

Sentinel-5P Zaman Serisi Verileri ve Google Earth Engine ile Kocaeli İlinde Azot Dioksit (NO₂) ve Karbon Monoksit (CO) Kirliliğinin Uzaktan Algılama Tabanlı İzlenmesi

Remote Sensing-Based Monitoring of Nitrogen Dioxide (NO₂) and Carbon Monoxide (CO) Pollution in Kocaeli Province with Sentinel-5P Time Series Data and Google Earth Engine

Dr. Öğr. Üyesi Meltem ÇELEN

Gebze Teknik Üniversitesi, Yer ve Deniz
Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, Türkiye
mkocal@gtu.edu.tr
ORCID: 0000-0001-9487-497X

Aylin BULUT

Gebze Teknik Üniversitesi, Yer ve Deniz
Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, Türkiye
ORCID: 0009-0009-7512-6875

Araş. Gör. Mustafacan SAYGI

Gebze Teknik Üniversitesi, Yer ve Deniz
Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, Türkiye
msaygi@gtu.edu.tr
ORCID: 0009-0003-6015-1273

Araş. Gör. Osman Yavuz ALTUNTAŞ

Gebze Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği
Bölümü, Kocaeli, Türkiye
oyavuzaltuntas@gtu.edu.tr
ORCID: 0000-0001-5940-4091

Doç Dr. İsmail ÇÖLKESEN

Gebze Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği
Bölümü, Kocaeli, Türkiye
icolkesen@gtu.edu.tr
ORCID: 0000-0001-9670-3023

Makale Türü:

ARAŞTIRMA

Gönderilme Tarihi:

5 Mayıs 2025

Kabul Tarihi:

31 Temmuz 2025

Öz

Sanayileşmenin ivme kazanmasıyla artan enerji tüketimi, fosil yakıtlara dayalı üretim ve karayolu taşımacılığı gibi faktörler, hava kirliliğinin artmasında önemli rol oynamaktadır. Canlıların sağlığı açısından büyük önem taşıyan hava kirliliğinin kontrol altına alınması ve gerekli tedbirlerin hayata geçirilmesi için bu kirlilik oluşumlarının düzenli olarak izlenmesi kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada, Google Earth Engine platformu kullanılarak Sentinel-5P uydu görüntüleri üzerinden Kocaeli iline ait azot dioksit (NO₂) ve karbon monoksit (CO) gazlarına yönelik çok zamanlı (2018-2023) analizler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, NO₂ seviyelerinin en yüksek olduğu 2023 yılına ilişkin aylık ve mevsimsel analizler hem il genelinde hem de ilçeler özelinde yapılmıştır. Nicel analizler sonucunda, ortalama en yüksek NO₂ değerlerine 2023 yılında, en yüksek CO değerlerine ise 2021 yılında ulaşılmıştır. Diğer taraftan hem NO₂ hem de CO gazlarının en yüksek seviyelere ulaştığı ilçe Darıca olarak belirlenmiştir. Elde edilen verilerin, nüfus yoğunluğu ve organize sanayi bölgeleri (OSB) ile olan ilişkileri Pearson korelasyon analizi ile değerlendirilmiştir. Bu analiz sonucunda, kent genelinde nüfus artışı ile NO₂ seviyesi arasında 0,65; ilçe merkezlerinin OSB'lere uzaklığı ile hava kirliliği arasında ise 0,80'in üzerinde korelasyon olduğu saptanmıştır. Sonuçlar, OSB'lere yakın bölgelerde hava kirliliğinin daha yoğun olduğunu ortaya koyarken, uzaktan algılama teknolojilerinin hava kirliliğinin izlenmesinde etkili bir araç olduğunu da göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Azot Dioksit, Google Earth Engine, Hava Kirliliği, Karbon Monoksit, Sentinel-5P, Uzaktan Algılama.

Abstract

Increasing energy consumption due to accelerating industrialization, fossil fuel-based production, and road transportation are major factors contributing to air pollution. Regular monitoring of these pollution sources is critically important for controlling air pollution and implementing necessary measures to protect public health. In this study, multi-temporal (2018-2023) analyses for nitrogen dioxide (NO₂) and carbon monoxide (CO) gases were conducted for Kocaeli province using Sentinel-5P satellite images on the Google Earth Engine platform. Additionally, monthly and seasonal analyses for 2023—the year with the highest NO₂ levels—were performed for the entire province and specific districts. The quantitative analysis showed that the highest average NO₂ values were reached in 2023, while the highest CO values were recorded in 2021. Furthermore, the Darıca district was identified as the location with the highest levels of both NO₂ and CO gases. The relationships between the obtained data and population density and organized industrial zones (OIZ) were evaluated using Pearson correlation analysis. This analysis found a correlation of 0.65 between population growth and NO₂ levels across the city and a correlation of over 0.80 between the distance of district centers from OIZs and air pollution. The results indicate that air pollution is more concentrated in areas close to OIZs and demonstrate that remote sensing technologies are an effective tool for monitoring air pollution.

Keywords: Nitrogen Dioxide, Google Earth Engine, Air Pollution, Carbon Monoxide, Sentinel-5P, Remote Sensing.

1.Giriş

Gün geçtikçe artan nüfusun ihtiyaçlarının karşılanabilmesi amacıyla giderek artan sanayileşme neticesinde insan sağlığı ve ekosistem için büyük bir tehdit konumunda bulunan hava kirliliği meydana gelmektedir. Özellikle fosil yakıtlara dayalı enerji üretiminin artması, azot dioksit (NO₂) gibi tehlikeli kirleticilerin atmosferde yoğunlaşmasına neden olmaktadır. Fosil yakıtların yaygın kullanımıyla oluşan NO₂ kirliliği ise atmosferdeki en zararlı gazlardan biri olarak kabul edilmektedir (Grzybowski vd., 2023). NO₂ gazına uzun süreli maruz kalınması durumunda başta solunum yolu hastalıkları olmak üzere, kardiyovasküler rahatsızlıklar ve solunum yollarında tahriş gibi sağlık sorunları ortaya çıkabilmektedir (Shetty vd., 2024). Bunun yanı sıra Dünya Sağlık Örgütü verilerine göre her yıl yaklaşık yedi milyon insan, kirli hava solunumuna bağlı nedenlerle yaşamını yitirmektedir (WHO, 2020; Virghileanu vd., 2020). İnsan sağlığının yanı sıra, yapılan araştırmalar NO₂ gazının iklim değişikliğine olan etkisinin de ciddi boyutlarda olduğunu göstermektedir (Cohen vd., 2010; Shetty vd., 2024). Diğer taraftan, atmosferdeki NO₂ gazı, toprağa azot birikimine neden olarak bitki gelişimini yavaşlatmakta ve tarımsal verimliliği olumsuz yönde etkilemektedir (Hettelingh vd., 2015).

Canlı sağlığı ve ekosistemlerin korunması açısından büyük önem arz eden hava kalitesi takibinde geleneksel yöntemlere dayalı gerçekleştirilen ölçümler yüksek maliyet, yoğun iş gücü ve zamansal kayba neden olmaktadır. Buna karşın, uzaktan algılama teknolojileri sayesinde geniş alanlarda düşük maliyetli, periyodik olarak, hızlı ve etkin hava kirliliği takibi yapılabilmektedir. Diğer taraftan, büyük veri hacmine sahip uydu görüntülerinin Google Earth Engine (GEE) gibi bulut tabanlı platformlarda işlenebilmesi depolama, maliyet ve zaman açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu noktada literatürde, uzaktan algılama teknolojilerine dayalı yöntemler kullanılarak hava kirliliğinin takibine yönelik birçok çalışma mevcuttur (Zheng vd., 2019; Schneider vd., 2021; Van Geffen vd., 2022; Grzybowski vd., 2023).

Bodah vd. (2022) tarafından yapılan çalışmada, Sentinel-5P TROPOMI uydu görüntüleri kullanarak Passo Fundo şehrindeki NO₂ ve CO gazı konsantrasyonlarını analiz etmeyi ve bu verilerle hava kalitesinin çevresel değerlemesini gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Elde edilen sonuçlar, nüfus yoğunluğunun NO₂ ile güçlü bir korelasyon gösterdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, Normalize Edilmiş Fark Yapılaşma İndeksi (NDBI) ve araç sayısı gibi ek faktörler de analiz edilmiş, NDBI'nin, NO₂ seviyeleri üzerinde anlamlı bir etkisi olduğu, ancak CO ile ilişkili olmadığı ifade edilmiştir. Araç sayısının ise her iki kirleticisi için de önemli bir etkisi olduğu tespit edilmiştir. Virghileanu vd. (2020) tarafından gerçekleştirilen bir başka çalışmada, 2019 ve 2020 yıllarındaki benzer dönemler arasında Avrupa'daki troposferik NO₂ sütun dağılımını karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Çalışmada, COVID-19 pandemisi süresince trafik ve sanayi faaliyetlerindeki ani düşüşlerin NO₂ kirliliği üzerindeki etkilerini ortaya koymaktadır. Sonuçlar, bazı büyük Avrupa şehirlerinde troposferik NO₂ seviyelerinde %85'e varan düşüşler yaşandığını göstermektedir. Uydu görüntüleri ile yersel çalışmalarla elde edilen veriler arasında yapılan korelasyon analizleri sonucunda, 0,50 ile 0,75 arasında değişen korelasyon katsayıları elde edilmiştir. COVID-19 karantina sürecinde Avrupa'da NO₂ kirliliğindeki bu belirgin azalma, Sentinel -5P uydu görüntüleri, sanayi üretim endeksi ve hava trafiği hacimleri ile doğrulanmıştır.

Bu çalışma kapsamında, Türkiye'nin Marmara Bölgesi'nde yer alan ve yoğun sanayi faaliyetlerinin gözlendiği Kocaeli ilinde, CO ve NO₂ gazlarına ait hava kirliliği düzeyleri Sentinel-5P TROPOMI uydu verileri kullanılarak GEE platformunda analiz edilmiştir. Analiz sürecinde, söz konusu kirlilik yoğunlukları hem kent genelinde hem de ilçe düzeyinde, yıllık, aylık ve mevsimsel olarak, çok-zamanlı nüfus verileri ve sanayi bölgelerinin konumları dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Bu özellikleri ile çalışma diğer hava kalitesi çalışmalarından ayrılmaktadır.

2. Yöntem

2.1. Çalışma Alanı

Çalışma kapsamında, Marmara Bölgesi'nin doğusunda yer alan ve yoğun sanayi faaliyetlerinin gerçekleştiği Kocaeli ili çalışma alanı olarak seçilmiştir (Şekil 1). Yaklaşık olarak 3600 km² yüz ölçümüne sahip Kocaeli, Türkiye'nin en önemli sanayi merkezlerinden biri olarak öne çıkmaktadır

Başiskele, Çayirova, Darıca, Derince, Dilovası, Gebze, Gölcük, İzmit, Kandıra, Karamürsel, Kartepe ve Körfez olmak üzere toplam 12 ilçeden oluşmaktadır. Sanayi faaliyetlerinin sağladığı istihdam olanakları nedeniyle il genelinde nüfus artış oranı yüksektir. 2018 - 2023 yılları arasında, il nüfusu %20'nin üzerinde artış göstererek 2.102.907 kişiye ulaşmıştır (TÜİK, 2023). Hızla artan nüfus yoğunluğunun yanı sıra özellikle Marmara Bölgesi'nin endüstriyel lokomotifi konumunda bulunan Kocaeli ilinde yaklaşık 4000 hektar alana kurulu 14 farklı OSB yer almaktadır (İTO, 2025).



Şekil 1. Çalışma Alanı.

2.2. Veri Seti

Atmosferdeki gazların ve kirleticilerin konsantrasyonunu izlemek amacıyla geliştirilen Sentinel-5P uydusu, Avrupa Uzay Ajansı (ESA) tarafından 2017 yılında yörüngeye fırlatılmıştır. Üzerinde bulunan Troposferik İzleme Aracı (TROPOMI) adı verilen spektrometre sayesinde, morötesi dalga boylarından kısa dalga kızlotesine kadar (270–2365 nm) geniş bir spektral aralıkta ölçümler gerçekleştirebilmektedir. Bu sayede Azot Dioksit (NO₂), Karbon Monoksit (CO), Metan (CH₄), Ozon (O₃), Kükürt Dioksit (SO₂), Formaldehit (HCHO) ve aerosoller gibi çeşitli gazlara ilişkin veriler elde edilebilmektedir. Sentinel-5P misyonu kapsamında, Seviye-1B, Seviye-2 ve Seviye-3 olmak üzere üç farklı veri düzeyi sağlanmaktadır. Seviye-1B verileri, atmosferdeki gazlara ilişkin doğrudan ölçülen ışınım değerlerini içeren işlenmemiş uydur verileridir. Seviye-2 verileri ise Seviye-1B verilerinin işlenmesiyle elde edilen ve gazların sütun yoğunluklarını gösteren konsantrasyon bilgilerinden oluşmaktadır. Seviye-3 verileri ise bulut maskeleymesi ve atmosferik düzeltmeler gibi ön işlemlerden geçirilmiş, analiz için doğrudan kullanılabilir nitelikteki verilerdir.

2.3. Veri Temini ve Ön İşlemler

Çalışma kapsamında, veri alımı ve veri analizi süreçlerinde Google tarafından 2010 yılında kullanıma sunulan GEE platformundan yararlanılmıştır. Uzaktan algılanmış görüntülere dayalı analizlerin daha hızlı ve verimli bir şekilde gerçekleştirilmesine olanak tanıyan bu bulut tabanlı platform, büyük hacimli uydur görüntülerinin yerel olarak depolanmasına gerek kalmaksızın işlenmesine imkân sağlamaktadır. Böylece hem depolama maliyetinden tasarruf edilmekte hem de analiz süreçleri zaman açısından verimli hâle getirilmektedir. Bu çalışma kapsamında, NO₂ ve CO gazlarına ilişkin verilerin temininde, Google Earth Engine platformu üzerinden Sentinel-5P uydusuna ait Seviye-3 verileri kullanılmıştır. Bu veriler, temel bulut maskeleyme ve atmosferik düzeltmelerin uygulanmış olduğu, analiz için doğrudan kullanılabilir nitelikteki veri ürünleridir. Ayrıntılı mekânsal analiz ve görselleştirme yapılması amacıyla, Kocaeli ili ve bağlı ilçelere ait vektör verileri kullanılarak geometrik filtreleme gerçekleştirilmiştir. Zaman serisi analizlerinde, yıllık eğilimleri incelemek amacıyla 2018–2023 dönemi, aylık ve mevsimsel analizler için ise 2023 yılına ait zaman filtreleri uygulanmıştır. Bu kapsamda hem il genelinde hem de ilçe düzeyinde yıllık

ve aylık ortalama değerler hesaplanarak analiz edilmiştir.

2.4. Karbon Monoksit (CO) ve Azot Dioksit (NO₂) Gazları

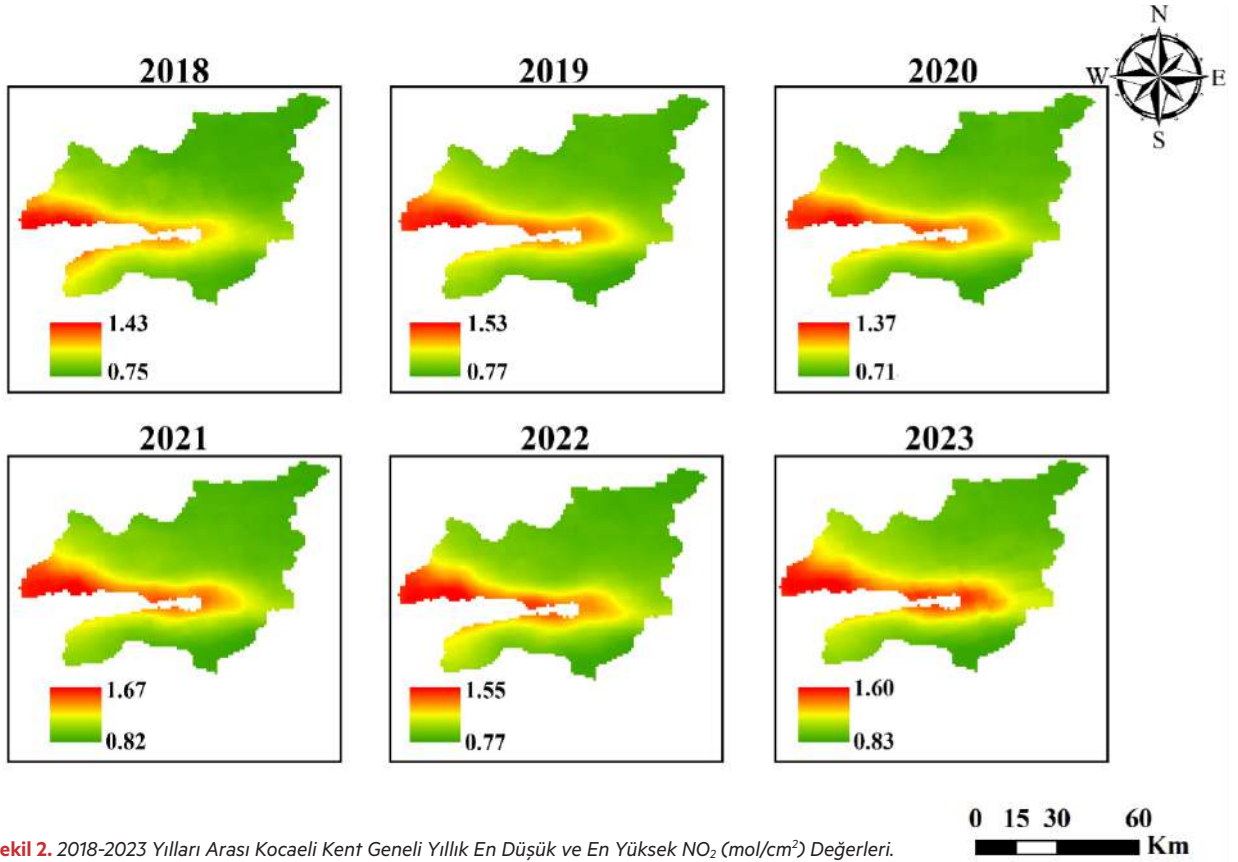
NO₂ seviyeleri günümüzde hava kirliliğinin yoğunluğunu ölçmek için önemli bir gösterge olarak kullanılmaktadır (Duros vd., 2023). Atmosferdeki NO₂ kaynakları hem doğal hem de insan kaynaklı emisyonlardan oluşmaktadır. Doğal kaynaklar arasında biyokütlenin yanması, yıldırımlar ve mikrobiyal nitrifikasyon süreçleri yer alırken günümüzde endüstriyel gelişimle birlikte fosil yakıtların (kömür, petrol ve gaz) yanması en büyük NO₂ kaynağı haline gelmiştir (Inness vd., 2019). Avrupa Çevre Ajansı'nın 2018 Hava Kalitesi raporuna göre, Avrupa şehirlerinde NO₂ emisyonlarının yaklaşık %40'ı motorlu araçların egzozlarından kaynaklanmaktadır (European Environmental Agency, 2018). Diğer önemli kaynaklar ise petrol ve metal rafinerileri, kömürle çalışan enerji santralleri, çeşitli imalat sektörleri ve gıda işleme endüstrileridir (Cilek, 2022).

CO gazı, kokusuz bir gaz olup, NO₂'nin kırmızımsı renginin aksine renksizdir. Yakıtlardaki karbonun (C) tam yanması durumunda oluşur ve oksijeni (O₂) bağlayarak canlılarda boğulmaya yol açabilir. İçten yanmalı motorlar, sanayi üretimleri, yoğun odun yakımı ve orman yangınları, CO gazının başlıca oluşum kaynakları arasındadır. (Taheri ve Razban, 2021). Sadece antropojenik kaynaklardan değil, aynı zamanda metanın atmosfere fotokimyasal oksidasyonu gibi doğal yollardan da CO oluşabilir (Weinstock ve Niki, 1972).

3. Uygulama

3.1. Kocaeli İl Geneli ve İlçelerin 5 Yıllık CO ve NO₂ Değişimleri

Çalışma kapsamında, 2018–2023 yılları arasında Kocaeli ili ve ilçeleri düzeyinde yıllık ortalama NO₂ ve CO konsantrasyon değerleri elde edilmiştir (Şekil 2). İl geneline yönelik analizlerde, NO₂ gazı açısından en yüksek ortalama değerin 2023 yılında (1,05 mol/cm²), en düşük ortalama değerin ise 2020 yılında (0,88 mol/cm²) kaydedildiği belirlenmiştir. 2020 yılında gözlenen bu düşüşte, COVID-19 pandemisi nedeniyle uygulanan sokağa çıkma kısıtlamaları, sanayi faaliyetlerinde yaşanan yavaşlama ve azalan trafik yoğunluğunun etkili olduğu düşünülmektedir.



Şekil 2. 2018-2023 Yılları Arası Kocaeli Kent Geneli Yıllık En Düşük ve En Yüksek NO₂ (mol/cm²) Değerleri.

İlçeler bazında değerlendirildiğinde ise bazı yerleşim yerlerinin sürekli olarak yüksek NO₂ seviyelerine sahip olduğu dikkat çekmektedir (Tablo I). Özellikle Darıca, her yıl en yüksek değerlere sahip olup, ortalama 1,45 mol/cm² ile öne çıkmaktadır. Darıca'yı Çayirova, Dilovası ve Gebze takip etmektedir. Bu ilçelerde sanayi faaliyetlerinin yoğun olması, ölçülen yüksek değerleri açıklayan temel faktörlerden biri olabilir. Öte yandan, Kandıra ilçesi tüm yıllar boyunca en düşük NO₂ konsantrasyonlarına sahip bölge olmuştur.

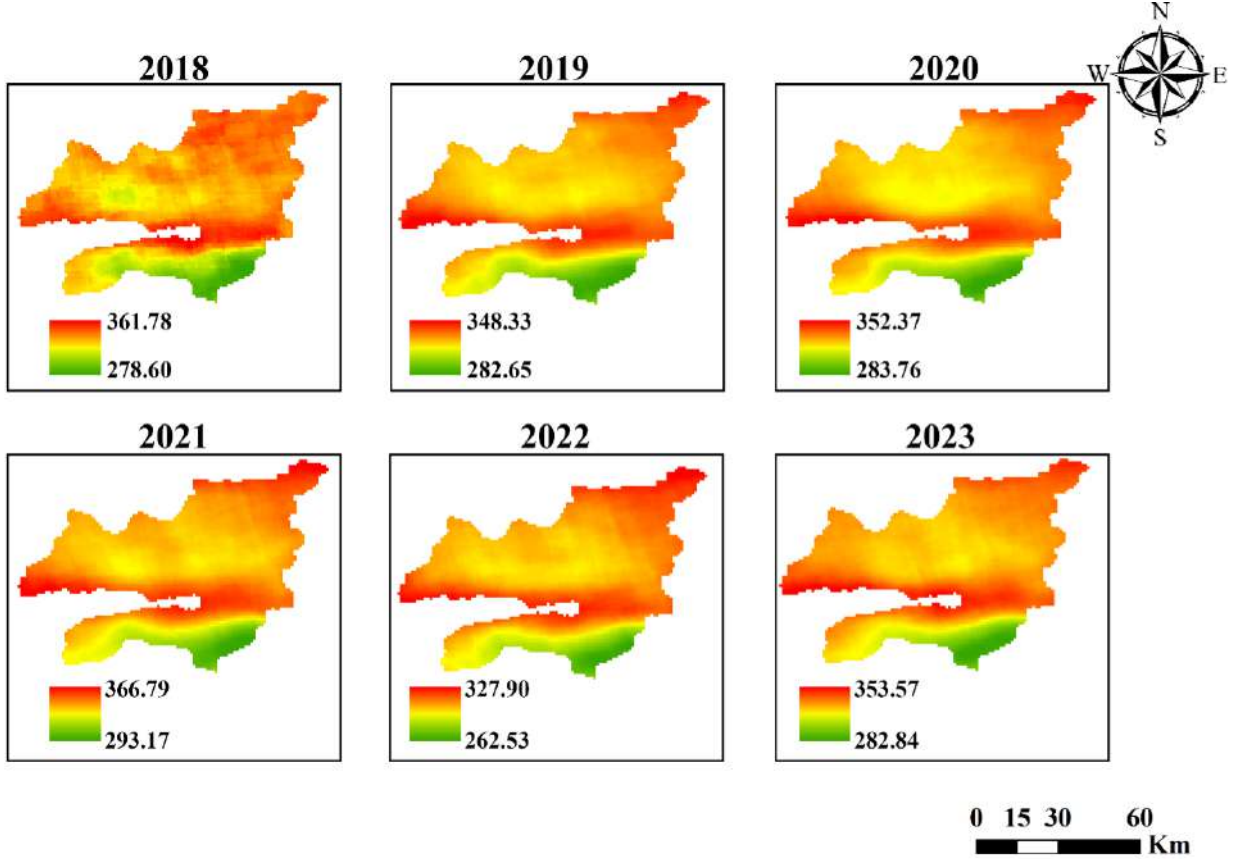
Ortalama 0,84 mol/cm²'lik değer, ilçenin daha kırsal yapısı, düşük nüfus yoğunluğu ve sanayi faaliyetlerinin sınırlı olmasıyla ilişkilendirilebilir. Beş yıllık ortalamalar dikkate alındığında, Dilovası, Gebze, Çayirova ve Darıca ilçelerinin kent ortalamasının üzerinde değerler sergilediği; diğer se-kiz ilçenin ise ortalamasının altında kaldığı görülmektedir. Bu durum, NO₂ kirliliğinin Kocaeli genelinde homojen dağılmadığını, özellikle doğu ve güneydoğu ilçelerinde daha yoğun olduğunu göstermektedir.

Tablo I: 2018-2023 Yılları Arasında Kocaeli Kent Geneli ve İlçelerine Ait Ortalama NO₂ (mol/cm²) Değerleri.

İlçe / Yıl	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Başıskele	0,92	0,95	0,87	1,03	0,97	1,05
Çayirova	1,21	1,34	1,21	1,51	1,42	1,51
Darıca	1,39	1,42	1,28	1,58	1,48	1,56
Derince	0,89	0,97	0,88	1,05	0,96	1,07
Dilovası	1,10	1,22	1,10	1,32	1,23	1,33
Gebze	1,01	1,09	0,97	1,19	1,10	1,21
Gölcük	0,99	1,01	0,92	1,09	1,05	1,12
İzmit	0,90	0,99	0,91	1,06	0,99	1,11
Kandıra	0,79	0,85	0,78	0,89	0,83	0,92
Karamürsel	1,04	1,01	0,92	1,08	1,06	1,09
Kartepe	0,93	0,98	0,90	1,07	1,01	1,12
Körfez	0,97	1,06	0,96	1,14	1,05	1,17
Kocaeli	0,93	0,98	0,89	1,02	0,97	1,05

Çalışmada ele alınan bir diğer gaz olan karbon monoksit (CO) bakımından, 2018-2023 dönemi incelendiğinde kent genelinde yıllar arasında belirli dalgalanmalar olduğu görülmektedir (Şekil 3). En yüksek yıllık ortalama değer 2021 yılında kaydedilmiş olup, bu dönemde Kocaeli genelinde ortalama CO konsantrasyonu 343.3 mol/cm² olarak

ölçülmüştür. Buna karşılık, en düşük seviye ise 2022 yılında 309 mol/cm² ile gerçekleşmiştir. Söz konusu düşüşün, o yıl içinde hava koşullarına, bölgesel emisyon kontrolü uygulamalarına veya sanayi üretimindeki değişimlere bağlı olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 3. 2018-2023 Yılları Arası Kocaeli Kent Geneli Yıllık En Düşük ve En Yüksek CO (mol/cm²) Değerleri.

İlçelere göre dağılım incelendiğinde, NO₂ gazında olduğu gibi CO gazında da en yüksek ortalama değer Darıca ilçesinde gözlemlendiği dikkat çekmektedir (Tablo II). Yaklaşık 345 mol/cm² düzeyindeki bu değer, ilçenin yoğun kentleşme ve ulaşım hareketliliğiyle ilişkili olabilir. Öte yandan, en düşük ortalama CO değerine sahip ilçe 309 mol/cm² ile Başiskele olmuştur. Tablodan da görüleceği üzere, NO₂

açısından en düşük değerlere sahip olan Kandıra ilçesi, CO gazı açısından il ortalamasının (yaklaşık 330 mol/cm²) üzerinde bir ortalamaya (331 mol/cm²) sahiptir. Bu durum, ilçelerin gaz kirliliği profillerinin gaz türüne göre farklılık gösterebileceğini ve her kirlenici için ayrı değerlendirme yapılması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Tablo II: 22018-2023 Yılları Arasında Kocaeli Kent Geneli ve İlçelerine Ait Ortalama CO (mol/cm²) Değerleri.

İlçe / Yıl	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Başıskele	313,09	307,64	310,15	323,96	289,98	311,04
Çayırova	333,98	334,98	335,29	349,88	312,89	336,99
Darıca	344,11	344,55	347,29	363,41	322,83	348,87
Derince	330,45	321,59	321,48	339,49	302,37	325,96
Dilovası	327,39	326,89	331,39	342,52	305,57	333,71
Gebze	331,74	325,30	328,20	342,21	304,85	331,24
Gölcük	321,44	315,92	318,73	333,54	298,82	322,30
İzmit	333,08	325,35	327,55	341,15	305,80	329,56
Kandıra	338,13	327,99	330,97	345,86	311,01	332,21
Karamürsel	321,02	316,77	321,94	333,03	297,44	323,34
Kartepe	321,87	318,93	321,77	333,19	298,20	321,42
Körfez	326,76	322,73	324,15	339,54	304,47	328,71
Kocaeli	331,87	327,36	329,29	343,34	308,00	330,18

3.2. Kocaeli İl Geneli ve İlçelerin 2023 Yılı Aylık ve Mevsimsel CO ve NO₂ Değişimleri

En yüksek yıllık ortalama NO₂ değerlerinin gözlemlendiği 2023 yılı özelinde hem NO₂ hem de CO gaz değerlerinin aylık ve mevsimsel değişimler il geneli ve ilçe bazında analiz edilmiştir. Bu doğrultuda, kent genelinde en yüksek NO₂ değeri şubat ayında (1,64 mol/cm²), en düşük değer ise haziran ayında (0,99 mol/cm²) gözlemlenmiştir (Tablo III). Mevsimsel olarak değerlendirildiğinde ise, kış mevsiminde ortalama 1,55 mol/cm² ile en yüksek NO₂ değerleri elde

edilmiş, yaz mevsiminde ise bu değer 1,03 mol/cm² ile en düşük seviyeye inmiştir.

İlçe bazlı incelemelerde, 2023 yılı boyunca aylık düzeyde en yüksek NO₂ değeri ocak ayında Çayırova ilçesinde 2,24 mol/cm² olarak belirlenmiştir. Bu ilçeyi ocak ayında Darıca (2,11 mol/cm²) ve şubat ayında Dilovası (1,89 mol/cm²) takip etmektedir. Tablodan da görüleceği üzere, en düşük NO₂ değerlerine sahip olan Kandıra ilçesinde en yüksek değer şubat ayında (1,12 mol/cm²), en düşük değer ise mayıs ayında 0,79 mol/cm² olarak belirlenmiştir.

Tablo III: 2023 Yılı Kocaeli Kent Geneli ve İlçelerine Ait Aylık Ortalama NO₂ (mol/cm²) Değerleri. (Kalın puntolar en yüksek değeri ifade etmektedir.)

Ay / İlçe	Başıskele	Çayırova	Darıca	Derince	Dilovası	Gebze	Gölcük	İzmit	Kandıra	Karamürsel	Kartepe	Körfez	Kocaeli
Ocak	1,20	2,24	2,11	1,36	1,87	1,72	1,37	1,43	1,09	1,32	1,36	1,56	1,55
Şubat	1,47	1,90	1,84	1,66	1,89	1,70	1,59	1,64	1,12	1,45	1,74	1,81	1,65
Mart	1,06	1,57	1,71	1,03	1,35	1,25	1,12	1,06	0,89	1,15	1,12	1,13	1,20
Nisan	1,01	1,21	1,20	0,99	1,13	1,07	1,03	1,03	0,97	1,01	1,04	1,04	1,06
Mayıs	0,89	1,43	1,54	0,85	1,13	1,04	0,94	0,86	0,79	0,97	0,89	0,92	1,02
Haziran	0,93	1,17	1,40	0,89	1,01	0,97	0,98	0,90	0,84	1,01	0,92	0,94	1,00
Temmuz	0,96	1,43	1,46	0,95	1,22	1,10	1,01	0,95	0,86	1,04	0,95	1,04	1,08
Ağustos	0,93	1,18	1,24	0,92	1,06	0,98	0,98	0,95	0,83	0,97	0,95	0,98	1,00
Eylül	0,93	1,51	1,65	0,90	1,24	1,09	1,00	0,91	0,80	1,01	0,93	1,00	1,08
Ekim	1,11	1,42	1,55	1,16	1,40	1,23	1,15	1,29	0,92	1,11	1,20	1,25	1,23
Kasım	0,99	1,44	1,24	1,02	1,27	1,17	1,02	1,06	0,91	0,96	1,07	1,10	1,10
Aralık	1,23	1,86	1,93	1,26	1,63	1,45	1,31	1,45	1,11	1,21	1,36	1,39	1,43

2023 yılına ait CO gazına ilişkin aylık ve mevsimsel analizler kapsamında, kent genelinde en yüksek değer temmuz ayında 337 mol/cm² olarak gözlemlenirken, en düşük değer Kasım ayında 309 mol/cm² olarak kaydedilmiştir (Tablo IV). Mevsimsel düzeyde yapılan değerlendirmelerde ise NO₂ gazının aksine, CO gazı açısından en yüksek ortalama değerler yaz aylarında (332 mol/cm²) elde edilmiştir. Buna karşılık, en düşük mevsimsel değerler sonbahar döneminde kaydedilmiştir. Ancak, sonbahar (325 mol/cm²), kış (326 mol/cm²) ve ilkbahar (326 mol/cm²) ortalamalarının birbirine oldukça yakın olduğu dikkat çekmektedir

İlçe bazlı yapılan analizler neticesinde, 2023 yılı boyunca CO gazına ait en yüksek değerlerin bazı ilçelerde özellikle yaz aylarında yoğunlaştığı tespit edilmiştir. Temmuz ayında Darıca ilçesinde 364 mol/cm² ve ağustos ayında 363 mol/cm² ile en yüksek değerler tespit edilmiştir (Tablo IV). Buna karşın, en düşük CO değeri ocak ayında Başiskele ilçesinde 293 mol/cm² olarak kaydedilmiştir. Elde edilen bulgulara göre Çayırova, Darıca, Gebze, İzmit, Kandıra ve Kartepe ilçelerinde CO gazı değerlerinin yaz aylarında en yüksek seviyelere ulaştığı tespit edilmiştir.

Tablo IV: 2023 Yılı Kocaeli Kent Geneli ve İlçelerine Ait Aylık Ortalama CO (mol/cm²) Değerleri.

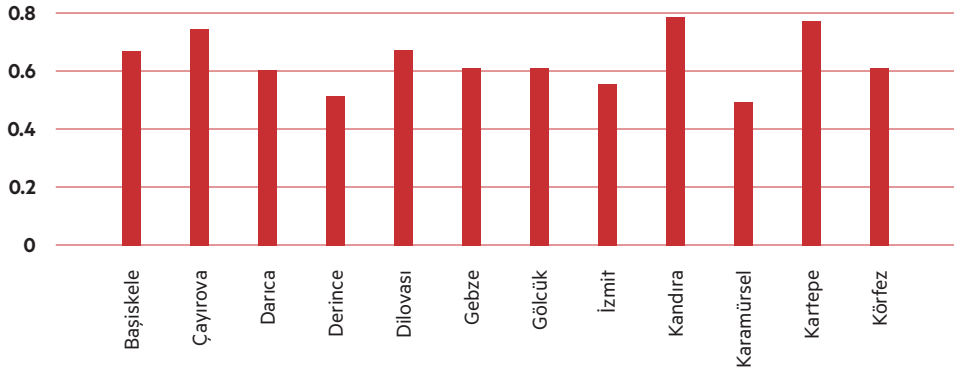
Ay / İlçe	Başiskele	Çayırova	Darıca	Derince	Dilovası	Gebze	Gölcük	İzmit	Kandıra	Karamürsel	Kartepe	Körfez	Kocaeli
Ocak	293,08	331,53	336,83	308,41	323,43	319,84	305,17	317,58	319,95	307,89	307,63	311,14	315,21
Şubat	308,89	341,04	349,94	328,21	336,50	335,67	317,65	335,28	335,85	316,93	325,69	330,26	330,16
Mart	310,22	336,46	350,68	327,62	322,02	326,74	324,67	319,17	326,83	315,41	316,94	330,46	325,60
Nisan	308,37	340,36	350,91	333,62	347,04	339,47	325,50	333,98	337,74	334,32	320,01	341,17	334,37
Mayıs	300,27	328,93	336,04	313,85	328,95	324,62	304,45	321,94	326,23	318,26	316,15	313,23	319,41
Haziran	301,54	329,82	350,62	319,98	337,40	328,40	317,78	325,28	327,62	328,49	321,26	320,94	325,76
Temmuz	317,31	355,39	364,08	331,31	344,56	341,83	329,53	336,01	338,43	332,77	322,86	335,69	337,48
Ağustos	319,15	344,44	362,91	329,77	334,04	332,68	331,62	332,60	338,72	323,83	328,75	335,19	334,48
Eylül	317,33	331,46	347,46	327,18	331,23	331,35	325,26	331,82	334,75	322,85	327,31	331,07	329,92
Ekim	327,50	338,38	345,34	337,01	339,71	335,10	339,83	336,00	334,84	334,37	328,30	335,92	336,03
Kasım	294,25	313,46	314,90	312,46	308,63	310,09	301,72	314,71	318,43	301,96	305,11	309,59	308,78
Aralık	317,45	339,27	357,16	330,78	329,52	334,77	326,53	335,75	336,65	326,20	323,07	334,41	332,63

3.3. NO₂ ve CO Değerlerinin Nüfus Yoğunluğu ve Organize Sanayi Bölgeleri ile İlişkilendirilmesi

Çalışma kapsamında, NO₂ ve CO gaz konsantrasyonlarına etki eden faktörlerin değerlendirilmesi amacıyla Kocaeli iline ait 2018-2023 yılları arasındaki ilçe bazlı nüfus verileri incelenmiştir. 2018 yılında 1.727.894 olan Kocaeli toplam nüfusunun 2023 yılı itibarıyla %20'yi aşan bir artışla 2.102.907'ye ulaştığı tespit edilmiştir. Ayrıca, bu dönemde 12 ilçenin tamamında nüfus yoğunluğunda artış meydana gelmiştir. Bu durum göz önünde bulundurularak, nüfus yoğunluğu ile gaz konsantrasyonları arasındaki ilişki analiz edilmiştir.

Bu doğrultuda, 2018-2023 yılları arasında 12 ilçeye ait nüfus yoğunluğu verileri ile yıllık ortalama NO₂ ve CO gaz değerleri

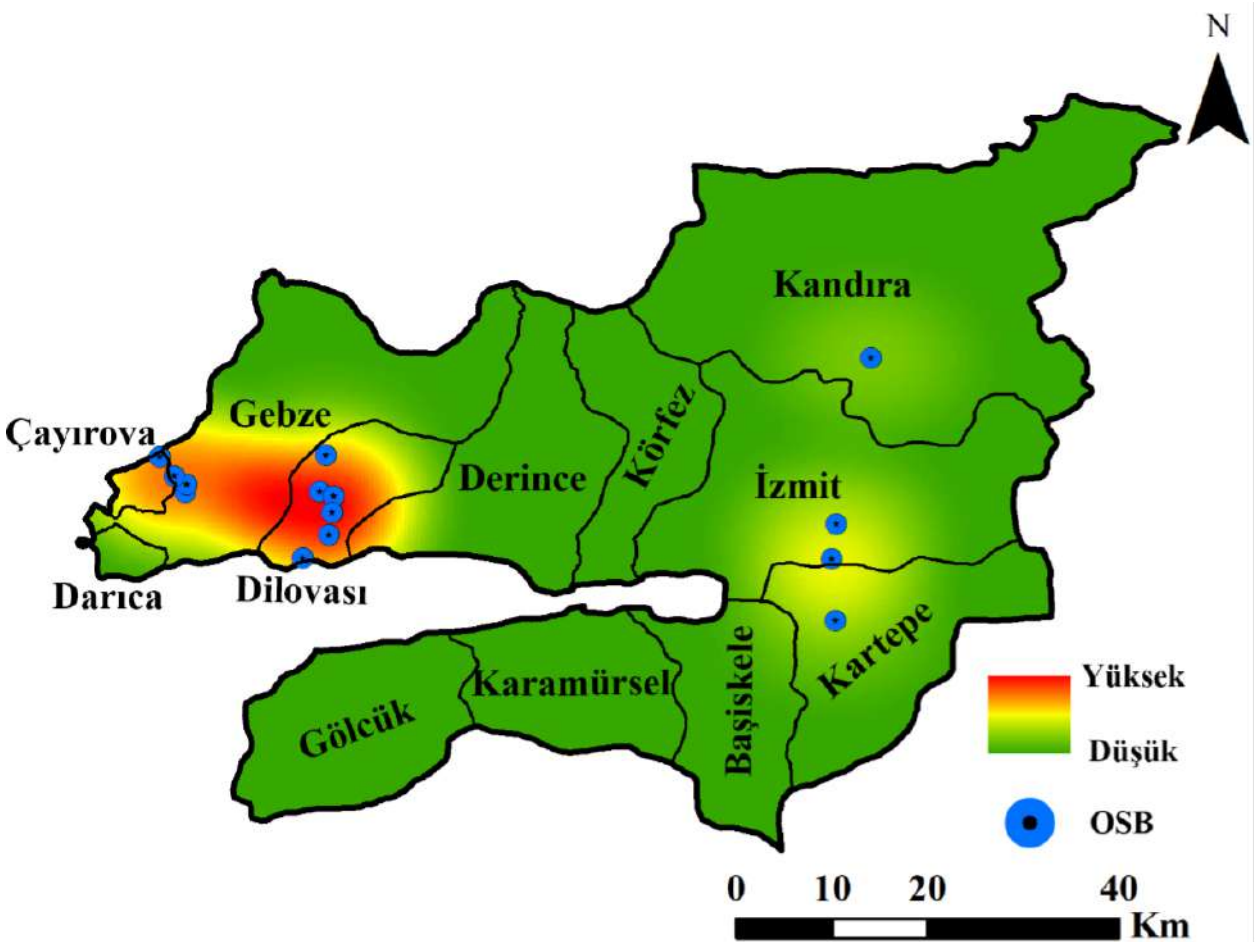
arasında istatistiksel ilişkiyi ortaya koymak amacıyla literatürde de birçok çalışmada yer verilen değişkenler, yersel veriler ve uydu tabanlı verilerin analizi için kullanılan Pearson korelasyon analizi gerçekleştirilmiştir (Sharifi ve Felegari, 2022; Faisal ve Jaelani, 2023; Omokpariola vd., 2024). Analiz sonuçlarına göre, NO₂ gazı ile nüfus yoğunluğu arasında en yüksek korelasyon Kandıra ilçesinde 0,80, en düşük korelasyon ise Karamürsel ilçesinde 0,53 olarak hesaplanmıştır (Şekil 4). Genel ortalama değerlere bakıldığında ise 2018-2023 yılları arasındaki nüfus artışı ile NO₂ gazındaki yıllık ortalama değişim arasında yaklaşık 0,65 düzeyinde bir korelasyon olduğu görülmüştür. Öte yandan, CO gazı ile nüfus yoğunluğu arasındaki ilişki de aynı yöntemle değerlendirilmiştir. Ancak, NO₂ gazının aksine CO gazı ile nüfus yoğunluğu arasında anlamlı bir korelasyon saptanmamıştır. Bu sonuç, CO konsantrasyonunun nüfustan ziyade farklı kaynaklar ya da çevresel değişkenlerle daha yakından ilişkili olabileceğine işaret etmektedir.



Şekil 4. 2018-2023 Yılları Arası Kocaeli İlçelerinin NO₂ Değerlerinin Nüfus Yoğunluğu Arasındaki Pearson Korelasyon Değerleri.

Türkiye'nin en büyük sanayi kentlerinden biri olan Kocaeli'nde, sanayi bölgelerinin NO₂ ve CO gaz yoğunluklarıyla olan ilişkisi kapsamlı biçimde incelenmiştir. Bu doğrultuda, il genelinde yer alan 14 organize sanayi bölgesinin (OSB) konumları belirlenmiş ve analizlerde kullanılmıştır

(Şekil 5). İlçelerle OSB'ler arasındaki mesafelerin hesaplanabilmesi amacıyla, her ilçeyi temsil eden poligonların merkez noktaları tanımlanmış ve bu merkezler ile OSB'ler arasındaki mesafeler hesaplanmıştır.



Şekil 5. Kocaeli İlinde Yer Alan Organize Sanayi Bölgelerinin Konumları ve Bu Konumlara Dayalı Olarak Gerçekleştirilen Yoğunluk Analizi.

Yapılan mesafe analizleri neticesinde, ilçe merkezlerine 20 km'den daha yakın konumda bulunan OSB sayısı ile 2018-2023 yılları arasındaki ortalama NO₂ değerleri arasındaki ilişki Pearson korelasyon katsayısı ile değerlendirilmiş; sonuç olarak 0,80 düzeyinde güçlü bir pozitif korelasyon saptanmıştır. Özellikle NO₂ değerlerinin en yüksek olduğu üç ilçe olan Darıca, Çayırova ve Dilovası'nın 20 km yarıçapı içerisinde 10 farklı OSB'nin yer alması, bu güçlü ilişkiyi desteklemektedir. CO gazı açısından ise OSB'lerle olan mesafeye dayalı korelasyon katsayısı 0,62 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, sanayi bölgelerine yakın ilçelerde hava kirleticilerinin daha yoğun olduğunu göstermektedir.

4. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışma kapsamında, Kocaeli ili özelinde 2018-2023 yılları arasında Sentinel-5P uydu verileri kullanılarak NO₂ ve CO gazlarına ilişkin zamansal ve mekânsal dağılım analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, kirlilik düzeyleri ile organize sanayi bölgeleri ve nüfus yoğunluğu arasında yapılan korelasyon analizleriyle çalışmaya farklı bir boyut eklenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, kent genelinde NO₂ yoğunluğu en yüksek seviyeye 2023 yılında (1,05 mol/cm²), en düşük seviyeye ise 2020 yılında (0,88 mol/cm²) ulaşmıştır. CO gazı açısından en yüksek değer 2021 yılında (343,3 mol/cm²), en düşük değer ise 2022 yılında (308 mol/cm²) olarak belirlenmiştir. İlçe bazlı analizler neticesinde, 2023 yılı için NO₂ ve CO değerlerinin en yüksek olduğu ilçe Darıca olarak öne çıkarken, en düşük NO₂ yoğunluğu Kandıra ilçesinde gözlemlenmiştir. Mevsimsel dağılımlar dikkate alındığında, NO₂ kirliliği kış aylarında zirve yaparken yaz aylarında minimum düzeyde seyretmiştir. CO gazı açısından ise mevsimsel değişim daha sınırlı olup, kış, ilkbahar ve sonbahar aylarında benzer yoğunluklar kaydedilmiştir. Diğer taraftan, literatürde yer alan çalışmalarda elde

edilen sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda özellikle CO ve NO₂ yoğunluklarıyla nüfusun yüksek oranda korelasyona sahip olduğu görülmektedir. Kaplan ve Aydan (2020) tarafından gerçekleştirilen çalışmada NO₂ yoğunluğu ile nüfus arasında R² değerleri 0,61 ile 0,80 arasında değişmektedir. Aynı zamanda Zheng vd. (2019) tarafından gerçekleştirilen bir başka çalışmada NO₂ yoğunluğunun hem endüstriyel bölgeler hem de nüfus ile ilgili yüksek korelasyona sahip olduğu görülmüştür. Nitekim literatürde yer alan çalışmaların, bu çalışmada elde edilen bulguları destekler nitelikte olduğu kanıtlanmıştır.

Bu bulgular, Kocaeli gibi yoğun sanayi faaliyetlerinin yürütüldüğü bir bölgede, sanayi alanlarının hava kirliliği üzerindeki belirleyici rolünü ortaya koymaktadır. Özellikle organize sanayi bölgelerine yakın ilçelerde NO₂ ve CO yoğunluklarının yüksek olması, endüstriyel kaynakların hava kalitesi üzerindeki etkisini doğrulamaktadır. Bununla birlikte, doğrudan etkisi sınırlı olsa da nüfus yoğunluğunun artışının dolaylı yoldan kirlilik seviyelerini yükselttiği anlaşılmaktadır. Özellikle kış aylarında fosil yakıt kullanımındaki artış, NO₂ konsantrasyonlarını artıran önemli bir etmen olarak değerlendirilmektedir.

Uzaktan algılama teknolojileri ile elde edilen verilerine dayalı bu çalışma, hava kalitesinin mekânsal ve zamansal olarak izlenmesinde Sentinel-5P uydu görüntülerinin etkin bir araç olduğunu göstermektedir. Ancak, bu tür analizlerin daha yüksek doğrulukla desteklenebilmesi için yerel ölçümlere dayalı verilerle çapraz doğrulama yapılması, meteorolojik ve topografik faktörler gibi diğer değişkenlerin de analize dahil edilmesi gerekmektedir. Gelecek çalışmalar, bu tür çok değişkenli analizlere odaklanarak hava kirliliğinin kaynaklarının daha ayrıntılı bir şekilde ortaya konmasına katkı sağlayabilir niteliktedir.

Kaynakça

- Bodah, B. W., Neckel, A., Maculan, L. S., Milanes, C. B., Korcelski, C., Ramirez, O., ... & Oliveira, M. L. (2022). Sentinel-5P TROPOMI Satellite Application for NO₂ and CO Studies Aiming at Environmental Valuation. *Journal of Cleaner Production*, 357, 131960.
- Cohen, J. B., Wang, C., & Prinn, R. G. (2010, December). The Impact of Detailed Urban-Scale Processing on the Aerosol Direct Effect and Its Impacts on the Climate. In *AGU Fall Meeting Abstracts* (Vol. 2010, pp. B11J-05).
- Çilek, M. Ü. (2022). Troposferik Nitrojen Dioksitin (NO₂) COVID-19 Pandemisinde Mekânsal ve Zamansal Analizi: Adana-Mersin Bölgesi. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 27(3), 581-594.
- Douros, J., Eskes, H., van Geffen, J., Boersma, K. F., Compernelle, S., Pinardi, G., ... & Veeckind, P. (2023). Comparing Sentinel-5P TROPOMI NO₂ Column Observations with the CAMS Regional Air Quality Ensemble. *Geoscientific Model Development*, 16(2), 509-534.
- European Environmental Agency. (2018). Air Quality in Europe - 2018 report. EEA Report No 12/2018. ISSN 1977-8449.
- Faisal, M., & Jaelani, L. M. (2023). Spatio-temporal Analysis of Nitrogen Dioxide (NO₂) from Sentinel-5P Imageries Using Google Earth Engine Changes during the COVID-19 Social Restriction Policy in Jakarta. *Natural Hazards Research*, 3(2), 344-352.
- Grzybowski, P. T., Markowicz, K. M., & Musiał, J. P. (2023). Estimations of the Ground-level NO₂ Concentrations Based on the Sentinel-5P NO₂ Tropospheric Column Number Density Product. *Remote Sensing*, 15(2), 378.
- Grzybowski, P. T., Markowicz, K. M., & Musiał, J. P. (2023). Estimations of the Ground-level NO₂ Concentrations Based on the Sentinel-5P NO₂ Tropospheric Column Number Density Product. *Remote Sensing*, 15(2), 378.
- Hettelingh, J. P., Stevens, C. J., Posch, M., Bobbink, R., & Vries, W. D. (2015). Assessing the Impacts of Nitrogen Deposition on Plant Species Richness in Europe. *Critical Loads and Dynamic Risk Assessments: Nitrogen, Acidity and Metals in Terrestrial and Aquatic Ecosystems*, 573-586.
- Inness, A., Flemming, J., Heue, K. P., Lerot, C., Loyola, D., Ribas, R., ... & Zimmer, W. (2019). Monitoring and Assimilation Tests with TROPOMI Data in the CAMS System: Near-Real-Time Total Column Ozone. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(6), 3939-3962.
- İstanbul Ticaret Odası. (2025). Kocaeli İlindeki Organize Sanayi Bölgeleri, 2025. https://www.ito.org.tr/documents/Hizmetler/osb_radar/kocaeli_ilindeki_organize_sanayi_bolgeleri_02_2025.pdf
- Kaplan, G., & Avdan, Z. Y. (2020). Space-borne Air Pollution Observation from Sentinel-5p Tropomi: Relationship between Pollutants, Geographical and Demographic Data. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 5(3), 130-137.
- Omokpariola, D. O., Nduka, J. N., & Omokpariola, P. L. (2024). Short-Term Trends of Air Quality and Pollutant Concentrations in Nigeria from 2018-2022 Using Tropospheric Sentinel-5P and 3A/B Satellite Data. *Discover Applied Sciences*, 6(4), 182.
- Sharifi, A., & Felegari, S. (2022). Nitrogen Dioxide (NO₂) Pollution Monitoring With Sentinel-5P Satellite Imagery over during the Coronavirus Pandemic (Case Study: Tehran). *Remote Sensing Letters*, 13(10), 1029-1039.
- Schneider, P., Hamer, P. D., Kylling, A., Shetty, S., & Stebel, K. (2021). Spatiotemporal Patterns in Data Availability of the Sentinel-5p No₂ Product over Urban Areas in Norway. *Remote Sensing*, 13(11), 2095.
- Shetty, S., Schneider, P., Stebel, K., Hamer, P. D., Kylling, A., & Berntsen, T. K. (2024). Estimating Surface NO₂ Concentrations over Europe Using Sentinel-5P TROPOMI Observations and Machine Learning. *Remote Sensing of Environment*, 312, 114321.
- Taheri, S., & Razban, A. (2021). Learning-Based CO₂ Concentration Prediction: Application to Indoor Air Quality Control using Demand-Controlled Ventilation. *Building and Environment*, 205, 108164.
- Türkiye İstatistik Kurumu. (2023). Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi Sonuçları, 2023. <https://www.tuik.gov.tr>
- Van Geffen, J., Eskes, H., Compernelle, S., Pinardi, G., Verhoelst, T., Lambert, J. C., ... & Veeckind, J. P. (2022). Sentinel-5P TROPOMI NO₂ Retrieval: Impact of Version v2. 2 Improvements and Comparisons with OMI and Ground-Based Data. *Atmospheric Measurement Techniques*, 15(7), 2037-2060.
- Virghileanu, M., Săvulescu, I., Mihai, B. A., Nistor, C., & Dobre, R. (2020). Nitrogen Dioxide (NO₂) Pollution Monitoring with Sentinel-5P Satellite Imagery over Europe during the Coronavirus Pandemic Outbreak. *Remote Sensing*, 12(21), 3575.
- Weinstock, B., & Niki, H. (1972). Carbon Monoxide Balance in Nature. *Science*, 176(4032), 290-292.
- World Health Organization. Air Pollution. Available online: https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_1 (accessed on 14 August 2020)
- Zheng, Z., Yang, Z., Wu, Z., & Marinello, F. (2019). Spatial Variation of NO₂ and its Impact Factors in China: An Application of Sentinel-5P Products. *Remote Sensing*, 11(16), 1939.
- Zheng, Z., Yang, Z., Wu, Z., & Marinello, F. (2019). Spatial Variation of NO₂ and its Impact Factors in China: An Application of Sentinel-5P Products. *Remote Sensing*, 11(16), 1939.