

# SOĞUK İKLİM BÖLGELERİNDE DIŞ MEKÂN TERMAL KONFORUNUN MİKROİKLİM TABANLI DEĞERLENDİRİLMESİ: Hilalkent TOKİ örneği

Gizem DEDEOĞLU<sup>1</sup>, Sevgi YILMAZ<sup>2</sup>

## Araştırma Makalesi

### Yazar Bilgileri

<sup>1</sup> Atatürk Üniversitesi, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Peyzaj Mimarlığı Bölümü, Erzurum, Türkiye  
gizemulgur2525@gmail.com  
ID 0009-0004-5059-5281  
Sorumlu Yazar

<sup>2</sup> Atatürk Üniversitesi, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Peyzaj Mimarlığı Bölümü, Erzurum, Türkiye  
sevgyi@atauni.edu.tr  
ID 0000-0001-7668-5788

Bu çalışma Gizem Dedeoğlu'nun Atatürk Üniversitesi FBE Mimarlık ABD Lisansüstü Programında Prof. Dr. Sevgi Yılmaz danışmanlığında devam eden "Yeni Yerleşim Alanlarında Mikro İklima Duyarlı Mekânsal Senaryoların ENVI-Met ile Analizi" başlıklı yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

Geliş: 22.01.2026

Kabul: 14.05.2026

DOI: 10.71298/maddergi.1869895

### Atıf için:

Dedeoğlu, G. & Yılmaz, S. (2026). Soğuk iklim bölgelerinde dış mekân termal konforunun mikroiklim tabanlı değerlendirilmesi: Hilalkent TOKİ örneği, *Mekansal Araştırmalar Dergisi*, 4(1):76-95. <https://doi.org/10.71298/maddergi.1869895>

### Özet

Bu çalışmada, Erzurum Hilalkent TOKİ yerleşim alanı için geliştirilen bir mevcut beş farklı kentsel tasarım senaryosu, ENVI-met simülasyonları kullanılarak yaz ve kış dönemleri için karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Dış mekân termal konforu; Fizyolojik Eşdeğer Sıcaklık (PET) başta olmak üzere hava sıcaklığı, rüzgâr hızı ve bağıl nem parametreleri üzerinden analiz edilmiştir. Yaz dönemi sonuçları, senaryolar arasındaki farkların belirginleştiğini ve özellikle ağaç yoğunluğunun termal konfor üzerinde belirleyici bir rol oynadığını göstermiştir. %30 ağaç artışı içeren senaryo, gölgeleme ve evapotranspirasyon etkileri sayesinde en düşük PET değerlerini üretmiş ve ısı stresini anlamlı biçimde azaltmıştır. Buna karşılık, su yüzeyi, toprak zemin ve yeşil çatı uygulamaları yaz döneminde sınırlı iyileşme sağlamıştır. Kış döneminde ise tüm senaryolarda düşük hava sıcaklıklarına bağlı olarak soğuk stres koşullarının hâkim olduğu belirlenmiştir. Su yüzeyi içeren senaryolar, artan bağıl nem nedeniyle kış döneminde olumsuz bir etki göstermiştir. Yaz ve kış dönemleri birlikte değerlendirildiğinde, %30 bitki oranına sahip senaryo, yıl boyu dengeli ve sürdürülebilir dış mekân termal konfor koşullarını sunan senaryo olarak öne çıkmıştır. Çalışma sonuçları, soğuk iklim kentlerinde kentsel tasarım kararlarının mevsime duyarlı, ağaçlandırma ağırlıklı ve mikro iklim temelli yaklaşımlar doğrultusunda ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** ENVI-met 5.6.1, vejetasyon, toplu konut bahçesi, Fizyolojik Eşdeğer Sıcaklık (FES)

## MICROCLIMATE-BASED EVALUATION OF OUTDOOR THERMAL COMFORT IN COLD CLIMATE REGIONS: The Case of Hilalkent TOKİ

### Abstract

This study comparatively evaluates the existing and five different urban design scenarios developed for the Hilalkent TOKİ housing area in Erzurum, using ENVI-met simulations for both summer and winter periods. Outdoor thermal comfort was analyzed primarily through Physiological Equivalent Temperature (PET), along with air temperature, wind speed, and relative humidity parameters. The summer simulation results revealed pronounced differences among the scenarios, highlighting tree density as a key determinant of thermal comfort. The scenario incorporating a 30% increase in tree coverage produced the lowest PET values due to enhanced shading and evapotranspiration effects, thereby significantly reducing heat stress. In contrast, scenarios including water surfaces, bare soil, and green roof applications provided only limited improvements in thermal comfort during the summer period. During the winter period, all scenarios were characterized by cold stress conditions resulting from low air temperatures. Scenarios incorporating water surfaces exhibited adverse effects in winter due to increased relative humidity levels. When both summer and winter periods were evaluated together, the scenario with a 30% vegetation increase emerged as balanced and sustainable option, offering improved outdoor thermal comfort conditions throughout the year. The findings of this study indicate that urban design strategies in cold-climate cities should be developed based on season-sensitive, tree-oriented, and microclimate-based approaches.

**Keywords:** ENVI-met 5.6.1, vegetation, residential garden, Physiologically Equivalent Temperature (PET)

## 1. GİRİŞ

Küresel iklim değişikliği kriziyle birlikte planlama ve kent iklimi arasındaki etkileşim önem kazanmıştır. Doğayı dikkate almayan alan planlaması, kentsel ısı adası (KIA) etkisi, daha fazla enerji tüketimi, hava kirliliği, ekonomik zararlar, geçirimsiz yüzey artışı, doğal felaketler, yeşil alanların azalması gibi olaylar canlıların yaşam alanlarında standartların düşmesine yol açmaktadır. Birleşmiş Milletler verilerine göre, günümüzde dünya nüfusunun %55'i kentlerde yaşamakta olup, 2050'de bu oranın yaklaşık %70'in üzerine çıkmasının beklendiği ifade edilmiştir (UN, 2018; Rajagopalan, 2020; Nath vd., 2021).

Güncel bilimsel değerlendirmeler, insan faaliyetlerine bağlı olarak küresel ortalama sıcaklıkların sanayi öncesi dönem olan 1850–1900'e kıyasla belirgin şekilde arttığını göstermektedir. IPCC'nin Altıncı Değerlendirme Raporu'na (AR6) göre dünya, son ölçümlere dayanarak yaklaşık 1.1–1.2 °C daha sıcaktır (IPCC, 2023). Bu artışın özellikle son yirmi yılda hızlandığı ve kentleşmenin bu ivmeyi artıran başlıca etkenlerden biri olduğu vurgulanmaktadır. Aynı rapor, küresel ısınmayı 1.5 °C eşliğinin altında tutma hedefinin hâlâ geçerli olduğunu, ancak mevcut eğilimlerin bu hedefi giderek daha zor hale getirdiğini ortaya koymaktadır. WMO'nun 2023 iklim değerlendirmesi son yılların kayıtlar arasındaki en sıcak dönem olduğunu doğrularak bu bulguları desteklemektedir (WMO, 2024).

Kentsel alanlarda termal konforun iyileştirilmesine yönelik çalışmalar son yıllarda artmış; özellikle ENVI-met tabanlı mikroiklim simülasyonları yaygın biçimde kullanılmaya başlanmıştır. Güncel araştırmalar, bitkilendirme, zemin kaplaması ve geçirimsiz yüzeylerin azaltılmasının hava sıcaklığı, yüzey sıcaklığı ve Fizyolojik Eşdeğer Sıcaklık (PET) üzerinde doğrudan etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Örneğin Ye vd. (2025), kampüs avlusunda yaptıkları ENVI-met simülasyonlarında "ağaç+çim" senaryosunun en yüksek serinletici etkiyi sağladığını ortaya koymuştur. Benzer şekilde Eingrüber vd. (2025), geçirimsiz yüzeylerin çim ızgara sistemleriyle dönüştürülmesinin yüzey sıcaklığını azaltabildiğini bildirmiştir. Qin ve Zhou (2025) ise bitki konfigürasyonlarının mevsimsel konforun sağlanmasında kritik rol oynadığını vurgulamıştır. Bu bulgular, peyzaj temelli tasarım stratejilerinin hem yaz sıcaklık stresini azaltmada hem de yıl boyunca konfor koşullarını iyileştirmede etkili olduğunu göstermektedir. Özetle, kentsel mekânlarda termal konforun iyileştirilmesine yönelik çalışmalarda ENVI-met gibi gelişmiş mikro iklim modelleme araçlarının kullanımı giderek artmakta; bu sayede peyzaj, yeşil altyapı ve zemin malzemeleri gibi tasarım değişkenlerinin termal etkileri nicel olarak değerlendirilebilmektedir (Tablo 1). Bu yaklaşım hem sıcak hem de soğuk–karasal iklime sahip kentlerde dış mekân tasarımına yönelik bilimsel ve kanıta dayalı karar süreçlerini güçlendirmektedir. Literatür incelemesi, mikro iklim temelli çalışmaların büyük çoğunluğunun sıcak iklim bölgelerine ve yaz dönemi koşullarına odaklandığını göstermektedir (Roy vd., 2025). Buna karşın, soğuk iklim bölgelerinde kış aylarında dış mekân kullanımını destekleyen termal konfor stratejilerine yönelik çalışmalar sınırlı düzeydedir. Bu çalışma, yıl boyu mikro iklim verileri ve kış odaklı senaryo analizleri kullanarak söz konusu boşluğu doldurmayı hedeflemekte; soğuk iklim koşullarında doğa temelli ve iklime duyarlı kentsel tasarım yaklaşımlarının önemini vurgulayarak literatüre özgün bir katkı sunmaktadır.

**Tablo 1.** Dış mekân termal konfor çalışmalarında ENVI-met yazılımı kullanılan araştırmalar (Yazarlar tarafından üretilmiştir).

Kaynakça	Çalışma Konusu	Çalışma Yeri	Çalışmanın Sonuçları
Abdi vd., 2020	Ağaçların Etkisi	Tebriz	Konut dokusu etrafında farklı tasarımlarda ağaçlandırmanın serinletme etkisi görülmüştür.
Lee vd., 2016	Ağaç, Çalı ve Farklı Zemin Etkisi	Freiburg	Ağaçların, özellikle güneş radyasyonunu gölgelendirerek ısı stresini önemli ölçüde azalttığı gösterilmiştir.
Yücekaya vd., 2022	Suyun İklimsel Etkisi	Nevşehir	Su kullanımının peyzaj tasarımlarında mikroklimatik açıdan olumlu etkileri olduğu belirlenmiştir.
Sert, 2022	Yüzey Malzemesi Seçimi ve Yeşil Alan Miktarının Etkileri	Çukurova	Yüzey malzemesi seçimi ve yeşil alan miktarının artırılmasının sıcaklık artışını azaltmaya olan etkisi belirlenmiştir.
Salata vd., 2016	Yeşil Alan Artışının ve Farklı Zeminlerin Etkisi	Roma	Serin çatılar, kaldırımlar ve bitkilendirmenin birlikte uygulanmasının termal konforu önemli ölçüde iyileştirebileceği belirlenmiştir.
Morakinyo vd., 2017	Farklı Ağaç Türlerinin ve Kentlerde Bina Gölgenmesinin Önemi	Hong Kong	Derin kanyonlarda ağaçlandırmanın termal faydasının bina gölgenmesiyle sınırlı olduğu tespit edilmiştir.
Skellhorn vd., 2014	Ağaç, Çim, Asfalt ve Yeşil Çatı Etkisi	Manchester	Yeşil alanların kaybının hem yüzey hem de hava sıcaklıklarını önemli ölçüde artırdığı belirlenmiştir.

**Tablo 1.** Dış mekân termal konfor çalışmalarında ENVI-met yazılımı kullanılan araştırmalar (devamı).

Li vd., 2023	Farklı Ağaç Türlerinin Etkileri	Guangzhou	Yeşil alan oranı arttıkça, alandaki gölgelendirme etkisi, yüzey sıcaklığı ve yüzey ısı akısı azaldığı görülmüştür.
Lin vd., 2024	Yeşil çatı + yeşil duvar ile yaya seviyesinde termal konfor	Guangzhou, Çin	Yeşil örtü arttıkça Ta, MRT, PET düşüyor; “toplam yeşil” (çatı + cephe birlikte) etkili; tek başına çatı yeşil etkisi daha sınırlı olduğu belirlenmiştir.
Tang vd., 2025	Bitki kombinasyonu + su + ağaç-çalı-çim ve fiskeye birlikteliğinin yatay/dikey soğutma etkisi	Tarihi/kültürel kentsel doku (Çin)	Ağaç gölgesi Tmrt’yi düşürüyor, fiskeye Ta’yı daha çok etkiliyor; hibrit senaryoların en iyi soğutmayı verdiği belirlenmiştir.
Ye vd., 2025	Bitki oranı + zemin türü ile dış mekân termal konfor optimizasyonu	Hengyang, Çin (kampüs avlusu)	“Ağaç + çim” kombinasyonu Ta/Ts/PET’i düşürmede güçlü; yüksek yansıtıcılı (high-albedo) beton Ta/Ts’yi düşürse de radyasyon nedeniyle PET’in arttığı saptanmıştır.
Jung, 2024	Yaya yolu kaplama malzemesi değişiminin mikroiklim + hava kalitesi	Seul, Güney Kore	Asfalt ile granit gibi kaplamalar Ta/Tg/Tmrt/PET üzerinde farklı etkiler üretiyor; kaplama seçimi “soğutma-ışınım” dengesini değiştirdiği görülmüştür.
Xie vd., 2025	Su yüzeyi / sulak alan soğutma etkisi	Chengdu, Çin	Sulak alanların ve bağlantılı su ağının termal çevreyi iyileştiren ek soğutma etkileri olduğu belirlenmiştir.
Eingrüber vd., 2025	Geçirgen zemin / çim izgara parke	Almanya (Köln Üniversitesi)	“Geçirgen/yeşil kaplama”yı ENVI-met’te daha gerçekçi temsil eden yeni parametreleme sunuluyor; şehir soğutması çalışmalarına altyapı sağladığı görülmüştür.
Yavaş & Yılmaz (2019)	Erzurum kentsel mikroiklim dış mekân termal konforunun incelenmesi	Erzurum, Türkiye	Kış mevsiminde yapılaşma yoğunluğu ve sokak yöneliminin mikroiklimi etkilediği; rüzgârın soğuk stresin arttığı, iyi güneşlenen alanlarda ise dış mekân termal konforunun iyileştiği belirlenmiştir.
Yılmaz & Canan, 2025	Termal konfor indeksi	Erzurum, Türkiye	Nötr PET aralığı saptandı; soğuk iklimde adaptasyon yüksek bulunmuştur.
Chen vd., 2015	Kış ve geçiş mevsimlerinde termal konfor	Şanghay, Çin – Kent Parkı	Kış ve geçiş mevsimlerinde gölgelemenin konforu azaltıcı, güneşlenmenin ise konforu artırıcı etkisi olduğu belirlenmiştir.

Çalışma, kentsel mekânlarda dış mekân termal konforunun iyileştirilmesine yönelik olarak mikroiklim temelli bir değerlendirme çerçevesi geliştirmeyi amaçlamaktadır. Soğuk ve karasal iklim özelliklerine sahip bir kentte yer alan yeni bir yerleşim alanında, farklı kentsel tasarım ve peyzaj senaryolarının dış mekân termal konforu üzerindeki etkilerini nicel olarak ortaya koymaktır. Bu kapsamda doğa temelli çözümler olarak, yeşil alan oranı, zemin kaplama türleri, su elemanları ve güneşlenme potansiyelini artırmaya yönelik tasarım yaklaşımlarının mikroiklim koşulları üzerindeki etkileri simülasyon temelli analizler aracılığıyla değerlendirilmiştir. Çalışmanın hedefleri arasında; (a) yıl boyu mikroiklim verileri kullanılarak dış mekân termal konforunun yaz-kış değişiminin analiz edilmesi, (b) özellikle kış döneminde termal konforu artırma potansiyeline sahip kentsel tasarım senaryolarının ENVI-met tabanlı simülasyonlar ile test edilmesi ve (c) soğuk iklim bölgeleri için bilimsel temelli ve uygulanabilir kentsel tasarım ve peyzaj önerilerinin geliştirilmesidir. Bu doğrultuda, çalışma alanı olarak yeni gelişen bir yerleşim alanını temsil eden ve uygulaması tamamlanmış bir toplu konut bölgesi belirlenmiştir.

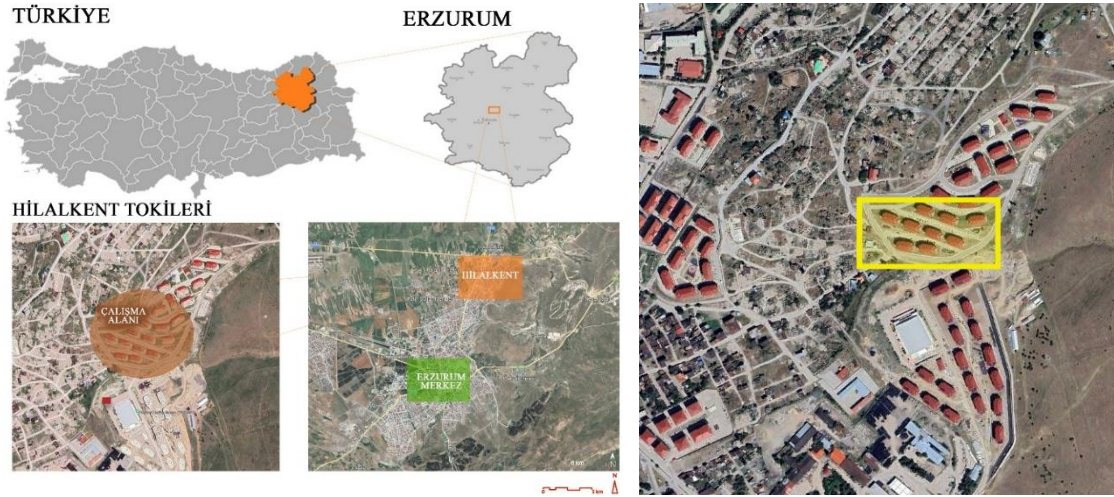
## 2. MATERYAL VE METOD

Çalışma alanı, Doğu Anadolu Bölgesi’nde, Erzurum kent merkezinin yaklaşık 8 km kuzeydoğusunda yer alan Hilalkent TOKİ konut yerleşimi olarak belirlenmiştir. Köppen iklim sınıflandırmasına göre Erzurum, kış aylarında en az dört ay boyunca aylık ortalama sıcaklıkların 10.0 °C’nin altında kaldığı, en sıcak ayların ise ortalama 22.0 °C’nin üzerinde olduğu Dsb (şiddetli kış, kuru ve serin yaz) alt tipinde yer almaktadır. Kış dönemi altı aydan daha uzun sürmekte olup, hava sıcaklıkları -37,2 °C’ye kadar düşebilmektedir. Kış aylarında görülen yoğun kar yağışları nedeniyle Erzurum, Köppen sınıflandırmasına göre önemli bir kış kenti olarak tanımlanmaktadır (Köppen & Geiger, 1968; MGM, 2020).

### 2.1. Çalışma Alanının Özellikleri

Çalışma alanı olarak belirlenen toplu konut alanı, kentsel büyüme ve gelişmenin aktif olarak sürdüğü bölgelerden birini temsil etmektedir. Konut ve ticaret potansiyeline sahip yerleşim alanı, gelişen sosyal altyapısı ve görece konforlu yaşam çevresi ile öne çıkmaktadır. Erzurum Hilalkent TOKİ projesi, Türkiye genelinde yürütülen kentsel dönüşüm ve konut üretim çalışmaları kapsamında Toplu Konut İdaresi Başkanlığı (TOKİ) tarafından gerçekleştirilen projelerden birisidir. Yerleşim, Erzurum’un belirgin karasal iklim özelliklerinin etkili olduğu bir

bölgede yer almakta; uzun ve sert kışlar ile yüksek güneş radyasyonuna maruz kalan kısa yaz dönemleriyle karakterize edilmektedir. Çalışma alanı 39.943921° kuzey enlemi ve 41.304109° doğu boylamında konumlanmakta olup, konum haritası Şekil 1’de sunulmuştur. Proje ağırlıklı olarak orta gelir grubuna yönelik olup 2+1 ve 3+1 konut tipolojilerinden oluşmaktadır. Benzer kat yüksekliklerine sahip, tekrarlayan blok tipolojileri ve geniş açık alanlar etrafında kurgulanmış konut adaları, düzenli ve homojen bir kentsel doku oluşturmaktadır. Bu yapılaşma biçimi, mikroiklim koşullarının belirgin biçimde gözlemlenmesine olanak sağlamaktadır.



Şekil 1. Çalışma alanı olarak belirlenen Hilalkent TOKİ yerleşim alanı konum haritası (Google Maps verileri ile yazarlar tarafından hazırlanmıştır)

Yerleşim alanında açık alanların önemli bir bölümü sert zeminlerle kaplı olup, yeşil alan oranı sınırlıdır. Ağaç ve çalıkların düzensiz dağılımı nedeniyle bazı alanlarda gölgeleme yetersiz kalmaktadır. Deniz seviyesinden yaklaşık 1800–1850 m arasında değişen eğimli topoğrafya, yaz aylarında ısı stresini artırırken, kış aylarında rüzgârın serbest dolaşımına bağlı olarak soğuk stresini artırmaktadır. Yerleşimin konut karakterini yansıtan görseller Şekil 2’de verilmiştir. Yapı blokları arasındaki mesafeler ve sokak yönelimleri, rüzgâr hareketleri ve güneşlenme süreleri üzerinde belirleyici olmaktadır.



Şekil 2. Çalışma alanına ait konut görünümleri (A), Davis Vantage Pro2 meteorolojik istasyonuna ait görünümler (B) (S. Yılmaz arşivi)

## 2.2. Mikro-İklim Verilerinin Elde Edilmesi

Çalışma alanına yakın konumda bulunan Körling Binası bahçesine, 1,20 × 1,20 m ölçülerinde koruyucu bir kafes içerisinde Davis Vantage Pro2 meteorolojik ölçüm sistemi kurulmuştur. Cihaz, yerden 1,5 m yükseklikte

zemine sabitlenmiş metal bir direk üzerine monte edilmiş ve meteoroloji istasyonu bu yapı üzerine yerleştirilmiştir (Şekil 2). Bu sistem aracılığıyla hava sıcaklığı (Ta, °C), bağıl nem (RH, %), rüzgâr hızı (WS, m/s) ve rüzgâr yönü gibi mikrometeorolojik veriler saatlik olarak kaydedilmiştir. Dış mekân termal konforunun değerlendirilmesinde PET parametresi kullanılmıştır. 2023 yılı boyunca toplanan mikroiklim verileri analiz edilmiş ve bu kayıtlar doğrultusunda yılın en sıcak ve en soğuk ayları belirlenmiştir. Bu dönemler içerisinde, en sıcak gün (10 Ağustos 2023) ve en soğuk gün (1 Ocak 2023) tespit edilerek, söz konusu günlere ait saatlik veriler sonraki analizlerde kullanılmıştır.

### 2.3. Peyzaj Tasarım Senaryoları

Hilalkent TOKİ konut yerleşimi içerisinde belirlenen çalışma alanında dış mekân termal konforunun değerlendirilmesine yönelik peyzaj tasarım senaryoları geliştirilmiştir. Bu çalışmada kullanılan senaryolar oluşturulurken, ağaç sayısında artış, toprak yüzeyi, yeşil çatılar ve su elemanları gibi peyzaj bileşenleri alana eklenmiş ve bu bileşenlerin mikroiklim ve termal konfor koşulları üzerindeki etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Mevcut durum ile karşılaştırmalı olarak hazırlanan senaryolar arasındaki ilişkilerin analiz edilebilmesi için enaryolar belirli gruplar altında sınıflandırılmıştır. Bu kapsamda geliştirilen peyzaj tasarım senaryoları Şekil 3'te gösterilmektedir.

**Senaryo A – Mervut Durum:** Mevcut durumun analizi içerisinde alanda bulunan binalar, asfalt yüzey ve çim alanlar işlenmiştir. Alan bitki yönünden incelenmiş ve alan içerisinde küçük boylu çalılar dışında bitkiye rastlanmamıştır. Bu senaryo, çalışma alanının mevcut fiziksel ve çevresel koşullarını temsil eden referans durumdur. Toplam alan 16 544 m<sup>2</sup> olup, bunun 6 844 m<sup>2</sup>'si yeşil alan, 6 164 m<sup>2</sup>'si asfalt yüzey ve 3 536 m<sup>2</sup>'si bina alanından oluşmaktadır. Senaryo A, diğer tüm senaryoların mikro iklim performanslarının karşılaştırılmasında temel karşılaştırma noktası olarak kullanılmıştır.

**Senaryo B – Ağaç Sayısında %15 Artış:** Senaryo B kapsamında, çalışma alanındaki mevcut ağaç sayısı %15 oranında artırılmıştır. Bu müdahale için seçilen ağaç türleri, alanın yapısal ve ekolojik özellikleriyle uyumlu olacak şekilde belirlenmiş olup *Ulmus glabra* (Karaağaç), *Betula pendula* (Huş ağacı), *Pinus sylvestris* (Sarıçam), *Tilia cordata* (Ihlamur) ve *Acer platanoides* (Akçaağaç) türlerini içermektedir (Yılmaz & İrmak, 2004). Arazi kullanım dağılımı Senaryo A ile aynı tutulmuş (%41,3 çim alan, %37,3 asfalt yüzey ve %21,4 bina alanı), buna karşın mevcut yeşil alanlar içerisindeki bitkisel yoğunluk %15 oranında artırılmıştır. Bu yaklaşım, arazi kullanım oranlarını değiştirmeden yalnızca bitkisel yoğunluk artışının mikroiklim koşulları üzerindeki etkisini izole ederek değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Ağaçlandırma yoğunluğundaki bu orta düzey artışın, özellikle yaya seviyesinde gölgelemenin artması ve yüzey sıcaklıklarının azalması yoluyla ölçülebilir ancak kontrollü bir etki oluşturması beklenmektedir.

**Senaryo C – Ağaç Sayısında %30 Artış:** Senaryo C kapsamında, çalışma alanındaki ağaç sayısı %30 oranında artırılmıştır. Bu senaryoda kullanılan ağaç türleri, %15 artış içeren Senaryo B'de kullanılan türlerle aynıdır. Genel yeşil alan oranı sabit tutulmasına rağmen, bu senaryo mevcut yeşil alanlar içerisindeki bitkisel yoğunluğun %30 artırıldığı daha yoğun bir ağaçlandırma yaklaşımını temsil etmektedir. Arazi kullanım dağılımı %41,3 yeşil alan, %37,3 asfalt yüzey ve %21,4 bina alanı olacak şekilde korunmuştur. Bu senaryo, özellikle mikro iklim parametreleri ve PET üzerindeki etkiler başta olmak üzere, yüksek oranda ağaçlandırma yoğunluğunun etkilerini açık biçimde ortaya koymak amacıyla tasarlanmıştır. Bu bağlamda Senaryo C, çalışma alanında yeşil altyapının mikro iklimi iyileştirme potansiyelinin üst sınırlarını inceleyen bir durum olarak değerlendirilmekte ve yoğun ağaçlandırmanın termal konfor üzerindeki belirleyici rolünü irdelemektedir.

**Senaryo D: Su Yüzeyi:** Çalışma alanında su yüzeyinin tasarlanmasıyla oluşturulmuştur. Mevcut alan içerisinde bulunan bina, asfalt zemin aynı kabul edilmiş, çim yüzey içerisine parçalanmış şekilde su yüzeyleri yerleştirilmiştir. Tüm alanın %13'ü oranında su yüzeyi eklenmiştir. Alan dağılımında niteliksel bir değişikliğe gidilerek toplam alanın %7,3'ü (1 200 m<sup>2</sup>) su yüzeyi olarak tanımlanmış, buna karşılık yeşil alan oranı %41,3'ten %34,1'e düşürülmüştür. Asfalt (%37,3) ve bina alanları (%21,4) sabit tutulmuştur. Bu senaryo, ağaçlandırma yerine mavi altyapının buharlaşma yoluyla oluşturduğu soğutma etkisini incelemeyi amaçlamakta olup, su yüzeylerinin özellikle yaz koşullarında hava sıcaklığı ve termal konfor üzerindeki katkısını değerlendirmek için oluşturulmuştur.

**Senaryo E: Toprak Zemin:** Çalışma alanının sert yüzeylerinin toprak zemin olarak kaplanması tasarlanmıştır. Alan içerisinde bina dışında bulunan tüm yüzeyler toprak zemin olarak kabul edilmiş ve ona göre analiz edilmiştir. Alanın %78,7'sinin (13 008 m<sup>2</sup>) toprak yüzey olarak tanımlandığı ve %21,4'lük kısmının bina alanı olarak bırakıldığı bir durumu temsil etmektedir. Bu senaryoda yeşil alan ve asfalt yüzey bulunmamaktadır. Doğal zemin ağırlıklı bu

yaklaşım, bitki örtüsü olmaksızın yüzey türünün mikroiklim üzerindeki etkilerini incelemeyi amaçlamakta ve özellikle yüzey sıcaklıkları ile ısı depolama davranışının değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Senaryo E, yeşil altyapının yokluğunda doğal yüzeylerin performansını ortaya koyan karşılaştırmalı bir senaryo niteliğindedir.

**Senaryo F: Çatı Bahçesi:** Çalışma alanı içerisinde bulunan binaların çatılarına bitkiler eklenmiş ve ona göre analiz edilmiştir. Yeşil alan oranının %51,6'ya çıkarıldığı ve çatı bahçeleriyle desteklenen en yoğun yeşil altyapı senaryosudur. Bu senaryoda asfalt alan %37,3 ve bina alanı %21,4 oranında sabit tutulmuştur. Yatay yeşil alanlara ek olarak yapı üstlerinde oluşturulan yeşil yüzeyler, kentsel ısı adası etkisinin azaltılmasına yönelik bütüncül bir yaklaşım sunmaktadır. Senaryo F, yeşil altyapının hem zemin hem de yapı üstü düzlemde entegre edilmesinin mikroiklim üzerindeki toplam etkisini değerlendirmek amacıyla oluşturulmuştur.

Senaryo A			<p>Toplam Alan:16544 m<sup>2</sup>            Yeşil Alan: 6844 m<sup>2</sup>            Asfalt Alan: 6164 m<sup>2</sup>            Bina Alanı: 3536 m<sup>2</sup>            Yeşil Alan (Çim) Albedo: 0.20 – 0.25            Asfalt Albedo: 0.05 – 0.10            Bina Yüzeyi Albedo: 0.30 – 0.40</p>
Senaryo B			<p>Toplam Alan:16544 m<sup>2</sup>            Yeşil Alan: 6844 m<sup>2</sup>            Asfalt Alan: 6164 m<sup>2</sup>            Bina Alanı: 3536 m<sup>2</sup>            Eklenmiş Bitki Oranı: %15            Yeşil Alan (Çim) Albedo: 0.20 – 0.25            Asfalt Albedo: 0.05 – 0.10            Bina yüzeyi Albedo: 0.30 – 0.40            Ağaç Albedo:0.15 – 0.18</p>
Senaryo C			<p>Toplam Alan:16544 m<sup>2</sup>            Yeşil Alan: 6844 m<sup>2</sup>            Asfalt Alan: 6164 m<sup>2</sup>            Bina Alanı: 3536 m<sup>2</sup>            Eklenmiş Bitki Oranı: %30            Yeşil Alan (Çim) Albedo: 0.20 – 0.25            Asfalt Albedo: 0.05 – 0.10            Bina yüzeyi Albedo: 0.30 – 0.40            Ağaç Albedo:0.15 – 0.18</p>
Senaryo D			<p>Toplam Alan:16544 m<sup>2</sup>            Yeşil Alan: 5644 m<sup>2</sup>            Asfalt Alan: 6164 m<sup>2</sup>            Bina Alanı: 3536 m<sup>2</sup>            Eklenmiş Su Yüzeyi: 1200 m<sup>2</sup>            Yeşil Alan (Çim) Albedo: 0.20 – 0.25            Asfalt Albedo: 0.05 – 0.10            Bina yüzeyi Albedo: 0.30 – 0.40            Su yüzeyi Albedo: 0.05 – 0.10</p>
Senaryo E			<p>Toplam Alan:16544 m<sup>2</sup>            Toprak Alan: 13008 m<sup>2</sup>            Bina Alanı: 3536 m<sup>2</sup>            Toprak Albedo: 0.15 – 0.25            Bina yüzeyi Albedo: 0.30 – 0.40</p>
Senaryo F			<p>Toplam Alan:16544 m<sup>2</sup>            Yeşil Alan: 8541 m<sup>2</sup>            Asfalt Alan: 6164 m<sup>2</sup>            Bina Alanı: 3536 m<sup>2</sup>            Yeşil Alan (Çim) Albedo: 0.20 – 0.25            Asfalt Albedo: 0.05 – 0.10            Bina yüzeyi Albedo: 0.30 – 0.40            Çatı Bahçesi Albedo:0.20 – 0.25</p>

Şekil 3. Çalışma alanı için geliştirilen senaryolara ait görsel temsiller ve bunların karşılık gelen alan kaplama oranları (Yazarlar tarafından üretilmiştir)

Çalışma alanı, Erzurum kentinin soğuk iklim koşullarını temsil edecek şekilde seçilmiş olup, simülasyonlarda kullanılan yüzey özellikleri bölgesel yapı malzemeleri dikkate alınarak tanımlanmıştır. Bu kapsamda asfalt, beton ve yeşil alan yüzeylerine ait albedo değerleri literatürde önerilen aralıklar doğrultusunda belirlenmiş ve Erzurum'daki

mevcut kentsel doku ile uyumlu olacak şekilde modele entegre edilmiştir. Özellikle koyu renk asfalt yüzeylerin düşük albedo değerleri nedeniyle gün içerisinde daha fazla ısı depoladığı, buna karşılık bitkilendirilmiş alanların ve açık renkli yüzeylerin daha düşük yüzey sıcaklıkları oluşturduğu gözlenmiştir.

#### 2.4. Analizlerde Kullanılan ENVI-met 5.6.1 Yazılımı

Bu çalışmada, mikroiklim ve dış mekân termal konfor simülasyonlarını gerçekleştirmek amacıyla ENVI-met 5.6.1 yazılımı kullanılmıştır. ENVI-met, kentsel mikroiklim dinamiklerini modellemek ve analiz etmek üzere özel olarak geliştirilmiş, dünya genelinde bilimsel çalışmalarda yaygın biçimde kullanılan bir simülasyon aracıdır (Bruse & Fleer, 1998; Banerjee vd., 2024; Yılmaz vd., 2025; Migliari vd., 2025; Roy vd., 2025).

Yazılım, insan termal konforu üzerindeki çevresel etkileri değerlendirebilen BIO+met adlı bir modül içermektedir. Bu modül; hava sıcaklığı, bağıl nem, rüzgâr hızı ve güneş radyasyonu gibi iklimsel değişkenleri kullanarak termal konfor indislerini hesaplamaktadır. BIO+met kapsamında PET hesaplamaları, 35 yaşında, 1,75 m boyunda ve 75 kg ağırlığında ayakta duran bir birey için; 0,90 clo giysi yalıtımı ve 1,48 met metabolik hız varsayımlarıyla gerçekleştirilmiştir (Matzarakis vd., 1999).

Simülasyonların sayısal kararlılığını sağlamak amacıyla, yerleşim alanının etrafına beş adet ek grid hücresi eklenmiştir. Buna bağlı olarak model alanı ENVI-met ortamında 145 m × 90 m × 38 m boyutlarında oluşturulmuş; yatay (XY düzlemi) çözünürlük 1 m ve dikey çözünürlük 1 m olarak tanımlanmıştır (Tablo 2).

**Tablo 2.** ENVI-met analizinde kullanılan parametreler (Yazarlar tarafından üretilmiştir).

Konum	Erzurum/Hilalkent	
İklim Türü	Dağ Ekosistemi	
Simülasyon Zamanı	Ocak ve Ağustos	
Toplam Simülasyon Süresi	1 Alternatif İçin 24 Saat	
Uzamsal Çözünürlük	1m x 1m x 1m	
Alan Boyutu	145 m x 90 m x 38 m	
	01.01.2023	04.08.2023
Temel Meteorolojik Girdi	Unshaded	Unshaded
Rüzgâr Hızı(M/S)	0.45	0.65
Rüzgâr Yönü(°)	13.12°	182.80°
24 Saatlik Hava Sıcaklığı	+	+
24 Saatlik Bağıl Nem	+	+
En Düşük Hava Sıcaklığı (°C)	-8.9 / 08.00	14.2 / 07.00
En Yüksek Hava Sıcaklığı (°C)	2.9 / 16.00	25.7 / 18.00
En Düşük Nem	%32 / 16.00	%33 / 19.00
En Yüksek Nem	%65 / 07.00	%66 / 07.00

Simülasyon sonuçlarının değerlendirilmesinde, dış mekân kullanımının yoğun olduğu 10:00–18:00 saatleri temel değerlendirme aralığı olarak alınmıştır. Bununla birlikte, analiz sonuçlarının görselleştirilmesinde, gün içi değişimlerin ve termal kontrastların en belirgin olduğu saat olan 14:00, temsil edici zaman dilimi olarak seçilmiştir.

#### 2.5. Veri Doğruluk Analizi

Bu çalışmada, ENVI-met simülasyonlarının güvenilirliği, öncelikle ölçülen verilerin doğruluğunun incelenmesi yoluyla değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, 1 Ocak 2023 ve 10 Ağustos 2023 tarihlerinde kaydedilen ölçümler kullanılarak doğruluk analizleri gerçekleştirilmiştir. Model performansının doğrulanmasında kullanılan değişkenler arasında hava sıcaklığı, en kritik parametrelerden biri olarak öne çıkmaktadır.

Model performansını değerlendirmek için tahmin edilen (P) ve gözlemlenen (O) veriler arasındaki uyum yedi istatistiksel gösterge ( $R^2$ , E, MBE, MAE, RMSE ve uyum indeksi d) kullanılarak analiz edilmiştir. Yalnızca  $R^2$ 'ye dayalı değerlendirmelerin yetersiz kalabildiği kabul edildiğinden, özellikle yüksek karesel farklara duyarlı olan bu ölçütlerle model-gözlem uyumu daha güvenilir biçimde ortaya konmuştur (Harmel & Smith, 2007; Battista vd.,2016).

Çevresel tahmin modelleri literatüründe RMSE ve MBE, ölçülen ve modellenen değerler arasındaki hataları bütüncül biçimde yansıtmaları ve kümülatif belirsizliğin değerlendirilmesine olanak tanımaları nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca simülasyon doğruluğu, Willmott (1982) tarafından geliştirilen uyum indeksi (d) ile değerlendirilmiştir; d değerinin 1,0'a yaklaşması yüksek uyum ve güvenilir model performansı olarak yorumlanmıştır. Çalışmada, simülasyon çıktıları saha ölçümleriyle karşılaştırılarak uyum indeksi (d) hesaplanmış ve modelin genel güvenilirliği doğrulanmıştır (Tablo 3).

**Tablo 3.** Doğruluk analizinde kullanılan parametrelerin anlamları ve kullanılan formül (Battista vd., 2016).

Formül kısaltmaları	Anlamları	Formül
d	uyum indeksi [-]	$d = 1 - \frac{\sum_{j=1}^{N_D} [(P_j - \bar{O}) - (O_j - \bar{O})]^2}{\sum_{j=1}^{N_D} ( P_j - \bar{O}  +  O_j - \bar{O} )^2}$ $MBE = \frac{\sum_{j=1}^{N_D} (P_j - O_j)}{N_D}$ $MAE = \frac{\sum_{j=1}^{N_D}  P_j - O_j }{N_D}$
MAE	Ortalama mutlak hata [-]	
MBE	Ortalama yanlılık hatası [-]	
N <sub>D</sub>	Analiz edilen veri sayısı [-]	
$\bar{O}$	Gözlenen değişkenin ortalaması	
O <sub>j</sub>	Her j anı için gözlenen değişkenler	
P <sub>j</sub>	Her j anı için model tahminli değişkenler	

Bu çalışma, insan veya hayvan denekler üzerinde herhangi bir deney, anket veya müdahale içermediğinden etik kurul onayı gerektirmemektedir. Araştırma süreci bilimsel araştırma ve yayın etiği ilkelerine uygun olarak yürütülmüştür.

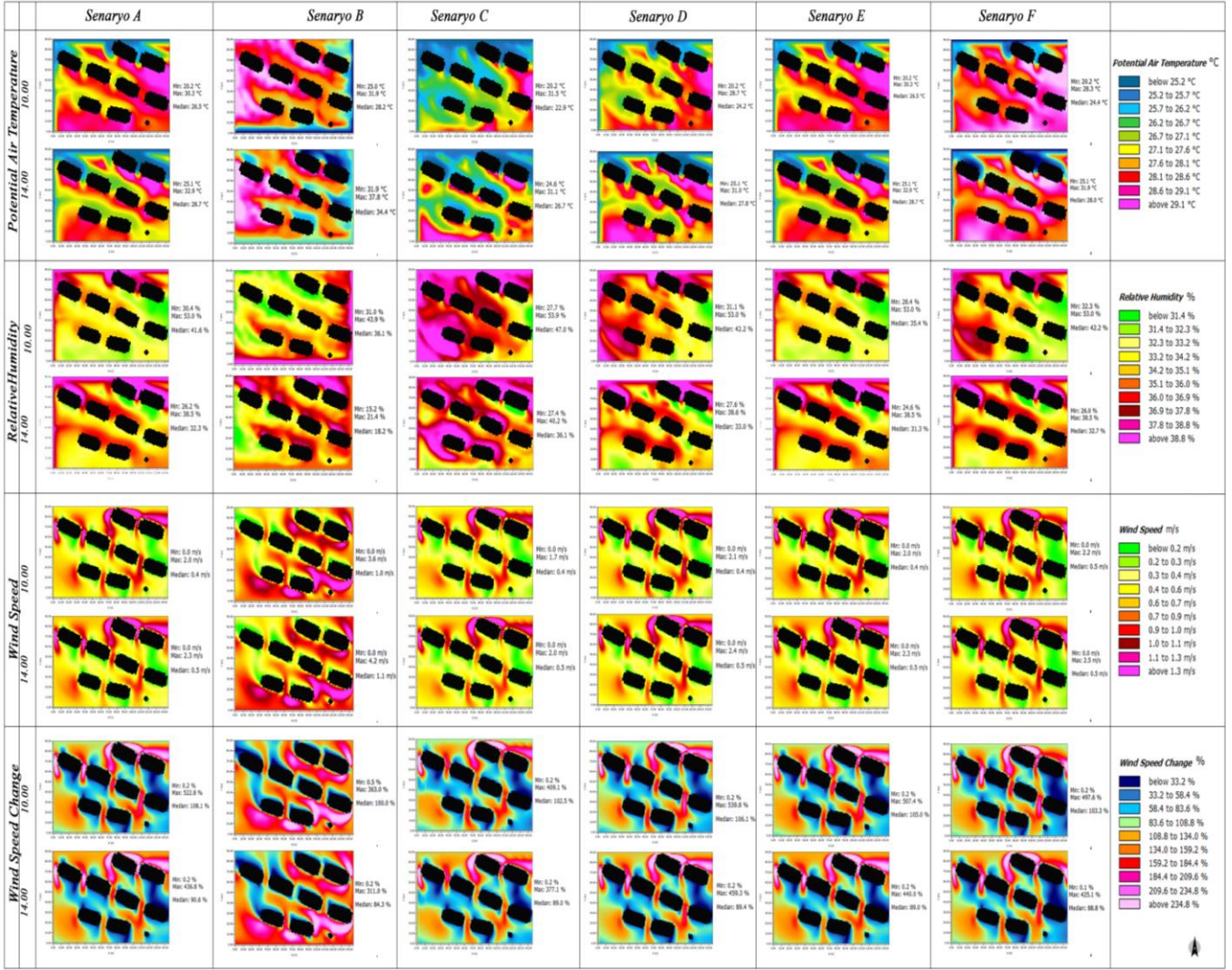
### 3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Hilalkent TOKİ yerleşim alanı için bir mevcut durum ve geliştirilen beş farklı senaryo olmak üzere toplam altı farklı senaryo değerlendirilmiştir. Yaz ve kış dönemleri için analiz edilmiş; değerlendirmeler 10:00 ve 18:00 saatleri esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Tüm senaryo analizlerinde en düşük değerlerin sabah 10:00 ve akşam 18:00 saatlerinde ortaya çıktığı görülmüştür. Genel olarak en yüksek değişimin ve maksimum farklılıkların gözlemlendiği zaman aralığı ise 10:00–14:00 olarak belirlenmiştir. Bu doğrultuda, ENVI-met simülasyonlarından elde edilen görselleştirmelerde, senaryolar arasındaki mekânsal ve zamansal farklılıkları en açık biçimde yansıtan bu zaman aralığına sahip çıktılarına odaklanılmıştır.

#### 3.1. Senaryoların Yaz Ayı İçin ENVI-met Analizi

**Hava Sıcaklığı (Ta, °C):** Hava sıcaklığı açısından genel olarak olumlu değerlerin Senaryo C (%30 ağaç artışı) kapsamında elde edildiği saptanmıştır. ENVI-met sonuçlarına göre yaz döneminde saat 14:00'te yüksek sıcaklık Senaryo B'de 34,4 °C olarak belirlenirken, Senaryo C'de sıcaklık 26,7 °C ile en düşük seviyeye ulaştığı görülmüştür. Senaryo A'da 28,2 °C, Senaryo D'de ise 27,8 °C olarak hesaplanan sıcaklıklar, Senaryo A, D, E ve F'te genel olarak 27,8–28,2 °C aralığında olduğu belirlenmiştir. Bu bulgular, artan bitki yoğunluğunun gölgeleme ve evapotranspirasyon etkilerini güçlendirerek hava sıcaklığını belirgin biçimde düşürdüğünü; Senaryo C'nin mevcut duruma kıyasla yaklaşık 1,5 °C daha serin koşullar üreterek yeşil alan yoğunluğunun yaz dönemindeki kritik rolünü ortaya koyduğunu göstermektedir. Elde edilen bulgular literatürle uyumlu olup, Middel et al. (2015) ağaç örtüsündeki artışın gündüz hava sıcaklıklarını yaklaşık 2,0 °C düşürebildiğini; ENVI-met tabanlı park çalışmalarında ise mevcut duruma kıyasla 0,5–1,5 °C arasında serinletme etkileri tespit edildiği belirtilmiştir (Teshnehdel vd., 2022). Farklı çalışmalarda bildirilen serinletme etkilerindeki değişkenlik; ağaç türü seçimi (Sarı vd., 2025) ve yaprak sıcaklığı ile evapotranspirasyon süreçlerini etkileyen kentsel mikro ölçekli bitki özellikleriyle ilişkilendirilmektedir (Irmak vd., 2018; Irmak vd., 2020; Feng vd., 2024). Analizlere göre Senaryo D, Senaryo A'ya kıyasla sınırlı ancak tutarlı bir iyileşme sağlamıştır: 14:00'te 28,2 °C'den 27,8 °C'ye, yani yaklaşık 0,4 °C'lik bir düşüş gözlenmiştir. Günün diğer saatlerinde de 0,3–0,5 °C aralığında benzer azalmalar görülmüştür. Su yüzeylerinin serinletici etkisi bilinse de, analizler bu etkinin ağaç oranının artırıldığı senaryolara kıyasla daha zayıf olduğunu göstermektedir (Wang vd., 2018; Yılmaz vd., 2021a; Yuca vd., 2025). Başka bir çalışmada yazın su senaryolarının 0.8–1.3 °C aralığında

serinletme sağladığı tespit edilmiştir (Xu vd., 2019). Yaz ayı için en sıcak ay olarak belirlenen Ağustos ayına göre ENVI-met programı ile yapılan analiz sonuçları Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Senaryoların yaz ayı için yapılan ENVI-met analizi (ENVI-met programı ile yazarlar tarafından üretilmiştir)

**Rüzgâr Hızı (m/s):** Rüzgâr hızı açısından belirgin ve tutarlı sonuçlar Senaryo B (%15 ağaç artışı) kapsamında elde edilmiştir. Saat 14:00'te ortalama rüzgâr hızı 1,1 m/s, 16:00 ve 18:00'de ise yaklaşık 1,2 m/s'ye ulaşmıştır. Buna karşılık Senaryo A, C, D, E ve F'te rüzgâr hızları gün boyunca büyük ölçüde 0,4–0,5 m/s aralığında kalmıştır. Bu bulgular, Senaryo B'nin kentsel morfoloji ve sokak yönlenmesi sayesinde doğal havalandırmayı daha etkin desteklediğini göstermektedir. Nitekim Ali-Toudert ve Mayer (2006), sokakların hâkim rüzgâr yönüyle uyumlu düzenlenmesinin rüzgâr hızlarını anlamlı biçimde artırdığını vurgulamıştır. Benzer şekilde, hâkim rüzgâr yönüne paralel sokaklarda daha yüksek hızlar (Doğan vd., 2020), karmaşık/dolambaçlı sokak ağlarında ise daha düşük hızlar tespit edilmiştir (Yılmaz vd., 2025).

**Rüzgâr Hızı Değişimi (%):** Rüzgâr hızı değişimi açısından hareketlilik Senaryo B'de gözlenmiştir. Saat 10:00–14:00 saatleri arasında bu senaryoda rüzgâr hızında bir artış görülürken, diğer senaryolarda değişim sınırlı düzeyde kalmıştır. Senaryo A, C, D ve E'de rüzgâr hızları gün boyunca büyük ölçüde sabit kalmış, Senaryo F (yeşil çatı)'de ise durağan değerler belirlenmiştir. Bu sonuçlar, sokak yönelimi ve kentsel formun rüzgâr dinamikleri üzerinde belirleyici olduğunu, yeşil çatı uygulamalarının ise yaya seviyesinde sınırlı etkide kaldığını göstermektedir. Yapılan araştırmalarda sokak ağaçlandırmasında ibrelili ve yapraklı bitkilerin birlikte kullanılmasında rüzgâr hızı hareketliliğinin arttığı saptanmıştır (Salata vd., 2016; Yuca vd., 2025). Nitekim, rüzgâr hızındaki farklılıklarda bitki yoğunluğu ve yerleşim düzeni önemli rol oynamaktadır. Analizler, rüzgâr hızı değişiminin genellikle sabah saatlerinde en yüksek değerlere ulaştığını göstermektedir. Literatürde bitkilerin rüzgârı kesici bir bariyer gibi davranarak hızı azalttığı; düzensiz ya da yoğun yerleştirildiğinde rüzgâr yönünü değiştirerek sirkülasyonu sınırlayabildiği belirtilmektedir (Yılmaz vd., 2017; Wang vd., 2019; Chan & Chau, 2021). Bu bağlamda, yoğun

ağaçlandırma içeren Senaryo C’de rüzgâr hızlarının Senaryo B’ye kıyasla daha düşük olması, bitkisel engellerin akımı sınırlayıcı etkisiyle açıklanabilir. Sonuç olarak, rüzgâr hızını artırmaya yönelik tasarımlarda yalnızca bitki miktarı değil; bitkilerin mekânsal düzeni ve kentsel form ile etkileşimi de belirleyicidir (Yılmaz vd., 2025).

**Bağıl Nem (RH, %):** Senaryolar karşılaştırıldığında genel olarak yüksek ortalama bağıl nem değerleri Senaryo C’de (%30 ağaç artışı) elde edilmiştir. Saat 14:00’te bu senaryoda bağıl nem %36,1 iken, Senaryo A, D, E ve F’te değerler %18–33 aralığında kalmıştır. Bu durum, artan bitki yoğunluğunun evapotranspirasyonu güçlendirerek mikroiklimde nemi artırdığını göstermektedir. Buna karşılık Senaryo B’de, yüksek rüzgâr hızlarına bağlı olarak nemin taşınım yoluyla uzaklaşması sonucu bağıl nem en düşük seviyelere (%18–20) gerilemiştir. Yeşil alanların nem artırıcı etkisi literatürde yaygın biçimde kabul edilirken (Bowler vd., 2010), yüksek rüzgâr hızlarının hâkim olduğu senaryolarda düşük nem değerleri beklenen bir durumdur.

Su yüzeyi eklenen Senaryo D, bağıl nem açısından mevcut duruma yakın değerler üretmiş ve Senaryo C kadar belirgin bir artış sağlamamıştır. Bu sonuçlar, bağıl nem örüntülerinin yüzey özellikleri, bitki örtüsü ve rüzgâr koşullarının birlikte etkisiyle şekillendiğini göstermektedir. Toprak yüzeylerinde gelen radyasyonun bir kısmının toprak neminin buharlaşmasıyla gizli ısıya dönüşmesi; ağaç gölgelemesi ve bitkilerin evapotranspirasyonu sıcaklık–nem etkileşimini belirleyen temel mekanizmalardır (Yavaş & Yılmaz, 2019; Yücekaya & Uslu, 2020). Genel olarak, yaz döneminde yer seviyesinde yüksek bitki yoğunluğu bağıl nemi artırmada belirleyici olurken; artan rüzgâr hızı kurutucu etki yaratarak algılanan termal koşulları farklı bir mekanizma üzerinden etkilemektedir. Bu nedenle bağıl nem, hava sıcaklığı ve rüzgâr ile birlikte değerlendirilmelidir. Nitekim sıcaklığın arttığı koşullarda bağıl nemin düştüğünü gösteren ilişki, farklı iklim ve kentsel bağlamlarda da doğrulanmıştır (İrmak vd., 2018; Wang vd., 2019; Yılmaz vd., 2021b). Yapılan analizler sonucunda:

- **Hava sıcaklığını düşürmede:** Senaryo C
- **Rüzgâr hızı değişimini artırmada:** Senaryo B
- **Bağıl nemi artırmada:** Senaryo C uygun senaryolar olarak öne çıkmıştır. Bu sonuçlar, yaz döneminde dış mekân termal konforunun sağlanabilmesi için tek başına rüzgâr artışının yeterli olmadığını, yeşil alan ve gölgeleme temelli tasarım kararlarının belirleyici rol oynadığını açıkça göstermektedir.

**Senaryo A – Mevcut Durum:** Mevcut durum senaryosu, yeşil veya mavi altyapı müdahalesi içermemesi nedeniyle yaz döneminde belirgin ısı birikimi göstermektedir. Düşük rüzgâr hızları ( $\approx 0,4-0,5$  m/s) ısının dağılımını sınırlamaktadır. Saat 14.00’te ortalama hava sıcaklığı 28,2 °C, PET değeri ise 49,6 °C olarak hesaplanmıştır. Akşam saatlerinde radyasyonun azalmasıyla PET düşse de gün ortasında koşullar yüksek termal stres nedeniyle dış mekân kullanımı açısından konforsuz bulunmuştur.

**Senaryo B – Ağaç Sayısında %15 Artış:** %15 ağaçlandırma artışını içeren Senaryo B’de, saat 14.00’te ölçülen hava sıcaklığı, mevcut duruma kıyasla 34,4 °C ile yüksek bir ortalama değer olarak kaydedilmiştir. Buna karşın, görece yüksek rüzgâr hızı ( $\approx 1,1$  m/s) doğal havalandırmayı artırarak PET’in 45,9 °C düzeyinde kalmasına katkı sağlamıştır. Bu bulgular, düşük bitki oranının yazın sıcaklığı düşürmede yetersiz kaldığını; ancak elverişli havalandırma koşullarında algılanan termal stresin sınırlı ölçüde azaltılabildiğini göstermektedir.

**Senaryo C – Ağaç Sayısında %30 Artış:** %30 ağaç artışı içeren Senaryo C, tüm senaryolar arasında yüksek termal performansı göstermiştir. Saat 14.00’te ortalama hava sıcaklığı 26,7 °C, PET değeri ise 36,4 °C olarak hesaplanmış; bu değerler mevcut duruma göre hava sıcaklığında yaklaşık 1,5 °C, PET’te ise 13,0 °C’yi aşan bir iyileşmeye işaret etmiştir. Sonuçlar, yoğun ağaçlandırmanın sağladığı gölgeleme ve evapotranspirasyon etkilerinin yaz döneminde dış mekân termal konforunu belirlemede baskın rol oynadığını ortaya koymaktadır. Bu doğrultuda Senaryo C, hem fiziksel hem de algısal termal konfor açısından en başarılı senaryo olarak öne çıkmış ve literatürde ağaç gölgelemesinin PET üzerindeki belirleyici etkisini vurgulayan bulgularla uyum göstermiştir.

**Senaryo D – Su Yüzeyi Eklenmiş Alan:** Su yüzeyi eklenen Senaryo D’de saat 14.00’te ortalama hava sıcaklığı 27,8 °C olarak ölçülmüş ve mevcut duruma göre yaklaşık 0,4 °C’lik sınırlı bir azalma sağlanmıştır. PET değeri 48,9 °C olup, termal konfor açısından olumlu bir iyileşmeye işaret etmektedir. Bulgular, su yüzeylerinin serinletici etkisinin daha çok yerel ve sınırlı kaldığını, ağaçlandırma temelli senaryolara kıyasla genel termal konfor üzerindeki etkisinin daha zayıf olduğunu göstermektedir. Yaz döneminde bağıl nemi artırmaya rağmen bu artış PET değerlerine sınırlı yansımıştır. Bu durum, su elemanlarının etkisinin mekânsal olarak sınırlı ve tek başına yeterli olmadığını ortaya koyan literatür bulgularıyla uyumludur (Yücekaya vd., 2022; Xie vd., 2025).

**Senaryo E – Toprak Zemin:** Toprak zemin içeren Senaryo E’de elde edilen bulgular, büyük ölçüde mevcut durumu temsil eden Senaryo A ile benzerlik göstermektedir. Saat 14.00’te ortalama hava sıcaklığı 28,2 °C, PET

değeri ise 49,6 °C olarak hesaplanmış ve bu değerler yaz döneminde yüksek termal stres koşullarına işaret etmiştir. Sonuçlar, toprak zeminin yüzey sıcaklıklarını sınırlı ölçüde düşürebilmesine karşın, gölgeleme ve evapotranspirasyon etkilerinin yetersizliği nedeniyle dış mekân termal konforunu anlamlı biçimde iyileştiremediğini ortaya koymaktadır. Roma’da gerçekleştirilen bir çalışmada da bitkilendirme ile yüzey müdahalelerinin birlikte uygulanmasının, tekil uygulamalara kıyasla daha etkili olduğu belirtilmiştir (Salata vd., 2016). Hilalkent TOKİ analizlerinde de yalnızca toprak zemin (Senaryo E) veya yeşil çatı (Senaryo F) uygulamalarının yaz döneminde sınırlı iyileşme sağladığı; buna karşılık yoğun ağaçlandırma içeren Senaryo C’nin olumlu sonuçlar ürettiği tespit edilmiştir.

**Senaryo F – Yeşil Çatı:** Yeşil çatı uygulamasını içeren Senaryo F’de saat 14.00’te ortalama hava sıcaklığı 28,0 °C, PET değeri ise 48,8 °C olarak belirlenmiştir. Mevcut duruma kıyasla yalnızca sınırlı bir iyileşme sağlayan bu senaryoda, rüzgâr hızı yaklaşık 0,5 m/s düzeyinde kalmıştır. Yeşil çatının yaya seviyesindeki mikroiklim üzerindeki etkisinin zayıf olması, bitkilendirmenin düşey konumlanması ve zeminle doğrudan etkileşiminin bulunmamasıyla ilişkilendirilmektedir. Bu bağlamda Senaryo F, yapı ölçeğinde çevresel katkılar sunsa da yer seviyesi dış mekân termal konforunun iyileştirilmesinde sınırlı bir etkiye sahiptir. ENVI-met analizleri, yaz döneminde dış mekân termal konforunun iyileştirilmesinde ağaçlandırma oranının belirleyici bir faktör olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Senaryolar genel olarak değerlendirildiğinde:

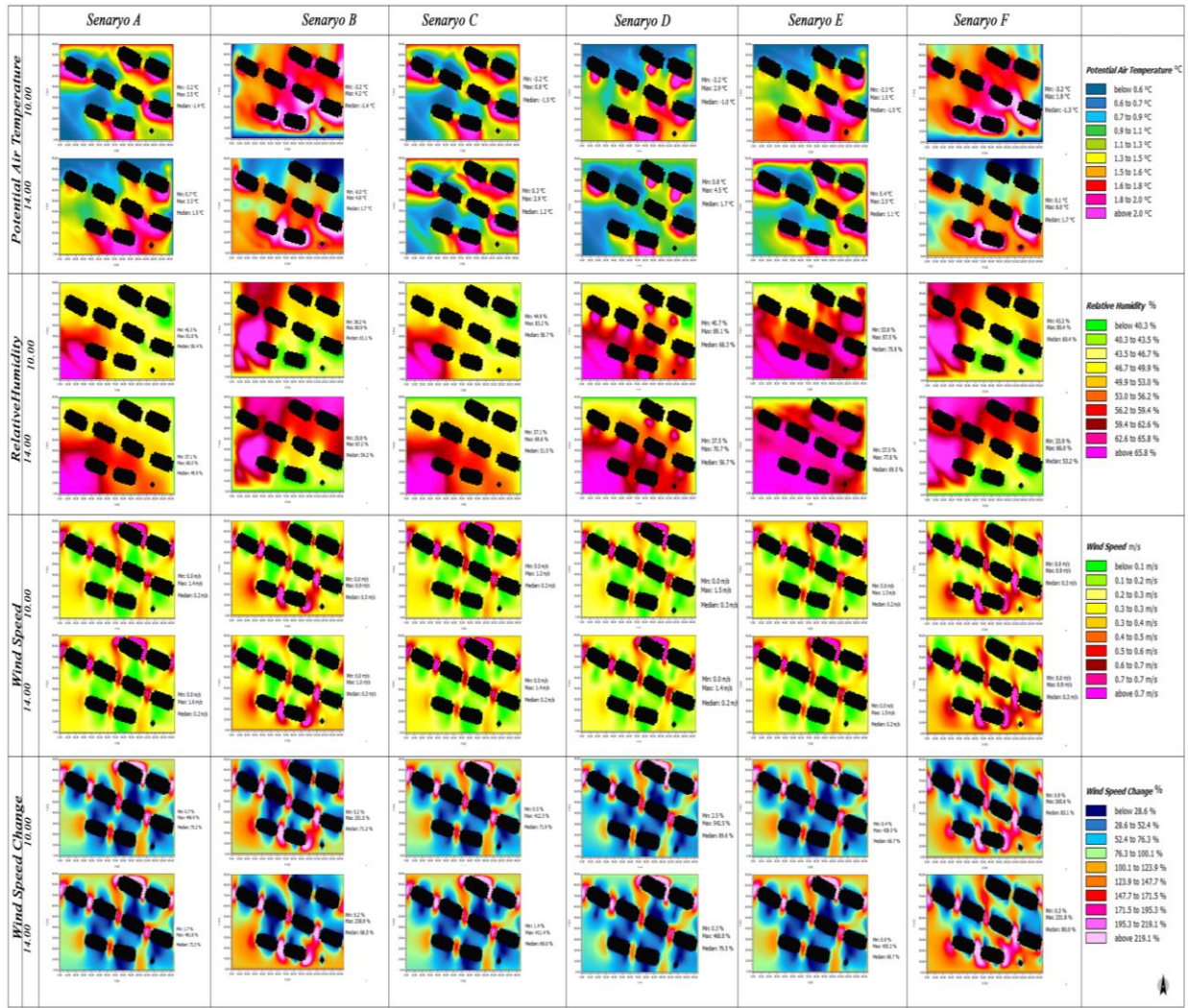
- **Olumlu performans:** Senaryo C (%30 ağaç artışı)
- **Orta düzey iyileşme:** Senaryo D (Su yüzeyi) ve Senaryo B (%15 ağaç artışı, rüzgâr avantajlı)
- **Sınırlı veya ihmal edilebilir etki:** Senaryo E (Toprak zemin) ve Senaryo F (Yeşil çatı)
- **Olumsuz durum:** Senaryo A (Mevcut durum). Bu sonuçlar, yaz döneminde kentsel açık alanlarda termal konforun sağlanabilmesi için düşük yoğunluklu veya dolaylı yeşil müdahaleler yerine, yeterli yoğunlukta ve yer seviyesinde uygulanan bitkisel tasarım çözümlerinin önceliklendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

### 3.2. Senaryoların Kış Ayı İçin ENVI-met Analizi

**Hava Sıcaklığı (Ta, °C):** Kış döneminde sıcaklık (Ta) bakımından senaryolar arasında sınırlı düzeyde olmakla birlikte farklılıklar olduğu tespit edilmiştir. Saat 14.00’te ortalama sıcaklık değerleri Senaryo E’de 1,1 °C, Senaryo C’de ise 1,2 °C olarak ölçülmüştür. Senaryo A’da sıcaklık 1,5 °C iken, Senaryo B, D ve F’de 1,7 °C’ye ulaşmıştır. Bu bulgular, toprak yüzeyler ve yoğun ağaçlandırmanın kış koşullarında hava sıcaklığını sınırlı ölçüde düşürebildiğini göstermektedir. Ağaçların mikroiklimi dengeleyici etkisi bulunmakla birlikte, bu etki kış döneminde farklı sonuçlar doğurabilmektedir. Özellikle artan ağaç örtüsü, güneşlenmenin azalmasına bağlı olarak yüzeylerin daha az ısınmasına neden olmakta ve bu durum ağaçlık alanlarda sıcaklıkların düşmesine yol açabilmektedir. Bu çalışmada gözlenen sıcaklık düşüşü, ağırlıklı olarak güneş radyasyonundaki azalma ve buna bağlı enerji dengesindeki değişim ile ilişkilendirilmektedir. Kış döneminde elde edilen bulgularda, özellikle Senaryo E ve C’de daha düşük sıcaklık değerlerinin gözlenmesi, toprak yüzeyler ve artan bitki örtüsünün güneşlenmeyi azaltarak yüzey ısınmasını sınırladığına işaret etmektedir. Benzer şekilde, yoğun bitki örtüsünün kış döneminde güneş radyasyonunu azaltarak hava sıcaklığını düşürebildiği daha önceki çalışmalarda da ortaya konmuştur (Yavaş ve Yılmaz, 2019; Chen vd., 2015). Buna karşılık diğer senaryolarda nispeten daha yüksek sıcaklıkların ölçülmesi, yüzey özellikleri ve daha düşük gölgeleme etkisi ile ilişkilendirilebilir. Bu durum, bitkilendirmenin kış döneminde yazdan farklı mikroiklim etkileri oluşturduğunu göstermektedir. Kış ayı için en soğuk ay olarak belirlenen Ocak ayına göre ENVI-met ile yapılan analiz sonuçları Şekil 5’te verilmiştir.

**Rüzgâr Hızı (WS, m/s):** Rüzgâr hızı açısından senaryolar arasında saat 14.00’te düşük sıcaklık Senaryo E’de (1,1 °C), yüksek sıcaklıklar ise Senaryo B, D ve F’de (1,7 °C) kaydedilmiştir. Bu sonuçlar, toprak yüzeyler ve yoğun ağaçlandırmanın kış koşullarında hava sıcaklığını sınırlı düzeyde düşürebildiğini göstermekte; ancak bu düşüşlerin kış termal konforu açısından bağlama bağlı olarak değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte literatürde, kış koşullarında rüzgâr hızındaki artışın ısı kaybını artırarak termal konforu olumsuz etkileyebileceği vurgulanmaktadır (Ali-Toudert & Mayer, 2006).

**Rüzgâr Hızı Değişimi (%):** Rüzgâr hızı değişkenliği bakımından değişkenlik oranı Senaryo F’de (yeşil çatı) gözlenmiş ve saat 14.00’te %80,0 değerine ulaşmıştır. Bunu Senaryo E (%69,5) ve Senaryo B (%66,5) izlemiştir. Buna karşılık Senaryo A ve Senaryo C daha durağan rüzgâr koşulları sergilemiştir. Bu bulgular, yeşil çatılar ve açık yüzeylerin rüzgârı daha değişken hâle getirdiğini, yoğun ağaçlandırmanın ise rüzgârı sönmüleyerek daha stabil bir mikro iklim oluşturduğunu göstermektedir. Rüzgâr değişkenliğinin dış mekân termal algısını etkilediği ve özellikle soğuk koşullarda termal konforu azaltabildiği literatürde belirtilmektedir (Salata vd., 2016).



Şekil 5. Senaryoların kış ayı için yapılan ENVI-met analizi (ENVI-met programı ile yazarlar tarafından üretilmiştir)

**Bağlı Nem (RH, %):** Saat 14.00’te yüksek bağlı nem Senaryo D’de (su yüzeyi, %79,5) ölçülmüş; bunu Senaryo A ve Senaryo E izlemiştir. Düşük nem değerleri Senaryo F’de (%53,2) ve Senaryo B’de (%54,2) gözlenmiştir. Bu sonuçlar, su yüzeylerinin kışın nemi artırabildiğini, yüksek rüzgâr hızlarının ise nemi azalttığını göstermektedir. Bitkisel ve su bileşenlerinin kentsel mikro iklimde nem düzenleyici rolü literatürde de vurgulanmaktadır (Bowler vd., 2010).

**Senaryo A – Mevcut Durum:** Mevcut durumda saat 14.00’te ortalama hava sıcaklığı 1,5 °C, rüzgâr hızı 0,2 m/s, bağlı nem %49,9 ve PET değeri 12,7 °C olarak belirlenmiştir. Bu koşullar, kışın soğuk stresinin kısmen azaldığını ancak düşük rüzgâr hızları nedeniyle havalandırmanın sınırlı kaldığını göstermektedir. Senaryo A, karşılaştırmalar için referans mikro iklimi temsil etmektedir.

**Senaryo B – %15 Ağaç Artışı:** %15 ağaçlandırma içeren Senaryo B’de saat 14.00’te hava sıcaklığı 1,7 °C, rüzgâr hızı 0,3 m/s, bağlı nem %54,2 ve PET 11,3 °C olarak belirlenmiştir. Ağaçların rüzgâr hızını azaltıcı etkisi bulunmakla birlikte, bu etki yerleşim düzeni ve çevresel morfolojiye bağlı olarak değişebilmektedir. Bu çalışmada ağaç oranının %15 artırıldığı senaryoda, rüzgâr akımının yönlenmesi ve koridor etkisi nedeniyle bazı bölgelerde hız artışları gözlenmiştir. Bu durum, bitkilendirmenin her koşulda rüzgâr hızını azaltmadığını, bazı durumlarda sınırlı düzeyde kaldığını göstermektedir.

**Senaryo C – %30 Ağaç Artışı:** Yoğun ağaçlandırma içeren Senaryo C’de saat 14.00’te hava sıcaklığı 1,2 °C ve PET değeri 10,7 °C seviyelerde gerçekleşmiştir. Bu durum, bitkilerin rüzgârı kesici etkisiyle ilişkilidir. Yoğun ağaçlandırma olan alanda rüzgâr hızı bloke olduğu için sıcaklık düşüşüde daha yavaş seyretmektedir (Yılmaz vd., 2017). Kış aylarında özellikle ibrelili bitkilerde rüzgâr hızının azaltılması ve termal konforun iyileşmesi görülürken, güneş ışığının geçirgenliğini azaltması nedeni ile dezavantajlı olduğu görülmüştür (Yılmaz vd., 2021a). Bu

nedenle bitkisel tasarım termal konforu etkileyen önemli bir faktör olarak görülmüştür. Dolayısı ile senaryo C yaz için daha avantajlı olsa da kış dönemi için kısmen avantajlı senaryo olarak değerlendirilmiştir. Bu durum, Chen vd. (2015), tarafından belirtilen; kış ve geçiş mevsimlerinde güneşlenmenin termal konforu artırdığı, gölgelemenin ise azalttığı yönündeki bulgularla örtüşmektedir.

**Senaryo D – Su Yüzeyi Eklenmiş Alan:** Su yüzeyi içeren Senaryo D’de saat 14.00’te hava sıcaklığı 1,7 °C ve PET değeri 12,8 °C olarak hesaplanmıştır. Kış döneminde su yüzeylerinin etkisinin sınırlı kaldığı, soğuk iklim koşullarında suyun donması veya boşaltılması nedeniyle mikro iklim üzerinde belirgin bir katkı sağlayamadığı görülmüştür. Nitekim, ENVI-met tabanlı önceki çalışmalarda da kış senaryolarında su yüzeylerinin belirgin bir etki yaratmadığı belirtilmiştir (Yılmaz vd., 2021a; Yılmaz vd., 2023).

**Senaryo E – Toprak Zemin:** Toprak zeminli Senaryo E’de saat 14.00’te hava sıcaklığı 1,1 °C ve PET değeri 11,8–12,0 °C aralığında hesaplanmıştır. Düşük sıcaklık ve sınırlı rüzgâr hızı, mikro iklim üzerinde yalnızca sınırlı bir etki yaratmış; bu senaryo kış dönemi termal konforunda belirgin bir iyileştirme sağlamamıştır.

**Senaryo F – Yeşil Çatı:** Yeşil çatı uygulamasını içeren Senaryo F’de saat 14.00’te PET değeri yaklaşık 11,5–11,8 °C olarak hesaplanmıştır. Rüzgâr hızı değişkenliği en yüksek düzeyde olsa da, düşük bağıl nem ve azalan PET değerleri, yeşil çatıların kış döneminde yer seviyesi termal konfor üzerindeki etkisinin sınırlı kaldığını göstermektedir.

Kış dönemi ENVI-met analizleri, senaryoların mikro iklim performanslarının değerlendirilen parametreye bağlı olarak farklılaştığını göstermektedir. Buna göre:

- **Hava sıcaklığını düşüren, bağıl nem oranını artıran senaryo:** Senaryo E (Toprak zemin)
- **Soğuk stresinin etkisini kısmen sınırlandıran senaryo:** Senaryo C (%30 ağaç artışı)
- **Rüzgâr hızını kısmen dengeleyen senaryo:** Senaryo C (%30 ağaç artışı), Senaryo B (%15 ağaç artışı)
- **Rüzgâr hızı değişkenliğinin yüksek olduğu senaryo:** Senaryo F (yeşil çatı)
- **Bağıl nemi artıran senaryo:** Senaryo D (su yüzeyi)

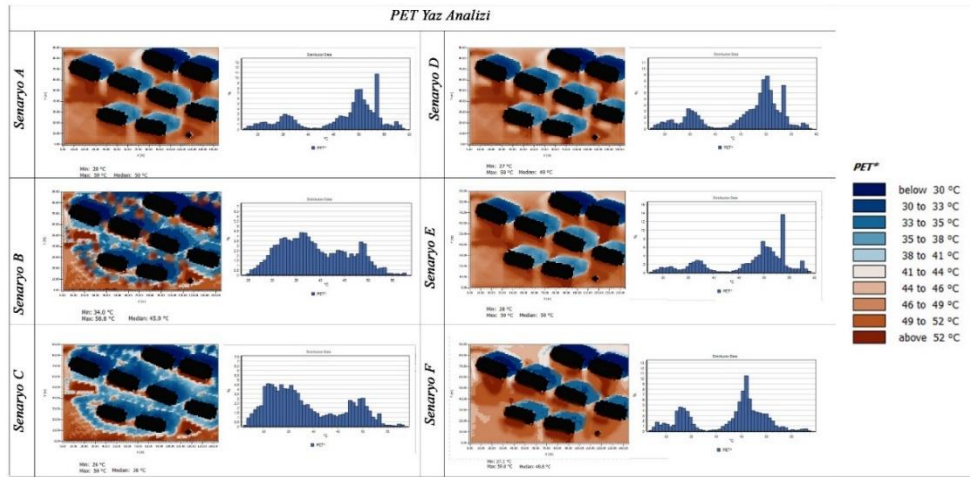
Bu sonuçlar, kış döneminde dış mekân termal konforunun iyileştirilmesi için nemi artıran ve rüzgâr hareketliliğini sınırlayan çözümlerin daha avantajlı olabileceğini; buna karşılık sert zemin yüzey düzenlemelerinin soğuk stresini artırabilecek etkiler yaratabileceğini göstermektedir. Dolayısıyla kentsel tasarım kararlarının, mevsime özgü mikro iklim hedefleri doğrultusunda, uyarlanabilir ve iklim duyarlı planlama yaklaşımlarıyla şekillendirilmesi gerekmektedir. Bu bulgular, kış döneminde kentsel açık alan tasarımında yoğun ağaçlandırma yerine, kitle–boşluk dengesine dikkat edilerek uygun alanlarda geçirgen toprak yüzeylerin oluşturulmasının daha etkili olabileceğini göstermektedir. Bu tür nem artırıcı ve rüzgârı sınırlayıcı stratejilerin, kış koşullarında dış mekân termal konforunun iyileştirilmesi açısından daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Tebriz’de yapılan araştırma bilgileride bu veriyi doğrulamaktadır (Abdi vd., 2020).

### 3.3. Senaryoların ENVI-met Analizinde Yaz ve Kış PET (°C) Değerleri

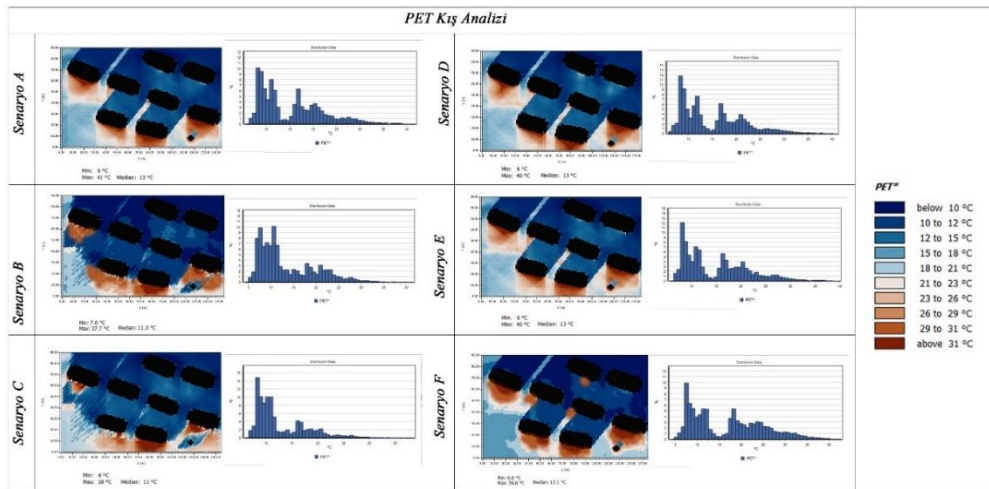
**Yaz PET Analizi (Termal Konfor, PET = °C):** Yaz ayı için Saat 14.00’te olumlu PET değeri Senaryo C’de (%30 ağaç artışı) 36,4 °C olarak hesaplanmıştır. Buna karşılık Senaryo A, E ve F’te PET değerleri 45–50 °C aralığında kalarak yüksek ısı stresini yansıtmıştır. Senaryo D’de sınırlı bir iyileşme gözlenirken (48,9 °C), Senaryo B’de rüzgâr etkisiyle PET 45,9 °C’ye düşmüş; ancak bu azalma, yoğun ağaçlandırmanın sağladığı etkiye kıyasla daha zayıf kalmıştır. Bu bulgular, PET’in yalnızca rüzgâr hızına bağlı olmadığını; gölgeleme etkisi ve ortalama ışınimsal sıcaklığın (T<sub>mrt</sub>) azaltılması ile güçlü biçimde ilişkili olduğunu göstermektedir. Nitekim önceki ENVI-met tabanlı çalışmalar, ağaç gölgelemesinin rüzgâr artışına kıyasla PET’i daha etkin biçimde düşürdüğünü ve dış mekân termal konforunun iyileştirilmesinde belirleyici rol oynadığını ortaya koymuştur (Matzarakis vd., 2010; Yılmaz vd., 2021b). Genel olarak yaz döneminde saat 14.00 gibi güneşlenmenin en yoğun olduğu zamanlarda geniş, açık ve düşük gölgelemeye sahip sert zeminli alanların yüksek PET değerleriyle ciddi ısı stresi oluşturduğunu; buna karşılık %30 ağaç artışı sağlanan, gölgeleme sürekliliği yüksek ve T<sub>mrt</sub> etkisi azaltılmış mekânların yaz koşullarında en etkili termal konfor iyileşmesini sunduğunu göstermektedir. ENVI-met senaryolarından elde edilen yaz ve kış PET (°C) değerleri ile bu değerlere ait grafikler, Şekil 6 ve Şekil 7’de sunulmaktadır.

**Kış PET Analizi (Termal Konfor, PET = °C):** Kış döneminde PET, saat 14.00’te Senaryo E’de (16,6 °C) ve Senaryo A’da (12,7 °C) elde edilmiştir. Bu değerler, açık alanlarda yüksek radyasyon yükü ve yetersiz gölgeleme koşullarında termal stresin arttığını ortaya koymaktadır. Benzer şekilde, Yavaş & Yılmaz (2019) tarafından yapılan

çalışmada da bitki örtüsünün yetersiz olduğu alanlarda PET değerlerinin önemli ölçüde yükseldiği ve gölgeleme elemanlarının termal konfor üzerinde belirleyici rol oynadığı vurgulanmıştır. Kış senaryolarında genel olarak tüm saatlere bakıldığında ise Senaryo C’de olumlu PET değerleri olduğu belirlenmiştir. Kış senaryolarında %30 bitki oranının artırılmasında özellikle ibrelili bitkilerin rüzgâr hızını kesmesinin olumlu sonuç verdiği görülmüştür. Nitekim benzer sonuçlar Yılmaz vd., (2017)’nin araştırmasında da tespit edilmiştir. Bu bulgular, kış döneminde tamamen açık ve düşük bitki yoğunluğuna sahip mekânlarda PET değerlerinin radyasyon etkisiyle yükseldiğini; buna karşılık yaklaşık %30 bitki örtüsüne sahip, özellikle ibrelili bitkilerle rüzgâr etkisi azaltılmış yarı korunaklı alanların kış koşullarında daha dengeli ve olumlu termal konfor sağladığını göstermektedir.



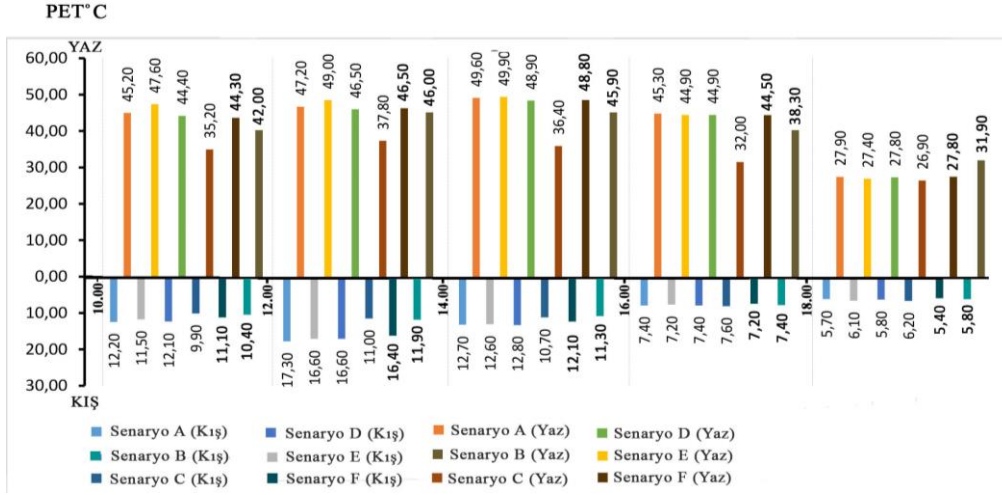
Şekil 6. ENVI-met senaryoları yaz PET analizleri ve grafikleri (ENVI-met programı ile yazarlar tarafından üretilmiştir)



Şekil 7. ENVI-met senaryoları kış PET analizleri ve grafikleri (ENVI-met programı ile yazarlar tarafından üretilmiştir)

Bu sonuçlar, kış koşullarında geçirimli yüzeylerin ve mevcut kentsel dokunun, rüzgârı kısmen sınırlayarak ve/veya bağıl nemi artırarak algılanan sıcaklığı yükseltebildiğini göstermektedir. Biyoklimatik literatürde PET’in yalnızca hava sıcaklığına değil; rüzgâr, nem ve ışınimsal koşulların birleşik etkilerine duyarlı olduğu açıkça belirtilmektedir (Matzarakis vd., 2010; Yılmaz vd., 2021b). Yılmaz ve Canan (2025), Erzurum’da nötr PET aralığının ılıman iklim kentlerine kıyasla daha düşük sıcaklıklarda oluştuğunu ve kullanıcıların soğuk iklime yüksek adaptasyon gösterdiğini ifade etmiştir. Hilalkent TOKİ analizlerinde PET değerleri 5–17 °C aralığında değişmesine karşın, bazı senaryolarda—özellikle Senaryo C’de—görece daha kabul edilebilir koşulların oluşması, bu adaptasyon etkisini desteklemektedir. Kış döneminde yoğun ağaçlandırmanın PET değerlerini düşürdüğü belirlenmiştir. Ancak senaryolar tüm mevsimler birlikte değerlendirilmiş olup, Senaryo C yaz ve geçiş mevsimlerinde sağladığı konfor artışı sayesinde yıl boyu daha dengeli bir performans sunmaktadır. Yaz ve kış ayı için senaryolara göre yapılan PET sonuçları, senaryolar arasındaki termal konfor farklarını açık biçimde ortaya koymaktadır. ENVI-met ile yapılan

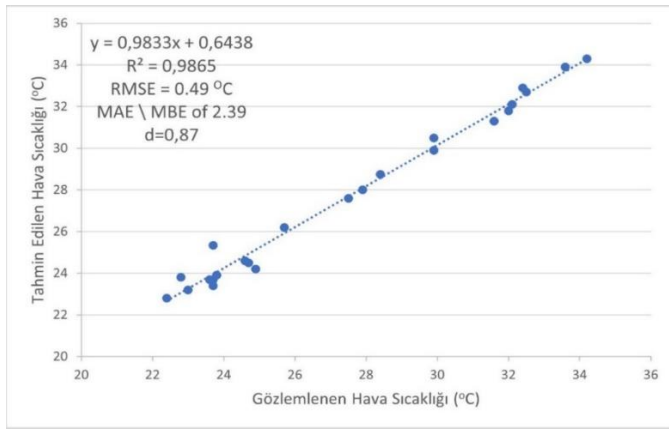
analiz sonuçlarına göre elde edilen grafik Şekil 8’de verilmiştir.



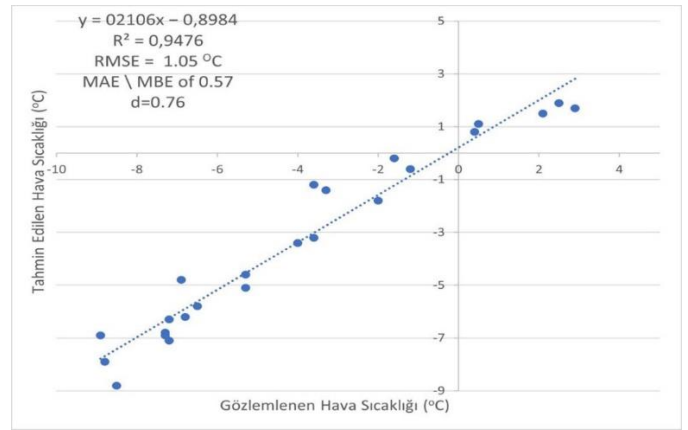
Şekil 8. Senaryolara göre ortalama yaz - kış PET değerleri grafiği (Yazarlar tarafından üretilmiştir)

### 3.4. Senaryolara Göre Elde Edilen Verilerin Doğruluk Analizi

ENVI-met modelinde, tahmin edilen ve gözlemlenen veriler arasındaki uyumu değerlendirmek amacıyla bir doğruluk analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analiz kapsamında belirleme katsayısı ( $R^2$ ), kök ortalama karesel hata (RMSE), ortalama yanlışlık hatası / ortalama mutlak hata (MBE/MAE) ve uyum indeksi (d) gibi istatistiksel göstergeler incelenmiştir. Mevcut duruma ait ölçülen ve simüle edilen hava sıcaklığı verileri yaz dönemi için değerlendirildiğinde,  $R^2$  değeri 0,9865 olarak bulunmuştur. Bu yüksek  $R^2$  değeri, gözlemlenen ve simüle edilen veriler arasında çok güçlü bir uyum olduğunu ve modelin yüksek doğrulukta sonuçlar ürettiğini göstermektedir. Ayrıca uyum indeksi (d) değeri 0,87 olarak hesaplanmış olup, bu sonuç simülasyonun yüksek güvenilirliğe sahip olduğunu doğrulamaktadır. d değerinin 1'e yaklaşması, daha güçlü bir uyuma işaret ettiğinden, elde edilen bu değer modelin doğruluğunu desteklemektedir (Şekil 9).



(a)



(b)

Şekil 9. Yaz (a) ve kış (b) doğruluk analizleri için tahmin edilen ve gözlemlenen hava sıcaklığı değerlerinin dağılım grafiği (Yazarlar tarafından üretilmiştir)

Kış dönemi için mevcut duruma ait doğruluk analizi sonuçlarında ise  $R^2$  değeri 0,9476 olarak hesaplanmıştır. Bu değer, ölçülen ve simüle edilen veriler arasında yine yüksek düzeyde bir uyum bulunduğunu göstermektedir. Buna ek olarak, d değeri 0,76 olarak belirlenmiş olup, bu sonuç kış koşulları altında simülasyonların kabul edilebilir düzeyde güvenilir ve doğru olduğunu ortaya koymaktadır. Genel olarak değerlendirildiğinde, elde edilen bulgular ENVI-met yazılımının yeterli doğruluk düzeyine sahip olduğunu teyit etmekte; bu çalışmada gerçekleştirilen analizler için uygulanabilirliğini ve simülasyon çıktılarının güvenilirliğini desteklemektedir.

#### 4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Erzurum Hilalkent TOKİ yerleşim alanı için geliştirilen senaryolar (A–F), ENVI-met simülasyonları kullanılarak yaz ve kış dönemleri için karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Dış mekân termal konforu; başta PET olmak üzere hava sıcaklığı (Ta), rüzgâr hızı (WS) ve bağıl nem (RH) parametreleri üzerinden analiz edilmiştir. Elde edilen sayısal sonuçlar, kentsel yüzey müdahaleleri ile yeşil altyapının mikroiklim üzerindeki etkisini açık biçimde ortaya koymaktadır.

**Yaz dönemi genel değerlendirmesi:** Yaz döneminde senaryolar arasındaki farklılıkların, kış dönemine kıyasla daha belirgin olduğu görülmüştür. Mevcut durumda (Senaryo A), gün ortasında ortalama hava sıcaklıkları 27–28 °C'ye ulaşırken, ortalama PET değerleri 45–50 °C aralığında gerçekleşmiş; bu durum açık alanların yüksek ısı stresi altında kaldığını göstermiştir. Senaryo B (%15 ağaç artışı) kapsamında yaz döneminde PET değerlerinde belirgin bir düşüş gözlenmiş; öğlen PET değerleri 42–46 °C aralığında gerçekleşmiştir. Artan rüzgâr hızları (ortalama 1,0–1,2 m/s) termal koşullar üzerinde olumlu bir etki yaratmış; ancak hava sıcaklığı ve ışınimsal yükün birleşik etkisinin tam anlamıyla dengelenmediği görülmüştür. %30 ağaç artışı içeren Senaryo C'nin yaz döneminde genel olarak dengeli sonuçları ürettiği görülmüştür. Ortalama hava sıcaklıkları 25–27 °C aralığında kalırken, PET değerlerinin genel olarak 35–38 °C seviyelerinde olduğu belirlenmiştir. Bu değerler, tüm senaryolar arasında en düşük ısı stresi koşullarını temsil etmektedir. Yoğun ağaçlandırmaya bağlı olarak gölgeleme ve evapotranspirasyon etkileri en üst düzeyde gerçekleşmiş ve dış mekân termal konforunda belirgin bir iyileşme sağlandığı gözlemlenmiştir. Su yüzeyi eklenen Senaryo D, yaz döneminde yerel ölçekte serinletici bir etki oluşturmuş; bununla birlikte, çalışma alanı genelinde PET değerlerinin 44–49 °C aralığında kaldığı belirlenmiştir. Artan bağıl nem, bazı saatlerde termal algıyı olumsuz yönde etkilemiş; bu durum su yüzeylerinin tek başına yaz dönemi termal konforunu iyileştirmek için yeterli bir çözüm olmadığını göstermiştir. Toprak zemin uygulaması (Senaryo E), yaz döneminde yüzey sıcaklıklarını düşürerek PET değerlerini yaklaşık 45 °C seviyelerine düşürdüğü görülmüş; ancak bu etki, ağaçlandırma temelli senaryolara kıyasla sınırlı düzeyde kalmıştır. Benzer şekilde, yeşil çatı uygulaması (Senaryo F) dış mekân termal koşulları üzerinde dolaylı bir etki yarattığı görülmüş; yaz döneminde PET değerlerinin 44–48 °C aralığında olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar %30 ağaç artışıyla sağlanan sürekli gölgelemenin, açık ve toprak zeminli alanlara göre mekânsal termal konforu belirgin biçimde iyileştirdiğini göstermektedir.

**Kış dönemi genel değerlendirmesi:** Kış döneminde tüm senaryolarda gün boyunca ortalama hava sıcaklıklarının yaklaşık –1,5 °C ile +2,0 °C arasında değiştiği belirlenmiştir. Bu aralık, analiz süresince elde edilen tüm zaman dilimlerine ait minimum–maksimum değerleri temsil etmektedir. Saat 14:00'e ait senaryo sonuçları ise gün ortası koşullarını yansıtan anlık değerler olup, Senaryo E'de 1,1 °C, Senaryo C'de 1,2 °C, Senaryo A'da 1,5 °C ve Senaryo B, D ve F'de 1,7 °C olarak belirlenmiştir. Elde edilen bu değerlerin tamamı söz konusu genel sıcaklık aralığı içerisinde yer almaktadır. Mevcut durumda (Senaryo A), gün ortasında dahi PET değerleri 12–17 °C aralığında kalmış; sabah ve akşam saatlerinde ise 5–7 °C seviyelerine düşmüştür. Bu durum, açık alanların büyük bölümünde sürekli soğuk stresinin hâkim olduğunu göstermektedir. Senaryo B (%15 ağaç artışı) kapsamında kış döneminde PET değerleri mevcut duruma kıyasla sınırlı bir iyileşme göstermiş; gün ortasında 11–12 °C, akşam saatlerinde ise 5–6 °C aralığında gerçekleşmiştir. Ancak bazı zaman dilimlerinde rüzgâr hızının 0,3 m/s ortalamasını aşması, soğuk stresin belirgin biçimde azaltılmasını engellediği görülmüştür. %30 ağaç artışı içeren Senaryo C, kış dönemi açısından genel olarak olumlu sonuçlar gösterdiği belirlenmiştir. Bu senaryoda gün ortasında ortalama PET değerleri 10–11 °C, sabah ve akşam saatlerinde ise 6–7 °C aralığında seyretmiş; rüzgâr hızlarının çoğunlukla 0,2 m/s'de kaldığı görülmüştür. Bitki örtüsünün rüzgâr kırıcı etkisi sayesinde açık alanlardaki mikroiklim etkisinin daha dengeli hale geldiği ve soğuk stresin şiddeti diğer senaryolara kıyasla azaldığı görülmüştür. Buna karşılık, Senaryo D (su yüzeyi) kış döneminde olumsuz performans gösteren senaryolardan biri olmuştur. Sabah ve akşam saatlerinde PET değerleri 5–6 °C'ye kadar düşmüş; bağıl nemin %80'in üzerine çıkması termal algıyı daha da olumsuz etkilediği belirlenmiştir. Bu bulgular, Erzurum gibi soğuk iklim kentlerinde su yüzeylerinin kış döneminde termal konforu azaltıcı bir unsur olabileceğini göstermektedir. Senaryo E'de kış döneminde PET değerleri genel olarak 6–7 °C aralığında gerçekleşmiş ve mevcut duruma göre sınırlı bir iyileşme sağlandığı belirlenmiştir. Ancak ağaçlandırma içermemesi nedeniyle bu iyileşme sınırlı kalmıştır. Yeşil çatı senaryosu (Senaryo F) ise kış döneminde sokak seviyesinde belirgin bir PET artışı yaratmamış; ortalama değerler 5–6 °C civarında seyretmiştir. Bu bulgular, rüzgârı kesen yoğun ağaç dokusunun açık alanlarda soğuk stresini azalttığını; su yüzeyi ve yeşil çatı gibi uygulamaların ise sokak ölçeğinde sınırlı düzeyde etki gösterdiğini ortaya koymaktadır.

**Genel değerlendirme ve öneriler:** Yaz ve kış dönemleri birlikte değerlendirildiğinde, %30 bitki oranına sahip Senaryo C, Hilalkent TOKİ yerleşimi için yıl boyu dengeli ve sürdürülebilir termal konfor koşullarını sağlayan senaryo olarak öne çıkmaktadır. Yoğun ağaçlandırma senaryosunda PET değerlerinde belirgin bir azalma gözlenmiş

olup, bu durum termal konfor açısından olumlu bir etki olarak değerlendirilmiştir. Diğer senaryolar belirli saatlerde avantaj sağlasa da genel olarak bir süreklilik sunamamıştır. Senaryo C, yazın ısı stresini anlamlı biçimde azaltırken, kışın da rüzgâr etkisini sınırlayarak soğuk stresin şiddetini düşürmüştür. Bu çalışma kapsamında elde edilen bulgular doğrultusunda, Erzurum Hilalkent TOKİ ve benzeri soğuk iklim yerleşimleri için aşağıdaki öneriler geliştirilmiştir:

- Yeni ve mevcut konut alanlarında ağaçlandırma oranını artıracak kentsel tasarım kararları alınmalıdır.
- Ağaçlandırma stratejileri, rüzgârı tamamen kesmeyen ancak hızını düşüren yarı geçirgen türler düzenlemelerde tercih edilmelidir. Yada ibrelili ve yapraklı kullanımında peyzaj plantasyon tekniklerine uyulmalıdır.
- Su yüzeyleri için yalnızca yaz kullanımını destekleyecek sınırlı ve kontrollü alanlarda önerilmelidir.
- Toprak içerikli olan geçirgen bazlı yüzey kaplama malzemeleri yaygınlaştırılmalıdır.

Hilalkent TOKİ özelinde termal konforun iyileştirilmesi çalışmasında, yüzey müdahalelerinden ziyade doğrudan sıcaklık ve rüzgârı kontrol eden doğru kurgulanmış ağaçlandırma stratejilerine bağlı olduğu sonucu elde edilmiştir.

**Çıkar Çatışması Beyanı:** Yazarlar bu çalışmada herhangi çıkar çatışması bulunmadığını beyan eder.

**Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı:** Etik kurul izni ve/veya yasal/özel izin alınmasına gerek olmayan bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

**Destek Beyanı:** Çalışma kapsamında herhangi bir kurum veya kuruluştan destek alınmamıştır.

**Araştırmacıların Katkı Oranı Beyanı:**

**Gizem Dedeoğlu:** Kavramsallaştırma (eşit), metodoloji (eşit), yazma - orijinal taslak (ana), yazma - gözden geçirme & düzenleme (eşit), görselleştirme (ana), kaynaklar (eşit), araştırma (eşit), biçimsel analiz (ana), veri iyileştirme (eşit), finansman temini (eşit), proje yönetimi (eşit), yazılım (ana), süpervizyon (ana), doğrulama (eşit).

**Sevgi Yılmaz:** Kavramsallaştırma (eşit), metodoloji (eşit), yazma - orijinal taslak (destek), yazma - gözden geçirme & düzenleme (eşit), görselleştirme (destek), kaynaklar (eşit), araştırma (eşit), biçimsel analiz (destek), veri iyileştirme (eşit), finansman temini (eşit), proje yönetimi (eşit), yazılım (destek), süpervizyon (destek), doğrulama (eşit).

## TEŞEKKÜR

Bu makalenin içeriğinin oluşturulmasında çeviri yapma ve bazı ifadelerin iyileştirilmesi amacıyla Chat-GPT 5.2 yapay zekâ aracı 20 Ocak 2026 tarihinde erişilerek kullanılmıştır. Yapay zekâ aracının kullanımı ile çalışmaya cümlelerin kısaltılması ve ifadelerin iyileştirilmesi yönünde katkı sağlanmıştır.

## KAYNAKLAR

- Abdi, B., Hami, A., & Zarehaghi, D. (2020). Impact of small-scale tree planting patterns on outdoor cooling and thermal comfort. *Sustainable Cities and Society*, 56, 102085. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102085>
- Ali-Toudert, F., & Mayer, H. (2006). Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. *Building and environment*, 41(2), 94-108. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.01.013>
- Battista, G., Carnielo, E., & Vollaro, R. D. L. (2016). Thermal impact of a redeveloped area on localized urban microclimate: A case study in Rome. *Energy and Buildings*, 133, 446-454. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.10.004>
- Banerjee, S., Pek, R. X. Y., Yik, S. K., Ching, G. N., Ho, X. T., Dzyuban, Y., ... & Chow, W. T. (2024). Assessing impact of urban densification on outdoor microclimate and thermal comfort using ENVI-met simulations for Combined Spatial-Climatic Design (CSCD) approach. *Sustainable Cities and Society*, 105, 105302. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105302>

- Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M., & Pullin, A. S. (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and urban planning*, 97(3), 147-155. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.05.006>
- Bruse, M., & Fleer, H. (1998). Simulating surface–plant–air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environmental modelling & software*, 13(3-4), 373-384. [https://doi.org/10.1016/s1364-8152\(98\)00042-5](https://doi.org/10.1016/s1364-8152(98)00042-5)
- Chan, S. Y., & Chau, C. K. (2021). On the study of the effects of microclimate and park and surrounding building configuration on thermal comfort in urban parks. *Sustainable Cities and Society*, 64, 102512. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102512>
- Chen, L., Wen, Y., Zhang, L., & Xiang, W. N. (2015). Studies of thermal comfort and space use in an urban park square in cool and cold seasons in Shanghai. *Building and environment*, 94, 644-653. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.10.020>
- Eingrüber, N., Domm, A., Korres, W., & Schneider, K. (2025). Simulation of the heat mitigation potential of unsealing measures in cities by parameterizing grass grid pavers for urban microclimate modelling with ENVI-met (V5). *Geoscientific Model Development*, 18(1), 141-160. <https://doi.org/10.5194/gmd-18-141-2025>
- Feng, L., Shuai, L., Zhou, Y., Zhang, X., & Sun, J. (2024). Improving the green space arrangement in residential areas from the perspective of tree leaf temperature utilizing scenario simulation in ENVI-met. *Science of The Total Environment*, 918, 170650. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170650>
- Google Maps <https://maps.app.goo.gl/SzoShGoTA78WQpTB7> linkinden 20.01.2026 tarihinde erişilmiştir.
- Harmel, R. D., Smith, P. K., 2007. Consideration of measurement uncertainty in the evaluation of goodness-of-fit in hydrologic and water quality modeling. *Journal of Hydrology*, 337(3-4), 326-336. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.01.043>
- IPCC. (2023). Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/> adresinden 01.05.2026 tarihinde alınmıştır.
- Irmak, M. A., Yılmaz, S., Mutlu, E., & Yılmaz, H. (2018). Assessment of the effects of different tree species on urban microclimate. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(16), 15802-15822. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1697-8>
- Irmak, M. A., Yılmaz, S., Mutlu, E., & Yılmaz, H. (2020). Analysis of different urban spaces on thermal comfort in cold regions: a case from Erzurum. *Theoretical & Applied Climatology*, 141. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03289-y>
- Jung, S. J. (2024). Pedestrian-path pavement materials to improve microclimate and air quality on current pedestrian paths. *Urban Climate*, 55, 101973. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.101973>
- Köppen, W. P., & Geiger, R. (1968). Klima der Erde: Climate of the Earth. *Perthes*. <https://doi.org/10.1515/9783111491530>
- Lee, H., Mayer, H., & Chen, L. (2016). Contribution of trees and grasslands to the mitigation of human heat stress in a residential district of Freiburg, Southwest Germany. *Landscape and Urban Planning*, 148, 37-50. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.12.004>
- Li, J., Zhai, Z., Ding, Y., Li, H., Deng, Y., Chen, S., & Ye, L. (2023). Effect of optimal allocation of urban trees on the outdoor thermal environment in hot and humid areas: a case study of a university campus in Guangzhou, China. *Energy and Buildings*, 300, 113640. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113640>
- Lin, C., & Zhang, S. (2024). Impact of green roofs and walls on the thermal environment of pedestrian heights in urban villages. *Buildings*, 14(12), 4063. <https://doi.org/10.3390/buildings14124063>
- Matzarakis, A., Mayer, H., & Iziomon, M. G. (1999). Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. *International Journal of Biometeorology*, 43, 76-84. <https://doi.org/10.1007/s004840050119>

- Matzarakis, A., Rutz, F., & Mayer, H. (2010). Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: basics of the RayMan model. *International journal of biometeorology*, 54(2), 131-139. <https://doi.org/10.1007/s00484-009-0261-0>
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM)., (2020). Turkish State Meteorological Service (MGM). <https://www.mgm.gov.tr/> adresinden 01.01.2024 tarihinde alınmıştır.
- Migliari, M., Chesne, L., Postal, A., Despax, J., Dogbo, A. M., Ulanowski, Y., ... & Baverel, O. (2025). Street albedo distribution's impacts on air temperature and outdoor thermal sensation during heat and cold waves. *Urban climate*, 63, 102551. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2025.102551>
- Middel, A., Chhetri, N., & Quay, R. (2015). Urban forestry and cool roofs: Assessment of heat mitigation strategies in Phoenix residential neighborhoods. *Urban Forestry & Urban Greening*, 14(1), 178-186. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2014.09.010>
- Morakinyo, T. E., Kong, L., Lau, K. K. L., Yuan, C., & Ng, E. (2017). A study on the impact of shadow-cast and tree species on in-canyon and neighborhood's thermal comfort. *Building and environment*, 115, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.01.005>
- Nath, B., Ni-Meister, W. & Özdoğan, M. (2021). Fine-scale urban heat patterns in new york city measured by ASTER satellite-the role of complex spatial structures. *Remote Sensing*, 13(19), 3797. <https://doi.org/10.3390/rs13193797>
- Rajagopalan, P. (2020). Urban heat island and mitigation in tropical India. *Urban heat island (UHI) mitigation: Hot and humid regions*, 183-203. [https://doi.org/10.1007/978-981-33-4050-3\\_9](https://doi.org/10.1007/978-981-33-4050-3_9)
- Roy, T.B., Middey, A., & Krupadam, R.J. (2025). Unveiling the microclimate: A comprehensive review of tools, techniques, and future directions for sustainable cities. *Build. Environ.* 2025, 274, 112726. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.112726>
- Qin, H., & Zhou, B. (2025). Optimizing vegetation configurations for seasonal thermal comfort in campus courtyards: An ENVI-Met study in hot summer and cold winter climates. *Plants*, 14(11), 1670. <https://doi.org/10.3390/plants14111670>
- Salata, F., Golasi, I., de Lieto Vollaro, R., & de Lieto Vollaro, A. (2016). Urban microclimate and outdoor thermal comfort. A proper procedure to fit ENVI-met simulation outputs to experimental data. *Sustainable Cities and Society*, 26, 318-343. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.07.005>
- Sarı, E. N., Nouri, A. S., Ekşi, M., & Matzarakis, A. (2025). Assessing thermo-physiological effects of different tree species within the inner regions of the urban canyon; confronting in-situ extreme heat stress in Istanbul during the El-Niño summer of 2023. *International Journal of Biometeorology*, 69(7), 1663-1686. <https://doi.org/10.1007/s00484-025-02922-7>
- Sert, E. B. (2022). The impact of urban green areas on the temperature increase causing by the surface materials and a future scenario. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v10i11.2237-2242.5578>
- Skelhorn, C., Lindley, S., & Levermore, G. (2014). The impact of vegetation types on air and surface temperatures in a temperate city: A fine scale assessment in Manchester, UK. *Landscape and Urban Planning*, 121, 129-140. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.09.012>
- Tang, L., Zheng, W., Wu, Y., Tang, L., & Zhao, Y. (2025). Evaluating the cooling performance of vegetation combined with a fountain in horizontal and vertical urban environments. *Building and Environment*, 267, 112192. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112192>
- Teshnehdel, S., Gatto, E., Li, D., & Brown, R. D. (2022). Improving outdoor thermal comfort in a steppe climate: Effect of water and trees in an urban park. *Land*, 11(3), 431. <https://doi.org/10.3390/land11030431>
- United Nations (UN). (2018). *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision*. United Nations Department of Economic and Social Affairs. <https://www.un.org/en/desa/2018-revision-world-urbanization-prospects> adresinden 01.05.2026 tarihinde alınmıştır.
- Xie, W., Yang, H., Luo, P., Li, H., Zhang, S., Huang, Y., ... & Yang, H. (2025). Hydrological connectivity creates additional cooling effects for urban wetland complexes. *Urban Climate*, 61, 102470. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2025.102470>

- Xu, X., Liu, S., Sun, S., Zhang, W., Liu, Y., Lao, Z., ... & Zhu, J. (2019). Evaluation of energy saving potential of an urban green space and its water bodies. *Energy and Buildings*, 188, 58-70. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.02.003>
- Wang, X., Cheng, H., Xi, J., Yang, G., & Zhao, Y. (2018). Relationship between park composition, vegetation characteristics and cool island effect. *Sustainability*, 10(3), 587. <https://doi.org/10.3390/su10030587>
- Wang, Y., Zhou, D., Wang, Y., Fang, Y., Yuan, Y., & Lv, L. (2019). Comparative study of urban residential design and microclimate characteristics based on ENVI-met simulation. *Indoor and Built Environment*, 28(9), 1200-1216. <https://doi.org/10.1177/1420326x19860884>
- Willmott, C. J., 1982. Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63(11), 1309-1313. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1982\)063<1309:scoteo>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1982)063<1309:scoteo>2.0.co;2)
- World Meteorological Organization (WMO). (2024). State of the Global Climate 2023. WMO-No. 1312. <https://wmo.int/publication-series/state-global-climate-2023> adresinden 01.05.2026 tarihinde alınmıştır.
- Yavaş, M., & Yılmaz, S. (2019). Soğuk iklim bölgesinde kentsel mikro iklimin değerlendirilmesi: Erzurum kentsel dönüşüm alanı örneği. *Artium*, 7(2), 103-114. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/785507>
- Ye, Z., Liu, J., & Huang, Z. (2025). Identifying the best combination of vegetation and paving materials to improve the outdoor thermal comfort in a campus courtyard. *Scientific Reports*, 15(1), 20602. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-05742-2>
- Yılmaz, H., & Irmak, M. A. (2004). Erzurum kenti açık-yeşil alanlarında kullanılan bitki materyalinin değerlendirilmesi. *Ekoloji*, 13(52), 9-16.
- Yılmaz, S., & Canan, F. (2025). Establishing the thresholds for outdoor thermal comfort in cold climate urban areas. *Energy and Buildings*, 342, 115861. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115861>
- Yılmaz, S., Yılmaz, H., Irmak, M. A., Kuzulugil, A. C., & Koç, A., (2017). Effects of urban *Pinus sylvestris* (L.) plantation sites on thermal comfort. İçinde International Society for Horticultural Science (ed.), *International Symposium on Greener Cities for More Efficient Ecosystem Services in a Climate Changing World Proceedings Book*, Bologna, Italy, September 12–15, 2017, Acta Horticulturae 1215: 39–44. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2018.1215.6>
- Yılmaz, S., Külekçi, E. A., Mutlu, B. E., & Sezen, I. (2021a). Analysis of winter thermal comfort conditions: street scenarios using ENVI-met model. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(45), 63837-63859. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12009-y>
- Yılmaz, S., Mutlu, B. E., Aksu, A., Mutlu, E., & Qaid, A. (2021b). Street design scenarios using vegetation for sustainable thermal comfort in Erzurum, Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(3), 3672-3693. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10555-z>
- Yılmaz, S., Kurt, A., & Gölcü, M. (2023). ENVI-met simulations of the effect of different landscape design scenarios on pedestrian thermal comfort: Haydar Aliyev Street. *Yuzuncu Yıl University Journal of Agricultural Sciences*, 33(3), 338-353. <https://doi.org/10.29133/yyutbd.1265752>
- Yılmaz, S., Menteş, Y., & Jamei, E. (2025). Investigating the effect of blue-green infrastructure on thermal condition case study: Elazığ, Turkey. *Land*, 14(4), 891. <https://doi.org/10.3390/land14040891>
- Yücekaya, M., Aklibaşında, M., & Günaydın, A. S. (2022). Suyun iklimsel etkisinin ENVI-met simülasyonu ile analizi. *Online Journal of Art & Design*, 10(4). <https://adjournal.net/articles/104/10420.pdf>
- Yücekaya, M., & Uslu, C. (2020). An analytical model proposal to design urban open spaces in balance with climate: A case study of Gaziantep. *Land Use Policy*, 95, 104564. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104564>
- Yuca, N., Alp, Ş., Yılmaz, S., Jamei, E., & Qaid, A. (2025). Designing for cooler street: Case study of Van city. *Land*, 14(12), 2313. <https://doi.org/10.3390/land14122313>