



Haziran 2025
Cilt: 2, Sayı: 1

June 2025
Volume:2, Issue: 1



ATMOSFER VE İKLİM DERGİSİ

JOURNAL OF ATMOSPHERE AND CLIMATE

atik @ Dergipark



İTÜ



ATMOSFER VE İKLİM DERGİSİ

ATİK

JOURNAL OF ATMOSPHERE AND CLIMATE

Haziran 2025, Cilt:2, Sayı:1
June 2025, Volume:2, Issue:1
e-ISSN: 3023-8560

DERGİ KURULLARI / JOURNAL BOARDS

BAŞ EDİTÖR / EDITOR IN CHIEF

Ahmet ÖZTOPAL, Doç. Dr., İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye

YARDIMCI EDİTÖR / ASSISTANT EDITOR

Ceyhan KAHYA, Dr. Öğretim Üyesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye

EDİTÖR VE DANIŞMA KURULU / EDITORIAL AND ADVISORY BOARD

Ahmet Duran ŞAHİN, Prof. Dr., İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye
Ali Ümran KÖMÜŞÇÜ, Prof. Dr., Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi, Türkiye
Ali TOKAY, Prof. Dr., University of Maryland, Amerika Birleşik Devletleri
Hasan TATLI, Prof. Dr., Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Türkiye
Ömer Lütfi ŞEN, Prof. Dr., İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye
Selahattin İNCECİK, Prof. Dr., Nükleer Düzenleme Kurulu, Türkiye

DERGİ KURULU / JOURNAL BOARD

Ahmet ÖZTOPAL, Doç. Dr., İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye
Ceyhan KAHYA, Dr. Öğretim Üyesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye

DİL EDİTÖRÜ / LANGUAGE EDITOR

Ceyhan KAHYA, Dr. Öğretim Üyesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye

MİZANPAJ EDİTÖRÜ / LAYOUT EDITOR

Abdurrahman DURMAZ, Araş. Gör., İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye

SEKRETER / SECRETARY

Sena Çağla APAYDIN, Mühendis, İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

SU SORUNU BAĞLAMINDA MEGAKENT İSTANBUL’U NE BEKLİYOR? - Araştırma Makalesi WHAT AWAITS MEGACITY ISTANBUL IN THE CONTEXT OF THE WATER ISSUE? - Research Article Ahmet Çamurlu, Mihriban Gültekin, Kasım Koçak	1
İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN SICAK HAVA DALGALARI ÜZERİNE ETKİSİ (Türkiye’de 1980-2024 Yılları Arasında Meydana Gelen Sıcak Hava Dalgası Olayları) - Araştırma Makalesi THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON HEAT WAVES (Heat wave events that have occurred in Turkey between 1980 and 2024) - Research Article Barış Özgün, Edanur Gözet, Batuhan Ateş Yılmaz	13
DENİZ TAŞIMACILIĞI KAYNAKLI EMİSYONLARIN BELİRLENMESİNDE UZAKTAN ALGILAMA YAKLAŞIMI - Araştırma Makalesi A REMOTE SENSING APPROACH TO IDENTIFY SHIPPING EMISSIONS - Research Article Cemre Fazilet Aldoğan, Hande Demirel.....	28
BULUT MASKELEME UYGULAMASININ YER YÜZEY SICAKLIĞI TAHMİNLERİNİN GÜVENİLİRLİĞİNE ETKİSİ - Araştırma Makalesi THE IMPACT OF CLOUD MASKING ON THE RELIABILITY OF LAND SURFACE TEMPERATURE ESTIMATES - Research Article Mehmet Seren Korkmaz, Ali Çalışkan, Atanur Aksoy	37

SU SORUNU BAĞLAMINDA MEGAKENT İSTANBUL’U NE BEKLİYOR?

Ahmet Çamurlu¹, Mihriban Gültekin¹, Kasım Koçak²

¹Erzincan Meteoroloji Müdürlüğü, İnönü Mah. İzzetpaşa Cad. No:22 24000 Merkez/Erzincan

²İstanbul Teknik Üniversitesi, Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, İklim Bilimi ve Meteoroloji Mühendisliği, 34469, Sarıyer, İstanbul
acamurlu@mgm.gov.tr, migultekin@mgm.gov.tr, kkocak@itu.edu.tr

Özet

İklim değişikliğinin en çok su kaynaklarını etkileyeceği yadsınmaz bir gerçektir. Pek çok iklim modeli belli bölgelerde yağış miktarında önemli azalmalar olacağını ortaya koymaktadır. Diğer taraftan İstanbul gibi tarihsel olarak sürekli su sorunu yaşamış olan mega kentler ciddi bir su sorunuyla karşı karşıya kalacaktır.

Bu çalışmada, İstanbul bölgesine düşen yıllık toplam yağış miktarlarından oluşan zaman serisinin ayrıntılı analizi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla İstanbul’da bulunan 11 meteoroloji gözlem istasyonunun yıllık toplam yağış verilerine standart normal homojenlik testi, Buishand testi, Pettit testi ve Von Neumann oran testi uygulanarak homojenlik analizi yapılmış ayrıca eksik verilerin tamamlanması yoluna gidilmiştir.

Yağış verilerine uygulanan homojenlik analizi sonucunda 11 meteoroloji istasyonundan 7 tanesinin homojen veri setine sahip olduğu ortaya konmuştur. Homojen olduğu belirlenen istasyonlara Mann-Kendall testi uygulanarak trend analizleri gerçekleştirilmiştir. Mann-Kendall trend testi sonuçlarına göre sadece Kireçburnu Meteoroloji istasyonu verilerinin $\alpha=0.05$ anlamlılık düzeyine göre istatistiksel olarak anlamlı olduğu görülmüştür. Buna göre sadece Kireçburnu meteoroloji istasyonunun yıllık toplam yağış verileri artan yönde bir trende sahiptir. Diğer taraftan $\alpha=0.05$ anlamlılık düzeyine göre Göztepe, Florya, ve Kartal istasyonlarında istatistiksel olarak anlamlı olmamakla birlikte azalan yönde bir trendin varlığı gözlemlenmiştir. Bahçeköy, Kandilli ve Samandıra meteoroloji istasyonlarında ise artan yönde ancak istatistiksel olarak anlamlı olmayan bir trende rastlanmıştır.

Tüm bu analizlere ek olarak, toplam yağış verilerinde zaman içinde bir değişkenlik yaşanıp yaşanmadığı ayrıca analiz edilmiştir. Buna göre 1980 sonrası yağışların değişkenliği, 1980 öncesine göre artmıştır. Bu durum aşırı yağışlarla birlikte, kuraklık riskinin de önemli ölçüde arttığı anlamına gelmektedir. Mevcut gözlemler dikkate alındığında İstanbul’da son 35 yılda 7 önemli meteorolojik kuraklık yaşanmıştır. Mevcut analizler bu tür olayların sıklığında ve şiddetinde artış beklenmesi yönündedir. Çalışmada elde edilen sonuçlar, İstanbul’un su sorununun çözümünde karar vericilerin dikkate alması gereken önemli bilgiler içermektedir.

Anahtar kelimeler: İklim, Yağış, İstanbul Su Sorunu, Değişkenlik Analizi, Kuraklık.

WHAT AWAITS MEGACITY ISTANBUL IN THE CONTEXT OF THE WATER ISSUE?

Abstract

It is an undeniable fact that climate change will most significantly affect water resources. Many climate models indicate that there will be substantial decreases in precipitation in certain regions. On the other hand, megacities like Istanbul, which have historically faced persistent water problems, will confront a serious water crisis.

In this study, a detailed analysis of the time series consisting of the annual total precipitation amounts in the Istanbul region has been conducted. For this purpose, the annual total precipitation data from 11 meteorological observation stations in Istanbul were subjected to the Standard Normal Homogeneity Test, Buishand Test, Pettitt Test, and Von Neumann Ratio Test to perform a homogeneity analysis. Additionally, missing data were completed.

As a result of the homogeneity analysis, it was revealed that 7 out of the 11 meteorological stations had homogeneous data sets. Trend analyses were then conducted on the stations identified as homogeneous using the Mann-Kendall test. Based on the Mann-Kendall trend test, only the data from the Kireçburnu Meteorological Station were found to be statistically significant at the $\alpha=0.05$ significance level. Accordingly, only the annual total precipitation data from the Kireçburnu station show an increasing trend at the $\alpha=0.05$ significance level.

On the other hand, at the $\alpha=0.05$ significance level, although not statistically significant, a decreasing trend was observed in the Göztepe, Florya, and Kartal stations. In the Bahçeköy, Kandilli, and Samandıra meteorological stations, an increasing trend was observed, but it was not statistically significant.

In addition to all these analyses, a separate analysis was carried out to determine whether there has been variability in total precipitation over time. It was found that the variability in precipitation after 1980 has increased compared to the period before 1980. This indicates that, alongside extreme rainfall, the risk of drought has also increased significantly. Based on current observations, Istanbul has experienced seven major meteorological droughts in the past 35 years. The current analyses suggest an expected increase in the frequency and severity of such events. The results obtained in this study contain crucial information that decision-makers should consider when addressing Istanbul’s water problem.

Keywords: Climate, Precipitation, Istanbul’s Water Problem, Variability Analysis, Drought.

Sorumlu Yazar: Kasım Koçak

Geliş Tarihi: 29 Nisan 2025

Kabul Tarihi: 22 Mayıs 2025

Yayın Tarihi: 30 Haziran 2025

Atıf Şekli: Çamurlu, A., Gültekin, M., Koçak, K. (2025). Su Sorunu Bağlamında Megakent İstanbul’u Ne Bekliyor?, *Atmosfer ve İklim Dergisi*, 1(2), 1-12.

Makale Tipi: Araştırma Makalesi

e-ISSN: 3023-8560

GİRİŞ

Yağış, ekosistemlerin dinamiklerini harekete geçiren temel bir güçtür. Diğer yandan yağış, yeryüzünde canlı hayatın devamı açısından, yerine başka hiç bir madde ikame edilemeyen eşsiz bir kaynaktır.

Çalışma alanı her ne kadar İstanbul ile sınırlı olsa da, genel olarak Marmara bölgesinin yağış klimatolojisini etkileyen durumların ortaya konması yararlı olacaktır. Marmara Bölgesi, Karadeniz ve Akdeniz iklimleri arasında bir geçiş iklimi özellikleri göstermekte olup, kendine özgü karakteristiklere de sahiptir. Karadeniz yağış özellikleriyle karşılaştırıldığında, yıl boyunca daha düşük yağış değerleri kaydedilmektedir. Akdeniz yağış rejimiyle karşılaştırıldığında ise Marmara bölgesi yıl boyunca daha fazla yağış almaktadır (Baltacı, Kındap, Ünal ve Karaca, 2017).

Bölge genellikle Cenova ve İzlanda üzerindeki alçak basınç siklonları belirli zaman ölçeklerinde bölgeyi etkilemektedir. Bunun sonucunda bölgenin iç kesimlerine daha fazla yağış ve nem transferi gerçekleşmektedir. Yaz aylarının bazı dönemlerinde, ülkenin güneyinden bölgenin iç kesimlerine kadar uzanan zayıf Asya musonu (Türkeş ve Tatlı, 2011) etkili olmakta ve beraberinde daha kuru ve sıcak atmosferik koşullar hakim olmaktadır.

Deniz etkisi mekanizması kar yağışı (şiddetli yağış) olayları oluşturmakta ve özellikle kış (sonbahar) aylarında sosyal yaşamı tehdit ederek ekonomik kayıplara neden olmaktadır (Yavuz, Deniz, Özdemir, Kolay ve Karan, 2021; Yavuz, Lupo, Fox ve Deniz, 2022; Baltacı, Lemos da Silva ve Gomes, 2021). İlkbahar ve sonbahar mevsimlerinde, kara alanlarında konvektif aktivite ve buna bağlı şiddetli yağış olayları ortaya çıkmaktadır.

İklim değişikliği ve su kaynakları konusu üzerinde önemle durulması gereken bir konudur. İklim değişikliği nedeniyle yağışların yersel ve zamansal olarak değişmesi, yağış türünün değişmesi, yüzey akış miktarının ve yeraltı su kaynaklarının beslenme miktarının değişmesi kaçınılmaz olacaktır. Yağışların, küresel iklim değişikliğinden farklı boyutlarda etkileneceği, bunun sonucunda bazı bölgelerde kuraklıkların, bazı bölgelerde ise sel ve taşkınların sıklaşacağı beklenmektedir (Çeribaşı, 2019). İklim değişiminin olumsuz sonuçlarından biri olan su kıtlığı dünyanın birçok bölgesinde görülmeye başlanmıştır.

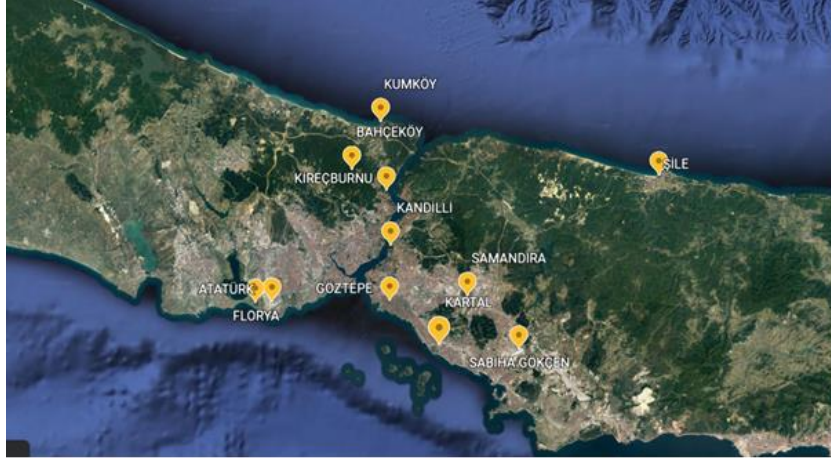
İstanbul için yapılan iklim projeksiyonları yağış ve buna bağlı olarak kuraklık hakkında, karar vericilere önemli bir veri sağlamaktadır. İklim modelleri İstanbul için yaz yağışlarında %30'a, toplam yağış miktarında ise yıllık %12'ye varan oranlarda azalma öngörmektedir. 1 mm veya daha az yağışın olduğu yerlerde yağışlı günlerin sayısında azalma öngörülmektedir. Daha çok yağışlı, yani 10 mm ila 20 mm arasında yağış alan günlerin sayısı ise muhtemelen artacak olup, bu günlerde toplam yağış miktarının %59'a varan oranda ve ortalama %13 oranında artması beklenmektedir. Yağışta yaşanacak bu dalgalanmalar artan buharlaşma ile birleştiğinde, kurak mevsimin yüzyılın ortalarına kadar 45 günden 57 güne yükselmesiyle uzun süreli kuraklık dönemleri beklenmektedir. Kar yağışı İstanbul genelinde daha yüksek irtifalara çekilerek azalacak ve ilkbaharda karların erimesi daha erken tarihlerde gerçekleşmesi beklenmektedir (İBB, 2021).

Yağış, tarımsal üretim ve çölleşmede temel rol oynayan bir faktördür. Bu nedenle yağış üzerine olan çalışmalar, bir bölgenin doğal kaynaklarını ve ekonomik faaliyetlerini tehdit eden sorunları tahmin etmeye yardımcı olabileceğinden, üzerinde önemle durulması gereken bir değişkendir (Ruiz-Alvarez, Singh, Enciso-Medina, Ontiveros-Capurata ve Corrales-Suastegui, 2020). Dolayısıyla yağışların detaylı bir şekilde analiz edilmesi günümüzdeki ve gelecekteki su sorunlarına ışık tutacağı için hayati bir öneme sahiptir.

İstanbul'un su sorununu oluşturan en önemli husus, su kaynaklarının çok sınırlı olmasıdır. Dolayısı ile İstanbul için yağışların düzenli ve yeterli miktarda olması önemlidir. Bu nedenle yağışlardan olabildiğince faydalanmak, mevcut su haznelerini korumak ve kapasitelerini artırmak, İstanbul'un su sorununa önemli bir katkı sağlayacaktır. Bu çalışmada, İstanbul genelinde 11 meteoroloji gözlem istasyonuna ait yıllık toplam yağış verileri öncelikle bir kalite kontrolünden geçirildikten sonra, homojenlik ve trend analizine tabi tutulmuştur. Tarihsel yağışların analizinden elde edilen sonuçların, İstanbul'un gelecekteki su ile ilgili planların yapılmasına katkı sunması ümit edilmektedir.

VERİ VE YÖNTEM

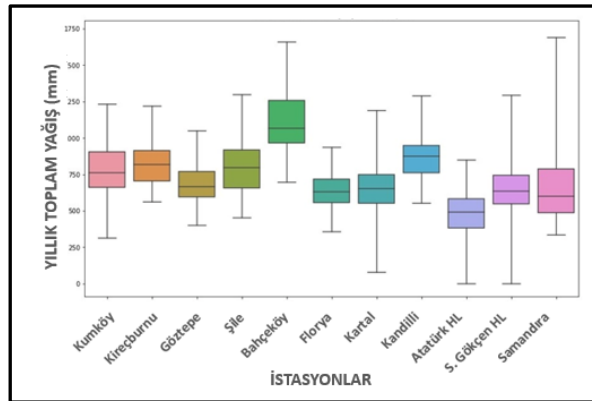
Çalışmada İstanbul ili için yıllık toplam yağış verileri kullanılmıştır. Gözlem periyodu her istasyonda değişiklik göstermekle birlikte 1949-2023 yıllarını kapsayan yaklaşık 75 yıllık veriler kullanılmıştır. Yıllık toplam yağış verileri Kandilli ve Meteoroloji Genel Müdürlüğüne bağlı Kumköy, Kireçburnu, Göztepe, Şile, Bahçeköy, Florya ve Kartal meteoroloji istasyonları ve bunlara ek olarak Samandıra, Atatürk Havalimanı ve Sabiha Gökçen Havalimanlarında bulunan meteoroloji istasyonlarından alınan verileri içermektedir. Bu istasyonların konumları Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Çalışmada kullanılan meteoroloji istasyonları.

Verilerin ön incelemesi

Öncelikle verilerde aykırı değer olup olmadığı araştırılmıştır. Bunun için tüm istasyonların kutu çizimleri (boxplot) oluşturulmuştur (Koçak, 2019), (Şekil 2.) Şekilden de görüldüğü gibi Kandilli, Sabiha Gökçen Havalimanı ve Samandıra gibi istasyonlarda aykırı değer söz konusu değildir.



Şekil 2. İstasyonların toplam yağış miktarlarının kutu grafikleri.

Verilerin ön incelemesinde ikinci aşama eksik verilerin tamamlanması aşamasıdır. Bu aşamada regresyon analizi kullanılmıştır (Wilks, 2013). Yöntem şu şekilde uygulanmıştır. Öncelikle verisi eksik olan istasyonlar belirlenmiştir. Daha sonra bu istasyon ile en yüksek determinasyon katsayısını veren istasyonlar arasında çoklu regresyon modeli oluşturulmuştur. Model parametreleri belirlendikten sonra, verisi eksik olan istasyonun verileri diğer istasyonların aynı döneme denk gelen verilerinden hareketle tamamlanmıştır.

Meteoroloji Genel Müdürlüğü’nden İstanbul’da bulunan 11 istasyonun, 1949-2023 yılları arasından alınan yıllık toplam yağış verilerinde, 39 tane yıllık verinin eksik olduğu tespit edilmiştir. İstasyonların gözlem periyodu, eksik verilerin sayısı ve yılları Tablo 1’de verildiği gibidir. Eksik verilerin tamamlanması aşamasında çoklu

regresyon analizi için R Studio programı kullanılarak regresyon katsayıları hesaplanmıştır. Bulunan katsayılar Excel ortamına aktarılmış, yine Excel ortamında hesaplanarak eksik değerler tamamlanmıştır.

Tablo 1. İstasyonların gözlem periyodu ve eksik veri bilgileri.

İstasyon	Gözlem periyod	Gözlem sayısı	Eksik veri sayısı (yıl)	Enlem	Boylam	Rakım (m)
Kumköy	1949-2023	75	1	41.25	29.03	38
Kireçburnu	1949-2023	75	yok	41.14	29.05	59
Göztepe	1949-2023	75	12	40.97	29.05	33
Şile	1949-2023	75	yok	41.16	29.60	83
Bahçeköy	1949-2023	75	17	41.17	28.98	110
Florya	1949-2023	75	yok	40.97	28.78	37
Kartal	1949-2023	75	6	40.91	29.15	18
Kandilli	1949-2023	75	yok	41.06	29.05	74
Atatürk HL	2002-2023	22	1	40.98	28.82	50
S. Gökçen HL	2001-2023	23	2	40.89	29.30	39
Samandıra HL	2005-2023	19	yok	40.98	29.21	123

Eksik verilerin tahmininde kullanılan çoklu regresyon denklemleri aşağıda verildiği gibidir:

$$Kumköy = -14,142 + 0,413 * Bah.köy + 0,349 * K.Burnu - 0,096 * Florya \quad (1)$$

$$Göztepe = 36,18 + 0,46 * Kartal + 0,30 * Florya + 0,17 * Kandilli \quad (2)$$

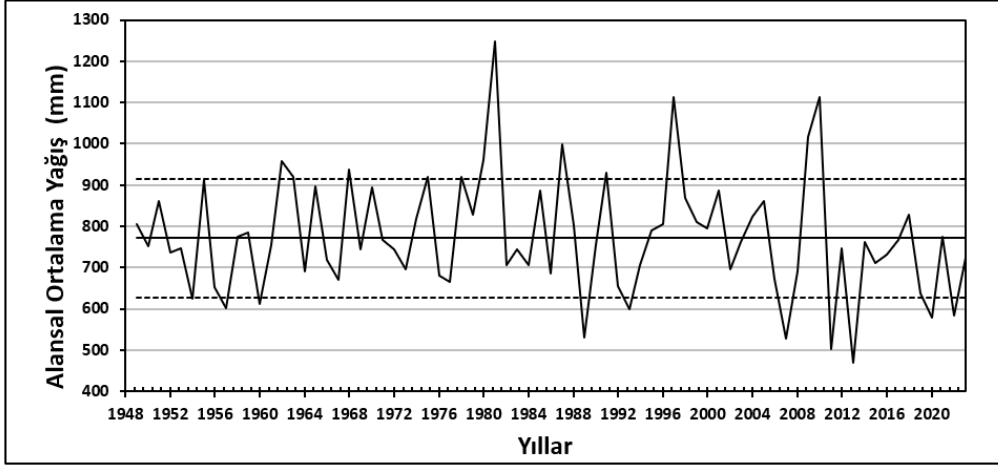
$$Bahçeköy = 0,91 + 0,51 * Kumköy + 0,43 * Kireçburnu + 0,56 Florya \quad (3)$$

$$Kartal = 7,52 + 0,77 * Göztepe + 0,16 * Florya + 0,02 * Kandilli \quad (4)$$

$$Atatürk = 48,02 + 0,41 * Kumköy - 0,01 * Kireçburnu + 0,18 * Kandilli \quad (5)$$

$$S. Gökçen = -190,5 + 0,91 * Kumköy - 0,21 * Kireçburnu + 0,36 * Florya \quad (6)$$

Veriler gerekli kalite kontrol aşamalarından geçirildikten sonra, bütün İstanbul için alansal ortalama toplam yağış serisi elde edilmiştir (Şekil 3). Şekilde koyu yatay çizgi zamansal ortalamayı, kesikli çizgiler ise, ortalamadan $\pm 1 S_x$ miktarını göstermektedir. Şeklin yakından incelenmesi toplam yağışın karakterini ortaya koyması açısından önemlidir. Şekilden de görüldüğü gibi yağışların genel karakteri 1980 yılı itibarıyla önemli ölçüde değişmiştir. Zaman serisi 1949-1980 ve 1981-2023 şeklinde iki periyot halinde dikkate alınmış, birinci periyot için $S_x = 108.15$ mm, ikinci periyot için de $S_x = 164.5$ mm olarak hesaplanmıştır. Buna göre periyotlar arasında değişkenlikteki artışın %52 gibi önemli bir miktarda gerçekleştiği sonucu ortaya çıkmaktadır. Bir diğer önemli nokta da, değişkenlikteki bu artış nedeniyle 1989 yılından 2023 yılına kadar geçen 35 yılda toplam 7 önemli kuraklık olayının yaşanmış olması gerçeğidir. Özetle, tek tek istasyon bazında değil de, İstanbul geneli için konuşacak olursak, Şekil 3'ü küresel ısınmanın beklenen etkilerini dikkate alarak yorumlarsak, yalnızca kuraklık olaylarının değil, taşkın olaylarının da hem şiddetinin, hem de sıklığının artması beklenmelidir.



Şekil 3. İstanbul geneli alansal ortalama toplam yağışın 1949-2023 zaman serisi

Homojenlik Testleri

Eksik verilerin uygun bir şekilde tamamlanmasının ardından istasyon verilerinin homojen olup olmadığı test edilmiştir. Bu aşama önemlidir, çünkü verilerin homojenliği zaman içinde çeşitli nedenlere bağlı olarak bozulabilmektedir. Örneğin istasyonların veya cihazların yerinin değiştirilmesi, ölçüm tekniklerindeki değişiklikler vb bu kapsamda değerlendirilebilir. Bu çalışmada, bir zaman serisinde homojenliği test etmek için dört ayrı test yöntemi uygulanmıştır. Bunlar, standart normal homojenlik testi (SNHT), Buishand aralık testi, Pettitt testi ve Von Neumann oran testidir.

Standart normal homojenlik testi, Pettitt testi ve Buishand aralık testinin uygulama aşamaları aşağıda ayrıntılı olarak verilmiştir. Bu testler verilen bir serinin homojen olup olmadığını test etmenin yanında, homojenliğin hangi yıldan itibaren ortadan kalktığını da ortaya koymaktadır. Buna karşılık Von Neuman testi sadece veri kümesinin homojen olup olmadığını test etmek amacıyla kullanılmaktadır (Wijngaard, Klein Tank, ve Können, 2003).

Aşağıda verilen homojenlik testlerinin anlatımında zaman serisi Y_i , $i=1, \dots, n$, serinin ortalaması $\bar{Y}$, serinin standart sapması ise s ile gösterilecektir.

Standart Normal Homojenlik Testi

Alexandersson tarafından geliştirilen standart normal homojenlik testi birçok iklimsel ve hidrolojik verinin test edilmesinde başarı ile kullanılmıştır (Alexandersson, 1986). Yöntemin esası, incelenen serinin ilk k adet gözlem noktasının ortalamasını son $n-k$ adet gözlem noktasının ortalaması ile kıyaslayan bir T_k istatistiğinin hesaplanmasına dayanmaktadır.

$$T_k = k * \bar{z}_1^2 + (n - k) * k * \bar{z}_2^2 \quad (7)$$

Bu eşitlikte geçen $\bar{z}_1$ ve $\bar{z}_2$ ortalama sırasıyla aşağıda verildiği gibidir

$$\bar{z}_1 = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (Y_i - \bar{Y})/s, \quad \bar{z}_2 = \frac{1}{n-k} \sum_{i=k+1}^n (Y_i - \bar{Y})/s \quad (8)$$

Eğer K . Yılda seride bir kırılma olmuşsa $k=K$ 'ya karşılık gelen yılda $T(k)$ istatistiği maksimum değerini alacaktır. Test istatistiği T_0 şu şekilde tanımlanır:

$$T_0 = \max_{1 \leq k \leq n} T(k) \quad (9)$$

Bu şekilde hesaplanan T_0 istatistiği seçilen bir anlamlılık seviyesinde kritik değerden büyükse, serinin homojen olduğu hipotezi reddedilir. Testler sonucundaki kritik değerler, veri sayısı ve p -değerleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. İstasyonların SNHT testi sonuçları.

İstasyon	T_0	p
Kumköy	8.06	0.08
Kireçburnu	8.17	0.08
Göztepe	1.87	0.93
Şile	10.17	0.03
Bahçeköy	3.76	0.56
Florya	3.57	0.60
Kartal	4.49	0.42
Kandilli	1.24	0.99
Atatürk HL	14.34	0.00
S. Gökçen HL	12.11	0.00
Samandıra	2.03	0.81

%95 güven aralığının (p -değeri<0.05) dışında kalan Şile, Atatürk HL ve Sabiha Gökçen HL meteoroloji istasyonlarının verileri SNHT testine göre homojen değildir. %95 güven aralığının (p -değeri>0.05) içinde kalan Kumköy, Kireçburnu, Göztepe, Bahçeköy, Florya, Kandilli, Kartal ve Samandıra meteoroloji istasyonlarının verileri ise SNHT testine göre homojen olarak kabul edilmiştir.

Buishand Aralık Testi

Bu test, Eşitlik (8)'de verildiği gibi düzeltilmiş kısmi toplamlar olarak tanımlanır.

$$S_0^* = 0 \text{ ve } S_k^* = \sum_{i=1}^k (Y_i - \bar{Y}), \quad k = 1, \dots, n \quad (10)$$

Bu test için kritik değer $R/\sqrt{n}$ şeklinde hesaplanır. Bu ifadedeki R şu şekilde hesaplanır:

$R = (\max_{0 \leq k \leq k} S_k^* - \min_{0 \leq k \leq n} S_k^*)/s$ (Buishand, 1982). Testler sonucundaki kritik değerler, veri sayısı ve p -değerleri Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. İstasyonların Buishand aralık testi sonuçları

İstasyon	n	$R/\sqrt{n}$	p
Kumköy	75	1.75	0.02
Kireçburnu	75	1.45	0.40
Göztepe	75	0.78	0.87
Şile	75	2.03	0.00
Bahçeköy	75	1.22	0.51
Florya	75	0.81	0.96
Kartal	75	0.71	0.94
Kandilli	75	0.84	0.77
Atatürk HL	22	1.35	0.74
S. Gökçen HL	23	1.54	0.88
Samandıra	19	1.17	0.22

%95 güven aralığının (p -değeri <0.05) dışında kalan Kumköy ve Şile meteoroloji istasyonlarına ait verilerin Buishand aralık testine göre homojen olmadığı; %95 güven aralığının (p -değeri >0.05) içinde kalan Kireçburnu, Göztepe, Bahçeköy, Florya, Kartal, Kandilli, Atatürk HL, Sabiha Gökçen HL ve Samandıra meteoroloji istasyonlarına ait verilerin ise homojen olduğu ortaya konmuştur.

Pettitt Testi

Bir zaman serisindeki sıçrama/kırılma noktasını belirlemek için Pettitt (1979) tarafından geliştirilen parametrik olmayan bu yöntem aylık veya yıllık ölçekte sıçrama noktasını bulabilmektedir. Sıfır hipotezi serinin homojen olduğunu, alternatif hipotez ise seride ani bir sıçrama olma durumunu belirtir. Bu yaklaşım Eşitlik (9) ile verilen X_k istatistiğinin hesaplanmasını gerektirir.

$$X_k = 2 * \sum_{i=1}^k r_i - k * (n+1) \quad k = 1, 2, 3, \dots, n \quad (11)$$

X_k değerleri grafik olarak çizilir. X_k 'nin mutlak değerlerinin maksimumu kırılma noktasını belirler. Eğer seride negatif kırılma varsa X_k grafiği bir maksimum değere, tersine eğer pozitif bir kırılma varsa X_k grafiği minimum bir değere sahip olur. Test istatistiği Eşitlik (10) ile verilir.

$$X_E = \max_{1 \leq k \leq n} |X_k| \quad (12)$$

Homojenlik testi sonucunda elde edilen sonuç, kritik değerden daha küçük ise o veri seti homojen olarak adlandırılır. Testler sonucundaki kritik değerler, veri sayısı ve p -değerleri Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4. İstasyonların Pettitt homojenlik testleri sonuçları

İstasyon	X_E	p
Kumköy	480	0.08
Kireçburnu	480	0.08
Göztepe	232	0.94
Şile	628	0.01
Bahçeköy	282	0.66
Florya	184	1.00
Kartal	230	0.95
Kandilli	182	1.00
Atatürk HL	67	0.18
S. Gökçen HL	66	0.26
Samandıra	30	0.95

Pettitt homojenlik testine göre %95 güven aralığının (p -değeri <0.05) dışında kalan Şile meteoroloji istasyonunun verileri hariç diğer istasyonların verilerinin homojen olduğu sonucuna varılmıştır.

Von Neumann Oran Testi

Von Neuman oranı N , ardışık yıllar arasındaki farkların kareleri toplamının varyans değerine oranı olarak tanımlanır (Von Neumann, 1941).

$$N = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (Y_i - Y_{i+1})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y_{i+1})^2} \quad (13)$$

İstasyonların Denklem (11) ile hesaplanan N ve p değerleri Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. İstasyonların Von Neumann Oranı homojenlik testleri sonuçları

İstasyon	N	p
Kumköy	1.65	0.10
Kireçburnu	1.72	0.19
Göztepe	2.07	0.84
Şile	1.59	0.06
Bahçeköy	1.78	0.28
Florya	1.97	0.82
Kartal	1.94	0.70
Kandilli	2.17	0.54
Atatürk HL	1.02	0.01
S. Gökçen HL	0.87	0.00
Samandıra	1.52	0.20

%95 güven aralığının (p -değeri<0,05) dışında kalan Atatürk HL ve Sabiha Gökçen HL meteoroloji istasyonlarına ait verilerin Von Neumann testine göre homojen olmadığı; %95 güven aralığının (p -değeri>0,05) diğer istasyonların gözlemlerinin ise homojen olduğu ortaya konmuştur. Buraya kadar verilen dört farklı homojenlik testinin sonuçları toplu olarak Tablo 6'da verildiği gibidir.

Tablo 6. İstasyonların homojenlik testlerinin sonuçları

(✓ homojendir, X homojen değildir).

İstasyon	SNHT	Buishand	Pettitt	Von Neumann
Kumköy	✓	X	✓	✓
Kireçburnu	✓	✓	✓	✓
Göztepe	✓	✓	✓	✓
Şile	X	X	X	✓
Bahçeköy	✓	✓	✓	✓
Florya	✓	✓	✓	✓
Kartal	✓	✓	✓	✓
Kandilli	✓	✓	✓	✓
Atatürk HL	X	✓	✓	X
S. Gökçen HL	X	✓	✓	X
Samandıra	✓	✓	✓	✓

Çalışmada kullanılan 4 testin sonuçlarına göre en az 3 testten geçen Kumköy, Kireçburnu, Göztepe, Bahçeköy, Florya, Kartal, Kandilli ve Samandıra istasyonlarının homojen veri setlerine sahip olduğu kabul edilmiştir. En

az 3 testten geçemeyen diğer istasyonlar Şile, Atatürk HL ve Sabiha Gökçen HL meteoroloji istasyonlarının homojen veri setine sahip olmadığı sonucuna varılmış ve bu istasyonlar trend analizine tabi tutulmamıştır.

Mann-Kendall (M-K) Trend Analizi

Mann-Kendall testi, parametrik olmayan bir testtir. Özellikle hidrolojik ve meteorolojik zaman serilerinin trendlerinin belirlenmesinde sıklıkla kullanılır. Bu test parametrik olmayan bir testtir ve verilen bir zaman serisindeki doğrusal trendin varlığının test edilmesinde kullanılan pratik bir yöntemdir. (Zhang, Harvey, Hogg ve Yuzyk, 2001).

M-K trend testi, istatistiksel olarak S değeri üzerine kuruludur. Rastgele değişkenin gözlemlenen her bir çifti $x_i, x_j (i < j)$ olacak şekilde) incelenerek, $x_i < x_j$ ya da $x_i > x_j$ durumu kontrol edilir. Bu çiftlerden birinci türde (yani $x_i < x_j$) olanların sayısı P , ikinci türde (yani $x_i > x_j$) olanların sayısı M olarak tanımlanır.

Buna göre, S istatistiği şu şekilde tanımlanır:

$$S = P - M \quad (14)$$

Trendin anlamlılığının belirlenebilmesi için öncelikle S istatistiği (Eşitlik (14) ve bu istatistik kullanılarak Z istatistiğinin (Eşitlik (15) hesaplanması gerekmektedir. Eğer rastgele değişkenler bağımsız ve rastgele dağılmış varsayılırsa ve gözlem sayısı $n \geq 8$ olduğunda, **S istatistiği yaklaşık olarak normal dağılmış** kabul edilir. Bu durumda ortalaması ve varyansı sırasıyla $\mu_S = 0$ ve $\sigma_S^2 = n(n-1)(2n+5)/18$ eşitlikleri ile verilir. Bütün bu bilgiler kullanılarak aşağıda verildiği gibi hesaplanan **standartlaştırılmış Z istatistiğinin dağılımı** normal standart dağılıma uyar.

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sigma} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sigma} & S < 0 \end{cases} \quad (15)$$

M-K trend testinde H_0 hipotezi incelenen seride doğrusal bir trendin olmadığını, H_1 hipotezi ise doğrusal bir trendin varlığına işaret eder. Eğer hesaplanan Z değeri, normal dağılım tablosundan $\alpha/2$ anlamlılık seviyesine karşılık gelen kritik değerden küçük ise yani $|Z| \leq Z_{\alpha/2}$ ise H_0 hipotezi kabul edilir, aksi durumda reddedilir. Diğer taraftan S veya Z 'nin işareti de serideki trendin yönü hakkında bilgi verir.

Homojen veri setine sahip olan istasyonlara ait yıllık toplam yağış verilerinin trend sonuçları Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. İstasyonların Mann-Kendall trend analizi testleri sonuçları

İstasyon	n	S	Z	p
Kumköy	75	387	1.77	0.08
Kireçburnu	75	573	2.62	0.01
Göztepe	75	-159	-0.72	0.47
Bahçeköy	75	115	0.52	0.60
Florya	75	-107	-0.48	0.63
Kartal	75	-135	-0.61	0.54
Kandilli	75	17	0.07	0.94
Samandıra	19	27	0.91	0.36

Tablo 7'de homojen veri setine sahip olmayan Şile, Atatürk HL ve Sabiha Gökçen HL meteoroloji istasyonları haricindeki 8 Meteoroloji istasyonunda gözlenen yıllık toplam yağış verilerinin trendi %95 güven aralığında incelenmiş olup sadece Kireçburnu meteoroloji istasyonunda anlamlı bir trendin varlığı saptanmıştır. Mann-

Kendall trend testi sonuçlarına göre Kireçburnu meteoroloji istasyonuna ait S ve Z değerlerinin pozitif ve $\alpha=0.05$ anlamlılık düzeyine göre istatistiksel olarak anlamlı (p -değeri <0.05) olduğu görülmektedir. Bu durumda %95 olasılıkla Kireçburnu meteoroloji istasyonunun yıllık toplam yağış verilerinin artan yönde bir trende sahip olduğu söylenebilir. $\alpha=0.05$ anlamlılık düzeyine göre Göztepe, Florya ve Kartal istasyonlarında istatistiksel olarak anlamlı olmasa da negatif S ve Z değerlerine sahip oldukları için, ilgili istasyonlarda trendin azalan yönde olduğu söylenebilir. Pozitif S ve Z değerlerine sahip Kumköy, Bahçeköy, Kandilli ve Samandıra meteoroloji istasyonlarında ise artan yönde ancak istatistiksel olarak anlamlı olmayan bir trende rastlanmıştır.

Verilerin Değişkenlik Analizi

Bir veri kümesinin değişkenliği söz konusu verinin en önemli özelliklerinden biridir. Her şeyden önce değişkenlik tahmin edilebilirlik ile yakından ilişkili bir özelliktir. Bir değişkenin değişkenliği ne kadar büyük ise o değişkenin tahmin edilebilirliği de o derece zordur, çünkü ortalama etrafındaki salınım çok fazladır. Diğer taraftan iklim değişimi meteorolojik ve hidrolojik değişkenlerin değişkenliğini de etkilemektedir. O nedenle toplam yağış verilerinin değişkenlik analizi ayrıca incelenmiştir.

Bir veri kümesinin değişkenlik ölçüsü, gözlem değerlerinin ortalama etrafında ne kadar toplu ya da yayılmış biçimde bulunmasının bir ölçüsüdür. Bu ölçünün belirlenmesi amacına yönelik olarak kullanılan yöntemlerinden bazıları; dördebölenler sapması (QD), ortalama mutlak sapma (MAD), standart sapma (S_x) ve değişim katsayısıdır (C_{vx}), (Koçak, 2019).

$$QD = \frac{IQR}{2} ; (IQR = q_{0.75} - q_{0.25}) \quad (16)$$

$$MAD = \frac{\sum |x_i - \mu|}{N} \quad (17)$$

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (18)$$

$$C_{vx} = \frac{S_x}{\bar{x}} \quad (19)$$

Tablo 8, QD ve MAD için hesaplanan değişkenlik değerlerini göstermektedir. Değişkenlik değerleri hem tüm periyot için, hem de iklim değişiminin etkisini görebilmek için 1949-1980 ve 1981-2023 şeklinde iki alt periyot için ayrı ayrı hesaplanmıştır.

Tablo 8. QD ve MAD için değişkenlik analizi sonuçları

	QD				MAD			
	1949-2023	1949-1980	1981-2023	Değişim (%)	1949-2023	1949-1980	1981-2023	Değişim (%)
Kumköy	123.35	117.39	132.18	11	136.57	121.22	147.99	18
Kireçburnu	106.15	99.18	123.6	20	127.71	113.87	138.02	17
Göztepe	94.42	88.73	91.55	03	105.85	96.48	112.82	14
Şile	130.45	82.76	112.36	26	152.29	147.39	155.94	05
Bahçeköy	151.98	134.83	183.1	26	174.07	139.92	199.48	30
Florya	83.51	82.9	84.96	02	95.52	82.44	105.24	22
Kartal	98.13	65.93	112.23	41	115.83	86.82	137.41	37
Kandilli	97.51	100.74	81.7	-23	117.39	110.8	122.3	09
Atatürk HL	100.35	-	-		161.35	-	-	
S. Gökçen HL	127.83	-	-		229.33	-	-	
Samandıra	157.2	-	-		271.34	-	-	
Ort. değişim (%)				13				19

Tablo 8’de verilen alt periyotlar dikkate alındığında QD değerlerinde birinci periyottan ikinci periyota geçişte Kandilli istasyonu hariç % 2-41 aralığında değişen artış söz konusudur. Buna göre QD dikkate alındığında

değişkenliği en az değişmiş olan istasyon Florya, en çok değişmiş olan istasyon ise Kartal istasyonudur. İki periyot arasındaki ortalama değişim % 13 kadardır. Aynı şekilde *MAD* yaklaşımına göre hesaplanan değişkenlik ölçülerinde de birinci periyottan ikinci periyoda geçişte bütün istasyonlarda artış söz konusudur. Bu artış yüzdeleri en az değişim Şile, en fazla değişim Kartal istasyonunda gözlenmiş olup % 5-37 arasında değişmektedir. Ortalama değişim %19'dur.

Tablo 9, S_X ve C_{VX} için hesaplanan değişkenlik değerlerini göstermektedir. Yukarıda da değinildiği gibi, değişkenlik değerleri hem tüm periyot için, hem de iklim değişiminin etkisini görebilmek için 1949-1980 ve 1981-2023 şeklinde iki alt periyot için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Tablo 9'de verilen alt periyotlar dikkate alındığında S_X değerlerinde birinci periyottan ikinci periyota geçişte % 17-38 aralığında değişen artış söz konusudur. Buna göre S_X dikkate alındığında değişkenliği en az değişmiş olan istasyon Kandilli, en çok değişmiş olan istasyon ise Kartal istasyonudur. İki periyot arasındaki ortalama değişim % 27 kadardır. Aynı şekilde C_{VX} yaklaşımına göre hesaplanan değişkenlik ölçülerinde de birinci periyottan ikinci periyoda geçişte bütün istasyonlarda artış söz konusudur. Bu artış yüzdeleri en az değişim Şile, en fazla değişim Kartal istasyonunda gözlenmiş olup % 12-41 arasında değişmektedir. Ortalama değişim %25'dir.

Tablo 9. S_X ve C_{VX} için değişkenlik analizi sonuçları

	S_X				C_{VX}			
	1949-2023	1949-1980	1981-2023	Değişim (%)	1949-2023	1949-1980	1981-2023	Değişim (%)
Kumköy	172.4	140.87	191.84	27	0.22	0.19	0.24	21
Kireçburnu	159.47	126.26	175.29	28	0.2	0.16	0.21	24
Göztepe	130.64	112.29	143.55	22	0.19	0.16	0.21	24
Şile	199.47	160.24	212.22	24	0.25	0.22	0.25	12
Bahçeköy	214.03	164.52	246.33	33	0.19	0.15	0.22	32
Florya	118.87	94.68	135.15	30	0.19	0.15	0.21	29
Kartal	156.93	113.38	183.14	38	0.24	0.17	0.29	41
Kandilli	154.55	138.77	166.79	17	0.18	0.16	0.19	16
Atatürk HL	224.06	-	-		0.48	-	-	
S. Gökçen HL	316.59	-	-		0.53	-	-	
Samandıra	391.93	-	-		0.56	-	-	
Ort.değişim (%)				27				25

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, İstanbul ilinde bulunan 11 meteoroloji istasyonundan elde edilen 1949-2023 yıllarını kapsayan yıllık toplam yağış zaman serilerinin analizi yapılmıştır. Çalışmada Kumköy, Kireçburnu, Göztepe, Şile, Bahçeköy, Florya, Kartal, Kandilli, Atatürk HL, Sabiha Gökçen HL ve Samandıra istasyonları kullanılmıştır. Çalışmada verilerin homojenliğinin test edilmesinde, standart normal homojenlik testi, Buishand aralık testi, Pettitt testi, Von Neumann oran testi kullanılmıştır. Verilerin trend içerip içermediği Mann-Kendall trend testi kullanılarak ortaya konmuştur. Standart normal homojenlik testi, Buishand aralık ve Pettitt testine göre homojen veri setine sahip olmayan Şile, Atatürk HL, Sabiha Gökçen HL ve Kumköy istasyonları Mann-Kendall trend testinde kullanılmamıştır. Çalışmada sonuçlarına göre bazı çıkarımlar maddeler halinde aşağıda verilmiştir.

1. Yapılan trend analizi sonuçlarına göre trend saptanan bir istasyon dikkate alınmazsa, İstanbul genelindeki diğer istasyonların yıllık toplam yağışlarında bariz bir artma ya da azalma eğilimi ($\alpha=0.05$ anlamlılık düzeyinde) gözlenmemiştir. Bu durum İstanbul su kaynakları üzerinde ciddi bir baskı oluşturacaktır. Çünkü bir yandan artan nüfus nedeniyle suya olan talep artarken, diğer yandan küresel ısınma nedeniyle başta buharlaşma olmak üzere su kayıpları önemli ölçüde artacaktır.
2. Değişkenlik oranının artması öngörülebilirliğin azalması anlamına gelmektedir. Bu durumda 1980 yılı ve sonrasında değişkenlik oranının daha fazla olması önümüzdeki yıllar için öngörülebilirliğin azaldığı sonucunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte öngörülebilirliğin azalması şehir planlamasında karar vericileri zor durumda bırakmaktadır.

3. 1980 yılı, yağışların genel karakterinin önemli ölçüde değiştiği yıl olarak karşımıza çıkmaktadır. 1980 sonrası yağışların değişkenliği, uygulanan tüm yöntemler dikkate alındığında önemli ölçüde artmıştır. Bu durum kuraklık riskinin de önemli ölçüde arttığı anlamına gelmektedir. İstanbul daha büyük kuraklıklara hazırlıklı olmalıdır.
4. Son 35 yılda 7 önemli meteorolojik kuraklık yaşanmıştır. Dolayısıyla kuraklıkların sıklığında ve şiddetinde artış beklenmelidir.
5. Son 75 yılın en kurak yılı 2013 yılında yaşanmıştır, bu yılda gerçekleşen toplam yağış miktarı 468.7 mm'dir. İstanbul için hesaplanan alansal ortalama yağış miktarının 752 mm olduğu dikkate alınırsa 2013 yılında yaşanan kuraklığın boyutu daha iyi anlaşılır. Başta nüfus artışı nedeniyle, bundan sonraki kuraklıklar bu seviyenin altında bile olsa etkilerinin daha yıkıcı olması beklenmelidir.

İstanbul başta Roma ve daha sonra Bizans ve Osmanlı İmparatorlukları döneminde hep su sorunu yaşamış bir kenttir. Bu sorun günümüzde de devam etmektedir. Son resmi rakamlara göre yaklaşık olarak her beş kişiden biri İstanbul'da yaşamaktadır. Bu nüfus baskısına, küresel ısınma nedeniyle su havzalarından gittikçe artan oranda gerçekleşmesi beklenen su kayıpları vb olumsuz durumlar da eklendiğinde, İstanbul su sorununun ulaşacağı boyutlar hayati bir önem kazanmaktadır. Konu hakkında daha kapsamlı çalışmalar yapılarak, alınması gereken önlemlere bilimsel destek sağlanması önem arz etmektedir.

KAYNAKLAR

- Alexandersson, H. (1986). A homogeneity test applied to precipitation data. *J Climatol*, 6(6), 661-675.
- Baltacı, H., Kındap, T., Ünal, A. ve Karaca, M. (2017). The influence of atmospheric circulation types on regional patterns of precipitation in Marmara (NW Turkey). *Theor Appl Climatol*, 127, 563-572.
- Baltacı, H., Lemos da Silva, M.C. ve Gomes H.B. (2021). Climatological conditions of the Black Sea-effect snowfall events in Istanbul, Turkey. *Int J Climatol*, 41, 2017-2028.
- Buishand, T.A. (1982). Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. *Journal of Hydrology* 58, 11-27.
- Çeribaşı, G. (2019). Analyzing rainfall datas' of eastern Black Sea basin by using Sen method and trend methods. *Journal of Computer Science and Technology*, 9, 254-64.
- İBB, (2021). *İstanbul İklim Değişikliği Eylem Planı*. Çevre Koruma ve Kontrol Dairesi Başkanlığı.
- Koçak, K. (2019). *Data Analysis (Lecture Notes)*. İ.T.Ü., Meteoroloji Mühendisliği Bölümü.
- Pettitt, A.N. (1979). A non-parametric approach to the change-point detection. *Applied Statistics*, 28, 126-135.
- Ruiz-Alvarez, O., Singh, V. P., Enciso-Medina, J., Ontiveros-Capurata, R. E. ve Corrales-Suastegui, A. (2020). Spatio-temporal trends of monthly and annual precipitation in Aguascalientes Mexico. *Atmosphere*, 11(5), 437.
- Türkeş, M. ve Tatlı, H. (2011). Use of the spectral clustering to determine coherent precipitation regions in Turkey for the period 1929-2007. *Int J Climatol*, 31, 2055-2067.
- Wijngaard, J., Klein Tank, A. ve Können, G. (2003). Homogeneity of 20th century European daily temperature and precipitation series. *Int J Climatol*, 23(6), 679-692.
- Wilks, D.S. (2013). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Academic Press.
- Yavuz, V., Lupo, A.R., Fox, N.I. ve Deniz, A. (2022). Meso-Scale Comparison of Non-Sea-Effect and Sea-Effect Snowfalls, and Development of Prediction Algorithm for Megacity Istanbul Airports in Turkey. *Atmosphere*, 13, 657.
- Yavuz, V., Deniz, A., Özdemir, E.T., Kolay, O. ve Karan H. (2021). Classification and analysis of sea-effect snowbands for Danube Sea area in Black Sea. *Int J Climatol*. 41, 3139-3152.
- Von Neumann, J. (1941). Distribution of the ratio of the mean square successive difference to the variance. *Annals of Mathematical Statistics*, 13, 367-395.
- Zhang, X., Harvey, K. D., Hogg, W. D. ve Yuzyk, T. R. (2001). Trends in Canadian streamflow. *Water Resources Research*, 37(4), 987-998.

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN SICAK HAVA DALGALARI ÜZERİNE ETKİSİ (Türkiye’de 1980-2024 Yılları Arasında Meydana Gelen Sıcak Hava Dalgası Olayları)

Barış Özgün¹, Edanur Gözet², Batuhan Ateş Yılmaz²

¹Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 06120 Kalaba, Keçiören, Ankara

²Meteoroloji 11. Bölge Müdürlüğü, 61080 Kalkınma, Ortahisar, Trabzon

bozgun@mgm.gov.tr, egozet@mgm.gov.tr, bayilmaz@mgm.gov.tr

Özet

Meteorolojik faktörler insan yaşantısı ve faaliyetlerinde çok etkili bir olgudur. Meteorolojik parametrelerde meydana gelen değişikliklere insanoğlu hem doğal yapısı hem de teknolojisiyle birlikte uyum sağlayabilmektedir. Ancak uyum çalışmalarının yetersiz kaldığı bazı şartlar da zaman zaman görülebilmektedir. Sıcaklık değişkeninde meydana gelen değişimlere uyum sağlanabilmesi için insanoğlu süreç içerisinde ısınma ve soğutma gereçleriyle birlikte çeşitli korunma yöntemleri geliştirmiştir. Ancak iklim değişikliği nedeniyle yüksek sıcaklık etkilerinin daha sıklıkla görülmesi nedeniyle zaman zaman korunma şartlarının yetersiz kaldığı ve yüksek sıcaklıkların zarar verici etkileri gözlemlenebilmektedir. İklim değişikliğinin sonuçlarından biri olan sıcak hava dalgalarının insan sağlığına etkileri incelendiğinde, ölüm ve hastalıklara doğrudan sebep olması nedeniyle son derece önemli olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmanın amacı, Türkiye’de 1980-2024 yılları arasında gerçekleşen sıcak hava dalgalarının görülme sıklığını değerlendirmektir. Günlük maksimum sıcaklığın, ard arda 5 gün boyunca uzun yıllar ortalama maksimum sıcaklığının 5°C üzerinde gerçekleşmesi “sıcak hava dalgası”, uzun yıllar ortalama maksimum sıcaklığın 10 °C üzerinde gerçekleşmesi durumunda ise “ekstrem sıcak hava dalgası” olarak adlandırılmaktadır. Uluslararası alanda sıcak hava dalgasının standardize edilmiş bir tanımı bulunmamakta olup ülkelerin yerel şartlarına göre yerel tanımlamalar yapılmıştır. Yapılan literatür taramasında bazı çalışmalarda 3 gün ard arda devam eden dönemler sıcak hava dalgası olarak tanımlanmıştır. Yapılan bu çalışmada 81 il merkezinin günlük maksimum hava sıcaklıkları ile (Tmax) uzun yıllar anomalisi hesaplanmıştır. Hesaplanan sıcak hava dalgası sayıları ile ekstrem sıcak hava dalgası sayılarının 45 yıllık periyottaki değişimi Mann-Kendall Trend Analizi yöntemi ile analiz edilmiştir. Mann-Kendall trend analizinin sonuçlarına göre, yıllık sıcak dalga sayılarında son 45 yılda belirginleşen artış eğilimi istatistiki olarak tüm istasyonlarda anlamlıdır. Ekstrem sıcak dalga sayılarında ise Bitlis, Balıkesir, Tokat ve Çorum istasyonu hariç tüm artan trend gözlenmektedir. Sıcak hava dalgası sayılarında kuzey kesimlerde daha belirgin olmak üzere genel bir artış olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: İklim Değişikliği, Sıcak Hava Dalgası, Türkiye, İstatistik.

THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON HEAT WAVES (Heat wave events that have occurred in Turkey between 1980 and 2024)

Abstract

Meteorological factors play a highly influential role in human life and activities. Human beings are able to adapt to changes in meteorological parameters through both their natural characteristics and technological means. However, there are certain conditions where these adaptation efforts prove to be insufficient. In response to temperature fluctuations, humans have developed various protective methods over time, including heating and cooling systems. Nevertheless, due to the increasing frequency of high-temperature events caused by climate change, there are times when protective measures are inadequate, and the harmful effects of extreme heat become apparent. One of the consequences of climate change, heatwaves, has been shown to have significant impacts on human health, particularly due to their direct links to mortality and illness. The aim of this study is to assess the frequency of heatwaves that occurred in Turkey between the years 1980 and 2024. A “heatwave” is defined as a period during which the daily maximum temperature exceeds the long-term average maximum temperature by 5°C for at least 5 consecutive days. If the daily maximum temperature exceeds the long-term average by 10°C, it is defined as an “extreme heatwave.” There is no standardized global definition for heatwaves; instead, countries adopt localized definitions based on their specific climatic conditions. According to the literature review, some studies have defined heatwaves as periods of 3 consecutive days with high temperatures. In this study, daily maximum temperatures (Tmax) from 81 provincial centers in Turkey were used to calculate long-term anomalies. The changes in the number of heatwave and extreme heatwave events over the 45-year period were analyzed using the Mann-Kendall Trend Analysis method. According to the results of the Mann-Kendall trend analysis, the increasing trend in annual heatwave frequency over the past 45 years is statistically significant across all stations. For extreme heatwaves, an increasing trend was observed at all stations except for Bitlis, Balıkesir, Tokat, and Çorum. The data also indicate a general increase in the number of heatwave events, especially more prominently in the northern regions of the country.

Keywords: Climate Change, Heat Wave, Türkiye, Statistics.

Sorumlu Yazar: Batuhan Ateş Yılmaz

Geliş Tarihi: 10 Nisan 2025

Kabul Tarihi: 24 Mayıs 2025

Yayın Tarihi: 30 Haziran 2025

Atf Şekli: Özgün, B., Gözet, E., Yılmaz, B.A. (2025). İklim Değişikliğinin Sıcak Hava Dalgaları Üzerine Etkisi (Türkiye’de 1980-2024 Yılları Arasında Meydana Gelen Sıcak Hava Dalgası Olayları), *Atmosfer ve İklim Dergisi*, 1(2), 13-27.

Makale Tipi: Araştırma Makalesi

e-ISSN: 3023-8560

GİRİŞ

İklim sanayileşmeden bu yana insan faaliyetlerinden kaynaklı büyük değişikliklere uğramıştır (Zhang vd., 2017). IPCC, 2023 raporuna göre küresel yüzey sıcaklığı 2011- 2020’de, 1850-1900’e göre yaklaşık 1,1 °C artmıştır. 1970’ten bu yana son 50 yıllık periyottaki yükseliş önceki dönemlere göre daha hızlı bir artış olarak kendini göstermektedir. Türkiye’de, Akdeniz Havzası’ndaki konumu ve kuzeye doğru genişleyen çöl iklimi nedeniyle Aşırı sıcak hava dalgalarının 1950’lerden bu yana daha sık ve daha yoğun hale geldiği belirtilmektedir (Kuglitsch vd., 2010; Kanat vd., 2018; ÇŞİDB, 2022). Küresel iklim modellerinin öngördüğü gibi sıcaklık artışının meydana gelmesi halinde; küresel ısınmaya bağlı olarak aşırı sıcak hava kaynaklı olayların daha sık, aşırı soğuk hava kaynaklı olayların daha az yaşanacağı düşünülmektedir (Gürkan vd., 2017; Chen vd., 2020). Sıcak/soğuk hava dalgasının kabul edilmiş ortak bir tanımı olmamakla birlikte atmosfere bağlı uzun süreli ve ekstrem yüksek/düşük ısı stresi olarak açıklanmaktadır (Robinson, 2001). Sıcak hava dalgalarının (heat waves) uluslararası meteoroloji sözlüğündeki tanımına bakıldığında; “Havanın belirgin şekilde ısınması veya geniş bir alan üzerinde yılın sıcak döneminde yerel iklim koşullarına göre en az iki ardışık gün boyunca (birkaç günden birkaç haftaya kadar sürebilir) bir bölge üzerinde belirgin şekilde olağandışı sıcak havanın istilası” şeklinde tanımlanmıştır (WMO, 1992). Günlük maksimum sıcaklığın, ard arda 5 gün boyunca uzun yıllar (en az 30 yıl) ortalama maksimum sıcaklığının 5°C üzerinde gerçekleşmesi “sıcak hava dalgası” olarak adlandırılmaktadır (WMO, 2011; Frich vd., 2002). Sıcak hava dalgaları tanımında dünya çapında bir fikir birliği olmamakla birlikte ülkeler kendi coğrafi ve iklim özelliklerine göre kendilerine özgü sıcak hava dalgası tanımlaması yapmaktadırlar. ABD Ulusal Hava Durumu Servisine göre, 2 günden uzun süren aşırı sıcak hava dönemi; NOAA’ya göre, 2 veya daha fazla günden daha fazla süren sıcak ve nemli hava dönemi; İngiltere Meteoroloji Ofisine göre, yılın o döneminde beklenen hava koşullarına kıyasla uzun süreli sıcak ve nemli dönem olarak tanımlanmaktadır (Bunting vd., 2024). Meteoroloji Genel Müdürlüğü 2000’li yıllardan itibaren gelişen teknolojiye uyum sağlamak ve gözlem ağındaki hataları en aza indirebilmek için elektronik tabanlı ve uzaktan algılama teknolojilerine sahip ölçüm ağını yaygınlaştırmıştır (Yılmaz ve Darende, 2021). Meteorolojik ölçümlerin otomatik olarak yapıp kaydedilmesiyle veri kaybını en aza inmiş ölçüm hassasiyeti artmıştır. Otomatik Meteorolojik Gözlem İstasyonlarının sayısında artış sağlanmasıyla birlikte insanlı ölçüm dönemlerinde il ve ilçe merkezlerinde bulunan ölçüm noktaları da artarak araziye yayılmış ve iklim verisi bakımından alanın daha verimli temsil edilmesi sağlanmıştır. Ülkemizde günlük maksimum sıcaklığın, uzun yıllar ortalama maksimum sıcaklığının 5 derece üzerinde gerçekleşmesi, “sıcak hava dalgası”, 5-9 derece üzerinde gerçekleşmesi “kuvvetli sıcak hava dalgası”, 10 derece üzerinde gerçekleşmesi durumu ise “ekstrem sıcak hava dalgası” olarak tanımlanmaktadır. Ülkelerin meteoroloji servisleri günler öncesinde bu sıcaklık artışlarını tahmin ederek “doğal afet” olarak tanımlamaktadır. (MGM, 2012).

İklim değişikliğinin insan sağlığına doğrudan etkileri arasında en önemli yeri, ölüm ve hastalıklara neden olan sıcak hava dalgaları almaktadır (MGM, 2012). Aşırı sıcaklıklar ve ölüm oranları arasındaki ilişkiyi saptayabilmek için geçmişten günümüze birçok araştırma yapılmıştır. Bouchama (2004) ve Thommen (2005) yapmış oldukları çalışmada; İsviçre’de 2003 yılının yaz döneminde gerçekleşen sıcak hava dalgaları sebebiyle gerçekleşen yüksek sıcaklıklar ile ölüm oranları arasındaki ilişkiyi analiz etmeye çalışmışlardır. Bu dönemde gündüz sıcaklığının 35°C’ nin ve gece sıcaklığının 20°C’ nin üzerinde olması ve yaklaşık 9 gün devam etmesi ölüm oranlarındaki bölgesel farklılıkları kısmen açıklamaktadır. Kuglitsch vd. (2010) yapmış oldukları çalışmada sıcak hava dalgalarının sayısı, uzunluğu ve yoğunluğunu belirleyebilmek amacıyla günlük maksimum ve minimum sıcaklıklarının 3 gün veya daha fazla sürede (daha iyi ve güvenilir bir şekilde karşılaştırması amacıyla) konuma bağlı (her meteorolojik istasyon kendi içerisinde değerlendirildiğinde) sıcaklık yüzdelerini aştığı sıcak hava olaylarını incelemişlerdir. Barnett vd. (2012) yapmış oldukları çalışmada 14 yıllık zaman periyodunda (1987-2000) ABD’nin 99 şehrinde, sıcak ve soğuk hava dalgalarını 2 gün veya daha fazla sürede soğuk ve sıcak hava eşik değerlerinin üstünde ve altında sıcaklıklar kullanarak tanımlamışlardır. Sıcak hava dalgasının yoğunluğundaki değişimin, sıcak hava dalgasının zamanlaması ve süresine kıyasla daha yüksek riskli olduğu sonucuna varmışlardır. Piticar vd. (2018) yapmış oldukları çalışmada; Romanya’da 55 yıllık zaman periyodunda (1961-2015) meydana gelen sıcak ve soğuk hava dalgalarını sayısı, sıklığı, süresi, büyüklüğü ve genliği açılarından üç referans dönemi baz alınarak (1961–1990, 1971–2000 ve 1981–2010) hesaplanmış ve

trend analizi yapılmış olup sıcak hava dalgaları daha sık, daha uzun ve daha yoğun hale gelirken, soğuk hava dalgaları daha seyrek hale gelmiştir.

Türkiye’de meydana gelmiş olan sıcak hava dalgaları üzerine yapılan çalışmalar için Meteoroloji Genel Müdürlüğü’nün yıllık olarak yayınladığı İklim Raporları incelendiğinde; 2014 yılında çoğu ilk 4 ayda olmak üzere 105 istasyonda sıcak hava dalgası, 12 istasyonda ise hem sıcak hem soğuk hava dalgası olduğu ortaya koyulmuştur (MGM, 2014). 2017 yılında, WMO tarafından günlük maksimum sıcaklıkların 5 günden fazla ve ortalama maksimum sıcaklığın 5°C üzerinde seyretmesi durumu olarak tanımlanan sıcak hava dalgasına uyan 143 lokasyonda 379 adet sıcak hava dalgası tespit edilmiştir (MGM,2017). 2023 yılında Ağustos ayında Türkiye’de geniş bir alanda sıcak hava dalgası yaşandığı ve Türkiye’nin orta ve iç batı kesimlerindeki 22 istasyonda 1991-2020 ortalamasının 5°C ve üzerinde süren ve 5-10 gün arasında değişen sürelerde devam eden sıcak hava dalgaları meydana geldiği ortaya koyulmuştur (MGM, 2024). 2024 yılında daha çok batı kesimlerde olmak üzere tüm Türkiye’de sıcak hava dalgası görülmüş olup, en fazla 6 adet ile Dursunbey’de (Balıkesir) görülmüştür. Aynı rapora göre 2024 yılında Türkiye genelinde sıcak hava dalga sayısının normallerine göre arttığı ortaya koyulmuştur (MGM, 2024).

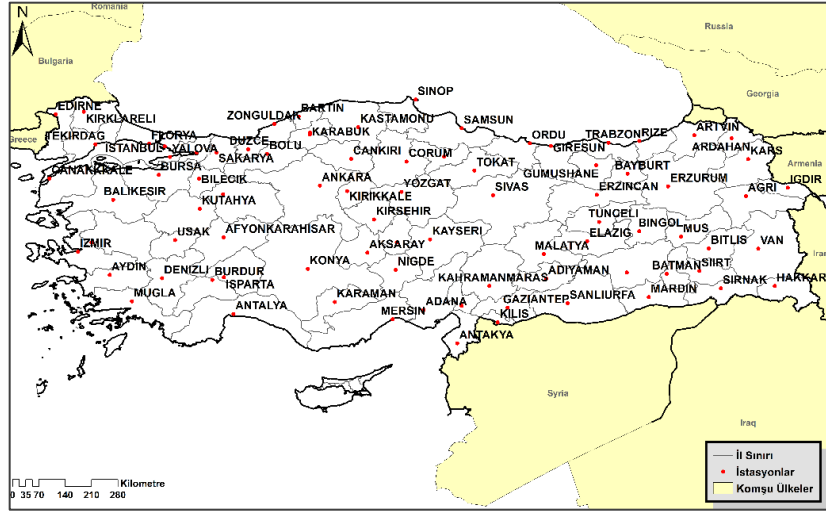
Erlat ve Doğucanlı (2011) yapmış oldukları çalışmada; Ege Bölgesi’nin ekstrem sıcaklıklarını 1939-2008 yılları arasında 10 meteoroloji istasyonunda 6 sıcaklık indisi ve parametrik olmayan Mann-Kendall sıra korelasyon testi kullanarak araştırmıştır. Türkiye ‘de sıcaklık ekstremlerinde artış olduğu ve termal koşulların daha sıcak koşullara doğru meylettğini ortaya koymuşlardır. Bölük vd. (2013) yapmış oldukları çalışmada, Temmuz ayında Türkiye’de gerçekleşen sıcak hava dalgası olayını incelemiş ve sıcak hava dalgasının Güney Doğu Anadolu, İç Anadolu, Doğu Karadeniz ve Marmara bölgesinin Trakya kesiminde etkili olduğu ve İç Anadolu Bölgesinde 17 gün sürdüğü sonucuna varmışlardır. Kuba vd. (2016) yapmış oldukları çalışmada, Türkiye’de 1960-2010 döneminde oluşan sıcak hava dalgalarının klimatolojik ve meteorolojik analizini incemişlerdir. Maksimum sıcaklıklardaki en yüksek artışın Doğu ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinde olmasına rağmen Akdeniz ve Kıyı Ege’deki artışın da bir hayli dikkat çekici olduğu ve Tropikal gün sayılarındaki artışların Karadeniz bölgesinde yüksek olduğu sonucuna varmışlardır. Gönençgil (2020) yapmış oldukları çalışmada, Türkiye’de sıcaklık ekstremlerindeki değişkenlikleri ortaya koymak için 156 meteoroloji istasyona ait, maksimum ve ortalama sıcaklıkları kullanmışlardır. Sonuç olarak Türkiye geneli sıcaklık ekstremlerinde (yaz günü, tropikal gece, ekstrem sıcaklık aralığı vb.) anlamlı bir artış bulunmuştur.

Bu çalışmanın amacı, Türkiye’de 1980-2024 yılları arasında il merkezlerinde gerçekleşen sıcak hava dalgalarının görülme sıklığını değerlendirmek ve sıcak hava dalgalarındaki eğilimleri ortaya koymaya çalışmaktır. İklim değişikliği sonucunda kent merkezlerinde daha çok görülebileceği düşünülen sıcak hava dalgası hadiselerinin zamansal değişimi ortaya konulmaya çalışılmıştır. Sıcak hava dalgası gelişmelerindeki artış ile ilgili olarak insan sağlığı üzerinde de etkileri nedeniyle disiplinler arası yapılacak çalışmalarda kullanılabilmesi amaçlanmıştır.

VERİ VE ÇALIŞMA ALANI

Çalışma alanı 36°-42° Kuzey enlemleri ile 26°-45° Doğu boylamları arasında yer alan 1.600 kilometre uzunluğu ve 800 km genişliği bulunan Türkiye için gerçekleştirilmiştir. Türkiye’deki uzun yıllar verisi olan (1980-2024 yılları arasında kapsayan) 81 il merkezinin günlük maksimum sıcaklıkları (Tmax) ve uzun yıllar aylık maksimum sıcaklık ortalamaları verileri kullanılmıştır. 81 il merkezine ek olarak İstanbul’da iki ayrı yakada iklim farklılıkların daha anlaşılır şekilde ortaya konulması amacıyla Florya istasyonu da çalışmada kullanılan bir diğer istasyondur. Çalışmada kullanılan veriler Meteoroloji Genel Müdürlüğü’nün Meteorolojik Veri Bilgi, Satış ve Sunum Sisteminden (MEVBİS) sağlanmıştır. Meteoroloji Genel Müdürlüğü yapılan ölçümler neticesinde veri tabanı oluşturma aşamasında verilerin mantıksal ve istatistiksel kontrolden geçirmekte olup MEVBİS veri tabanında bu kalite kontrol aşamalarından geçirilmiş veriler bulunmakta ve kullanıcılara sunulmaktadır. Ölçüm noktalarının günlük maksimum sıcaklık verileri ile istasyonların uzun yıllar maksimum sıcaklık ortalamalarının farkları alınmıştır. Ortalama değerler ile maksimum sıcaklıklar arasında +5 derece ve +10 derece olduğu günler

tespit edilmiştir. Tespit edilen sıcak/soğuk günler ayrıca ardışık olarak 3 gün ve 5 gün devam eden dönemler olarak saydırılarak istatistikleri çıkarılmıştır. Ardışık olarak devam eden 3 ve 5 günlük dönemleri kapsayan “Sıcak Hava Dalgaları”nın sayısı hesaplanmış olup, istasyonlardaki sıcak hava dalgalarının uzun yıllardaki değişimi ve eğilimleri Mann-Kendall (MK) trend analizi ile hesaplanarak analiz edilmiştir. Ayrıca coğrafi bölgelere göre nüfusu yüksek olan iller dikkate alınarak seçilen 16 istasyondaki (Adana, Ankara, Antalya, Bursa, Diyarbakır, Bursa, İstanbul, İzmir, Kayseri, Konya, Malatya, Samsun, Sivas, Trabzon, Van, Zonguldak) yıllık toplam sıcak hava dalga sayısı ile yıllar arasındaki ilişki pearson korelasyon analizi aracılığıyla belirlenmiştir. Bu çalışmada il merkezlerinin kullanılmasının amacı hem insan faaliyetlerini temsiliyet olarak en fazla etkileşimin olduğu sahaları kullanmak hem de veri seti bağlamında en az kaybın ve değişikliğin olduğu istasyonları kullanmaktır (Şekil 1.).



Şekil 1. Çalışmada Kullanılan İstasyonlar

MATERYAL VE YÖNTEM

Veri Analizi

Sıcak hava dalgalarının tespit ve analizinde birçok farklı yöntem kullanılmaktadır. Sıcak/soğuk hava dalgası analizleri, günlük maksimum ve minimum sıcaklıkların aylık ortalama maksimum ve minimum sıcaklıklarındaki değişimlere bağlı olarak belirli eşik değerlerin üzerindeki sayım serileri ile belirlenmektedir (Diffenbaugh vd., 2007; Kuglitsch vd., 2010). Uzun yıllar ortalama maksimum sıcaklığı 5°C geçen ardışık 10 günü sıcak hava dalgası olarak tanımlanmaktadır (Frich vd., 2002). Dünya Meteoroloji Örgütü tarafından sıcak hava dalgası, günlük maksimum sıcaklık değerinin, ard arda 5 gün boyunca uzun yıllar (en az 30 yıl) ortalama maksimum sıcaklığının 5°C üzerinde gerçekleşmesi olarak adlandırılmaktadır. (WMO,2011).

Bu çalışmada, sıcak hava dalgalarının tespitinde, 81 il merkezinin günlük maksimum hava sıcaklıkları ile (Tmax) uzun yıllar maksimum sıcaklık anomalileri hesaplanmıştır. Çalışmada günlük maksimum sıcaklık değerleri ile uzun yıllar aylık maksimum sıcaklık ortalamalarının farkları alınmıştır. Böylece günlük maksimum sıcaklığın aylık maksimum sıcaklık ortalamasından ne kadar yüksek veya düşük olduğu tespit edilmiştir. Fark değerleri 5°C ve üzerinde olan ard arda en az 3 gün ve 5 gün kesintisiz olarak devam eden sıcak gün sayıları hesaplanmış ve bu değerler “sıcak hava dalgası” olarak değerlendirilmiştir. Fark değerlerinin 10°C ve üzerinde olan ard arda 3 gün ve 5 gün devam eden sıcak gün sayıları hesaplanmış ve bu değerler “ekstrem sıcak hava dalgası” olarak isimlendirilmiştir. Ardışık devam eden günler içerisinde meydana gelen sıcak hava dalgaları ne kadar tekrar ederse etsin tek bir sıcak hava dalgası olarak değerlendirilmiştir. Örneğin; En az 3 gün devam eden sıcak hava dalgası analizi yapılırken ardışık 3 gün devam eden yüksek sıcaklıklar da ardışık 10 gün devam eden yüksek sıcaklıklar da tek bir sıcak hava dalgası olarak kabul edilmiştir. Hesaplanan sıcak hava dalga sayıları ile ekstrem sıcak hava dalga sayılarının 45 yıllık periyottaki değişimi Mann-Kendall Trend Analizi yöntemi ile analiz edilmiştir.

Çalışmada yapılan hesaplamalar ve veri dönüşümleri, Rstudio programında, tidyverse (Wickham, 2023), dplyr (Wickham, 2023) paketi kullanılarak hesaplanmıştır. Görseller ggplot2 (Wickham, 2024) paketi ile oluşturulmuştur. Mann-Kendall Trend analizleri ise trend (Pohlert, 2023) ve kendall (McLeod, 2022) paketi ile hazırlanmıştır.

Mann-Kendall (MK) Trend Analizi

Mann-Kendall Metodu (MK), Hidroloji ve klimatoloji gibi alanlarda zaman serilerinin trendinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan ve Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO) tarafından da önerilen bir yöntem olan parametrik olmayan bir istatistiksel test yöntemidir. Bu yöntem ilk kez Mann (1945) tarafından önerilmiştir. Daha sonra Kendall (1975) ve Hirsch (1991) tarafından geliştirilmiştir. MK testi Kendall'ın tau istatistiği olarak da literatürde geçmektedir. Eksik verilerin varlığına müsaade etmesi ve verileri belirli bir dağılıma uymak zorunluluğu olmaması nedeniyle avantajlı bir yöntemdir. (Katipoğlu vd., 2022) Mann-Kendall istatistiği (S); Denklem 1'deki gibi hesaplanır.

$$s = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (1)$$

normal bir dağılıma sahip olan verilerde S'nin varyansı Denklem 2'de verildiği gibi hesaplanmakta,

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} +1 & \text{Eğer } (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & \text{Eğer } (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & \text{Eğer } (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

zaman serilerinde bağ durumu olması durumunda ise Denklem 3'de verildiği gibi hesaplanmakta,

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (3)$$

S'nin varyansının hesaplanması Z anlamlılık seviyesinin bulunması için önemlidir. Aşağıdaki formüle göre yapılan hesaplamalar sonucu elde edilen Z değeri tabloda okunur. İkiyle çarpılır. Bu işlem sonucunda p değeri elde edilir. Elde edilen p değeri başta seçilen α anlamlılık seviyesinden küçük ise trend var, büyük ise trend yok demektir. Başka bir deyişle; p, 0.01'den küçük ise 0.01 seviyesinde, 0.01 ile 0.05 aralığında ise 0.05 (%95) seviyesinde, 0.05 ile 0.1 aralığında ise 0.1 seviyesinde anlamlılık vardır. P değerinin 0.1'den büyük olduğu durumlar istatistiksel olarak anlamlı değildir (Efe ve Gözet, 2021). Ayrıca S değeri pozitif olduğunda artan trend, negatif olduğunda ise azalan trendin varlığı söz konusudur (Kumar vd., 2014).

$$z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{Eğer } S > 0 \\ 0 & \text{Eğer } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{Eğer } S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

Pearson Korelasyon Analizi

Coğrafi bölgeleri temsil etmesi amacıyla nüfusu yüksek olan iller dikkate alınarak seçilen 16 istasyondaki (Adana, Ankara, Antalya, Bursa, Diyarbakır, Bursa, İstanbul, İzmir, Kayseri, Konya, Malatya, Samsun, Sivas, Trabzon, Van, Zonguldak) yıllık toplam sıcak hava dalga sayısı ile yıllar arasındaki ilişki Denklem 5'te ifade edilen pearson korelasyon analizi aracılığıyla belirlenmektedir. Bu analiz ile sürekli olan iki değişken arasında doğrusal olarak anlamlı bir ilişki olup olmadığı araştırılmaktadır. N veri sayısını, r korelasyon değerini ve ifade etmektedir ve bu r değeri +1 ile -1 arasında değer almaktadır. Katsayının (+) ya da (-) olması parametreler

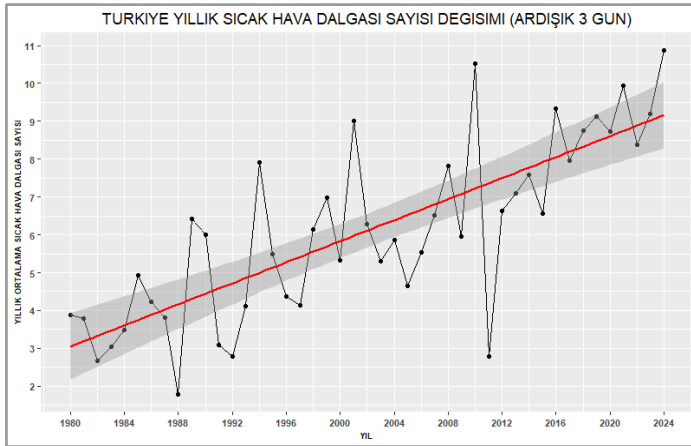
arasındaki ilişkinin doğru ya da ters orantılı doğrusal bir ilişki olduğunu göstermektedir (Pearson, 1894; Bayazıt ve Yegen, 2005; Duru ve Parlakay, 2021).

$$r_{x,y} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{N S_x S_y} \quad (5)$$

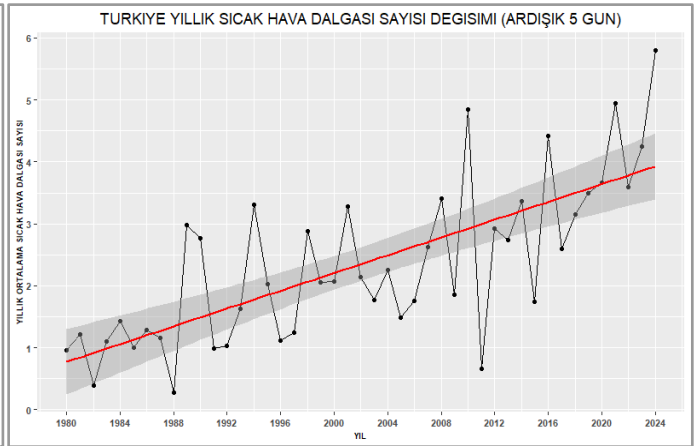
BULGU VE DEĞERLENDİRMELER

Sıcak Hava Dalgalarının Analizi

Yapılan analizler neticesinde uzun yıllar Tmax verilerinin anomalileri değerlendirildiğinde; 1980-2024 periyodunda ardışık 3 gün devam eden sıcak dalga sayısı ülke geneli ortalaması yaklaşık 6 adet iken ardışık 5 gün devam eden sıcak hava dalga sayısı ortalaması 2-3 adet civarındadır. Meteorolojik çalışmalara göre son 10 yıllık dönem küresel bazda en sıcak 10 yıllık dönem olarak kayıtlara geçmiştir. Şekil 2.'de görüldüğü üzere son dönemlerdeki sıcak hava dalgaları sayısı belirgin şekilde artmıştır. Çalışma periyodunu içeren 45 yıllık dönemde hem 3 günlük (Şekil2a.) hem de 5 günlük (Şekil2b.) sıcak hava dalgası sayılarında belirgin bir artış olduğu gözlenmiştir. Özellikle 2010'lu yıllardan itibaren her iki grafikte de ortalamanın üzerinde değerler oldukça dikkat edilmesi gereken bir olgu olarak tespit edilmiştir. 2024 yılı, yaklaşık 11 adet (ardışık 3 gün) ve yaklaşık 6 adet (ardışık 5 gün) sıcak hava dalgasıyla rekor yıl olarak hesaplanmıştır.

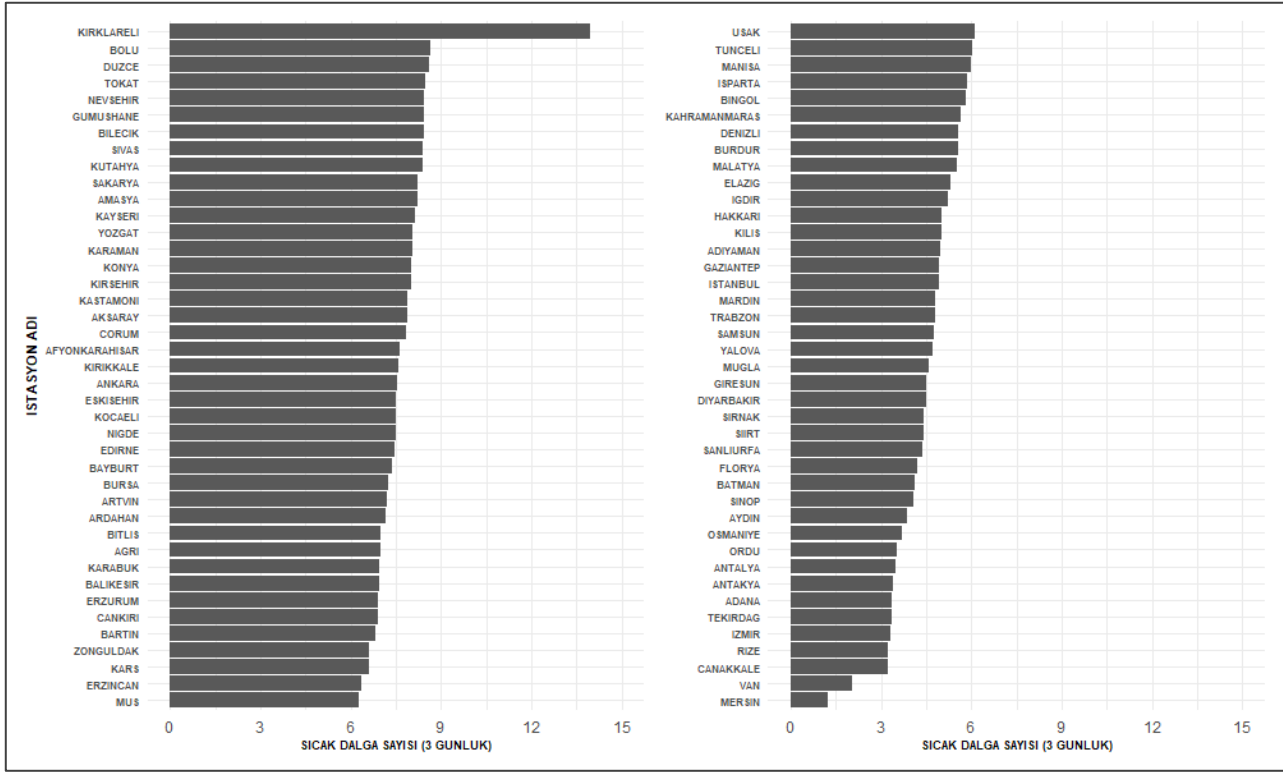


Şekil 2a. Yıllık sıcak hava dalgası sayılarının değişimi (ardışık 3 gün)

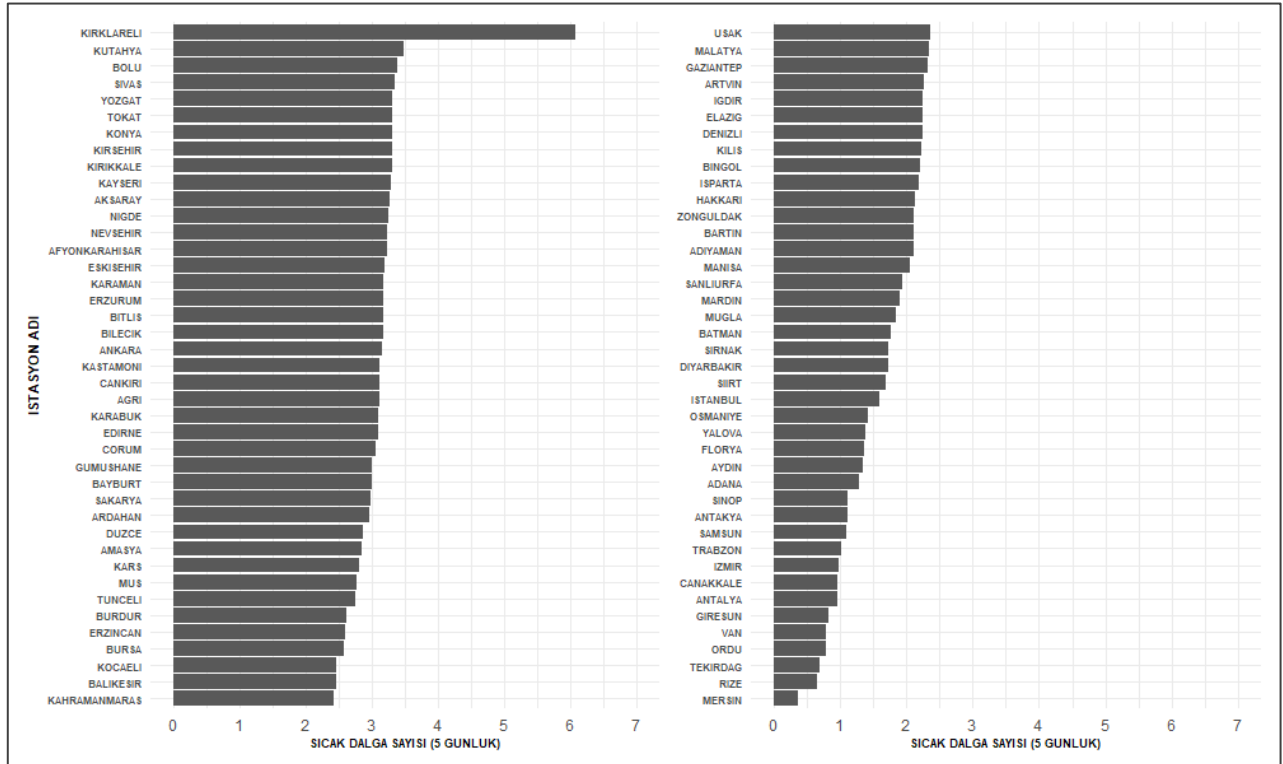


Şekil 2b. Yıllık sıcak hava dalgası sayılarının değişimi (ardışık 5 gün)

Çalışmada kullanılan 81 il merkezinin 45 yıllık (1980-2024) sıcak dalga sayılarının uzun yıllar ortalamaları incelendiğinde, Kırklareli istasyonu yaklaşık 14 adet (ardışık 3 gün) ve 6 adet ile (ardışık 5 gün) ile en yüksek sayıda sıcak hava dalgası gerçekleşen istasyondur. Mersin istasyonu ise yılda ortalama 1 adet ile en düşük sayıda sıcak hava dalgası gerçekleşen istasyondur. İstasyonlar ayrı ayrı değerlendirildiğinde; genel olarak Türkiye'nin kuzey kesimlerinde yer alan istasyonların toplam sıcak hava dalgası sayılarının (Kırklareli, Bolu, Düzce, Tokat, Gümüşhane, Bilecik, Sivas, Sakarya, Amasya ...), Türkiye'nin güney kesimlerinde yer alan istasyonların (Mersin, Van, Şırnak, Osmaniye, Adana, Hatay, Antalya, İzmir ...) toplam sıcak hava dalga sayılarına göre daha fazla olduğu söylenebilir (Şekil 3a. ve Şekil 3b).



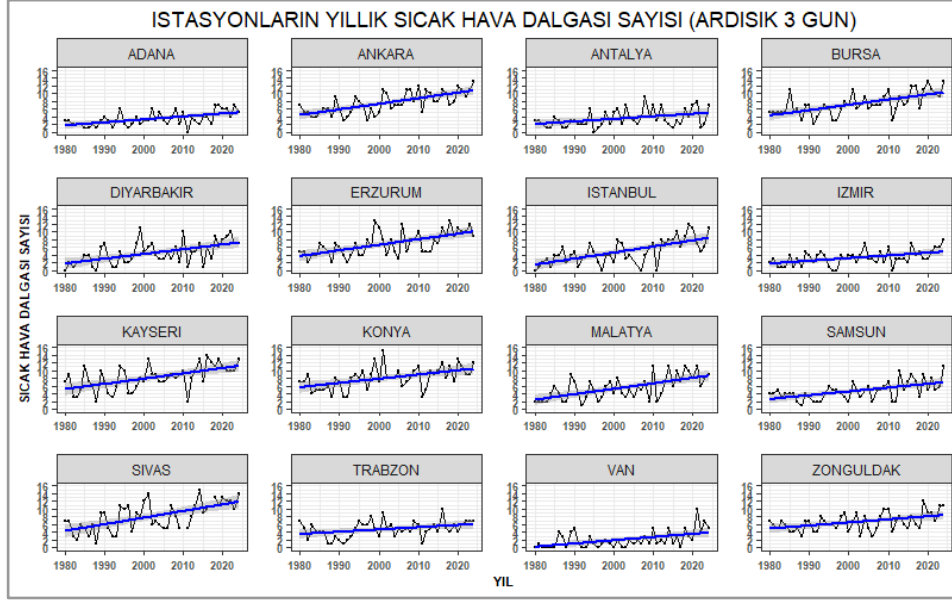
Şekil 3a. Çalışmada kullanılan istasyonların sıcak dalga sayılarının uzun yıllar ortalamaları (ardışık 3 gün)



Şekil 3b. Çalışmada kullanılan istasyonların sıcak dalga sayılarının uzun yıllar ortalamaları (ardışık 5 gün)

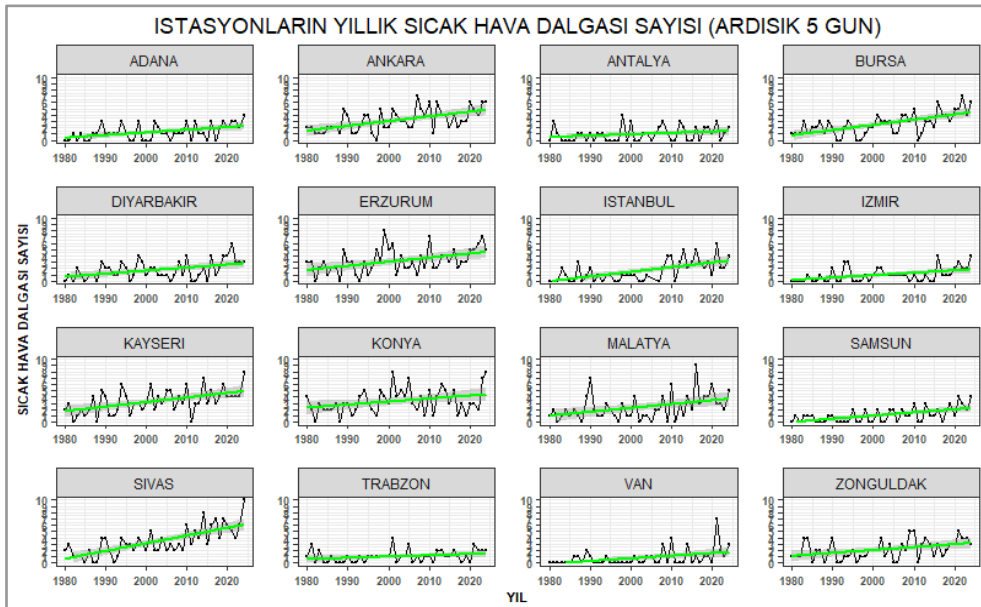
Seçilen 16 il merkezinin ardışık 3 gün boyunca devam eden yıllık sıcak hava dalga sayıları ayrı ayrı incelendiğinde, 2024 yılında gerçekleşen en yüksek sıcak hava dalgası sayısı (14 adet) Sivas ilinde meydana gelmiş iken, en düşük sıcak hava dalga sayısı (5 adet) Van ve Adana istasyonlarında meydana gelmiştir. Adana, Van, İzmir, Trabzon, Antalya istasyonlarında, diğer istasyonlara göre oldukça düşük seviyelerde sıcak hava

dalgası gerçekleşmiştir. Pearson korelasyon testi analizi sonucu elde edilen değerler göz önüne alındığında (+0.3) Trabzon, Antalya, Zonguldak ve İzmir istasyonlarının yıllara göre artışı zayıf seviyede olarak gözlenmiştir. Ankara, İstanbul, Sivas, Bursa, Malatya ve Erzurum istasyonlarının (+0.6 ve üzeri) yıllara göre artışı güçlü olarak gözlenmiştir (Şekil 4.).



Şekil 4. Seçilen Büyük Şehirlerin Yıllık Sıcak Dalgası Sayıları (Ardışık 3 Gün)

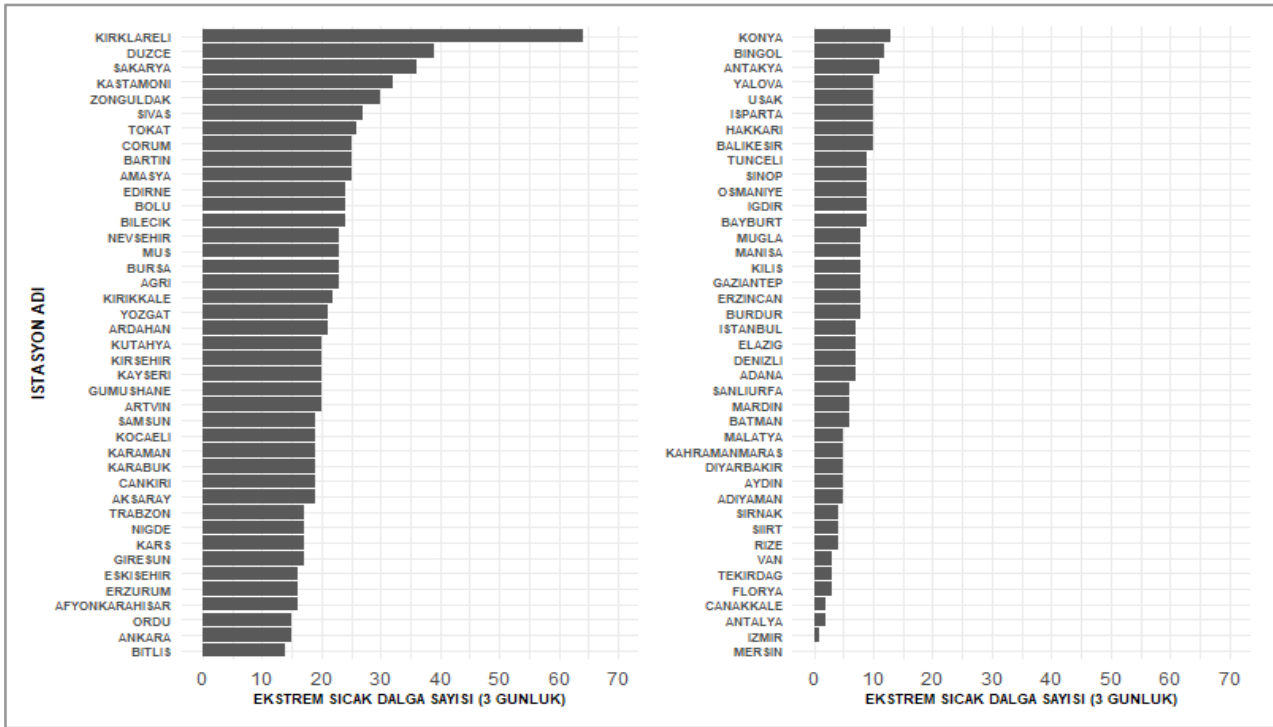
Seçilen 16 il merkezinin ardışık 5 gün boyunca devam eden yıllık sıcak hava dalgası sayıları ayrı ayrı incelendiğinde, 2024 yılında gerçekleşen en yüksek sıcak hava dalgası sayısı (10 adet) Sivas ilinde meydana gelmiş iken, en düşük sıcak hava dalgası sayısı (2 adet) Antalya ilinde meydana gelmiştir. Adana, Van, İzmir, Diyarbakır istasyonlarında, diğer istasyonlara göre oldukça düşük seviyelerde sıcak hava dalgası gerçekleşmiştir. Pearson korelasyon testi analizi sonucu elde edilen değerler göz önüne alındığında (+0.2 ve +0.3) Trabzon, Antalya, Konya, Zonguldak ve Malatya istasyonlarının yıllara göre artışı zayıf seviyede olarak gözlenmiştir. Sivas (+0.7), Bursa, İstanbul, Samsun (+0.6 ve üzeri) yıllara göre artışı güçlü olarak gözlenmiştir (Şekil 5.).



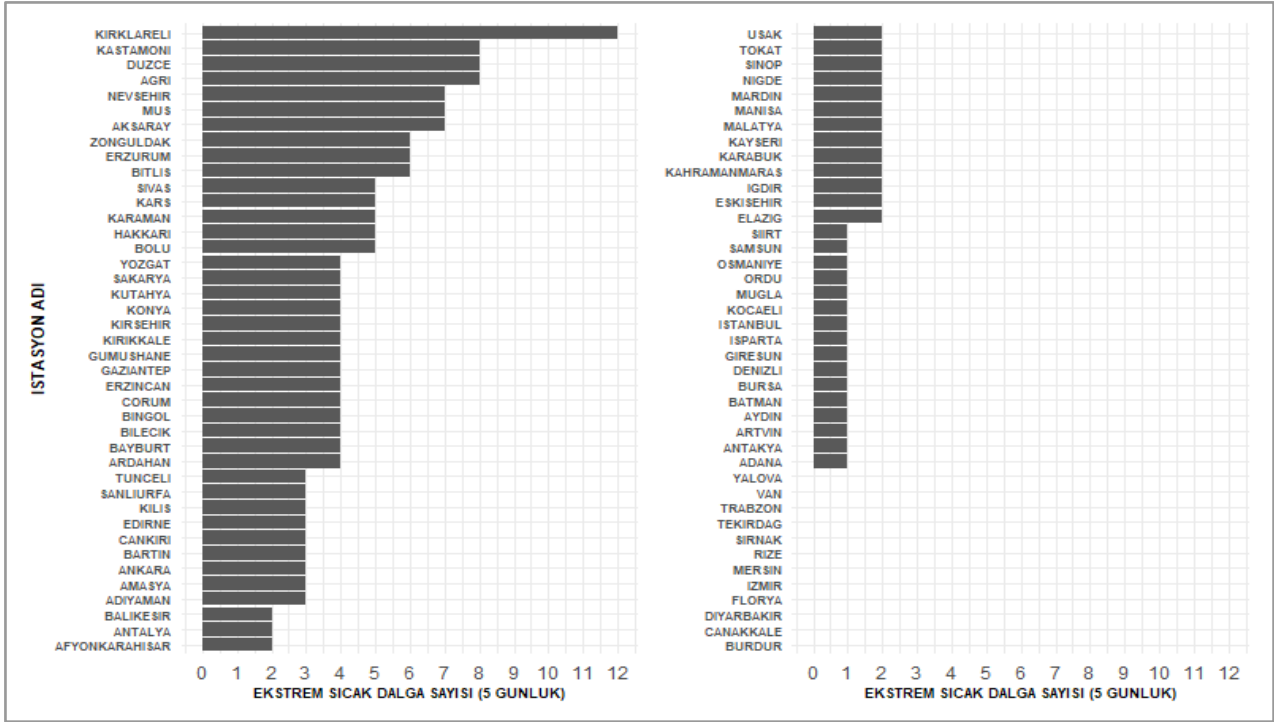
Şekil 5. Seçilen Büyük Şehirlerin Yıllık Sıcak Dalgası Sayıları (Ardışık 5 Gün)

Ekstrem Sıcak Hava Dalgalarının Analizi

81 il merkezinin 45 yıllık (1980-2024) ekstrem sıcak hava dalgası sayıları (günlük maksimum sıcaklık ile uzun yıllar aylık maksimum sıcaklık ortalamaları arasındaki fark 10°C ve üzerinde olan, ard arda en az 3 gün veya en az 5 gün devam eden sıcak gün sayıları) toplamı incelendiğinde; Kırklareli istasyonu 64 adet (ardışık 3 gün) ve 12 adet ile (ardışık 5 gün) ile en yüksek sayıda sıcak hava dalgası gerçekleşen il merkezi olarak kayıtlara geçmiştir. Düzce, Sakarya, Kastamonu, Zonguldak ve Ağrı istasyonları diğer yüksek sıcak hava dalgası sayısını toplamına sahip olan istasyonlardır. Mersin istasyonunda hem 3 günlük hem de 5 günlük ekstrem sıcak hava dalgası gerçekleşmemiş olup Burdur, Çanakkale, Diyarbakır, İstanbul, İzmir, Rize, Şırnak, Tekirdağ, Trabzon, Van ve Yalova istasyonlarında; bu istasyonların maksimum sıcaklığı zaten yüksek olduğu için ardışık 5 gün devam eden ekstrem sıcak hava dalgası olayı gerçekleşmemiştir. Ekstrem sıcak hava dalgası gerçekleşmesi daha az görülen bir hava olayı olması nedeniyle gerçekleşme sayıları gösterilirken 45 yıllık periyodun toplam sayıları üzerinden gidilmiştir (Şekil 6a. ve Şekil 6b.).



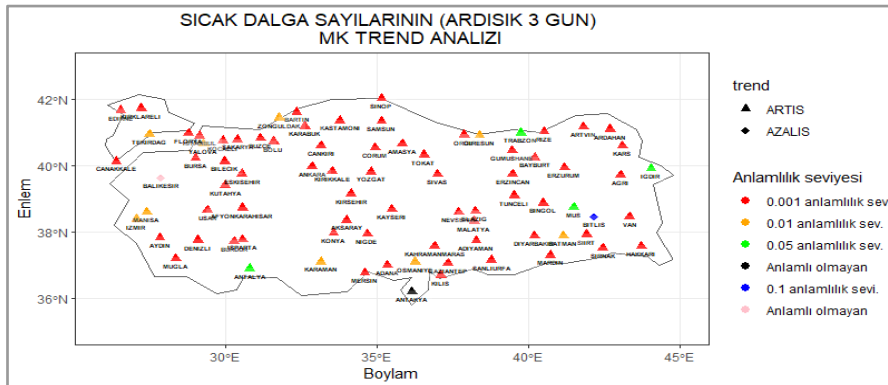
Şekil 6a. Çalışmada kullanılan istasyonların 45 yıllık ekstrem sıcak dalga sayılarının toplamaları (ardışık 3 gün)



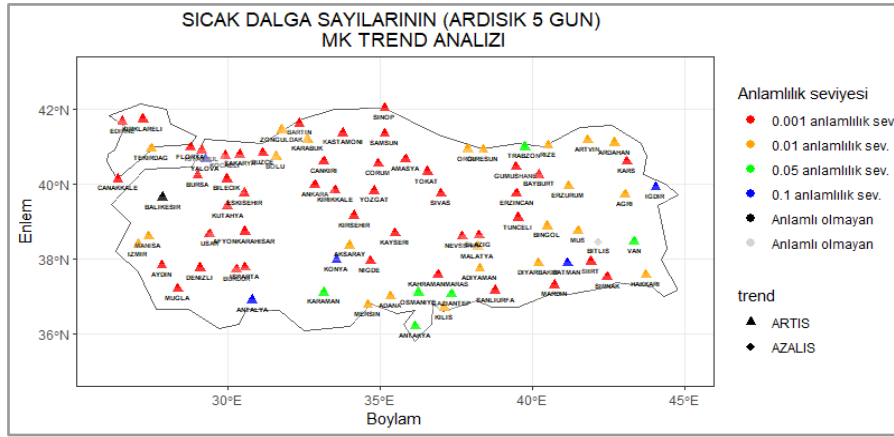
Şekil 6b. Çalışmada kullanılan istasyonların 45 yıllık ekstrem sıcak dalga sayılarının toplamaları (ardışık 5 gün)

Mann-Kendall (MK) Trend Analizi Sonuçları

Ardışık en az 3 gün ve ardışık en az 5 gün devam sıcak hava dalgalarının MK analizleri incelendiğinde il merkezlerimizin yaklaşık olarak hepsi anlamlı artan trende sahipken (Antakya istasyonu hariç), büyük bölümünde yüksek güven aralığında bir artış trendinden söz edilebilmektedir. Özellikle Batı Karadeniz ve İç Anadolu Bölgesinde yer alan illerin birçoğunun (kırmızı renk ile gösterilen iller) en az 3 gün ve en az 5 gün devam eden sıcak hava dalgalarının eğilimi çok yüksek güven aralığında (0.001 anlamlılık seviyesinde) artan trende sahiptir. Dolayısı ile bu illerde sıcak hava dalgası hadisesinin biraz daha belirgin bir risk barındırdığı ve yerleşim yerleri için yapılacak planlamalarda bu anlamda risk gruplarının göz önünde bulundurulması gerektiği ortaya çıkmaktadır. MK analizleri il bazlı olarak incelendiğinde bazı illerde 3 günlük artışların, bazılarında da 5 günlük artışların daha anlamlı olduğu görülebilmektedir. Örneğin, Muş istasyonu ardışık 3 günlük sıcak hava dalgalarında 0.05 anlamlılık seviyesinde artan trende sahipken ardışık 5 günlük sıcak hava dalgalarında 0.01 anlamlılık seviyesinde artan trende sahiptir. Bir başka örnekle Konya istasyonu ardışık 3 günlük sıcak hava dalgalarında 0.001 anlamlılık seviyesinde artan trende sahipken ardışık 5 günlük sıcak hava dalgalarında 0.1 anlamlılık seviyesinde artan trende sahiptir. Ayrıca, Bitlis istasyonu dışında herhangi bir anlamlılık seviyesinde azalan trende sahip istasyon bulunmamaktadır. 3 günlük sıcak dalga sayılarında Bitlis ve Balıkesir istasyonu, 5 günlük sıcak dalga sayılarında yalnız Bitlis istasyonu azalan trend eğilimi göstermektedir (Şekil 7. ve Şekil 8.).



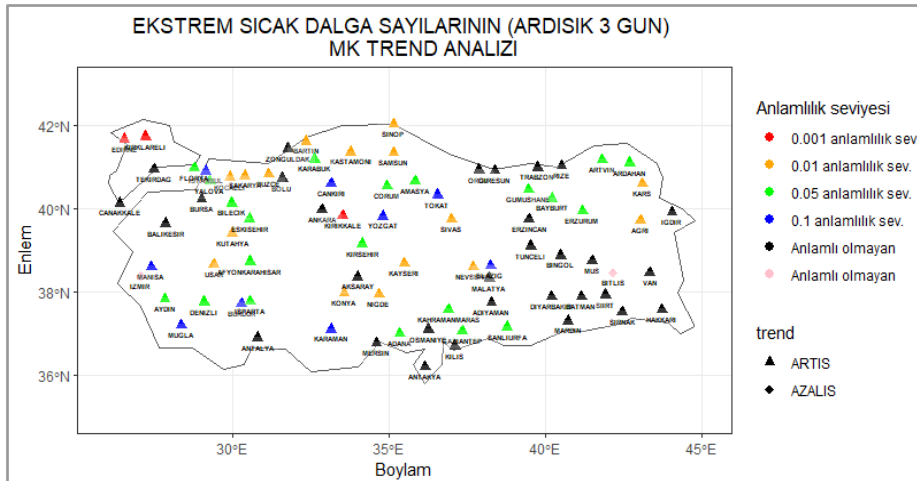
Şekil 7. Sıcak Dalga Sayılarının (Ardışık 3 Gün) MK Analizi



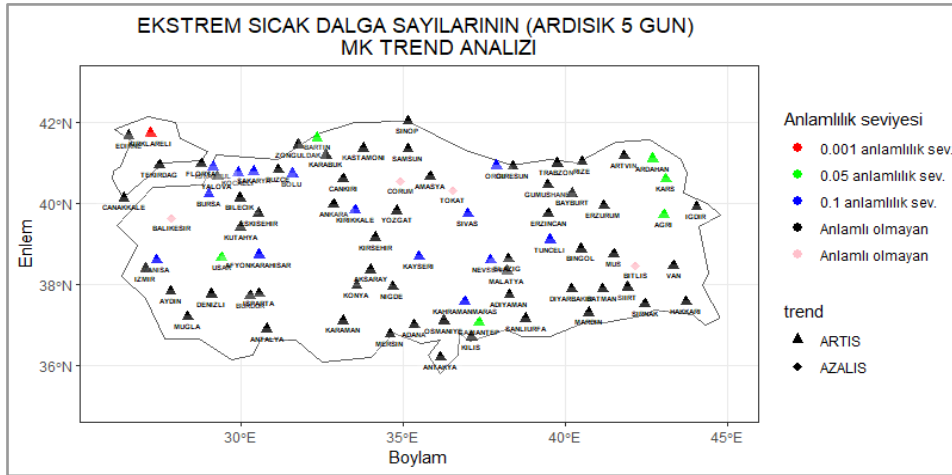
Şekil 8. Sıcak Dalga Sayılarının (Ardışık 5 Gün) MK Analizi

Ardışık en az 3 gün ve ardışık en az 5 gün devam eden ekstrem sıcak hava dalgalarının MK analizleri incelendiğinde; Kırklareli istasyonundaki artış eğilimi en yüksek güven aralığında (0.001 anlamlılık seviyesinde anlamlı) artan trende sahiptir. Şekil 9.'da belirtilen MK analizlerinde, Bitlis istasyonu hariç tüm istasyonlarda ekstrem sıcak dalga sayılarında (ardışık en az 3 gün) artan trend gözlenmektedir. Türkiye'nin özellikle Doğu kesimlerindeki artan trendlerin çoğunda hiçbir seviyede anlamlı trend bulunmamaktadır.

Şekil 10.'da belirtilen MK analizlerinde Bitlis, Balıkesir, Tokat ve Çorum istasyonu hariç tüm istasyonlarda ekstrem sıcak dalga sayılarında (ardışık en az 5 gün) artan trend gözlenmektedir. İstasyonların birçoğunda artan trendlerin hiçbir seviyede anlamlı olmadığı sonucu bulunmaktadır. Doğu kesimlerde yer alan Ardahan, Kars ve Iğdır istasyonlarındaki artan trend eğilimi diğer istasyonlara göre daha yüksek güven düzeyindedir (0.05 anlamlılık seviyesi). Kuzeybatı kesimlerinde yer alan Bursa, İstanbul, Kocaeli, Sakarya ve Bolu istasyonları ile İç Anadolu bölgesinde yer alan Kırıkkale, Sivas, Kayseri, Tunceli, Nevşehir ve Kahramanmaraş istasyonlarında 0.1 anlamlılık seviyesinde artan trend görülmektedir.



Şekil 9. Ekstrem Sıcak Dalga Sayılarının (Ardışık 3 Gün) MK Analizi



Şekil 10. Ekstrem Sıcak Dalga Sayılarının (Ardışık 5 Gün) MK Analizi

SONUÇLAR

Yeryüzünde meydana gelen önemli afetlerin büyük kısmı meteoroloji ve iklim kaynaklı hadiselerden meydana gelmektedir. Bu hadiseler ve afetler farklı coğrafyalarda farklı etkiler gösterebildiği gibi farklı coğrafyalarda önem sıraları da değişmektedir.

Yapmış olduğumuz çalışmada en dikkat çekici sonuç, Türkiye'nin kuzey kesimlerinde yer alan istasyonların (Kırklareli, Bolu, Düzce, Tokat, Gümüşhane, Bilecik, Sivas, Sakarya, Amasya ...) 45 yıllık (1980-2024) toplam sıcak hava dalgası sayılarının Türkiye'nin güney kesimlerinde yer alan istasyonların (Mersin, Van, Şırnak, Osmaniye, Adana, Hatay, Antalya, İzmir ...) toplam sıcak hava dalga sayılarına göre daha fazla olduğu ortaya koyulmuştur. Bunun sebebinin ülkemizin coğrafi konumu nedeniyle güney kesimlerinin daha sıcak olması ve ortalama sıcaklık değerlerinin daha yüksek olması dolayısı ile ülkemizi etkileyen sıcak hava dalgalarında göreceli olarak daha az etkilendiği düşünülmüştür. Yine özellikle deniz kıyısı olan kesimlerde sıcak hava dalgası sayılarının karasal alanlara göre daha az olduğu gözlemlenmiştir. Türkiye genelinde 45 yıllık dönem içerisinde meydana gelen ardışık 3 gün devam eden sıcak dalga sayılarının ortalaması ülke genelinde 6 adet iken ardışık 5 gün devam eden sıcak dalga sayısı 2 adet civarındadır. Çalışma periyodunu içeren 1980 yılından 2024 yılına kadar hem 3 günlük hem de 5 günlük sıcak hava dalgası sayılarında belirgin bir artış trendi olduğu görülmüştür. 2024 yılı, yaklaşık 11 adet (ardışık 3 gün) ve yaklaşık 6 adet (ardışık 5 gün) sıcak hava dalgasıyla rekor yıl olarak hesaplanmıştır. 2010 yılı da yaklaşık 10 adet (ardışık 3 gün) ve yaklaşık 5 adet (ardışık 5 gün) sıcak hava dalgasıyla en çok sıcak hava dalgası gerçekleşen ikinci yıl olmuştur. Yapmış olduğumuz çalışmada ayrıca seçilen 16 Büyükşehir merkezlerinin (Adana, Ankara, Antalya, Bursa, Diyarbakır, Bursa, İstanbul, İzmir, Kayseri, Konya, Malatya, Samsun, Sivas, Trabzon, Van, Zonguldak) ardışık 3 gün boyunca devam eden yıllık sıcak hava dalga sayıları ayrı ayrı incelendiğinde, 2024 yılında gerçekleşen en yüksek sıcak hava dalgası sayısı (14 adet) Sivas ilinde meydana gelmiş iken, en düşük sıcak hava dalga sayısı (5 adet) Van ve Adana istasyonlarında meydana gelmiştir. Adana, Van, İzmir, Trabzon, Antalya istasyonlarında, diğer istasyonlara göre oldukça düşük seviyelerde sıcak hava dalgası gerçekleşmiştir. Ardışık en az 3 gün ve ardışık en az 5 gün devam eden sıcak hava dalgalarının Mann-Kendall trend analizleri incelendiğinde, il merkezlerimizin yaklaşık olarak hepsi anlamlı artan trende sahipken (Antakya istasyonu hariç), büyük bölümünde yüksek güven aralığında bir artış trendinden söz edilebilmektedir. Seçilen 16 il merkezinin ardışık 3 gün ve 5 gün boyunca devam eden yıllık sıcak hava dalga sayıları ile yıllar arasındaki Pearson korelasyon testi analizleri incelendiğinde istasyonların tümünde pozitif doğrusal bir ilişki gözlenmiştir. Bu değerlendirmeler göz önünde bulundurulduğunda sıcak hava dalgalarının hangi şehirler için daha belirgin bir risk oluşturabileceği tespit edilebilecektir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar yapılan diğer bazı çalışmalar ile benzerlik göstermektedir. Demirtaş (2017) yapmış olduğu çalışmada, 2003 yılının Haziran-Temmuz-Ağustos (HTA) döneminde meydana gelen sıcak hava dalgalarının toplam süresini hesaplamış, özellikle Avrupa'nın iç kesimlerinde bu sürenin 70-80 güne varan

uzunlukta olduğunu, yurdumuzda ise Ege ve çevresinde 40-50 güne vardığı sonucunu ortaya koymuştur. İlgili dönemde meydana gelen toplam sıcak hava dalgası sayısı dağılımına bakıldığında, Batı Avrupa’da 5-6, Balkanlar’da 7-8 kadar olduğu, ülkemizde Marmara civarında 6-7 sayılarına vardığı not edilmiştir. 2012 HTA döneminde özellikle etkisini gösteren sıcak hava dalgaları, Güneydoğu Avrupa’da, bazı Akdeniz ülkelerinde ve yurdumuzda etkili olmuştur. Türkiye’de en yüksek sıcaklıklar Haziran ve Temmuz döneminde kaydedilmiş ve en yüksek sıcaklık 49,5°C ile Sarıcakaya, Eskişehir’de gerçekleşmiştir. Sıcak hava dalgası toplam sayısı hesaplamaları, en yüksek değerlerin (7-8 tane) Güney Avrupa’da olduğunu ve yurdumuz üzerinde ise Marmara ve Batı Karadeniz’de 5-6 tane olduğunu göstermektedir. 2015 HTA döneminde gerçekleşen sıcak hava dalgalarının toplam süresine bakıldığında, Türkiye’de en çok etkilenen bölgelerin 40-60 gün, diğer bölgelerin ise 20-30 gün sıcak hava dalgasının etkisi altında kaldığı not edilmektedir. Bu dönemde, yurdumuz üzerinde görülen en yüksek sıcak hava dalga sayısı 5 iken, Avrupa’da oldukça geniş bir alanda 6-8 arasındadır. HTA dönemlerinde gerçekleşen toplam sıcak hava dalga sayısı analizleri, 2003 ve 2012’de oldukça fazla sayıda olduğunu göstermiştir.

Dünya Sağlık Örgütü’nün tahminlerine göre 1998-2017 arasında 166.000’den fazla insan sıcak hava dalgaları nedeniyle hayatını kaybetmiştir. Aynı zamanda ülkemizde afetlerde meydana gelen can kaybı, yaralanma ve zararların çeşitli şekillerde kayıtları tutulsa da sıcak hava dalgası veya soğuk hava dalgası kaynaklı meydana gelen zarar ve can kayıplarının kayıtları tutulmamaktadır. Can kayıpları bağlamı dışında özellikle tarımsal üretimde meydana getirdiği etkiler göz önünde tutulduğunda ekonomik etkileri de kayıtlanmamaktadır.

Ülkemizde sıcak hava dalgası ve soğuk hava dalgası hadiseleri meteorolojik açıdan uyarı sınıflandırmasında bulunmaktadır. Ancak ülkemizde ne yazık ki sağlık sistemi ve meteoroloji alanındaki etkileşim istenilen düzeyde değildir. Ülkemizde “Tıbbi Meteoroloji” alanında yapılan çalışmalar oldukça düşük düzeyde olup meteorolojik parametrelerdeki değişimlerin insanlar üzerindeki etkileri tam olarak raporlanmamaktadır. Sıcak hava dalgası da bunlardan biridir. Özellikle yaşlılık, tansiyon hastalığı, solunum zorluğu bulunan hastalar, kalp hastalıkları diyabet ve böbrek hastalıkları gibi rahatsızlığı bulunan hastaların sıcak hava dalgası dönemlerinde başvurdukları sağlık birimlerinde rahatsızlığın veya can kaybının tetiklenmesinde sıcak hava dalgasının raporlanması gerektiği düşünülmektedir. Çalışma yapılırken incelenen literatür taramasında yurtdışında bu şekilde örneklerin olduğu görülmüş ve herhangi bir alanda meydana gelen sıcak hava dalgası sonucu can kaybı veya ekonomik kayıpların raporlandığı görülmüştür. Ancak ne yazık ki ülkemizde bu şekilde bilgilere ulaşamamıştır.

İklim değişikliğinin en önemli etkilerinden biri de meydana gelen sıcak hava dalgalarının sıklığının genliğinin ve şiddetinin artacağı yönündedir. İklim değişikliğinden etkilenebilirlik ve iklim uyum çalışmalarında yapılan değerlendirmelerde sıcak hava dalgasının da bir risk olarak sayılması ve alınabilecek tedbirler bağlamında çalışma yapılması gerekmektedir. Çalışmamız bizlere göstermiştir ki 2010’lu yıllardan sonra sıcak hava dalgalarının sayılarında belirgin bir artış bulunmakta olup önümüzdeki dönemde de olası yanlış imar çalışmaları sıcak hava dalgalarının şehir yaşamındaki etkisini daha da arttıracaktır.

Bahse konu sıcak hava dalgalarının meydana gelişleri etki alanları ve etki süreleri açısından ele alınarak meteorolojik oluşum şartlarının incelenmesinin bundan sonra meydana gelebilecek sıcak hava dalgalarının tahmininde faydalı olacağı düşünülmektedir. Yine aynı şekilde çalışmada görüleceği üzere sıcak hava dalgalarının meydana gelme sayılarındaki artış nedeniyle etkilenebilirlik bağlamında tıbbi meteoroloji çalışmalarının yapılarak kırılgan grupların tespiti ve uyarı mekanizmasında iletişimin nasıl sağlanacağını belirlenmesi de sağlık açısından alınacak tedbirler bağlamında önem arz etmektedir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar çalışmada kullanılan Meteorolojik Veri Bilgi, Satış ve Sunum Sisteminden (MEVBİS) elde edilen istasyon verileri için Meteoroloji Genel Müdürlüğü’ne teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

- Barnett, A. G., Hajat, S., Gasparrini, A. & Rocklöv, J. (2012). Cold and heat waves in the United States. *Environmental Research*, 112, 218–224. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2011.12.010>
- Bayazıt, M., ve Yeğen Oğuz, E. B. (2005). *Mühendisler için istatistik* (s. 197). Birsen Yayınevi.
- Bouchama, A. (2004). The 2003 European heat wave. *Intensive Care Medicine*, 30(1), 1–3. <https://doi.org/10.1007/s00134-003-2062-y>
- Bunting, E. L., Tolmanov, V. & Keellings, D. (2024). What is a heat wave: A survey and literature synthesis of heat wave definitions across the United States. *PLOS Climate*, 3(9), e0000468. <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000468>
- Bölük, E., Akçakaya, A. ve Arabacı, H. (2013). 2012 Temmuz ayında yaşanan sıcak hava dalgası. *6th Atmospheric Science Symposium*, İstanbul.
- Demirtaş, M. (2017). Şiddetli sıcak hava dalgaları: Dinamik-fiziksel etkenler ve bu sıcak hava dalgalarının özellikleri. *Sakarya University Journal of Science*, 21(2), 257–267.
- Diffenbaugh, N. S., Pal, J. S., Giorgi, F. & Xuejie, G. (2007). Heat stress intensification in the Mediterranean climate change hotspot. *Geophysical Research Letters*, 34(L11706). <https://doi.org/10.1029/2007GL030000>
- Duru, S. ve Parlakay, O. (2021). Türkiye’de iklim değişikliğinin bal verimine etkisi: ARDL sınır testi yaklaşımı. *Mustafa Kemal Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi*, 26(3), 791–800.
- Efe, B. ve Gözet, E. (2021). Samsun ilinin turizm iklim indeksi değerlerinin trend analizi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11(4), 1164–1176.
- Erlat, E. ve Doğucanlı, D. (2011). Ege Bölgesi’nde sıcaklık ekstremlerinde gözlenen değişim ve etmenlerin değerlendirilmesi. *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*.
- Frich, P., Alexander, L. V., Della-Marta, P., Gleason, B., Haylock, M., Klein Tank, A. M. G. & Peterson, T. (2002). Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Climate Research*, 19, 193–212. <https://doi.org/10.3354/cr019193>
- Gönençgil, B. (2020). Türkiye sıcaklık ekstremlerindeki değişkenlikler. *Journal of Geography*.
- Gürkan, H., Eskioglu, O., Yazıcı, B., Şensoy, S., Kömüşçü, A. Ü. ve Çalık, Y. (2017). İklim değişikliğinin etkisi altında sıcak ve soğuk hava dalgalarında öngörülen eğilimler. *8. Atmosfer Bilimleri Sempozyumu Bildiri Kitabı*, İstanbul, 1–4 Kasım, 111–122.
- IPCC. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report*.
- Kanat, Z. ve Keskin, A. (2018). Dünyada iklim iklimi üzerine yapılan iklimlendirme ve Türkiye’de mevcut durum. *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 49, 67–78.
- Katipoğlu, O. M., Yeşilyurt, S. N. ve Dalkılıç, H. Y. (2022). Yeşilirmak havzasındaki hidrolojik kuraklıkların Mann-Kendall ve Yenilikçi Şen yöntemi ile trend analizi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 12(2), 422–442.
- Kendall, M. G. (1975). *Rank correlation methods (4th ed.)*. Charles Griffin.
- Kuba, E. B., Deniz, Z. A. ve Öztürk, B. (2016). Türkiye’de 1960–2010 döneminde oluşan sıcak hava dalgalarının klimatolojik ve meteorolojik analizi. *TÜCAUM Uluslararası Coğrafya Sempozyumu*.
- Kuglitsch, F. G., Toreti, A., Xoplaki, E., Della-Marta, P. M., Zerefos, C. S., Türkeş, M. & Luterbacher, J. (2010). Heat wave changes in the eastern Mediterranean since 1960. *Geophysical Research Letters*, 37, 1–5. <https://doi.org/10.1029/2009GL041841>
- Kumar, R., Singh, S., Randhawa, S. K. K., Singh, J. C. & Rana, N. (2014). Temperature trend analysis in the Glacier region of Naradu Valley, Himachal Himalaya, India. *Geoscience*, 346(9–10), 213–222.
- Mann, H. B. (1945). Non-parametric tests against trend. *Econometrica*, 13, 245–259.
- McLeod, A. (n.d.). *Kendall: A Grammar of Data Manipulation* (R package Version 2.1.0). <https://cran.r-project.org/web/packages/Kendall/index.html>
- MGM - Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (2012). *İklim değişikliğinin sağlık üzerine etkileri*. https://mgm.gov.tr/FILES/genel/makale/16_iklim-saglik-etki.pdf
- MGM - Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (2017). *2017 yılı iklim değerlendirmesi*. <https://www.mgm.gov.tr/files/iklim/yillikiklim/2017-iklim-raporu.pdf>
- MGM - Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (2023). *2023 yılı iklim değerlendirmesi*. <https://www.mgm.gov.tr/FILES/iklim/yillikiklim/2023-iklim-raporu.pdf>
- MGM - Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (2024). *2024 yılı iklim değerlendirmesi*. <https://mgm.gov.tr/FILES/iklim/yillikiklim/2024-iklim-raporu.pdf>
- Pearson, K. (1894). Contributions to the mathematical theory of evolution. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. A, 185, 71–110.
- Pitaric, A., Croitoru, A. E., Ciupertea, F. A. & Harpa, G. V. (2018). Recent changes in heat waves and cold waves detected based on excess heat factor and excess cold factor in Romania. *International Journal of Climatology*, 38(4), 1777–1793.
- Pohlert, T. (n.d.). *Trend: A Grammar of Data Manipulation* (R package Version 1.1.6). <https://cran.r-project.org/package=trend>
- Robinson, P. J. (2001). On the definition of a heat wave. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 40(4), 762–775.
- Thommen, O. (2005). Heat wave 2003 and mortality in Switzerland. *Swiss Medical Weekly*, 135(13–14), 200–205.
- T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2011). *Türkiye’nin ulusal iklim değişikliğine uyum stratejisi ve eylem planı 2011–2023*.
- Wickham, H., Francois, R., Henry, L. & Müller, K. (n.d.). *Dplyr: A Grammar of Data Manipulation* (R package Version 1.1.4). <https://cran.r-project.org/package=dplyr>

- Wickham, H., Chang, W., Henry, L., Pedersen, T. L., Takahashi, K., Wilke, C., Woo, K., Yutani, H. & Dunnington, D. (n.d.). *Ggplot2: Grammar of Data Manipulation* (R package Version 3.5.1). <https://cran.r-project.org/package=ggplot2>
- WMO - World Meteorological Organization. (1992). *International meteorological vocabulary* (WMO-No. 182).
- WMO - World Meteorological Organization (WMO). (2011). *Weather extremes in a changing climate: Hindsight on foresight* (WMO-No. 1075).
- Yılmaz, E. ve Darende, V. (2021). Türkiye’de yağış ölçümü yapılan manuel-otomatik meteoroloji gözlem istasyonu verilerinin karşılaştırılması. *Türkiye Coğrafya Dergisi*, 77, 53–66.
- Zhang, R., Chen, Z. Y., Ou, C. Q. & Zhuang, Y. (2017). Trends of heat waves and cold spells over 1951–2015 in Guangzhou, China. *Atmosphere*, 8(2), 37. <https://doi.org/10.3390/atmos8020037>

DENİZ TAŞIMACILIĞI KAYNAKLI EMİSYONLARIN BELİRLENMESİNDE UZAKTAN ALGILAMA YAKLAŞIMI

Cemre Fazilet Aldoğan¹, Hande Demirel²

¹İstanbul Teknik Üniversitesi, Bilişim Enstitüsü, Coğrafi Bilgi Teknolojileri Programı, 34469, Sarıyer, İstanbul

²İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, 34469, Sarıyer, İstanbul

aldogan17@itu.edu.tr, demirelha@itu.edu.tr

Özet

Aşırı hava olaylarının görülme sıklığının artması ve iklim değişikliğinin önemli nedenlerinden birinin ulaştırma kaynaklı emisyonlar olduğu bilinmektedir. Emisyonların tahmini için ulaştırma hareketliliğinin izlenmesi gerekli olup, uzaktan algılama veri ve yöntemleri; sürekliliği geniş kapsama alanı ve ilgili diğer veriler ile bütünleştirilme kolaylığı nedeniyle öne çıkmaktadır. Bu çalışmada deniz taşımacılığı kaynaklı emisyonların tahmin edilmesi için bölgesel ölçekte gemi hareketlerinin derin öğrenme algoritmalarından YOLOX ile tespit edilmesi amaçlanmıştır. Sentinel-2 verisi ulaştırma hareketliliğinin izlenmesinde ve emisyon tahmininde yardımcı bir veri kaynağıdır. Bu sebeple, kara-deniz, çevre ve iklim izleme verileri araştırmacılara ücretsiz sunulmakta olduğu Avrupa Uzay Ajansı Copernicus programının bir parçası olan Sentinel-2 RGB görüntülerinden yeni bir veri seti oluşturulmuş olup, bu veri seti gemilerin otomatik çıkarımında kullanılmıştır. Veri çeşitliliği, model eğitiminde ve modelin genelleme yeteneğini artırmada önemli bir parametredir. Veri çeşitliliğini sağlamak ve modelin öğrenme kapasitesini artırmak için dünyanın farklı konteyner limanlarından alınan Sentinel-2 görüntüleri bir araya getirilmiş ve çeşitli ön işlem adımlarından geçirilmiştir. İlk kez 2021 yılında kullanıcılara tanıtılan YOLOX algoritması farklı büyüklükteki nesneleri tespit edebilme kapasitesine sahip bir algoritma olup, bu yönü ile önceki diğer YOLO mimarilerinden ayrılmaktadır. Bu sebeple, bu çalışma özelinde YOLOX algoritması tercih edilmiştir. Tespit doğruluğunu artırmak amacıyla, her bir standart YOLOX modeli (YOLOX-s-m-l-x) ayrı oturumlarda, hiperparametreler üzerinde değişiklik yapılmadan eğitilmiştir ve aralarından en yüksek metrik değerlere ulaşan YOLOX-l modeli ile gemiler tespit edilmiştir. Model ortalama kesinlik, ortalama duyarlılık ve F1 puanı sırasıyla %56.39, %65.45 ve %60.48 bulunmuştur. Gemi çıkarımları, Rotterdam limanında 2023 yılı deniz taşımacılığı kaynaklı karbonmonoksit (CO) emisyonlarının tahmininde kullanılmıştır ve sonuç olarak emisyon miktarı 148,504-ton olarak görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Deniz Taşımacılığı Kaynaklı Emisyonlar, Uzaktan Algılama, Gemi Tespiti, Derin Öğrenme.

A REMOTE SENSING APPROACH TO IDENTIFY SHIPPING EMISSIONS

Abstract

Shipping emissions are recognized as a significant contributor to climate change, increasing the frequency of extreme weather events. It is important to monitor transportation mobility for estimating emissions, and remote sensing data and methods are valuable due to their continuity, wide coverage, and ease of integration with other relevant data. Sentinel-2 data enables monitoring of transportation mobility and can be used as proxy data to infer shipping emissions. For this purpose, this study aims to monitor ship movements on a regional scale with YOLOX-assisted ship detection to estimate emissions. A new dataset was curated from Sentinel-2 RGB images provided by the European Space Agency's Copernicus program, in which environmental and climate monitoring data are available free of charge. The dataset covers various locations of busy container ports to support data diversity. The YOLOX object detector, introduced to the computer vision community in 2021, is known for its versatility in detecting multi-scale objects. Thus, YOLOX was chosen to perform ship detection, and each standard YOLOX model (YOLOX-s-m-l-x) was trained on the dataset in separate sessions with default hyperparameters. As a result, the model with the highest evaluation score, YOLOX-l, was utilized to extract ship instances and localize ships from the dataset. Average precision (AP), average recall (AR), and F1-score were found to be 56.39%, 65.45%, and 60.48%, respectively. Ship extractions were utilized to estimate carbon monoxide (CO) emissions for 2023 in the port of Rotterdam, and a total of 148.504 tons of shipping-related CO emissions were inferred as a result.

Keywords: Shipping Emissions, Remote Sensing, Ship Detection, Deep Learning.

Sorumlu Yazar: Cemre Fazilet Aldoğan

Geliş Tarihi: 15 Nisan 2025

Kabul Tarihi: 24 Haziran 2025

Yayın Tarihi: 30 Haziran 2025

Atıf Şekli: Aldoğan, C.F., Demirel, H. (2025). Deniz Taşımacılığı Kaynaklı Emisyonların Belirlenmesinde Uzaktan Algılama Yaklaşımı, *Atmosfer ve İklim Dergisi*, 1(2), 28-36.

Makale Tipi: Araştırma Makalesi

e-ISSN: 3023-8560

GİRİŞ

Küresel taşımacılığın önemli bir bileşeni olan gemilerden atmosfere salınan sera gazları ve hava kirleticileri, iklim üzerinde zarar verici etkilere sebep olmakla beraber insan sağlığı ile ilgili ciddi problemlerin doğmasına yol açmaktadır (Corbett ve Fischbeck, 1997; Deniz ve Durmuşoğlu, 2003; Zhang vd., 2014; Nunes vd., 2017; Wan vd., 2020; Alamoush vd., 2022; Christodoulou ve Cullinane, 2024). Taşımacılık faaliyetleri sonucu karbonmonoksit (CO), sülfür oksit (SO_x), nitrojen oksit (NO_x), karbondioksit (CO₂) gazlarının yanı sıra PM_{2.5} ve PM₁₀ gibi partikül maddeler atmosfere salınmaktadır. Sera gazı ve partikül madde emisyon miktarı, EMEP, CAMS, EDGAR vb. bir çok emisyon envanterinde yerel, bölgesel ve küresel ölçekte hesaplanmaktadır. Bu envanterler emisyon hesaplamada “aşağıdan yukarıya” (bottom-up) ya da “yukarıdan aşağıya” (top-down) yaklaşımını benimsemektedirler. “Aşağıdan yukarıya” yaklaşımında, gemi türü, hızı, yakıt türü, motor tipi, emisyon faktörü gibi parametreler ile bir geminin saldıgı emisyon hesaplanması üzerinden sektörel bazda emisyon miktarına ulaşılmaktadır. Bu yaklaşım çalışmalarda sıklıkla tercih edilmektedir fakat bazı kısıtları içinde barındırmaktadır. Bu kısıtlar; toplam emisyonu doğrulamada karşılaşılan problemler, emisyon hesaplamasının karmaşıklığı ve harcanan zamanın fazlalığıdır (Luo vd., 2024). Uzaktan algılama yöntemleri, insan kaynaklı emisyon envanterlerinin oluşturulması ve emisyon seviyesinin hesaplanmasında, ve bu hesaplamaların daha hızlı yürütülmesinde önemli bir alternatiftir. Yer gözlem uyduları, sadece yeryüzünün izlenmesinde değil, aynı zamanda atmosferdeki değişimlerin gözlemlenmesinde de rol oynamaktadır. Yer gözlem uydularının düzenli aralıklarla sağladığı uydu görüntüleri ile iklim verilerinin bir araya getirilmesi sonucu gaz ve partikül madde emisyonları ve bunların kaynağı hakkında daha hassas bilgiler edinilebilmektedir.

Evrişimsel sinir ağları (CNNs), gemi tespitinde önemli kilometre taşlarından biridir (LeCun vd., 2015). İki aşamalı tespit edicilerden RCNN (Girshick vd., 2014), Fast-RCNN (Girshick, 2015), Faster-RCNN (Ren vd., 2015) CNN mimarisinin nesne tespitindeki türevleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu tespit edicilerin, istenilen tespit hızını yakalayamaması YOLO (Redmon vd., 2016) gibi tek aşamalı tespit edicilerin doğmasına öncülük etmiştir. Uzaktan algılama özelinde incelendiğinde tespit edicilerin karşılaştığı diğer sorunlar, nesne boyutu çeşitliliği, hava koşullarının (mevsimler değişimleri, sislilik, bulutluluk vb.) uydu görüntülerinde oluşturduğu bulanıklık ve gürültü miktarıdır (Er vd., 2023). Bununla beraber, nesne tespit modellerinin eğitilmesinde harcanan sürenin uzun olması, performans değerlendirme metrikleri olan kesinlik ve duyarlılık değerleri arasındaki dengesizlik, tespit hızı dışında karşılaşılan diğer problemler olmuştur. Bu problemlere yenilikçi bir bakış açısı geliştirmeyi hedefleyen YOLO, model hızı ve doğruluğu arasındaki dengeyi tesis etmek için 2015'ten bu yana piyasaya sürülen çeşitli YOLO versiyonları aracılığıyla mimaride yapısal değişiklikler deneyimlemiştir. Bu versiyonlardan YOLOX, Ge Zheng tarafından 2021 yılında geliştirilmiş ve önceki YOLO versiyonlarına göre daha yüksek bir performans sergilemeyi amaçlamıştır.

Hava kalitesi izleme istasyonları, enerji santralleri ve endüstriyel bölgelere ait emisyon miktarının tahmin edildiği bazı çalışmalarda, uydu tabanlı hava kalitesi verisinin yanında ikame bir veri kaynağı olarak Sentinel-2 görüntülerinin kullanıldığı görülmüştür (Strandgren vd., 2020; Hanna vd., 2022; Jain A., 2022; Hobbs vd. 2023; Rowley ve Karakuş, 2023; Rouet-Leduc ve Hulbert, 2024). Avrupa Uzay Ajansı, Copernicus programı, (https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus – web 1), Sentinel-2 misyonu, (<https://dataspace.copernicus.eu/explore-data/data-collections/sentinel-data/sentinel-2> – web 2) ürün hasadı, bitki ve arazi örtüsünün izlenmesinin yanında hava kalitesi gözlemlerinde de araştırmacılara geniş olanaklar tanımaktadır (Helber vd. 2019; Scheibenreif vd. 2021). Scheibenreif vd., rastgele noktalarda NO₂ emisyon seviyelerini tahmin edebilmek amacıyla, uydu tabanlı atmosferik hava kirliliği verisi ile beraber ikame veri olarak Sentinel-2 görüntülerinden yararlanmışlardır (2021). Bir başka çalışmada, fosil enerji santrallerinden yayılan CO₂ emisyon lokasyonları hakkında çıkarımlarda bulunmak için, sıcaklık, nem ve rüzgar gibi parametreleri içeren ERA-5 verisine ek olarak Sentinel-2 verisi kullanılmıştır. (Hanna vd., 2023). Başka bir çalışmada ise, birden fazla optik uydu verisi (Sentinel-2, Landsat-8, and PlanetScope) CO₂ emisyon tahmininde kullanılmıştır (Couture vd., 2024). Balasundaram ve diğerleri tarafından yürütülen çalışmada, Sentinel-2 verisi üzerinden sanayi sitelerinden yayılan duman (smoke plumes) konsantrasyon seviyesinin tahmini yapılmıştır (2024). Bahsedilen bu çalışmalarda, hava kalitesi izleme istasyonları, sanayi siteleri, enerji santralleri, kirliliğin

yoğun olduğu şehir ve kırsal alanların lokasyonlarını tespit etmede Sentinel-2 görüntülerinden yararlanmışlardır. Sentinel-2 verisinin benzer amaçlarla tercih edildiği bazı çalışmalarda, nesne tespiti, görüntü sınıflandırma ve anlamsal bölütleme gibi bilgisayarlı görü teknikleri ile konum hakkında bilgi üretilmiştir. Poucin vd. (2023) baskın emisyon noktalarının konumunu belirlemek ve emisyon seviyesini tahmin etmek için gradient boosting ve ResNet gibi sınıflandırma modellerini tercih ederken, Wu vd. (2023) nesne tespiti ve anlamsal bölütleme tekniklerini tercih etmiştir. Bildiğimiz kadarıyla, Sentinel-2 verisinden elde edilen gemi çıkarımlarının öznetelikleri baz alınarak deniz taşımacılığı kaynaklı emisyonların tahmin edildiği bir çalışma literatürde henüz yer almamaktadır. Bu sebeple bu çalışmanın amacı; deniz taşımacılığı kaynaklı emisyonların tahmininde ilk aşamada YOLOX nesne tespit algoritması ile gemilerin tespit edilmesi ve ikinci aşamada bu tespitlere göre CO emisyonlarının hesaplanmasıdır.

Çalışmada, Sentinel-2 veri seti üzerinden tespit edilen gemi sayısını artırmak için en yüksek performanslı YOLOX modeli seçilmiş ve bu model ile nesne tespiti sonrası elde edilen gemi özneteliklerini (gemi boyutu ve sayısı) baz alarak Rotterdam limanında deniz taşımacılığı kaynaklı CO emisyonları tahmin edilmiştir. Makalenin diğer bölümlerinde, “Veri ve Yöntem” başlığı altında Sentinel-2 veri seti ve YOLOX eğitim detayları hakkında bilgiler verilmiştir. “Bulgular” başlığı altında gemi tespiti görsel sonuçları ve modellerin istatistiki değerlendirmeleri tartışılmış olup, “Sonuç” bölümünde elde edilen bulgular değerlendirilmiştir.

VERİ

Sentinel-2, Avrupa Uzay Ajansı tarafından 2015 yılında kara ve deniz alanlarının küresel çapta ve sistematik olarak izlenmesi amacıyla başlatılan bir uydu misyonudur. Sentinel-2A (23.06.2015), Sentinel-2B (07.03.2017) ve Sentinel-2C (05.09.2024) uyduları, bünyelerinde barındırdıkları çok bantlı algılayıcılar (Multispectral Instrument) (MSI) ile beş (5) günde bir yer gözlem verisi toplamaktadırlar. Sentinel-2A verisi, görünür kıızılötesinden kırsal kızılötesi aralığına kadar 13 farklı spektral banttan oluşmaktadır. Bantların mekansal çözünürlüğü sırasıyla 10m, 20m ve 60m arasında değişmektedir (Drusch vd., 2012). Sentinel-2A verisine erişim Copernicus Data Space Ecosystem üzerinden sağlanabilmektedir. Alternatif olarak, Google Earth Engine (GEE) ya da geemap Python kütüphanesi üzerinden indirilebilmektedir. Bu çalışmada Sentinel-2 Level-2A yüzey yansıma verisinin 10m mekansal çözünürlüklü görünür bantları (Red-Green-Blue, RGB) kompozit olarak geemap kütüphanesi üzerinden indirilmiştir. İndirme öncesinde tarih aralığı 2017-2024 yılları arası ve bulutluluk oranı %10'dan az olacak bir biçimde filtreleme uygulanmıştır. Gölge ya da düşük kontrast gibi negatif ışık etkilerinin görüldüğü görüntüleri elemek amacıyla ilkbahar ve sonbahar mevsimleri tercih edilmiştir. Böylelikle, gürültülü görüntüler elenerek, sadece yüksek kaliteli görüntülerin indirilmesi sağlanmıştır. Optik uydu görüntüleri atmosferik koşullardan büyük ölçüde etkilendiğinden, indirilen Sentinel-2 görüntü sayısı ve buna bağlı olarak veri seti örneklem büyüklüğü bu faktöre göre değişkenlik göstermiştir. Veri seti için seçilen coğrafi noktalar Bremerhaven (Almanya), Busan (Güney Kore), İzmir (Türkiye), Long Beach (ABD), Nantong (Çin), Rizhao (Çin), Taranto (İtalya), Abudhabi (BAE), Hong Kong (Çin), Savannah (ABD), Tianjin (Çin) ve Rotterdam (Hollanda) limanlarıdır. Rotterdam limanına ait görüntüler test setini oluşturduklarından, yıllık emisyon tahmini için mevsim farkı gözetilmemiş, toplamda yılın altmış iki (62) günü çalışmada temsil edilmiştir. Yukarıda bahsedilen tüm limanları içeren 1064 adet Sentinel-2A görüntüsü indirme işlemi sonrası karolara ayırma işlemine tabi tutulmuştur. Karo görüntüler, Roboflow ortamında etiketlenmiş ve yeniden boyutlandırma, görüntü zenginleştirme gibi ön-işlem adımlarından geçirilmiştir. İşlem yükünü azaltmak amacıyla görüntü boyutu 1024x1024 pikselden 400x400 piksele düşürülmüştür. Yeniden boyutlandırılmış bu görüntülere kontrast germe ve -10 ve 10 derece yatay döndürme veri artırımı uygulanmıştır. Kolaylık örnekleme türünün seçildiği çalışmada, veri setinde öncelikle coğrafi çeşitlilik sağlamak amacıyla ve daha fazla gemi örneği toplamak adına ağırlıklı olarak en işlek limanlardan ve farklı kıtalara ait limanlardan görüntülere yer verilmiştir. Bu limanlarda gürültü oranı daha az Sentinel-2 görüntülerine ulaşıldığı için bu örneklem tipi çalışmaya uygun bulunmuştur. 8:2 örneklem oranı ile 3626, 517 ve 254 görüntü sırasıyla eğitim, doğrulama ve test verisi olarak ayrılmıştır. Toplamda 4397 adet Sentinel-2 görüntüsünden oluşan bir veri seti oluşturulmuştur. 8:2 örneklem oranı bu büyüklükte bir veri setinin doğrulanmasında yeterli bulunmuş olup, bu sebeple çalışmada ek olarak çapraz doğrulama yapılmamıştır. Gemi tespiti sonrası 2023 yılına ait CO emisyonlarının hesaplanması

için brüt ton ve gemilerin limanda bekleme süresi verileri birleşmiş milletlerin veri portalından (UNCTAD Data Hub) alınmıştır (<https://unctadstat.unctad.org/datacentre/dataviewer/US.PortCalls>, - web 3) Motor gücü (kW), özgül yakıt tüketimi (g/kWh), emisyon faktörü (kg/tonne) Avrupa İzleme ve Değerlendirme Programı (European Monitoring and Evaluation Programme – EMEP) 2023 kılavuzu 1.A.3.d.i uluslararası deniz seyrüsefer emisyon raporundan alınmıştır. Emisyon formüllerine ise Hollanda Çevre Değerlendirme Ajansının 2023 yılına ait ulaştırma kaynaklı emisyonların hesaplanma yöntemleri raporundan ulaşılmıştır.

YÖNTEM

YOLOX, bilgisayarlı görü araştırmalarında sıklıkla tercih edilen YOLO serisinin güncel bir üyesidir. Açılımı “You Only Look Once” olan bu nesne tespit serisi tek aşamalı tespit ediciler sınıfına dahildir. İki aşamalı tespit modellerinin aksine, YOLO modelleri, bölge önerilerinin belirlenmesi ve nesnelerin tespit aşamalarını tek seferde yönetmektedir. YOLOX tespit edicisi, doğal görüntülerde ya da uydu görüntülerinde rastlanılan çeşitli büyüklüklerdeki nesnelerin tespit edilebilmesini kolaylaştırmak amacıyla geliştirilmiştir (Ge vd. 2021). İçerisinde farklı ağ yapılarında YOLOX-s, YOLOX-m, YOLOX-l, YOLOX-x ve YOLOX-Darknet53 varyantlarını barındırmaktadır. YOLOX-Darknet53 haricindeki tüm modeller YOLOv5 modellerinden türetilmiş iken YOLOX-Darknet53, YOLOv3 tespit edicisinden türetilmiştir (Ransheng vd. 2023). YOLOv5 mimarisine eklenen CSPNet, Focus, SPP ağ yapıları ile FPN ve PANet öznitelik piramit yapısı YOLOX mimarisini oluşturmaktadır. Bu çalışmada, yukarıda bahsedilen standart YOLOX modellerinin her biri (YOLOX-s, YOLOX-m, YOLOX-l, YOLOX-x) en yüksek performans gösteren YOLOX modelini bulmak için Sentinel-2 veri seti üzerinde eğitilmiştir. Diğerlerinden daha yüksek performans gösteren YOLOX-l modeli test edilerek gemi çıkarımları yapılmıştır. Gemi çıkarımları sonucu elde edilen sınırlayıcı kutu boyutları referans alınarak gemiler küçük, orta, büyük gemiler olarak COCO sınıflandırma kriterlerine göre sınıflandırılmıştır (Lin vd. 2024). Bu sınıflandırmaya göre sınırlayıcı kutu alanı 1024 pikselden azsa gemi küçük, 1024-9216 piksel arasında ise orta, 9216 pikselden fazla ise büyük gemi olarak sınıflandırılmaktadır. Her bir gemi sınıfı bilgisi ve gemi sayıları, karbonmonoksit (CO) emisyonlarının hesaplanmasında formüllerde kullanılmıştır. Emisyon formülleri aşağıdaki gibidir:

$$F_v = V_v * T_v * E_v \quad (1)$$

$$F_{v,f,m} = f_{v,f} * f_{v,m} * F_v \quad (2)$$

$$EM_{s,v,f,m} = F_{v,f,m} * \text{Emisyon faktörü}_{s,f,m} \quad (3)$$

F_v yakıt tüketimini (kg), V_v brüt tonu (GT), T_v demirde bekleme zamanını, E_v yakıt tüketim oranını, v ise gemi tipini ifade etmektedir. $F_{v,f,m}$ gemi, yakıt ve motor tipi başına yakıt tüketimini, $f_{v,f}$ gemi tipi başına yakıt fraksiyonunu, $f_{v,m}$ gemi tipi başına motor fraksiyonunu, $EM_{s,v,f,m}$ emisyon miktarını (kg), $\text{Emisyon faktörü}_{s,f,m}$ her bir madde, yakıt ve motor tipi başına emisyon faktörünü, f, m, s ise sırasıyla, yakıt, motor tipi ve maddeyi temsil etmektedir. Uygun CO emisyon faktörünün seçimi, dizel yakıt türüne ve limana yakın gemilerin orta hızla ilerlediğini göz önünde bulundurarak yapılmıştır. Eğitim, doğrulama ve test işlemleri, Google Colab ortamında A100 ve L4 NVIDIA grafik işlem birimi (GPU) kullanılarak yürütülmüştür. A100 GPU belirli bir ücret karşılığında kullanıcılara sunulmaktadır. YOLOX-s ve YOLOX-x modellerinin eğitiminde A100 GPU, YOLOX-m ve YOLOX-l modellerinin eğitiminde ise L4 GPU kullanılmıştır. YOLOX-s ve YOLOX-x modellerinin eğitilmesi sırasıyla 3 ve 6 saat, diğerlerinin ise ayrı oturumlar halinde toplam 32 saat sürmüştür. Devir, öğrenme oranı, ağırlık bozunumu, SGD momentumu, cihaz sayısı ve yığın boyutu sırasıyla 300, 0.01, 0.0005, 0.9, 1 ve 16'dır. Küçük gemilerin görüntüde temsil ettiği piksel sayısının, deniz yüzeyine göre çok az olması sebebiyle çalışmada büyük gemilerin tespiti üzerine yoğunlaşmıştır (Li vd. 2021). Son olarak, en yüksek doğruluk performansı gösteren model ile test için ayrılan Sentinel-2 görüntüleri test edilmiştir. YOLOX gemi tespitine dair metrik sonuçların yorumlaması öncesinde kesinlik, duyarlılık ve F1 puanı kavramlarının bilinmesi önemlidir.

Formüller aşağıdaki gibidir:

$$\text{Kesinlik} = \frac{\text{Doğru Pozitif}}{\text{Doğru Pozitif} + \text{Yanlış Pozitif}} \quad (3)$$

$$\text{Duyarlılık} = \frac{\text{Doğru Pozitif}}{\text{Doğru Pozitif} + \text{Yanlış Negatif}} \quad (4)$$

$$\text{F1 Puanı} = \frac{2 \cdot \text{Kesinlik} \cdot \text{Duyarlılık}}{\text{Kesinlik} + \text{Duyarlılık}} \quad (5)$$

Kesinlik tüm tespitlerin içerisindeki doğru tespitlere odaklanırken, duyarlılık ise gözden kaçan tespitlerin dahil olduğu yer doğruluğu içerisindeki doğru tespitlere odaklanır. F1 puanı kesinlik ve duyarlılık değerlerinin harmonik ortası olarak hesaplanan temel değerlendirme metriklerinden biridir. 0 ve 1 arasında değer alır ve bu değerlere yakınlık sırasıyla modelin yüksek ve düşük doğruluğuna işaret etmektedir.

BULGU VE DEĞERLENDİRMELER

Sentinel-2 veri setine ait test görüntülerinden tespit edilen bazı gemi örnekleri sınırlayıcı kutular içerisinde Şekil 1’de aşağıda sunulmuş olup, sadece YOLOX-l modeli ile test edilen Sentinel-2 görüntüleri yer almaktadır. Güven eşiğinin 0.25 olarak ayarlandığı bu çalışmada, toplamda 696 tespit yapılmıştır. YOLOX-l modelinin çeşitli büyüklük ve ebatlarda yer alan gemileri tespit edebildiği göze çarpmaktadır. Öte yandan bazı gemilerin model tarafından tespit edilemediği, diğer bir ifadeyle, gözden kaçan gemilerin var olduğu görülmektedir.



Şekil 1. YOLOX Gemi Tespiti Sonuçları.

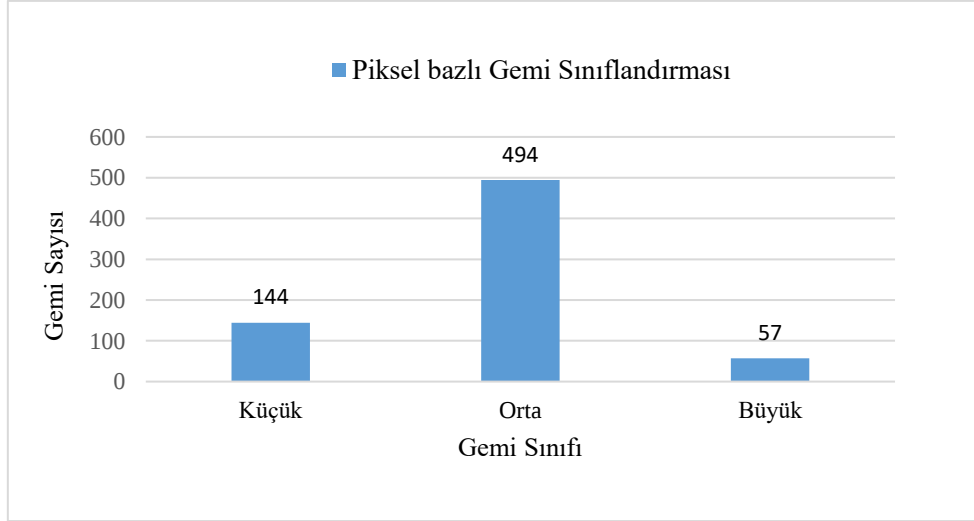
Ek olarak, yanlış alarm olarak nitelendirilen tespitler de bulunmaktadır. Bu tespitlerin düşük güven değeri ile tespit edildiği görülmektedir. Bir tespitin doğru pozitif (TF), doğru negatif (TN), yanlış pozitif (FP) ya da yanlış negatif (FN) olarak sınıflandırılması kesişimin birleşime oranı (IoU) değerine göre kesinlik kazanmaktadır. IoU, yer doğruluğu ve tespit edilmiş sınırlayıcı kutuların kesişiminin yine bu kutuların birleşimine oranı olarak ifade edilmektedir. Bu çalışmanın gelecek emisyon tahmin çalışmaları ile entegre edilmesi için büyük gemilerin tespitine odaklanılmıştır.

Tablo 1’de YOLOX standart model performanslarını özetleyen ortalama kesinlik, 0.5 eşik değerinde ortalama kesinlik (AP50), ortalama duyarlılık değerleri ve F1 puanı verilmiştir:

Tablo 1. YOLOX Gemi Tespit Değerlendirme Sonuçları

Model	AP (%)	AP50 (%)	AR (%)	F1 Puanı
YOLOX-s	47.17	89.0	57.83	51.95
YOLOX-m	54.06	89.5	63.91	58.57
YOLOX-x	54.84	91.1	63.94	59.04
YOLOX-l	56.39	91.2	65.45	60.58

Yukarıda Tablo 1’deki sonuçlar incelendiğinde, en yüksek metrik değerlerin YOLOX-l modeli ile elde edildiği gözlemlenmiştir. Bu bulgu, YOLOX-l modelinin diğerleri üzerinde bir tespit üstünlüğüne sahip olduğuna işaret etmektedir. Ek olarak YOLOX-l modelinde büyük gemileri lokalize eden sınırlayıcı kutulara göre ortalama kesinlik ve ortalama duyarlılık sırasıyla 0.739 ve 0.786 bulunmuştur. YOLOX-l modelinin tespit ettiği yanlış pozitif ve yanlış negatif örnek sayısının diğer modeller ile karşılaştırıldığında daha az olduğu gözlemlenmiştir. YOLOX-x modelinin YOLOX-l modelinden 44.9 milyon daha fazla parametre içerdiği bilinmesine karşın, YOLOX-l modelinin %60.58 F1 puanı ile daha yüksek doğruluk oranına eriştiği görülmektedir (Megvii-BaseDetection, 2022). Bununla birlikte, alınan ortalama kesinlik, ortalama duyarlılık ve F1 puanı değerleri, YOLOX-l modelinin tespit ettiği nesneler arasında yanlış pozitif örneklerin doğru pozitif, diğer bir ifadeyle, doğru tespit örnek sayısını aştığını göstermiştir. Gemilerin YOLOX-l ile tespit edilmesini takip eden gemi sınıflandırmasında her bir gemi sınıfına ait (küçük, orta, büyük) gemi sayıları aşağıdaki gibidir:



Şekil 2. Gemi Sınıflarına Göre Gemi Sayılarının Dağılımı

Şekil 2’de görüldüğü üzere, YOLOX-l modeli en fazla orta büyüklükteki gemileri tespit edebilmede başarı sağlamıştır. Deniz taşımacılığı kaynaklı CO emisyonları hakkında tahmin yöntemlerinin geliştirilmesi ve bir öngöründe bulunulması, diğer sera gazı ve kirleticilerin arasında ikincil öneme sahip olsa da, uluslararası ticaretin yoğun olarak gerçekleştiği limanlarda ortaya çıkan CO kaynaklı hava kirliliğinin boyutlarının bilinmesi; küresel ısınma, halk sağlığı, bölgesel hava kalitesi çalışmalarına katkı sağlayacaktır (WHO, 2021). Yakıt-motor tipi, gemi boyut ve sayısı gibi birden fazla faktörün belirleyici olduğu CO emisyon miktarı ($EM_{sv,f,m}$); küçük, orta ve büyük gemiler için sırasıyla, 1,202, 134,659 ve 12,642-ton olarak tahmin edilmiştir. Rotterdam limanına ait görüntülerde yer alan gemilerin CO emisyonunun hesaplandığı çalışmada, deniz taşımacılığı kaynaklı emisyon

miktarı toplamda 148,504-ton kaydedilmiştir. Gelecek dönemlerde CO₂, NO_x, SO_x, PM_{2.5} ve PM₁₀ gibi sera gazı ve hava kirleticilerinin tamamının bulunduğu kapsamlı bir tahmin çalışmasının yürütülmesi hedeflenmektedir.

SONUÇLAR

Gemilerin tespit edilmesinde kullanılan Sentinel-2 uydu görüntüleri, bu özelliği ile deniz taşımacılığı kaynaklı emisyonların tahmininde yardımcı bir veri kaynağı olarak kullanılmıştır. Bu çalışmada, ilk olarak YOLOX modelleri ile Sentinel-2 seviye 2A MSI görüntülerinden gemiler tespit edilmiştir. Çalışmada faydalanılan bu standart modeller deniz taşımacılığı kaynaklı emisyonların tahmini aşamasına geçilmesi için gereken gemilerin tespitinde ortalama bir performans sergilemiştir. Diğer taraftan, YOLOX mimarisi farklı büyüklüklerdeki gemilerin tespitinde etkili sonuçlar alınmasına imkan tanımıştır. Özellikle, küçük boyutlu gemilerin tespitinde büyük gemilerin tespit edilmesinden daha fazla başarı sağlanmıştır. Sentinel-2 görüntülerinden gemilerin tespit edilmesi ile uzaktan algılamaya dayalı gözlemler sunulmuş, optik uydu verilerinin CO emisyonlarının tahmin edilmesindeki potansiyeli değerlendirilmiştir. Rotterdam limanına ait Sentinel-2 görüntülerinden tespit edilen gemilerin büyüklük ve sayıları baz alınarak hesaplanan 2023 yılı CO emisyon miktarı 148,504-ton bulunmuştur.

TEŞEKKÜR

Bu makalede sunulan araştırma, ilk yazarın (Cemre Fazilet Aldoğan) İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ), Bilişim Enstitüsü, Bilişim Uygulamaları Anabilim Dalı, Coğrafi Bilgi Teknolojileri (GIT) programında yaptığı doktora tez çalışmasının bir parçasıdır ve bu doktora tezi Türkiye Yükseköğretim Kurulu (YÖK) tarafından sağlanan 100/2000 doktora bursu ile desteklenmiştir. Sağladıkları destek için kurula teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

- Alamouh, A. S., Ölçer, A. I. & Ballini, F. (2022). Ports' role in shipping decarbonisation: A common port incentive scheme for shipping greenhouse gas emissions reduction. In *Cleaner Logistics and Supply Chain* (Vol. 3). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.clscn.2021.100021>
- Balasundram, A., Shaik, A., Banga, J. K. & Singh, A. K. (2024). U-Net inspired deep neural network-based smoke plume detection in satellite images. In *Computers, Materials & Continua*, 79(1), 779-799. <https://doi.org/10.32604/cmc.2024.048362>
- Christodoulou, A. & Cullinane, K. (2024). The prospects for, and implications of, emissions trading in shipping. *Maritime Economics and Logistics*, 26(1), 168–184. <https://doi.org/10.1057/s41278-023-00261-1>
- Couture, H. D., Alvara, M., Freeman, J., Davitt, A., Koenig, H., Rouzbeh Kargar, A., O'Connor, J., Söldner-Rembold, I., Ferreira, A., Jeyaratnam, J., Lewis, J., McCormick, C., Nakano, T., Dalisay, C., Lewis, C., Volpato, G., Gray, M. & McCormick, G. (2024). Estimating Carbon Dioxide Emissions from Power Plant Water Vapor Plumes Using Satellite Imagery and Machine Learning. *Remote Sensing*, 16(7). <https://doi.org/10.3390/rs16071290>
- Deniz, C. & Durmuşoğlu, Y. (2008). Estimating shipping emissions in the region of the Sea of Marmara, Turkey. *Science of the Total Environment*, 390(1), 255–261. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.09.033>
- Drusch, M., del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F. & Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>
- Er, M. J., Zhang, Y., Chen, J. & Gao, W. (2023). Ship detection with deep learning: a survey. *Artificial Intelligence Review*, 56(10), 11825–11865. <https://doi.org/10.1007/s10462-023-10455-x>
- Everingham, M., van Gool, L., Williams, C. K. I., Winn, J. & Zisserman, A. (2010). The pascal visual object classes (VOC) challenge. *International Journal of Computer Vision*, 88(2), 303–338. <https://doi.org/10.1007/s11263-009-0275-4>
- Fontelle, J.-P., Fridell, E., Grigoriadis, A., Hill, N., Kilde, N., Lavender, K., Mamarikas, S., Reynolds, G., Rypdal, K., Thomas, R., Webster, A. & Winther, M. (n.d.). *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023 1 Category Title NFR 1.A International maritime and inland navigation, national navigation, national fishing, recreational boats International maritime navigation, international inland navigation, national navigation (shipping), national fishing EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023 2*.
- Gascon, F., Bouzinac, C., Thépaut, O., Jung, M., Francesconi, B., Louis, J., Lonjou, V., Lafrance, B., Massera, S., Gaudel-Vacaresse, A., Languille, F., Alhammoud, B., Viallefont, F., Pflug, B., Bieniarz, J., Clerc, S., Pessiot, L., Trémas, T., Cadau, E., ... Fernandez, V. (2017). Copernicus Sentinel-2A calibration and products validation status. *Remote Sensing*, 9(6). <https://doi.org/10.3390/rs9060584>
- Ge, Z., Liu, S., Wang, F., Li, Z. & Sun, J. (n.d.). *YOLOX: Exceeding YOLO Series in 2021 V100 batch 1 Latency (ms) YOLOX-L YOLOv5-L YOLOX-DarkNet53 YOLOv5-Darknet53 EfficientDet5 COCO AP (%) Number of parameters (M) Figure 1: Speed-accuracy trade-off of accurate models (top) and Size-accuracy curve of lite models on mobile devices (bottom) for YOLOX and other state-of-the-art object detectors* (Vol. 5). <https://github.com/ultralytics/yolov3>

- Geilenkirchen, G., Bolech, M., Hulskotte, J., Dellaert, S., Ligterink, N., Sijstermans, M., Geertjes, K. & Felter, K. (n.d.). *Methods for Calculating the Emissions of Transport in the Netherlands Colophon Methods for calculating the emissions of transport in the Netherlands Author(s)*.
- Girshick, R. (n.d.). *Fast R-CNN*. <https://github.com/rbgirshick/>
- Girshick, R., Donahue, J., Darrell, T. & Malik, J. (n.d.). *Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation*. <https://arxiv.org/abs/1311.2524>
- Gorroño, J., Varon, D. J., Irakulis-Loitxate, I. & Guanter, L. (2023). Understanding the potential of Sentinel-2 for monitoring methane point emissions. *Atmospheric Measurement Techniques*, 16(1), 89–107. <https://doi.org/10.5194/amt-16-89-2023>
- Hanna, J., Borth, D. & Mommert, M. (2023). Physics-Guided Multitask Learning for Estimating Power Generation and CO₂ Emissions From Satellite Imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 61. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2023.3286444>
- Hanna, J., Mommert, M. & Borth, D. (n.d.). *Estimation of Power Generation and CO₂ Emissions Using Satellite Imagery*. <https://doi.org/10.5281/zenodo>
- Helber, P., Bischke, B., Dengel, A. & Borth, D. (2019). Eurosat: A novel dataset and deep learning benchmark for land use and land cover classification. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12(7), 2217–2226. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2019.2918242>
- Hobbs, M., Kargar, A. R., Couture, H., Freeman, J., Söldner-Rembold, I., Ferreira, A., Jeyaratnam, J., O'Connor, J., Lewis, J., Koenig, H., McCormick, C., Nakano, T., Dalisay, C., Davitt, A., Gans, L., Lewis, C., Volpato, G., Gray, M. & McCormick, G. (2023). Inferring Carbon Dioxide Emissions From Power Plants Using Satellite Imagery and Machine Learning. *IGARSS 2023 - IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 4911–4914. <https://doi.org/10.1109/igarss52108.2023.10283046>
- Hosang, J., Benenson, R., Dollar, P. & Schiele, B. (2016). What Makes for Effective Detection Proposals? *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 38(4), 814–830. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2015.2465908>
- Jain, A. (2022). Employing Deep Learning to Quantify Power Plant Greenhouse Gas Emissions via Remote Sensing Data. *AAAI 2022 Fall Symposium: The Role of AI in Responding to Climate Challenges*. <https://www.climatechange.ai/papers/aaaifss2022/11>
- Li, B., Xie, X., Wei, X. & Tang, W. (2021). Ship detection and classification from optical remote sensing images: A survey. In *Chinese Journal of Aeronautics* (Vol. 34, Issue 3, pp. 145–163). <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.09.022>
- Lin, Y., Li, J., Wei, S. & Liu, S. (2024). OptiShipNet: Efficient Ship Detection in Complex Marine Environments Using Optical Remote Sensing Images. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/jmse12101786>
- Luo, Z., He, T., Yi, W., Zhao, J., Zhang, Z., Wang, Y., Liu, H. & He, K. (2024). Advancing shipping NO_x pollution estimation through a satellite-based approach. *PNAS Nexus*, 3(1). <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad430>
- Mommert, M., Sigel, M., Neuhausler, M., Scheibenreif, L. & Borth, D. (2020). *Characterization of Industrial Smoke Plumes from Remote Sensing Data*. <http://arxiv.org/abs/2011.11344>
- Nunes, R. A. O., Alvim-Ferraz, M. C. M., Martins, F. G. & Sousa, S. I. V. (2017). Assessment of shipping emissions on four ports of Portugal. *Environmental Pollution*, 231, 1370–1379. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.08.112>
- Passig, J., Schade, J., Irsig, R., Li, L., Li, X., Zhou, Z., Adam, T. & Zimmermann, R. (2021). *Detection of Ship Plumes from Residual Fuel Operation in Emission Control Areas using Single-Particle Mass Spectrometry*. <https://doi.org/10.5194/amt-2020-482>
- Poucin, F., Ouerghi, E., Lajouanie, S., de Almeida Rodrigues, H., Facciolo, G., de Franchis, C. & Hessel, C. (2023). Machine Learning and Feature Extraction for Industrial Smoke Plumes Detection from Sentinel-2 Images. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2023-July, 6113–6116. <https://doi.org/10.1109/IGARSS52108.2023.10282662>
- Ransheng, Y., Ying, H. & Hongfei, Z. (2023). Ship Detection in Maritime Surveillance System Based on YOLOX. *2023 8th International Conference on Image, Vision and Computing, ICIVC 2023*, 146–153. <https://doi.org/10.1109/ICIVC58118.2023.10269862>
- Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R. & Farhadi, A. (n.d.). *You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection*. <http://pjreddie.com/yolo/>
- Ren, S., He, K., Girshick, R. & Sun, J. (n.d.). *Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks*. <https://github.com/>
- Rouet-Leduc, B. & Hulbert, C. (2024). Automatic detection of methane emissions in multispectral satellite imagery using a vision transformer. *Nature Communications*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-024-47754-y>
- Rowley, A. & Karakuş, O. (2023). Predicting air quality via multimodal AI and satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, 293. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113609>
- Scheibenreif, L., Mommert, M. & Borth, D. (2021). *Estimation of Air Pollution with Remote Sensing Data: Revealing Greenhouse Gas Emissions from Space*. <http://arxiv.org/abs/2108.13902>
- Strandgren, J., Krutz, D., Wilzewski, J., Paproth, C., Sebastian, I., R. Gurney, K., Liang, J., Roiger, A. & Butz, A. (2020). Towards spaceborne monitoring of localized CO₂ emissions: An instrument concept and first performance assessment. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13(6), 2887–2904. <https://doi.org/10.5194/amt-13-2887-2020>
- van Geffen, J., Folkert Boersma, K., Eskes, H., Sneep, M., ter Linden, M., Zara, M. & Pepijn Veefkind, J. (2020). S5P TROPOMI NO₂ slant column retrieval: Method, stability, uncertainties and comparisons with OMI. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13(3), 1315–1335. <https://doi.org/10.5194/amt-13-1315-2020>
- Wan, Z., Ji, S., Liu, Y., Zhang, Q., Chen, J. & Wang, Q. (2020). Shipping emission inventories in China's Bohai Bay, Yangtze River Delta, and Pearl River Delta in 2018. *Marine Pollution Bulletin*, 151. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110882>

- Wang, Q., Shi, W., Li, Z. & Atkinson, P. M. (2016). Fusion of Sentinel-2 images. *Remote Sensing of Environment*, 187, 241–252. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.10.030>
- Wu, J., O’Sullivan, C., Orlandi, F., O’Sullivan, D. & Dev, S. (2023). Measurement of Industrial Smoke Plumes from Satellite Images. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2023-July, 5680–5683. <https://doi.org/10.1109/IGARSS52108.2023.10282713>
- Wu, Q. (2020). geemap: A Python package for interactive mapping with Google Earth Engine. *Journal of Open Source Software*, 5(51), 2305. <https://doi.org/10.21105/joss.02305>
- Zhang, F., Chen, Y., Tian, C., Wang, X., Huang, G., Fang, Y. & Zong, Z. (2014). Identification and quantification of shipping emissions in Bohai Rim, China. *Science of the Total Environment*, 497–498, 570–577. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.08.016>
- Zhang, Q., Geng, G. N., Wang, S. W., Richter, A. & He, K. bin. (2012). Satellite remote sensing of changes in NO_x emissions over China during 1996–2010. *Chinese Science Bulletin*, 57(22), 2857–2864. <https://doi.org/10.1007/s11434-012-5015-4>
- Zhang, Q., Huang, Y. & Song, R. (2022). A Ship Detection Model Based on YOLOX with Lightweight Adaptive Channel Feature Fusion and Sparse Data Augmentation. *AVSS 2022 - 18th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal-Based Surveillance*. <https://doi.org/10.1109/AVSS56176.2022.9959441>
- WHO global air quality guidelines. (2021). Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide.
- Web 1, https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2, (20.08.2024 tarihinde alınmıştır).
- Web 2, <https://dataspace.copernicus.eu/>, (20.08.2024 tarihinde alınmıştır).
- Web 3, <https://unctadstat.unctad.org/datacentre/dataviewer/US.PortCalls>, (20.08.2024 tarihinde alınmıştır).
- Web 4, <https://github.com/Megvii-BaseDetection/YOLOX?tab=readme-ov-file#standard-models>, (10.10.2024 tarihinde alınmıştır).
- Web 5, <https://github.com/ultralytics/yolov5>, (10.10.24 tarihinde alınmıştır).

BULUT MASKELEME UYGULAMASININ YER YÜZEY SICAKLIĞI TAHMİNLERİNİN GÜVENİLİRLİĞİNE ETKİSİ

Mehmet Seren Korkmaz¹, Ali Çalışkan², Atanur Aksoy²

¹Samsun Üniversitesi, Özdemir Bayraktar Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, İklim Bilimi ve Meteoroloji Mühendisliği Bölümü, Ondokuzmayıs, Samsun

²Samsun Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Meteoroloji Mühendisliği Programı, Canik, Samsun
mehmetskorkmaz@samsun.edu.tr, 240758001@samsun.edu.tr, 240758002@samsun.edu.tr

Özet

Yer Yüzey Sıcaklığı (YYS) verileri, özellikle iklim değişikliğiyle ilgili çalışmalar başta olmak üzere birçok araştırma alanında yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu veri setleri, çeşitli algoritmalar ve yöntemlerle hesaplanarak farklı çevrimiçi platformlar aracılığıyla kullanıcılara sunulmaktadır. Ancak bu mekânsal veriler, atmosferin üst katmanlarında faaliyet gösteren uzaktan algılama araçlarıyla elde edildiğinden, atmosfer kolonunda farklı yükseklik ve türlerde bulunan bulutların etkisine sıklıkla maruz kalmaktadır. Bu nedenle, tüm bölgeler için yüksek doğrulukta YYS değerleri üretmek çoğu zaman mümkün olmamaktadır. Bu sorunun çözümü için çeşitli bulut maskeleme teknikleri geliştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında, bulut örtüsünün YYS hesaplanması üzerindeki etkisi Landsat 8 Seviye 1 verilerinden faydalanılarak incelenmiştir. Coğrafi Bilgi Sistemleri araçları yardımıyla kolaylıkla uygulanabilen pratik bir bulut maskeleme yöntemi, yaz mevsimine ait üç farklı Landsat 8 Seviye 1 görüntüsüne uygulanmıştır. Haziran, Temmuz ve Ağustos aylarına ait, farklı yıllardan temin edilen Landsat 8 Seviye 1 uydu ürünleri, Ankara ilinin dokuz merkez ilçesi için kullanılmıştır. Çalışma sonuçları, bulut maskelemesi uygulanmadan kullanılan YYS katmanlarının, gerçek yüzey koşullarıyla uyumlayan, gerçek dışı derecede düşük minimum sıcaklık değerleri ürettiğini göstermektedir. Bu durum, tüm mekânsal veri kümesinde ortalama yüzey sıcaklıklarının hesaplanmasında önemli hatalara yol açmaktadır. Çalışmada, maskeleme yapılmış ve yapılmamış katmanlar arasındaki ortalama YYS farkı %3,63 olarak hesaplanmıştır. Ancak daha çarpıcı olan bulgu, minimum sıcaklıklar arasındaki farkın 24 °C'ye kadar ulaşmasıdır. Son yıllarda araştırmacılar bulut filtreleme algoritmaları ve maskeleme yöntemlerini giderek daha fazla kullanmaya başlasa da aylık, yıllık veya başka dönemsel olarak üretilen mekânsal veri setlerinde bu işlemler çoğu zaman göz ardı edilmektedir. Bunun bir sonucu olarak, üretilen YYS haritaları gerçek yüzey koşullarını tam olarak yansıtmayabilir. Bu nedenle, sıklıkla referans alınan ve YYS verilerinden türetilen Kentsel Isı Adası (Urban Heat Island - UHI) haritalarında da yanlış temsil durumu ortaya çıkabilmektedir. Bunun önüne geçmek için indirilen tüm görüntülere mutlaka bulut maskeleme işlemi yapılmalıdır.

Anahtar Kelimeler: Yer Yüzey Sıcaklığı, Landsat 8, Bulut Maskeleme.

THE IMPACT OF CLOUD MASKING ON THE RELIABILITY OF LAND SURFACE TEMPERATURE ESTIMATES

Abstract

Land Surface Temperature (LST) data are widely utilized in many research fields, particularly in studies related to climate change. These datasets are often made available to users through various online platforms, calculated using different formulations and methods. However, since such spatial data are derived from remote sensing instruments operating from the upper layers of the atmosphere, they are frequently influenced by the presence of clouds of varying altitudes and types along the atmospheric column. As a result, it is often not possible to generate highly accurate LST values across all regions. To address this issue, numerous cloud masking techniques have been developed. The impact of cloud cover on LST calculation is investigated using Landsat 8 Level-1 data within the scope of this study. A practical cloud masking method, which can be easily implemented with the help of Geographic Information System tools, is applied to three different Landsat 8 Level-1 images from the summer season. Landsat 8 images from different years for the months of June, July, and August were utilized for the nine central districts of Ankara Province. The results show that when LST layers are used without any cloud masking, they often produce unrealistically low minimum temperature values that are inconsistent with actual surface conditions. Consequently, this leads to significant errors in the calculation of average surface temperatures across the entire spatial dataset. At the end of the study, the difference in average LST values between masked and unmasked layers is calculated as 3.63%. More striking, however, is the observed difference in minimum temperatures between masked and unmasked data, which reached up to 24 °C. Although researchers have increasingly adopted cloud filtering algorithms and masking techniques in recent years, these processes are often overlooked in spatial datasets produced on a monthly, yearly, or other periodic basis. As a result, the generated LST maps may not accurately reflect actual surface conditions. Therefore, misrepresentation may also occur in Urban Heat Island (UHI) maps, which are frequently referenced and derived from LST data. To prevent this, all provided satellite images must be subjected to cloud masking prior to analysis.

Keywords: Land Surface Temperature, Landsat 8, Cloud Masking.

Sorumlu Yazar: Mehmet Seren Korkmaz

Geliş Tarihi: 9 Mayıs 2025

Kabul Tarihi: 24 Haziran 2025

Yayın Tarihi: 30 Haziran 2025

Atıf Şekli: Korkmaz, M.S., Çalışkan, A., Aksoy, A. (2025). Bulut Maskeleme Uygulamasının Yer Yüzey Sıcaklığı Tahminlerinin Güvenilirliğine Etkisi, *Atmosfer ve İklim Dergisi*, 1(2), 37-47.

Makale Tipi: Araştırma Makalesi

e-ISSN: 3023-8560

GİRİŞ

Uzaktan algılama teknolojisi, farklı platformlar ve sensörler aracılığıyla Dünya gözlemleri için önemli bir kaynaktır. Geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında, daha ucuz, araştırma tasarımıyla bağlı olarak daha doğru ve daha hızlı sonuçlarla geniş ölçekte çalışma imkânı sunar (Sekertekin ve Bonafoni, 2020). Kentsel alanların iklim dinamikleri; hızlı kentleşme, nüfus artışı ve küresel sıcaklık artışı gibi etkenlerle yeniden şekillenmektedir. Bu dönüşümleri izlemek ve anlamak için kullanılan araçlar arasında Yer Yüzey Sıcaklığı (YYs - İngilizce: Land Surface Temperature - LST), önemli bir gösterge olarak kabul edilmektedir. YYS, Dünya yüzeyiyle atmosfer arasındaki enerji ve su değişiminde temel bir rol oynar; bu yönüyle hem meteoroloji hem de iklim çalışmalarında önemlidir (Yu vd., 2014). Doğru analiz edildiğinde, YYS yeryüzü-atmosfer etkileşimlerinin hem küresel hem de bölgesel ölçekte daha etkin bir şekilde modellenmesine olanak tanır. Ayrıca, bitki örtüsü ve toprak nemi gibi diğer değişkenlerle birlikte değerlendirildiğinde, yüzey koşullarına dair daha kapsamlı ve zengin bir bakış açısı sunar (Dervişoğlu, 2023). YYS, yeryüzünden yayımlanan radyasyonun ölçülmesi yoluyla hesaplanır ve şehirlerin mikroklimatolojisinin anlaşılmasında büyük önem taşır. Bu veri, iklim değişikliğine uyum stratejilerinin geliştirilmesinde ve sürdürülebilir kentsel planlamanın yönlendirilmesinde kritik bir rol oynar (Roy vd., 2014; Crawford vd., 2023). Ancak YYS'nin önemi sadece kentsel alanlarla sınırlı değildir; tarımsal alanlarda sulama yönetiminden orman yangınlarının izlenmesine, kuraklık analizlerinden arazi örtüsü değişimlerinin takibine kadar çok çeşitli çevresel uygulamalarda da temel bir parametre olarak kullanılmaktadır (Wan vd., 2010).

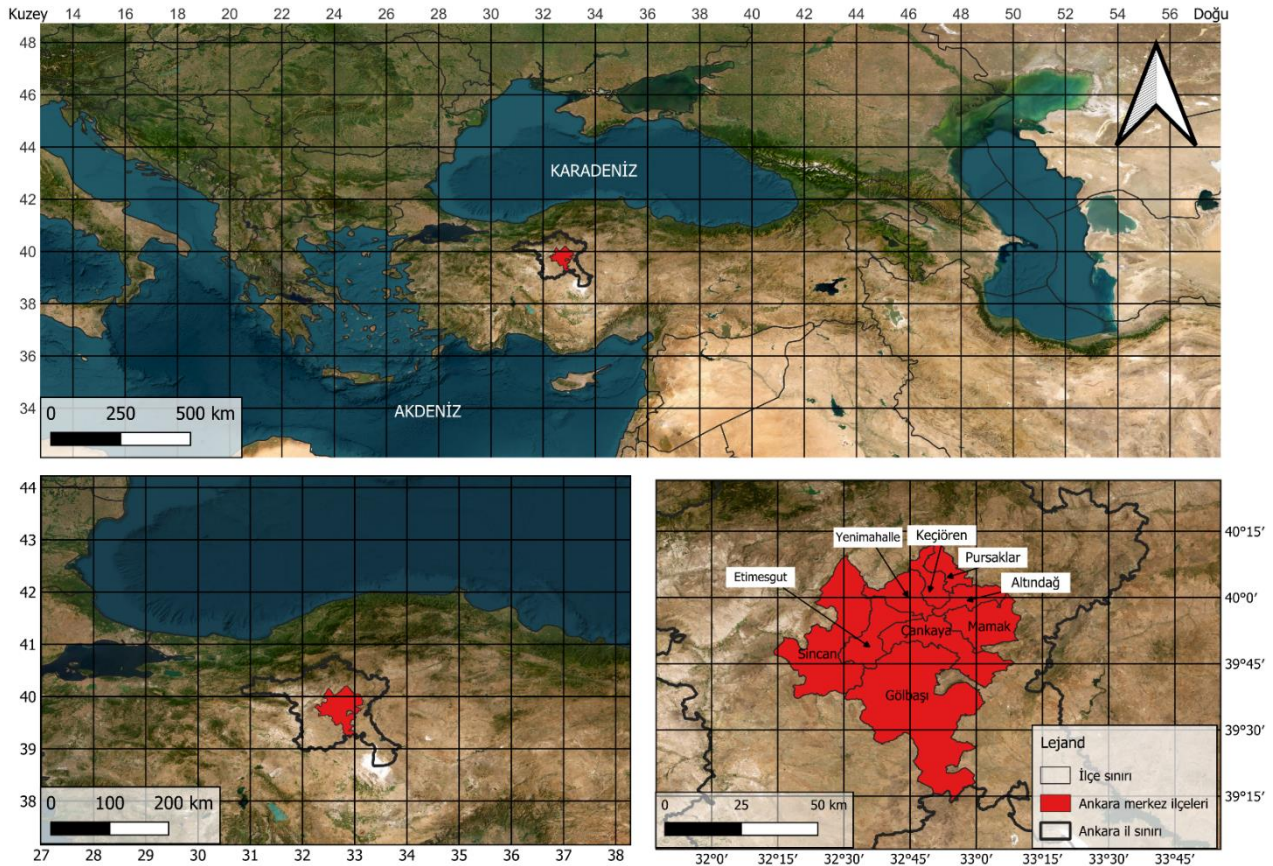
Son yıllarda uzaktan algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS), çevresel değişimlerin izlenmesinde vazgeçilmez araçlar haline gelmiştir. Özellikle Landsat 8 gibi orta çözünürlüklü uydu sistemleri, termal bantları sayesinde yüzey sıcaklıklarını haritalamak ve zamansal değişimlerini hassas biçimde takip etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır (Weng vd., 2004; Roy vd., 2014). Google Earth Engine (GEE) gibi platformlar ise büyük uydu veri arşivlerine hızlı ve bulut tabanlı erişim sağlayarak çevresel araştırmaları yaygınlaştırmıştır. Bu sayede, özellikle YYS gibi hesaplama açısından yoğun veri ürünleri çok daha pratik işlenebilir hale gelmiştir (Gorelick vd., 2017). Bununla birlikte, atmosfer koşulları (özellikle bulut örtüsü), YYS ölçümlerinin doğruluğunu önemli ölçüde etkilemektedir. Bulutlar, yeryüzünden yayımlanan uzun dalga boylu karasal (İng. extraterrestrial) termal radyasyonu absorblamakta, bu nedenle uydu sensörlerine ulaşan enerji miktarını azaltmaktadır. Bu da YYS değerlerinin olduğundan düşük ölçülmesine neden olmaktadır (Yu vd. 2014). Bu etkinin göz ardı edilmesi, mekansal sonuçların güvenilirliğini zayıflatılabilmekte ve yanlış yorumlara yol açabilmektedir (Li vd., 2013; Jia vd., 2021). Bu durum özellikle yaz aylarında daha da problemli hale gelir; çünkü çok az miktarda bulut örtüsü bile ortalama sıcaklık değerlerini bozabilir. Örneğin Barsi vd. (2014), Landsat kaynaklı YYS verilerinde bulut maskesi uygulanmamasının ciddi hatalara neden olabileceğini göstermiştir. Skakun vd. (2021) ise GEE platformunda kullanılan otomatik bulut maskeleyme algoritmalarının iyileştirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Literatürde birçok çalışma, doğru sonuçlara ulaşmak için buluttan etkilenmiş piksellerin gelişmiş bulut giderme teknikleriyle uygun şekilde filtrelenmesi gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır (Zhu ve Woodcock, 2012).

Su yüzeyleri de YYS analizlerinde benzersiz bir zorluk oluşturmaktadır. Yansıtma ve ısı emme özellikleri karasal yüzeylerden farklı olduğu için, bu alanlar genellikle çevresindeki kara alanlarına kıyasla daha düşük sıcaklıklar göstermekte ve bu da mekansal ortalamaları etkilemektedir. Bu soğutucu etki, özellikle yaz aylarında belirgin hale gelir ve su kütleleri doğal birer ısı tamponu işlevi görür (Wang vd., 2016).

Bu çalışmada, ABD Jeolojik Araştırmalar Kurumu (USGS) tarafından sağlanan Landsat 8 Seviye 1 uydu görüntüleri, GEE platformu kullanılarak indirilmiş ve CBS platformlarında işlenmiştir. Haziran, Temmuz ve Ağustos aylarına ait seçilen günlerdeki görüntülerde bulut maskeleymesi yapılmış ve yapılmamış durumlar karşılaştırılarak, bulut örtüsünün kara yüzey sıcaklığı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Atmosfer ve bulut etkilerinden arındırılan veriler daha sonra QGIS ve ArcGIS Pro CBS platformlarında mekansal olarak çözümlenmiştir. Son olarak da işlenen Landsat 8 Seviye 1 verilerinin doğrulama işlemi, Modis Seviye 3 verileri kullanılarak yapılmıştır.

ÇALIŞMA SAHASI VE VERİLER

Türkiye'nin başkenti ve aynı zamanda nüfus bakımından ikinci en kalabalık kenti olan Ankara, bu çalışmada çalışma sahası olarak seçilmiştir. İç Anadolu Bölgesi'nde yer alan Ankara'nın toplam yüzölçümü 25632 km²'dir. Ancak bu çalışmada, kentsel ve demografik yoğunluğun yüksek olduğu merkez ilçelere odaklanılmıştır. Bu ilçeler; Altındağ, Çankaya, Etimesgut, Gölbaşı, Keçiören, Mamak, Pursaklar, Sincan ve Yenimahalle'dir (Web 1). Belirtilen dokuz merkez ilçe toplamda 3991 km² alan kapsamaktadır (Şekil 1) (Web 2).



Şekil 1. Çalışma Sahasına ait Lokasyon Haritası

Çalışma verileri olarak, USGS tarafından sağlanan ve GEE üzerinden erişilen Landsat 8 Collection 2 Tier 1 uydü görüntüleri kullanılmıştır (Web 3). Bu veri seti, 30 metre mekânsal çözünürlüğe ve aynı nokta için 16 günlük tekrar ziyaret süresine sahip multispektral ve termal bantları içermektedir. OLI (Operational Land Imager) sensörüne ait Band 4 (kırmızı) ve Band 5 (yakın kızılötesi) bantları, Normalize Edilmiş Bitki Örtüsü İndeksi (NDVI) ve yüzey emisyon değerlerinin hesaplanmasında; TIRS (Thermal Infrared Sensor) sensörüne ait Band 10 verileri ise Yer Yüzey Sıcaklığı (YYS) hesaplamasında kullanılmaktadır (Crawford vd., 2023). B10 bant eksikliği sebebiyle, Landsat 8 Collection 2 Tier 2 verileri, bu çalışmada tercih edilmemiştir (Crawford vd., 2023). En yüksek veri kalitesine sahip Landsat 8 görüntülerinin 1. Katmana (Seviye 1) yerleştirildiği ifade edilmiştir. Seviye 1'de yer alan iyi karakterize edilmiş bu veriler, GEE platformu üzerinden YYS hesaplanmasında kullanılmıştır (Crawford vd., 2023). YYS hesaplamasında kullanılan spektral bantların teknik özellikleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Landsat 8 Spektral Bant Özellikleri

Spektral Bant Numarası	Spektral Bant Adı	Dalgaboyu Aralığı (μm)	Mekansal Çözünürlük (m)
4	Kırmızı (Red)	0.64 - 0.67	30
5	Yakın Kızılötesi (NIR)	0.85 - 0.88	30
10	Termal Kızılötesi 1 (TIRS)	10.60 - 11.19	100 (yeniden örneklenmiş: 30)

Çalışmada kullanılan Landsat 8 uydu görüntülerine ait teknik özellikler Tablo 2’de sunulmuştur. Yaz mevsimindeki her bir ay için temsil niteliğinde bir gün seçilmiştir. Tüm görüntülere %10 bulut örtüsü filtresi uygulandıktan sonra, bulut etkisini araştırmak amacıyla bulut oranı yüksek olan günlerden belirlenmiştir.

Tablo 2. Landsat 8 Uydu Görüntülerinin Teknik Bilgileri

Görüntü Tarihi	Zaman (UTC+3)	Sensör	Yol/Satır	Bulut Örtüsü(%)
29 Haziran 2021	11:27	OLI/TIRS	177/32	6.19
23 Temmuz 2018	11:26	OLI/TIRS	177/32	5.93
13 Ağustos 2020	11:27	OLI/TIRS	177/32	4.99

Landsat 8 Seviye 1 verilerinin doğrulamasını yapmak amacıyla Modis Seviye 3 katmanında yer alan, ön işlemden geçmiş veri seti kullanılmıştır. Yapılan ön işlemlerde, atmosferik ve geometrik düzeltmelerle bulut filtreleme işlemi uygulanarak kullanıma hazır şekilde sunulmuştur. Modis Seviye 3 veri seti, Seviye 2 veri setinin açık-gökyüzü (clear-sky) koşullarını sağlamasıyla oluşturulmuştur. Bu koşula uyan YYS değerleri sinüzoidal projeksiyondaki gridlere yerleştirilmiştir. Aynı grid içine düşen birden fazla YYS değeri varsa ağırlıklı ortalaması alınmıştır (Wan, 2013). Çalışma alanı içerisinde seçilen günlere ait yüksek kaliteli piksel oranının %40-54 aralığında olduğu görülmektedir. Modis verilerinde yol/satır bilgisi yerine küresel grid yapısı kullanılmaktadır (Wan, 2013). Modis seviye 3 uydu verilerine ait teknik bilgilere Tablo 3’te yer verilmiştir.

Tablo 3. Modis Seviye 3 Uydu Görüntülerinin Teknik Özellikleri

Görüntü Tarihi	Sensör	Toplam Piksel Sayısı	Yüksek Kaliteli Piksel Sayısı	Yüksek Kaliteli Piksel Oranı (%)
29 Haziran 2021	MODIS	4132	2209	53.5
23 Temmuz 2018	MODIS	4132	1688	40.9
13 Ağustos 2020	MODIS	4132	1739	42.1

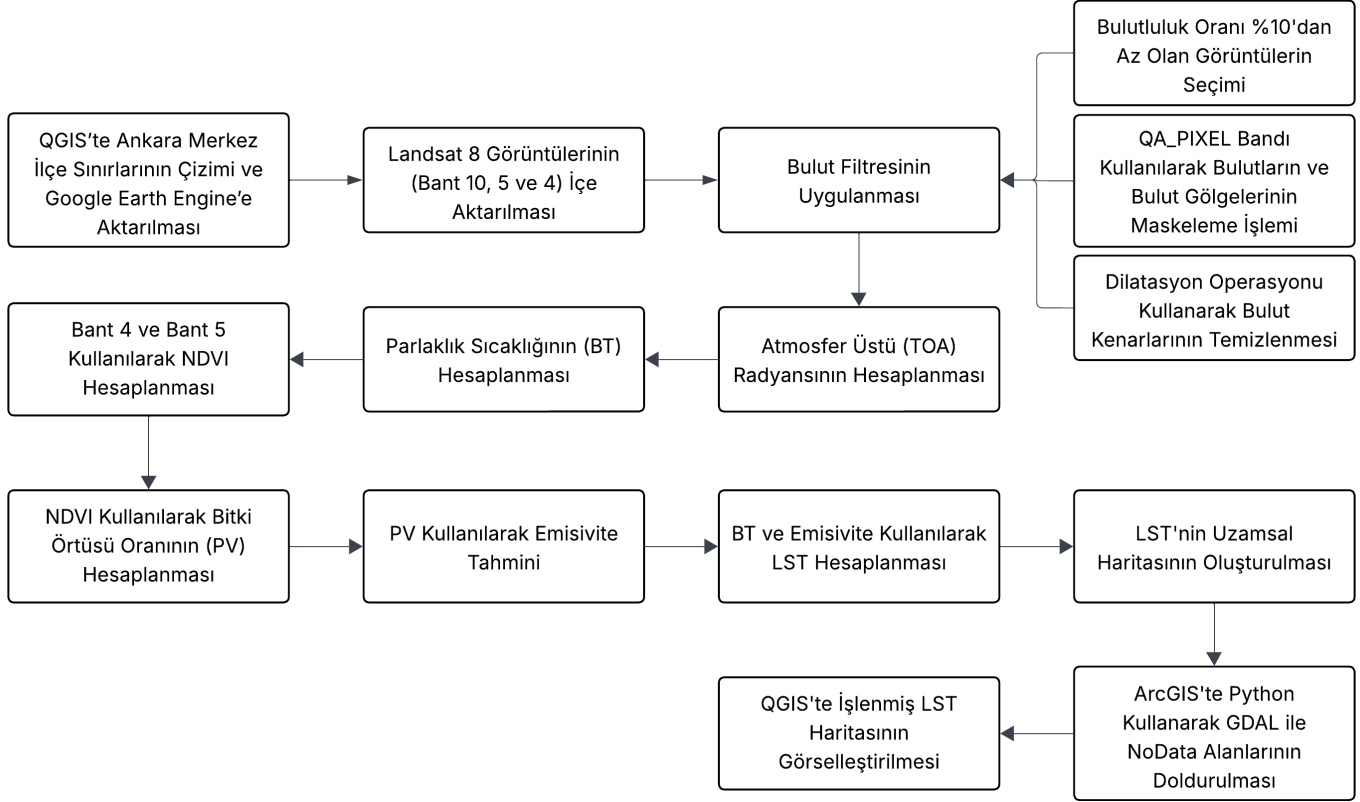
YÖNTEM

GEE platformu üzerinden erişilen Landsat 8 verilerinin işlenmesi ve analizinde JavaScript programlama dili kullanılmıştır. Bu platform, geniş ölçekli coğrafi verilerin işlenmesinde güçlü bir araç olarak; Landsat 8 Seviye 1 verilerinin filtrelenmesi ve ortam parametrelerinin hesaplanmasında da kullanılmıştır. Bu çalışmada, Landsat 8 verilerinin mekânsal analizi için ArcGIS Pro Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) platformu kullanılmıştır. ArcGIS, mekânsal hesaplamalar için güçlü araçlar sağlamaktadır. Görselleştirme ve haritalama işlemleri için açık kaynaklı QGIS 3.4 platformu tercih edilmiştir. QGIS de ArcGIS gibi güçlü araçlara sahip olmakla birlikte temel bazı mekânsal analiz ve araçlar konusunda farklı eklentileri kullanabilme imkanları sunabilmektedir.

Ankara’nın merkez ilçelerine ait sınırlar, OpenStreetMap veritabanı kullanılarak (overpass-turbo çevrimiçi portalı üzerinden-Web 4) çizilmiş ve çalışma sahası olarak tanımlanmıştır. Bu alan, daha sonra bir ‘asset’ olarak Google Earth Engine (GEE) platformuna yüklenmiş ve belirlenen günlere karşılık gelen YYS verileri bu sınırlara göre kırılmıştır.

YYS verileri bulut maskeleymesi uygulanmış ve uygulanmamış olarak iki farklı şekilde işlenmiştir. Tüm analizlerde tutarlılığı sağlamak amacıyla, veri seçimi aşamasında yalnızca %10’un altında bulut örtüsüne sahip Landsat 8 görüntüleri dikkate alınmıştır. Bu ön filtreleme adımı, veri kümesine bulut maskeleymesi uygulanıp uygulanmadığına bakılmaksızın tüm görüntülere eşit şekilde uygulanmıştır. Bulut maskeleymesi uygulanmayan veri setleri doğrudan analizde kullanılmıştır. Bulut maskeleymesi uygulanan veri setlerindeyse, öncelikle ‘QA_Pixel’ bandı kullanılarak bulutlu alanlar ve bulut gölgeleri tanımlanmıştır. Daha sonra her bir bulut pikselinin çevresinde 10 piksellik bir tampon alan oluşturularak dilatasyon işlemi uygulanmış ve bu bölgeler maskeleyme yoluyla veri setinden çıkarılmıştır. Sonuç olarak, bulut örtüsünden arındırılmış bölgeler dışındaki alanlar ‘nodata’ olarak tanımlanmıştır.

Elde edilen YYS veri setlerindeki 'nodata' pikselleri, ArcGIS ortamında entegre edilmiş bir Python betiği aracılığıyla, GDAL kütüphanesi kullanılarak Ters Mesafe Ağırlıklı Enterpolasyon (Inverse Distance Weighting - IDW) yöntemiyle doldurulmuştur. Son olarak, işlenmiş veri seti QGIS'de görselleştirilmiş ve geoistatistiksel analiz yapılmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. Çalışmanın akış şeması

Landsat 8 Seviye 1 verilerinin doğrulanması amacıyla GEE platformundan elde edilen Modis Seviye 3 verileri doğrudan kullanılmıştır. Bu veriler elde edilirken, veri iyileştirmede bulut filtreleme ve interpolasyon işlemleri uygulanmamıştır. Modis Seviye 3 YYS verilerinin kalite değerlendirmesi QC_day bandı kullanılarak yapılmıştır. QC_day değeri 0 olan pikseller yüksek kaliteli piksel olarak işaretlenmiştir.

YYS Hesaplanması

Bu çalışmada, Landsat 8 uydu görüntülerinden YYS hesaplanması amacıyla bir dizi işlem adımı uygulanmıştır. İlk olarak, Landsat 8'in TIRS (Termal Kızılötesi Sensör) sensöründen elde edilen Band 10 verileri, Atmosfer Üstü Radyans (Top of Atmosphere - TOA) değerlerine dönüştürülmüştür. Bu dönüşüm, dijital sayı (Digital Number - DN) değerleriyle birlikte belirli bir radyans çarpanı (0.0003342) ve bir radyans sabiti (0.1) kullanılarak, (1)'de verilen formüle göre gerçekleştirilmiştir (Artis ve Carnahan, 1982).

$$TOA = 0.0003342 \times B_{10} + 0.1 \quad (1)$$

Burada B10, Landsat 8 uydusunun Band 10 verisini temsil etmektedir. Elde edilen TOA radyans değerleri kullanılarak, termal bant üzerinden Parlaklık Sıcaklığı (Brightness Temperature - BT) hesaplanmaktadır (2) (Gutman vd., 2013).

$$BT = \left(\frac{1321.0789}{\ln\left(\frac{774.8853}{TOA} + 1\right)} \right) - 273.15 \quad (2)$$

(2)'de, paydaki '1321.0789' değeri Planck sabitini, '774.8853' değeriye kalibrasyon sabitini temsil etmektedir. BT değerleri, sıcaklık ölçümlerini Kelvin cinsinden sağlamaktadır ve bu değerler daha sonra Santigrat dereceye dönüştürülmektedir. BT hesaplamalarının ardından, çalışma sahası için NDVI değeri hesaplanmaktadır. NDVI, Landsat 8 uydusuna ait Band 5 (yakın kızılötesi) ve Band 4 (kırmızı) kullanılarak (3)'teki şekilde hesaplanmaktadır (Roy vd., 2014; Weng, Lu ve Schubring, 2004).

$$NDVI = \frac{B5 - B4}{B5 + B4} \quad (3)$$

Çalışma sahasına ait minimum ve maksimum NDVI değerleri, hesaplanan NDVI verilerinden belirlenmiş ve bu değerler, Bitki Örtüsü Oranı (Proportion of Vegetation - PV)'nın hesaplanmasında kullanılmıştır (4) (Roy vd., 2014; Yu, Guo ve Wu, 2014).

$$PV = \left(\frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \right)^2 \quad (4)$$

$NDVI_{\min}$ ve $NDVI_{\max}$ ifadeleri, çalışma alanı içerisindeki minimum ve maksimum NDVI değerlerini temsil etmektedir(4). PV değerleri kullanılarak, yüzey emisivitesi (Surface Emissivity - EMM yardımıyla hesaplanmaktadır (5) (Avdan ve Jovanovska, 2016; Roy vd., 2014).

$$EMM = 0.004 \times PV + 0.986 \quad (5)$$

Elde edilen emisivite değerleri ve BT verileri kullanılarak YYS hesaplanmaktadır. YYS hesaplamasında kullanılan formül (6)'da verilmiştir (Avdan ve Jovanovska, 2016; Roy vd., 2014; Yu vd., 2014).

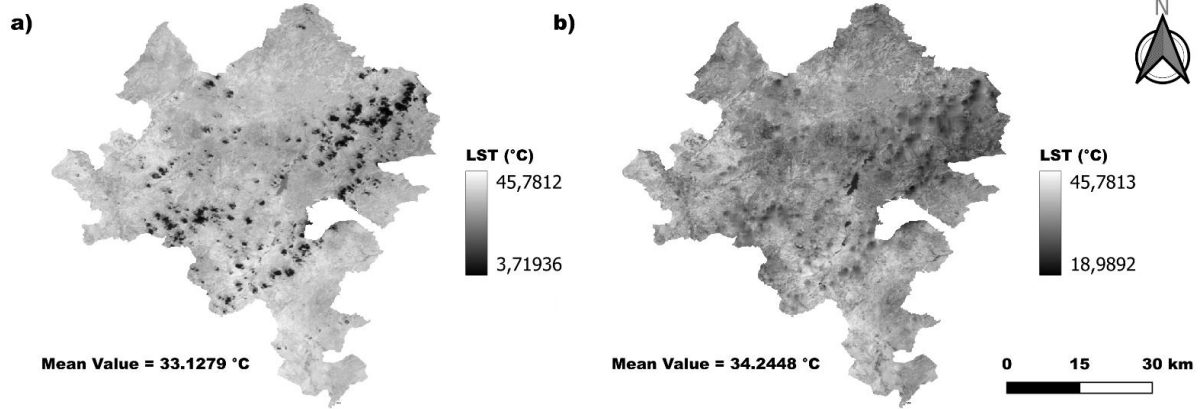
$$YYS = \frac{BT}{1 + \left(\frac{0.00115 \times BT}{1.4388} \right) \times \ln(EMM)} \quad (6)$$

Bu hesaplama, atmosferik etkilerden düzeltilmiş YYS verilerinin elde edilmesini sağlamak ve yüzeyin gerçek sıcaklık değerlerini temsil etmektedir.

BULGULAR

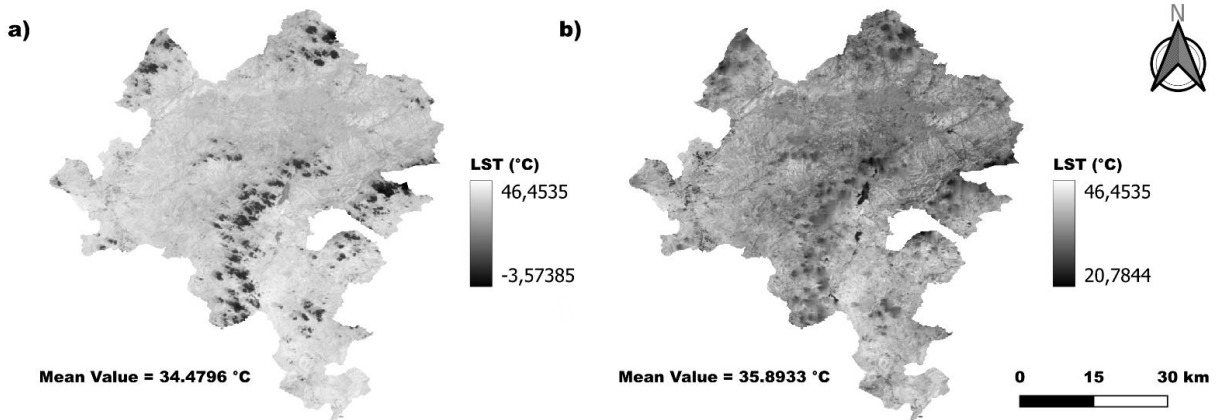
Bulutların YYS verileri üzerindeki etkisini analiz etmek amacıyla yaz mevsimine ait Haziran, Temmuz ve Ağustos aylarından birer gün seçilmiştir.

İlk analiz, 29 Haziran 2021 tarihli görüntü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, çalışma alanının %6,19'unun bulutlarla kaplı olduğu belirlenmiştir. Bulutların varlığı, YYS değerlerinde belirgin düşüşlere neden olmuştur. Bulut maskeleyesi uygulanmamış YYS veri setinde en düşük sıcaklık 3,72 °C olarak kaydedilmiştir (Şekil 3a). Ancak bulut maskesi uygulandıktan sonra minimum sıcaklık 18,99 °C'ye yükselmiştir (Şekil 3b). Ortalama sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması, iki durum arasında 1,12 °C fark olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bulgular, bulut örtüsünün YYS katmanları üzerindeki etkisini açık bir şekilde göstermektedir.



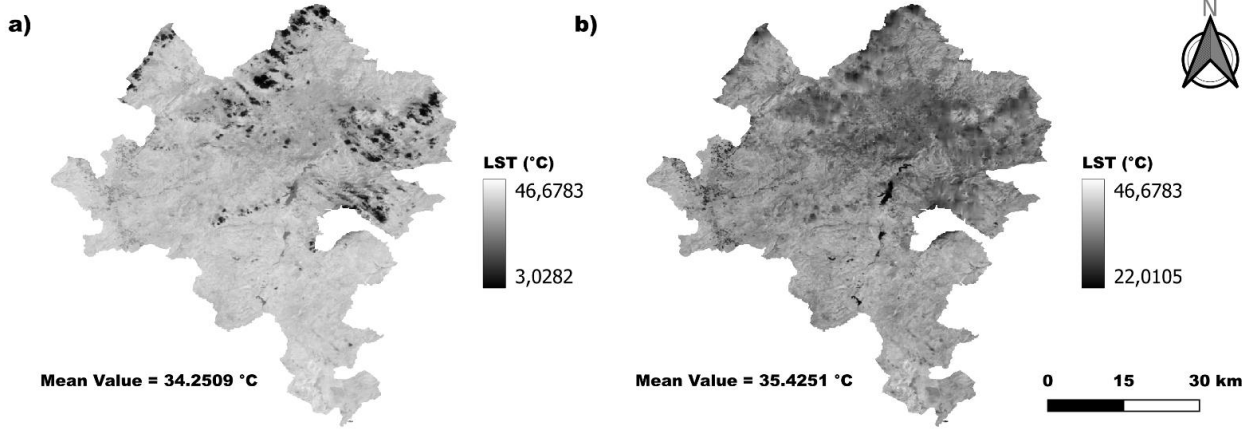
Şekil 3. 29 Haziran 2021 tarihli YYS uydu görüntüleri: a) bulut maskesi uygulanmamış, b) bulut maskesi uygulanmış

23 Temmuz 2018 tarihli YYS verilerinin analizi (Şekil 4), çalışma alanının %5,93'ünün bulutlarla kaplı olduğunu ortaya koymaktadır. Bulut maskelemesi uygulanmamış veri setinde en düşük YYS değeri $-3,57^{\circ}\text{C}$ olarak kaydedilmiştir (Şekil 4a). Bulut tepe sıcaklığı; bulut cinsine, yüksekliğine ve mevsimine bağlı olarak değişmektedir. Bu durum, 29 Haziran 2021 tarihinde en düşük sıcaklığın 0°C 'nin altında kaydedilmesini açıklamaktadır. Bulut maskesi uygulandıktan sonra minimum sıcaklık $20,78^{\circ}\text{C}$ 'ye yükselmiştir (Şekil 4b). Mekânsal ortalama YYS değerleri karşılaştırıldığında iki durum arasında $1,41^{\circ}\text{C}$ 'lik fark olduğu görülmektedir.



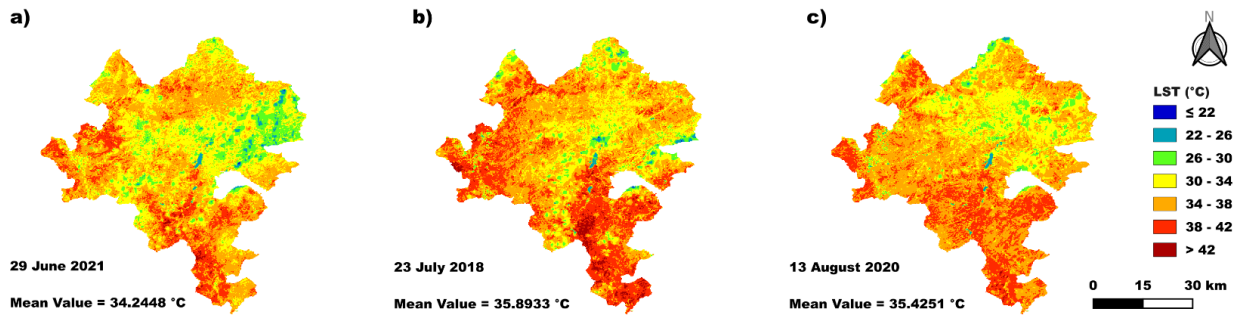
Şekil 4. 23 Temmuz 2018 tarihli YYS uydu görüntüleri: a) bulut maskesi uygulanmamış, b) bulut maskesi uygulanmış

13 Ağustos 2020 tarihli YYS verilerinin analizi (Şekil 5), çalışma alanının %4,99'unun bulutlarla kaplı olduğunu göstermektedir. Bulut maskelemesi uygulanmamış veri setinde en düşük yüzey sıcaklığı $3,03^{\circ}\text{C}$ olarak gözlemlenmiştir (Şekil 5a). Buna karşılık, bulut maskesi uygulandıktan sonra minimum sıcaklık $22,01^{\circ}\text{C}$ 'ye yükselmiştir (Şekil 5b). Mekânsal ortalama YYS değerlerinin karşılaştırılması, iki durum arasında $1,17^{\circ}\text{C}$ 'lik bir sıcaklık farkı olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 5. 13 Ağustos 2020 tarihli YYS uydu görüntüleri: a) bulut maskesi uygulanmamış, b) bulut maskesi uygulanmış

Bulut maskesi uygulanarak ve eksik değerler interpolasyon yöntemiyle doldurularak elde edilen YYS verileri, belirli bir renk skalası kullanılarak görselleştirilmiştir. Her ay için seçilen görüntülerde, su kütleleri ortalama yüzey sıcaklıklarının görece daha düşük olması sayesinde açık şekilde ayırt edilebilmektedir. Ankara'nın merkez ilçeleri içerisinde, özellikle çalışma alanının güney kesimlerinde daha yüksek YYS değerleri gözlemlenmiştir. Buna karşılık, şehir merkezine karşılık gelen bölgelerde çevresine kıyasla belirgin şekilde daha düşük yüzey sıcaklıkları tespit edilmiştir (Şekil 6).



Şekil 6. Renklendirilmiş YYS görüntüleri: a) 29 Haziran 2021, b) 23 Temmuz 2018, c) 13 Ağustos 2020

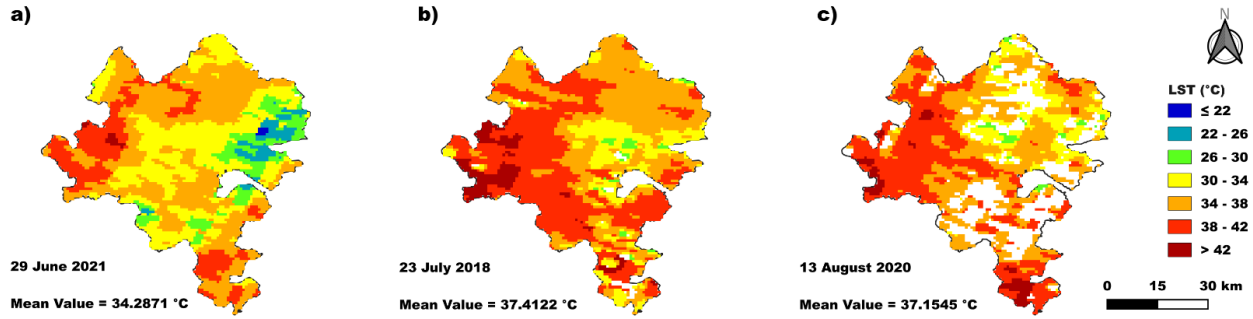
Tablo 2, seçilen tarihlere ait bulut maskesi uygulanmış ve uygulanmamış YYS verileri arasındaki ortalama ve minimum sıcaklık değerlerindeki farkları göstermektedir. Bulut maskeleymesi uygulanarak elde edilen sonuçlar, özellikle minimum sıcaklık değerlerinde belirgin farklar ortaya koymaktadır. Bulut filtreleme süreci, YYS ölçümleri üzerinde gözle görülür bir etki yaratmakta ve maskeleyme yapılmamış verilere kıyasla daha tutarlı yüzey sıcaklığı tahminleri sağlamaktadır. Bu fark, uzaktan algılama ile elde edilen sıcaklık verilerinin analizinde bulut maskeleymenin önemini açıkça ortaya koymaktadır.

Tablo 2. Seçilen Tarihler için Bulut Maskesi Uygulanmış ve Uygulanmamış Veriler arasındaki Ortalama ve Minimum YYS Değerlerindeki Farklar

Tarih	Ortalama Sıcaklık (°C)			Minimum Sıcaklık (°C)		
	Bulut maskesiz	Bulut maskeli	Fark	Bulut maskesiz	Bulut maskeli	Fark
29 Haziran 2021	33.13	34.24	1.12	3.72	18.99	15.27
23 Temmuz 2018	34.48	35.89	1.41	-3.57	20.78	24.36
13 Ağustos 2020	34.25	35.43	1.17	3.03	22.01	18.98

Seçilen tarihlere ait Modis Seviye 3 uydu verisinden elde edilen YYS haritaları, Şekil 7'de verilmiştir. Modis Seviye 3 veri seti, çeşitli ön işleme adımlarından geçirilerek sunulduğu için, çalışma alanı içerisindeki bazı bölgelerde veri boşlukları tespit edilmiştir (Hubanks vd., 2019).

Veri olmayan bu boşluklar, yüksek kaliteli olmayan pikseller kısmında yer almaktadır. Modis Seviye 3 uydusuna ait YYS haritaları incelendiğinde; Mekansal çözünürlüğün düşük olması dikkat çekmektedir. Modis Seviye 3 görüntülerinin 1x1 km olması, kara, su ve yeşil alanların ayırımını zorlaştırmaktadır. Ancak, 30x30 m mekansal çözünürlüğe sahip Landsat 8 Seviye 1 görüntülerinin daha yüksek detay gücüne sahip olması, topografik özelliklerin ayırımında daha başarılı olduğunu göstermektedir.



Şekil 7. Modis Seviye 3 verilerine ait renklendirilmiş YYS görüntüleri: a) 29 Haziran 2021, b) 23 Temmuz 2018, c) 13 Ağustos 2020

Seçilen tarihlere ait Landsat 8 Seviye 1 ve Modis Seviye 3 uydu verilerinden hesaplanan YYS verileri karşılaştırıldığında; 29 Haziran 2021 tarihinde mekansal ortalama YYS değerlerinin çok yakın olduğu görülmektedir. Ancak, 23 Temmuz 2018 ve 13 Ağustos 2020 tarihlerine ait mekansal ortalama YYS farkı 1.5-1.7 °C olarak bulunmuştur. Böyle bir farkın ortaya çıkması, Modis verisetlerinde yüksek çözünürlüklü piksel oranının düşük olması ve bazı bölgelerdeki bazı piksellerin çıkarılmış olmasıyla (Şekil7.c) ilişkilendirilmiştir. Uydu verilerine ait YYS ortalama sıcaklık farkları Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Landsat 8 Seviye 1 ve Modis Seviye 3 Uydu verileri arasındaki ortalama YYS farkları

Tarih	Landsat 8 Seviye 1	Modis Seviye 3	Ortalama Sıcaklık Farkı
29 Haziran 2021	34.24	34.28	0.04
23 Temmuz 2018	35.89	37.41	1.52
13 Ağustos 2020	35.43	37.15	1.72

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada Ankara ilinin merkez ilçeleri çalışma sahası olarak seçilmiş ve 3 farklı tarih için bulut maskelemesi uygulanmamış Landsat 8 uydu verileri üzerinden hesaplanan YYS verileri, önerilen yöntem kullanılarak bulut maskelemesi uygulanmış verilerle uydu görüntüleri üzerinden yapılan analizlere dayalı olarak karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgulara göre, bulutlu günlerde YYS değerlerinin belirgin şekilde daha düşük olduğu ortaya konulmuştur. Seçilen tarihler yaz aylarına gelmesine rağmen mekânsal ortalamalar dikkate alındığında, bulutlu ve bulutsuz koşullar arasındaki sıcaklık farkının 1 °C'yi aştığı görülmektedir.

Yaz aylarında bulutluluk oranı görece düşük olsa da bulutların YYS üzerindeki etkisinin hâlâ anlamlı düzeyde yüksek olduğu tespit edilmiştir. Yıllık ortalamalar hesaplandığında, ortaya çıkan ortalama YYS değerlerinin gerçek yüzey koşullarından daha düşük olduğu ve bunun da yanıltıcı yorumlara yol açabileceği anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, YYS verilerinden türetilen Kentsel Isı Adası (UHI) ve Kentsel Termal Alan Değişim İndeksi (UTFVI) gibi indeksler, bulut etkileri doğru şekilde dikkate alınmadığında hatalı biçimde hesaplanma riski taşımaktadır. Bu durum, mekânsal analizlerden elde edilen çıkarımları doğrudan etkileyebilir. Kentsel ısı adasına bağlı kent ikliminin değişikliğin doğrudan bir sonucu olarak görüldüğünden (Masson vd., 2020), kamusal planlama ve sektörel uygulamalarda yapılan hatalı değerlendirmeler ise çeşitli sosyal, ekonomik ve çevresel olumsuzluklara neden olma potansiyeline sahiptir.

Bu nedenle, uydu tabanlı çalışmalarda bulut koşullarının dikkatle değerlendirilmesi, bulutla kaplı alanlar için uygun eşik değerlerin tanımlanması ve güvenilir bulut maskeleyme işlemlerinin uygulanması gereklidir. Mevcut bulut maskeleyme algoritmalarının daha hassas ve kapsayıcı olacak şekilde geliştirilmesi, doğru analiz sonuçları elde edilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın bilimsel gelişimine sağladığı değerli katkılardan ötürü Doç. Dr. Sema Arıman'a teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

- Artis, D. A. & Carnahan, W. H. (1982). Survey of emissivity variability in thermography of urban areas. *Remote Sensing of Environment*, 12(4), 313–329. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(82\)90043-8](https://doi.org/10.1016/0034-4257(82)90043-8)
- Avdan, U. & Jovanovska, G. (2016). Algorithm for automated mapping of land surface temperature using Landsat 8 satellite data. *Journal of Sensors*, 2016, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2016/1480307>
- Barsi, J. A., Schott, J. R., Hook, S. J., Raqueno, N. G., Markham, B. L. & Radocinski, R. G. (2014). Landsat-8 thermal infrared sensor (TIRS) vicarious radiometric calibration. *Remote Sensing*, 11(17), 1973. <https://doi.org/10.3390/rs6111607>
- Crawford, C. J., Roy, D. P., Arab, S., Barnes, C., Vermote, E., Hulley, G., ... Zahn, S. (2023). The 50-year Landsat collection 2 archive. *Science of Remote Sensing*, 8, 100103. <https://doi.org/10.1016/j.srs.2023.100103>
- Dervişoğlu, A. (2023). Investigation of the efficiency of satellite-derived LST data for mapping the meteorological parameters in Istanbul. *Atmosphere*, 14(4), 644. <https://doi.org/10.3390/atmos14040644>
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D. & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Gutman, G., Huang, C., Chander, G., Noojipady, P. & Masek, J. G. (2013). Assessment of the NASA–USGS Global Land Survey (GLS) datasets. *Remote Sensing of Environment*, 134, 249–265. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.02.026>
- Hubanks, P. A., Platnick, S., King, M. D. & Ridgway, B. (2019). MODIS atmosphere L3 gridded product algorithm theoretical basis document (ATBD). *NASA Goddard Space Flight Center*. https://atmosphere-imager.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/ModAtmo/L3_ATBD_C6_2018_04_11.pdf
- Jia, A., Ma, H., Liang, S. & Wang, D. (2021). Cloudy-sky land surface temperature from VIIRS and MODIS satellite data using a surface energy balance-based method. *Remote Sensing of Environment*, 263, 112566. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112566>
- Li, Z., Tang, B., Wu, H., Ren, H., Yan, G., Wan, Z., ... Zhou, C. (2013). Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives. *Remote Sensing of Environment*, 131, 14–37. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.12.008>
- Masson, V., Lemonsu, A., Hidalgo, J. & Voogt, J. (2020). Urban climates and climate change. *Annual Review of Environment and Resources*, 45, 411–444. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012320-083623>
- Roy, D. P., Wulder, M. A., Loveland, T. R., Woodcock, C. E., Allen, R. G., Anderson, M. C., ... Scambos, T. A. (2014). Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment*, 145, 154–172. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.001>
- Sekertekin, A. & Bonafoni, S. (2020). Land surface temperature retrieval from Landsat 5, 7, and 8 over rural areas: Assessment of different retrieval algorithms and emissivity models and toolbox implementation. *Remote Sensing*, 12(2), 294. <https://doi.org/10.3390/rs12020294>
- Skakun, S., Vermote, E. F., Santamaria Artigas, A. E., Rountree, W. H. & Roger, J.-C. (2021). An experimental sky-image-derived cloud validation dataset for Sentinel-2 and Landsat 8 satellites over NASA GSFC. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 95, 102253. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102253>
- Wan, Z., Zhang, Y., Zhang, Q. & Li, Z.-L. (2010). Quality assessment and validation of the MODIS land surface temperature. *Remote Sensing of Environment*, 83(1–2), 163–180. <https://doi.org/10.1080/0143116031000116417>
- Wan, Z. (2013). Collection-6 MODIS land surface temperature products users' guide. *Earth Research Institute, University of California, Santa Barbara*. https://lpdaac.usgs.gov/documents/118/MOD11_User_Guide_V6.pdf
- Wang, C., Myint, S. W., Wang, Z. & Song, J. (2016). Spatio-temporal modeling of the urban heat island in the Phoenix Metropolitan area: Land use change implications. *Remote Sensing*, 8(3), 185. <https://doi.org/10.3390/rs8030185>
- Weng, Q., Lu, D. & Schubring, J. (2004). Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment*, 89(4), 467–483. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.11.005>
- Yu, X., Guo, X. & Wu, Z. (2014). Land surface temperature retrieval from Landsat 8 TIRS—Comparison between radiative transfer equation-based method, split window algorithm and single channel method. *Remote Sensing*, 6(10), 9829–9852. <https://doi.org/10.3390/rs6109829>
- Yu, W., Ma, W. & Wu, Q. (2021). Urban land surface temperature under cloud cover conditions: A temporal and spatial assessment using MODIS data. *Remote Sensing*, 13(11), 2183.
- Zhu, Z. & Woodcock, C. E. (2012). Object-based cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 118, 83–94. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.028>
- Web-1, ATO. (2025, April 10). Rakamlarla Ankara. https://www.atonet.org.tr/Uploads/Birimler/Internet/Flash%20Tan%C4%B1t%C4%B1m%20Alan%C4%B1/2025_04_10_rakamlarla_ankara/2025_04_10_rakamlarla_ankara.pdf (01 Mayıs 2025 tarihinde ulaşıldı).

- Web 2, Harita Genel Müdürlüğü. (n.d.). İl ve ilçe yüzölçümleri. <https://www.harita.gov.tr/il-ve-ilce-yuzolcumleri>, (01 Mayıs 2025 tarihinde ulaşıldı).
- Web 3, Google Earth Engine. (n.d.). LANDSAT/LC08/C02/T1: Landsat 8 collection 2 tier 1. https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/LANDSAT_LC08_C02_T1?hl=tr (01 Mayıs 2025 tarihinde ulaşıldı).
- Web 4, Overpass Turbo. (n.d.). Overpass Turbo: Web-based data filtering interface for OpenStreetMap. <https://overpass-turbo.eu>, (20 Nisan 2025 tarihinde ulaşıldı).