

## ARAŞTIRMA MAKALESİ

## İstanbul'da Şehir Isı Adası ve Kentsel Gelişim Senaryolarına Bağlı Değişimi

Deniz DİREN ÜSTÜN<sup>1</sup>, Ebru KAPLAN<sup>2</sup>, Yurdanur ÜNAL<sup>3</sup>

Yazışma yazarı:  
Deniz DİREN ÜSTÜN,  
dirend@itu.edu.tr

Referans:  
Diren Üstün, D., Kaplan, E. ve Ünal, Y. (2022), İstanbul Şehir Isı Adası ve Kentsel Gelişim Senaryolarına Bağlı Değişimi, Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik, 23(1) 55-68.

Makale Gönderimi : 7 MART 2022  
Online Kabul : 8 NİSAN 2022  
Online Basım : 30 MAYIS 2022

<sup>1</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi, Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Meteoroloji Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye. ORCID:0000-0003-2261-2772

<sup>2</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi, Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Meteoroloji Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye. ORCID:0000-0003-4320-5826

<sup>3</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi, Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Meteoroloji Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye. ORCID:0000-0003-2006-1372

**Özet** Kentleşme ve küresel iklim değişimi çevre, toplum ve ekonomi üzerindeki en önemli insan etkilerindedir. Şehir ısı adasının (ŞIA) şiddeti, sıcak hava dalgalarının ve yağışların şiddetinin ve sıklığının artmasına neden olmaktadır. Bu çalışmada İstanbul'un şehir ısı adası dağılımı şehir iklim modeli MUKLIMO\_3 ile analiz edilmiştir. İlk olarak, şehirleşme sonucunda arazi kullanımındaki değişimlerin ve buna bağlı olarak kırsal ve şehir arasındaki atmosfer dolaşımındaki değişimin ŞIA şiddetine etkisi incelenmiştir. İstanbul'da ŞIA etkisinin en şiddetli olduğu mevsim yaz mevsimidir. Bu nedenle ŞIA dağılımının analizleri için şehir iklim modeli yaz mevsimi ortalama meteorolojik değişkenleri ile çalıştırılmıştır. İstanbul'da şehirleşmenin hiç olmadığı ve şehir alanlarının ormanlık alanlar ile kaplı olduğu varsayımsal durumdaki sıcaklık değişimleri incelenmiştir. Her ne kadar günümüz koşullarındaki gözlemsel ve modelleme çalışmaları İstanbul'daki ŞIA şiddetinin 3 °C civarında olduğunu gösterse de model simülasyonları şehirleşme ile değiştirilen kırsal ve şehir arasındaki atmosfer dolaşımının da etkisiyle 6 °C ye kadar sıcaklık farkı olabileceğini göstermiştir. Ayrıca, İstanbul için yatay ve düşey iki farklı gelişim senaryosuna göre ŞIA şiddetindeki değişimler incelenmiştir. Yatay gelişim senaryosu boş arazilerin yapılaşmasını baz almaktadır ve sıcaklık artışlarının yalnızca yapılaşmanın olduğu alanlar ile sınırlı kalmayıp civarında da artacağını ve bu artışların 3 °C'ye ulaşabileceğini göstermektedir. Buna karşın alçak ve orta yüksekliğe sahip binaların 2 kat artması ile tasarlanan düşey gelişme senaryosu sıcaklıklardaki artışları 1 °C civarında tahmin etmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Şehir ısı adası, İstanbul, şehir iklim modeli, şehir gelişim senaryoları

## Urban Heat Island in Istanbul and Its Variations for Urban Development Scenarios

**Abstract** Urbanization and global climate change are two of the most important human impacts on environment, society, and economy. The intensity of the urban heat island (UHI) causes an increase in the intensity and frequency of heat waves and precipitation. In this study, the urban heat island distribution of Istanbul was analyzed by using the urban climate model MUKLIMO\_3. First of all, UHI intensity variations due to the land use and the local atmospheric circulation between the urban and rural areas are examined. In Istanbul, the UHI intensity is at the largest in summer season. For this reason, the urban climate model is driven by the summer mean meteorological observations for the analysis of the UHI distribution over Istanbul. Temperature changes in Istanbul for the hypothetical situation in which there is no urbanization and the urban areas are covered with forest areas, are simulated. Although observational and modeling studies in today's land-use conditions show that the intensity of UHI in Istanbul is around 3 °C, our results indicate that temperature differences can be 6 °C due to the effect of the atmospheric circulation changes induced by urbanization between the urban and rural areas. In addition, the changes in the UHI intensity are investigated for two different horizontal and vertical development scenarios. The horizontal development scenario is based on the urbanization over open land use areas and shows that the temperature increases will not only be limited to the areas where there is new urbanization, but will also increase around it, and these increases can reach 3 °C. On the other hand, the model simulations based on the vertical development scenario designed with a 2-floor increase in low and medium height buildings estimates the increase in temperatures around 1 °C.

**Keywords:** Urban heat island, Istanbul, urban climate model, urban development scenarios

## 1. Giriş

Şehirleşme ve iklim değişimi arasındaki etkileşim çift yönlüdür. Büyüyen, gelişen ve hızlı değişen şehirlerde iklim değişimi etkilerine yönelik sürdürülebilir stratejiler üretilmesi, planlama ve gelişim açısından oldukça önemlidir. Bu bağlamda şehirleşmenin iklim değişimi etkilerine yönelik hazırlanan bilimsel çalışmalar karar vericilerin ve uygulayıcıların nezdinde değer taşımaktadır. Günümüzde dünya nüfusunun %50'den fazlası şehirlerde yaşamaktadır ve bu oranın gelecekte artması beklenmektedir (UNWUP, 2018). Dolayısıyla şehirleşmenin iklim değişimi üzerindeki etkilerinin de artacağı öngörülebilir. Modern yaşam koşulları insan hayatını kolaylaştırıyor olsa da plansız ve yoğun şehirleşme beraberinde pek çok sorun getirmektedir.

İnsan faaliyetinin büyük bölümünün gerçekleştiği şehirlerde; şehirlerin küresel ısınmada oynadığı rolün anlaşılması büyük önem taşımaktadır. Birleşmiş Milletler Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli'nin Altıncı Değerlendirme Raporu sera gazları ve aerosol emisyonlarından kaynaklanan antropojenik etkilerin mevcut küresel ısınmanın en önemli nedeni olduğunu belirtmektedir. İklim değişiminin en ciddi etkilerinden biri aşırı (ekstrem) hava olaylarının sıklık ve şiddetinde gözlenen artıştır. Şehir ısı adasının etkileri; genellikle kasırgalar, hortumlar veya ani şiddetli yağışlar gibi felaket niteliğinde olmasa da yüzey yakınında sıcaklığı artırması nedeniyle özellikle sıcak hava dalgaları sırasında halk sağlığı için trajik sonuçlar yaratabilir. Örneğin, 2003 ve 2010 yıllarında Avrupa'da yaşanan sıcak hava dalgaları, on binlerce kişinin yaşamını yitirmesine yol açmıştır. Sıcak hava dalgaları gibi aşırı hava olaylarının şehirler üzerinde çok daha şiddetli hissedildiği ortaya konmuştur (Schär ve diğ., 2004; Robine ve diğ., 2008; Barriopedro ve diğ., 2011; Fischer ve diğ., 2012). Şehirleşen bölgelerde doğal arazi örtüsünün yerini alan beton, asfalt gibi geçirimsiz yüzeyler şiddetli yağışlarda emilimi azaltacağından sellere sebep olabilirken; trafik, evsel ısıtma gibi emisyon kaynakları da hava kirliliğini arttıran etkenlerin başında gelir. Yeşil alanların azalması, havanın ve su kaynaklarının kirlenmesi, hâkim rüzgâra dik konumlandırılan yüksek yapılarla şehrin havalanmasının engellenmesi hem iklim değişimine hem de şehirleşmeye bağlı olarak yağış paternindeki değişimler ve daha sık deneyimlenen ekstrem sıcaklık değerleri pek çok şehrin karşı karşıya olduğu başlıca problemlerdir. Böylece şehirleşme, pek çok açıdan lokal iklimi etkileyen bir faktör olarak ortaya çıkar. Şehir yüzeyleri, farklı ısı kapasitelerinin de etkisiyle bölgede yer alan doğal hava sirkülasyonunu bozulmasında etkili olur. Şehirleşmenin yerel iklim ve sirkülasyon üzerindeki etkisinin anlaşılabilmesi için yer-atmosfer etkileşiminin ve atmosferik sınır tabaka içerisindeki fiziksel ve dinamik süreçlerin araştırılması gerekmektedir. Dickinson tarafından 1995 yılında yayımlanan araştırma makalesinde belirtildiği gibi yer-atmosfer etkileşiminin temel unsurları, bu iki sistem arasındaki nem, momentum ve enerji alışverişidir. Başlarda bu etkileşimin mikro-meteoroloji, tarım ve orman meteorolojisi, atmosferik sınır tabaka ve hidroloji ile ilgili alanlarda önemi ele alınsa da 1990'lı yıllarda biyojeokimyasal döngü, iklim, mezo-ölçek meteoroloji ve sayısal hava tahmini çalışmaları için de önemli olduğu ortaya konmuştur (Dickenson, 1995).

Şehirleşme pek çok meteorolojik parametreyi etkilemektedir. Örneğin yağışın şehirleşme ile değişimi araştırılırken, literatürdeki örnekler şehirleşmenin, yaz sezonunda yağış miktarını ve sıklığını özellikle şehrin rüzgâr altı kesiminde artırdığı sonucu ile karşımıza çıkmaktadır. Şehirleşme sebebiyle oluşan ısınma konvektif yağış sıklığını ve şiddetini artırabilmektedir. (Wang ve diğ., 2009). Ayrıca şehirleşmenin bulut mikrofiziğine etkileri araştırıldığında antropojenik faaliyetler sonucu açığa çıkan aerosollerin bulut çekirdeği işlevi görerak yağışı artırdığı belirtilen

çalışmalar bulunmaktadır (Han ve Baik, 2008). Şehirleşmenin, dolayısıyla geçirimsiz yüzeylerin yoğun olduğu bölgelerde yağış sonucu taşkınların ve sel riskinin daha yüksek olduğu da bilinmektedir.

Şehirleşme, yüzeyin aerodinamik karakterini değiştirmesinden ötürü özellikle yer seviyesi yakınlarında rüzgârı etkilemektedir. Şehirleşmenin yarattığı sürtünme etkisi sebebiyle azalan rüzgâr şiddeti, kirleticilerin birikmesine neden olabildiği gibi bazı durumlarda şehir ısı adası etkisini de güçlendirebilmektedir (Lee ve diğ., 2014; Ünal ve diğ., 2020). Zhou ve diğ. (2014), şehirleşmenin yatay ve düşeyde rüzgârı engelleyerek şehir ısı adası etkisini güçlendirdiğini belirtmiştir. Ünal ve diğ. (2019) rüzgârın artışı ile şehir ısı adası şiddetindeki değişimleri inceledikleri çalışmada, rüzgârın sakin koşullardan 4-5 m/s şiddetine artmasının gündüz şehir ısı adası yoğunluğunu az da olsa artırdığı ancak rüzgâr şiddeti daha da yükseldiğinde şehir ısı adasında azalma olduğunu belirtmişlerdir. Öte yandan, şehir ısı adası gece yoğunluğunun, rüzgâr hızı 5-6 m/s'ye ulaşana kadar sürekli aynı oranda azaldığı vurgulanmıştır. Foley ve diğ. (2005) şehirlerdeki arazi kullanım değişiminin canlı yaşamına etkisi üzerine hazırladıkları çalışmada, şehirleşmenin su ve radyasyon dengelerini değiştirdiğini ayrıca değişen rüzgârın hava kalitesini etkilediğini ve kirlenici yoğunluğunu artırdığını belirtmişlerdir.

İklim değişiminin ve şehirleşmenin etkilerinden bir diğeri de yüzey yakınındaki hava sıcaklığının artışıdır. Şehirlerde sıcaklıkların artışı yalnızca küresel iklim değişimi ile değil, şehir ısı adasının da etkisiyle meydana gelir (Oke, 1995). Şehir ısı adası şehrin üzerinde sınır tabakayı etkiler ve atmosferin sirkülasyonunu değiştirir. Bu sebeple hava kalitesi ve ekolojik koşullar etkilenir (Tayanç ve Toros, 1997; Kleerekoper ve diğ., 2012). Aynı zamanda şehir ısı adası canlılar üzerinde ısı stresini artırır ve şehir ortamındaki su döngüsünü etkiler (Robaa, 2003). Büyüyen şehirler ve bunun bir sonucu olarak artan şehir ısı adası etkisi, iklim değişiminin olumsuz etkilerini şiddetlendirir. Şehir alanlarında civarda yer alan kırsal bölgelere göre yüzey ve atmosfer sıcaklıklarının daha yüksek olduğu gerçeği ilk defa Luke Howard tarafından 1800'lü yıllarda ortaya konmuştur (Stewart, 2011). Bu olaya şehir ısı adası etkisi denir. Şehirleşmenin artışıyla şehir ısı adasının etkisi de gün geçtikçe önem kazanmıştır. Şehir ısı adası etkisi, sıcak hava dalgalarının etkisini de arttırmaktadır, böylece iklim değişimiyle doğrudan alakalıdır.

Şehir ısı adaları, pek çok meteorolojik değişkeni, atmosferin lokal sirkülasyonunu ve yerel iklimi etkileyen önemli bir olaydır. İnsan kaynaklı faaliyetlerden oldukça etkilenen şehirlerde doğru stratejilerin ve planlamaların yapılabilmesi ve iklim değişimi etkilerinin anlaşılabilmesi için şehir ısı adası etkisinin araştırılması büyük önem taşır. Özellikle iklim değişimi ile birlikte şehirleşmenin yarattığı atmosferik değişimlerin aşırı hava olaylarının sıklığını ve şiddetini artırarak daha büyük ekonomik zararlara sebep olduğu bilindiğinden, şehirleşme sonucu yaşanan bu değişimlerin iyi anlaşılması, alınacak önlemler ve şehir planlamaları açısından oldukça gereklidir. Zira bu değişimler şehrin yapısı, büyüklüğü ve yerleşim alanının konumuna göre farklılaşmaktadır.

Bu çalışmada, İstanbul'un Boğaz bölgesine odaklanılarak şehirleşmenin sıcaklıklar üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Mikro ölçek iklim modeli yardımıyla şehir ısı adası analizi yapılmış ve çeşitli senaryolar ile şehir ısı adası şiddetindeki değişimler ortaya konmuştur.

## 2. Şehir Isı Adası

Şehir ısı adaları, genellikle şehir merkezi ile kırsal alanlar arasındaki aşağı atmosfer katmanındaki sıcaklık farkının doğrusal bir şekilde azalmasıyla karakterize edilir. Yüksek binalar ve dar sokakların varlığı, yeşil alanların azlığı nedeniyle yoğun kentleşme alanları kırsala göre daha yüksek sıcaklıklara maruz

kalır. Örneğin, kentsel yoğunluklu farklı yerleşim alanlarına sahip olan şehirde, şehir ısı adasının dağılımının çok merkezli olduğu görülebilir.

Şehir ısı adası, tropikal ve ekvatorial alanların yanı sıra orta enlemde yüksek enlemlere kadar çeşitli coğrafi konumlardaki şehirlerde gözlemlenmektedir. Şiddeti mevsime ve günün zamanına göre değişir. Genellikle öğleden sonra veya akşamın erken saatlerinde artan ve geceleri maksimuma ulaşan günlük bir döngüyü takip eder. Yoğunluğu şafaktan sonra azalmaya başlar ve genellikle sabah saatlerinde minimuma ulaşır. Yağmurlu, bulutlu veya rüzgârlı mevsimlerde, ŞİA daha zayıf olabılırken, antisiklonik koşullar için bunun tersi geçerlidir. Genel olarak şiddeti yaz aylarında kış aylarına göre daha fazladır. ŞİA her şehrin coğrafi konumu, topoğrafyası, yapısı ve bölgesel akış özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle ŞİA analizleri şehirlere özgü olarak yapılmalıdır.

Şehir ısı adası etkisi yüzeysel ve atmosferik olarak iki farklı olguyu tanımlamaktadır. Yüzeysel sıcaklıkları ile ilişkili olan yüzeysel ısı adasını gözlemlemek için yoğunlukla uydu verilerinden ve kızılötesi sensörlerden yardım alınmaktadır. Yüzeysel ısı adası azami şiddetini yaz günleri öğlen ve öğleden hemen sonra günün en sıcak saatlerinde gösterir. Toprak bir yüzey ile asfalt bir yüzeyin sıcaklık farkları 10 °C mertebesinde farklılık gösterebilir. Öte yandan atmosferik ısı adaları 2 m'de ölçülen sıcaklıklar ile ilişkilidir. Atmosferik ısı adaları her mevsim gözlenirken maksimum şiddetini bulutsuz ve sakin rüzgâr koşullarının hâkim olduğu bir günde, güneş battıktan yaklaşık 2 saat sonra gösterir. Bu durum, şehir yüzey materyallerinin ısı tutma kapasitelerinin doğal yüzeylerden farklı olmasından kaynaklanır. Gün boyu güneş radyasyonunu emen şehir yüzeyleri, gün batımından sonra bu enerjiyi uzun dalga boylu radyasyon olarak yayıp sınır tabaka içindeki atmosfer sıcaklığını etkiler. Atmosferik şehir ısı adası etkisini zamansal açıdan inceleyerek değişimi hakkında bilgi sahibi olunabilir. Şehir ısı adaları mevsimler, aylar, yıllar veya sıcak hava dalgalarının hâkim olduğu bazı günler bazında araştırılabilir (Velazquez-Lozada ve diğ., 2006). Atmosferik ısı adalarını incelemek için seçilen zaman diliminde genellikle geceler tercih edilir ve açık gökyüzü koşullarının varlığı aranır. Bu şekilde geçici etki oluşturan değişkenler göz ardı edilebilir (Kim ve Baik, 2005).

Şehir ısı adaları pek çok faktörün ortak sonucu olarak meydana gelirler. Yeşil alanlar, bina materyalleri, antropojenik ısı kaynakları insanlar tarafından kontrol edilebilir faktörlerken, rüzgâr hızı, bulut kapallılığı gibi faktörler kontrol edilemezler ve her iki grup da şehir ısı adası oluşumunu etkiler. Şehirlerde ısınmanın ana kaynakları, trafikten, elektrik santrallerinden, evsel ısıtmadan, iklimlendirme elemanlarından ve diğer pek çok kaynaktan yayılabilecek antropojenik ısıdır. Buna ek olarak karmaşık kentsel yapının ısıyı emmesi ve yeniden yayması da şehirlerde ısınmayı beraberinde getirir (Memon ve diğ., 2007). Şehirleşmiş bölgelerde doğal bitki örtüsü azdır, bundan dolayı buharlaşma/terleme gerçekleşmez ve yüzey yeterince soğuyamaz. Tüm bu etkiler birleşerek şehirlerin, etrafındaki kırsal alanlara göre daha sıcak olmasına sebep olurlar. Şehir alanlarında, gelen kısa dalga boylu radyasyonun emilmesi için etrafındaki kırsal alanlara göre daha fazla yüzey bulunur, aynı zamanda yayılan uzun dalga boylu radyasyon da bu yüzeylere çarparak geri yansır veya yüzeyler tarafından tekrar soğutulur ve yeniden yayılır. Böylece radyasyonun yer seviyesinde geçirdiği süre artar. Bu durum da kentsel alanlardaki yere yakın seviye sıcaklıkların kırsal alandakilere göre daha fazla olmasına katkı sağlar.

Çok çeşitli yüzey materyalleri barındıran şehirlerde, depolanan ısı akısının ölçümü büyük oranda imkânsızdır (Christen ve Vogt, 2004). Güneş/yer radyasyonu ile yüzey materyallerinin etkileşimi (ısı kapasiteleri, albedoları vs.) ve insan faaliyetleri sonucu ısı

yayımları yüzey enerji dengesi bileşenlerinin gündüz ve gece değişmesine neden olur. Sonuçta şehir ortamında yüzey ve atmosfer arasındaki mikro meteorolojik süreçler kırsal alanlara kıyasla farklılık gösterir. Bir alanın içerdiği ısı enerjisi hakkında bilgi veren yüzey enerji dengesinin matematiksel ifadesi Denklem 1'de görüldüğü gibidir (Oke, 1987).

$$Q^* + QF = QH + QE + \Delta QS + \Delta QA \quad (1)$$

Bu eşitlikte  $Q^*$  net radyasyonu,  $QF$  antropojenik kaynaklardan yayılan ısıyı,  $QE$  gizli ısı akısını,  $QH$  türbülanslı hissedilir ısı akısını,  $\Delta QS$  kontrol hacmi içindeki net ısı depolamasını,  $\Delta QA$  kontrol hacminden ısı ve nem adveksiyonunu ifade eder. Eşitlikte yer alan antropojenik ısı, bölgedeki durgun veya hareketli sistemlerden üretilen ısıdır. Antropojenik ısı; araçlar, binalar veya insanlar tarafından üretilen ısının toplamından meydana gelir (Sailor ve Lu, 2004; Grimmond, 1992). Radyasyona, gizli ısı akısına ya da hissedilir ısı akısına dönüştürülebilir, depolanabilir (Christen ve Vogt, 2004). Oke (1988) antropojenik ısı salınımının nüfusa ve kişi başına kullanılan enerji miktarına bağlı olabileceğini belirtmiştir. Dolayısıyla şehirleşme ve insan faktörü enerji dengesinde önemli bir bileşendir.

Şehir ısı adası, günümüzde pek çok araştırmanın konusudur. Orta enlemlerde bulunan şehirlerin, şehir ısı adasının 1-3 °C arasında gözlemlendiği ve bu hadisenin yoğunlukla yaz dönemlerinde maksimum olduğu belirtilmiştir (Oke, 1987; Arnfield, 2003). Ayrıca, Akdeniz şehirlerinde şehir ısı adası şiddetinin 6 °C'ye kadar çıkabildiğini ve şehir geometrisinin ŞİA şiddetini azaltmadaki önemi literatürde yer almaktadır (Vardoulakis ve diğ., 2013). İstanbul için ŞİA etkisi de çok kez araştırılmış bir konudur (Eljadid, 1994; Karaca ve diğ., 1995; Karaca ve diğ., 2003; Ezber ve diğ., 2017; Özdemir ve diğ., 2012 ve Kaya ve diğ., 2012, Ünal ve diğ., 2018). Örneğin Eljadid (1994) İstanbul'da ısı adasının oluşumu üzerine şehir ve kırsal alanların sıcaklık, rüzgâr hızı ve bağıl nem parametrelerinin etkisini araştırmıştır. Karaca ve diğ. (1995) İstanbul iklimi üzerindeki şehirleşme etkilerini araştırmışlar ve şehrin güney kesiminde sıcaklık artışlarının daha ciddi bir trende sahip olduğunu vurgulamışlardır. İstanbul'daki şehirleşmenin etkileri, Ezber ve diğ. (2007) tarafından da istatistiksel ve sayısal modellerle incelenmiş ve İstanbul'un yoğun şehir alanlarında istatistiksel olarak pozitif eğilimlerin varlığı ortaya konmuştur. Ünal ve diğ. (2018) yaptıkları çalışmada, İstanbul için minimum sıcaklık değerleriyle hesaplanan şehir ısı adası şiddetinin, Kartal istasyonunda tüm günler için yıllık ortalama 1,38 °C iken sakin, yağışsız ve bulutsuz atmosfer koşullarının hâkim olduğu günlerde 2,70 °C olduğunu belirtmektedir. İstanbul için gece şehir ısı adası şiddetinin ortalama büyüklüğü bütün mevsimlerde pozitif değerdedir. Ayrıca, yaz gecelerinde şehir ısı adasının daha şiddetli olduğu ve şehir istasyonları Göztepe ve Florya'da 2°C, Kartal'da ise 3°C'den yüksek gözlemlendiği belirtilmiştir. Bu çalışma da Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) tarafından 1960-2012 yılları arasında 6 meteoroloji istasyonunda gözlenen maksimum ve minimum sıcaklıklar ve 31 adet Afet Koordinasyon Merkezi (AKOM) istasyon verileri kullanılmıştır. Sarıyer, Göztepe, Florya ve Kartal istasyonlarının kaydedilen uzun dönem ortalama sıcaklık değerlerinin kırsal istasyon Şile'de ölçülen sıcaklıklardan farkı Tablo 1'de listelenmektedir. Görüldüğü gibi en yüksek ŞİA şiddeti değerleri yaz aylarında görülmektedir. Minimum sıcaklıklarda en yüksek ŞİA değerleri Haziran ayında iken maksimum sıcaklıklarda Temmuz ayında görülmektedir. Yarı kırsal olarak adlandırılan Kilyos ile Şile arasındaki farklar 0,5 °C'nin altında kalmaktadır. Kış aylarında ise negatiftir.

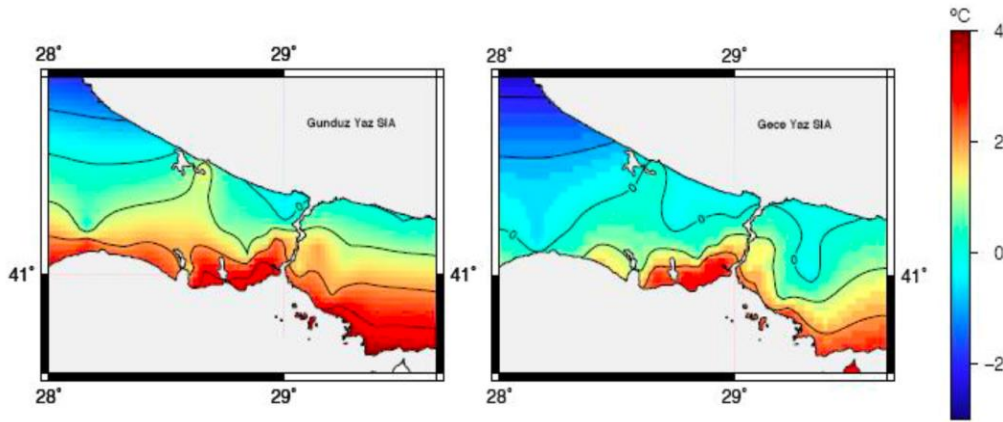
6 MGM istasyonuna ek olarak, 31 AKOM istasyonunun 2007-2012 yıllarındaki saatlik sıcaklık ölçümlerinden Şile istasyon verileri baz alınarak hesaplanan ŞİA indeksinin yaz aylarındaki ortalama değişimi alansal olarak gece ve gündüz şeklinde iki

farklı zaman aralığı için Şekil 1’de gösterilmektedir. Gündüz sıcaklıkları yerel saat ile 12:00-16:00 arasındaki ortalamalara, gece sıcaklıkları ise 20:00-24:00 saatleri arasındaki ortalamalara karşı gelmektedir. Şehir ısı adası, genellikle öğle saatlerine doğru ve gün içinde zayıflarken, güneşin batışından sonra şehir alt yapısından yayınlanan ısı nedeniyle yükselmektedir. Oke, (1987) genellikle bir milyon ve daha fazla insanın yaşadığı bir şehirde yıllık ortalama hava sıcaklığı çevresinden 1-3 °C daha sıcak olduğunu, açık ve sakin bir gecede sıcaklık farkının daha da yükselebileceğini göstermiştir. İstanbul coğrafi konumu, kara deniz dağılımı ve İstanbul Boğazı’nın varlığı nedeniyle karasal alanlardaki benzer şehirlere kıyasla daha düşük bir ŞİA şiddeti göstermektedir. Yaz aylarında İstanbul’da hâkim rüzgâr yönü

kuzey doğudur (poyraz). Şehirleşmenin İstanbul Boğazı civarında olması ve Boğaz’ın hâkim rüzgâr yönündeki konumu nedeniyle yarattığı kanal etkisi ventilasyonu destekleyerek İstanbul’da ŞİA şiddetinin düşük kalmasını sağlamaktadır. Ayrıca Karadeniz ve Marmara denizi kıyı şeridinde kara ve deniz meltemleri sıcaklıkları kısmen kontrol etmektedir. Bununla birlikte, İstanbul istasyonlarının sıcaklık dağılımı (Şekil 1) genel durumu destekleyici niteliktedir. Şile’ye göre hesaplanan gece ŞİA şiddeti binaların yoğunlaştığı alanlarda en yüksek değerlere ulaşmaktadır. Gündüz sıcaklık farklarında da benzer durum gözlenmektedir.

Tablo 1. Meteoroloji istasyonlarının minimum ve maksimum sıcaklıklarının Şile istasyonundan olan farkının mevsimsel ortalama değerleri.

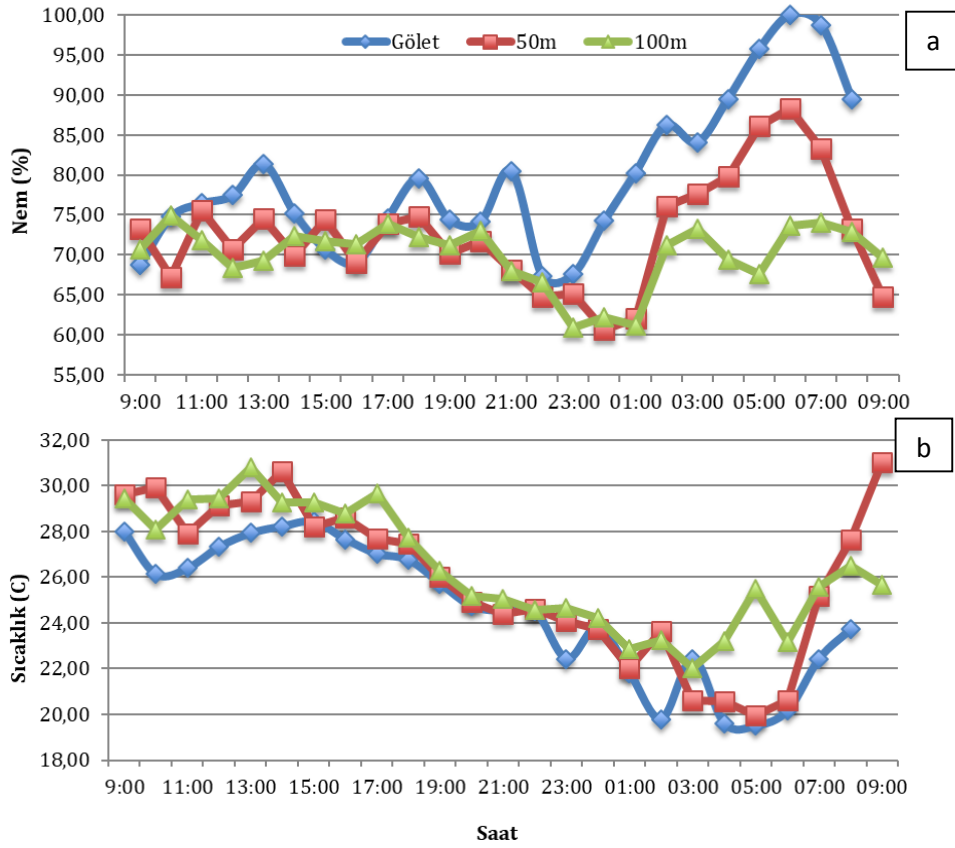
		Ortalama sıcaklık farkı (°C)				
		Kış	İlkbahar	Yaz	Sonbahar	Yıllık
Maksimum Sıcaklık	Kilyos	-0.13	0.09	0.93	0.42	0.33
	Sarıyer	-0.46	0.15	0.46	-0.10	0.05
	Göztepe	0.13	1.48	2.45	1.05	1.34
	Florya	-0.29	0.90	2.13	0.77	0.93
	Kartal	0.45	1.84	3.04	1.25	1.68
Minimum Sıcaklık	Kilyos	0.12	0.00	0.35	0.24	0.18
	Sarıyer	0.55	0.51	1.22	1.01	0.86
	Göztepe	0.76	0.95	1.08	0.52	0.87
	Florya	0.64	0.91	1.12	0.85	0.88
	Kartal	1.43	1.88	2.17	1.64	1.80



Şekil 1. 2007-2012 arası gündüz ve gece sıcaklıklarının ŞİA şiddeti dağılımı.

Ünal ve diğ. (2018) tarafından hazırlanan Avrupa Birliği ERAfrica LOCLIM3 / TUBITAK 1001 114Y047 no’lu proje kapsamında, İstanbul üzerinde sıcak hava dalgasının etkili olduğu 24-25 Temmuz 2017 tarihlerinde İTÜ Ayazağa Kampüsü’nde ölçüm kampanyası düzenlenmiş, farklı arazi kullanımları civarında 1,5 m yükseklikte sıcaklık, bağıl nem, rüzgâr ve radyasyon ölçümleri mobil meteorolojik aletler yardımıyla yapılmıştır. Ayrıca kızılötesi termometre ile farklı yüzeylerin yüzey sıcaklıkları ölçülmüştür. Bu ölçümler şehir ısı adası gözlemine dair önemli sonuçlar ortaya koymuştur. Örneğin gölet yakınında, göletin güney batısında 50 m ve 100 m mesafede mobil ölçüm aletleri ile ölçülen sıcaklıkların 24 saatlik değişimine bakıldığında gün

içerisinde göl çevresindeki sıcaklıkların kampüsün diğer noktalarına göre 1-1,5 °C daha soğuk olduğu gözlenmiştir (Şekil 2). Gündüz gölet kıyısında %82 civarında olan bağıl nem akşam saatlerinden itibaren artmış, sabah saat 7 civarında %100 olarak kaydedilmiştir. Buna karşın 100 m uzaktaki asfalt zemin üzerinde yaklaşık %75 olarak ölçülmüştür. Her iki ölçüm noktasında fark %10 civarında iken, sabah erken saatlerde, bu farkın %25’e ulaştığı görülmüştür. Bunun yanı sıra gölet ve çevresi arasındaki mikro dolaşımın maksimum hava sıcaklığının zamanlamasını geciktirdiği görülmüştür. Su yüzeylerinin şehir ısı adası şiddetini azaltmak için bir strateji olarak kullanılabilmesi ortaya konmuştur.



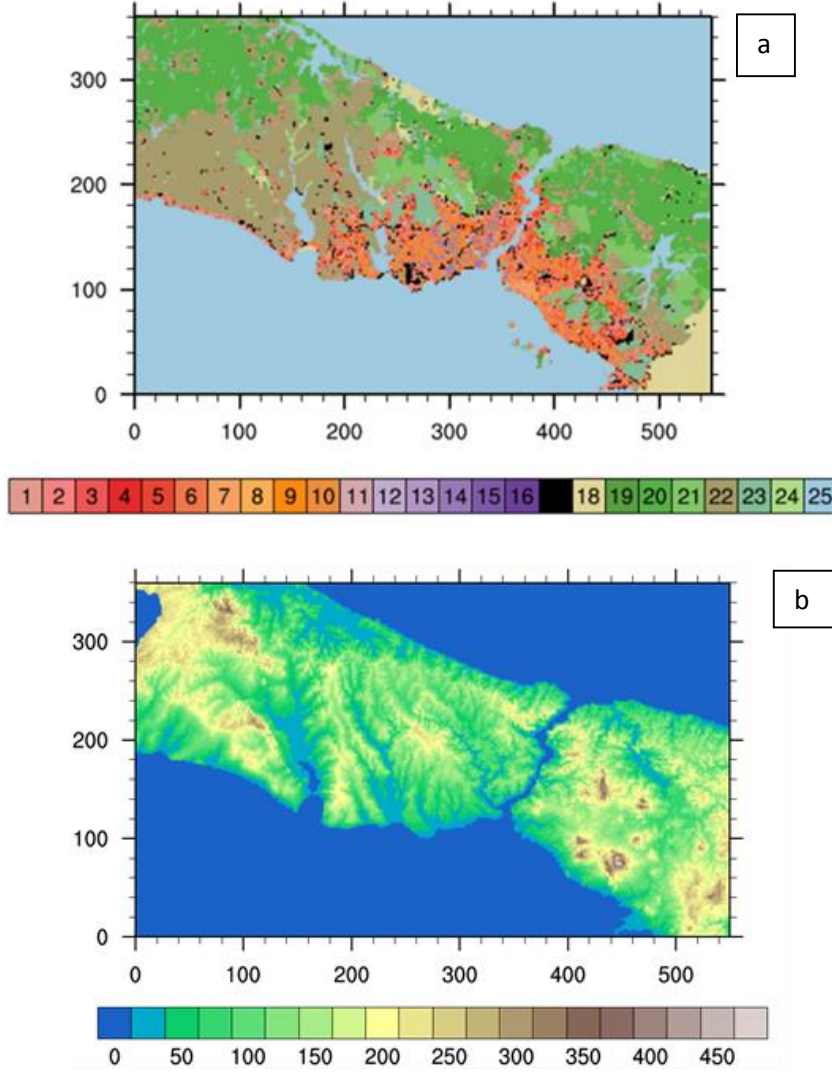
Şekil 2. İstanbul Teknik Üniversitesi'nde 24-25 Temmuz 2017 tarihinde göletin yanında ve göletten 50 m ve 100 m mesafede ölçülen saatlik a) bağıl nem ve b) sıcaklık değerleri.

Ayrıca farklı yüzey tiplerinin ısınma ve soğuma hızına ve çevresel koşullara bağlı olarak gün boyunca sıcaklıklarındaki değişim de takip edilmiştir. Kızılötesi sensörler yardımıyla yapılan ölçümlerde gölet gözlem noktasındaki toprak yüzeyin güneş ışınlarını daha fazla emmesinden dolayı sıcaklık değerlerinin 14:00'da diğer yüzeylere göre daha fazla olduğu görülmüştür. Çakıl yüzeyinin gün boyu sıcaklık değişimi toprak yüzeyinden az olmakla beraber, toprak yüzeyine benzerlik gösterir. Toprak yüzey sıcaklığı 47°C'ye, çakıl yüzey üzerinde ise 43°C'ye kadar yükselmektedir. Toprak, çakıl gibi malzemelerdeki ısı taşınımı kondüksiyon ile gerçekleştiğinden, bir günlük zaman ölçeğinde ısı enerjisinin nüfus ettiği derinlik sığ kalmaktadır. Bu da hızlı soğuma ve ısınmayı tetikleyerek, daha büyük günlük sıcaklık aralığının oluşmasını sağlamaktadır. Suyun ısı kapasitesi yüksek olduğundan su yüzeyi üzerindeki sıcaklık ölçümleri gün içerisinde maksimum 7°C değişim göstermektedir.

Asfalt yüzeylerin sıcaklıkları, gün boyunca diğer yüzeylerin sıcaklıklarından daha fazladır. Asfaltın albedosu 0.10-0.12 arasında olduğundan gün boyu gelen güneş ışınımının büyük bir kısmını soğurmaktadır. Ölçüm kampanyası kapsamında iki farklı asfalt yüzeyde ölçümler yapılmıştır. Gün boyu ağaçların gölgesi altında kalan asfalt yüzeyin maksimum sıcaklığı güneşin en yüksek olduğu saat 13:00 civarında 37 °C olarak ölçülürken güneşe maruz kalan asfalt yüzeyin sıcaklığı 13:00-14:00 saatleri arasında 54 °C ölçülmüştür. Direkt güneş radyasyonu alan beton yüzey ise 13:00-14.00 saatlerinde 50°C sıcaklığa ulaşmıştır. Asfalt ile beton arasında maksimum sıcaklıkların gözlemlendiği saatlerde, albedo değerlerindeki farklılıktan kaynaklanan 4 °C sıcaklık farkı gözlemlenmiştir. Açık asfalt alanındaki sıcaklığın maksimum değeri ise gün boyu gölgede kalan asfalt alanının iki katı kadardır. Bu sonuçlar yüzey materyallerinin ve şehir planlamasının şehir ısı adasını ve dolayısıyla şehirlerin yerel iklimini kontrol etmede ne kadar önemli olduğunu ortaya koymaktadır.

### 3. Veri ve Yöntem

Çalışmada İstanbul'un boğaz Boğaz bölgesine odaklanılarak şehir ısı adası etkisi incelenmiştir. Alman Meteoroloji Servisi (DWD) İklim ve Çevre Departmanı tarafından geliştirilen MUKLIMO\_3 (Mikroskaliges Urbanes KLima MOdel) modeli kullanılmıştır. MUKLIMO\_3 ideal atmosfer koşullarının, sıcaklık, nem ve rüzgâr alanlarının simülasyonunu yapan şehir iklimi analizi için uygun bir modeldir (Siebert ve diğ.,1992; Bokwa ve diğ., 2015; Siebert ve diğ.1992). Aynı zamanda farklı modellerle birlikte kullanılarak termal konfor çalışmalarında da tercih edilmektedir. MUKLIMO\_3, yatay çözünürlüğü 20x20 m<sup>2</sup> ile 100x100 m<sup>2</sup> arasında değişen düşey çözünürlüğü ise 10-100 m arasında değişen, sınır tabaka içerisindeki lokal ölçekli meteorolojik değişkenlerin simülasyonunda kullanılan bir modeldir. (Bokwa ve diğ., 2015). Atmosferik akışı simüle etmek için Navier-Stokes denklemlerini çözen MUKLIMO modelinin ilk versiyonu, akım fonksiyonu-vortisite metodu yardımıyla üç boyutlu olarak simülasyon yapabilmektedir (Sievers, 1995). Model kodu içinde kullanılan türbülans şemasının formülasyonu Monin-Obukhov benzerlik teorisine (MOST) ve Prandtl karışma uzunluğu yaklaşımına dayanmaktadır (Sievers ve diğ., 1987; Sievers ve Fröh, 2012). Yüzey yakınındaki kısa dalga boyulu ışınım ile ilgili hesaplamalar Sievers ve Fröh (2012) tarafından tanımlanmıştır. Model, bulutların radyasyona etkisini hesaba katmaktadır, ancak yağış, yatay akış ve antropojenik ısı model içerisinde hesaba alınmamaktadır. Bu sebeple MUKLIMO\_3, yağışsız atmosfer koşulları için şehir ısı adası modellemesinde kullanılmaktadır.



Şekil 3. a) İstanbul arazi kullanım haritası, b) topografyası.

MUKLIMO\_3 modelinin kullanılabilmesi için arazi kullanım verisi ve yüzey karakteristiklerini tanımlayan arazi kullanım tablosunun oluşturulması gerekir. Bina-atmosfer ilişkisini incelemek için kullanılan modelde, bina yoğunluğu, duvar alanı ve ortalama yükselti gibi bilgilere ihtiyaç vardır (Bokwa ve diğ., 2015). Bu bilgiler arazi kullanım tablosu yardımı ile modele dâhil edilir. Modelde bina yüksekliği, geçirimsiz yüzeylerin alanı ve bitki örtüsü alanı gibi parametreler çeşitli sınıflarla ifade edilir. Bu sınıflar arazi kullanım verisi ile modele tanımlanır. İhtiyaç durumunda kullanıcı yeni sınıflar tanımlayabilir veya önceden tanımlanmış sınıfların özelliklerini değiştirebilir. Oluşturulan arazi kullanım dosyaları modele girdi olarak verilir. Arazi kullanım tablosu ve haritası çalışma alanına özgü olacağından her şehir için ayrı ayrı hazırlanmalıdır. Çalışma kapsamında İstanbul için arazi kullanım dosyaları oluşturulmuştur. Şekil 3a'da model alanının arazi kullanım sınıfları görülmektedir. Şekil 3b'de çalışma alanının topografyası verilmektedir. İstanbul arazi kullanım haritasının oluşturulması için üç farklı veri setinden yararlanılmıştır. Yerleşim alanlarının sınıflandırılmasında İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB) Coğrafi Veri Seti ve Başar Soft Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) Veri Seti kullanılmıştır. Bina dışındaki arazi kullanım sınıflarını belirlemek için CORINE (2012) Arazi Örtüsü

Raster Verileri kullanılmıştır. İstanbul için arazi kullanım haritası 25 sınıfa sahiptir. İlk 17 sınıf geçirimsiz yüzeyleri ve binaları temsil ederken, diğer 8 sınıf ağaçlık alanları, açık alanları ve su alanlarını temsil etmektedir (Ünal ve diğ., 2019). Arazi kullanım sınıfları Tablo 2'de görülmektedir.

Bu çalışmada kullanılan ortalama düşey profil verileri, ERAInterim reanaliz verilerinin 2008-2017 yılları arasında 06 UTC saatine karşılık gelen sıcaklık, bağıl nem ve rüzgâr verileri kullanılarak elde edilmiştir. Sakin rüzgâr koşulları, açık gökyüzü ve yüksek miktarda gelen güneş radyasyonu, şehir ısı adası etkisinin yaz aylarında daha sık görülmesine neden olur. Ünal ve diğ. (2019) İstanbul'daki şehir ısı adası yoğunluğunun yaz aylarında diğer mevsimlere göre daha güçlü olduğunu bulmuştur. Bu nedenle hesaplanan yaz aylarına ait düşey profil verileri, şehir ısı adasının yoğunluğunu belirlemek ve orman senaryosu uygulandığında değişimini incelemek üzere MUKLIMO\_3 modeli ile kullanılmıştır. Sıcak hava dalgasının olduğu gün için yapılan şehir gelişim senaryoları simülasyonlarında ise o tarihe ait radyozonde verilerinden yararlanılarak düşey profil elde edilmiştir.

Tablo 2. CORINE, IBB ve Başar Soft verilerinden yararlanılarak hazırlanan arazi kullanım sınıfları.

Sınıf	Bina Yüksekliği	Yoğunluk	Sınıf ismi
1	<10m		Bina
2	10m-20m	%5-%15 düşük yoğunluk	Bina
3	20m-30m		Bina
4	>30m		Bina
5	<10m		Bina
6	10m-20m	%15-%30 orta yoğunluk	Bina
7	20m-30m		Bina
8	>30m		Bina
9	<10m		Bina
10	10m-20m	%30-%50 yüksek yoğunluk	Bina
11	20m-30m		Bina
12	>30m		Bina
13	<10m		Bina
14	10m-20m	>%50 çok yüksek yoğunluk	Bina
15	20m-30m		Bina
16	>30m		Bina
17	-	-	Trafik ve otopark
18	-	-	Çıplak toprak
19	-	-	İğne yapraklı orman
20	-	-	Geniş yapraklı orman
21	-	-	Karışık orman
22	-	-	Tarım alanı
23	-	-	Otlak ve çalılık
24	-	-	Çayır
25	-	-	Su

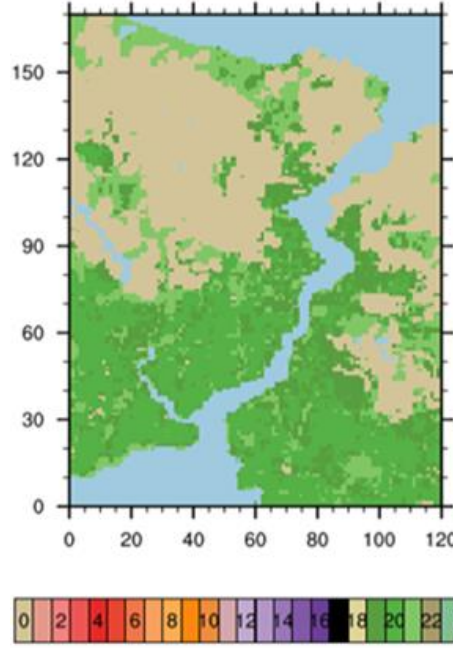
### 3.1 Şehir gelişim senaryoları

Çalışmada MUKLIMO\_3 modeli yardımıyla İstanbul Boğazi bölgesinin şehir ısı adası şiddetinin ortaya konması amaçlanmıştır. Ayrıca model için özel olarak üretilen İstanbul arazi kullanım verisi, test edilen farklı senaryolara bağlı olarak değiştirilmiştir. Bu varsayımsal senaryolar ile şehrin yapısındaki değişimlerin şehir ısı adası şiddetine etkisi incelenmektedir. MUKLIMO\_3 modeli öncelikle günümüz arazi kullanım koşulları ve ortalama yaz ayları meteorolojik veriler ile çalıştırılarak kontrol simülasyonları oluşturulmuştur.

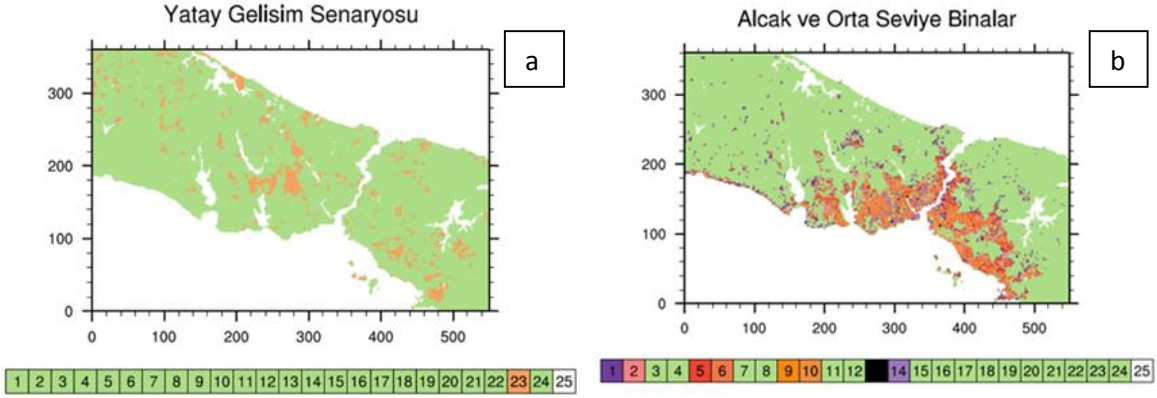
Günümüz koşulları için çalıştırılan modelde 2008-2017 yılları arasındaki 10 yıllık ERA-Interim verilerinin yaz ayları için elde edilen düşey profil verileri kullanılmıştır. Ayrıca, aynı zaman periyodunun yaz ayları için ortalama deniz suyu sıcaklığı 23.39 °C ve toprak sıcaklığı 23.47 °C olarak modele verilmiştir. Rüzgâr yönü ve hızı sırasıyla 45 °C ve 3,8 m/s olarak alınmıştır. Kontrol simülasyonunun ardından eğer model alanının tamamı ormanlık alan olsaydı sıcaklıklar nasıl değişirdi sorusunun cevabı aranmıştır. Bunun için modeldeki şehir alanı orman ile değiştirilmiş (Şekil 4) ve simülasyon tekrarlanmıştır.

Şehir ısı adası iklim değişimi ile sıklığını arttıracak sıcak hava dalgalarının şehir ortamında daha şiddetli hissedilmesini sağlayacaktır. Bu nedenle şehir gelişim senaryoları simülasyonlarında lokal iklim modeli sıcak hava dalgasına karşı

gelen meteorolojik verilerle çalıştırılmış ve tüm İstanbul'u kapsayan bir model alanı kullanılmıştır. Bu senaryolar yatay gelişim ve düşey gelişim senaryolarıdır (Şekil 5a ve Şekil 5b). Yatay gelişimli senaryoda, mevcut açık alanların (arazi kullanım verisindeki 23 numaralı sınıf) tamamı grid kutusunun %15 ile %30'unu kaplayan 20-30 m arasında yüksekliğe sahip binalarla (arazi kullanım verisindeki 7 numaralı sınıf) kaplanmıştır. Şehrin düşeyde gelişeceğini göz önüne alan senaryoda alçak ve orta yüksekliğe sahip binalar (arazi kullanım verisindeki 1, 2, 5, 6, 9, 10, 13, 14 numaralı sınıflar) 2 kat (yaklaşık 6 m) yükseltirse sıcaklıklar nasıl değişir sorusuna cevap aranmıştır.



Şekil 4. Şehir alanlarının ormanlarla değiştirildiği arazi kullanım haritası.



Şekil 5. a) Yatay gelişim senaryosunda, b) Düşey gelişim senaryosunda değiştirilen arazi kullanım alanları.

#### 4. Senaryo Analizleri ve Tartışma

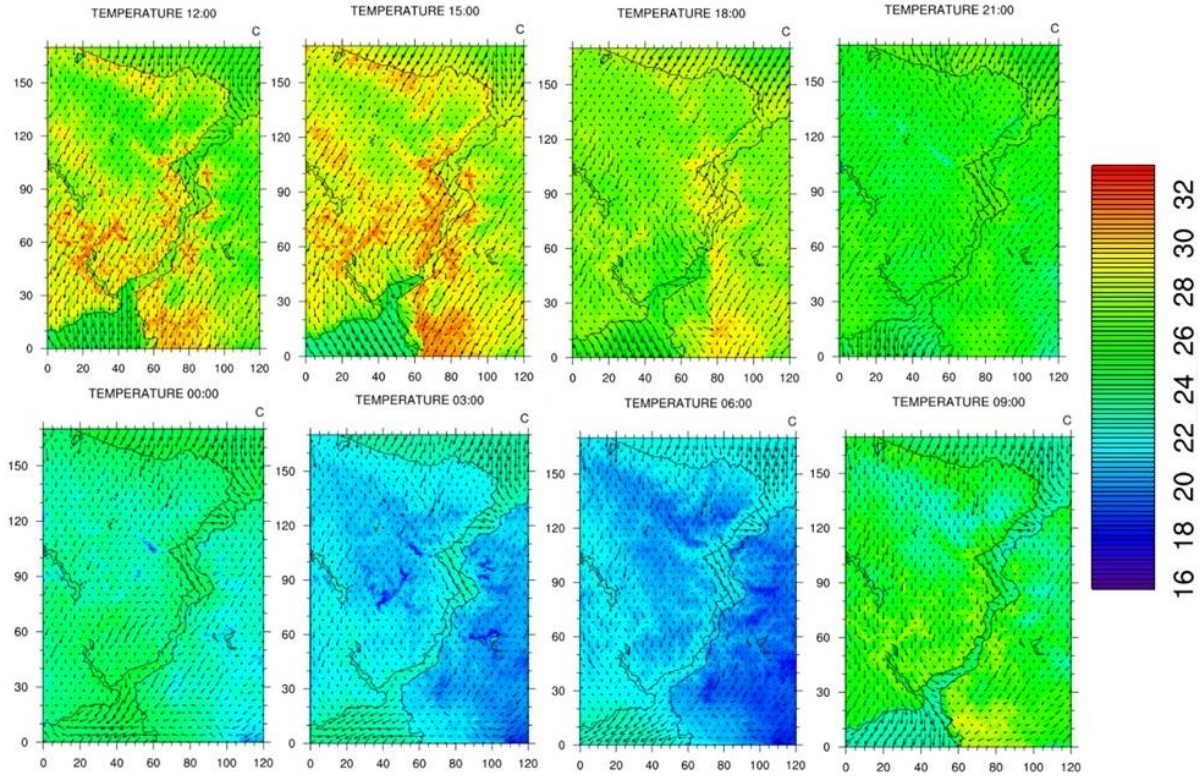
Bu çalışmada İstanbul için farklı şehir gelişim senaryolarında şehir ısı adasının değişimi MUKLIMO\_3 modeli kullanılarak araştırılmıştır. Mevcut koşullar için sıcaklık ve rüzgâr alanındaki değişimler 3 saat aralıklarla Şekil 6'da gösterilmektedir. Lokal iklim modeli simülasyonunda şehir alanlarındaki sıcaklıkların kırsal alanlara göre daha yüksek değerlere sahip olduğu görülmektedir. Gün batımından sonraki görsellerde şehir alanları kırsal alanlara göre daha sıcaktır. Bunun nedeni, şehir yüzeylerinin doğal yüzeylerden farklı ısı kapasitelerine sahip olmasıdır. Gündüzleri doğal olmayan yüzeyler tarafından emilen güneş radyasyonu, geceleri uzun dalga boylu radyasyon olarak şehir yüzeylerinden atmosfere yayılmaktadır.

Günlük maksimum sıcaklık öğleden sonra 15:00'da 34,59 °C olarak görülmektedir. Minimum sıcaklık ise sabah 06:00'da, 15,14 °C'dir. Kontrol modeli olarak günümüz koşullarını temsil eden arazi kullanım verisi ile elde edilen bu değerler yaz aylarındaki tipik bir günün ortalamasını temsil etmektedir. İstanbul'da hâkim rüzgâr yönü kuzeydoğu olmakla birlikte; kentsel alanların yarattığı ısınma farklılıkları etkisi ile kuzey ve kuzeybatı rüzgârları da gözlenmektedir. Boğaz bölgesindeki akış, şehirleşmenin etkisiyle binaların yarattığı gölgeler ve düşük gök görüş alanı faktörü sıcaklıklarda lokal değişimlere sebep olmaktadır. Sıcaklık

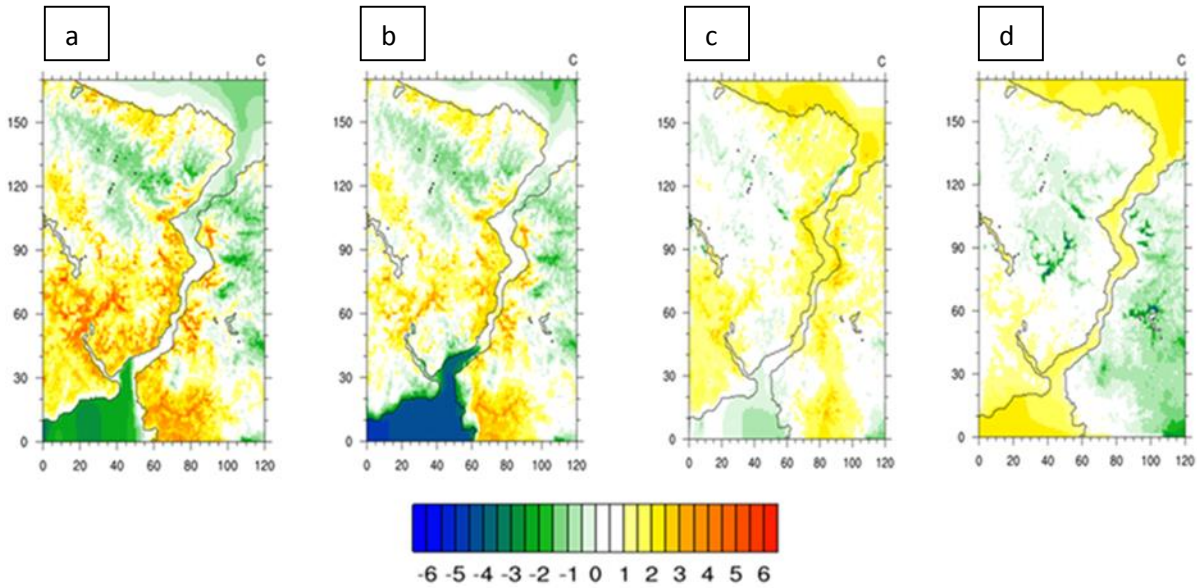
gradyanını artıran bu durum yerel sirkülasyonu dolayısıyla rüzgârları etkilemektedir. Öte yandan, şehir alanlarındaki yüksek pürüzlülüğün sebep olduğu sürtünme etkisi de rüzgâr alanını zayıflatmaktadır. Bu durum, özellikle yüksek binaların bulunduğu alanlarda türbülanslı bir akış olarak görülmektedir.

Mevcut durumda şehir ısı adasının etkisini görebilmek için kırsal alanı temsil eden 600x600 m<sup>2</sup>'lik bir alanın ortalama sıcaklığı hesaplanarak tüm model alanındaki sıcaklıklardan çıkarılmıştır. Böylece şehir ve kırsal bölge arasındaki sıcaklık farkı yani ŞİA yoğunluğu ortaya konmuştur. Şekil 7(a-d) şehir ve seçilen kırsal bölgenin sıcaklık farklarının zamansal olarak değişimini, yani gündüz ve gece şehir ısı adasının etkisinin değişimini göstermektedir.





Şekil 6. Güncel verilerle çalıştırılan model sonuçlarına göre üçer saatlik aralıklarla sıcaklık ve rüzgâr değerlerinin alansal dağılımı.



Şekil 7. İstanbul şehir ısı adası etkisinin gün boyunca alansal ve zamansal değişimi, a) 12:00, b)14:00, c) 20:00, d) 03:00.

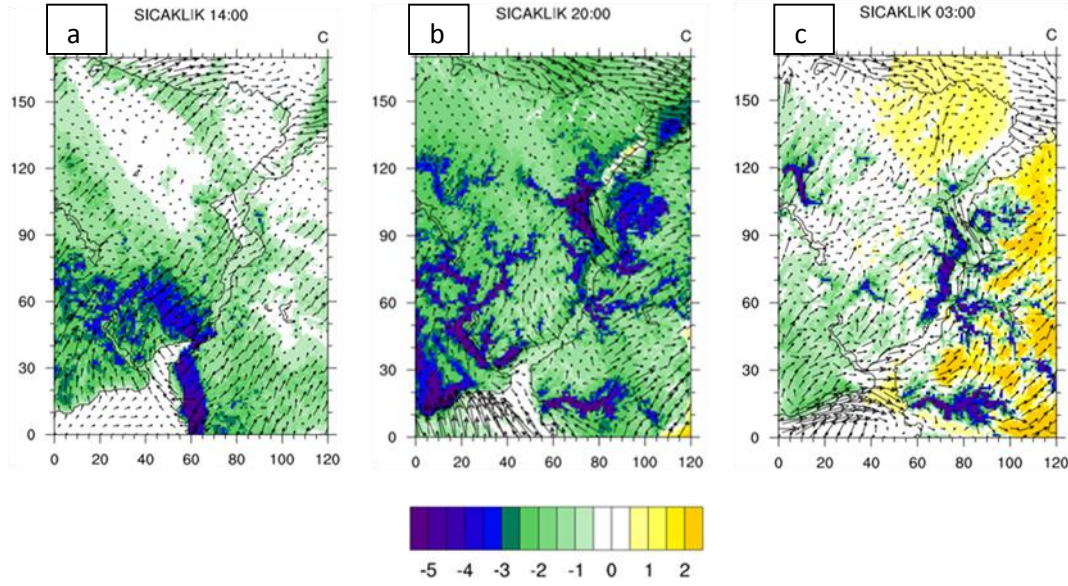
12:00 görselinde şehir alanları referans kırsal alandan ortalama 6°C daha sıcaktır. Denize yakın bölgelerde sıcaklık çevredekinden daha yüksektir, bu nedenle görselde kırsal alan olmasına rağmen referans alanından daha yüksek sıcaklıklara sahip bölgeler vardır. Kırsal alanın gece boyunca uzun dalga boylu radyasyon kaybı ile hızla soğuması ve karanın ısı kapasitesinin düşük olması nedeniyle denizler ve kırsal alanlar arasındaki sıcaklık farkı artmaktadır. Gece saat 03:00 civarında Karadeniz, İstanbul Boğazı ve Marmara Denizi'nde bu farkın 2,5 °C'ye ulaştığı görülmektedir. Güneş battıktan sonra kırsal alanların şehirleşmiş bölgelere göre daha soğuk olduğu açıktır. Bu farklılıklar, gün batımından 1-2 saat sonra kıyı şeridinin iç kesimlerinde 2-3 °C civarındadır.

Model alanı içerisinde şehir sınıflarının ormana dönüştürüldüğü senaryo sonucu elde edilen sıcaklık ve rüzgâr alanının günümüz koşullarından farkı Şekil 8'de sunulmakta ve oldukça çarpıcı sonuçlara işaret etmektedir. Bu senaryo modelde her yer ormanlık alan ile kaplı olsaydı İstanbul'un mikro iklimi nasıl değişirdi sorusuna cevap vermek için test edilmiştir. Kontrol modelinde İstanbul için şehir ısı adası değerlerinin 2-3 °C civarında olduğu tespit edilmişti. Tüm şehir alanların ormanla kaplı olması durumunda, bölgenin lokal iklim sirkülasyonundaki farklılıkların kontrol modeline göre sıcaklığın -6 °C'ye kadar daha düşük olabileceğine işaret etmektedir. Sıcaklıklardaki bu azalma kontrol modelinde şehir alanı olan yerlerde ve kıyılarda en yüksek değerlere ulaşmaktadır. Şehir alanı orman sınıfları ile

## Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik

değiştirildiğinde daha yüksek pürüzlülüğe sahip bir arazi yüzeyi oluşturulmuştur. Bu sebeple denizden karaya esen rüzgâr kara yüzeyi üzerinde yavaşlamıştır. Sıcaklığı etkileyen bir diğer faktör de şehir ve kırsal arasındaki lokal ölçek atmosfer sirkülasyonu ile gerçekleşen enerji alışverişidir. Ancak şehrin olmadığı durumda

şehir ısı adasının yarattığı sirkülasyonun ortadan kalkması bazı bölgelerin günümüzden daha sıcak olmasına neden olmaktadır. Gece kırsal alan sıcaklıklarının kısmen artışı şehir-kırsal arasında meydana gelen lokal atmosfer sirkülasyonunu da zayıflatmaktadır.

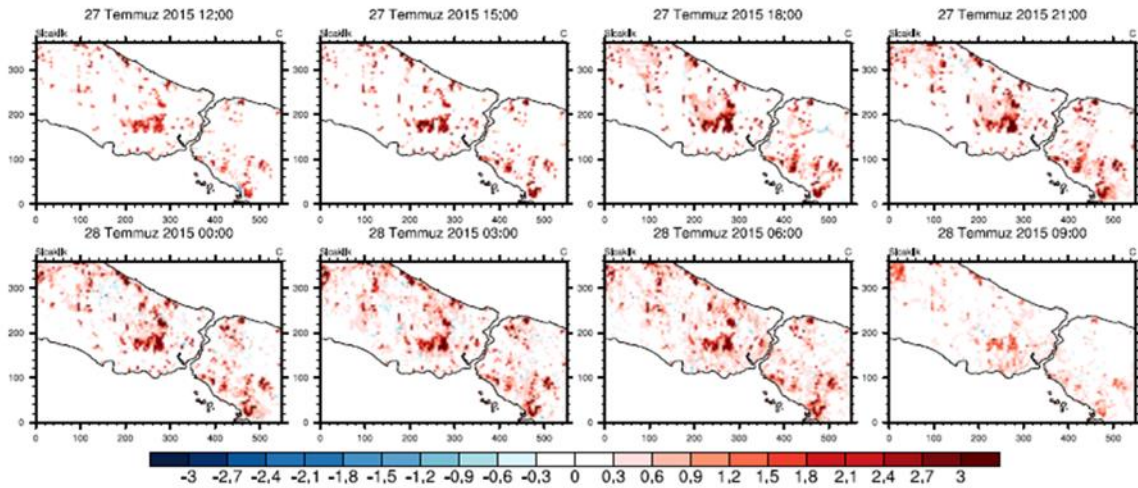


Şekil 8. Şehir alanlarının ormanlık alanlara dönüştürülmesi durumunda sıcaklık ve rüzgâr alanının günümüz koşullarından farkı a) 14:00, b) 20:00, c) 03:00.

Yatay gelişim senaryonun uygulanabilmesi için arazi kullanım tablosunda bulunan duvar alan indeksi parametresi yeniden hesaplanmıştır. Artan bina yoğunluğundan dolayı bu parametrenin tekrar hesaplanması gerekmiştir. Şekil 9'da 3 saatlik aralıklarla yatay gelişim senaryosunun kontrol simülasyonuna göre sıcaklık farklarını gösterilmektedir. Yatay gelişimli bir genişleme stratejisi

izlenecek olursa İstanbul üzerinde gözlemlenebilecek olan 3 °C'ye yaklaşan sıcaklık farkları dikkat çekmektedir ve yeni yerleşim yerleri ve civarındaki sıcaklık artışları özellikle 18-21 saatleri arasında daha yüksektir. Şehirleşmenin açık alanlara dağılması, neredeyse tüm İstanbul üzerinde sıcaklık artışına sebep olmaktadır (Şekil 9).

### İstanbul Sıcaklık Farkı Href=2m (Yatay kentleşme - Kontrol)



Şekil 9. Yatay gelişim senaryosunun kontrol simülasyonundan 2 m sıcaklık farkları.

Uygulanan şehir gelişim senaryolarının nüfus artışına katkısı yaklaşık olarak hesaplanmıştır. Öncelikle MUKLIMO\_3 model alanı içinde bulunan tüm bina sınıfı gridleri tespit edilmiş ve bu gridlerin bina yüzdelere ve kat sayılarından yola çıkarak 2015 yılı için TÜİK'ten alınan verilere göre 14.000.000'lük İstanbul nüfusu düşünüldüğünde kişi başına düşen bina alanı hesaplanmıştır. Bina sınıfları içerisinde yalnızca konut değil iş yeri, okul, hastane gibi kurumların binaları da olduğu göz önünde bulundurulduğunda kişi başına düşen bina kullanım alanı 60 m<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır. Bu hesaptan yola çıkarak, arazi kullanımında açık alan sınıfının bina sınıfına dönüştürülmesi ile

MUKLIMO\_3 model alanındaki mevcut bina alanı %10 değerinden %17 değerine çıkmaktadır. Bu artış yaklaşık olarak 9 milyonluk bir nüfus artışına karşılık gelmektedir.

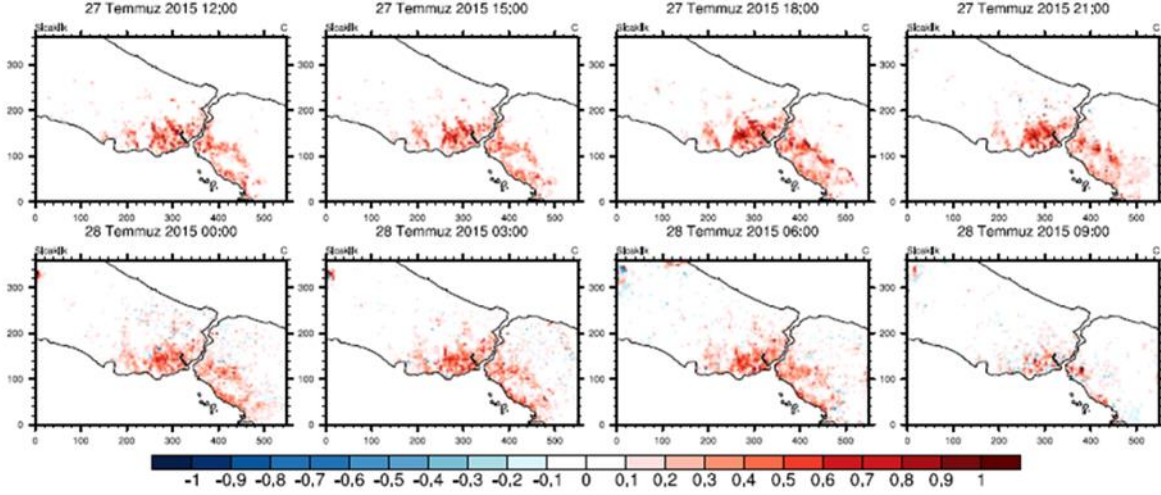
Şehrin düzeyde gelişeceği göz önüne alınan senaryoda düşük yüksekliğe sahip binalar ile orta yükseklikteki binaların yükseklikleri ikişer kat (yaklaşık 6 m) artırılmıştır. Model için arazi kullanım tablosunda bina yükseklikleri ve duvar alan indeksi parametreleri bu senaryolar için tekrar hesaplanmıştır. Alçak binaların 2 kat artırılması sonrası bina kullanım alanı %10'dan %12'ye yükselmektedir. Bu artış yaklaşık 1 milyon 900 bin kişilik nüfus

artışına karşılık gelmektedir. Hem alçak hem de orta seviye binaların 2 kat artırılması durumunda ise bina kullanım alanı %15'e çıkmaktadır ve yaklaşık 6 milyon kişinin daha İstanbul'da yaşamasına olanak vereceği öngörülmektedir.

Düşey gelişim senaryolarına göre hava sıcaklığında olası değişimler 3 saatlik aralıklar ile Şekil 10 ile gösterilmektedir.

Modelleme çalışmalarımız en fazla 1 °C civarında sıcaklık değişimleri tahmin etmektedir ve en geniş etki alanı gece saatlerinde gözlenmektedir. Bu senaryoda, boş alanların bina ile doldurulduğu senaryoya göre şehir ısı adası nedeniyle sıcaklıktaki değişim daha az olmaktadır. Bu durumun şehir atmosferindeki rüzgâr alanı açısından da daha detaylı değerlendirilmesine ihtiyaç vardır.

### Istanbul Sıcaklık Farkı Href=2m (Alçak+Orta Bina(6m) - Kontrol)



Şekil 10. Düşey gelişimli senaryonun (alçak ve orta binalar) referans modelinden sıcaklık farkı.

## 5. Sonuç

Bu çalışmada İstanbul'un şehir ısı adası şehir iklim modeli MUKLIMO\_3 ile simüle edilmiş, farklı şehir gelişim senaryolarına göre şehir ısı adası şiddetinin değişimi incelenmiştir. Şehir iklim modeli MUKLIMO\_3, 24 saatlik günlük sıcaklık döngüsünü kırsal ve şehir alanlarında yaklaşık olarak temsil etmektedir. Farklılıklar arazi kullanım tablosunun gerçekte tam olarak örtüşmemesinden veya 200 m çözünürlüğün arazideki çeşitliliği doğru olarak ortaya koyamamasından kaynaklanabilir.

İstanbul'un yerleşim alanlarının sıcaklığa etkisi, tüm şehir alanlarının ormanlık alanlar ile kaplandığı şehir iklim simülasyonu ile test edilmiştir. Her ne kadar günümüz koşullarında İstanbul şehir ısı adasının şiddetinin 3 °C'ye ulaştığı gözlemler ve modelleme çalışmaları ile gösterilmiş olsa da özellikle kentsele alanlar ile kırsal alanlar arasındaki atmosfer sirkülasyonundaki değişimler sıcaklık farklarının 6 °C'ye ulaşmasını tetiklemektedir.

İstanbul'da nüfus artışına bağlı yatay ve düşey gelişim senaryolarının MUKLIMO\_3 modeli ile simülasyonları, arazi kullanım tablosunda boş alan olarak tanımlanan alanlarda grid kutusunun %15 ile %30'unu kaplayan 20-30 m arasında yüksekliğe sahip binalarla kaplanmasının yaklaşık 9 milyonluk nüfus artışına ve İstanbul ikliminde de 3 °C'ye yakın sıcaklık artışına neden olacağını göstermektedir. Buna karşın düşey gelişim senaryosu dikkate alındığında, alçak ve orta yükseklikteki binaların 2 kat yükseltilmesinin 6 milyonluk nüfus artışına ve İstanbul ikliminde de 1 °C'ye yakın sıcaklık artışına neden olabileceğini ortaya koymuştur. Düşey gelişim senaryosu şehir ısı adası kontrolü için tercih edilebilir. Bununla birlikte, düşey yapılaşmanın rüzgâr alanını ve buna bağlı hava kalitesini nasıl etkileyeceği detaylı olarak incelenmelidir. Şehir ölçeğinde iklim modeli simülasyonlarının doğruluğunu arttırmak için 3 boyutlu arazi kullanım verisine ve detaylı karşılaştırmalar için şehir geneline yayılmış gözlem ağına ihtiyaç vardır.

Bu çalışmada basit ve varsayımsal gelişim senaryoları test edilmiştir. Şehrin gelecekte gelişimine dair daha gerçekçi idari planlar esas alınarak senaryolar geliştirilmeli ve iklimsel etkileri analiz edilmelidir. Ayrıca yerleşim alanlarındaki değişimin şehrin havalandırılmasında yaratacağı farklılıklar da irdelenmelidir. Şehirdeki hâkim rüzgâr yönü ile yerleşim alanlarının konumuna bağlı olarak hava kalitesinde sorunlar yaşanması ve şehir ısı adası şiddetinin daha da güçlenmesi olasıdır.

Şehir ısı adası, şehirlerin sıcaklığını artırır, küresel ısınmaya olumsuz katkıda bulunur, fırtınaların/yağış olaylarının yersel, zamansal konumlarını ve şiddetini değiştirir, şehirlerin enerji talebini artırır ve sıcak hava dalgalarının şiddetini artırarak halk sağlığında tehlike yaratır. Bu nedenle öncelikle ŞIA etkisine hangi faktörlerin neden olduğunu bilmek önemli olup etkiler şehirlere özgün olarak tespit edilmelidir.

Bir şehrin iklim değişiminden etkilenebilirliği ve uyum düzeyi genellikle şehrin hangi coğrafyada yer aldığına, yerel faktörlerine ve kurumsallığına bağlıdır. Bunların bileşkesi iklim değişiminin getireceği riskleri belirler. Elbette iklim değişikliğinin etkilerine uyum sağlama ve iklim değişikliğini azaltma amaçlı önlemler maliyetlidir. Ancak iklim değişikliğine karşı sorumluluk ve eylemlerin ortak bir platformda buluşturulması için bilimsel çalışmalar yardımıyla şehirlerde iklim değişikliğiyle mücadelede yönelik eylemler ve planlar oluşturulmalı ve politik kararlarda bu sonuçlar göz önünde bulundurulmalıdır.

## 6. Teşekkür ve Bilgi

Bu çalışma Avrupa Birliği ERAfrica LOCLIM3 / TUBITAK 1001 114Y047 no'lu projesi ile desteklenmiştir. Meteorolojik veriler için Meteoroloji Genel Müdürlüğü'ne teşekkür ederiz.

Makale araştırma ve yayın etiğine uygun olarak hazırlanmıştır. Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

## 7. Kaynaklar

- Arnfield, A. J. (2003), Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *Int J Climatol*, 23, 1-26.
- Barriopedro, D., Fischer, E. M., Luterbacher, J., Trigo, R. M. and Garcia-Herrera, R. (2011), The hot summer of 2010: Redrawing the temperature record map of Europe, *Science*, 332, 220- 224.
- Bokwa, A., Dobrovolny, P., Gal, T., Geletic, J., Gulyas, A., Hajto, M.J., Hollosi, B., Kielar, R., Lehnert, M., Skarbit, N., Stastny, P., Svec, M., Unger, J., Vysoudil, M., Walawender, J.P., Zuvella-Aloise, M. and Burian, L. (2015), Urban climate in Central European cities and global climate change, *International Visegrad Fund, Standard Grant No. 21410222. 10.2014–.2015. Final Report. pp. 49.*
- Christen, A., and Vogt, R. (2004), Energy and radiation balance of a central European city. *International Journal of Climatology*, 24, 1395-1421.
- Dickinson, R. E., (1995). Land-atmosphere interaction, *Reviews Of Geophysics*, p. 917-922.
- Eljadid, A. G. (1994), Urban heat island effect in Istanbul City. Istanbul Technical University, Institute of Science and Technology, MSc. Thesis, Istanbul.
- Ezber, Y., Sen, O.L., Kindap, T. and Karaca, M. (2007), Climatic effects of urbanization in Istanbul: a statistical and modeling analysis", *Int. J. Climatol*, 27, 667–679.
- Fischer, E. M., Oleson, K. W. and Lawrence, D. M. (2012), Contrasting urban and rural heat stress responses to climate change, *Geophys. Res. Lett.* 39: 3, L03705.
- Foley, J.A., DeFries, R., Asner, G.P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S.R., Stuart Chapin, F., Coe, M.T., Daily, G.C., Gibbs, H.K., Helkowski, J.H., Holloway, T., Howard, E.A., Kucharik, C.J., Monfreda, C., Patz, J.A., Colin Prentice, I., Ramankutty, N., and Snyder, P.K. (2005), Global consequences of land use. *Science*, 309, 570e574.
- Grimmond, C. S. (1992), The Suburban Energy Balance: Methodological Considerations and Results for a Mid-latitude West Coast City Under Winter and Spring Condition. *International Journal of Climatology*, 12, 481-497.
- Han, J. Y., and Baik, J. J. (2008), A theoretical and numerical study of urban heat island induced circulation and convection. *Journal Of The Atmospheric Sciences*, 65, 1869-1877.
- Karaca, M., Tayanc, M. and Toros, H. (1995), Effects of urbanization on climate of Istanbul and Ankara. *Atmos. Environ*, 29, 3411-3421.
- Karaca, M., Unal, Y. S., Kindap, T. and Dalfes N. (2003), Küresel iklim değişimi ve GAP bölgelerine yansımaları, DPT Projesi.
- Kaya, S., Basar, U.G., Karaca, M. And Seker, D. Z. (2012), Assessment of urban heat island using remotely sensed data. *Ekoloji*, 21, 84: 107-113.
- Kleerekoper, L., van Esch, M., Salcedo T. B. 2012. "How to make a city climate-proof, addressing the urban heat island effect", *Resources, Conservation and Recycling*, 64, 30-38.
- Kim, Y. and Baik, J. (2005), Spantial and Temporal Structure of the Urban Heat Island Seoul. *Journal of Applied Meteorology*, 44, 5, 591–605.
- Lee, T.W., Choi, H.S. and Lee, J. (2014), Generalized scaling of urban heat island effect and its applications for energy consumption and renewable energy. *Advanced Meteorology*, 1e5.
- Memon, R. A., Leung, D., and Chunho, L. (2007), A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of Environmental Sciences*, 20, 1, 120-128
- Oke, T. R. (1987), *Boundary layer climates*. Routledge (2<sup>nd</sup> ed.).
- Oke, T. R. (1995), *The heat island of the urban boundary layer: Characteristics, causes and effects*. *Wind Climate in Cities*. Editors: Cermak, J. E., Davenport, A. G., Plate E. J., Viegas D.X. Kluwier Academic Publishers.
- Oke, T. R. (1998), *The Urban Energy Balance*. *Progress in Physical Geography*. PPG: Earth and Environment, 12: 471-508.
- Ozdemir, H., Unal, A., Kindap, T., Turuncoglu, U., Durmusoglu, Z.O., Khan, M., Tayanc, M. and Karaca, M. (2012), Quantification of the urban heat island under a changing climate over Anatolian Peninsula, *Theor. Appl. Climatol*, 108, 31–38.
- Robaa, S. (2003), Thermal Human Comfort in Egypt, *International Journal of Meteorology*, 283, 359-371.
- Robine, J. M., Cheung, S. L. K., LeRoy, S., Van Oyen, H., Griffiths, C., Michel, J.,P. and Herrmann, F.,R, (2008), Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. *C. R. Biol*, 331,171-178.
- Sailor, D. J., and Lu, L. (2004), A top-down meteorology for developing diurnal and seasonal anthropogeniz heating profiles for urban areas. *Atmospheric Environment*, 38,2737-2748.
- Schär, C., Vidale, P., Lüthi, D., Frei, C., Harberli, C., Liniger, M., and Appenzeller, C. (2004), The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature volume 427*, pages 332–336 (2004)
- Siebert, J., Sievers, U., Zdunkowski W. (1992), A one-dimensional simulation of the interaction between land surface processes and the atmosphere, *Boundary Layer Meteorology*, 59, 1-34.
- Sievers, U., Mayer, I. And Zdunkowski W. (1987), Numerische Simulation des urbanen Klimas mit.
- Sievers, U. (1995), Verallgemeinerung der Stromfunktionsmethode auf drei Dimensionen, *Meteorol Zeitschrift*, 4, 3-15.
- Sievers, U., Früh B. (2012), A practical approach to compute short-wave irradiance interacting with subgrid-scale buildings, *Met. Zeit.*, 21, 349-364.
- Stewart, I. D. (2011), A systematic and scientific critique of methodology in modern urban heat island literatue, *Int. J. Climatol*, 31, 200- 217.

Tayanç, M. and Toros, H. (1997), Urbanization effects on regional climate change in the case of four large cities of Turkey, *Climatic Change*, 35, 501-524.

Unal, Y., İncecik, S., Topçu, S., Menteş, S., Güney, C., Doğru, A. O., Yürük, C., Diren, D., Bilgen, S. and Temizöz, P., (2018), Farklı nüfus, şehir yapısı, arazi kullanımı sınıflaması ve iklim karakteristiklerine sahip 3 şehrin (Kahire, Nairobi ve İstanbul) lokal iklim değişimi ve bu şehirlerdeki lokal iklim değişimine karşı farklı adaptasyon stratejilerinin karşılaştırılması, TÜBİTAK 114Y047 project final report.

Unal, Y., Sonuc, C.Y., Incecik, S., Topcu, S., Üstün, D.D. and Temizöz, P. (2020), Investigating urban heat island intensity in İstanbul, *Theo. and Appl. Climatology*, (2020) 139:175–190.

UNWUP (2018), United Nations World Urbanization Prospect 2018.

Vardoulakis, E., Karamanis, D., Fotiadi, A., and Mihalakakou, G. (2013), The urban heat island effect in a small Mediterranean city of high summer temperatures and cooling energy demands. *Solar Energy*, 94, 128-144.

Velazquez-Lozada, A., J E, G., and Winter, A. (2006), Urban Heat Island effect analysis for San Juan, Puerto Ric. *Atmospheric Environment*. 40, 1731-1741.

Wang, X., Wang, Z., Qi, Y., and Guo H. (2009), Effect of urbanization on the winter precipitation distribution in Beijing area, *Sci China Ser D-Earth Sci*, 52 (2), 250-256.

Zhou, W., Xiaoma, Y.Q., Weifeng, L. and Han L.L. (2014), Relationships between land cover and the surface urban heat island: seasonal variability and effects of spatial and thematic resolution of land cover data on predicting land surface temperatures, *Landscape Ecology*, 29, 153–167.

