

PAPER DETAILS

TITLE: Eskisehir'de hava kirliligi: PM10, PM2.5 ve SO2 konsantrasyonlarinin mekânsal-zamansal degisimi ve kaynaklarinin degerlendirilmesi

AUTHORS: Ilker Balcilar

PAGES: 1115-1126

ORIGINAL PDF URL: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/3826639>



Eskişehir’de hava kirliliği: PM₁₀, PM_{2.5} ve SO₂ konsantrasyonlarının mekânsal-zamansal değişimi ve kaynaklarının değerlendirilmesi

Air pollution in Eskişehir: Spatio-temporal variation of PM₁₀, PM_{2.5}, and SO₂ concentrations and evaluation of sources

İlker Balcılar^{1,*}

¹ Eskişehir Teknik Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 26555, Eskişehir Türkiye

Öz

Bir bölgedeki hava kalitesine etki eden kaynakların ve katkılarının belirlenmesi etkin kontrol stratejilerinin geliştirilmesi için büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, Eskişehir’deki üç farklı istasyondan elde edilen PM₁₀, PM_{2.5} ve SO₂ verileri 2023 yılı için incelenmiştir. Tüm istasyonlarda, PM₁₀ ve PM_{2.5} konsantrasyonlarının Dünya Sağlık Örgütü tarafından önerilen sınır değerlerin üzerinde olduğu belirlenmiştir. Kirleticilerin zamansal ve mekânsal değişimleri ile iki değişkenli polar grafikleri incelendiğinde, İstasyon 1’de trafik ve evsel ısınmanın tüm kirleticiler üzerinde yüksek katkısı gözlenmiştir. İstasyon 2’de ise trafik ve ısınmanın kirleticiler üzerindeki katkıları farklılık göstermiştir. İstasyon 3’te ise SO₂ ve PM_{2.5} üzerinde antropojenik kaynaklar daha etkili olurken, PM₁₀’da toprak emisyonlarının etkisi de gözlenmiştir. PM₁₀ için konsantrasyon ağırlıklı yörünge modeli, Türkiye’de İç Anadolu ve Ege bölgeleri ile Yunanistan üzerindeki bölgeleri önemli katkı sağlayan bölgeler olarak belirlemiştir.

Anahtar kelimeler: Mevsimsel değişim, İki değişkenli polar grafik, Konsantrasyon ağırlıklı yörünge

1 Giriş

Kentleşme ve hızlı sanayileşme, yaşam standartlarının yükselmesi ve teknolojik kabiliyetlerin artması gibi bir dizi faydayı beraberinde getirmiş olsa da birçok olumsuz sonuca da yol açmıştır. Bu sonuçlardan en önemlilerinden biri de hava kirliliği problemidir. Kentsel hava kirliliği, hem doğal hem de antropojenik kaynaklardan etkilenen çok yönlü bir sorundur [1]. Volkanik patlamalar, orman yangınları ve toz taşınımı gibi doğal kaynaklar kentsel hava kirliliğine katkıda bulunurken, antropojenik faaliyetler bu sorunu önemli ölçüde şiddetlendirmektedir [2]. Ulaşım, fosil yakıtların evsel ısınmada kullanımı, sanayileşme, enerji üretimi, yanma ve tarım gibi antropojenik faktörler kentsel hava kirliliğine başlıca katkıda bulunan unsurlardır [3]. Bu kaynaklardan salınan emisyonlar sonucu dünyanın birçok kentinde hava kirliliği insan sağlığını tehdit eden önemli bir problem haline gelmiştir. Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ), dünya nüfusunun %99’unun DSÖ tarafından önerilen hava kalitesi sınır değerlerinin karşılanmadığı yerlerde yaşadığını belirtmektedir [4]. Dünyanın birçok kentinde olduğu gibi

Abstract

Determining the sources and their contributions to air quality in a region is of great importance for the development of effective control strategies. In this study, PM₁₀, PM_{2.5}, and SO₂ data obtained from three different stations in Eskişehir were analyzed for 2023. At all stations, PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations exceeded the limit values recommended by the World Health Organization. Analysis of temporal and spatial variations in pollutants, along with bivariate polar plots, revealed that traffic and residential heating have high contribution on all pollutants at Station 1. At Station 2, the contributions of traffic and residential heating to pollutants differed. At Station 3, anthropogenic sources were more effective for SO₂ and PM_{2.5}, while contribution of soil emissions was also observed for PM₁₀. For PM₁₀, the concentration weighted trajectory model identified the Central Anatolia and Aegean regions in Türkiye, as well as regions over Greece, as significant source regions.

Keywords: Seasonal variation, Bivariate polar plot, Concentration weighted trajectory

Türkiye’de de hava kirliliği ile ilgili yapılan çalışmalar hava kirliliğinin özellikle kentlerde önemli bir problem olduğunu göstermektedir [5-7].

Hem doğal hem de antropojenik kaynaklardan salınan başlıca emisyonların arasında PM₁₀, PM_{2.5} ve SO₂ de yer almaktadır. Bu kirleticiler, ABD Çevre Koruma Ajansı tarafından insan sağlığı ve ekosistem üzerindeki zararlı etkilerinden dolayı atmosferdeki seviyelerinin kontrol edilmesi gereken 6 öncelikli kirleticiler arasında yer almaktadır [8]. Partikül madde (PM) olarak bilinen havadaki partiküller, boyutlarına göre sınıflandırılır. PM₁₀, çapı 10 mikrometre veya daha küçük olan partikülleri ifade ederken, PM_{2.5}, çapı 2.5 mikrometre veya daha küçük olan partikülleri ifade eder. SO₂, sülfür içeren fosil yakıtların yanmasıyla ortaya çıkan bir gazdır. Bu kirleticilerin endüstriyel faaliyetler, ulaşım ve biyokütle yanması dahil olmak üzere çeşitli kaynakları vardır [9, 10] ve kömür yanması SO₂ emisyonlarına önemli katkıda bulunur [11].

PM₁₀ ve PM_{2.5}, solunum ve kardiyovasküler hastalıklar gibi çeşitli sağlık sorunları ve artan ölüm oranları ile

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ilkerbalcilar@eskisehir.edu.tr (İ. Balcılar)
Geliş / Received: 27.03.2024 Kabul / Accepted: 10.07.2024 Yayınlanma / Published: 15.10.2024
doi: 10.28948/ngumuh.1459990

ilişkilendirilmiştir [12, 13]. SO₂ emisyonları partikül madde oluşumuna katkıda bulunmakta ve solunum ve kardiyovasküler sorunlarla ilişkilidir [14]. Çalışmalar, bu kirleticilere maruz kalmanın halk sağlığı üzerindeki ciddi sonuçlarını ortaya koymuş ve atmosferdeki seviyelerinin izlenmesi ve kontrol edilmesinin önemini vurgulamıştır [15, 16]. Özellikle, COVID-19 ile farklı parametreler arasında korelasyonun olduğuna [17] ve ayrıca NO₂'nin mortaliteye atfedilecek etkisi de dikkat çekilmiştir [18].

Araştırmalar, PM ve SO₂ seviyelerinin meteoroloji, mevsimsellik ve insan faaliyetleri gibi çeşitli faktörlerden etkilendiğini ve mekânsal ve zamansal değişikliklere uğradığını göstermiştir. Özellikle PM_{2.5} konsantrasyonlarının zaman içinde farklılıklar gösterdiği ve SO₂ konsantrasyonları ile pozitif korelasyon gösterdiği tespit edilmiştir [8]. PM_{2.5}'te mevsimsel değişimler gözlemlenmiş ve benzer şekilde günlük değişimler de kaydedilmiştir [19]. Molepo vd. [20] PM₁₀'un günlük değişiminin SO₂ ve NO_x'e benzer olduğu ancak O₃'ten farklı olarak sabahları pik yaptığını belirtmiştir. Barhoumi vd. [21] SO₂ konsantrasyonlarındaki mevsimsel değişimlerin meteorolojik koşullara ve emisyon kaynaklarına bağlı olduğunu; kış ve sonbaharda daha yüksek, ilkbahar ve yaz aylarında ise daha düşük seviyelerde olduğunu belirtmiştir. Ayrıca, Xu vd. [22] PM_{2.5} ve PM₁₀'un değişimlerinde gündüz/gece döngülerini varlığını ve günün farklı saatlerinde farklı konsantrasyonların gözlemlendiğini doğrulamıştır. Xue vd. [23] NO₂ ve SO₂'nin belirli bölgelerdeki mekânsal ve zamansal değişimlerini izleyerek farklı yıllardaki dalgalanmaları göstermiştir. Son olarak, yapılan başka bir çalışmada COVID-19 karantinalarının hava kalitesi üzerindeki etkisi sunulmuş, bununla birlikte yağış gibi meteorolojik faktörlerden etkilenen PM₁₀ ve PM_{2.5} konsantrasyonlarının mevsimsel farklılıklar gösterdiği ortaya konmuştur [24].

Türkiye'nin İç Anadolu Bölgesi'nde yer alan Eskişehir, yoğun nüfusunun yanı sıra Türkiye'nin 10. büyük sanayi bölgesine ev sahipliği yapmaktadır. Ayrıca, lojistik ve yolcu taşımacılığı açısından yoğun bir trafiğe sahip olan Ankara-Bursa D200 karayolu, Eskişehir şehir merkezinden geçmektedir. Eskişehir'de daha önce yapılan çalışmalar, kentleşme, yoğun trafik ve sanayi faaliyetleri nedeniyle kentin yüksek düzeyde hava kirliliği ile karşı karşıya olduğunu göstermiştir [25-27]. Geçmişte yapılan bu çalışmalarda, uçucu organik bileşikler, PAH'lar, PM, SO₂, NO₂ ve O₃ gibi kirleticiler Eskişehir'in hava kirliliğine katkıda bulunan önemli unsurlar olarak tespit edilmiştir. Ancak, Eskişehir'in hava kalitesine ilişkin mevcut çalışmalarda bazı eksiklikler bulunmaktadır. İlk olarak, PM_{2.5}'in zamansal ve mekânsal değişimine ilişkin daha önce bir analiz yapılmamıştır. Diğer bir önemli eksik ise bölgede kaynak türlerinin ve katkılarının etkin bir şekilde değerlendirilmesine yönelik reseptör modellemesi yöntemlerine başvurulmamış olmasıdır.

Bu çalışmada, Eskişehir il merkezinde Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağında yer alan üç farklı istasyonda ölçülen PM₁₀, PM_{2.5} ve SO₂ konsantrasyonları kullanılarak kirleticilerin zamansal ve mekânsal değişimlerini incelemek, reseptör modellemesi yöntemleriyle bu istasyonlardaki

kaynak etkilerinin benzerliklerini ve farklılıklarını belirlemek ve uzun mesafeli taşınımın hava kalitesine etkisini tespit etmek amaçlanmıştır. Bahsedilen bu analizler çalışmanın özgün noktalarını oluşturmaktadır.

2 Materyal ve metod

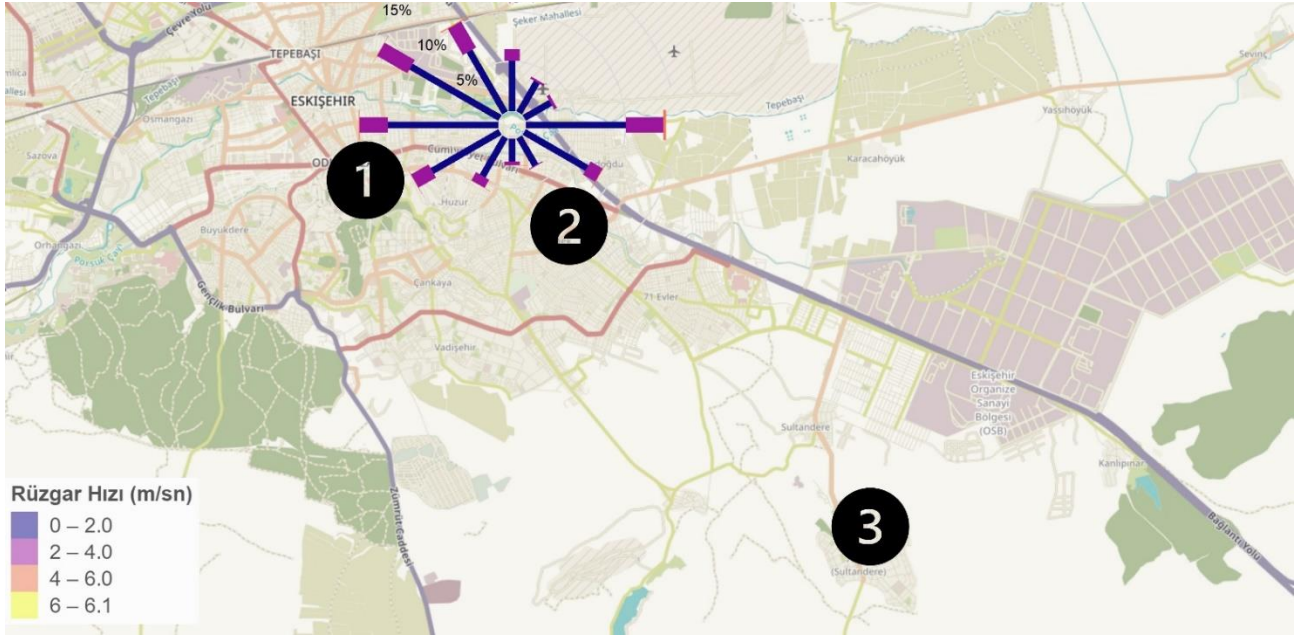
2.1 Hava kalitesi istasyonları ve istasyon verileri

İç Anadolu Bölgesi'nin kuzeybatısında, 29°-32° doğu boylamları ile 39°-40° kuzey enlemleri arasında yer alan Eskişehir'in yüzölçümü 13653 km² ve il merkezinin denizden yüksekliği 792 metredir [28]. Eskişehir il merkezinin 2023 yılı TÜİK verilerine göre nüfusu 915418 kişidir [29]. 2020 yılında Eskişehir'in en önemli ekonomik gelirini %54'lük pay ile hizmetler oluştururken, sanayi ve tarım sektörlerinin katkıları ise sırasıyla %39 ve %7 olmuştur [30]. 32 milyon m²'lik alanda kurulu Eskişehir Organize Sanayi Bölgesi, şehir merkezinin doğu yönünde 10 km mesafede yer almaktadır ve sanayi işletmelerinin sektörlere göre dağılımı şu şekildedir: makine ve ekipmanlar için %13.6; gıda ürünleri için %11.6; metal ürünleri için %11 ve elektrik, gaz, buhar için %10.5 [30, 31].

Eskişehir il merkezinde Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığına bağlı Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı (UHKİA) kapsamında 5 adet hava kalitesi ölçüm istasyonu bulunmaktadır. Bu istasyonlardan ikisi trafik, ikisi ısınma ve bir tanesi ise sanayi kaynaklı kirleticileri izlemek için kullanılmaktadır. Eskişehir il merkezinde kirleticilerin mekânsal ve zamansal değişimlerinin incelenebilmesi amacıyla, tüm istasyonlar hem ölçülen kirleticiler türleri hem de kirleticilerin ölçüm yüzdeleri açısından değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme sonucunda, her istasyon türünden birer adet olmak üzere toplamda üç istasyon seçilmiştir. İstasyon 1, Cumhuriyet Bulvarı üzerinde (39.7665 30.5259) yer almakta olup istasyon türü trafiktir. İstasyon 2, Odunpazarı semt merkezinde bir okul bahçesinde (39.7577 30.5639) yer almaktadır ve istasyon türü ise ısınmadır. İstasyon 3 ise Organize Sanayi Bölgesine (OSB) yakın bir konumda (39.7156 30.6175), yarı kırsal bir bölgede kuruludur ve istasyon türü ise sanayidir. İstasyon 1, 2 ve 3'ün harita üzerindeki konumları ve Eskişehir il merkezinde rüzgâr yönlerine göre esme sıklıklarını ve hızlarını gösteren rüzgâr gülü Şekil 1'de verilmiştir. Seçilen istasyonlardaki PM₁₀, PM_{2.5} ve SO₂ için 01 Ocak 2023 – 31 Aralık 2023 tarihleri arasındaki saatlik ölçüm verileri UHKİA portalı [32] kullanılarak temin edilmiştir.

2.2 İki değişkenli polar grafik

İki değişkenli polar grafikler, emisyon kaynakları hakkında yön bilgisi sağladığından ve konsantrasyonların rüzgâr hızına göre nasıl değiştiğini gösterdiğinden, belirli bir kirleticinin konsantrasyonunu hem rüzgâr hızı hem de yönü ile ilişkili olarak analiz etmek için etkili bir araçtır [33, 34]. Bu grafikler, grafiksel analiz yoluyla atmosferik kirleticilerin potansiyel emisyon kaynaklarının belirlenmesinde [35] ve kirleticiler konsantrasyonunun kutupsal koordinatlarda rüzgâr yönü ve hızı ile nasıl değiştiğini etkili bir şekilde göstererek farklı emisyon kaynakları arasında ayırım yapılmasına yardımcı olurlar [36].



Şekil 1. Hava kalitesi izleme istasyonları ve Eskişehir'in 2023 yılına ait rüzgâr gülü

İki değişkenli polar grafikleri oluşturmak için rüzgâr hızı, rüzgâr yönü ve konsantrasyon verileri rüzgâr hızı yönü kutuplarına bölünür ve her kutup için ortalama konsantrasyon hesaplanır [37].

Bu değerler daha sonra rüzgârın u ve v bileşenlerini kullanarak bir konsantrasyon yüzeyi oluşturmak için kullanılır. İlk olarak rüzgârın u ve v bileşenleri Denklem 1 ile hesaplanır; burada $\bar{u}$ ortalama rüzgâr hızını, Θ ise 90 derece doğu olmak üzere derece cinsinden ortalama rüzgâr yönünü temsil eder.

$$u = \bar{u} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\Theta}\right), v = \bar{u} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\Theta}\right) \quad (1)$$

Rüzgârın u ve v bileşenleri ile kirletici konsantrasyon verileri kullanılarak Genelleştirilmiş Eklemeli Modeli (GAM) [38] yardımıyla konsantrasyon yüzeyi Denklem 2'ye göre oluşturulur; burada C_i kirletici konsantrasyonu, β_0 yanıtın genel ortalamasını, $s(u_i, v_i)$ u ve v ortak değişkenlerinin i'nci değerinin düzleştirme fonksiyonunu, ε_i i'nci artık değerini temsil eder.

$$\sqrt{C_i} = \beta_0 + s(u_i, v_i) + \varepsilon_i \quad (2)$$

PM_{10} , $PM_{2.5}$ ve SO_2 'nin iki değişkenli polar grafikleri RStudio® yazılımında "OpenAir" paketi [39] kullanılarak oluşturulmuştur. Bu analiz için meteorolojik veriler Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından sağlanmıştır.

2.3 Konsantrasyon ağırlıklı yörünge modeli

Geri yörünge istatistiği yöntemleri ölçülen kirletici konsantrasyonları ile birleştirildiğinde kaynak-reseptör ilişkisi kurarak atmosferik taşınımın kirleticiler üzerindeki etkisinin incelenmesine olanak sağlamaktadır. Bir geri yörünge istatistiği yöntemi olan konsantrasyon ağırlıklı

yörünge (CWT) modeli, kirleticilerin atmosferik taşınım yollarını ve potansiyel kaynak bölgelerini analiz etmek için kullanılır. CWT modeli uygulanarak, ölçülen kirletici konsantrasyonlarını etki eden potansiyel kaynak bölgeleri belirlenebildiği gibi potansiyel kaynak katkı fonksiyonu (PSCF) yönteminden farklı olarak bu bölgelerin gözlemlenen kirletici seviyelerine göre katkıları da belirlenebilmektedir [40].

CWT modelinde kullanılan geri yörüngeler 72 saat uzunluğunda ve 500 m geliş yüksekliğinde 01 Ocak 2023 – 31 Aralık 2023 tarihleri için günlük olarak bir CBS yazılımı olan MeteoInfo [41] kullanılarak hesaplanmıştır. MeteoInfo yazılımı geri yörüngeleri HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) modelini kullanarak hesaplamaktadır. CWT modelinde kullanılan çalışma alanı, geri yörüngelerin uzunluğunu da kapsayacak şekilde doğu-batı yönünde -15° ve 50° boylamları ile güney-kuzey yönünde 26° ve 72° enlemleri arasındaki bölgeyi kapsamaktadır. Bu çalışma alanı daha sonra $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ grid hücrelerine bölünmüştür. CWT modelinde, her bir grid hücresine, o hücreden geçen yörüngelerle ilişkili ortalama örnek konsantrasyonlarına dayalı olarak ağırlıklı bir konsantrasyon atanır [42]. Her bir grid hücresinin ortalama ağırlıklı konsantrasyon değeri Denklem 3 ile hesaplanır.

$$C_{ij} = \frac{1}{\sum_{l=1}^M \tau_{ijl}} \sum_{l=1}^M C_l \tau_{ijl} \quad (3)$$

Burada C_{ij} ij'inci hücredeki ortalama ağırlıklı konsantrasyonunu, l yörüngesinin indeksini, M toplam yörünge sayısını, C_l l yörüngesinin varışında gözlemlenen konsantrasyonu ve τ_{ijl} l yörüngesinin ij'inci hücrede geçirdiği süreyi gösterir.

Her bir grid hücresi için hesaplanan ortalama ağırlıklı konsantrasyon değeri daha sonra Tang vd. [43] tarafından belirtilen metoda göre ağırlıklandırılmıştır ve haritanın görselleştirilmesinde bu ağırlıklandırılmış değerler kullanılmıştır.

3 Bulgular ve tartışma

1 Ocak 2023 – 31 Aralık 2023 tarihleri arasında İstasyon 1, 2 ve 3'te ölçülen PM₁₀, PM_{2.5} ve SO₂ konsantrasyonlarının istatistiksel değerleri (ortalama, standart sapma, ortanca, minimum, maksimum) Tablo 1'de yer almaktadır. PM₁₀ için en yüksek ortalama konsantrasyon, trafiğin ve yerleşimin yoğun olduğu bir bölgede kurulu olan İstasyon 1'de 48.5 ± 32.1 µg/m³ olarak kaydedilmiştir. İstasyon 2 ve 3'te PM₁₀ ortalama değerleri sırasıyla 42.7 ± 28.9 µg/m³ ve 23.1 ± 17 µg/m³ olarak kaydedilmiştir. Daha önce de değinildiği gibi, İstasyon 2, yerleşimin yoğun olduğu ancak trafiğin yoğun olduğu yollara İstasyon 1'e kıyasla daha uzak bir lokasyonda bulunmaktadır. İstasyon 3 ise şehir merkezinden uzak ve yerleşimin daha az yoğun olduğu Organize Sanayi Bölgesinde kuruludur. İstasyonların konumlarındaki bu bölgesel farklılıkların, PM₁₀ seviyeleri üzerinde etkili olduğu görülmektedir. PM_{2.5} için en yüksek ortalama konsantrasyon 25.4 ± 19.3 µg/m³ ile İstasyon 1'de kaydedilirken, İstasyon 2'de ortalama değer 9.6 ± 11.7 µg/m³, İstasyon 3'te ise 6.7 ± 6.4 µg/m³ olarak kaydedilmiştir. PM₁₀'a benzer şekilde, PM_{2.5}'te de bölgesel farklılıklar belirleyici olmaktadır. SO₂ için de diğer kirleticilerde olduğu gibi en yüksek ortalama konsantrasyon İstasyon 1'de 7.4 ± 8.1 µg/m³ olarak kaydedilmiştir. İstasyon 2 ve 3 için ise ortalama konsantrasyonlar sırasıyla 5.7 ± 4.5 µg/m³ ve 5.2 ± 4.9 µg/m³ olarak kaydedilmiştir.

Tablo 1. İstasyon 1, 2 ve 3'te PM₁₀, PM_{2.5} ve SO₂ için ölçülen konsantrasyonların istatistiksel değerleri (µg/m³)

İstasyon 1	Ort. ± SS	Ortanca	Minimum	Maksimum
PM ₁₀	48.5 ± 32.1	40.7	2.1	411.5
PM _{2.5}	25.4 ± 19.3	20.9	0.3	240.0
SO ₂	7.4 ± 8.1	4.7	0.6	128.6
İstasyon 2	Ort. ± SS	Ortanca	Minimum	Maksimum
PM ₁₀	42.7 ± 28.9	36.7	0.5	314.1
PM _{2.5}	9.6 ± 11.7	5.2	0.01	142.9
SO ₂	5.7 ± 4.5	4.2	0.9	57.1
İstasyon 3	Ort. ± SS	Ortanca	Minimum	Maksimum
PM ₁₀	23.1 ± 17	19	0.1	191.6
PM _{2.5}	6.7 ± 6.4	5.2	0.01	114.2
SO ₂	5.2 ± 4.9	4.1	0.9	78.0

DSÖ [4] tarafından PM₁₀ için yıllık ortalama sınır değeri 15 µg/m³ olarak önerilmektedir. DSÖ tarafından önerilen bu yıllık sınır değerin 2023 yılında tüm istasyonlarda aşıldığı gözlenmiştir. İstasyon 1'de PM₁₀'un yıllık ortalama konsantrasyonu önerilen sınır değerin 3 katından fazla kaydedilmiştir. İstasyon 2'de 3 katına yakına yakın, istasyon 3'te ise 1.5 katından fazla gözlenmiştir. PM₁₀ için ülkemizde [44] ve Avrupa Birliği'nde (AB) [45] belirlenen yıllık ortalama değerler 40 µg/m³'tür. Bu sınır değerin ülkemiz mevzuatlarına göre İstasyon 1 ve İstasyon 2'de aşıldığı

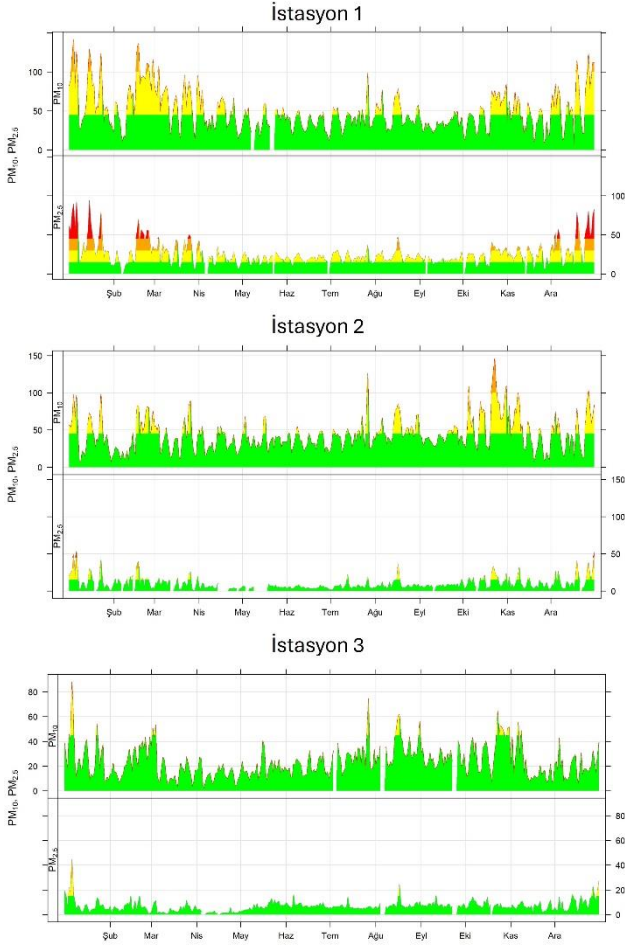
gözlenirken, İstasyon 3'te sınır değeri aşılmamıştır. PM_{2.5} için DSÖ tarafından önerilen yıllık ortalama sınır değeri 5 µg/m³'tür [4]. Bu sınır değeri yine PM₁₀'da olduğu gibi tüm istasyonlarda PM_{2.5} için de aşıldığı gözlenmiştir. Özellikle istasyon 1'de PM_{2.5} ortalama konsantrasyonu 5 kat fazla kaydedilmiştir. PM_{2.5} için ülkemizde bir sınır değeri belirlenmemiştir, ancak AB tarafından belirlenen yıllık sınır değeri 20 µg/m³'tür [45]. AB tarafından belirlenen sınır değeri, sadece İstasyon 1'de aşıldığı gözlemlenmiştir. DSÖ ve AB tarafından, SO₂ için yıllık ortalama sınır değeri önerilmemektedir. Ancak, ülkemizde SO₂ için yıllık ortalama sınır değeri 20 µg/m³ [44] olarak belirlenmiştir. Ülkemiz mevzuatında SO₂ için belirlenen yıllık sınır değeri hiçbir istasyonda aşılmamıştır.

3.1 Kirleticilerin zamansal değişimleri

Şekil 2 istasyonlarda PM₁₀ ve PM_{2.5} konsantrasyonlarının günlük değişimlerini ve Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ) tarafından önerilen sınır değerlerini göstermektedir. Yeşil renkler limit değeri altında kalan günlük ortalama konsantrasyonları, sarı, turuncu ve kırmızı renkler ise limit aşımını temsil etmektedir. DSÖ, PM₁₀ ve PM_{2.5} için günlük ortalama değerlerini sırasıyla 45 µg/m³ ve 15 µg/m³ olarak önermektedir. Bu değerlerin bir takvim yılı içerisinde 3-4 defadan fazla aşılmaması gerektiğini belirtmektedir [4]. Önerilen bu sınır değerleri, PM₁₀ için İstasyon 1'de 169 günde, İstasyon 2'de 135 günde, İstasyon 3'te ise 19 günde aşılmıştır. PM_{2.5} için önerilen sınır değeri, İstasyon 1'de 281 günde, İstasyon 2'de 61 günde ve İstasyon 3'te ise 15 günde aşılmıştır. DSÖ SO₂ için günlük ortalama sınır değeri 40 µg/m³ olarak önermektedir [4]. SO₂ sınır değeri için 2023 yılında hiçbir istasyonda limit aşımı kaydedilmemiştir.

PM₁₀, PM_{2.5} ve SO₂'nin istasyonlardaki saatlik ve haftanın günlerine göre zamansal değişimleri Şekil 3'te gösterilmiştir. Kirleticilerin zamansal değişimleri incelendiğinde İstasyon 1'de PM₁₀, PM_{2.5} ve SO₂'nin öğle ve gece yarısında gözlemlenen iki tepeli belirgin bir dağılım gösterdiği görülmektedir. Kirleticilerde görülen bu dağılım, Ulutaş vd. [46] tarafından yapılan başka bir çalışmada da gözlenmiştir. İstasyon 1, trafik kaynaklı emisyonları izlemek için kullanılsa da konum olarak yerleşimin de yoğun olduğu bir bölgede yer almaktadır. Güneşin doğuşu ile tüm kirleticiler konsantrasyonları artışa geçip, öğle saatlerinde gün içerisindeki ilk maksimum seviyesine ulaşmıştır. Günün ilerleyen saatlerinde konsantrasyonlar düşüşe geçip, İstasyon 1'deki en yüksek konsantrasyonlar güneşin batışı ile başlayan ikinci yükseliş trendinde saat 00:00'da kaydedilmiştir. Öğle saatlerinde görülen ilk tepe, daha çok sabah saatlerinde trafiğin artışına bağlı olarak gerçekleşmiştir. SO₂ genellikle kömür yanmasının izlenmesinde kullanılsa da, trafiğe bağlı olarak da önemli miktarlarda SO₂ atmosfere salınmaktadır [47]. Akşam ve gece saatlerindeki konsantrasyonlardaki artış ise ısınma kaynaklı emisyonlar ve azalan karışım yüksekliği nedeniyle daha düşük dağılım ile ilişkilidir [48]. Kirleticilerin haftanın günlerine göre değişimleri incelendiğinde, genel olarak hafta içi günlerde daha yüksek seviyelerde seyrederken, hafta sonu özellikle pazar günleri düşüş göstermiştir. Bu durum tipik olarak hafta sonu trafiğin düşmesi ile ilişkilidir. Ancak, Şekil

3'te dikkat çeken diğer bir nokta ise SO₂'nin en düşük seviyesinin perşembe günü gözlenmiş olmasıdır. SO₂'deki bu düşüşün, bölgede trafik ve ısınmanın azalan etkisi ile ilişkili olduğu düşünülmektedir.



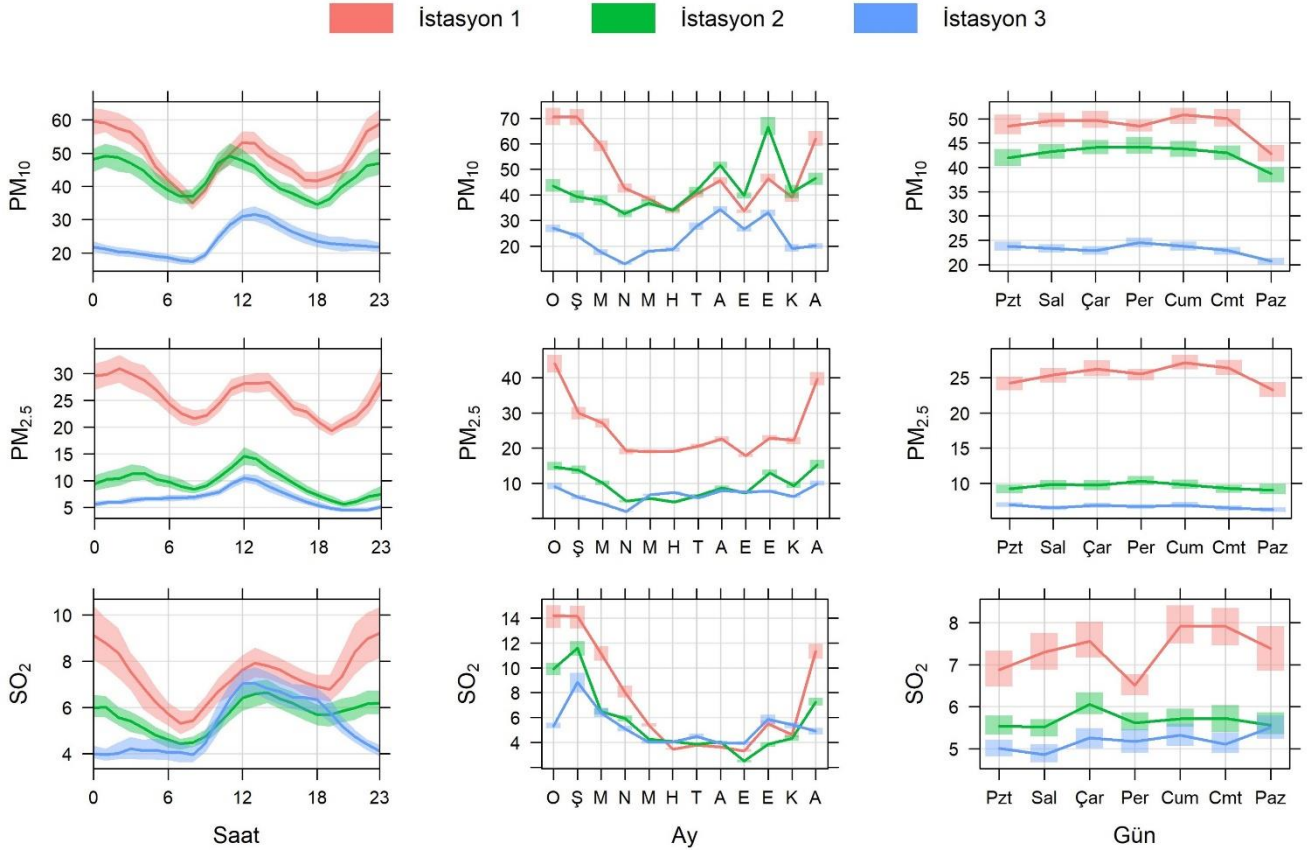
Şekil 2. PM₁₀ ve PM_{2.5}'in istasyonlarda günlük değişimleri (µg/m³)

İstasyon 2'de PM₁₀ seviyeleri, İstasyon 1'e benzer şekilde iki tepeli bir dağılım göstermiştir. Bu durum, bölgede PM₁₀'un hem trafik hem de ısınma kaynaklı olduğunu göstermektedir. PM₁₀'un haftanın günlerine göre değişimi de İstasyon 1'e benzer şekilde hafta içi günlerde daha yüksek konsantrasyonlarda seyredip hafta sonunda düşmüştür. PM_{2.5}'in İstasyon 2'de gün içindeki değişimi PM₁₀'a göre farklılık göstermektedir. PM₁₀ sabah trafiğin yoğunlaştığı saatlerde artışa geçip ilk maksimum noktasına saat 11:00'da ulaşırken, PM_{2.5} maksimum noktasına saat 12:00'da ulaşmıştır. PM₁₀'da saat 18:00'dan itibaren başlayan artış trendi, PM_{2.5}'te ise saat 20:00 civarında başlamıştır. Bu durum, İstasyon 2'de PM_{2.5} üzerinde PM₁₀'a göre trafik ve ısınma kaynakların farklı katkılarını göstermektedir. İstasyon 2'de SO₂'nin zamansal değişimi incelendiğinde, konsantrasyonlar sabah saatleri ile artışa geçip saat 12:00'de en yüksek seviyesine ulaşmıştır. Saat 18:00'dan sonra ise konsantrasyonlarda tekrar bir artış gözlemlenmiştir.

İstasyon 3, OSB'ye yakın bir bölgede sanayi kaynaklı emisyonları izlemek için kullanılmaktadır. Mesai saatlerinin PM₁₀, PM_{2.5} ve SO₂ konsantrasyonlarının gün içerisindeki değişimlerine etkisi açıkça görülmektedir. Konsantrasyonlar mesai saatleri ile artışa geçmekte, öğle saatlerinde maksimum seviyesine ulaşmakta ve daha sonra düşüş trendine girmektedir. Saat 12:00-18:00 saatleri arasında gözlemlenen bu düşüş, gün ilerledikçe artan karışım yüksekliği ile ilişkilendirilmektedir [49]. Mesainin bittiği saat 18:00'dan sonra kirleticilerin konsantrasyonlarındaki düşüşler daha belirgin hale gelmektedir. İstasyon 3'te kirleticiler pazar günü düşüş gösterse de bu düşüş diğer istasyonlardaki kadar belirgin değildir.

PM₁₀, PM_{2.5} ve SO₂'nin istasyonlardaki aylık ortalama konsantrasyonları Şekil 3'te gösterilmiştir. İstasyon 1'de tüm kirleticilerde belirgin bir mevsimsellik gözlemlenmektedir. Konsantrasyonlar kış aylarında daha yüksek seyrederken, yaz aylarında düşük seviyelerde kaydedilmiştir. PM₁₀'un kış ayları (Aralık, Ocak ve Şubat) ortalama konsantrasyonu 67.6 µg/m³, yaz ayları ortalaması (Haziran, Temmuz ve Ağustos) 39.8 µg/m³ olarak belirlenmiştir. PM_{2.5}'in kış ayları ortalama konsantrasyonu 37.9 µg/m³, yaz ayları ortalaması ise 20.7 µg/m³ olarak belirlenmiştir. SO₂'nin ise kış aylarında ortalama konsantrasyonu 13.2 µg/m³ iken, bu değer yaz aylarında 3.6 µg/m³ belirlenmiştir. Daha önce de değinildiği gibi, İstasyon 1 hem trafik hem de ısınma kaynaklı emisyonların etkisi altındadır. Kış aylarında başlayan evsel ısınma ve değişen meteorolojik faktörler, bölgede önemli bir kirlilik yükü oluşturmaktadır. Eskişehir'de 2023'te kış aylarında ortalama rüzgâr hızı 1.37 m/sn, yaz aylarında ise 1.57 m/sn olarak ölçülmüştür. Kış aylarındaki daha düşük rüzgâr hızı, kirleticilerinin şehir üzerinde daha uzun süre kalmasına ve kirlilik yüklerinin artmasına neden olmaktadır.

İstasyon 2'de PM₁₀ için yaz ve kış mevsimlerinde belirgin bir mevsimsellik gözlenmemiştir. Yaz aylarında ortalama konsantrasyon 42.5 µg/m³ iken, kış aylarında bu değer 43.1 µg/m³ olarak belirlenmiştir. İstasyon 2'de ortalama konsantrasyonların en yüksek olduğu mevsim sonbahardır ve bu mevsimdeki ortalama konsantrasyon 49.1 µg/m³ olarak ölçülmüştür. Ekim ayındaki 66.1 µg/m³'lük ortalama konsantrasyon, sonbahardaki genel artışta belirgin bir etkiye sahiptir. Ekim ayı, 2023 yılında Eskişehir'de ortalama 1 m/sn rüzgâr hızıyla en düşük hızın ölçüldüğü ay olmuştur. Bu düşük rüzgâr hızının, Ekim ayında İstasyon 2'de PM₁₀'un yüksek seviyelerde gözlenmesinde etkili olduğu düşünülmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi, İstasyon 2'de PM₁₀ hem trafik hem de evsel ısınma kaynaklarının etkisi altındadır. Ancak, İstasyon 2'deki evsel ısınmanın PM₁₀ üzerindeki katkısı, İstasyon 1'deki kadar belirgin değildir. PM_{2.5}'in kış ve yaz aylarındaki ortalama konsantrasyonları sırasıyla 14.5 µg/m³ ve 6.6 µg/m³ olarak belirlenmiştir. SO₂ için ise kış aylarında ortalama konsantrasyon 9.6 µg/m³ iken, yaz aylarında bu değer 4 µg/m³ olarak belirlenmiştir. Her iki kirletici de evsel ısınmanın başladığı aylar ile yükselişe geçmektedir. Bu durum, kış aylarında PM_{2.5} üzerinde evsel ısınmanın katkısının daha etkin olduğunu göstermektedir.



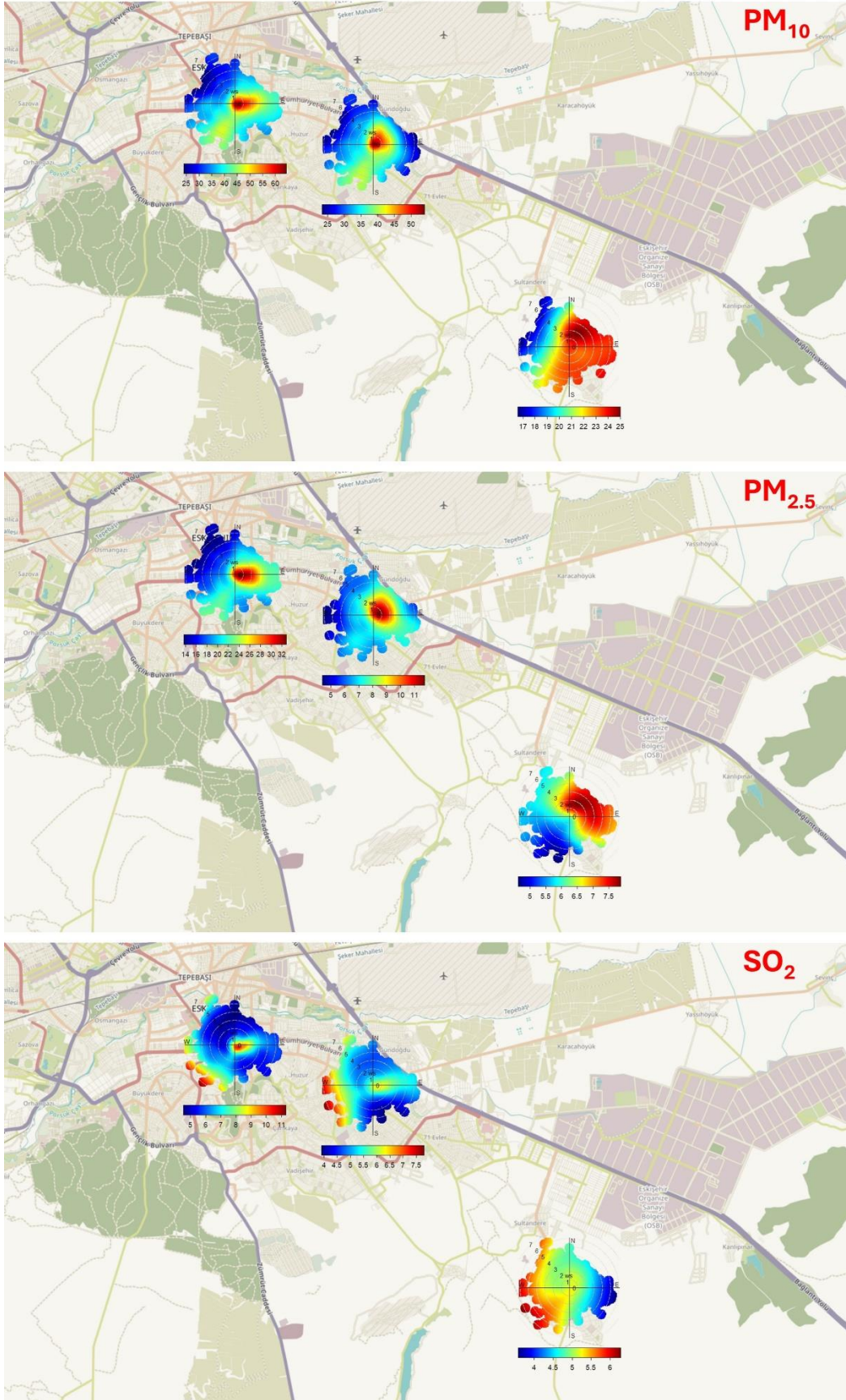
Şekil 3. PM₁₀, PM_{2.5} ve SO₂ konsantrasyonlarının istasyonlarda saatlik, aylık ve günlük değişimleri (µg/m³)

İstasyon 3'te PM₁₀'un kış ayları ortalaması 23.7 µg/m³, yaz ayları ortalaması ise 26.9 µg/m³ olarak belirlenmiştir. PM₁₀'nun kış ve yaz ayları ortalama konsantrasyonları belirgin bir mevsimsellik göstermese de toprağın kuru olduğu Ekim ayına kadar PM₁₀ konsantrasyonları artış trendinde olmuştur. Toprağın kuru olduğu dönemlerde, toprak rüzgarla kolayca havalandığı ve havada askıda halde bulunduğu gözlemlenmektedir [50]. Bu durum, yağışın az olduğu dönemlerde PM₁₀ konsantrasyonlarında artışa neden olmaktadır. PM_{2.5}'in kış aylarında ortalama konsantrasyon 8.2 µg/m³ iken, yaz aylarında ortalama konsantrasyon 7 µg/m³ olarak belirlenmiştir. PM_{2.5}'in PM₁₀'dan farklı olarak kış aylarında daha yüksek konsantrasyonlarda gözlenmesinde ısınmaya bağlı emisyonlardaki artışın etkili olduğu düşünülmektedir. SO₂'nin ise kış aylarında ortalama konsantrasyonu 6.4 µg/m³ iken, bu değer yaz aylarında 4.1 µg/m³ belirlenmiştir. Bölüm 3.2'de tartışıldığı gibi, kış aylarında SO₂ konsantrasyonlarındaki artışın nedeni, şehir merkezinden taşınımın etkili olmasıdır.

3.2 İki değişkenli polar grafik sonuçları

Eskişehir il merkezinde 2023 yılında hâkim rüzgâr yönleri doğu, batı ve kuzey batı olmuştur (Şekil 1). Kış aylarında hâkim rüzgâr yönü doğu iken, yaz aylarında batı ve kuzey batılı yönler olmuştur. Şekil 4, PM₁₀, PM_{2.5} ve SO₂ konsantrasyonlarının istasyonlarda rüzgâr yönüne ve rüzgâr hızına göre ilişkilerini iki değişkenli polar grafikler ile göstermektedir. PM₁₀'un istasyonlardaki iki değişkenli polar

grafiklerine göre, İstasyon 1'de 0-2 m/sn rüzgâr hızı aralığında doğu yönündeki kaynakların etkisi ortalama 55-65 µg/m³ aralığında gözlenmiştir. Düşük rüzgâr hızı ile gözlemlenen bu PM₁₀ seviyeleri, kaynakların istasyona yakınlığını ve emisyonların fazla olmasını göstermektedir. Bu durum, bölgedeki trafiğin önemli katkısını göstermektedir. Rüzgâr hızı 5 m/sn'ye çıktığında güney batılı yönlerden 45-50 µg/m³ aralığında taşınım gözlenmiştir. Bu durum, yerleşim yerlerinin yoğun olduğu bölgeleri ve dolayısıyla evsel ısınmanın etkisini göstermektedir. İstasyon 2'de, rüzgâr hızı 0-2 m/sn aralığında kuzey doğulu yönünden yüksek seviyelerde PM₁₀ taşınımını göstermektedir. Bu yönde Ankara-Bursa D200 karayolu bulunmaktadır, dolayısıyla bu yönden taşınımın trafik kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Rüzgâr hızı 5 m/sn'ye kadar çıktığında ve güney batıdan estiği durumlarda taşınımın yerleşim bölgelerinden gerçekleşmektedir. İstasyon 2'de evsel ısınmanın katkısı, İstasyon 1'e kıyasla daha düşüktür; bu durum güney batılı yönlerden konsantrasyonların daha düşük seviyelerde taşınmasıyla görülmektedir. İstasyon 3'te ise kuzey, doğu ve güney yönlerinden esen rüzgarlarla gerçekleşen taşınımın PM₁₀'a önemli katkıları gözlenmektedir. Özellikle rüzgârın kuzey doğu yönünden estiğinde, OSB bölgesinin katkısı daha fazla olmaktadır. İstasyon, yarı kırsal bir bölgede kurulu olduğu için, rüzgârın doğu ve güney yönlerinden estiğinde bölgede toprak taşınımının etkili olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4. PM₁₀, PM_{2.5} ve SO₂'nin iki değişkenli polar grafikleri ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

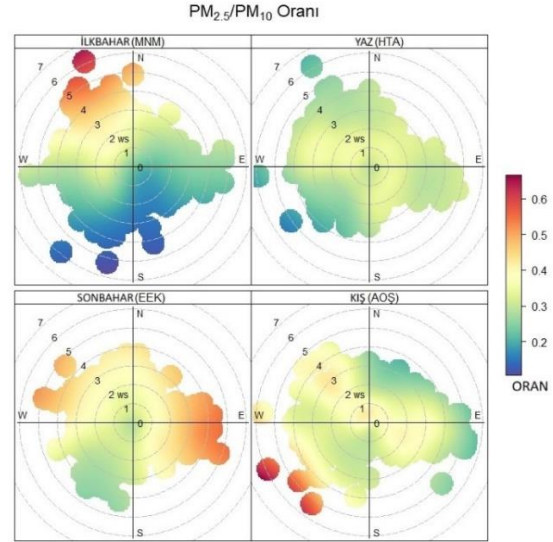
Şekil 4'te $PM_{2.5}$ 'in istasyonlardaki iki değişkenli polar grafiklerine göre, İstasyon 1 ve İstasyon 2'deki taşınım benzerlik göstermektedir. Yine PM_{10} 'da olduğu gibi, 0-2 m/sn hızlarındaki taşınımlar trafiğin etkisini yansıtırken, rüzgâr hızının arttığı ve güney batılı yönlerden estiği durumlarda evsel ısınmanın etkisi görülmektedir. Ancak, İstasyon 2'de evsel ısınmanın etkisi İstasyon 1'deki kadar belirgin değildir. İstasyon 3'te ise rüzgârın kuzey ve doğu yönleri arasında kalan yönlerden estiği durumlarda OSB bölgesinin etkisi gözlenmektedir.

SO_2 'nin Şekil 4'te iki değişkenli polar grafiklerine göre, tüm istasyonlardaki taşınım konumlarından dolayı yönde farklılıklar gösterse de yerleşimin yoğun olduğu batılı yönlerden evsel ısınma kaynaklı emisyonları işaret etmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi, İstasyon 1'de trafiğin belirgin etkisi yine düşük rüzgâr hızlarında doğu yönünde gözlenmiştir.

3.3 Konsantrasyon ağırlıklı yörünge sonuçları

$PM_{2.5}$ 'in PM_{10} 'a oranı, atmosferdeki partikül madde kirliliği kaynaklarını anlamak için kritik bir göstergedir. Düşük $PM_{2.5}/PM_{10}$ oranları doğal kaynaklardan gelen kaba partiküllerin yaygınlığını işaret ederken, yüksek oranlar antropojenik kaynaklarla daha güçlü bir ilişkiyi işaret etmektedir [51]. Daha önce de değinildiği gibi İstasyon 3'te rüzgârın doğudan ve güneyden estiği durumlarda bölgede toprak taşınımının etkili olduğu düşünülmektedir. Bu durumu doğrulamak için İstasyon 3'te mevsimlere göre $PM_{2.5}/PM_{10}$ oranları için hazırlanan iki değişkenli polar grafikleri Şekil 5'te verilmiştir. Şehir merkezi İstasyon 3'e göre batılı yönlerde bulunmaktadır. Tüm mevsimlerde rüzgârın >3 m/sn ile batılı yönlerden estiği durumlarda $PM_{2.5}/PM_{10}$ oranı artmaktadır. Bu durum, PM_{10} kütlesi üzerindeki antropojenik etkiyi göstermektedir. Ayrıca, sonbahar mevsiminde rüzgârın doğulu yönlerden 2-5 m/sn hızlarında estiği durumda da $PM_{2.5}/PM_{10}$ oranı artmaktadır. Rüzgârın doğu yönlerinden estiği zamanlarda $PM_{2.5}/PM_{10}$ oranındaki artışta Organize Sanayi Bölgesinin ve Ankara-Bursa D200 karayolundaki taşıt trafiğinin etkili olduğu düşünülmektedir. Rüzgârın ilkbahar, yaz ve sonbahar mevsimlerinde güneyden estiği, kış mevsiminde ise doğudan estiği durumlarda $PM_{2.5}/PM_{10}$ oranı düşmektedir. Bu durum da İstasyon 3'e güney ve doğu yönlerinden toprak kaynaklı taşınımı göstermektedir.

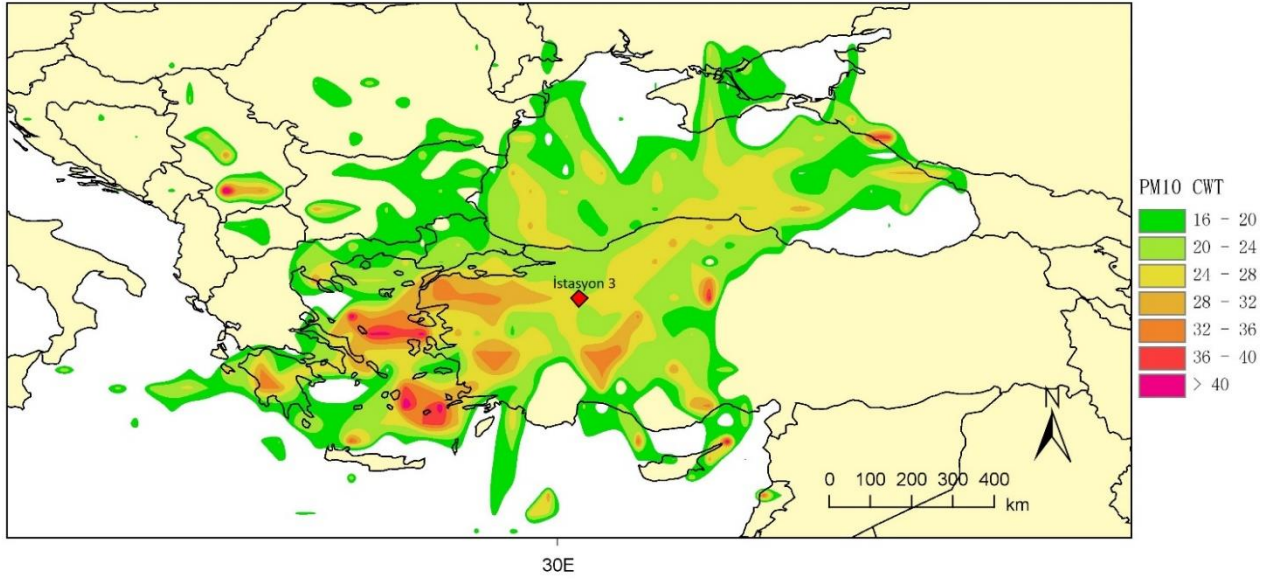
İstasyon 3'te taşınımla gelen PM_{10} 'un muhtemel kaynak bölgelerinin ve bu bölgelerin katkılarının belirlenmesi için oluşturulan konsantrasyon ağırlıklı yörünge haritası Şekil 6'da verilmiştir. Konsantrasyon ağırlıklı yörünge model haritası incelendiğinde, İstasyon 3'te PM_{10} 'a $28 - 36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ aralığında önemli katkı sağlayan bölgelerin Türkiye'de Konya havzası, Balıkesir – Çanakkale arasında kalan bölge ve Uşak olduğu görülmektedir. Bu bölgeler Türkiye'nin en kurak ve yarı kurak bölgeleri arasında yer almaktadır [52, 53]. Bu bölgelerin Türkiye'de önemli toz kaynak alan bölgeleri arasında yer aldığı farklı çalışmalarda da belirtilmiştir [54, 55]. Türkiye'deki bu bölgelere ek olarak özellikle Yunanistan PM_{10} konsantrasyonlarına yüksek katkı sağlayan bölgeler arasında yer almaktadır.



Şekil 5. İstasyon 3'te $PM_{2.5}/PM_{10}$ oranının mevsimsel iki değişkenli polar grafikleri

4 Sonuçlar

Kentlerdeki hava kalitesi, insan sağlığını tehdit eden önemli bir problemdir. Eskişehir, 900000 üzerindeki nüfusu ve yoğun sanayisi ile hava kirliliği probleminin yaşandığı şehirlerden biridir [56]. Ulusal Hava Kalitesi Ağında yer alan 3 istasyondan elde edilen PM_{10} , $PM_{2.5}$ ve SO_2 verileri 2023 yılı için incelendiğinde, tüm istasyonlarda PM_{10} ve $PM_{2.5}$ 'in DSÖ tarafından önerilen sınır değerleri çok defa aştığı ve kaynakların Eskişehir'de PM açısından önemli bir yük oluşturduğu belirlenmiştir. Dünya genelinde her yıl yaklaşık 7 milyon, Avrupa'da ise yaklaşık 900000 insanın $PM_{2.5}$ 'e maruz kalması nedeniyle öldüğünü tahmin edilmektedir [57]. Tarín-Carrasco vd. [57] artan nüfusa ve PM maruziyetine bağlı olarak, Avrupa'da 2050 yılında bu oranın %73 artacağını öngörmektedir. Ülkemizde PM kirliliğinin mortalite üzerindeki etkisini birçok çalışmada incelenmiştir. Ulusoy [1] tarafından yapılan çalışmada, Zonguldak'ta 2020 – 2022 yılları arasında PM'ye atfedilebilir tahmini ölüm oranlarının %18.75 ile %18.95 arasında değiştiği ve hava kirliliğine atfedilen tahmini ölüm sayılarının ise 810 ile 927 arasında değiştiği belirtilmiştir. Koçak ve Balcılar [55] tarafından yapılan çalışmada, Ankara'nın 8 farklı bölgesinde 2020-2022 yılları arasında $PM_{2.5}$ maruziyetine bağlı olarak atfedilebilir tahmini ölüm oranlarının %4.38 ile %25.25 arasında değiştiği belirtilmiştir. Ayrıca, nüfusun yoğun olduğu bölgelerde artan $PM_{2.5}$ konsantrasyonlarına bağlı olarak ölüm oranlarının da arttığı ifade edilmiştir. Yapılan bu çalışmalar, özellikle nüfusun yoğun olarak yaşadığı Eskişehir'in İstasyon 1 ve İstasyon 2 bölgelerinde PM konsantrasyonlarının sınır değerlerinin üzerinde kaydedilmesinin, kentin halk sağlığı üzerinde ciddi potansiyel etkilere sahip olduğunu göstermektedir. Tüm dünyada ve ülkemizde SO_2 emisyonlarının azaltılmasına yönelik çabalar ile kentlerde doğalgaz kullanımının yaygınlaştırılması sonucu SO_2 konsantrasyonlarının limit değerleri aşılmadığı görülmüştür.



Şekil 6. PM₁₀'un potansiyel kaynak bölgeleri ve bu bölgelerin PM₁₀ konsantrasyonlarına ağırlıklı katkıları (µg/m³)

Eskişehir il merkezinde kaynakların ve katkılarının etkin bir şekilde değerlendirilmesi için kirleticilerin mekânsal ve zamansal değişimleri ile iki değişkenli polar grafikleri incelenmiştir. İstasyon 1’de kirleticiler üzerinde trafiğin tüm yıl boyunca, kış aylarında evsel ısınmanın başlamasıyla da yanma kaynaklı emisyonların etkili olduğu görülmüştür. İstasyon 2’de ise PM₁₀’un trafik ve ısınma kaynaklı olduğu, PM_{2.5} konsantrasyonları üzerinde evsel ısınmanın daha etkili olduğu görülmüştür. İstasyon 3, şehir merkezine 10 km mesafede yarı kentsel bir alanda bulunmaktadır. Bu istasyonda PM₁₀, PM_{2.5} ve SO₂ konsantrasyonları diğer istasyonlara göre daha düşük seviyelerde kaydedilmiştir. PM_{2.5} üzerinde OSB bölgesinden kaynaklanan emisyonlar etkin olduğu, SO₂’nin ise kış aylarında şehir merkezinden gerçekleşen taşınım ile arttığı gözlenmiştir. İstasyon 3’te PM₁₀’un hem OSB hem de toprak kaynaklı olduğu görülmüştür. Bölgedeki PM₁₀ seviyeleri üzerindeki toprak katkısını doğrulamak amacıyla PM_{2.5}/PM₁₀ oranının mevsimlere göre polar grafikleri incelenmiştir. Tüm mevsimlerde rüzgârın batılı yönlerden estiği durumlarda PM_{2.5}/PM₁₀ oranının arttığı, rüzgârın güney yönünden estiği ilkbahar, yaz ve sonbahar mevsimleri ile doğu yönünden estiği kış mevsiminde ise bu oranın düştüğü görülmüştür. Bölgeye taşınım ile gelen PM₁₀’un kaynak bölgelerini ve bu bölgelerin katkılarını belirlemek için konsantrasyon ağırlıklı yörünge modeli kullanılmıştır. CWT model sonuçları ülkemizde İç Anadolu ve Ege bölgeleri ile Yunanistan üzerinden gelen hava kütlelerinin Eskişehir’de PM₁₀ yüküne etki ettiğini göstermiştir.

Bu çalışmanın sonuçları, Eskişehir’de hava kalitesini iyileştirmek için kent düzeyinde önlemler alınmasının gerektiğini vurgulamaktadır. Aynı zamanda, Eskişehir’deki süregelen hava kirliliği sorunlarını çözmek için kapsamlı hava kalitesi izleme ve kanıta dayalı politika

müdahalelerinin önemine dikkat çekmektedir. Özellikle nüfusun yoğun olduğu bölgelerde PM konsantrasyonlarının tüm yıl boyunca trafik nedeniyle yüksek olduğu tespit edilmiştir. Kış aylarında ise evsel ısınmanın başlaması, hava kalitesini olumsuz etkileyen önemli bir diğer faktör olarak belirlenmiştir. Bu bölgelerde, trafik yoğunluğunu azaltıcı önlemler alınması büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, evsel ısınmada hâlâ katı yakıtların kullanıldığı yerlerde doğalgaza geçişin teşvik edilmesi önerilmektedir. Eskişehir’de hava kalitesinin iyileştirilmesine yönelik uzun vadeli stratejileri içeren Temiz Hava Planları hazırlanarak uygulanması, hava kalitesi probleminin önemli ölçüde iyileştirilmesine katkı sağlayacaktır.

Teşekkür

Yazar, bu çalışmada kullanılan kirletici verilerini sağladığı için Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı’na teşekkür eder.

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %6

Kaynaklar

- [1] K. Ulusoy, Zonguldak’ta PM_{2.5} odaklı hava kirliliği-mortalite ilişkisinin incelenmesi. Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 13(1), 301-308, 2023. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1372.285>.
- [2] U. A. Bhatti, Z. Zeeshan, M. M. Nizamani, S. Bazai, Z. Yu and L. Yuan, Assessing the change of ambient air quality patterns in Jiangsu Province of China pre-to post-COVID-19. Chemosphere, 288, Pt 2, 132569, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132569>.

- [3] T. Lauriks, R. Longo, D. Baetens, M. Derudi, A. Parente, A. Bellemans, J. Van Beeck and S. Denys, Application of improved CFD modeling for prediction and mitigation of traffic-related air pollution hotspots in a realistic urban street. *Atmospheric Environment*, 246, 118127, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.118127>.
- [4] WHO, 2022 Ambient (outdoor) air pollution. [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health), Erişim Tarihi 01 Mart 2024.
- [5] B. Caliskan, N. Özençin and S. S. Cindoruk, Air quality level, emission sources and control strategies in Bursa/Turkey. *Atmospheric Pollution Research*, 11, 12, 2182-2189, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.05.016>.
- [6] M. F. Sari and F. Esen, Atmospheric concentration, spatial variations, and source identification of persistent organic pollutants in urban and semi-urban areas using passive air samplers in Bursa, Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-11, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17987-1>.
- [7] E. Yücer, A. Erener and G. Sarp, A land use regression model to estimate ambient concentrations of PM10 and SO2 in İzmit, Turkey. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 51, 6, 1329-1341, 2023. <https://doi.org/10.1007/s12524-023-01704-1>.
- [8] V. Singh, S. Singh, A. Biswal, A. P. Kesarkar, S. Mor and K. Ravindra, Diurnal and temporal changes in air pollution during COVID-19 strict lockdown over different regions of India. *Environmental Pollution*, 266, 115368, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115368>.
- [9] J. Maffia, E. Dinuccio, B. Amon and P. Balsari, PM emissions from open field crop management: emission factors, assessment methods and mitigation measures – A Review. *Atmospheric Environment*, 226, 117381, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117381>.
- [10] B. A. Maher, V. O'Sullivan, J. Feeney, T. Gonet and R. A. Kenny, Indoor particulate air pollution from open fires and the cognitive function of older people. *Environmental Research*, 192, 110298, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110298>.
- [11] S. K. Kharol, V. Fioletov, C. A. McLinden, M. W. Shephard, C. E. Sioris, C. Li and N. A. Krotkov, Ceramic industry at morbi as a large source of SO2 emissions in India. *Atmospheric Environment*, 223, 117243, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117243>.
- [12] A. L. d. Jesus, M. H. Thompson, L. D. Knibbs, M. Kowalski, J. Cyrus, J. V. Niemi, A. Kousa, H. Timonen, K. Luoma, T. Petäjä, D. C. S. Beddows, R. M. Harrison, P. K. Hopke and L. Morawska, Long-Term trends in PM2.5 mass and particle number concentrations in urban air: The impacts of mitigation measures and extreme events due to changing climates. *Environmental Pollution*, 263, Part A 114500, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114500>.
- [13] S. Sayols-Baixeras, A. Fernández-Sanlés, A. Prats-Urbe, I. Subirana, M. Plusquin, N. Künzli, J. Marrugat, X. Basagaña and R. Elosúa, Association between long-term air pollution exposure and DNA methylation: The REGICOR Study. *Environmental Research*, 176, 108550, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108550>.
- [14] A. Bari, W. B. Kindzierski and P. Roy, Identification of ambient SO2 sources in industrial areas in the Lower Athabasca Oil Sands Region of Alberta, Canada. *Atmospheric Environment*, 231, 117505, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117505>.
- [15] T. F. Mebrahtu, G. Santorelli, T. Yang, J. Wright, J. Tate and R. McEachan, The effects of exposure to NO2, PM2.5 and PM10 on health service attendances with respiratory illnesses: A time-series analysis. *Environmental Pollution*, 333, 122123, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122123>.
- [16] S. Kong, Q. Yan, H. Zheng, H. Liu, W. Wang, S. Zheng, G. Yang, M. Zheng, J. Wu, S. Qi, G. Shen, L. Tang, Y. Yin, T. Zhao, H. Yu, D. Liu, D. Zhao, Z. Tao, J. Ruan and M. Huang, Substantial reductions in ambient PAHs pollution and lives saved as a co-benefit of effective long-term PM2.5 pollution controls. *Environment International*, 114, 266-279, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.03.002>.
- [17] K. Ulutas, S. K. M. Abujayyab, S. S. Abu Amr, A. F. M. Alkarkhi and S. Duman, The effect of air quality parameters on new COVID-19 cases between two different climatic and geographical regions in Turkey. *theoretical and Applied Climatology* 152, 1-2, 801-812, 2023. <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04420-5>.
- [18] K. Ulutaş, Prediction of mortality attributed to NO2 Air pollutant in Sakarya by using Airq+ software for 2018 and 2019. *ESTÜDAM Halk Sağlığı Dergisi*, 7, 2, 315-325, 2022. <https://doi.org/10.35232/estudamhds.1060529>.
- [19] K. J. Maji, V. O. Li and J. C. K. Lam, Effects of China's current air pollution prevention and control action plan on air pollution patterns, health risks and mortalities in Beijing 2014–2018. *Chemosphere*, 260, 127572, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127572>.
- [20] K. M. Molepo, B. J. Abiodun and R. N. Magoba, The transport of PM10 over Cape Town during high pollution episodes. *Atmospheric Environment*, 213, 116-132, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.05.041>.
- [21] B. Barhoumi, M. Tedetti, J. A. T. Onrubia, A. Dufour, T.-Q. Doan, S. Boutaleb, S. Touil and M. L. Scippo, Chemical Composition and In vitro Aryl Hydrocarbon Receptor-Mediated activity of atmospheric particulate matter at an urban, agricultural and industrial site in North Africa (Bizerte, Tunisia). *Chemosphere*, 258, 127312, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127312>.
- [22] X. Xu, N. Qin, Z. Yang, Y. Liu, S. Cao, B. Zou, L. Jin, Y. Zhang and X. Duan, Potential for Developing independent daytime/nighttime LUR Models based on short-term mobile monitoring to improve model

- performance. *Environmental Pollution*, 268, Part B, 115951, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115951>.
- [23] R. Xue, S. Wang, D. Li, Z. Zou, K. L. Chan, P. Valks, A. Saiz-Lopez and B. Zhou, Spatio-Temporal variations in NO₂ and SO₂ over Shanghai and Chongming eco-island measured by Ozone Monitoring Instrument (OMI) during 2008–2017. *Journal of Cleaner Production*, 258, 120563, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120563>.
- [24] A. Jakob, S. Hasibuan and D. Fiantis, Empirical evidence shows that air quality changes during COVID-19 pandemic lockdown in Jakarta, Indonesia Are Due to Seasonal Variation, Not Restricted Movements. *Environmental Research*, 208, 112391, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112391>.
- [25] O. Ozden, T. Dogeroglu and S. Kara, Assessment of ambient air quality in Eskisehir, Turkey. *Environment International*, 34, 5, 678-87, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2007.12.016>.
- [26] E. O. Gaga and A. Ari, Gas–particle partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in an urban traffic site in Eskisehir, Turkey. *Atmospheric Research*, 99, 2, 207-216, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.10.013>.
- [27] Ö. Özden Üzmez, E. O. Gaga and T. Döğeroğlu, Development and field validation of a new diffusive sampler for determination of atmospheric volatile organic compounds. *Atmospheric Environment*, 107, 174-186, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.02.040>.
- [28] T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı, Eskişehir Coğrafya Yapısı. <https://eskisehir.ktb.gov.tr/TR-70841/cografya-yapisi.html>, Erişim Tarihi 12 Mart 2024.
- [29] Türkiye İstatistik Kurumu, Nüfus istatistikleri portalı. <https://nip.tuik.gov.tr/?value=CinsiyeteGoreNufus>, Erişim Tarihi 12 Mart 2024.
- [30] Bursa Eskişehir Bilecik Kalkınma Ajansı, Eskişehir Ekonomik Yapı. <https://www.investineskisehir.gov.tr/ekonomik-yapi/>, Erişim Tarihi 12 Mart 2024.
- [31] Eskişehir Organize Sanayi Bölgesi, Tarihçe. <https://mobil.eosb.org.tr/vPage/hakkimizda>, Erişim Tarihi 12 Mart 2024.
- [32] T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı. https://sim.csb.gov.tr/STN/STN_Report/StationDataDownloadNew, Erişim Tarihi 20 Aralık 2023.
- [33] E. Koçak, Aksaray kentinin PM₁₀ ve SO₂ konsantrasyonlarının zamansal değişimi: koşullu iki değişkenli olasılık fonksiyonu ve K-means kümeleme. *Journal of Engineering Sciences and Design*, 6, 3, 471-478, 2018. <https://doi.org/10.21923/jesd.426741>.
- [34] E. Koçak, Prediction of daily fine particulate matter (PM_{2.5}) concentration in Aksaray, Turkey: Temporal variation, meteorological dependence, and employing artificial neural network. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 43, 2, e14355, 2024. <https://doi.org/10.1002/ep.14355>.
- [35] J. A. Espinoza-Guillen, M. B. Alderete-Malpartida, J. H. Cañari-Cancho, D. L. Pando-Huerta, D. F. Vargas-La Rosa and S. J. Bernabé-Meza, Immission levels and identification of sulfur dioxide sources in La Oroya city, Peruvian Andes. *Environment, Development and Sustainability*, 25, 11, 12843-12872, 2023. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02592-0>.
- [36] Y. Chang, C. Deng, F. Cao, C. Cao, Z. Zou, S. Liu, X. Lee, J. Li, G. Zhang and Y. Zhang, Assessment of carbonaceous aerosols in Shanghai, China–Part 1: long-term evolution, seasonal variations, and meteorological effects. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, 16 9945-9964, 2017. <https://doi.org/10.5194/acp-17-9945-2017>.
- [37] I. Uria-Tellaetxe and D. C. Carslaw, Conditional bivariate probability function for source identification. *Environmental Modelling & Software*, 59, 1-9, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.05.002>.
- [38] F. Dominici, A. McDermott, S. L. Zeger and J. M. Samet, On the use of generalized additive models in time-series studies of air pollution and health. *American Journal of Epidemiology*, 156, 3, 193-203, 2002. <https://doi.org/10.1093/aje/kwf062>.
- [39] D. C. Carslaw and K. Ropkins, Openair-an R package for air quality data analysis. *Environmental Modelling & Software*, 27, 52-61, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.09.008>.
- [40] E. Busa, B. Gugamsetty, R. O. R. Kalluri, R. G. Kotalo, C. R. Tandule, L. R. Thotli, M. Chakala and S. N. R. Palle, Diurnal, seasonal, and vertical distribution of carbon monoxide levels and their potential sources over a semi-arid region, India. *Atmósfera*, 35, 1, 165-178, 2022. <https://doi.org/10.20937/ATM.52808>.
- [41] Y. Wang, An open source software suite for multi-dimensional meteorological data computation and visualisation. *Journal of Open Research Software*, 7, 1, 21, 2019. <http://doi.org/10.5334/jors.267>.
- [42] C. He, S. Hong, H. Mu, P. Tu, L. Yang, B. Ke and J. Huang, Characteristics and meteorological factors of severe haze pollution in China. *Advances in Meteorology*, 2021, 1-15, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/6680564>.
- [43] X. Tang, X. Chen and Y. Tian, Chemical composition and source apportionment of PM_{2.5}—A case study from one year continuous sampling in the Chang-Zhu-Tan urban agglomeration. *Atmospheric Pollution Research*, 8, 5, 885-899, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2017.02.004>.
- [44] T.C. Cumhurbaşkanlığı Menzuat Bilgi Sistemi, Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği. <https://www.mevzuat.gov.tr/File/GeneratePdf?mevzuatNo=12188&mevzuatTur=KurumVeKurulusYonetmeli&mevzuatTertip=5>, Erişim Tarihi 9 Haziran 2024.
- [45] European Commission, EU air quality standards. https://environment.ec.europa.eu/topics/air/air-quality/eu-air-quality-standards_en, Erişim Tarihi 9 Haziran 2024.
- [46] K. Ulutaş, S. K. M. Abujayyab and S. Abu Amr, Evaluation of the major air pollutants levels and its

- interactions with meteorological parameters in Ankara. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 9, 4, 1284-1295, 2021. <https://doi.org/10.21923/jesd.939724>.
- [47] M. Yang, T. Ma and C. Sun, Evaluating the impact of urban traffic investment on SO₂ emissions in China cities. Energy Policy, 113, 20-27, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.10.039>.
- [48] V. Singh, S. Singh, A. Biswal, A. P. Kesarkar, S. Mor and K. Ravindra, Diurnal and temporal changes in air pollution during COVID-19 strict lockdown over different regions of India. Environmental Pollution, 266, 3, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.11.5368>.
- [49] S. Mor, S. A. Kumar, T. Singh, S. Dogra, V. Pandey and K. Ravindra, Impact of COVID-19 lockdown on air quality in Chandigarh, India: Understanding the emission sources during controlled anthropogenic activities. Chemosphere, 263, 127978, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127978>.
- [50] G. Prabhakar, A. Sorooshian, E. Toffol, A. F. Arellano and E. A. Betterton, Spatiotemporal distribution of airborne particulate metals and metalloids in a populated Arid Region. Atmospheric Environment, 92, 339-347, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.04.044>.
- [51] V. Evagelopoulou, P. Begou, P. Kassomenos and S. Zoras, Investigation of the particulate air pollution and the ratio of PM_{2.5} to PM₁₀ concentrations in the atmosphere over the lignite mining and lignite-fired power plants region of Western Macedonia, Greece. Iop Conference Series Earth and Environmental Science, 1113, 012077, 2022. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1123/1/012077>.
- [52] S. Dursun, Effects of climate change and drought in Konya: A Review. International Journal of Ecosystems and Ecology Science (IJEES), 10, 4, 595-602, 2020. <https://doi.org/10.31407/ijeec.10.403>.
- [53] D. D. Yavaşlı and E. Erhat, Climate model projections of aridity patterns in Türkiye: A comprehensive analysis using CMIP6 models and three aridity indices. International Journal of Climatology, 43, 13, 6207-6224, 2023. <https://doi.org/10.1002/joc.8201>.
- [54] E. S. Uzunpinar, I. Imamoglu, A. Rahmani and G. Tuncel, Modification of Saharan dust size distribution during its transport over the Anatolian Plateau. Sci Total Environ, 892, 164646, Sep 20 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164646>.
- [55] E. Koçak and İ. Balcılar, Spatio-temporal variation of particulate matter with health impact assessment and long-range transport - case study: Ankara, Türkiye. Science of the Total Environment, 938, 173650, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173650>.
- [56] Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Eskişehir Temiz Hava Eylem Planı THEP (2014-2019), 2014, Erişim Adresi: <https://webdosya.csb.gov.tr/db/eskisehir/webicerik/webicerik1221.pdf>.
- [57] P. Tarín-Carrasco, U. Im, C. Geels, L. Palacios-Peña and P. Jiménez-Guerrero, Contribution of fine particulate matter to present and future premature mortality over Europe: A non-linear response. Environment International, 153, 106517, 2021. <https://doi.org/10.1016%2Fj.envint.2021.106517>.

