Değişikliği Projeksiyonları ve İlişkili İklimsel Riskler (Tablodaki nicel aralıklar, IPCC AR6, Türkiye ulusal bildirimleri ve Meteoroloji Genel Müdürlüğü değerlendirmelerinden türetilmiş bölgesel eğilimlerin karşılaştırmalı sentezi niteliğindedir [17, 19–24]; bölgesel belirsizlikler nedeniyle mutlak değerler değil, tasarım açısından "risk büyüklüğü" göstergeleri olarak kullanılmıştır.)

Bölge	Sıcaklık Değişimi	Yağış Rejimi (Projeksiyon)	Kuraklık Riski	Nemlilik-Kuruluk Dengesi	Rüzgar Karakteristiği	Ekstrem Olaylar
Marmara	3,0°C – 3,4°C artış (Yüzyıl sonu)	%10 – %20 artış (Kış) / Yaz düzensizliği	Orta (Trakya'da yerel şiddetli yoğunluk)	Yüksek Nem (Yıllık %73 ortalama; yoğuşma riski kritik)	Şiddetli (Aşırı rüzgarlı gün sayısında %80 artış)	Dolu, hortum, ani sel, ısı adası
Ege	4,0°C – 6,0°C artış (Yazın ekstrem)	%20 – %40 azalma	Şiddetli (Uzun süreli ve kronik kuraklık)	Orta Nem (Mevsimsel buharlaşma; değişken su stresi)	Şiddetli (Maksimum rüzgar hızında %100 artış riski)	Yangın, fırtına, sıcak hava dalgası
Akdeniz	5,0°C – 6,0°C artış (Kritik eşik)	%30 – %50 azalma	Şiddetli (Kalıcı su açığı ve ekstrem kuraklık)	Orta Nem (Yazın düşük, kışın nemli; dengesiz yapı)	Düşük (Fırtına şiddetinde bölgesel azalış eğilimi)	Ekstrem sıcak dalgaları, yangınlar
Karadeniz	2,5°C – 4,5°C artış (Kuzeydoğu daha fazla)	%30 – %100 artış (Ekstrem)	Düşük (Mevsimsel kaymalar kaynaklı geçici risk)	Yüksek Nem (Sürekli %71-%75 doygunluk; aşırı nem)	Orta (Kıyı şeridinde artan aşırı rüzgarlı gün sayısı)	Şiddetli yağış (R95P), sel, heyelan
İç Anadolu	4,0°C – 5,0°C artış (Homojen ısınma)	%20 – %40 azalma	Şiddetli (SPEI3 indeksinde %80'i aşan artış)	Yüksek Kuruluk (Düşük nispi nem; malzeme çatlama riski)	Orta (Yerel konvektif fırtına risklerinde artış)	Tarımsal kuraklık, ani don, obruk
Doğu Anadolu	5,0°C – 6,5°C artış (En yüksek artış)	%30 – %60 azalma (Kar kaybı)	Şiddetli (Hidrolojik kuraklık ve kar örtüsü kaybı)	Yüksek Kuruluk (Yüksek rakımlı kuru hava; kar kaybı)	Düşük (Günlük maksimum rüzgar hızında genel azalma)	Çığ, ekstrem don, taşkın
Güneydoğu	6,0°C – 7,5°C artış (Ekstrem ısınma)	%35 – %55 azalma	Şiddetli (Ekstrem ısınma kaynaklı kalıcı kuraklık)	Ekstrem Kuruluk (Yıllık %53.6 nem; şiddetli buharlaşma)	Düşük (Toz taşınımı kaynaklı statik hava kütlesi)	Toz fırtınası, ekstrem sıcaklık

4. Yeşil Cephelerin Performans Ölçütleri

Dikey yeşil sistemler, yapı kabuğunun çevresel koşullarla etkileşimini dönüştüren ve enerji, mikroiklim ile yapı performansı üzerinde çok boyutlu etkiler üreten pasif sistemler olarak değerlendirilmektedir. Literatürde, bu sistemlerin performansının yalnızca bitkisel özelliklere değil; iklim koşulları, cephe yönelimi, sistem tipi ve yapı bileşenleri gibi birçok değişkene bağlı olarak farklılaştığı ortaya konmaktadır

[25, 26, 27]. Bu durum, performansın sabit çıktılar üzerinden değil, bağlamsal bir çerçevede ele alınmasını gerekli kılmaktadır. Belirlenen gereklilik doğrultusunda çalışmadaki ölçütler, literatürde yaygın olarak kullanılan ve sistemlerin çevresel, yapısal ve operasyonel boyutlarını birlikte değerlendirmeye imkân tanıyan yüzey sıcaklığı ve ısı akısı, güneş ışınımı ve gölgeleme etkisi, evapotranspirasyon ve mikroiklim koşulları, bitki türü ve yaprak yoğunluğu (LAI), rüzgâr yükü ve sistem ağırlığı, su tüketimi ve sulama gereksinimi ile enerji talebi ve karbon etkisi gibi temel parametrelere dayandırılmıştır [25, 26, 27, 28, 32, 34, 35, 38].

Ölçütlerin belirlenme sürecinde, iklim değişikliği projeksiyonlarıyla tanımlanan çevresel girdiler ile sistem performansı arasındaki ilişkiler esas alınarak; sıcaklık ve güneş ışınımındaki artış "iklimsel ve ısıl performansı" [26, 28, 34], bitkisel stres koşulları "bitkisel sistem direncini" [26, 34, 35], rüzgâr ve kar yükleri "yapısal ve mekanik performansı" [28, 38], yağış rejimi ve kuraklık "su yönetimi ve bakım performansını" [26, 32, 34], enerji talebindeki değişimler ise "enerji ve karbon performansını" [26, 27] belirleyici girdiler olarak öne çıkmaktadır. Kurgulanan teorik çerçeve, farklı iklim koşullarında karşılaştırılabilir ve bütüncül bir performans değerlendirmesi yapılmasına olanak sağlamaktadır. Bu kapsamda, performans ölçütleri literatürde raporlanan etkilerin bölgesel iklim projeksiyonlarıyla örtüşme düzeyi dikkate alınarak nitel karşılaştırma yaklaşımıyla değerlendirilmiştir.

İklimsel ve Isıl Performans; sıcaklığı, güneş ışınımı kontrolü ve mikroiklim etkileri üzerinden değerlendirilmektedir ve literatür, özellikle yüksek güneş radyasyonu altında cephe yüzey sıcaklıklarının anlamlı biçimde azaldığını göstermektedir. Tropikal iklimlerde 4–12 °C aralığında düşüşler rapor edilirken [26], Akdeniz ikliminde uzun dönemli ölçümler yaz koşullarında yaklaşık 3.8–6.8 °C azaldığı, sıcak hava dalgalarında ise bu etkinin daha belirgin hale geldiğini ortaya koymaktadır [27]; ılıman iklimlerde ise azalmanın genellikle 1.2–2.7 °C aralığında kaldığı belirtilmektedir [28] Sistem tipine bağlı performans farklılaşmakta; yüksek bitki yoğunluğu ve sürekli sulama içeren yaşayan duvarların daha yüksek soğutma potansiyeli sunduğu, dolaylı yeşil cephelerde etkinin daha çok gölgeleme ile ilişkili olduğu ifade edilmektedir [29, 30]. Bu bulgular, dikey yeşil sistemlerin ısıl performansının iklim, sistem tipi ve bitkisel özelliklerin birlikte belirlediği değişken bir yapı sergilediğini ortaya koymaktadır. Yapı kabuğu ölçeğinde, bitkisel katman ile cephe yüzeyi arasındaki hava boşluğu belirleyici bir ara katman oluşturarak bitkisel örtünün sağladığı gölgeleme ile evapotranspirasyon ve düşük hızda hava hareketinin birleşimiyle cepheye ulaşan ısı akısını azaltan bir mikroiklim bölgesi üretmektedir [28, 31]; ölçümler bu katmandaki hava sıcaklığının dış ortama göre 0.5–4 °C daha düşük olabildiğini ve bunun ısı akısını doğrudan etkilediğini göstermektedir [32, 33]. Bitkisel katmanın rüzgâr hızını düşürmesi konvektif ısı transferini sınırlandırarak daha stabil bir termal davranış sağlarken hava boşluğu 60 mm üzerinde olan sistemlerde artan hava hareketi etkiyi zayıflatmaktadır [29]. Sistemlerin bütünü ele alındığında yaz döneminde soğutma yüklerinin azaldığı, kış koşullarında ise etkinin sınırlı kaldığı veya değişiklik oluşturmadığı belirtilmektedir [7, 30]. Sonuç olarak, iklimsel ve ısıl performans; yüzey sıcaklığı ile sınırlı olmayan, mikroiklim, hava hareketi ve enerji dengesi ile birlikte ele alınması gereken bağlamsal bir performans alanı olarak değerlendirilmelidir.

Bitkisel Sistem Direnci; bir sistemin iklimsel baskılara karşı gösterdiği dayanıklılığı ve uzun vadeli hayatta kalma kapasitesini tanımlamayan temel bir performans bileşeni olup; bitki türü, yaprak yoğunluğu ve fizyolojik özelliklerle doğrudan ilişkilidir. Farklı iklim bölgelerinde yürütülen çalışmalar, bitki örtüsünün sağladığı ısıl katkı ve performans sürekliliğinin önemli ölçüde değiştiğini göstermektedir. Tropikal iklimlerde yoğun bitki örtüsüne sahip sistemlerde cephe yüzey sıcaklığında 4–12 °C aralığında azalma sağlanabildiği ve etkinin yaprak yoğunluğu ile örtü sürekliliğine bağlı olduğu belirtilirken [26], bitki türleri arasında bazı türlerin yaklaşık 6–7 °C, bazılarının ise 7 °C'nin üzerinde yüzey soğutma kapasitesine ulaştığı ve farkın morfolojik yapı ile evapotranspiratif özelliklerden kaynaklandığı ortaya konmaktadır [35]. Yüksek güneş ışınımına sahip sıcak iklimlerde etkinin artarak yüzey sıcaklığı düşüşlerinin 12–20 °C aralığına ulaşabildiği rapor edilirken [34, 36, 37], ılıman iklimlerde bitkisel performansın daha sınırlı kaldığı ve düşüşlerin yaklaşık 1.2–2.7 °C aralığında gerçekleştiği belirlenmiştir [28]. Akdeniz ikliminde yürütülen

saha çalışmalarında yaprak alan indeksi (LAI) değerlerinin 0.1–3.1, yüzey kaplama oranının ise %10–80 aralığında değiştiği ve bu parametrelerin doğrudan soğutma performansı ile ilişkili olduğu ortaya konmuştur [32]. Aynı çalışmada bitkisel aktivitenin mevsimsel değişim gösterdiği ve sistem performansında dalgalanmalara yol açtığı ifade edilmektedir [32]; bitki örtüsünün seyrekleştiği veya sağlığının bozulduğu durumlarda yüzey sıcaklığı düşüşlerinin belirgin biçimde azaldığı ve performansın zayıfladığı deneysel olarak gösterilmiştir [26]. Araştırmalar, kuraklığa dayanıklı türlerle tasarlanan yaşayan duvarlarda bitki kaybının %50'nin altında tutulabildiği bildirilmektedir [35]. Yapılan çalışmalar, yağış azalmasının beklendiği bölgelerde bitki türü seçiminin sistem performansı açısından belirleyici olduğunu göstermektedir [11, 12]. Sonuç olarak bitkisel sistem direnci, başlangıç koşullarına bağlı statik bir özellikten ziyade bitki gelişimi ve iklim koşullarına bağlı olarak zaman içinde değişen dinamik bir performans parametresi olarak değerlendirilmektedir [12].

Yapısal ve Mekanik Performans; yeşil cephe sistemlerinin rüzgâr, kar yükü ve öz ağırlıkları altında taşıyıcı yapı ile güvenli biçimde çalışabilme kapasitesini ifade etmekte; sistemler yalnızca bir kaplama katmanı değil, aynı zamanda hava akışıyla etkileşime girerek cephe üzerindeki yük koşullarını değiştiren bileşenler olarak değerlendirilmektedir [28, 38]. Bitkisel katman, cepheye ulaşan rüzgâr hızını düşürerek yüzey yakınındaki hava hareketini değiştirir; bu durum hem ısı alışverişini hem de rüzgârın cephe üzerindeki etkisini doğrudan etkilemektedir [28]. Rüzgâr tüneli deneyleri, bitki türüne göre rüzgâra karşı oluşan direncin değiştiğini ve rüzgâr hızı 30–35 m/s seviyesine çıktığında bu direncin en yüksek değerine ulaştığını göstermektedir [38]. Yapraklar rüzgâr yönüne göre konum değiştirdiği için cepheye etkiyen yükler zamanla değişir; bu durum sistem davranışının sabit olmadığını, çevresel koşullara bağlı olarak değiştiğini göstermektedir [38]. Sistem tipine bağlı olarak yapısal davranış değişmektedir; doğrudan cepheye tutunan sistemler, alt konstrüksiyonlu dolaylı sistemler ve modüler yaşayan duvarlar arasında hem kurgu hem de cephe ile etkileşim açısından önemli farklar bulunmaktadır [26, 28]. Çok katmanlı yaşayan duvarlarda bitki, substrat ve taşıyıcı katmanların birlikte oluşturduğu yapı cephe davranışını doğrudan etkilemektedir [28]. Bitkisel katman ile cephe arasındaki hava boşluğu da kritik bir parametre olup yaklaşık 40–60 mm aralığında daha dengeli bir davranış sağlanmakta ve rüzgâr etkileri daha iyi kontrol edilmektedir [28, 40]; daha geniş boşluklarda ise rüzgâr hızının artması performansı olumsuz etkileyebilmektedir [28]. Sonuç olarak yapısal ve mekanik performans, sistem tipi, bitki özellikleri ve cephe detaylarının birlikte değerlendirilmesini gerektiren çok bileşenli bir performans alanıdır.

Su Yönetimi ve Bakım Performansı; yeşil cephe sistemlerinin uzun dönemli işletilebilirliğini belirleyen temel bileşenlerdir. Yağmur suyu ile beslenen yaşayan duvar sistemleri, geleneksel sulama yöntemlerine kıyasla toplam su tüketimini %40–60 oranında azaltabilmektedir [11, 39]. Farklı iklim bölgelerinde gerçekleştirilen çalışmalar, su tüketimi ve sulama gereksinimlerinin belirgin biçimde iklime duyarlı olduğunu göstermektedir [26, 27, 32]. Tropikal iklimlerde yüksek sıcaklık ve nem koşullarına rağmen yoğun bitki örtüsü nedeniyle evapotranspirasyon kaynaklı su tüketimi artmakta ve sistemlerin sürekli sulama ile desteklenmesi gerekmektedir [26]. Akdeniz ikliminde uzun dönemli ölçümler, yaz aylarında evapotranspirasyonun 5–25 mm/gün aralığında, kış aylarında ise 1.5 mm/gün altına düştüğünü göstermekte ve mevsimsel su yönetimi stratejilerinin gerekliliğine işaret etmektedir [32]. Kurak ve yarı kurak bölgelerde sınırlı su kaynakları, düşük su tüketimli tür seçimi ve sulama verimliliğinin artırılmasını zorunlu kılarken, ılıman iklimlerde yağışlar sulama ihtiyacını kısmen azaltsa da düzensiz yağış rejimi kontrollü su yönetimini gerekli kılmaktadır [26, 27, 34]. Substratın su tutma kapasitesi ve sistem tipine bağlı olarak suyun depolanma ve buharlaşma davranışı değişmekte, bu durum sistemlerin iklimsel performansını doğrudan etkilemektedir [28]. Bakım süreçleri ile su yönetimi arasındaki ilişki, artan iklimsel değişkenlik koşullarında sistem performansının sürekliliği açısından kritik bir rol oynamaktadır [26, 27, 34]. Literatürde, yetersiz sulama ve düzensiz bakım durumlarında bitki örtüsünde seyrelme ve kuruma meydana geldiği, bunun gölgeleme ve evapotranspiratif soğutma etkisini doğrudan zayıflattığı belirtilmektedir [26, 34]. Kurak ve yarı kurak iklimlerde su stresine bağlı bitki kayıpları kısa sürede performans düşüşüne yol açarken [26, 34], ılıman ve okyanusal iklimlerde daha dengeli yağış rejimi bakım yükünü kısmen azaltmakta, ancak düzensiz

yağışlar ve ani sıcaklık artışları kontrollü bakım ve sulama stratejilerini gerekli kılmaktadır. Uzun dönemli saha çalışmaları, bakım ve su yönetiminin iklim koşullarına uyarlanmadığı durumlarda performansın zamanla azaldığını ve sistemler arası farkların belirginleştiğini göstermektedir [26, 27]. Sonuç olarak su yönetimi ve bakım performansı, teknik bir işletme konusu olmanın ötesinde, iklimsel değişkenliklere uyum sağlayan ve bitkisel sürekliliği güvence altına alan bütüncül bir performans parametresi olarak değerlendirilmelidir.

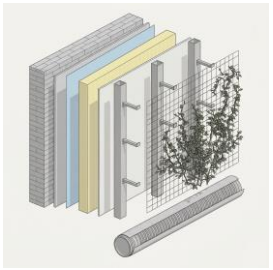
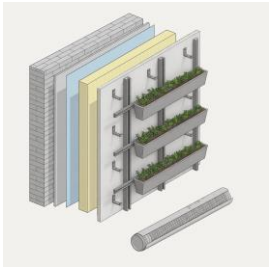
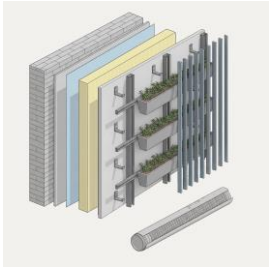
Enerji ve Karbon Performansı; dikey yeşil sistemlerin bina enerji tüketimine etkisi ve buna bağlı emisyon azaltım potansiyeli üzerinden değerlendirilmektedir; farklı iklimlerde yapılan çalışmalar, etkinin özellikle soğutma yüklerinde belirgin olduğunu göstermektedir. Akdeniz ikliminde yeşil cephelerin soğutma enerjisi talebini %9–11 oranında azalttığı [41], sıcak ve yüksek güneşlenmeli bölgelerde yaşayan duvarların bu oranı %19.7–24.9'a kadar çıkarabildiği belirlenmiştir [42]. Tropikal iklimlerde gölgeleme ve evapotranspirasyonun birleşimiyle soğutma enerjisi ihtiyacında önemli düşüşler sağlanmakta ve etkinin cephe yönelimi ile bitki yoğunluğuna bağlı olarak değiştiği ifade edilmektedir [26]. Ilıman ve okyanusal iklimlerde kazanımlar daha sınırlı kalmakla birlikte yaz döneminde yüzey sıcaklığındaki düşüşlere bağlı olarak soğutma ihtiyacında azalma gözlenmekte; İngiltere'de yapılan çalışmalarda, yüzey sıcaklığının 9–10 °C düşürülebildiği ve bunun iç mekân sıcaklıklarını etkileyerek mekanik soğutma ihtiyacını azalttığı; ancak düşük güneşlenme koşullarında etkinin süre ve şiddet açısından sınırlı olduğu belirtilmektedir [34]. Kurak ve yarı kurak iklimlerde yüksek sıcaklık farkları soğutma potansiyelini artırırken su kısıtı ve bitki sürekliliği performansın sürdürülebilirliğini doğrudan etkilemektedir [27]. Uzun dönemli saha çalışmalarında, yıllık enerji tüketiminde yaklaşık %8–9 oranında azalma sağlandığı ve bunun yaklaşık 9 ton CO_2 emisyonunun önlenmesine karşılık geldiği rapor edilmektedir; ancak karbon tutumu potansiyelinin oldukça sınırlı olduğu ve enerji tasarrufu kaynaklı emisyon azaltımına kıyasla ikincil düzeyde kaldığı belirtilmektedir [27, 43]. Sonuç olarak enerji ve karbon performansı; iklim, cephe yönelimi, sistem tipi ve bitki özelliklerine bağlı olarak değişmekte ve en yüksek kazanımlar sıcak ve yüksek güneşlenmeli koşullarda ortaya çıkmaktadır.

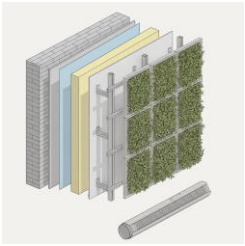
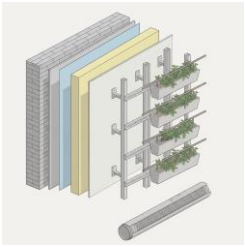
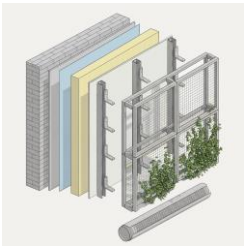
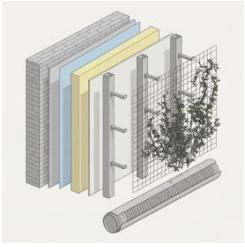
5. Bölgesel Yeşil Cephe Sistem Önerileri ve Tasarım Kararları

Türkiye'nin farklı iklim bölgeleri için öngörülen iklim değişikliği projeksiyonları ile yeşil cephe sistemlerinin performans ölçütleri birlikte ele alınarak bölgeye özgü sistem kararları geliştirilmiştir. Yeşil cephe sistemleri sınıflandırmasında tanımlanan alternatifler arasından, sıcaklık artışı, yağış rejimi değişimi, kuraklık, rüzgâr ve nemlilik gibi iklimsel baskılar doğrultusunda farklılaşan risk profilleri dikkate alınarak her bölge için uygun sistem seçilerek ilerlenmiştir. Bu iklim girdileri, iklimsel ve ısıl performans, su yönetimi ve bakım performansı, bitkisel sistem direnci, yapısal ve mekanik performans ile enerji ve karbon performansı ölçütleriyle ilişkilendirilerek sistem seçimini destekleyen tasarım girdileri olarak ele alınmıştır. Sınıflandırma bölümünde tanımlanan doğrudan, dolaylı ve yaşayan duvar sistemlerine ilişkin teknik avantaj ve sınırlılıklar, Tablo 2.'de yer alan bölgesel sistem tercihlerinin oluşturulmasında referans olarak alınmıştır.

Bu ilişkileri bütüncül ve karşılaştırılabilir biçimde sunmak amacıyla oluşturulan Tablo 2, her bölge için öne çıkan iklim kaynaklı ana riskleri, tasarımda kritik hâle gelen performans ölçütlerini ve bu ölçütlere karşılık önerilen yeşil cephe sistemlerini aynı çerçevede bir araya getirmektedir. Böylece tablo, iklim verileri ile sistem seçimi arasındaki ilişkiyi görünür kılar ve bölgesel sistem tercihlerini karşılaştırılabilir bir karar çerçevesinde sunar.

Tablo 2. RCP8.5 Koşullarında Türkiye'de Bölgesel İklim Risklerine Göre Yeşil Cephe Kesit Tipi Önerileri (İklim projeksiyonuna dayalı ana riskler Tablo 1 referans alınarak bölgesel karşılaştırma ile elde edilmiştir.)

Bölge	İklim Projeksiyonuna Dayalı Ana Riskler	Öncelikli Performans Ölçütleri	Önerilen Sistem(ler)	Seçim Gerekçesi	Katmanlar	Görsel
Marmara	Yüksek nem, yoğuşma riski, artan rüzgâr yükleri	Yapısal ve Mekanik Performans (rüzgâr yükü), Su Yönetimi (yoğuşma kontrolü)	Dolaylı yeşil cephe (kablo–tel)	Yüksek havalandırma kapasitesi ile nem birikimini azaltma ve rüzgâr yükleri altında daha öngörülebilir yapısal davranış	Dış duvar – Sıva - Su yalıtımı – Isı yalıtımı – Sıva – Taşıyıcı konstrüksiyon – Havalandırma boşluğu - Tel ağ – Tırmanıcı bitki – Drenaj borusu	
Ege	Ekstrem sıcaklık artışı, yağış azalması, kuraklık	İklimsel ve Isıl Performans (güneş ışınımı), Bitkisel Sistem Direnci	Yaşayan duvar (modüler saksılı)	Yüksek evapotranspiratif soğutma ve bitki sürekliliği ile yüzey sıcaklığını düşürme potansiyeli	Dış duvar – Sıva - Su yalıtımı – Isı yalıtımı – Sıva – Taşıyıcı konstrüksiyon – Havalandırma boşluğu – Damlama sulama – Saksı modülü – Drenaj borusu	
Akdeniz	Aşırı sıcaklık, ciddi yağış azalması, su stresi	İklimsel ve Isıl Performans, Su Yönetimi ve Bakım	Yaşayan duvar (modüler saksılı)	Kontrollü sulama ve su yönetimi ile yüksek ısıl performansı birlikte sağlayabilme potansiyeli	Dış duvar – Sıva - Su yalıtımı – Isı yalıtımı – Sıva – Taşıyıcı konstrüksiyon – Havalandırma boşluğu – Damlama sulama – Saksı modülü – Güneş kırıcı – Drenaj borusu	

Karadeniz	Aşırı yağış, yüksek nem, küf ve biyolojik bozulma riski	Su Yönetimi (drenaj), Yapısal Performans (nem etkisi)	Yaşayan duvar (mineral yünü)	Yüksek su tutma ve buhar geçirgenliği ile cephe nem dengesini stabilize edebilme	Dış duvar – Sıva - Su yalıtımı – Isı yalıtımı – Sıva – Taşıyıcı konstrüksiyon – Havalandırma boşluğu – Mineral yünü panel – Bitkisel katman – Drenaj borusu	
İç Anadolu	Kuraklık, ani don, yüksek sıcaklık farkları	Su Yönetimi, Bitkisel Sistem Direnci	Yaşayan duvar (modüler saksılı) / Dolaylı yeşil cephe	Sulama koşullarına bağlı olarak yüksek performans potansiyeli; altyapı sürekliliği yoksa düşük bakım ihtiyacı sunan alternatif sistem	Dış duvar – Sıva - Su yalıtımı – Isı yalıtımı – Sıva – Taşıyıcı konstrüksiyon – Havalandırma boşluğu – Damlama sulama – Saksı modülü – Drenaj borusu	
Doğu Anadolu	Don–çözülme, kar yükü, düşük sıcaklık	Yapısal ve Mekanik Performans (don etkisi), Bitkisel Direnç	Dolaylı yeşil cephe (modüler kafes)	Basit taşıyıcı sistem ile don ve kar yükleri altında daha dayanıklı ve düşük bakım gereksinimli yapı	Dış duvar – Sıva - Su yalıtımı – Isı yalıtımı – Sıva – Taşıyıcı konstrüksiyon – Havalandırma boşluğu - Kafes taşıyıcı sistem – Tırmanıcı bitki – Drenaj borusu	
Güneydoğu Anadolu	Ekstrem sıcaklık, kronik kuraklık, su kıtlığı	Su Yönetimi, Bitkisel Sistem Direnci, Isıl Performans	Dolaylı yeşil cephe (kablo–tel)	Düşük su ihtiyacı ve pasif çalışma prensibi ile kurak koşullarda daha sürdürülebilir işletme	Dış duvar – Sıva - Su yalıtımı – Isı yalıtımı – Sıva – Taşıyıcı konstrüksiyon – Havalandırma boşluğu - Tel ağ – Tırmanıcı bitki – Drenaj borusu	

Marmara Bölgesi'nde yüksek bağıl nem ve artan rüzgâr yükleri, cephe arkasında yoğuşma riski ile birlikte yapısal zorlanmaları öne çıkarmaktadır. Bölgesel projeksiyonlar ele alındığında öncelikli tasarım girdileri yapısal–mekanik güvenlik ve sürekli havalandırma olarak belirlenmiştir. Bu bağlamda, yüksek nem koşullarında hava hareketinin sınırlanmasının cephe arkasında ısı ve nem birikimine yol açabildiği, rüzgâr etkisinin ise bitkisel katman ve taşıyıcı sistem üzerinde değişken mekanik yükler oluşturduğu literatürde vurgulanmaktadır [28, 38]. Ayrıca, nemli ve rüzgâr etkisinin birlikte görüldüğü iklimlerde bitkisel katman ile cephe arasındaki hava boşluğunun ve havalandırma kapasitesinin mikroiklim ve sistem davranışı üzerinde belirleyici olduğu belirtilmektedir [28, 31]. Yaşayan duvar sistemleri ısıl açıdan yüksek performans sunabilse de, rüzgâr ve nem rejimi altında bağlantı detayları ve bakım sürekliliği açısından zayıf bir yapı göstermektedir. Bu tür sistemlerde çok katmanlı yapı ve yüksek nem tutma kapasitesi, özellikle yüksek bağıl nem koşullarında sistem ağırlığı ve bakım gereksinimlerini artırabilmektedir [26, 27, 28]. Bu nedenle Marmara koşulları için dolaylı taşıyıcılı kablo–tel yeşil cephe sistemlerinin tercih edilmesi önerilmektedir; söz konusu sistemler, rüzgâr yükleri ve bakım kısıtlarının baskın olduğu durumlarda daha kontrollü çözümler sunabilmekte ve geçirgen yapıları sayesinde hava akışını destekleyerek cephe arkasında daha dengeli bir mikroiklim oluşumuna katkı sağlayabilmektedir [28, 31].

Ege Bölgesi'nde yaz aylarında beklenen yüksek sıcaklık artışı ve belirgin yağış azalması, cephe tasarımında ısıl performans, bitkisel sistem direnci ve enerji verimliliğini birincil ölçütler hâline getirmektedir. Sıcak ve kurak koşullarda güneş ışınımı ve yüzey sıcaklıklarının artışı, bina kabuğu üzerinden gerçekleşen ısı kazançlarını artırmakta; bu durum gölgeleme ve evapotranspiratif soğutma mekanizmalarının önemini artırmaktadır [26, 34]. Koşullar göz önünde bulundurulduğunda, yüksek yaprak alan indeksine ve güçlü evapotranspiratif soğutma kapasitesine sahip ön üretimli modüler saksılı yaşayan duvar sistemleri, cephe yüzeylerinde gölgeleme ve mikroiklim düzenlemesine katkı sağlayabilme potansiyeli doğrultusunda uygun çözümler arasında değerlendirilmektedir.Literatürde, yüksek bitki yoğunluğu ve sürekli sulama ile desteklenen yaşayan duvar sistemlerinin, özellikle yüksek güneş ışınımı altında yüzey sıcaklıklarını belirgin ölçüde düşürdüğü ve mikroiklim üzerinde daha güçlü bir düzenleyici etki oluşturduğu belirtilmektedir [26, 27]. Bu yaklaşım, yaşayan duvarların yüksek ısıl ve mikroiklim performansı üretme potansiyeline dayanarak tercih edilmesini önermektedir.

Akdeniz Bölgesi'nde hem sıcaklık artışı hem de yağış azalması daha kritik düzeylere ulaşmaktadır. Bölgede artan güneş ışınımı ve su stresi, cephe sistemlerinde hem ısıl performansın hem de su yönetiminin birlikte ele alınmasını zorunlu kılmaktadır [26, 27, 32]. Bölgenin gereksinimleri nedeniyle ısıl performans, su yönetimi, bitkisel süreklilik ve enerji performansının birlikte optimize edilmesi sistem sürekliliği açısından belirleyicidir. Literatürde, sıcak ve kurak iklimlerde evapotranspirasyonun yüksek değerlere ulaşması (5–25 mm/gün) nedeniyle sulama stratejilerinin sistem performansını doğrudan etkilediği ve bitkisel süreklilik üzerinde belirleyici olduğu belirtilmektedir [32]. Yağmur suyu hasadı ve kontrollü sulama ile desteklenen modüler saksılı yaşayan duvar sistemleri, bu gereksinimleri birlikte karşılayabilme potansiyeli doğrultusunda uygun çözümler arasında değerlendirilmektedir. Ayrıca, yüksek bitki yoğunluğu ve substrat varlığı sayesinde yaşayan duvar sistemlerinin yüzey sıcaklıklarını düşürme ve mikroiklim düzenleme kapasitesinin sıcak iklimlerde daha belirgin hale geldiği ifade edilmektedir [26, 27]. Ön üretimli sistemlerin altyapı sürekliliğini sağlayabilme potansiyeli, kuraklık baskısının arttığı bölgelerde tercih edilme gerekçelerinden biri olarak değerlendirilmektedir.

Karadeniz Bölgesi'nin aşırı yağışlı karakteri ve sürekli yüksek seyreden bağıl nem oranları, yeşil cephelerin temel işlevsel odağını soğutma etkisinden ziyade nem ve su yönetimi stratejilerine kaydırmaktadır. Literatürde, yüksek bağıl nem ve düşük buharlaşma kapasitesine sahip mikroklimalarda cephe yüzeyinde nem birikiminin arttığı, bu durumun yapı kabuğu performansı üzerinde belirleyici bir rol oynadığı vurgulanmaktadır [28, 31]. Yaşayan duvar sistemlerinde kullanılan substratın su tutma ve drenaj kabiliyetinin sistem başarısını doğrudan etkilediği, bu teknik özelliklerin özellikle yüksek nem koşullarında kritik bir önem kazandığı belirtilmektedir [26, 27, 28]. Bu bağlamda, yüksek su tutma kapasitesi ve buhar

geçirgenliği sunan mineral yünü tabanlı yaşayan duvar sistemleri, cephe yüzeyindeki nem dengesine katkı sağlayarak küf ve biyolojik bozulma riskinin azaltılmasına yönelik uygun bir seçenek olarak değerlendirilmektedir. Nitekim yaşayan duvar sistemlerinin, bünyesindeki suyun depolanması ve kontrollü buharlaşma mekanizmaları aracılığıyla cephe yüzeyinde daha dengeli bir nem rejimi tesis edebildiği ifade edilmektedir [28]. Söz konusu bu tercih, mineral yünü katmanlı sistemlerin nem stabilizasyonu sağlayan özgün yetişme ortamı özellikleriyle doğrudan ilişkilidir.

İç Anadolu Bölgesi'nde artan sıcaklık dalgaları, belirgin kuraklık ve ani don olayları eş zamanlı olarak gözlemlenmektedir. Bu tür yarı kurak ve kıtasal iklim koşullarında ortaya çıkan yüksek sıcaklık farkları ile su kısıtı, hem bitkisel süreklilik hem de sistem performansı üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır [26, 27, 32]. Söz konusu karmaşık iklim rejimi; su yönetimini, bitkisel direnci ve ısıl performansı kritik bir boyuta taşımaktadır. Literatürde, su stresinin ve aşırı sıcaklık dalgalanmalarının bitki sağlığı ile sistem etkinliği üzerinde doğrudan etkili olduğu, bitkisel yoğunluk ve sürekliliğin azalmasının ise yüzey sıcaklığı düşüşünü kısıtladığı ifade edilmektedir [26, 34]. Don riski ve drenaj güvenliği sağlandığı koşullarda, modüler saksılı yaşayan duvar sistemlerinin bölge özelinde yüksek performans sunma potansiyeline sahip olduğu değerlendirilmektedir; ancak teknik altyapı sürekliliğinin sağlanamadığı durumlarda dolaylı yeşil cephe sistemleri daha güvenli bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. Bu yaklaşım, yaşayan duvar sistemlerinin sunduğu yüksek ısıl performans potansiyeline karşın su ve bakım gereksinimlerine olan hassasiyetinden, dolaylı sistemlerin ise daha düşük bakım ihtiyacı ve öngörülebilir yapısal davranış sergilemesinden kaynaklanmaktadır [27, 28].

Doğu Anadolu Bölgesi'nde don–çözülme döngüleri ve kar yükleri, mekanik güvenliği ve sistem sürekliliğini birincil ölçüt haline getirmektedir. Düşük sıcaklık koşulları ile tekrarlayan don–çözülme etkileri, cephe sistemlerinde malzeme davranışı ve bağlantı detayları üzerinde belirleyici olmakta, bu durum sistem performansının sürdürülebilirliğini doğrudan etkilemektedir. Rüzgâr ve kar yüklerinin eş zamanlı etkili olduğu soğuk iklim koşullarında, bitkisel katman ile taşıyıcı sistem üzerindeki yüklerin değişkenlik göstererek sistem davranışını karmaşıklaştırdığı belirtilmektedir [38]. Gelecek dönem projeksiyonları dikkate alındığında, aktif sulama ve karmaşık altyapı gerektiren yaşayan duvar sistemlerinin bu bölgede daha yüksek arıza riski taşıyabileceği değerlendirilmektedir; bu nedenle daha dayanıklı bir çözüm olarak dolaylı taşıyıcılı modüler kafes yeşil cephe sistemlerinin tercih edilmesi önerilmektedir. Bu seçim, yaşayan duvarların çok katmanlı yapısı ve yoğun bakım gereksinimlerinin sistem sürekliliğini riske atabilmesi, dolaylı sistemlerin ise yalın taşıyıcı kurguları sayesinde mekanik açıdan daha öngörülebilir davranış sergilemesi ile ilişkilendirilerek literatür ışığında temellendirilmektedir. Dolaylı sistemlerin yapısal olarak ana kütleden ayrışan taşıyıcı kurgusu, yoğun kar yükü ve don etkileri altında teknik açıdan daha uygun bir alternatif olarak değerlendirilmektedir.

Güneydoğu Anadolu Bölgesi'ndeki ekstrem sıcaklık artışı ve kronik su kıtlığı, aktif sulamaya bağımlı sistemlerin uzun dönemli işletilebilirliğini kısıtlamaktadır. Kurak ve yarı kurak iklim koşullarında suyun sınırlı olması, bitkisel sistemlerin sürekliliğini doğrudan etkileyen temel bir parametre olarak öne çıkmakta; evapotranspirasyonun yüksek olduğu bu bölgelerde sulama gereksinimi sistem performansını belirleyici hale getirmektedir [26, 27, 32]. Bölgedeki temel hedef maksimum soğutma etkisinden ziyade, kısıtlı kaynaklar altında performans sürekliliğinin sağlanmasıdır. Literatürde, su stresine bağlı olarak bitki örtüsünde seyrelme ve performans kaybı oluşabildiği, bu durumun özellikle yüksek sıcaklık koşullarında sistem etkinliğini sınırlandırdığı ifade edilmektedir [26, 34]. Düşük sulama gereksinimi ile öne çıkan dolaylı kablo–tel taşıyıcılı yeşil cephe sistemleri, bu iklim koşullarında daha yönetilebilir ve iklime uyumlu bir seçenek olarak değerlendirilmektedir. Bu tercih, dolaylı sistemlerin daha düşük bakım ve altyapı gereksinimi ile daha öngörülebilir bir işletme süreci sunmasıyla ilişkilendirilmektedir [27, 28, 32].

Her bölge için önerilen sistemler, RCP8.5 senaryosu altında öngörülen uzun dönemli iklim baskıları dikkate alınarak operasyonel sürdürülebilirliği destekleyecek biçimde kurgulanmış; tercihler yalnızca ısıl

performans değil, su yönetimi, bitkisel süreklilik, yapısal güvenlik ve bakım gereksinimlerinin birlikte değerlendirilmesi doğrultusunda belirlenmiştir. Bu çalışma kapsamında, literatürde yaygın olarak incelenen keçe tabanlı yaşayan duvar sistemleri öneri sistemleri arasında yer almamıştır; bu tercih, söz konusu sistemlerin yüksek su tüketimi, sürekli bakım ihtiyacı ve karmaşık altyapı gereksinimleri nedeniyle kuraklık, don–çözülme döngüleri ve yüksek nem gibi iklim baskıları altında operasyonel süreklilik açısından daha yüksek riskler barındırabileceğine yönelik değerlendirmelere dayanmaktadır [12, 15, 34]. Buna karşılık, modüler saksılı yaşayan duvar sistemleri ve dolaylı yeşil cephe çözümleri, daha kontrollü su yönetimi, daha öngörülebilir yapısal davranış ve daha düşük bakım gereksinimi gibi özellikleri doğrultusunda farklı iklim koşullarına daha uyarlanabilir seçenekler arasında değerlendirilmektedir [12, 15, 30].

Bu çerçevede önerilen yeşil cephe çözümleri, estetik veya sembolik yaklaşımlar yerine, ölçülebilir ısıl, hidrolik, biyolojik ve yapısal performanslara dayalı iklim uyumlu yapı kabuğu stratejileri olarak ele alınmaktadır.

6. SONUÇ

Çalışma kapsamında Türkiye'nin farklı iklim bölgeleri için IPCC RCP8.5 senaryosu altında öngörülen iklim değişikliği projeksiyonları, yeşil cephe sistemlerinin performans ölçütleri ile birlikte değerlendirilerek bölgeye özgü sistem kararları geliştirilmiştir. İklim verilerinin mimari tasarım girdisine dönüştürülmesi amacıyla kurgulanan "risk → performans ölçütü → sistem seçimi" çerçevesi, iklim değişikliğinin yapı kabuğu üzerindeki etkilerini nicel ve nitel boyutlarıyla birlikte ele alan bütüncül bir karar çerçevesi sunmaktadır. Bu yönüyle çalışma, Türkiye ölçeğinde iklim projeksiyonlarını doğrudan yeşil cephe sistem seçimi ile ilişkilendiren sınırlı sayıdaki çalışmaya metodolojik bir katkı sunmayı amaçlamaktadır.

Elde edilen bulgular, yeşil cephe sistemlerinin tek tip çözümler olarak ele alınamayacağını, bölgesel iklim rejimlerine bağlı olarak farklı performans öncelikleri üzerinden değerlendirilmesi gerektiğini açık biçimde göstermektedir. Yüksek nem ve rüzgâr yüklerinin baskın olduğu Marmara ve Karadeniz bölgelerinde yapısal–mekanik güvenlik ile su yönetimi öne çıkarken, aşırı sıcaklık artışı ve kuraklık baskısının belirleyici olduğu Ege, Akdeniz ve Güneydoğu Anadolu'da ısıl performans, bitkisel sistem direnci ve su verimliliği öncelikli hâle gelmektedir. Doğu Anadolu ve İç Anadolu gibi don–çözülme döngülerinin ve termal gerilmelerin belirgin olduğu bölgelerde ise sistem sürekliliği ve bakım gereksinimleri, ısıl performansın önüne geçmektedir. Bu farklılaşma, performans ölçütlerinin iklimsel bağlama duyarlı olarak ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Geliştirilen bölgesel sistem önerileri, iklim projeksiyonlarının doğrudan yapı kabuğu tasarımına aktarılmasını sağlayan bir karar çerçevesi sunmaktadır. Bu yaklaşım, yeşil cepheleri yalnızca estetik ya da sembolik sürdürülebilirlik öğeleri olarak değil, ısıl, hidrolik, biyolojik ve yapısal performansları üzerinden değerlendirilen aktif iklim uyum bileşenleri olarak ele almaya imkân vermektedir. Özellikle RCP8.5 gibi yüksek riskli senaryolar altında, bu tür performans temelli ve bölgesel olarak farklılaştırılmış çözümlerin bina ölçeğinde iklim değişikliğine uyum açısından kritik önem taşıdığı görülmektedir.

Çalışma kapsamında geliştirilen karar modeli, literatür temelli bulguların sistematik sentezine dayanmakta ve iklim projeksiyonlarının tasarım kararlarına aktarılmasını kavramsal düzeyde ele almaktadır. Modelin farklı iklim bölgelerinde nicel performans çıktılarıyla test edilmesi, önerilen sistemlerin bağlamsal geçerliliğinin değerlendirilmesi açısından önem taşımaktadır. Bu doğrultuda, gelecekte yapılacak çalışmalarda sistemlerin enerji simülasyonları, mikroiklim ölçümleri ve yaşam döngüsü analizleriyle desteklenmesi; ayrıca bitki türü, cephe yönelimi ve sistem detaylarının performans üzerindeki etkilerinin parametrik olarak incelenmesi önerilmektedir. Gelecekte yürütülecek çalışmalar, geliştirilen yaklaşımın

uygulama ölçeğinde doğrulanmasına ve farklı iklimsel bağlamlara uyarlanabilirliğinin güçlendirilmesine katkı sağlayacaktır.

Sonuç olarak, Türkiye'nin iklimsel çeşitliliği içinde yeşil cephe tasarımının tek tip yaklaşımlar yerine risk temelli, performans odaklı ve bölgesel olarak uyarlanmış bir çerçeve içinde ele alınması gerektiği ortaya konmaktadır. Önerilen karar modeli, hem yeni yapılarda hem de mevcut yapıların iklim uyumlu dönüşümünde kullanılabilecek sistematik bir tasarım yaklaşımı sunmakta; aynı zamanda ileri düzey nicel analizlere temel oluşturabilecek bir çerçeve sağlamaktadır.

Kaynakça

1. Seto, K. C., Dhakal, S., Bigio, A., Blanco, H., Delgado, G. C., Dewar, D., Huang, L., Inaba, A., Kansal, A., Lwasa, S., McMahon, J., Müller, D. B., Murakami, J., Nagendra, H., & Ramaswami, A. (2014). *Human settlements, infrastructure and spatial planning*. In O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel & J. C. Minx (Eds.), *Climate change 2014: Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (ss. 923–1000). Cambridge University Press.

2. UN-Habitat. (2011). *Hot cities: Battle-ground for climate change*. United Nations Human Settlements Programme.

3. United Nations Environment Programme, & Global Alliance for Buildings and Construction. (2025). Global status report for buildings and construction 2024/2025. https://www.unep.org/resources/report/global-status-report-buildings-and-construction-2024-2025

4. Ibn-Mohammed, T., Greenough, R., Taylor, S., Ozawa-Meida, L., & Acquaye, A. (2013). *Operational vs. embodied emissions in buildings: A review of current trends*. Energy and Buildings, 66, 232–245. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.026

5. Pacini, A., Edelmann, H. G., Großschedl, J., & Schlüter, K. (2022). A Literature Review on Facade Greening: How Research Findings May Be Used to Promote Sustainability and Climate Literacy in School. Sustainability, 14(8), 4596. https://doi.org/10.3390/su14084596

6. Ottelé, M. (2011). *The green building envelope: Vertical greening* (Doktora tezi). Delft University of Technology.

7. Beşir, A. B., & Cüce, E. (2018). Green roofs and facades: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 915–939.

8. Perini, K., & Rosasco, P. (2013). Cost-benefit analysis for green façades and living wall systems. *Building and Environment*, 70, 110–121. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.08.012

9. Sarıkeçe, C. (2021). *Bina cephesine entegre düşey yeşil sistemlerin yaya kotundaki rüzgâr konforuna etkisinin incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi.

10. Erdoğdu, E. (2014). *Düşey yeşil sistemlerin enerji etkinliklerinin değerlendirilmesi* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi.

11. Uyar, G. D. (2018). *Dikey yeşil sistemler ve uygulama örnekleri* (Yüksek lisans tezi). Anadolu Üniversitesi.

12. Ottelé, M., Perini, K., Fraaij, A. L. A., Haas, E. M., & Raiteri, R. (2011). Comparative life cycle analysis for green façades and living wall systems. *Energy and Buildings*, 43(12), 3419–3429. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.010

13. Ottelé, M., & Perini, K. (2017). Comparative experimental approach to investigate the thermal behaviour of vertical greened façades of buildings. *Ecological Engineering*, 108, 152–161. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.08.016

14. Mir, A. (2011). *Green facades and building structures* (Yüksek lisans tezi). Delft University of Technology.

15. Manso, M., & Castro-Gomes, J. (2015). Green wall systems: A review of their characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 863–871. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.203

16. Sayman, R. Ü., Baş, D., Tuğaç, Ç., Kavak, K., Bitlis, M., & Ergün, K. (Ed.). (2023). *A'dan Z'ye iklim değişikliği başucu rehberi* (3. bs.). İklim ve Çevre Merkezi.

17. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2024). *İklim değişikliği azaltım stratejisi ve eylem planı (2024–2030)*. https://iklim.gov.tr/eylem-planlari-i-19

18. Şensoy, S., Demircan, M., Ulupınar, Y., & Balta, İ. (2016.). *Türkiye iklimi*. Meteoroloji Genel Müdürlüğü. https://www.mgm.gov.tr/files/genel/makale/13_turkiye_iklimi.pdf

19. Republic of Türkiye, Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change. (2023). *Eighth national communication and fifth biennial report of Türkiye under the UNFCCC*. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/8NC-5BR%20T%C3%BCrkiye.pdf

20. Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (2025). *2024 yılı iklim değerlendirmesi*. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. https://mgm.gov.tr/FILES/iklim/yillikiklim/2024-iklim-raporu.pdf

21. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2018). *Türkiye'nin 7. ulusal bildirimi*. https://iklim.gov.tr/ulusal-bildirimler-i-21

22. Çamalan, G., & Çetin, S. (2022). Türkiye kuraklık projeksiyonları. In V. M. Coşkun, H. Doğan & H. Eroğlu (Eds.), *Çevre ve meteoroloji* (ss. 97–137). Sonçağ Yayıncılık.

23. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/

24. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *Climate change 2023: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/

25. Azkorra-Larrinaga, Z., Erkoreka-Gonzalez, A., Martin-Escudero, K., Pérez-Iribarren, E. ve Romero-Anton, N. (2023). Thermal characterization of a modular living wall for improved energy performance in buildings. *Building and Environment, 234*, 110102. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110102

26. Wong, N. H., Tan, A. Y. K., Yu, C., Sekar, K., Tan, P. Y., Chan, D., Chiang, K. ve Wong, N. C. (2010). Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls. *Building and Environment, 45*(3), 663–672. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.08.005

27. Zuckerman, N. ve Lensky, I. M. (2023). Thermal performance of vertical greenery systems (VGS) in a street canyon: A real-scale long-term experiment. *Building and Environment, 244*, 110775. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110775

28. Perini, K., Ottelé, M., Haas, E. M. ve Raiteri, R. (2011). Vertical greening systems and the effect on air flow and temperature on the building envelope. *Building and Environment, 46*(11), 2287–2294. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.05.009

29. Perini, K. ve Magliocco, A. (2014). Effects of vegetation, urban density, building height, and atmospheric conditions on local temperatures and thermal comfort. *Urban Forestry & Urban Greening, 13*(3), 495–506. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2014.03.009

30. Coma, J., Pérez, G., de Gracia, A., Burés, S., Urrestarazu, M. ve Cabeza, L. F. (2017). Vertical greenery systems for energy savings in buildings: A comparative study between green walls and green facades. *Building and Environment, 111*, 228–237. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.014

31. Susorova, I., Azimi, P. ve Stephens, B. S. (2014). The effects of climbing vegetation on the local microclimate, thermal performance, and air infiltration of four building facade orientations. *Building and Environment, 76*, 113–124. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.03.011

32. Bakhshoodeh, R., Ocampo, C. J. ve Oldham, C. E. (2023). Impact of ambient air temperature, orientation, and plant status on the thermal performance of green façades. *Energy and Buildings, 296*, 113389. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113389

33. Lee, L. S. H. ve Jim, C. Y. (2017). Subtropical summer thermal effects of wirerope climber green walls with different air-gap depths. *Building and Environment, 126*, 1–12. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.09.021

34. Cameron, R. W. F., Taylor, J. E. ve Emmett, M. R. (2014). What's "cool" in the world of green façades? How plant choice influences the cooling properties of green walls. *Building and Environment, 73*, 198–207. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.12.005

35. Köhler, M. (2008). Urban ecosystems, green façades: A view back and some visions. *Urban Ecosystems, 11*, 423–436. https://doi.org/10.1007/s11252-008-0063-0

36. Mazzali, U., Peron, F., Romagnoni, P. ve Pulselli, R. M. (2013). Experimental investigation on the energy performance of living walls in a temperate climate. *Building and Environment, 64*, 57–66. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.03.005

37. Pérez, G., Rincón, L., Vila, A., González, J. M. ve Cabeza, L. F. (2011). Behaviour of green facades in Mediterranean continental climate. *Energy Conversion and Management, 52*, 1861–1867. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.11.008

38. Arnold, K., Gosztonyi, S. ve Luible, A. (2021). Wind forces in overgrown rope façades. *Journal of Facade Design and Engineering, 9*(2), 95–118. https://doi.org/10.7480/jfde.2021.2.4833

39. United Nations Environment Programme (UNEP). (2014). *Green infrastructure guide for water management*. United Nations Environment Programme.

40. Ascione, F., Bianco, N., De Masi, R. F., Mauro, G. M. ve Vanoli, G. P. (2020). Green walls in buildings: A review of state of the art. *Energy and Buildings, 214*, 109891. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109891

41. Bano, P. ve Dervishi, S. (2021). The impact of vertical vegetation on thermal performance of high-rise office building facades in Mediterranean climate. *Energy and Buildings, 236*, 110761. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110761

42. García, M., Vera, S., Rouault, F., Gironás, J. ve Bustamante, W. (2022). Cooling potential of greenery systems for a stand-alone retail building under semiarid and humid subtropical climates. *Energy and Buildings, 259*, 111897. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111897

43. Anderson, V. ve Gough, W. A. (2021). Harnessing the four horsemen of climate change: A framework for deep resilience, decarbonization, and planetary health in Ontario, Canada. *Sustainability, 13*(1), 1–19. https://doi.org/10.3390/su13010379