



Research Article

The Levels of Main Air Pollutant Parameters and Their Effects on Air Quality Index for Ardahan in the Period 2019 – 2023

Necla Barlık¹*, Rövşen Guliyev¹, Mustafa Akgün²

¹ Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Ardahan University, 75002, Ardahan, Türkiye

² Department of Occupational Health and Safety Program, Vocational School of Technical Sciences, Ardahan University, 75002, Ardahan, Türkiye

* Correspondence: neclabarlik@ardahan.edu.tr

Received: 16 May 2024; Accepted: 22 October 2024; Published: 31 December 2024

In this study, hourly and daily average HKI values of Ardahan city center were calculated for the 5-year period between 2019 and 2023. Hourly average AQI values were compared with the National AQI, and the levels of pollutant parameters (PM₁₀, SO₂, NO₂, CO and O₃) taken as basis in calculating the AQI were compared with the national regulations. The average 24-hour PM₁₀ concentration exceeded the 50 µg/m³ level specified in the regulations in 10.568 of the 41.466 hourly data recorded for at least 3 parameters at the same time, corresponding to approximately 25%. Hourly HKI averages calculated from the same data set, according to the National HKI evaluation criteria; 388 (0.01%) hours were in the “unhealthy” or “poor” category and 7.992 (19%) were in the “medium” or “delicate” category. PM₁₀ 24-hour average concentrations, with the highest values recorded between 28 and 31 December 2021, have the largest average daily values of 379 µg/m³ on 31 December 2021 and the largest average hourly values of 385 µg/m³ at 05:00 on the same date. has happened. The daily average maximum HKI value was calculated as 211 on 29.12.2021 and 214 at 07:00 on the same date. In addition, according to the impact analyzes carried out between AQI and pollution parameters, it was seen that the 24-hour average PM₁₀ concentrations were the most important parameter affecting the air quality index, with a rate of 88.5%.

Keywords: AQI, air pollutants, PM₁₀

Araştırma Makalesi

2019 – 2023 Döneminde Ardahan'da Başlıca Hava Kirletici Parametrelerinin Seviyeleri ve Hava Kalitesi İndeksine Etkileri

Öz: Bu çalışmada 2019 – 2023 yıllarını kapsayan 5 yıllık süre için Ardahan il merkezinin saatlik ve günlük ortalama HKİ değerleri hesaplanmıştır. Saatlik ortalama HKİ değerleri Ulusal HKİ ile ve HKİ'nin hesaplanmasında esas alınan kirletici parametrelerinin (PM₁₀, SO₂, NO₂, CO ve O₃) düzeyleri, ulusal mevzuatla ile karşılaştırılmıştır. Aynı saatte en az 3 parametre için ölçüm kaydedilmiş 41.466 adet saatlik verinin yaklaşık %25'ine tekabül eden 10.568 adedinde ortalama 24 saatlik PM₁₀ konsantrasyonu mevzuatta belirtilen 50 µg/m³ seviyesini aşmıştır. Aynı veri setinden hesaplanan saatlik HKİ ortalamaları, Ulusal HKİ değerlendirme ölçütlerine göre; 388 (%0,01) saat “sağlıksız” veya “kötü” ve 7.992 (%19) adet “orta” veya “hassas” kategoride yer almaktadır. 28 – 31 Aralık 2021 aralığında en yüksek değerleri kaydedilen PM₁₀ 24 saatlik ortalama konsantrasyonları, 31 Aralık 2021'de 379 µg/m³ olarak en büyük ortalama günlük ve aynı tarihte saat 05:00'de 385 µg/m³ olarak en büyük ortalama saatlik değerlere sahip olmuştur. Günlük ortalama maksimum HKİ değeri ise 29.12.2021 tarihinde 211 olarak aynı tarihte saat 07:00 için 214 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, HKİ ile kirlilik parametreleri arasında yürütülen etki analizlerine göre % 88,5'lük bir oranla ile 24 saatlik ortalama PM₁₀ konsantrasyonlarının hava kalitesi indeksini etkileyen en önemli parametre olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: HKİ, hava kirleticiler, PM₁₀

Citation: N. Barlık, R. Guliyev, and M. Akgün, “The Levels of Main Air Pollutant Parameters and Their Effects on Air Quality Index for Ardahan in the Period 2019 – 2023”, *Journal of Studies in Advanced Technologies*, vol. 2, no. 2, pp. 83-94, Dec 2024, doi: 10.63063/jsat.1485314

1. Giriş

Sanayi, ısınma ve trafik kaynaklı emisyonlar dış ortam hava kalitesini etkileyen en önemli antropojenik kaynaklardır. Hava kirliliği gelir düzeyinden bağımsız olarak tüm dünyada herkesi etkileyen en önemli çevre sorunlarından ve sağlığa yönelik en büyük küresel risklerden birisi olarak yılda yaklaşık 7 milyon önlenebilir ölüme neden olmaktadır [1].

Ortam hava kalitesinin izlenmesi ve değerlendirilmesi hava kirliliğini kontrol etmede ilk önemli adımdır. Büyük miktardaki izleme verisi, genellikle hava kalitesi hakkında politika yapıcılara, düzenleyicilere ve özellikle halka basit ve anlaşılır bir bilgi iletmez. Çevre kuruluşları, hava kirlleticilerinin sağlık etkileri ışığında hava kalitesi hakkında kamuoyunu bilgilendirmek ve veri yorumlamak için hava kalitesi endeksinin (HKİ) kullanmaktadır.

Hava Kalitesi İndeksi (HKİ); hava kalitesi düzeyinin, uyarı ve renk kategorilerine göre sınırları belirli bir ölçek içerisinde toplumla paylaşılması için geliştirilmiştir uluslararası bir yaklaşımdır. Tablo 1’de sunulan indekse göre; 0 – 500 aralığında bir ölçek, 6 uyarı ve renk kategorisine ayrılmış olarak ortalama hava kalitesi hakkında toplumu bilgilendirmeyi amaçlamaktadır [2], [3].

Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı (US-EPA) tarafından benimsenen ilk indekslerden biri Kirlilik Standart İndeksi'ydi (PSI). Bu indeks 1999 yılında yine EPA tarafından, yer seviyesindeki ozon ve PM (partikül madde) emisyonu olmak üzere iki yeni alt indeks içeren Hava Kalitesi İndeksi (Air Pollution Index, AQI) ile değiştirilmiştir. HKİ kullanımıyla, kentsel alanlardaki başlıca kirleticilerin (PM10, SO₂, NO₂, O₃, CO) konsantrasyonlarını tek bir değer altında birleştirmek mümkün olmuştur [4].

Tablo 1. Hava Kalitesi İndeksi

İndeks	HKİ	Anlamı
	0 – 50	İyi
	51 – 100	Orta
	101 – 150	Hassas
	151 – 200	Sağlıksız
	201 – 300	Kötü
	301 – 500	Tehlikeli

Partikül madde (PM) terimi farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip ve havada asılı halde bulunan parçacıkların oluşturduğu hava kirliticilerini sınıflandırmak için kullanılır. Aerodinamik çapları 10 µm'nin altında olan partikül maddeler PM10 olarak sınıflandırılır. Şehir içi atmosferinde PM konsantrasyonlarındaki değişikliklerin, kardiyolojik ve kanser gibi sağlık sorunlarıyla önemli ölçüde ilişkili olduğu [5] bilinmektedir ve bu nedenle PM 10 ve PM 2,5 (solunabilir parçacıklar) ortam hava kalitesinin ölçülmesi ve izlenmesi açısından önemli göstergeler olup, mevzuat ve direktifler kapsamında sınır değerleri belirlenmiştir. Kömür dumanından kaynaklanan en önemli hava kirliticilerden birisi olarak SO₂, atmosferde ikincil PM'lerin oluşumuna da katkıda bulunur. SO₂ özellikle sistemik inflamasyon ve oksidatif stres yoluyla insan sağlığını olumsuz yönde etkileyebilmektedir [6]. NO₂, antropojenik olarak fosil yakıtların yanması ve araç egzoz emisyonlarından kaynaklanan önemli bir atmosferik kirliticidir. Ancak toprak emisyonları, biyokütleli doğal yanması ve yıldırımlar da önemli ölçüde NO₂ emisyonuna neden olabilen doğal kaynaklar olarak düşünülür. Solunum yoluyla alınan NO₂'nin uzun süreli etkisi altında akciğer fonksiyonlarını ve solunum sistemini tehdit edebileceği ve üst solunum yollarını uyararak şok semptomlarına neden olabileceği belirtilmektedir [7]. Bunun yanında SO₂ ile birlikte asit birikimine neden olan en önemli gazlardan birisi olarak NO₂, atmosferde fotokimyasal sis ve O₃ (ozon) oluşum süreçlerini de tetikleyen gazlardan birisidir. İkincil bir kirlitici olarak O₃, atmosferde NO₂, NO_x ve uçucu organiklerin (VOC) fotokimyasal reaksiyon ürünüdür. Yer seviyesi ozon kirliliği oluşumunda birincil etkiye sahip emisyonlar trafik kaynaklıdır ancak enerji santrallerinden kaynaklanan NO_x emisyonları ve uçucu organik emisyonların olduğu akaryakıt istasyonları O₃ kirliliğinde ilk akla gelen kirlilik kaynaklarıdır [8]. Yüksek ozon konsantrasyonlarına uzun süreli maruz kalmanın, insan kardiyopulmoner fonksiyonunun bozulmasına ve solunum yolu hastalıklarının görülme sıklığının artmasına, eozinofilik hava yolu inflamasyonuna yol açarak solunum patojenlerine veya alerjenlere karşı duyarlılığa veya alerjeniteye neden olabileceği belirtilmiştir [9]. Öte yandan bir eksik yanma ürünü

olarak CO'in hem doku hipoksisine hem de çeşitli mekanizmalar yoluyla immünolojik veya inflamatuvar hasarı içeren doğrudan hücresele değişikliklere neden olduğu bilinmektedir [10].

Hava kalitesi indeksinin tahmini, meteorolojik ve topoğrafik parametrelerle korelasyonu birçok araştırmacı tarafından ele alınmıştır. Pekin için yürütülen bir çalışmada Çin hava kirliliği indeksi ile hava kalitesi indeksi, uydu görüntülerinden sağlanan aerosol verileri ile karşılaştırılmış ve hava kalitesi indeksinin ortam hava kalitesini tanımlamada daha sağlıklı sonuçlar ürettiği tespit edilmiştir [11]. Çin'de yürütülen bir başka bir çalışmada Yangtze Nehri Deltası'ndaki hava kalitesinin mekânsal ve zamansal analizi ve meteorolojik faktörlerle ilişkisi hava kalitesi indeksi üzerinden tartışılmıştır. Araştırmacılar çalışmalarında hava kalitesi indeksi ile mekânsal ve zamansal değişkenler arasındaki ilişkiyi ARIMA ve çoklu lineer regresyon modelleriyle araştırmışlar ve ARIMA'nın çoklu lineer regresyondan daha doğru sonuçlar ürettiğini bildirmişlerdir [12]. Meteorolojik parametrelerle hava kalitesi indeksi arasındaki ilişkiyi modelleyen çalışmalarda indeksin meteorolojik parametrelere bağlı olarak değiştiğini bildirmektedir [13], [14]. Marmara Bölgesi'nde hava kalitesi indeksleri kullanılarak hava kalitesini etkileyen faktörlerin belirlendiği bir diğer çalışmada NO₂ ve O₃ konsantrasyon düzeylerinin antropolojik etkilerden, PM kirliliğinin zamansal ve mekansal faktörlerden daha çok etkilendiği belirtilmektedir [15]. Ardahan, Kars, Erzurum ve Iğdır için yürütülen bir diğer çalışmada hava kalitesi indeksleri rastgele orman algoritması ile %74,89 doğruluk oranında tahmin edilmiştir [3]. Çerkezköy organize sanayi bölgesinde hava kirlenici parametrelerinin hava kalitesi indeksine etkilerinin ele alındığı bir araştırmada çalışma döneminde hava kalitesinin orta ve iyi düzeyde seyretti belirtilmiştir [16]. COVID – 19 pandemisi döneminde Dakka'da hava kalitesi indeksi ile COVID-19 kaynaklı ölümler arasındaki ilişkinin incelendiği bir araştırmada değişkenler arasında Kendall ve Spearman korelasyonları yürütülmüş ve anlamlı korelasyonlar bulunduğu bildirilmiştir [17].

Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı bünyesinde Türkiye geneline kurulmuş olan Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı'na bağlı istasyonlarından sağlanan kirlenici konsantrasyonları Ulusal HKİ değerlerine dönüştürülmekte ve gerçek zamanlı olarak çevrimiçi yayınlanmaktadır [18]. Ardahan gibi sanayileşmemiş ve uzun kış mevsimlerinin yaşandığı bölgelerde yılın büyük bir bölümünde dış ortam hava kalitesi, ısınma amacıyla kullanılan fosil yakıt emisyonlarından ve ayrıca trafik kaynaklı emisyonlardan güçlü bir şekilde etkilenir. İlde uzun kış mevsimi boyunca konutların ve diğer binaların ısıtılmasında yaygın olarak kömür ve doğal gaz kullanılmaktadır. Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü tarafından hazırlanan 2020 yılı Çevre Durum Raporu'na göre yıl içerisinde ısınma amaçlı olarak yaklaşık 10.044 ton katı yakıt ve 17.482 536 m³ doğal gaz kullanılmıştır ve aynı yıl ilde trafiğe kayıtlı araç sayısı 19.317'dir [19]. Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı'na veri beslemesi, şehir merkezinde bulunan 1 adet hava kalitesi ölçüm istasyonu ile gerçekleştirilmektedir. İstasyonda PM₁₀, SO₂, NO₂, NO_x ve O₃ takibi yapılmakta gerçek zamanlı olarak ulusal hava kalitesi indeks (HKİ)'ne dönüştürülerek Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı üzerinden çevrimiçi paylaşılmaktadır.

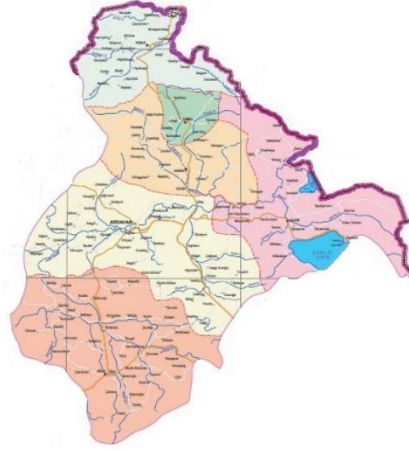
Bu çalışma; 2019 – 2023 yıllarını kapsayan periyotta Ardahan şehir merkezinde HKİ ve indeksin hesaplanmasında kullanılan PM₁₀, SO₂, NO₂, O₃ ve CO gibi kirlilik parametrelerinin etki analizlerini yapmayı ve sonuçların değerlendirilmesini amaçlamaktadır. İncelenen periyot için bu kirlenici parametrelerin konsantrasyon düzeylerinin dağılımları ve indeks değerleri Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği (HKDYY) [20] ile karşılaştırılmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Çalışma Alanı

Anadolu'nun kuzeydoğusunda yer alan Ardahan İli (Şekil 1), 42,70° doğu boylamları ile 41,11° kuzey enlemleri arasında kuzeydoğuda Gürcistan ve Ermenistan, güney ve güneydoğuda Kars, güneybatıda Erzurum ve batıda Artvin ile çevrilidir. İl alanı ana hatlarıyla 1800 – 2100 m rakımlarda yer alan dalgalı yapıya sahip bir plato görünümündedir. Bölgenin rakımının yüksek olması ve yüzey şekillerinin değişkenliği nedeniyle il genelinde karasal iklim hakimdir. Kışlar uzun, sert ve karlıdır. Köppen-Geiger iklim sınıflandırmasına göre Ardahan ilinin tamamı Dfb harfleriyle gösterilen, kışların soğuk, yazın sıcak, her mevsim yağışlı olduğu orta enlem iklim tipine dahildir [21]. Deniz seviyesinden yüksekliği yaklaşık 1829 m ve denizden karayoluyla uzaklığı ise yaklaşık 211 km olan ilde; Meteoroloji Genel Müdürlüğü'ne bağlı il istasyonunun kayıtlarına göre yıllık ortalama sıcaklık 3,7 °C'dir. İl genelinde yağışlar kışın kar, yılın diğer mevsimlerinde yağmur olmak üzere her mevsim görülse de en fazla yağış nisan, mayıs ve haziran aylarında görülmektedir. Kış sezonu

genellikle ekim ayı sonlarında başlar ve nisan ayı sonuna kadar devam eder. Bulutluluk ve kapalı gün sayısının fazla olması; ilde iklimin genel olarak serin olmasının en önemli nedenlerinden birisi olarak değerlendirilir [22].



Şekil 1. Ardahan il haritası [23]

2.2. Veri

1 Ocak 2019 ile 31 Aralık 2023 tarih aralığını kapsayan 5 yıllık dönem için saatlik ortalama kirletici konsantrasyonları Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı'nın Ardahan şehir merkezinde bulunan ölçüm istasyonu kayıtlarından çevrimiçi olarak sağlanmıştır [18]. Bu çalışma için aynı zamanda hava kalitesi indeksinin de hesaplanmasında esas alınan PM10, SO₂, NO₂ ve O₃ başlıca hava kirliliği parametreleri olarak seçilmiştir. HKİ'nin hesaplanmasında esas alınan ancak şehirdeki Ulusal Hava Kalitesi İzleme istasyonunda takibi yapılmadığından CO, değerlendirmeye dahil edilmemiştir.

2.3. Yöntem

Ulusal Hava Kalitesi İndeksi, EPA Hava Kalitesi İndeksi'nin ulusal mevzuatımıza ve sınır değerlerimize uyarlanması ile oluşturulmuştur. İndeksin hesaplanmasında PM10, SO₂, NO₂, CO ve O₃ dan oluşan 5 temel kirletici parametre dikkate alınmaktadır ve herhangi bir zaman dilimi için indeks hesaplanırken kirletici parametrelerin en az %75'inin (3 parametre) ölçülmüş olması ön koşulu aranmaktadır [24]. Bu çalışmada HKİ; CO hariç gerekli parametrelerin %80'ine tekabül eden 4 parametre üzerinden hesaplanmıştır.

Gerek kirletici parametre düzeylerinin kendi içinde değerlendirilebilmesi gerekse hava kalitesi indeksinin hesaplanabilmesi için µg/m³ cinsinden olmak üzere PM10 için 24 saatlik, SO₂ ve NO₂ için saatlik ve O₃ için 8 saatlik ortalama konsantrasyon değerleri kullanılmalıdır [24], [25]. Bu nedenle Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı veri tabanından sağlanan saatlik ortalama konsantrasyon düzeyleri öncelikle PM10, SO₂ ve NO₂ için tam sayıya, O₃ için üç basamaklı ondalık kesirli sayıya kırılarak düzenlenmiş ardından PM10 için 24 saatlik ve O₃ için 8 saatlik kayan ortalama değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca, 24 saatlik PM10, saatlik SO₂ ve NO₂ ve 8 saatlik O₃ ortalama konsantrasyon düzeyleri günlük ortalama konsantrasyon düzeylerine dönüştürülmüştür.

2.4. Hava Kalitesi İndeksi

Ulusal Hava Kalitesi İndeksi'nin belirlenmesinde referans alınan EPA Hava Kalitesi İndeksi Denklem [1] olarak aşağıda verilen eşitlikle hesaplanmaktadır. Buna göre her bir kirletici parametre için ayrı ayrı kesme noktaları dikkate alınarak bir parametre indeksi (I_p) tanımlanmaktadır. Kirletici parametre indeksleri arasındaki maksimum değer, HKİ değeri (Denklem [2]) olarak kabul edilmektedir [25].

$$I_p = [(I_{Hi} - I_{Lo}) / (BP_{Hi} - BP_{Lo})] (C_p - BP_{Lo}) + I_{Lo} \quad (1)$$

$$HKI = \max (I_{PM10}, I_{SO_2}, I_{NO_2}, I_{CO}, I_{O_3}) \quad (2)$$

Burada, I_p ; p kirleticisi için indeks, C_p ; p kirleticisi için kırılmış ortalama konsantrasyon, BP_{Hi} ; C_p ' ye eşit veya büyük kesme noktası konsantrasyonu, BP_{Lo} ; C_p ' ye eşit veya küçük kesme noktası konsantrasyonu, I_{Hi} ve I_{Lo} ; sırasıyla BP_{Hi} ve BP_{Lo} 'ye karşılık gelen HKİ değerleridir.

Hesaplamalar için gereken kesme noktası konsantrasyonları ve bunlara karşılık gelen indeks değerleri Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'na bağlı Hava Kalitesi İzleme Sistemi'nin internet sitesinden alınmıştır [24].

3. Bulgular ve Tartışma

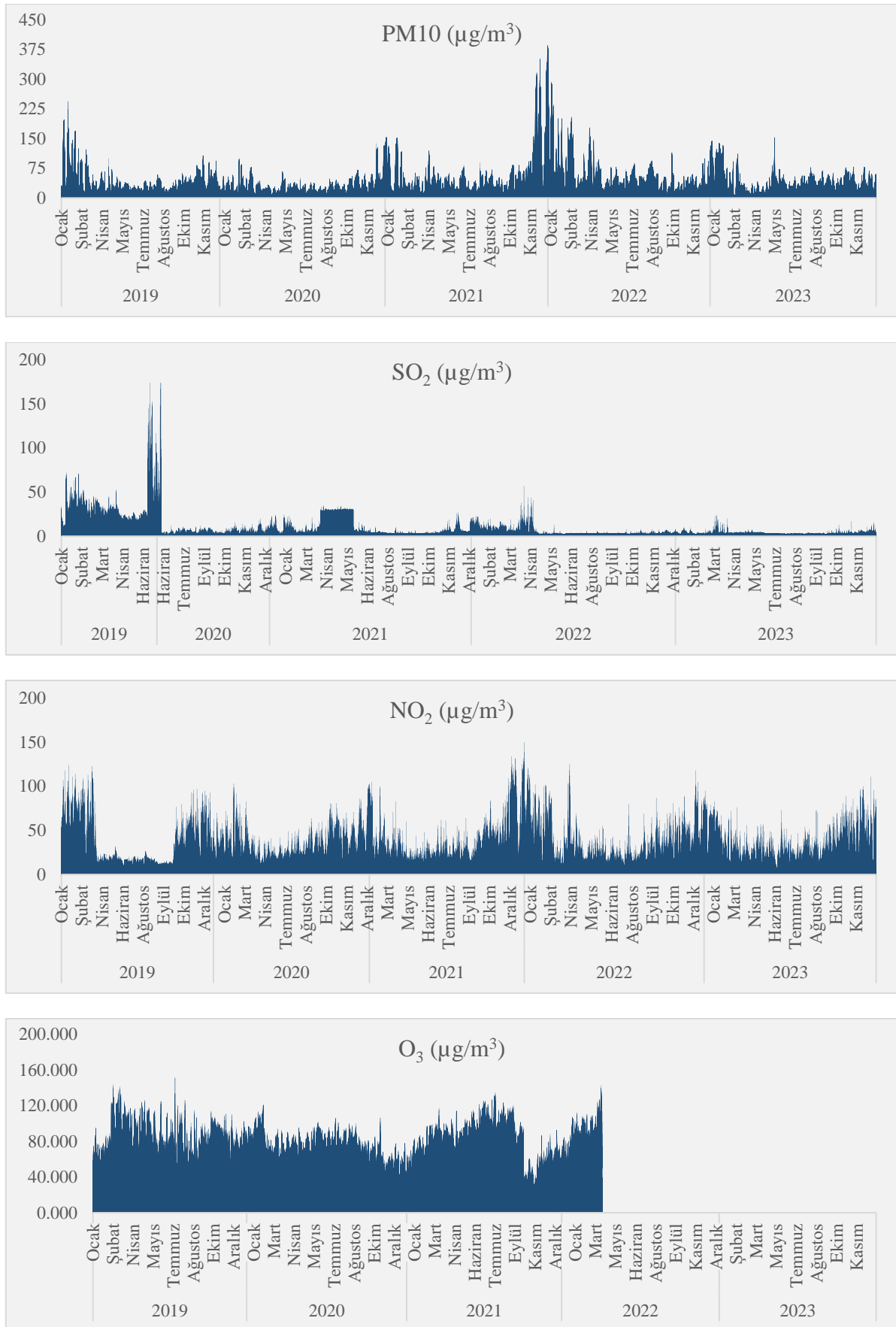
Ele alınan periyotta kirletici parametrelerinin her birisi için toplam 43 824 adet olması gereken saatlik verinin PM10 için %97, SO₂ için %79, NO₂ için %89 ve O₃ için %97'lik oranları elde edilebilmiştir. SO₂ hariç diğer parametrelerde minimum %90 veriye yakın veya üzerinde oranlar sağlanabilmiştir.

3.1. Hava Kirletici Parametreler

SO₂ ve NO₂ için saatlik ortalama düzeyler, PM10 için 24 saatlik ve O₃ için 8 saatlik kayan ortalama değerler zaman serileri olarak Şekil 2'de sunulmaktadır. Özellikle fosil kökenli yakıtların kullanılmasından kaynaklanan 24 saatlik ortalama PM10 ve NO₂ emisyonlarının kışın en sert geçtiği ve maksimum ısınma ihtiyacının doğduğu Kasım – Mart arasında pik değerlerine ulaştığı görülmektedir. Kasım 2021 – Mart 2022 döneminde her iki kirleticinin de konsantrasyon değerleri 5 yıllık çalışma aralığının en yüksek düzeylerinde seyretmektedir. PM10, 31 Aralık 2021 tarihinde saatlik ortalama 385 µg/m³ ve günlük ortalama 379 µg/m³'lük düzeyleri ile çalışma aralığındaki maksimumuna ulaşmıştır. Yine 31 Aralık 2021 tarihinde NO₂, 150 µg/m³ olarak 5 yıllık periyodun en yüksek saatlik ortalama konsantrasyonuna sahiptir. 24 saatlik PM10 konsantrasyonları için yönetmelik 1 yıl içerisinde en fazla 35 kez 50 µg/m³ değerini aşmasına, yıllık ortalama konsantrasyonun da maksimum 40 µg/m³ olmasına müsaade etmektedir. Tablo 2'de kirletici parametrelerinin HKDYY'ne göre değerlendirme sonuçlarında da verildiği gibi PM10 düzeylerinin çalışma periyodundaki her yıl ama en çok da 2021 yılında 2732 kez ve 2022 yılında 2992 kez olmak üzere 50 µg/m³'lük limit değeri 35'den çok daha fazla sayıda aştığı görülmektedir. Aynı yılların ortalama yıllık PM10 konsantrasyon düzeyleri de sırasıyla 55 ve 53 olarak yine yönetmelikle belirlenen 40 µg/m³ limit değerinin üzerindedir. NO₂ düzeyleri, ulusal mevzuatla belirlenen saatlik ortalama 200 µg/m³ limitini aşmadığı yine yıllık ortalama da 40 µg/m³'lük limit değerin altında kaldığı görülmektedir.

Bu çalışmada ele alınan kirletici parametreler için ulusal mevzuattaki limit değerler Avrupa Çevre Ajansı (European Environment Agency, EEA) tarafından izlenen mevzuatla [26] uyumludur. Ancak Dünya Sağlık Örgütü (World Health Organization, WHO) Covid – 19 pandemisinden sonra güncellediği düzenlemelerinde bu limitleri daha aşağılara çekmeyi önermektedir [27]. Buna göre PM10 24 saatlik ortalama konsantrasyonlarının 45 µg/m³'ü en fazla 3 – 4 kez aşması, yıllık ortalama 15 µg/m³ limit değerini aşmaması önerilmektedir. Benzer şekilde; NO₂ için 24 saatlik ortalama konsantrasyon düzeyinin 25 µg/m³ değerini en fazla 3 – 4 kez aşması ve yıllık ortalama düzeyin 10 µg/m³ ile sınırlandırılması gerektiği belirtilmektedir.

Ulusal Hava İzleme Ağı üzerinden sağlanan SO₂ verilerinde en fazla veri kaybı 2019 ve 2020 yıllarının kayıtlarından kaynaklanmaktadır. Sağlanan veriler kapsamında 31 Aralık 2019 ve 8 Ocak 2020 tarihlerinde 174 µg/m³'lük saatlik ortalama ile maksimum değerlere ulaştığı, diğer yıllarda 24 – 57 arasında maksimum değerler sergiledi belirlenmiştir. Şekil 2'de saatlik ortalama SO₂ konsantrasyon düzeylerinin grafik aktarımında 2019 yılından sonra kirletici konsantrasyonunda önemli bir azalmanın kaydedildiği görülmektedir.



Şekil 2. 2019 – 2023 yılları arasında kaydedilen ortalama 24 saatlik PM10, saatlik SO₂ ve NO₂ ve 8 saatlik O₃ konsantrasyonları için zaman serileri

HKDY Yönetmeliği ile belirlenen limit değerler açısından da incelenen periyotta 2019 yılı ortalama konsantrasyon düzeyinin $24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ile mevzuat limit değerlerini aştığı bunun dışında kalan tüm düzeylerde limit değerlerin altında kaldığı görülmektedir.

Tablo 2. 2019 – 2023 periyodunda kirletici parametrelerinin HKDYY'ne göre değerlendirme sonuçları

HKDYY'ne göre kirleticilerin limit değerleri				Çalışma dönemi için hesaplan değerler (adet)				
	Ortalama süre	Limit değer	Açıklama	2019	2020	2021	2022	2023
PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24 saat	50	35 kez/yıl aşılamaz	1727	904	2732	2992	2213
	Yıllık	40		40	30	55	53	40
SO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1 saat	350	24 kez /yıl aşılamaz	-	-	-	-	-
	24 saat	125	3 kez/yıl aşılamaz	-	-	-	-	-
	Yıllık	20		24	5	9	4	3
NO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1 saat	200	18 kez/yıl aşılamaz	-	-	-	-	-
	Yıllık	40		23	22	24	22	21
O ₃ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	8 saat	120	25 gün/3 yıl aşılamaz*	-	-	-	-	-

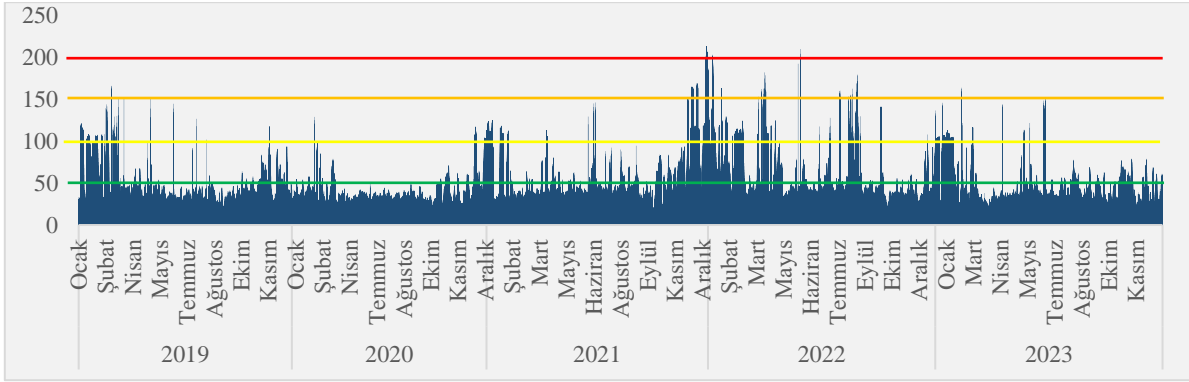
*Üç yıllık ortalamalar dikkate alınır ve verilerin, takip eden üç yıl sonunda uyumluluğun hesaplamasında kullanılacağı ilk yıl 2022'dir

2017 – 2019 yılları arasında Ardahan hava kalitesi indeksi ile meteorolojik parametreler arasındaki ilişkinin incelendiği çalışmamızda [28] 2018 yılı sonundan itibaren O₃ konsantrasyon düzeylerinin çarpıcı bir artış sergilediği belirtilmiştir. Şekil 2' verilen 8 saatlik ortalama O₃ konsantrasyon profilinden çalışma periyodunun önemli bir bölümünde kirletici düzeyinin $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ değerine yaklaştığı veya aştığı görülebilmektedir. Bu periyotta en yüksek saatlik ortalama konsantrasyon değeri 27 Haziran 2023 tarihinde $178 \mu\text{g}/\text{m}^3$ olarak kaydedilmiştir. Aynı tarihte 8 saatlik ortalama konsantrasyonu $157 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 'tür. Ulusal mevzuat; 2022 yılından sonra geçerli olmak üzere 8 saatlik ortalama konsantrasyon düzeylerinin 3 yıllık ortalama $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ limit değerini 25 günden fazla aşmamasını, eğer üç yıllık ortalamalar belirlenemiyorsa yıllık verilerin ardışık ve tam seti bazında bilgi eşiği olarak 1 saatlik ortalamanın $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ olmasını istemektedir. Buna göre çalışma periyodu içerisinde Ardahan'da kaydedilen O₃ konsantrasyon düzeyleri mevzuatın belirlediği bilgi eşiği değerinin altında kalmaktadır. WHO ise 8 saatlik ortalama konsantrasyon için $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ limit değerinin 1 yılda en fazla 3 – 4 kez aşılmasını önermektedir ki incelenen periyotta 32 gün bu hedef değerinin aşıldığı belirlenmiştir.

3.2. Hava Kalitesi İndeksi

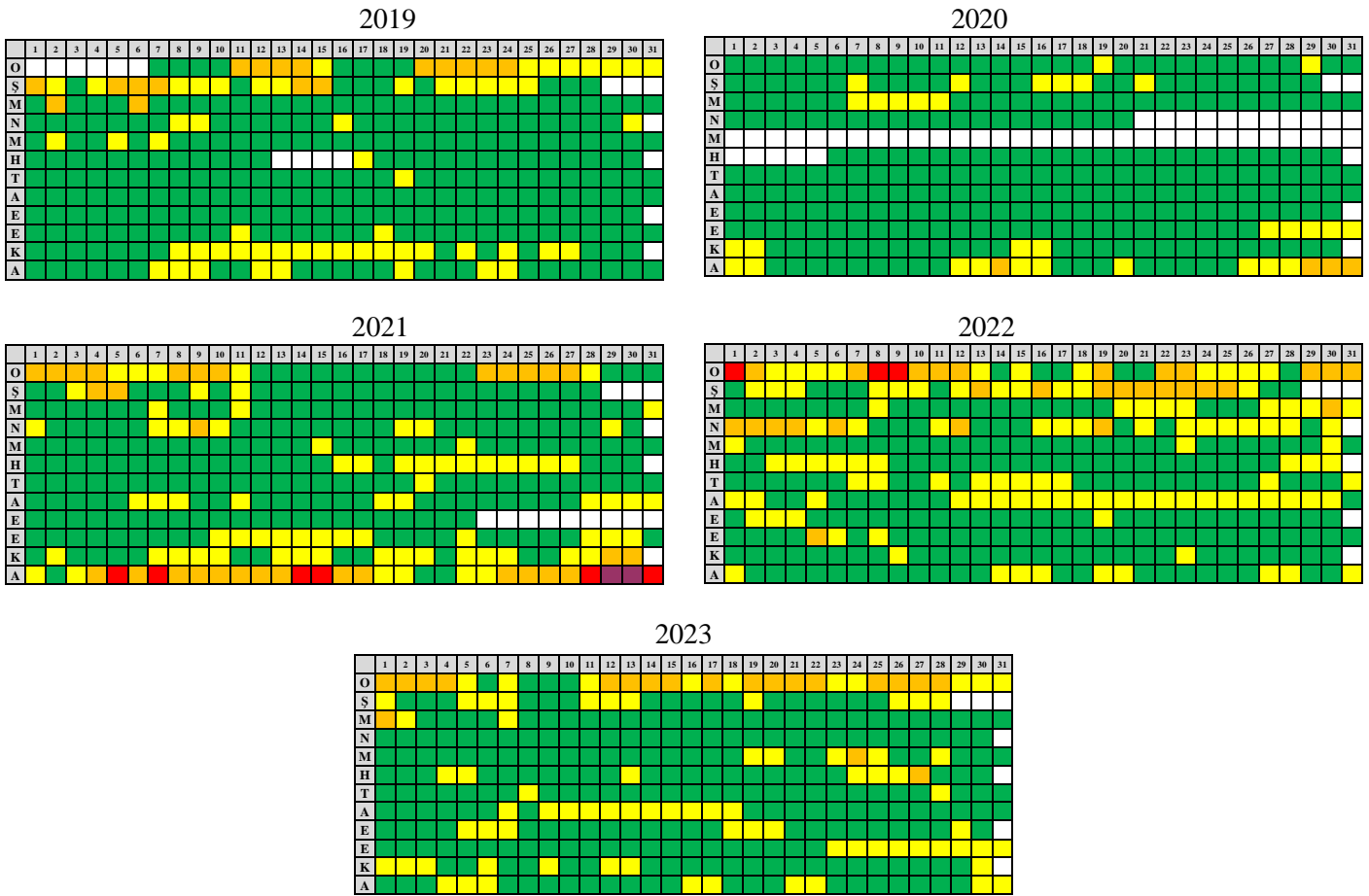
İncelenen 5 yıllık periyod için Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı üzerinden sağlanan saatlik ortalama kirletici konsantrasyonları PM10, SO₂ ve NO₂ için tamsayıya O₃ için ağdan sağlanan şekliyle ondalık değerlerinde 2 basamaklı sayılara kırpılmıştır. PM10 ve O₃ için sırasıyla 24 saatlik ve 8 saatlik ortalama konsantrasyonları hesaplanmış ve SO₂ ve NO₂ için tamsayıya kırpılmış saatlik ortalama konsantrasyonları birlikte Denklem 1 ve 2 kullanılarak saatlik HKİ değerlerine dönüştürülmüştür. Herhangi bir saat için indeks değerinin belirlenebilmesi için en az 3 parametre indeksinin hesaplanmış olması, dolayısıyla o saat için verilerin en az %75'inin mevcut olması şartı arandığından toplam 41 415 adet saatlik HKİ değeri hesaplanmıştır.

Şekil 3'te saatlik HKİ değerlerinin zamansal dağılımı ve ulusal HKİ'ne göre kesme noktaları indeks renk kodlarına uygun olarak çizilmiş şekilde sunulmuştur. Grafiğe göre saatlik ortalama HKİ değerleri 2021 – 2022 yıllarında en yüksek düzeylerini göstermektedir ve 29 Aralık 2021 tarihinde 214 maksimum değerine sahip olduğu belirlenmiştir. Ulusal indekse göre 151 – 200 aralığına düşen kırmızı kategorideki ve 201 – 300 aralığına düşen pembe kategorideki indeks düzeylerinin tamamı da yine bu yıllarda izlenmiştir.



Şekil 3. 2019 – 2023 yılları arasında saatlik ortalama HKİ değerleri ve renk kodlarına göre sınırları

Şekil 4'te hesaplanan saatlik ortalama HKİ değerleri günlük ortalama değerlere dönüştürülmüş ve 2019 – 2023 yılları için ayrı ayrı indeks renk kodlarına göre yıllık dağılımları çizilmiştir.



Şekil 4. 2019 – 2023 yılları günlük ortalama HKİ değerlerinin indeks kategori renklerine göre dağılımları (Diyagramların sağ sütunlarında ay isimleri baş harfleri ile kodlanmıştır)

Tablo 1'de verilen ulusal HKİ'ne göre; saatlik ortalama HKİ değerlerinin %74,05'inin yeşil kategoride "iyi", %19,30'unun sarı kategoride "orta", %5,84'sinin turuncu kategoride "hassas", %0,8'inin kırmızı kategoride "sağlıksız" ve %0,02'sinin pembe kategoride "kötü" hava kalitesi koşullarına işaret ettiği belirlenmiştir. Aralık 2021 ve Ocak 2022 dönemlerinde günlük ortalama HKİ düzeylerinin kırmızı ve pembe kategorilerde yer aldığı günler görülebilmektedir. 2020 yılı nisan ve haziran ayları arasındaki yaklaşık 45 günlük süre için HKİ indeksinin hesaplanmasına yetecek sayıda veri sağlanamamıştır. Daha az sayıda olmak üzere diğer yıllara ait diyagramlarda da beyaz bölgeler yeterli verinin sağlanamadığı günleri göstermektedir.

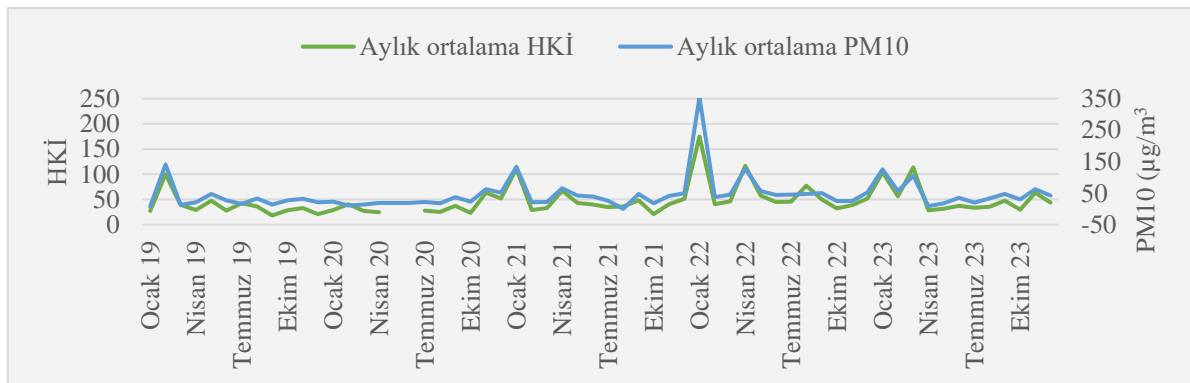
2019 – 2023 yılları arasında ilde izlenen hava kalitesi indeksinin fonksiyonu olduğu kirletici parametrelerle değişimi de incelenmiştir. Bu amaçla HKİ ile kirletici parametrelerinin ortalama konsantrasyonu ve parametre indeksleri arasında lineer regresyon analizi yürütülmüştür. Tablo 3'te verilen

analiz sonuçlarına göre indeks değerleri, PM10'un 24 saatlik ortalama konsantrasyonları ve parametre indeksleri ile sırasıyla 0,885 ve 0,873'lük regresyon katsayılarıyla en güçlü lineer ilişkiye sahiptir. Parametre indekslerine göre NO₂ ikinci ve O₃ üçüncü büyük regresyon katsayılarına sahip olmuşlardır. SO₂, 0,010 düzeyindeki regresyon katsayısı ile HKİ değerleriyle en zayıf lineer ilişkiyi sergilemiştir.

Tablo 3. 2019 – 2023 döneminde kirlilik parametrelerinin ortalama konsantrasyonlarının ve alt indekslerinin ile HKİ üzerine etki analizi sonuçları

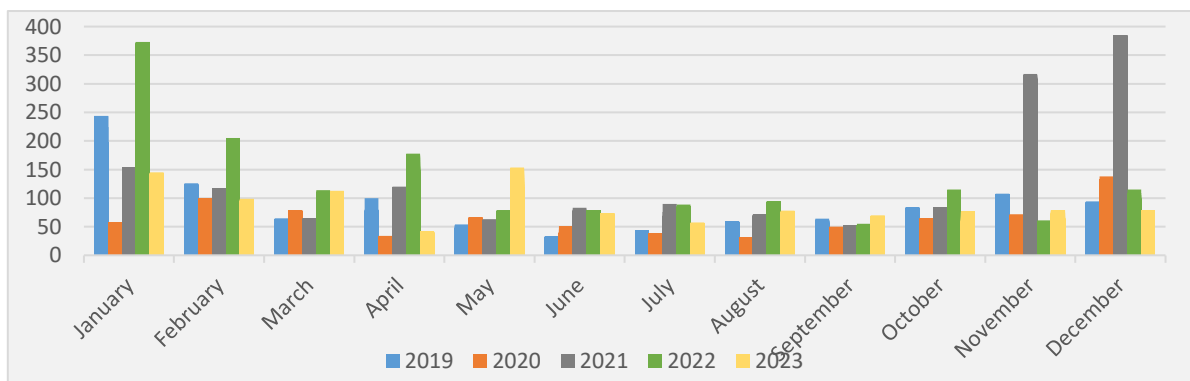
PM10			SO ₂		
HKİ	Saatlik ortalama (µg/m ³)	$r^2=0,873$	HKİ	Saatlik ortalama (µg/m ³)	$r^2=0,010$
	24 Saatlik ortalama (µg/m ³)	$r^2=0,526$		8 Saatlik ortalama (µg/m ³)	$r^2=0,009$
		$r^2=0,885$			
NO ₂			O ₃		
HKİ	Saatlik ortalama (µg/m ³)	$r^2=0,243$	HKİ	Saatlik ortalama (µg/m ³)	$r^2=0,023$
		$r^2=0,241$		8 Saatlik ortalama (µg/m ³)	$r^2=0,001$
				$r^2=0,001$	

2019 – 2023 periyodunda 24 saatlik ortalama PM10 konsantrasyonları ile saatlik HKİ değerlerinin aylık ortalamaları arasında Şekil 5 ile verilen grafikteki uyumlu salınımlar, regresyon analizi sonuçlarında indeks düzeyleri ile PM10 değerleri arasında görülen yüksek katsayının bir sonucu olarak düşünülebilir.



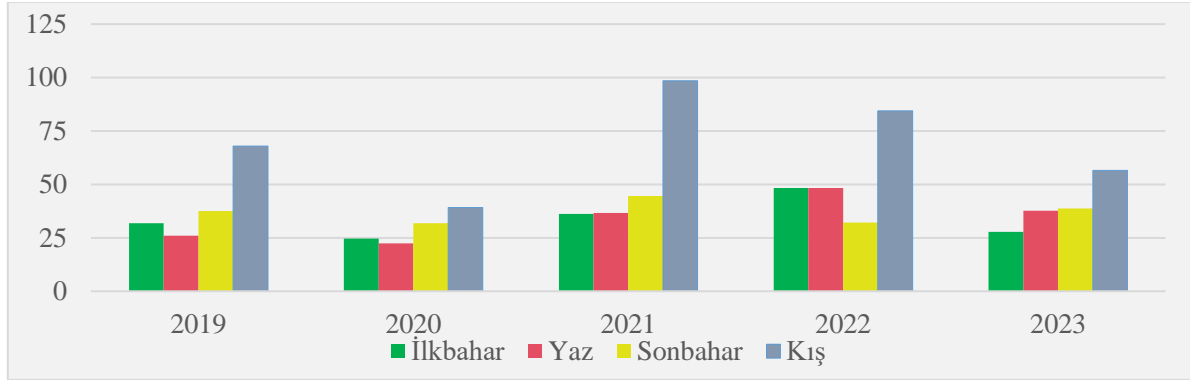
Şekil 5. 2019 – 2023 yılları ortalaması HKİ değerleri ile 24 saatlik ortalama PM10 konsantrasyonlarının aylık bazda karşılaştırılması

Regresyon analizi sonuçları ve esasen bu sonuçların bir doğrulaması gibi görülebilecek Şekil 5 ile verilen grafiğe göre; çalışma periyodunda Ardahan'da ki hava kalitesini belirleyen en önemli parametrenin PM10 olduğu düşünülebilir. 2019 – 2023 yılları arasında Ardahan'daki 24 saatlik ortalama PM10 konsantrasyonlarının aylık ve mevsimlik ortalamaları sırasıyla Şekil 6 ve 7'de birer sütun grafik olarak sunulmuştur.



Şekil 6. 2019 – 2023 yılları arasında 24 saatlik ortalama PM10 konsantrasyonlarının aylık ortalamaya göre dağılımı.

Bu iki grafik birlikte değerlendirildiğinde çalışma periyodu içerisinde PM10 kirliliğinin 2020 yılının genelinde nispeten daha düşük olduğu 2021 ve 2022 yıllarında daha yüksek düzeylerde seyrettiği açıkça görülmektedir. Sadece 2020 yılı kış mevsiminde (Aralık, Ocak ve Şubat) ortalama mevsimlik PM10 düzeyleri $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 'lük kritik eşik altına kalmıştır. Aylık ortalamalara göre; ildeki Ekim – Mayıs arasını kapsayan ısınma periyodundaki tüm aylarda PM10 düzeyleri $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ değerinin (2020 ve 2023 Nisan hariç) üzerindedir. 2021 yılı Kasım ve Aralık ayları ile 2022 yılı Ocak ayını kapsayan dönem PM10 düzeyleri aylık ortalamalarda zirve değerlerine ulaşmıştır.



Şekil 7. 2019 – 2023 yılları arasında 24 saatlik ortalama PM10 konsantrasyonlarının mevsimsel ortalamaya göre dağılımı.

4. Sonuçlar

1 Ocak 2019 ile 31 Aralık 2023 periyodunda Ardahan'daki başlıca hava kirlenici parametreler, HKİ ve kirlenici parametrelerin her birinin ayrı ayrı indekse etkisi incelenmiştir. Periyotta kaydedilen kirlenici düzeyleri ulusal ve uluslararası mevzuatla karşılaştırılmış, kirlenici parametrelerin saatlik ortalama konsantrasyonlarından saatlik HKİ değerleri hesaplanmış ve HKİ ile parametreler arasında lineer regresyon analizi yürütülmüştür. Buna göre;

- PM10, incelenen periyotta ulusal mevzuatla belirlenen limit değerleri en fazla aşan kirlenici parametre olmuştur. 2020 yılında 904 kez ve 2022 yılında 2992 kez 24 saatlik ortalama PM10 konsantrasyonu $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 'lük limit değeri aşmıştır. Aylık ve mevsimsel değişimler, PM10 düzeylerinin uzun geçen ısınma periyotlarında meteorolojik faktörlerden oldukça etkilendiğini söylenebilir.
- İnceleme periyot için veri tabanında en fazla veri kaybı SO_2 için olmakla birlikte sağlanan veriler üzerinden 2019 yılından sonra konsantrasyon düzeylerinin anlamlı bir şekilde azaldığı söylenebilir.
- NO_2 düzeyleri yıllık ortalama $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 'lük limit değeri her yıl ortalama 21 – 23 kez aşmıştır.
- Öncesine kıyasla 2019 yılından itibaren O_3 konsantrasyonlarında dramatik bir artış görülmektedir. Ulusal mevzuatın uyguladığı 8 saatlik ortalama konsantrasyon için limit $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ düzeyi 2022 yılından itibaren geçerli olacağından mevzuatla karşılaştırılamamıştır ancak DSÖ'nün tavsiye ettiği $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 'lük limit değeri birçok kez aşmıştır. Şehirdeki ozon konsantrasyonlarında izlenen artışın tek başına bir araştırma konusu olarak araştırılması gerektiği düşünülmektedir.
- PM10, SO_2 , NO_2 ve O_3 kirlenicilerinin düzeylerine bağlı olarak çalışma aralığı için hesaplanan saatlik ve günlük ortalama HKİ değerlerinin büyük bir oranı yeşil veya sarı renk koduna yani “iyi” veya “orta” düzeylere tekabül etmektedir.
- Hava kalitesi indeksi yaklaşık 0,89'luk bir regresyon katsayısı ile en fazla 24 saatlik ortalama PM10 düzeylerinden etkilenmektedir.

CO , şehirde yerleşik bulunan hava kirliliği izleme istasyonunda takip edilmemektedir. HKİ'nin hesaplanmasında temel alınan parametrelerden birisi olarak; CO 'in eksik yanma ürünü bir gaz olduğu ve şehirde uzun ısınma periyotlarına ihtiyaç duyulduğu da göz önünde bulundurulduğunda bu çalışma da dahil şehrin hava kalitesi üzerine yapılan değerlendirmelerin eksik kalacağı söylenebilir.

Yazar Katkı Oranı

Metodoloji, N.B. ve R.G; yazılım, R.G ve M.A; validasyon, N.B. ve M.A; araştırma, N.B ve R.G; yazım ve düzenleme; M.A grafik ve tasarım. Tüm yazarlar makalenin yayınlanan versiyonunu okumuş ve kabul etmiştir.

Destek ve Teşekkür

Bu araştırmanın yürütülmesi sürecinde herhangi bir destek alınmamıştır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Kaynakça

- [1] DSÖ, "Health, environment and climate change," 18 Nisan 2019. [Online]. Available: https://apps.who.int/gb/ebwha/pdf_files/WHA72/A72_15-en.pdf?ua=1. [Accessed: Jun. 11, 2024].
- [2] Suman, "Air quality indices: A review of methods to interpret air quality status," *Materials Today: Proceedings*, vol. 33, pp. 863-868, 2021.
- [3] M. Akgün and N. Barlık, "Makine Öğrenmesi Algoritmaları Kullanılarak Hava Kalitesi İndeksinin Tahmini," *European Journal of Science and Technology*, vol. 51, pp. 97-107, 2023.
- [4] R. Lanzafame, P. Monforte, G. Patanè, and S. Strano, "Trend analysis of Air Quality Index in Catania from 2010 to 2014," *Energy Procedia*, vol. 82, pp. 708-715, 2015.
- [5] J. G. Wilson, S. Kingham, J. Pearce, and A. P. Sturman, "A review of intraurban variations in particulate air pollution: Implications for epidemiological research," *Atmospheric Environment*, vol. 39, no. 34, pp. 6444-6462, 2005.
- [6] H. Guo et al., "Do socioeconomic factors modify the effects of PM1 and SO2 on lung cancer incidence in China?," *Science of the Total Environment*, vol. 756, p. 143998, 2021.
- [7] Z. Liu et al., "Development of land use regression model and health risk assessment for NO2 in different functional areas: A case study of Xi'an, China," *Atmospheric Environment*, vol. 213, pp. 515-525, 2019.
- [8] ÇŞİDB, "Yer Seviyesi Ozon Kirliliği Bilgi Notu," [Online]. Available: https://webdosya.csb.gov.tr/db/cygm/editordosya/Ozon_kirlili%C4%9Fi_bilgi_notu.pdf. [Accessed: Jun. 8, 2024].
- [9] C. Tao et al., "Exhalation metabolomics: A new force in revealing the impact of ozone pollution on respiratory health," *Environmental and Experimental Health Journal*, Journal Pre-proof, 2024.
- [10] N. B. Hampson, C. A. Piantadosi, S. R. Thom, and L. K. Weaver, "Practice Recommendations in the Diagnosis, Management, and Prevention of Carbon Monoxide Poisoning," *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, vol. 186, no. 11, pp. 1095-1101, 2012.
- [11] S. Zheng, C. X. Cao, and R. P. Singh, "Comparison of ground based indices (API and AQI) with satellite based aerosol products," *Science of the Total Environment*, vol. 488-489, pp. 398-412, 2014.
- [12] Y. Li, Y. Chen, H. Karimian, and T. Tao, "Spatiotemporal analysis of air quality and its relationship with meteorological factors in the Yangtze River Delta," *Journal of Elementology*, vol. 25, no. 3, pp. 1059-1075, 2020.
- [13] Y. Di and R. Li, "Correlation analysis of AQI characteristics and meteorological conditions in heating season," *Environmental Earth Sciences*, vol. 242, p. 022067, 2019.
- [14] D. Zhang, S. Tang, R. Ci, and D. Qiong, "Analysis of the Air Pollution Index and Meteorological Factors and Risk Assessment for Tibet," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1838, p. 012047, 2021.
- [15] İ. Yener and K. O. Demirarslan, "Determining the Factors Affecting Air Quality in Marmara, Turkey, and Assessing it Using Air Quality Indices," *Doğa Afet ve Çevre Dergisi*, vol. 8, no. 2, pp. 383-395, 2022.

- [16] H. Özel, P. Cihan, H. K. Özcan, S. Aydın, and A. Hanedar, "Hava Kirletici Parametrelerinin Hava Kalitesi İndeksine Uzun Zamanlı Etkilerinin İncelenmesi: Çerkezköy Organize Sanayi Bölgesi Örneği," *Kırklareli University Journal of Engineering and Science*, vol. 7, no. 1, pp. 94-106, 2021.
- [17] P. M. R. Sarkar et al., "Impact and Correlation of Air Quality and Climate Variables with COVID-19 Morbidity and Mortality in Dhaka," *Asian Climate Trends*, vol. 5, no. 4, p. 000197, 2020.
- [18] ÇŞİDB, "Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı," [Online]. Available: https://sim.csb.gov.tr/STN/STN_Report/StationDataDownloadNew. [Accessed: Mar. 5, 2024].
- [19] ÇŞİDB, "Ardahan İli 2020 Yılı Çevre Durum Raporu," [Online]. Available: https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/2020_ardahan_cdr-20210803140316.pdf. [Accessed: Mar. 5, 2024].
- [20] Mevzuat Bilgi Sistemi, "Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği," [Online]. Available: <https://www.mevzuat.gov.tr/File/GeneratePdf?mevzuatNo=12188&mevzuatTur=KurumVeKurulusYonetmeliği&mevzuatTertip=5>. [Accessed: Jan. 3, 2024].
- [21] E. Bölük, "Köppen İklim Sınıflandırmasına Göre Türkiye İklimi," Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Ankara, 2016.
- [22] M. Z. Öztürk and H. Kılıç, "Ardahan'da iklim parametrelerindeki değişimin zamansal analizi," *Türk Coğrafya Dergisi*, vol. 70, pp. 37-43, 2018.
- [23] Millî Savunma Bakanlığı Harita Genel Müdürlüğü, "Ardahan İl Haritası," [Online]. Available: <https://www.harita.gov.tr/urun/ardahan-mulk-idare-il-haritasi/455>. [Accessed: Apr. 15, 2024].
- [24] ÇŞİDB, "Hava Kalitesi İzleme Sistemi," [Online]. Available: <https://sim.csb.gov.tr/Home/HKI?baslik=HAVZA%20%C4%B0ZLEME%20S%C4%B0STEM%C4%B0>. [Accessed: Mar. 5, 2024].
- [25] USEPA, *Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air Quality – the Air Quality Index (AQI)*, 2018.
- [26] European Parliament and European Council, "Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe," [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2008/50/oj>. [Accessed: Jun. 7, 2024].
- [27] WHO, *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*, [Online]. Available: <https://iris.who.int/handle/10665/345329>. [Accessed: Jun. 7, 2024].
- [28] N. Barlık, "Meteorolojik Faktörlerin HKİ Üzerine Etkisinin Çoklu Regresyon Modeli ile Analizi," *MAS 16th International European Conference On Mathematics, Engineering, Natural & Medical Sciences*, Mardin, 2022.