



Konya ilinde PM₁₀ ve SO₂ kirleticilerinin zamansal ve mekânsal değişimi ile PM₁₀ maruziyetine bağlı sağlık risk değerlendirmesi

Temporal and spatial variation of PM₁₀ and SO₂ pollutants and health risk assessment of PM₁₀ exposure in Konya province

Halil Aydın¹ , Ebru Koçak^{2,*}

^{1,2}Aksaray Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 68100, Aksaray, Türkiye

Öz

Bu çalışma, 2019–2021 yılları arasında Konya ilinde PM₁₀ ve SO₂ kirleticilerinin zamansal ve mekânsal değişimini analiz etmiş; ayrıca PM₁₀ maruziyetine bağlı sağlık etkilerini Dünya Sağlık Örgütü'nün AirQ+ modeli aracılığıyla nicel olarak değerlendirmiştir. PM₁₀'un yıllık ortalama konsantrasyonu 45.7 ile 54.6 µg m⁻³ arasında değişmiş olup, tüm yıllarda WHO'nun önerdiği yıllık sınır değerin (15 µg m⁻³) oldukça üzerinde seyretmiştir. SO₂ düzeyleri ise özellikle 2021 yılında artış göstermiştir. Mekânsal analiz sonuçları, her iki kirleticinin de kentsel merkezlerde ve düşük hava sirkülasyonuna sahip bölgelerde yoğunlaştığını ortaya koymuştur. AirQ+ analizleri doğrultusunda, PM₁₀ maruziyetine bağlı mevsimsel atfedilebilen ölüm sayısı 788 ile 2,861 kişi arasında hesaplanmış; en yüksek değer 2021 sonbaharında, ortalama PM₁₀ konsantrasyonunun 55.4 µg m⁻³ olduğu dönemde gözlenmiştir. Bulgular, PM₁₀ kirliliğinin mevsimsel ve bölgesel düzeyde belirgin farklılıklar gösterdiğini ve bu değişimin sağlık etkileri üzerinde doğrudan etkili olduğunu ortaya koymuştur.

Anahtar kelimeler: Hava kalitesi, PM₁₀, SO₂, Mekânsal dağılım, Sağlık riski

1 Giriş

Hava kirliliği, günümüzde yalnızca çevresel bir sorun olmaktan çıkmış, küresel ölçekte halk sağlığını tehdit eden başlıca çevresel risk faktörlerinden biri haline gelmiştir [1]. Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ), hava kirliliğini insan sağlığı için en büyük çevresel tehdit olarak tanımlamakta ve her yıl dünya genelinde yaklaşık 7 milyon erken ölüme neden olduğunu bildirmektedir [2]. Bu etkiler, özellikle kentsel alanlarda yoğunlaşmakta; sanayi, ulaşım ve ısınma gibi antropojenik faaliyetler sonucunda atmosfere salınan kirleticiler, ciddi solunum ve kardiyovasküler hastalıklara yol açmaktadır [3, 4].

Partikül madde (PM₁₀) ve kükürtdioksit (SO₂), hem yaygın maruziyet hem de sağlık etkileri açısından en kritik kirleticiler arasında yer almaktadır [5]. PM₁₀, çapı 10 mikrometreden küçük olan ve akciğerin derin bölgelerine ulaşabilen parçacıklardan oluşur [6]. Bu parçacıklar astım, kronik obstrüktif akciğer hastalığı (KOAH) ve

Abstract

This study analyzed the temporal and spatial changes of PM₁₀ and SO₂ pollutants in Konya province between 2019 and 2021 and also quantitatively evaluated the health effects resulting from PM₁₀ exposure using the World Health Organization's AirQ+ model. Annual mean concentrations of PM₁₀ varied between 45.7 and 54.6 µg m⁻³, significantly exceeding the annual limit value (15 µg m⁻³) recommended by WHO in all years. SO₂ levels notably increased, particularly in 2021. Spatial analysis results indicated that both pollutants were concentrated in urban centers and areas with low air circulation. Based on AirQ+ analyses, the number of seasonally attributable deaths due to PM₁₀ exposure was estimated to be between 788 and 2,861 people; the highest value was recorded in the autumn of 2021, when the average PM₁₀ concentration reached 55.4 µg m⁻³. The findings highlighted that PM₁₀ pollution exhibited significant variations at both seasonal and regional levels, and this change had a direct impact on health outcomes.

Keywords: Air quality, PM₁₀, SO₂, Spatial distribution, Health risk

kardiyovasküler hastalıkların tetikleyicisi olabilir [7]. Öte yandan, SO₂, başlıca fosil yakıtların yanmasıyla oluşan reaktif bir gazdır ve özellikle hassas gruplarda akut solunum semptomlarını şiddetlendirebilmektedir [8].

PM₁₀ ve SO₂'ye maruziyetin mekânsal ve zamansal boyutları, çevre yönetimi, halk sağlığı ve kentsel planlama açısından kritik öneme sahiptir. Avrupa Birliği ülkelerinde yürütülen APHEA (Air Pollution and Health: A European Approach) projesi, PM₁₀ seviyesindeki her 10 µg m⁻³ artışın kardiyovasküler ölümleri %0.76, solunum sistemi ölümlerini ise %0.58 oranında artırdığını ortaya koymuştur [9]. Gelişmekte olan ülkelerde, özellikle İran, Hindistan ve Çin gibi yüksek hava kirliliği düzeyine sahip bölgelerde yapılan çalışmalar da bu etkileri doğrulamaktadır [10-12].

Türkiye'de ise hava kalitesi izleme altyapısı son yıllarda gelişmiş olsa da, uzun dönemli ve mekânsal detaylı analizlerin sınırlı olduğu gözlemlenmektedir. İstanbul, Ankara ve Gaziantep gibi şehirlerde yapılan çalışmalar,

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ebrukocak@aksaray.edu.tr (E. Koçak)

Geliş / Received: 23.05.2025 Kabul / Accepted: 08.08.2025 Yayınlanma / Published: 15.10.2025

doi: 10.28948/ngumuh.1704780

PM₁₀'un özellikle ısınma ve trafik kaynaklı olarak sınır değerlerin üzerine çıktığını ve bu artışların meteorolojik değişkenlerle ilişkili olduğunu göstermektedir [13-15]. Konya özelinde yapılan araştırmalar ise çoğunlukla kısa süreli veri setlerine dayanmakta ve kirleticilerin mevsimsel dağılımı, meteorolojik etkileşimleri ve sağlık etkileriyle entegrasyonu çoğu zaman ihmal edilmektedir.

Bu çalışma, Konya ilinde 2019–2021 yılları arasında PM₁₀ ve SO₂ kirleticilerinin zamansal ve mekânsal değişimlerini kapsamlı biçimde analiz etmekte ve PM₁₀ maruziyetinin sağlık etkilerini Dünya Sağlık Örgütü tarafından geliştirilen AirQ+ yazılımı aracılığıyla değerlendirmektedir. Bu bağlamda, literatürde eksik kalan üç temel alan hedeflenmektedir: (i) PM₁₀ ve SO₂'nin üç yıllık değişiminin incelenmesi (ii) mekânsal dağılımının Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ile modellenmesi, (iii) PM₁₀ maruziyetine bağlı mortalite risklerinin AirQ+ ile nicel olarak hesaplanması.

2 Materyal ve metod

Bu çalışmada kullanılan PM₁₀ ve SO₂ düzeyleri, Türkiye Cumhuriyeti Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'na bağlı Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı kapsamında Konya ilinde faaliyet gösteren yedi sabit hava kalitesi izleme istasyonundan elde edilmiştir (Şekil 1). Veri seti Ocak 2019–Aralık 2021 dönemini kapsamaktadır. Veri güvenilirliğini sağlamak amacıyla, yıllık bazda %60'ın altında veri temin edilen istasyonlar çalışmadan çıkarılmış ve yıllık eksik veri sayısı 92 günü aşan örnekler analiz kapsamı dışında bırakılmıştır [16].

Bu çalışmada hava kalitesi verilerinin zamansal ve mekânsal analizlerinin daha sağlıklı gerçekleştirilebilmesi amacıyla eksik verilerin tamamlanması süreci uygulanmıştır. Özellikle PM₁₀ ve SO₂ parametrelerinde gözlemlenen günlük ölçüm eksiklikleri, analizlerin bütünlüğünü ve güvenilirliğini olumsuz etkileyebilecek düzeydedir. Bu bağlamda, eksik veri problemiyle başa çıkmak amacıyla "MissForest" algoritması kullanılmıştır.

Bu çalışmada eksik veri problemini gidermek için MissForest algoritması tercih edilmiştir. MissForest, hem sürekli hem de kategorik değişkenlerde etkili çalışabilen, rastgele orman (Random Forest) tabanlı, yinelemeli bir imputasyon yöntemidir. Literatürde, özellikle çevresel veri setleri gibi çok değişkenli ve eksiklik oranı orta düzeyde olan durumlarda, ortalama/mode tamamlama, k-NN ve MICE gibi yöntemlere kıyasla daha düşük hatayla tamamlama yaptığı gösterilmiştir [17]. Bu bağlamda, PM₁₀ ve SO₂ değişkenlerindeki günlük veri eksiklikleri sırasıyla %6.3 ve %7.1 düzeyinde olup, MissForest bu eksik değerleri mevcut verilerle korelasyon yapısını bozmadan tahmin edebilmiştir.

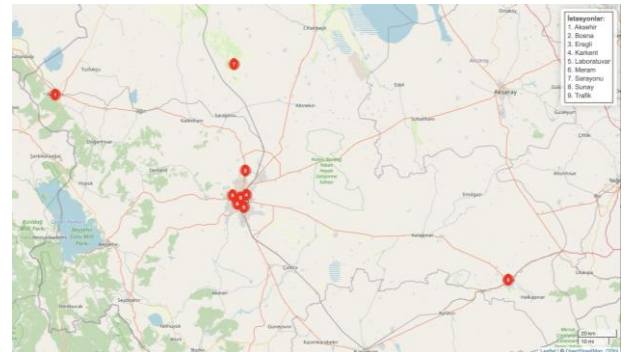
İmputasyon sonrası veri setinin tutarlılığı, eksiksiz gözlemlerle tamamlanmış veri arasındaki temel istatistiklerin karşılaştırılmasıyla test edilmiştir. Aritmetik ortalama, medyan ve standart sapma gibi ölçütler açısından anlamlı bir fark gözlenmemiş ($p > 0.05$) ve varyans yapısının korunduğu belirlenmiştir.

2.1 İstatistiksel değerlendirme ve limit aşım analizleri

Bu çalışmada elde edilen veriler üzerinde tanımlayıcı istatistiksel analizler gerçekleştirilmiş; aritmetik ortalama,

medyan, maksimum, minimum ve standart sapma gibi temel ölçütler hesaplanmıştır. PM₁₀ için yıllık sınır değer 40 $\mu\text{g m}^{-3}$, SO₂ için ise 20 $\mu\text{g m}^{-3}$ olarak alınmış ve bu sınırların aşımı değerlendirilmiştir. Limit aşım analizleri, özellikle kamu sağlığına yönelik politika üretimi ve erken uyarı sistemlerinin geliştirilmesi açısından önem arz etmektedir [18].

Yıllar ve mevsimler arasındaki farklılıkların istatistiksel olarak test edilmesinde tek yönlü varyans analizi (One-Way ANOVA) kullanılmış; varyanslar arasındaki farklılıkların kaynaklarını belirlemek üzere Tukey HSD çoklu karşılaştırma testi uygulanmıştır [19]. Ayrıca zaman serisi eğilimlerinin belirlenmesi amacıyla çizgi grafikleri oluşturulmuş; istasyonlar arası farklar ise kutu grafikleri ile görselleştirilmiştir.



Şekil 1. Konya'nın Türkiye haritasındaki konumu ve hava kalitesi izleme istasyonları

2.2 Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ile mekânsal dağılım ve görselleştirme

Kirleticilerin mekânsal yayılımını değerlendirmek amacıyla CBS tabanlı analizler gerçekleştirilmiştir. Her bir hava kalitesi izleme istasyonunun (Akşehir, Sarayönü ve Ereğli dışında) coğrafi koordinatları (enlem-boylam) esas alınarak, 2019–2021 yıllarına ait yıllık ve mevsimsel ortalamalar mekânsal katmanlara dönüştürülmüştür.

Veri enterpolasyonu için Inverse Distance Weighting (IDW) yöntemi tercih edilmiştir. IDW, bilinmeyen noktaların değerlerini yakın çevresindeki bilinen noktaların değerleriyle ters orantılı olarak hesaplayan deterministik bir enterpolasyon yöntemidir. Bu yöntem, hava kirleticilerinin yayılımında topografya ve meteorolojik koşulların etkisi altında kalan lokal yoğunlukların daha doğru temsil edilmesini sağlamaktadır [20, 21]. Özellikle sınırlı sayıda istasyon verisiyle yapılan analizlerde, IDW yöntemi yüksek

doğruluk oranları sunması nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Ancak bu yöntemin önemli bir sınırlılığı, uzak noktaların etkisinin hızlı biçimde azalarak mekânsal otokorelasyonu tam olarak yansıtamamasıdır. Ayrıca IDW, verilerin mekânsal varyans yapısını dikkate almadığı için jeostatistiksel güven aralıkları sunamaz. Bu bağlamda alternatif bir yöntem olan Kriging, veri noktaları arasındaki varyogram yapısını analiz ederek daha istatistiksel temelli ve doğruluk oranı yüksek tahminler sunabilmektedir. Ancak Kriging yönteminin uygulanması için daha yoğun mekânsal veri ağı gereklidir ve işlem süresi oldukça yüksektir. Bu çalışmada yedi sabit izleme istasyonuna dayalı sınırlı sayıdaki veri nedeniyle, Kriging'in istatistiksel sağlamlığı sınırlı kalacağından IDW yöntemi tercih edilmiştir. Bununla birlikte, gelecekteki çalışmalarda izleme istasyonu sayısının artırılması halinde hem IDW hem de Kriging yöntemlerinin birlikte uygulanarak karşılaştırmalı analiz yapılması önerilmektedir [22].

2.3 AirQ+ modeli ile sağlık etkilerinin sayısallaştırılması

Bu çalışmada, 2019–2021 yılları arasında Konya ilinde gözlemlenen PM₁₀ düzeylerinin sağlık üzerindeki etkileri, Dünya Sağlık Örgütü'nün (WHO) önerdiği AirQ+ metodolojisi çerçevesinde değerlendirilmiştir [23]. Sağlık etkisi hesaplamalarında, WHO'nun 2021 yılında yayımladığı güncel hava kalitesi kılavuzları esas alınmıştır. Hesaplamalar sırasında, partikül madde (PM₁₀) maruziyeti ile mortalite arasındaki ilişkiyi ifade eden göreceli risk (RR) değeri 1.06 olarak alınmıştır. Bu değer, PM₁₀ düzeyinde 10 µg/m³'lük bir artışın toplam ölüm riskini %6 oranında artırdığı varsayımına dayanmaktadır [24].

PM₁₀ için kullanılan eşik değeri, WHO'nun 2021 yılında yayımladığı hava kalitesi kılavuzunda önerilen yıllık sınır olan 15 µg m⁻³ olarak kabul edilmiştir [25]. Türkiye için tahmini bazal ölüm oranı 600 ölüm/100.000 kişi olarak belirlenmiştir. Bu parametrelere dayanarak, doz-tepki fonksiyonunda kullanılan β katsayısı şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\beta = \frac{\ln(1.06)}{10} \approx 0.00583 \quad (1)$$

Bu katsayı kullanılarak her mevsim için atfedilen fraksiyon (AF) hesaplanmıştır. Atfedilen fraksiyon formülü şu şekildedir:

$$AF = 1 - e^{-\beta(c - c^0)} \quad (2)$$

Buradan elde edilen AF değeri, bazal ölüm oranı (MR) ve yıl ortası nüfusu (N) ile çarpılarak, mevsimsel bazda atfedilebilen ölüm sayısı hesaplanmıştır:

$$\text{Ölüm} = AF \times MR \times N \quad (3)$$

Nüfus verileri Türkiye İstatistik Kurumu'ndan (TÜİK) temin edilmiş ve yıllık ortalama nüfus şu şekilde alınmıştır: 2019 için 2.232.374, 2020 için 2.250.020 ve 2021 için 2.273.661 kişi [26]. Tüm hesaplamalar, mevsimsel ortalama PM₁₀ konsantrasyonları üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bu

sayede WHO'nun eşik değerine göre her mevsim için karşılaştırmalı bir sağlık riski tahmini yapılmıştır.

3 Bulgular ve tartışma

3.1 PM₁₀ konsantrasyonlarının değerlendirilmesi

PM₁₀, hem kısa hem de uzun vadeli sağlık etkileri nedeniyle Dünya Sağlık Örgütü (WHO) ve Avrupa Birliği tarafından önemle izlenen başlıca hava kirleticiler arasında yer almaktadır. Konya ilinde 2019–2021 yılları arasında yürütülen ölçümler, bu kirleticinin mekânsal ve zamansal dağılımında belirgin farklılıklar olduğunu ortaya koymuştur. İstasyon bazlı yıllık ortalamalar incelendiğinde en yüksek PM₁₀ seviyeleri Karkent ve Sunay istasyonlarında gözlenmiştir (Şekil 3). Karkent istasyonunda PM₁₀ konsantrasyonları 2019 yılında 53.9 µg m⁻³, 2020 yılında 56.6 µg m⁻³ ve 2021 yılında 72.0 µg m⁻³ olarak ölçülmüştür. Sunay istasyonunda ise aynı yıllarda sırasıyla 49.9 µg m⁻³, 54.6 µg m⁻³ ve 60.3 µg m⁻³ seviyelerinde değerler kaydedilmiştir. Bu istasyonların yüksek değerleri, yoğun trafik akışı, konut ısıtması ve yerel emisyon kaynaklarına yakınlıkla ilişkilendirilmektedir [27, 28].

Trafik, Laboratuvar ve Akşehir istasyonlarında da özellikle 2021 yılında yüksek PM₁₀ ortalamaları elde edilmiştir. Trafik istasyonunda bu değer 42.9 µg m⁻³, Laboratuvar'da 38.8 µg m⁻³ ve Akşehir'de 36.9 µg m⁻³ olarak belirlenmiştir. Buna karşılık, daha düşük seviyeler Sarayönü ve Ereğli gibi kırsal yerleşim alanlarında kaydedilmiştir. Sarayönü'nde PM₁₀ yıllık ortalamaları 2019'da 20.4 µg m⁻³, 2020'de 19.8 µg m⁻³ ve 2021'de 25.0 µg m⁻³; Ereğli'de ise aynı yıllarda sırasıyla 22.3 µg m⁻³, 24.7 µg m⁻³ ve 25.7 µg m⁻³ düzeyindedir. Meram istasyonunda 2019'da 37.6 µg m⁻³ olan PM₁₀ ortalaması, 2020'de 31.9 µg m⁻³ ve 2021'de 30.5 µg m⁻³ seviyesine gerilemiştir. Bosna istasyonunda ise bu değerler üç yıl boyunca 30–59 µg m⁻³ aralığında seyretmiştir.

Yıllık genel ortalamalar tüm istasyonların birlikte değerlendirilmesiyle hesaplandığında, PM₁₀ konsantrasyonlarının 2019 yılında 35.5 µg m⁻³, 2020 yılında 36.5 µg m⁻³ ve 2021 yılında 40.6 µg m⁻³ olduğu görülmektedir. Bu sonuçlara göre 2021 yılı dışında Türkiye'nin ulusal yıllık sınır değeri olan 40 µg m⁻³ aşılmamış; ancak tüm yıllarda WHO'nun önerdiği 15 µg m⁻³ yıllık sınır eşiği tüm istasyonlarda ve her yıl boyunca aşılmıştır. 2021 yılında yaşanan artış, özellikle Karkent ve Sunay gibi bazı merkezî istasyonlardaki yüksek konsantrasyonlara bağlıdır. Bu eğilim, bölgesel hava kalitesinde uzun vadeli ve mevsimsel etkilere bağlı bir bozulma riskine işaret etmektedir [29].

Şekil 2'deki kutu grafikleri, Konya ilindeki farklı izleme istasyonlarında PM₁₀ ve SO₂ konsantrasyonlarının istatistiksel dağılımını görselleştirmektedir. PM₁₀ değerlerine bakıldığında, Karkent, Sunay ve Akşehir istasyonlarında medyan seviyelerin görece yüksek olduğu ve bu bölgelerde aykırı (uç) değerlerin sıkça gözlemlendiği dikkat çekmektedir. Bu durum, söz konusu bölgelerde trafik, sanayi faaliyetleri veya evsel ısınma kaynaklı emisyonların etkili olduğunu göstermektedir. Öte yandan, Sarayönü ve Ereğli gibi daha kırsal alanlarda medyan değerlerin düşük, dağılım aralığının ise daha dar olması, bu bölgelerdeki kirletici kaynaklarının daha sınırlı olduğunu ortaya koymaktadır.

3.2 SO₂ konsantrasyonlarının değerlendirilmesi

SO₂, özellikle kömür ve diğer fosil yakıtların yakılması sonucu ortaya çıkan önemli bir hava kirleticisidir [30, 31]. Konya ilinde 2019–2021 yılları arasında elde edilen veriler, bu kirleticinin istasyonlar arasında belirgin dağılım farklılıkları gösterdiğini ortaya koymuştur. Yıllık ortalamalar dikkate alındığında en yüksek SO₂ seviyeleri Sunay istasyonunda kaydedilmiştir (Şekil 4). Bu istasyonda 2019 yılında 30.1 µg m⁻³, 2020 yılında 15.5 µg m⁻³ ve 2021 yılında 21.2 µg m⁻³ değerleri ölçülmüştür. İncelenen yıllar arasında 2019 ve 2021 yıllarında ölçülen PM₁₀ değerleri, Türkiye'nin yıllık sınır değeri olan 20 µg m⁻³'ün üzerinde gerçekleşmiştir. Bu durum, ilgili bölgedeki yoğun katı yakıt kullanımı ve yerel kaynaklı emisyonlarla ilişkilendirilebilir [32, 33].

Diğer istasyonlar arasında Meram istasyonu 2021 yılında 13.5 µg m⁻³ ile öne çıkarken, Akşehir'de 2021 yılı değeri 12.8 µg m⁻³ olarak ölçülmüştür. Bu değerler ulusal sınırın altında olsa da, WHO'nun önerdiği yıllık sınır olan 10 µg m⁻³'e oldukça yakındır. Meram istasyonunda 2019 yılında 14.1 µg m⁻³, 2020 yılında ise 11.5 µg m⁻³ seviyelerinde değerler elde edilmiştir.

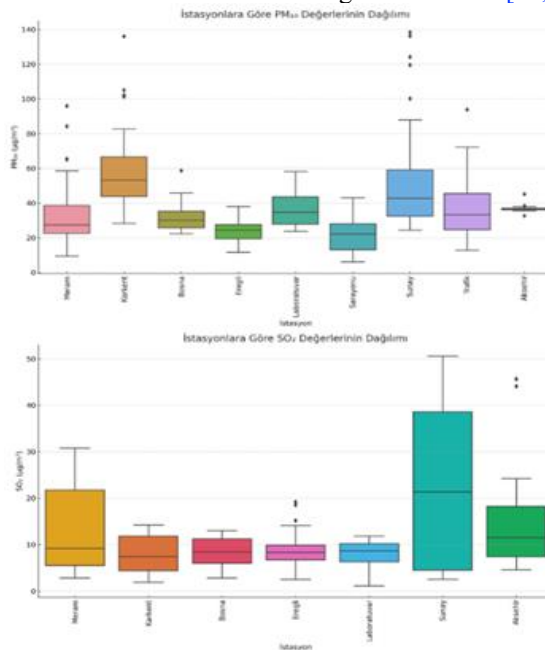
SO₂ seviyeleri bazı kentsel istasyonlarda, özellikle düşük hava sirkülasyonu veya lokal emisyon kontrolünün etkili olduğu bölgelerde, diğer kentsel noktalara kıyasla daha düşük seviyelerde ölçülmüştür. Örneğin, Konya şehir merkezine yakın konumda yer alan ve yoğun konut alanı barındıran Karkent istasyonunda 2020 yılı ortalama SO₂ değeri 4.6 µg m⁻³, Bosna istasyonunda ise aynı yıl 5.4 µg m⁻³ olarak ölçülmüştür. Bu düşük seviyeler, ilgili dönemlerdeki meteorolojik koşullar, yakıt türü farklılıkları veya bireysel ısınma sistemlerinin özellikleriyle açıklanabilir [34, 35]. Laboratuvar istasyonu da benzer şekilde 2020 yılında 5.7 µg m⁻³ düzeyinde SO₂ ortalamasına sahiptir. Diğer yandan, Ereğli istasyonunda üç yıllık süreç boyunca ölçülen SO₂ değerleri 8–9 µg m⁻³ aralığında kalmış; bu da kentsel merkez

dışındaki ilçelerde emisyon seviyelerinin görece sabit seyrettiğini göstermektedir.

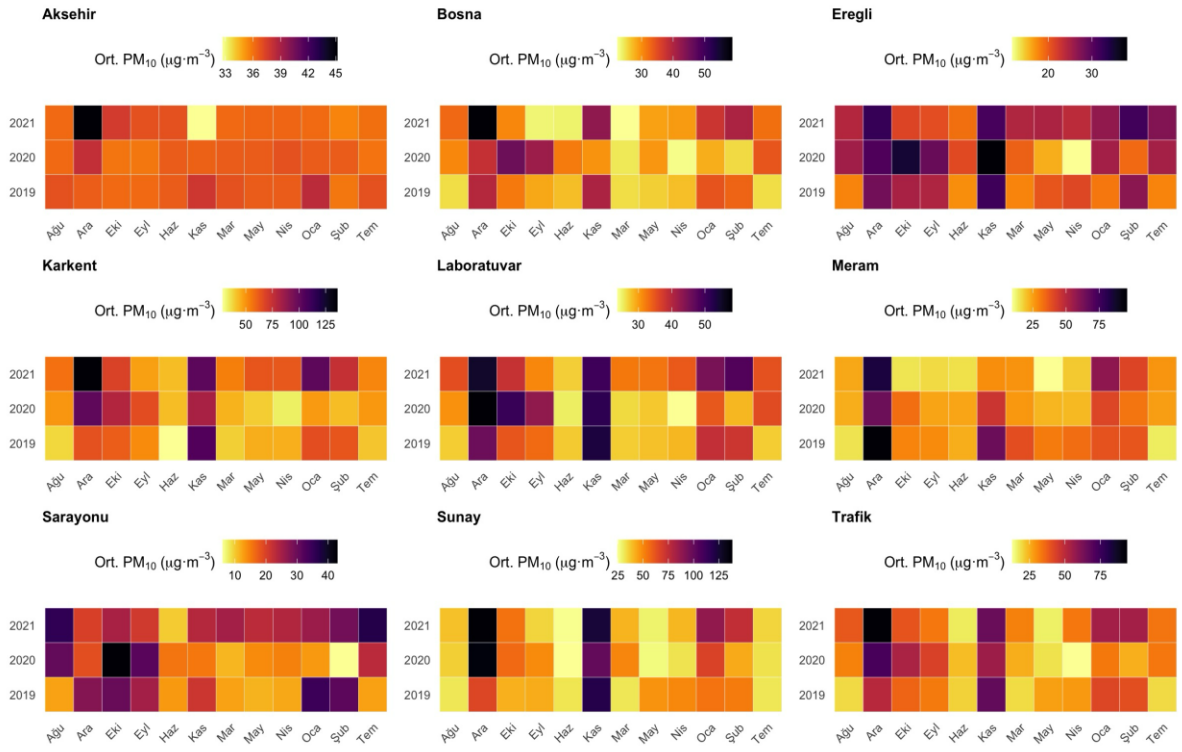
Yıllık genel ortalamalar tüm istasyonlar dikkate alınarak değerlendirildiğinde, Konya ili için 2019 yılında 14.9 µg m⁻³, 2020 yılında 8.6 µg m⁻³ ve 2021 yılında 11.6 µg m⁻³ düzeylerinde SO₂ konsantrasyonları hesaplanmıştır. 2021 yılında gözlemlenen bu artışın, yalnızca kış aylarına özgü ısınma kaynaklı emisyonlarla sınırlı kalmadığı; aynı zamanda COVID-19 pandemisi sonrası dönemde endüstriyel ve ticari faaliyetlerin yeniden hız kazanmasıyla da ilişkili olabileceği değerlendirilmektedir. Literatürde, pandemi sonrası ekonomik canlanma süreçlerinin hava kirleticilerinde geçici artışlara yol açtığına dair bulgulara sıklıkla rastlanmaktadır. Ayrıca, bu dönemde enerji piyasalarında yaşanan dalgalanmalara bağlı olarak daha düşük kaliteli yakıtların kullanımının artması, SO₂ emisyonlarını tetiklemiş olabilir. Bu değerler, hiçbir yıl için Türkiye'nin 20 µg m⁻³'lük ulusal sınır değerini aşmamıştır. Ancak WHO'nun daha düşük yıllık sınırı göz önüne alındığında, özellikle 2019 ve 2021 yıllarında sınırın aşıldığı görülmektedir.

Şekil 2'de SO₂ dağılımında en yüksek medyan değer Sunay istasyonunda gözlemlendiği, bunu Akşehir ve Meram istasyonlarının takip ettiği görülmektedir. Sunay istasyonundaki geniş dağılım aralığı ve yüksek maksimum değer, özellikle kış aylarında ısınma amaçlı kullanılan düşük kaliteli fosil yakıtların SO₂ seviyelerini ciddi biçimde artırdığını düşündürmektedir. Karkent ve Ereğli istasyonlarında ise hem medyan değerler hem de dağılım aralığı görece daha düşüktür. Bu farklılıklar, kirletici kaynakların mekânsal dağılımı ve meteorolojik koşullarla ilişkili olarak değerlendirilebilir.

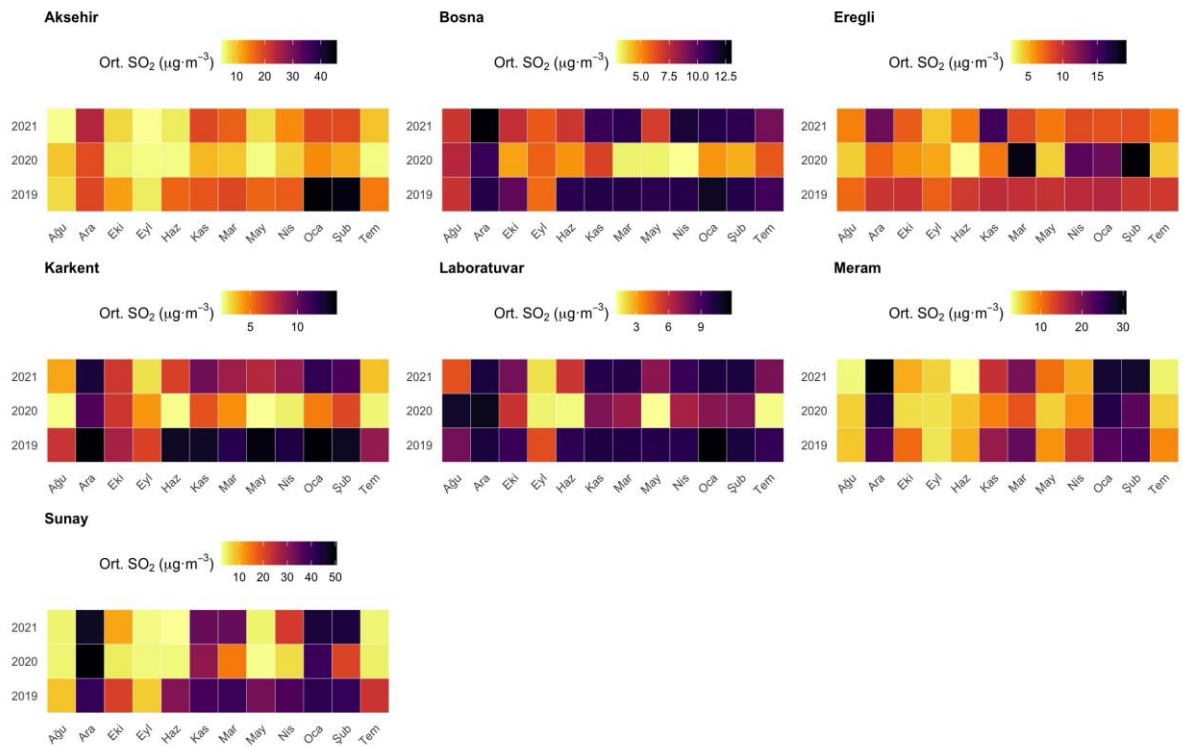
Bu bulgular, SO₂'nin zamansal ve mekânsal dağılımında konut ısıtması, yerleşim yoğunluğu ve endüstriyel etkinliklerin etkili olduğunu, buna karşın kırsal alanlarda konsantrasyonların daha düşük düzeyde kaldığını göstermektedir [36, 37].



Şekil 2. İstasyonlara göre PM₁₀ ve SO₂ değerlerinin dağılımı



Şekil 3. PM_{10} aylık ortalama konsantrasyon değerleri ($\mu g m^{-3}$) (2019-2021)



Şekil 4. SO_2 aylık ortalama konsantrasyon değerleri ($\mu g m^{-3}$) (2019-2021)

3.3 İstatistiksel analiz sonuçları

PM₁₀ düzeylerinin istatistiksel olarak yıl ve mevsimlere göre anlamlı bir farklılık gösterip göstermediğini belirlemek amacıyla tek yönlü varyans analizi (ANOVA) ve ardından çoklu karşılaştırma testi olarak Tukey HSD uygulanmıştır. Analizler, 2019–2021 yılları arasındaki verileri kapsamaktadır.

Yıllar arası karşılaştırmalarda PM₁₀ ortalamaları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark gözlenmemiştir ($p > 0.05$). Tukey HSD testi sonuçları da bu bulguyu desteklemektedir; 2019, 2020 ve 2021 yılları arasındaki ortalama farkların güven aralıkları sıfırı kapsamaktadır (Tablo 1). Bu sonuç, yıllık bazda PM₁₀ maruziyetinin belirli bir sabitlik gösterdiğini ve yıllık politikaların, genel eğilimde anlamlı bir değişim yaratmadığını düşündürmektedir.

Buna karşın, mevsimsel analizlerde PM₁₀ değerlerinde istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar tespit edilmiştir ($p < 0.001$). Özellikle yaz ve ilkbahar aylarında ölçülen PM₁₀ seviyeleri, kış ve sonbahar aylarına kıyasla anlamlı düzeyde daha düşük bulunmuştur. Bu farklılıklar yalnızca istatistiksel olarak değil, aynı zamanda halk sağlığı açısından da klinik öneme sahiptir. PM₁₀ ve SO₂ seviyelerinin kış ve sonbahar aylarında anlamlı şekilde artması, solunum yolu hastalıkları ve mortalite açısından önemli bir risk unsuru olarak değerlendirilmiştir. Bu fark, özellikle evsel ısınma kaynaklı emisyonların ve meteorolojik koşulların kış aylarında hava kalitesini olumsuz yönde etkilemesiyle açıklanabilir. Kış aylarında sıcaklık terselmesi (inversiyon) ve durağan hava koşulları partikül maddelerin atmosferde birikmesine neden olurken; yaz aylarında ise artan sıcaklık ve atmosferik karışım yüksekliği bu partiküllerin dağılmasını kolaylaştırmaktadır [38].

Bu bulgular, hava kalitesine yönelik çevresel ve yapısal politikaların yalnızca yıllık ortalamalar üzerinden değil, mevsimsel varyasyonları dikkate alacak şekilde planlanması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Tablo 1. PM₁₀ değerlerinin yıllara ve mevsimlere göre Tukey HSD testi sonuçları

Grup 1	Grup 2	Ortalama Farkı	p-değeri
2019	2020	0.99	0.9339
2019	2021	5.14	0.1584
2020	2021	4.16	0.2983
Kış	Sonbahar	-4.59	0.4101
Kış	Yaz	-18.94	0.0000
Kış	İlkbahar	-18.82	0.0000
Sonbahar	Yaz	-14.35	0.0000
Sonbahar	İlkbahar	-14.23	0.0000
Yaz	İlkbahar	0.12	1.0000

Kentsel hava kirliliğinin önemli göstergelerinden biri olan SO₂ (kükürt dioksit), özellikle fosil yakıt kullanımına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu çalışmada 2019–2021 yıllarına ait veriler üzerinde yapılan varyans analizi ve Tukey HSD testi sonuçları, SO₂ konsantrasyonlarının hem yıllar hem de mevsimler

düzeyinde anlamlı değişiklikler gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Yıllara göre yapılan tek yönlü ANOVA sonucunda SO₂ düzeylerinde anlamlı farklar saptanmış ($p < 0.001$), Tukey HSD testi ile bu farkların özellikle 2019–2020 ve 2019–2021 yılları arasında istatistiksel olarak anlamlı olduğu belirlenmiştir (Tablo 2). 2019 yılına ait SO₂ ortalamaları, sonraki yıllara göre anlamlı derecede düşüktür. Bu durum, Türkiye’de özellikle 2020 yılında pandemi nedeniyle uygulanan sokağa çıkma kısıtlamaları ve enerji tüketimindeki düşüşle ilişkilendirilebilir. Nitekim pandemi döneminin hava kalitesi üzerindeki olumlu etkileri birçok çalışmada rapor edilmiştir [39, 40].

Mevsimsel değişime ilişkin analizler ise, kış aylarında ölçülen SO₂ seviyelerinin diğer tüm mevsimlere göre istatistiksel olarak anlamlı biçimde yüksek olduğunu ortaya koymaktadır ($p < 0.001$). Bu durum, bireysel ısınma kaynaklı emisyonların (özellikle kömür ve düşük kaliteli fosil yakıt kullanımı) artması ve atmosferde kirlenici birikimini kolaylaştıran meteorolojik koşulların etkisine bağlanabilir. Esposito ve arkadaşlarının çalışması da benzer şekilde, kış aylarında artan SO₂ seviyelerinin özellikle çocuk sağlığı üzerinde ciddi etkiler yarattığını vurgulamıştır [41].

Tablo 2. SO₂ değerlerinin yıllara ve mevsimlere göre Tukey HSD testi sonuçları

Grup 1	Grup 2	Ortalama Farkı	p-değeri
2019	2020	-6.33	0.0000
2019	2021	-3.38	0.0488
2020	2021	2.94	0.1007
Kış	Sonbahar	-9.60	0.0000
Kış	Yaz	-11.77	0.0000
Kış	İlkbahar	-7.46	0.0000
Sonbahar	Yaz	-2.18	0.4810
Sonbahar	İlkbahar	2.14	0.4983
Yaz	İlkbahar	4.32	0.0254

3.4 Mekânsal dağılım analizleri

3.4.1 PM₁₀’un mekânsal yayılımı

Konya iline ait CBS tabanlı analizlerde, PM₁₀ kirleniciisinin mekânsal dağılımı özellikle kentsel merkezlerde ve yoğun ulaşım ile sanayi alanlarına yakın bölgelerde yüksek konsantrasyonlarla karakterize edilmiştir. IDW enterpolasyon yöntemi kullanılarak oluşturulan dağılım haritaları (Şekil 5), özellikle Karkent, Sunay Park ve Trafik istasyonları çevresinde yıllık ortalamaların sıklıkla 60 $\mu\text{g m}^{-3}$ düzeyini aştığını göstermektedir. Bu değerler hem ulusal hem de uluslararası sınır değerlerin oldukça üzerindedir. Ölçüm verileri de bu bulguları desteklemekte; söz konusu istasyonlarda PM₁₀ medyan değerlerinin sırasıyla 53.3 $\mu\text{g m}^{-3}$ (Karkent), 42.7 $\mu\text{g m}^{-3}$ (Sunay) ve 33.4 $\mu\text{g m}^{-3}$ (Trafik) olduğu belirlenmiştir.

Mevsimsel düzeyde incelendiğinde, PM₁₀ konsantrasyonlarının özellikle kış ve sonbahar aylarında belirgin şekilde arttığı, buna karşılık yaz aylarında düştüğü gözlemlenmektedir. Bu durumun başlıca nedenleri arasında

katı yakıt kullanımına bağlı ısınma emisyonları, atmosferik inversiyon olayları ve zayıf hava sirkülasyonu sayılabilir. Literatürde de belirtildiği üzere, kış mevsimlerinde meydana gelen inversiyonlar, özellikle kapalı havzalarda (Konya Ovası gibi) hava kirleticilerinin alçak atmosferde birikmesini kolaylaştırmaktadır [3, 42].

Konya ilinde arazi kullanımı verileriyle birlikte değerlendirildiğinde, PM₁₀ yoğunluğunun özellikle yoğun nüfuslu konut alanlarında, trafik akslarının kesişim noktalarında ve ısınma amaçlı kömür kullanılan semtlerde daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca tarımsal faaliyetlere bağlı toz taşınımı, Konya gibi yarı-kurak iklim kuşaklarında PM₁₀ düzeylerinin yaz aylarında da tamamen düşmemesine neden olabilmektedir [43].

3.4.2 SO₂'nin mekânsal yayılımı

IDW tabanlı dağılım haritaları (Şekil 5), 2019–2021 yılları arasında Karkent, Meram ve Sunay istasyonları çevresinde SO₂ konsantrasyonlarının belirgin şekilde yükseldiğini göstermektedir. Ölçüm verileri de bu durumu desteklemekte; en yüksek medyan SO₂ değeri Sunay istasyonunda 21.4 µg m⁻³ olarak belirlenmiş, bunu Akşehir (11.5 µg m⁻³) ve Meram (9.2 µg m⁻³) takip etmiştir. Bu değerler, özellikle kış aylarında yerel kirletici kaynakların etkisiyle artış göstermektedir.

SO₂'nin başlıca kaynakları düşük kaliteli kömür kullanımı, sanayi baca emisyonları ve trafikten kaynaklanan ikincil oluşumlarla ilişkilidir. Konya'nın karasal iklim koşulları, atmosferik inversiyon riski ve kapalı havza niteliğindeki topoğrafyası, kış aylarında kirleticilerin atmosferde daha uzun süre kalmasına neden olmaktadır. Bu durum, özellikle bireysel ısınmada merkezi sistemlerin yaygın olmadığı bölgelerde, soba kullanımının yoğun olduğu mahallelerde kirlilik yükünü artırmaktadır. Ayrıca Ereğli

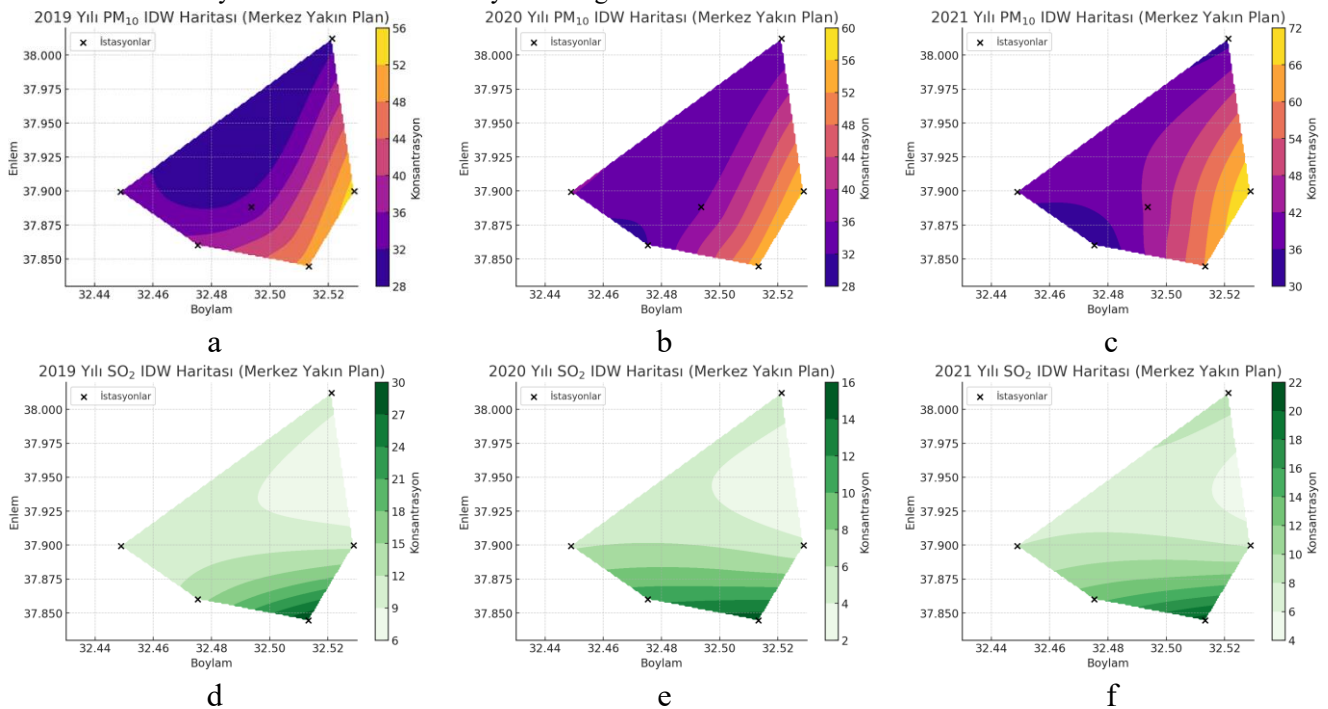
gibi sanayi faaliyetlerinin daha yoğun olduğu ilçelerde, yerel emisyonlar ve tarımsal atık yakımı gibi unsurlar bölgesel katkıyı güçlendirmektedir [44].

SO₂'nin mekânsal yayılım eğilimleri, PM₁₀ ile büyük oranda örtüşmekte olup aynı bölgelerde kirletici birikimiyle tanımlanan sıcak noktaların oluşmasına yol açmaktadır. Bu durum, özellikle çocuklar, yaşlı bireyler ve kronik hastalık taşıyan savunmasız gruplar açısından birleşik maruziyet riskini artırmakta, sağlık üzerindeki olumsuz etkilerin şiddetini yükseltmektedir.

3.5 PM₁₀ maruziyetine bağlı sağlık risk değerlendirmesi

Yapılan hesaplamalar, Dünya Sağlık Örgütü'nün (WHO) 2021 yılında güncellediği 15 µg m⁻³ sınır değeri temel alınarak, Konya ilinde 2019–2021 yılları arasında gözlemlenen PM₁₀ maruziyetine bağlı sağlık etkilerini mevsimsel düzeyde ortaya koymuştur. Analizler, özellikle sonbahar ve kış mevsimlerinde PM₁₀ düzeylerinin WHO eşik değerinin oldukça üzerinde seyrettiğini ve bu durumun önemli ölçüde sağlık yükü oluşturduğunu göstermektedir.

Tablo 3'te özetlenen değerlere göre, 2021 yılı sonbahar mevsiminde ortalama PM₁₀ konsantrasyonu 55.40 µg m⁻³ olup, WHO sınırının yaklaşık 3.7 katıdır. Bu dönemde tahmini olarak 2.861 ölüm PM₁₀ maruziyetine atfedilmiştir. Benzer şekilde 2019 sonbaharında PM₁₀ ortalaması 49 µg m⁻³, atfedilebilen ölüm sayısı ise 2.412 kişi olarak hesaplanmıştır. Kış mevsiminde de benzer bir eğilim gözlenmiştir; 2021 kışında ortalama PM₁₀ seviyesi 44.5 µg m⁻³, bu döneme ait tahmini ölüm sayısı ise 2.153 olmuştur. 2019 ve 2020 kışlarında ise sırasıyla 36.1 ve 31.6 µg m⁻³'lük ortalamalarla tahmini ölüm sayıları 1.549 ve 1.241 olarak belirlenmiştir.

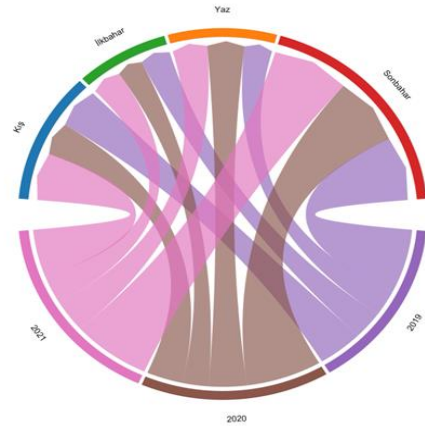


Şekil 5. PM₁₀ (a, b, c) ve SO₂ (d, e, f) kirlilik haritaları

Buna karşılık, ilkbahar ve yaz aylarında PM_{10} seviyeleri ve buna bağlı sağlık etkileri düşüş göstermiştir. Örneğin, 2020 ilkbaharında ortalama PM_{10} değeri $25.3 \mu g m^{-3}$ olup, atfedilen ölüm sayısı 788 kişi ile sınırlı kalmıştır. Yaz aylarında ise en düşük sağlık etkisi gözlenmiştir; 2019 yazında ortalama PM_{10} seviyesi $27.8 \mu g m^{-3}$ iken, buna bağlı ölüm tahmini 965 kişi olarak hesaplanmıştır. 2021 yazında bu değer 1.395, 2020 yazında ise 1.506 olarak gerçekleşmiştir (Tablo 3).

Yıl	Mevsim	PM ₁₀	Atfedilebilir ölüm sayısı
2019	Kış	36.1	1548.9
2019	Sonbahar	49.1	2412.0
2019	Yaz	27.8	965.0
2019	İlkbahar	28.9	1040.62
2020	Kış	31.6	1241.2
2020	Sonbahar	53.6	2722.1
2020	Yaz	35.3	1505.50
2020	İlkbahar	25.3	788.4
2021	Kış	44.5	2152.7
2021	Sonbahar	55.4	2861.1
2021	Yaz	33.5	1394.8
2021	İlkbahar	29.1	1074.3

Bu bulgular, mevsimsel farklılıkların hava kirliliği kaynaklı sağlık etkilerinde ne denli belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır [47]. Kış ve sonbahar aylarında, PM₁₀ seviyelerinde yaşanan artış, doğrudan ölüm riski ile ilişkilendirilebilir düzeydedir. Bu nedenle, bu dönemlerde alınacak önlemler, halk sağlığı açısından önemli kazanımlar sağlayabilir.



4 Sonuçlar

Çalışmada PM₁₀ konsantrasyonlarının üç yıl boyunca hem Türkiye'nin hem de WHO'nun yıllık sınır değerlerini aştığı; günlük sınır değer aşımalarının ise özellikle 2020 ve 2021 yıllarında dikkat çekici düzeylere ulaştığı tespit edilmiştir. SO₂ açısından da 2021 yılında önemli sayıda limit aşımı gözlenmiş, bu durum ısınma kaynaklı emisyonlar ve meteorolojik koşulların etkisiyle açıklanmıştır. Mekânsal analizler, kirliliğin merkez ilçelerde ve düşük hava sirkülasyonuna sahip bölgelerde yoğunlaştığını ortaya koymuş; PM₁₀ maruziyetinin 2019–2021 yılları arasında mevsimsel bazda 788 ile 2.861 ölüm arasında değişen sağlık yüküne yol açtığı belirlenmiştir.

Teşekkür

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

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %7

Kaynaklar

- [1] F. Chen, W. Zhang, M. F. B. Mfarrej, M. H. Saleem, K. A. Khan, J. Ma, A. Raposo and H. Han, Breathing in danger: Understanding the multifaceted impact of air pollution on health impacts. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 280, 116532, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116532>.
- [2] W. H. Organization, Ambient air pollution: Health impacts. 2021.
- [3] C. A. Pope and D. W. Dockery, Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56, 6, 709-742, 2006. <https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464485>.
- [4] İ. Balcılar, Eskişehir'de hava kirliliği: PM₁₀, PM_{2.5} ve SO₂ konsantrasyonlarının mekânsal-zamansal değişimi ve kaynaklarının değerlendirilmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13, 4, 1115-1126, 2024. https://doi.org/10.28948/ngu_muh.1459990.
- [5] P. Fu, W. Jiang, X. Tan, Y. Shu and L. Yang, Short-term attributable risk and economic burden of hospital admissions for anxiety disorders due to air pollution: a multicity time-stratified case-crossover study. *Environmental Health*, 24, 1, 4, 2025. <https://doi.org/10.1186/s12940-025-01157-8>.
- [6] J. L. Pereira, M. J. dos Anjos, J. T. Assis, R. G. Leitão, C. Canellas, F. T. Tsuyama and H. SG Filho, Assessment of suspended particulate matter in school environments in the city of Rio de Janeiro (Brazil) using X-ray fluorescence. *Radiation Physics and Chemistry*, 235, 112804, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2025.112804>.
- [7] R. D. Brook, S. Rajagopalan, C. A. Pope, J. R. Brook, A. Bhatnagar, A. V. Diez-Roux and F. Holguin, Particulate matter air pollution and cardiovascular disease. *Circulation*, 121, 21, 2331-2378, 2010. <https://doi.org/10.1161/CIR.0b013e3181dbecel>.
- [8] S. C. Izah, M. C. Ogwu, N. G. Etim, A. Shahsavani and Z. Namvar, Short-term health effects of air pollution. in *Air Pollutants in the Context of One Health: Fundamentals, Sources, and Impacts*: Springer, pp. 249-278, 2024.
- [9] K. Katsouyanni, G. Touloumi, C. Spix, J. Schwartz, F. Balducci, S. Medina and G. Rossi, Confounding and effect modification in the short-term effects of ambient particles on total mortality: Results from 29 European cities within the APHEA2 project. *Epidemiology*, 12, 5, 521-531, 2001. <https://doi.org/10.1097/00001648-200109000-00011>.
- [10] S. Maji, A. K. Dikshit and A. Deshpande, Assessment of air quality and its effects on health of residents of Delhi, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189, 6, 295, 2017. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-5993-7>.
- [11] W. Huang, J. Cao, Y. Tao, L. Dai, S. E. Lu, B. Hou and T. Zhu, Particulate air pollution and daily mortality in 17 Chinese cities. *Epidemiology*, 23, 4, 511-518, 2012. <https://doi.org/10.1097/EDE.0b013e31824a0b3c>.
- [12] Z. Khorrani, M. Pourkhosravani, A. Karamoozian, A. Jafari-Khounigh, M. E. Akbari, M. Rezapour, R. Khorrani, S. M. Taghavi-Shahri, H. Amini and K. Etemad, Ambient air pollutants and breast cancer stage in Tehran, Iran. *Scientific reports*, 14, 1, 3873, 2024. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-53038-8>.
- [13] Y. Ugurlu and M. Kara, Spatiotemporal analysis of air quality and influencing factors in urban centers of Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 24367-24380, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12009-0>.
- [14] M. Bahaeddin, H. Baltaci and B. Onat, The role of large-scale atmospheric circulations on long-term variations of PM₁₀ concentrations over Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 1, 1260-1275, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-31164-6>.
- [15] G. Tuna Tuygun and T. Elbir, Long-term spatiotemporal variation in atmospheric aerosol properties over Türkiye based on MERRA-2 reanalysis data: aerosol classification based on city type. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 28, 40655-40668, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27920-3>.
- [16] P. Kumar, M. Ketzel, S. Vardoulakis, L. Pirjola and R. Britter, Dynamics and dispersion of nanoparticles from road traffic in urban environments-A review. *Journal of Aerosol Science*, 42, 9, 580-603, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2011.06.001>.
- [17] D. J. Stekhoven and P. Bühlmann, MissForest—non-parametric missing value imputation for mixed-type data. *Bioinformatics*, 28, 1, 112-118, 2012. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btr597>.
- [18] J. Wang and S. Ogawa, Effects of meteorological conditions on PM_{2.5} concentrations in Nagasaki, Japan. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12, 8, 9089-9101, 2015. <https://doi.org/10.3390/ijerph120809089>.
- [19] A. Field, *Discovering Statistics using IBM SPSS Statistics* (4th ed.). Sage Publications, 2013.
- [20] G. Y. Lu and D. W. Wong, An adaptive inverse-distance weighting spatial interpolation technique. *Computers & Geosciences*, 34, 9, 1044-1055, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.07.010>.
- [21] M. Mohammadi, M. Mohammadi and S. M. M. Moezzi, Air pollution meteorology and dispersion. in *Air Pollution, Air Quality, and Climate Change*: Elsevier, pp. 51-82, 2025.

- [22] P. A. Burrough, R. A. McDonnell and C. D. Lloyd, Principles of geographical information systems. Oxford University Press, 2015.
- [23] W. H. Organization, AirQ+: Software tool for health risk assessment of air pollution, WHO Regional Office for Europe 2016.
- [24] G. Hoek, R. M. Krishnan, R. Beelen, A. Peters, B. Ostro, B. Brunekreef and J. D. Kaufman, Long-term air pollution exposure and cardio-respiratory mortality: a review. *Environmental Health*, 12, 1, 43, 2013. <https://doi.org/10.1186/1476-069x-12-43>.
- [25] W. H. Organization, WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization, 2021.
- [26] TÜİK Kurumsal. <https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=Nufus-ve-Demografi-109>, Erişim Tarihi 02.01.2025
- [27] R. Dimitrova and M. Velizarova, Assessment of the contribution of different particulate matter sources on pollution in Sofia City. *Atmosphere*, 12, 4, 423, 2021. <https://doi.org/10.3390/atmos12040423>.
- [28] T. Sarica, K. Sartelet, Y. Roustan, Y. Kim, L. Lugon, B. Marques, B. D'Anna, C. Chaillou and C. Larrieu, Sensitivity of pollutant concentrations in urban streets to asphalt and traffic-related emissions. *Environmental Pollution*, 332, 121955, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121955>.
- [29] F. Kunt, Z. C. Ayturan, F. Yümün, İ. Karagönen, M. Semerci and M. Akgün, Measurement and evaluation of particulate matter and atmospheric heavy metal pollution in Konya Province, Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193, 1-22, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09428-w>.
- [30] S. Amritha, V. Patel and J. Kuttippurath, The COVID-19 lockdown induced changes of SO₂ pollution in its Human-made global hotspots. *Global Transitions*, 6, 152-163, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.glt.2024.06.003>.
- [31] A. P. Pribadi, A. U. Rauf, Y. M. R. Rahman and Z. F. Haq, Air Quality and Urban Sustainable Development-Current Issues and Future Directions. in *Sustainable Urban Environment and Waste Management: Theory and Practice*: Springer, pp. 23-51, 2025.
- [32] D. Sari and A. Bayram, Quantification of emissions from domestic heating in residential areas of İzmir, Turkey and assessment of the impact on local/regional air-quality. *Science of the Total Environment*, 488, 429-436, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.11.033>.
- [33] Z. Koşan, D. Kavuncuoğlu, E. O. Çalıkoğlu and E. B. Yerli, Evaluation of air pollution by PM₁₀ and SO₂ levels in Erzurum province, Turkey: Descriptive study. *Journal of Surgery and Medicine*, 2, 3, 265-268, 2018. <https://doi.org/10.28982/josam.422921>.
- [34] M. Mahmoud, M. Ramadan, S. Naher, K. Pullen and A.-G. Olabi, The impacts of different heating systems on the environment: A review. *Science of the Total Environment*, 766, 142625, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142625>.
- [35] W. Lin, X. Xu, B. Ge and X. Liu, Gaseous pollutants in Beijing urban area during the heating period 2007–2008: variability, sources, meteorological, and chemical impacts. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 15, 8157-8170, 2011. <https://doi.org/10.5194/acp-11-8157-2011>.
- [36] R. Li, H. Fu, L. Cui, J. Li, Y. Wu, Y. Meng, Y. Wang and J. Chen, The spatiotemporal variation and key factors of SO₂ in 336 cities across China. *Journal of Cleaner Production*, 210, 602-611, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.062>.
- [37] M. Mokarram and E. Rastegar, Assessing the impact of coal furnace activities on air quality: A comprehensive spatial and temporal analysis. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 137, 103811, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2024.103811>.
- [38] R. Dubey, A. K. Patra and Nazneen, Vertical profile of particulate matter: A review of techniques and methods. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 15, 6, 979-1010, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11869-022-01192-1>.
- [39] Y. F. Elshorbany, H. C. Kapper, J. R. Ziemke and S. A. Parr, The status of air quality in the United States during the COVID-19 pandemic: a remote sensing perspective. *Remote Sensing*, 13, 3, 369, 2021. <https://doi.org/10.3390/rs13030369>.
- [40] M. Mousazadeh, B. Paital, Z. Naghdali, Z. Mortezania, M. Hashemi, E. Karamati Niaragh, M. Aghababaei, M. Ghorbankhani, E. Lichtfouse and M. Sillanpää, Positive environmental effects of the coronavirus 2020 episode: a review. *Environment, Development and Sustainability*, 23, 12738-12760, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01240-3>.
- [41] S. Esposito, V. Fainardi, A. Titolo, A. Lazzara, M. Menzella, B. Campana, A. Argentiero and N. Principi, How air pollution fuels respiratory infections in children: current insights. *Frontiers in Public Health*, 13, 1567206, 2025. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2025.1567206/full>.
- [42] A. P. K. Tai, L. J. Mickley and D. J. Jacob, Correlations between fine particulate matter (PM_{2.5}) and meteorological variables in the United States: Implications for the sensitivity of PM_{2.5} to climate change. *Atmospheric Environment*, 44, 32, 3976-3984, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.06.060>.
- [43] M. Viana, T. A. Kuhlbusch, X. Querol, A. Alastuey, R. M. Harrison, P. K. Hopke, W. Winiwarter, M. Vallius, S. Szidat and A. S. Prévôt, Source apportionment of particulate matter in Europe: A review of methods and results. *Journal of Aerosol Science*, 39, 10, 827-849, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2008.05.007>.
- [44] B. Brunekreef and S. T. Holgate, Air pollution and health. *The Lancet*, 360, 9341, 1233-1242, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(02\)11274-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(02)11274-8).
- [45] K. Slezakova and M. C. Pereira, 2020 COVID-19 lockdown and the impacts on air quality with emphasis on urban, suburban and rural zones. *Scientific reports*,

- 11, 1, 21336, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-99491-7>.
- [46] E. E. Agency, Air quality in Europe – 2020 report. Luxembourg: European Environment Agency, 2020.
- [47] B. Chen and H. Kan, Air pollution and population health: a global challenge. *Environmental health and preventive medicine*, 13, 94-101, 2008. <https://doi.org/10.1007/s12199-007-0018-5>.

