

Havalimanlarında Hava Kalite Parametrelerinin Sentinel-5P Uydu Verileri ile İncelenmesi: İstanbul ve Rize-Artvin Havalimanı Örneği

Examination of Air Quality Parameters in Airports with Sentinel-5P Satellite Data: A Case Study for Istanbul and Rize-Artvin Airports

*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 09.09.2024

Kabul/Accepted: 26.12.2024

Yayınlandı/Published: 10.06.2025

Nur YAĞMUR AYDIN* 

Gebze Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Türkiye



© 2025 The Author | Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 (CC BY-NC) International License

Öz

Havalimanları toplumun ulaşım ihtiyacının önemli bir kısmını karşılamaktadır. Ancak, kentleşmenin artışı ile yeni havalimanlarının inşaatı için elverişli alanlar azalmış, şehre uzak noktalarda rehabilite edilmiş alanlara veya denize dolgu alanlara inşa edilmeye başlanmıştır. Ancak doğal ekosistemin tahrip edilmesiyle inşa edilen bu yapıların, çevreye verebileceği olası zararların izlenmesi gerekmektedir. Bu bağlamda izlenmesi gereken çevresel etkilerden biri, yeni inşa edilen bu havalimanlarının etkilediği hava kalitesidir. Uzaktan algılama kaynakları, yer istasyonları gibi nokta bazlı bir veri kaynağı olmamakla birlikte belirli periyotlarda veri sağlayarak mekânsal ve zamansal analizlere olanak sağlamaktadır. Çalışma kapsamında, ülkemizde en son faaliyete açılan İstanbul Havalimanı ve Rize-Artvin Havalimanı üzerinde hava kalite parametrelerinde meydana gelen değişimler uydu kaynaklarından elde edilen aylık zaman serileri ile incelenmiştir. Sentinel-5P uydusu ile ultraviyole aerosol indeksi (UV), karbon monoksit (CO), azot dioksit (NO₂), ozon (O₃) ve kükürt dioksit (SO₂) hava kalite parametrelerinin 2018-Mayıs 2024 periyodu için zaman serileri Google Earth Engine bulut platformu kullanılarak elde edilmiştir. Parametre bazında incelenen zaman serisi analizlerinde, UV, SO₂, NO₂ ve O₃ parametrelerinde artan bir eğilim tespit edilirken, CO parametresinde stabil bir eğilim görülmüştür. Gerçekleştirilen istatistiksel analizler doğrultusunda uçak trafiği verileri ile CO ve NO₂ parametreleri arasında pozitif korelasyonların (havalimanları özelinde sırasıyla CO parametresi ile 0.48 ve 0.41, NO₂ parametresi ile 0.66 ve 0.73) yanı sıra istatistiksel olarak anlamlı sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Havalimanı; Sentinel-5P; Hava kalitesi; Zaman serisi analizi; Granger Nedensellik testi; Google Earth Engine.

Abstract

Airports meet a significant part of the transportation needs of society. However, with the increase in urbanization, the areas suitable for the construction of new airports have decreased, and they have started to be built on rehabilitated areas or on sea-filled areas. However, it is necessary to monitor the possible damage of these structures, which are built by destroying the natural ecosystem. In this context, one of the environmental impacts to be monitored is air quality. Remote sensing enables spatio-temporal analysis since they are not point-based data sources and provide data at specific periods. In the study, changes in air quality parameters at two new airports (Istanbul Airport and Rize-Artvin Airport) were examined with time series analysis. Time series of five air quality parameters (ultraviolet aerosol index (UV), carbon monoxide (CO), nitrogen dioxide (NO₂), ozone (O₃) and sulfur dioxide (SO₂)) for the period 2018-May 2024 were obtained using the Google Earth Engine cloud platform with the Sentinel-5P satellite. In the time series analyzes examined on a parameter basis, an increasing trend was detected in UV, SO₂, NO₂, and O₃ parameters, while a stable trend was observed in CO parameter. In line with the statistical analyses performed, positive correlations between aircraft traffic data and CO and NO₂ parameters (0.48 and 0.41 with CO parameter, 0.66 and 0.73 with NO₂ parameter, respectively, for airports), as well as statistically significant results were obtained.

Keywords: Airport; Sentinel-5P; Air quality; Time series analysis; Granger-Causality test; Google Earth Engine.

1. Giriş

Nüfus artışı, kentsel yapılaşmada artışın yanı sıra ulaşım sistemlerinde de ihtiyacın artmasına neden olmaktadır. Ulaşım sistemlerinin büyük çoğunluğunu karayolları oluştururken, ikinci sırada havayolları gelmektedir (ÇŞİDB 2023). Havayolları, gerek yurt içi gerekse yurt dışı ulaşım ve taşımacılık sektörlerinde aktif rol oynamaktadır. Bu

sebeple, yeni havalimanlarına gereksinim gün geçtikçe artmaktadır. Günümüzde Türkiye’de sivillerin kullandığı 59 havalimanı mevcuttur ve son 20 yılda havalimanı sayısında ciddi bir artış olduğu görülmektedir. Ancak artan şehirleşme ile elverişli alanların azalması ve havalimanı gibi büyük ölçekli altyapıların inşaatına uygun yer eksikliği sebebiyle, dolgu alanlar veya rehabilite edilerek

kazandırılmış alanlar üzerine havalimanları inşa edilmeye başlanmıştır (Liu vd. 2019). Her ne kadar havalimanlarının inşası toplumsal fayda açısından önemli olsa da, rehabilite alanlarına ya da deniz dolgusu üzerine inşa edilmeleri ciddi çevresel sonuçları da beraberinde getirecektir.

Havacılığın insan ve doğal kaynaklar üzerindeki çevresel etkileri ABD’de Ulaştırma Araştırma Kurulu tarafından hazırlanan raporda; gürültü, hava kalitesi, su kalitesi ve iklim değişikliği olarak listelenmektedir (TRC 2021). Bu kapsamda, artan nüfus ile beraber yolcu sayısının artışı havacılık sektörünün faaliyetlerini de arttırdığından, havalimanlarının çevresel etkilerini takip etmek daha da önemli bir hal almıştır. Uçaklardan kaynaklanan emisyonların hava kirliliği, insan sağlığı, ozon tabakası, sera gazları ve iklim değişikliği üzerinde çeşitli olumsuz etkileri mevcuttur (Elbir 2008, Lee vd. 2010). Özellikle hava kirliliği, hem toplum sağlığını hem de iklim değişikliğini etkilediğinden takibi ve değişiminin belirlenmesi önem kazanmaktadır. Hava kirleticilerin etkisini azaltmaya yönelik güvenilir bir tahmin ve karar alma modeli kurulabilmesi için hava kalitesinin sürekli ve doğru bir şekilde izlenmesi gereklidir (Hou vd. 2019).

Uçak egzoz emisyonları, havacılık yakıtı olan kerosenin yanmasından kaynaklanmaktadır (Elbir 2008). Bir hava taşıtından kaynaklanan bu emisyonlar temel olarak karbondioksit (CO_2), su buharı (H_2O), azot oksitler (NO_x), çeşitli sülfür oksitler (SO_x), karbon monoksit (CO), çeşitli metan dışı hidrokarbonlar (NMHC), partikül madde (PM), uçucu organik bileşikler ve diğer bileşikler içerir (Kesgin 2006). Çevre ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etkileri olduğu bilinen bu emisyonların miktarının ve etkilerinin belirlenmesi önemlidir. Bu sebeple, uçaklardan kaynaklanan emisyonların çevre ve insan sağlığı üzerindeki etkisi iki bölüme ayrılabilir. İlki, uçak operasyonlarının iniş ve kalkış aşamalarında (LTO döngüsü) oluşan uçaklardan kaynaklanan kirlitici emisyonlardan oluşur ve havacılıktan kaynaklanan hava kirliliği olarak görülür (Kurniawan ve Khardi 2011). Örneğin havaalanlarının yakınında üretilen SO_2 ve NO_2 emisyonları kirli havaya sebep olurken, CO toksiktir ve bazı hidrokarbonların ve isin kanserojen olduğundan şüphelenilmektedir (Kesgin 2006). İkinci bölüm ise tırmanma, seyir operasyonları (LTO döngüsü olmayan) dahil olmak üzere diğer uçuş aşamalarında oluşan emisyonları oluşturur ve bunların iklim değişikliği, stratosferik ozon ve UV radyasyonu üzerindeki etkilerini içerir (Kurniawan ve Khardi 2011). CO , NO_2 , O_3 ve SO_2 kirleticileri maruz kalındığında insan sağlığı için tehlikeli maddeler olarak sıralanan hava kalite parametreleridir (De Nevers 2010). Bu noktada emisyon takibi ve azaltımı kritik bir konudur. Gelişen uzaktan algılama teknolojileri

ile bahsedilen hava kalitesi parametreleri geniş mekansal ölçekte izlenebilmektedir.

Atmosferik partiküllerin ve kimyasalların atmosferdeki mekansal dağılımı oldukça heterojendir (El-Khoury vd. 2021). Bu sebeple, istasyon bazlı hava kalitesi ağı sadece noktasal bilgi sağlayacağından partiküllerin atmosferdeki dağılımını kapsamlı bir şekilde sunamamaktadır (Pinder vd. 2019). Uzaktan algılama, geniş kapsama alanı ile atmosferik parametrelerin takibine olanak sağlamaktadır. Bodah vd. (2022), Sentinel-5P TROPOMI verilerini kullanarak Brezilya’nın Passo Fundo kenti için NO_2 ve CO parametrelerinin 2019 yılı boyunca değişimini incelemişlerdir. Halder vd. (2023), bulut tabanlı Google Earth Engine (GEE) platformunu kullanarak 2018-2021 zaman aralığında MODIS ve Sentinel-5P uydu kaynaklarından elde ettikleri hava kalitesi parametrelerinin ülkesel ölçekte yıllık analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Sentinel-5P, zengin veri içeriği ve ücretsiz erişim olanağıyla son yıllarda farklı çalışmalarda oldukça sık kullanılmaya başlanmıştır (Zheng vd. 2019, Magro vd. 2021, Muniraj vd. 2023, Makineci vd. 2023) ve diğer hava kalitesi gözlem uydu sensörlerinden farklı olarak TROPOMI, hava kalitesi uygulamaları için gerekli olan nispeten yüksek bir mekansal çözünürlüğe sahiptir (Abida vd. 2016). Ayrıca birçok çalışma, Sentinel-5P uydu verilerinin yerel alanlarda da kullanıma uygun olduğunu ortaya koymuştur (Beirle vd. 2019, Virghileanu vd. 2020, Çilek 2022).

Son yıllarda, Çin (Jiang ve Lin 2010, Zhuo vd. 2020, Song vd. 2022), Filipinler (Catane vd. 2024), Fransa (Cavalié vd. 2023) gibi birçok farklı ülkede havalimanlarının kıyı alanlara inşa edilmesi eğilimi artmıştır. Türkiye’de de dolgu veya ıslah edilen alanlara havalimanı inşa edilmeye başlanmış ve ilk olarak deniz dolgusu üzerine inşa edilen Ordu-Giresun Havalimanı 2015 yılında faaliyetlerine başlamıştır. ıslah edilen alan üzerine inşa edilen İstanbul Havalimanı ve deniz dolgusu üzerine inşa edilen Rize-Artvin Havalimanı da sırasıyla 2018 ve 2022 yıllarında faaliyetlerine başlamıştır. Havalimanları neden olduğu emisyonlar sebebi ile hava kirliliğine sebep olurken, doğal ekosistemi doğrudan etkileyen dolgu havalimanlarında da hava kirliliğinin oluşması kaçınılmaz olacaktır (Durmaz vd. 2007). Ancak, atmosferde ölçülen kirleticilerin havacılıktan mı yoksa diğer kaynaklardan mı kaynaklandığını izleme ağlarından kesin olarak belirlemenin bilinen bir yolu olmadığından, hava kalitesindeki bozulmanın ne kadarının havacılıktan kaynaklandığını belirlemek zordur (TRC 2021). Bu sebeple, bu çalışma kapsamında uzaktan algılama kaynaklarının dolgu havalimanlarında hava kalitesinin takip edilebilirliğindeki etkinliğinin araştırılması

amaçlanmıştır. Literatürde Türkiye’de faaliyet gösteren havalimanlarının hava kalitesine etkilerini inceleyen çalışmalar mevcuttur.

Bu çalışmalar, yer istasyonları kullanılarak (Birinci vd. 2023) veya LTO döngüsü emisyonları belirlenerek (Ekici ve Şöhret 2021, Gürçam vd. 2021, Zeydan ve Şekertekin 2022) gerçekleştirilmiş olup, Sentinel-5P uydu verileri kullanılarak gerçekleştirilen çalışmaya rastlanmamıştır. Uluslararası literatürde ise havalimanlarındaki emisyonlar ve etkileri yersel ölçme verileri kullanılarak değerlendirilmiş olup (Schäfer vd. 2003, Unal vd. 2005, Popescu vd. 2011) uzaktan algılama verileri, özellikle Sentinel-5P verileri, ile gerçekleştirilen çalışmalar sadece havalimanlarındaki Covid-19 sürecini ele almaktadır (Kanniah vd. 2021, Shikwambana ve Kganyago 2021). Devlet Hava Meydanları İşletmesi (DHMI) Genel Müdürlüğü de hazırladığı 2024-2028 Stratejik Planı’nda hava kalitesi yönetiminin yetersiz olduğu tespitinde bulunmuştur (DHMI 2024). Bu amaçla, Sentinel-5P uydu verileri kullanılarak yeni faaliyete giren İstanbul Havalimanı ve Rize-Artvin Havalimanı’ndaki uçak operasyonlarından kaynaklanan emisyonların (CO, NO₂, SO₂, UV ve O₃) atmosferdeki yayılımı ve meydana gelen zamansal değişimler incelenmiştir. Sentinel-5P uydu verisinin havalimanlarında hava kalitesinin izlenmesindeki rolü değerlendirilerek, uçak trafiğinin hava kalite parametreleri üzerindeki etkileri de Granger Nedensellik testi ile istatistiksel olarak analiz edilmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1 Çalışma Alanı

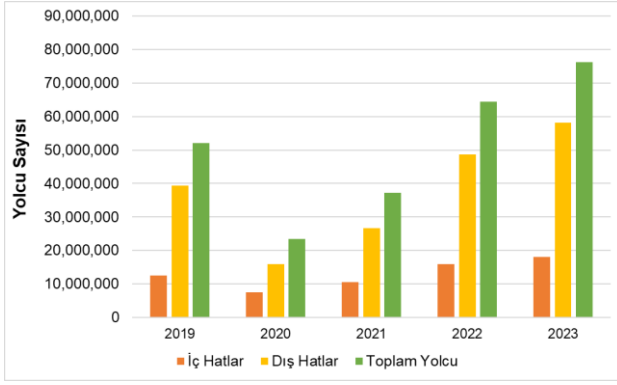
Çalışma kapsamında, ülkemizde en son kullanıma açılan iki havalimanı; ıslah edilen alanlar üzerine inşa edilen İstanbul Havalimanı ve deniz dolgusu üzerine inşa edilen Rize-Artvin Havalimanı çalışma alanı olarak seçilmiştir (Şekil 1). Bu havalimanlarının seçilmesinin temel sebebi, her iki havalimanında da mevcut ekosistemin havalimanı inşaatı için değiştirilmesidir. İstanbul Havalimanı, İstanbul’un kuzeybatısında yer alan Tayakadın ile Akpınar köyleri arasında yer alan sulak alanların ıslah edilmesiyle 2015 yılında inşa edilmeye başlanmıştır (Yağmur ve Musaoğlu 2022). 76,5 km² üzerine inşa edilmesi hedeflenen havalimanı 29 Ekim 2018 tarihinde iki pisti ile kullanıma açılmıştır. Haziran 2020’de de üçüncü pisti tamamlanarak kullanıma açılmıştır. Havalimanı’nın inşa edildiği bölgenin 1970-1990 yılları arasında şehrin kömür ihtiyacını karşılamak amacıyla kullanıldığı ancak doğalgazın gelmesiyle beraber terkedildiği bilinmektedir (Seker vd. 2008). Terkedilen açık maden ocaklarının yağmur ve yeraltı suları ile dolarak sulak alanları oluşturması, bölgede zaman içerisinde bir ekosistem oluşmasını sağlamıştır (JMO 2014). Ayrıca, maden ocaklarından çıkarılan kum yığınları da ağaçlandırılarak rehabilitasyon çalışmaları yapılmıştır (Turnacıgil 2008). Havalimanı inşaatı, Yeniköy tarafında yer alan bölgenin tahrip edilmesine ve sulak alanların kurutularak doldurulmasına sebebiyet vermiştir.



Şekil 1. Çalışma kapsamında incelenen havalimanları: İstanbul Havalimanı ve Rize-Artvin Havalimanı ve konumları.

Havalimanı kullanıma açıldığı tarihten beri artan yolcu trafiğiyle İstanbul’un ulaşım ihtiyacının büyük bir kısmını karşılamaktadır. Şekil 2’de İstanbul Havalimanı’nda taşınan yolcu sayıları yıl bazında verilmiştir. Kullanım hayatına 2018 yılında yaklaşık olarak 95 bin yolcu ile başlayan havalimanı, 2019 yılında hızlı bir ilerleme ile yılda

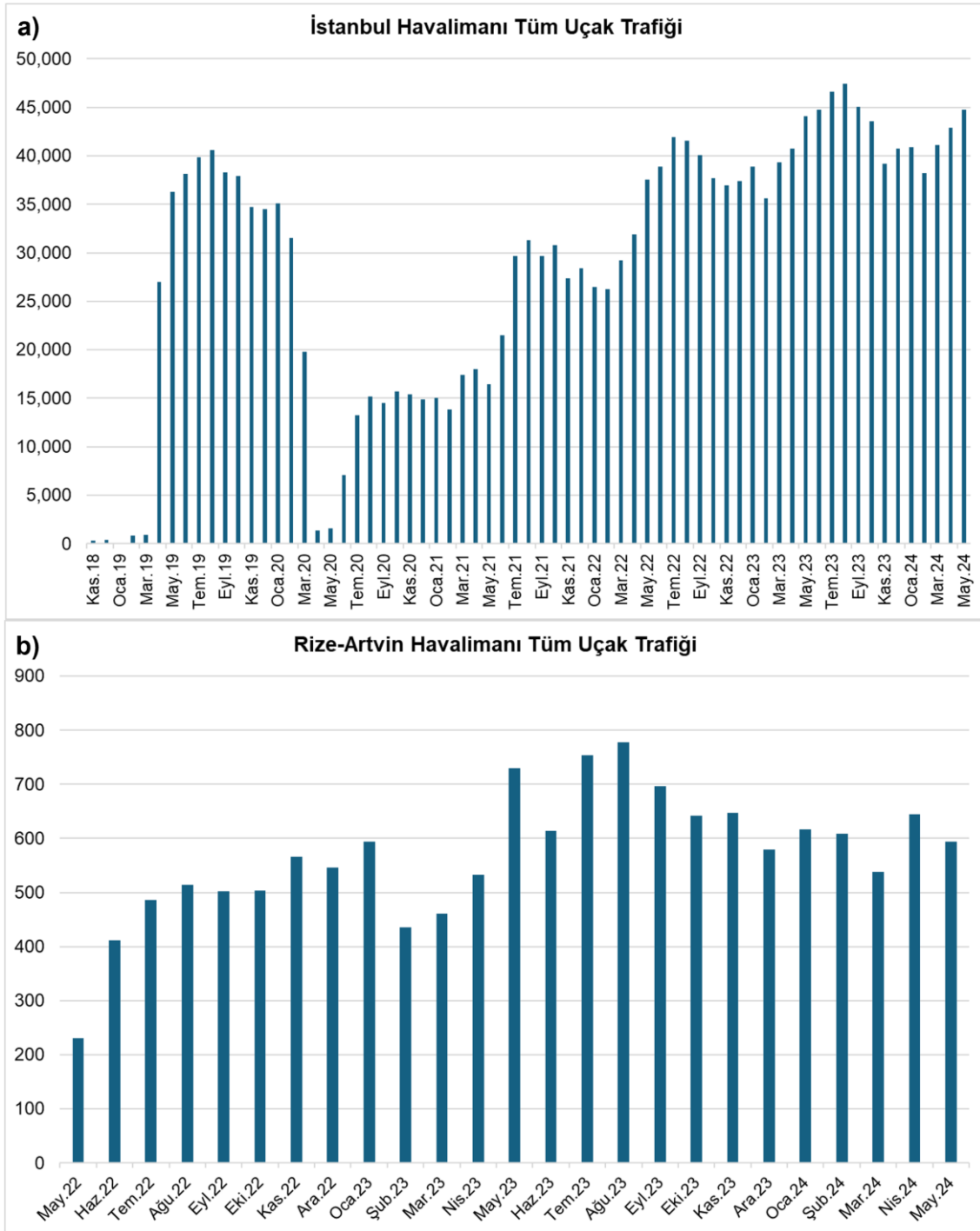
yaklaşık olarak 50 milyon yolcunun ulaşımına olanak sağlamıştır. 2020 yılında Türkiye’de yaşanan COVID-19 salgını sonrası bu sayı yarı yarıya düşse de, 2023 yıllarına doğru yine artış göstererek 76 milyona ulaşmıştır. 2018 yılında yolcu sayısının ve etkisinin az olması sebebiyle Şekil 2’deki grafik gösteriminde dikkate alınmamıştır.



Şekil 2. İstanbul Havalimanı'nda seyahat eden yıllık toplam yolcu sayısı.

Rize'nin Pazar ilçesinde inşa edilen Rize-Artvin Havalimanı ise, Ordu-Giresun Havalimanı'ndan sonra deniz dolgusu üzerine inşa edilen ikinci havalimanıdır. Mayıs 2022'de kullanıma açılmıştır. Kullanıma açıldıktan sonra 2022 yılında taşınan yolcu sayısı 526.880 iken 2023 yılında bu sayı 1 milyona ulaşmıştır (DHMI 2024).

Her iki havalimanı da zamanla artan yolcu sayısı ile hava trafiğinde etkin rol oynamaktadır. DHMI tarafından aylık tüm uçak trafiği verileri kayıt altına alınarak servis edilmektedir. Servis edilen veriler ile hazırlanan istatistikler (DHMI 2024) görselleştirilerek Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. a). İstanbul Havalimanı ve b) Rize-Artvin Havalimanı'nda meydana gelen tüm uçak trafiği.

2.2 Uydu Verileri ve Hava Kalite Parametreleri

Hava kalite parametrelerinin izlenebilmesi amacıyla, misyonu hava kalitesi, ozon ve UV radyasyonu ile iklim izleme ve tahmin için kullanılacak yüksek mekânsal ve zamansal çözünürlükte atmosferik ölçümler gerçekleştirmek olan Sentinel-5P TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument) uydu verileri çalışma kapsamında kullanılmıştır. Uydu, havayı ve dolayısıyla insan sağlığını ve iklimi etkileyen çok sayıda gazın haritasını çıkarmak için son teknoloji ürünü olan TROPOMI sensörünü taşımaktadır (ESA 2024). TROPOMI sensörü, atmosferik ozon (O_3), metan, formaldehit, ultraviyole aerosol indeks (UV), karbon monoksit (CO), azot dioksit (NO_2) ve kükürt dioksit (SO_2) konsantrasyonlarını kaydetmektedir. Göreve başladığında 3.5×7 km mekânsal çözünürlükte veri kaydeden sensör, 6 Ağustos 2019'dan itibaren 3.5×5.5 km olarak veri kaydetmektedir.

Hava kalite parametrelerinin oluşumunda birçok faktör rol oynamaktadır. CO, herhangi bir karbonlu malzemenin eksik yakılmasından kaynaklanan, kokusuz ve renksiz bir gazdır (Muniraj vd. 2023). CO kirliliği öncelikle fosil yakıtla çalışan motorların ürettiği emisyonlardan kaynaklanmaktadır. Daha yüksek CO seviyeleri genellikle yoğun trafik sıklığının olduğu bölgelerde ortaya çıkmaktadır (Asadifard ve Masoudi 2018).

İnsan sağlığını en çok etkileyen azot oksit türü olduğu belirtilen NO_2 parametresi, bu özelliği sebebiyle en önemli hava kalite parametrelerinden biridir. Temel sebepleri arasında, trafik yoğunluğu, ısınma faaliyetleri ve sanayi bölgeleri gösterilmektedir (ÇŞİDB-SİM 2024). Ortam atmosferindeki NO_2 'nin ana kaynakları kömür, petrol ve gaz gibi fosil yakıtların yakılmasıdır. NO_2 oldukça reaktif bir kirleticidir ve özellikle fosil yakıtların yanması sonucu yayılır. Ulaşım, NO_2 emisyonlarının ana kaynağı olarak değerlendirilmektedir (Muhammad vd. 2020). NO_2 gazları su buharı ile reaksiyona girerek farklı türde asit yağmurları oluşumuna sebebiyet verir (Muniraj vd. 2023).

SO_2 parametresi ise, genellikle volkanlardan kaynaklanan jeotermal faaliyetler tarafından doğal olarak veya kömür ve petrolün yanması gibi insan faaliyetleri tarafından üretilen yaygın bir atmosferik kirleticidir (Cullis ve Hirschler 1980). Motorlu taşıtlar yüksek düzeyde CO ve önemli derecede hidrokarbon (HC) ve nitrojen oksit (NO_x) kaynağı üretirken, konut, ticari ve endüstriyel ısıtma ve soğutma gibi sistemlerde yakıt kullanımı SO_2 'nin baskın kaynağıdır (Dursun vd. 2015).

Sentinel-5 TROPOMI verisinde bulunan UV aerosol indeks parametresi, emici aerosol indeksleri ifade etmektedir.

Biyokütlenin yakılmasından kaynaklanan duman, çöl tozu, volkanik kül ve antropojenik olarak üretilen kurum gibi emici aerosoller, radyasyonu emer ve iklim üzerinde sıcaklık artışına neden olan bir etkiye sahiptir (Kooreman vd. 2020). UV emici aerosol indeksi, atmosferde aerosollere atfedilen emilimin varlığını gösterir. Pozitif değerler toz ve duman gibi UV emici aerosollerin varlığını gösterir ve emici aerosol yüklü bir atmosfer ile berrak bir atmosfer arasındaki yansıma kalıntısının pozitif değerleri olarak tanımlanır. Negatif değerler çoğunlukla saçılan aerosoller ve bulutlarla ilişkilidir ve açık bir atmosfere kıyasla daha fazla saçılan parçacık içeren bir atmosferin göstergesidir (Penning de Vries vd. 2009).

Bir diğer önemli parametre olan O_3 parametresi de, şehir havasında yaygın olarak bulunan bir oksidan gazdır ve ozona maruz kalmak oksidatif strese neden olarak hava yolu inflamasyonuna ve solunum yolu hastalıklarının artmasına neden olabilmektedir (Adhikari ve Yin 2020). Ozon, güneşin ultraviyole radyasyonu altında uçucu organik bileşiklerin nitrojen oksitlerle (NO_x) fotokimyasal reaksiyonları sonucu oluşur (Fares vd. 2010). Çoğu bölgede NO_x emisyonlarının azalmasıyla birlikte O_3 de azalırken; bununla birlikte, yüksek NO_x emisyonlarının hakim olduğu trafiğin yoğun olduğu bazı kentsel bölgelerde, O_3 başlangıçta azalan NO_x emisyonlarına tepki olarak artabilmekte, ancak kentsel dumanın kırsal alanlara taşınmasından sonra O_3 parametresi de azalmaktadır (Dentener vd. 2020).

Havalimanlarında hava kalite parametrelerinin değişiminin izlenmesi için kullanılan beş parametre ve verinin zamansal aralığı Çizelge 1'de verilmiştir. Sentinel-5P uydusu 13 Ekim 2017'de fırlatılmasına rağmen veri temininin başlangıcı parametrelere göre değişkenlik göstermektedir. UV, CO ve NO_2 uydu verileri Temmuz 2018 itibarıyla sağlanırken, O_3 Eylül 2018'de ve SO_2 ise Aralık 2018'de temin edilmeye başlanmıştır.

Çizelge 1. Kullanılan hava kalitesi parametreleri ve zamansal veri aralığı.

Parametre	Veri Aralığı
UV	Temmuz 2018 – Mayıs 2024
CO	Temmuz 2018 – Mayıs 2024
NO_2	Temmuz 2018 – Mayıs 2024
O_3	Eylül 2018 – Mayıs 2024
SO_2	Aralık 2018 - Mayıs 2024

Çizelge 1'de belirlenen beş parametrenin günlük zaman serileri Google Earth Engine (GEE) bulut platformu kullanılarak elde edilmiştir. GEE, uydu görüntülerinin depolanmasının yanı sıra çeşitli mekânsal analizlerin

gerçekleştirilmesine olanak sağlayan açık kaynak kodlu bir bulut platformudur. Kullanıcı dostu ara yüzü ile Javascript programlama dili kullanılarak analizlere olanak sağlamaktadır (GEE 2024). Sentinel-5P uydusundan Seviye 2, GEE aracılığıyla yaklaşık olarak 1 km mekânsal çözünürlüğe sahip grid sistemiyle daha yüksek mekânsal çözünürlükte Seviye 3 olarak depolanmaktadır. Seviye 2 veriler, geometrik ve radyometrik düzeltmesi yapılmış Seviye 1B verilerinin işlenmesinden elde edilen jeofiziksel büyüklüklerden oluşmaktadır.

2.3 Metodoloji

Çalışma kapsamında, bulut tabanlı GEE platformundan faydalanılarak günlük olarak elde edilen hava kalite parametrelerinin zaman serileri üretilmiştir ve aylık periyotlarda ortalama, maksimum ve minimum değerler ile incelenmiştir. Elde edilen zaman serileri, DHMI tarafından paylaşılan aylık tüm uçuş trafiği istatistikleri (DHMI 2024) ile beraber değerlendirilmiştir. Zaman serilerinin eğilimlerinin değerlendirilmesinin yanı sıra, hem tüm uçak trafiğinin parametreler üzerindeki etkisi hem de parametrelerin birbiri üzerindeki etkilerinin belirlenmesi için Granger Nedensellik testi zaman serilerine uygulanmıştır. Daha çok ekonomi ve sosyal bilimler (Takım 2010, Shojaie ve Fox 2022) alanlarında kullanılan test, Granger (1969) tarafından önerilen istatistiksel bir hipotez testidir. Bir değişkenin diğer değişkenin tahmininde etkili olup olmadığını anlamaya yardımcı olan güçlü bir istatistiksel araç olarak anılmaktadır. Ancak değişkenler arasında kurulan bu Granger modeli, gelecek tahmini değil nedensellik ilişkilerinin belirlenmesini hedeflemektedir (Gökçe 2002). Değişkenler arasındaki ilişkilerin yönünü ve büyüklüğünü anlamak için kullanılır. Diğer bir deyişle, iki değişkenin birbiri üzerinde gecikmeli etkisinin olup olmadığı, X değişkeni mi Y değişkeninin nedeni ($X \rightarrow Y$), Y değişkeni mi X değişkeninin nedeni ($Y \rightarrow X$) ya da iki değişken arasında geri beslemeli bir ilişki mi olduğu (hem $X \rightarrow Y$, hem de $Y \rightarrow X$) bu test ile araştırılabilmektedir. Denklem 1’de verildiği şekilde uygulanmaktadır. α , β , γ ve δ katsayıları ifade ederken i ve j gecikme sürelerini göstermektedir. u_{1t} ve u_{2t} ise regresyon artıkları olarak adlandırılmaktadır.

$$Y_t = \sum_{i=1}^n \alpha_i Y_{t-i} + \sum_{j=1}^n \beta_j X_{t-j} + u_{1t}$$

$$X_t = \sum_{i=1}^n \gamma_i X_{t-i} + \sum_{j=1}^n \delta_j Y_{t-j} + u_{2t} \quad (1)$$

Denklem 1’e göre boş hipotez sınanır. Eğer β katsayıları sıfırdan farklı bulunursa boş hipotez reddedilir ve X’in Y üzerinde anlamlı bir nedensel etkisi olduğu sonucuna varılır. Benzer şekilde δ katsayıları sıfırdan farklı bulunursa boş hipotez reddedilir ve Y’nin X üzerinde anlamlı bir

nedensel etkisi olduğu sonucuna varılır. Boş hipotezin sınanması için yaygın olarak F testi uygulanmaktadır. F-testi bir değişkenin diğeri üzerindeki etkisinin kapsamını ifade etmektedir. Bu nedenle, daha yüksek F değerleri ve dolayısıyla elde edilen daha düşük p-değerleri, bir değişkenin diğeri üzerinde daha anlamlı bir etkisi olduğunu göstermektedir. Ancak anlamlılık düzeylerinin belirlenmesi için p değerlerinin yorumlanmasında uygulanan kriterler Çizelge 2’de verilmiştir.

Çizelge 2. p değerlerinin yorumlanması (Rosner 2010, Kul 2014).

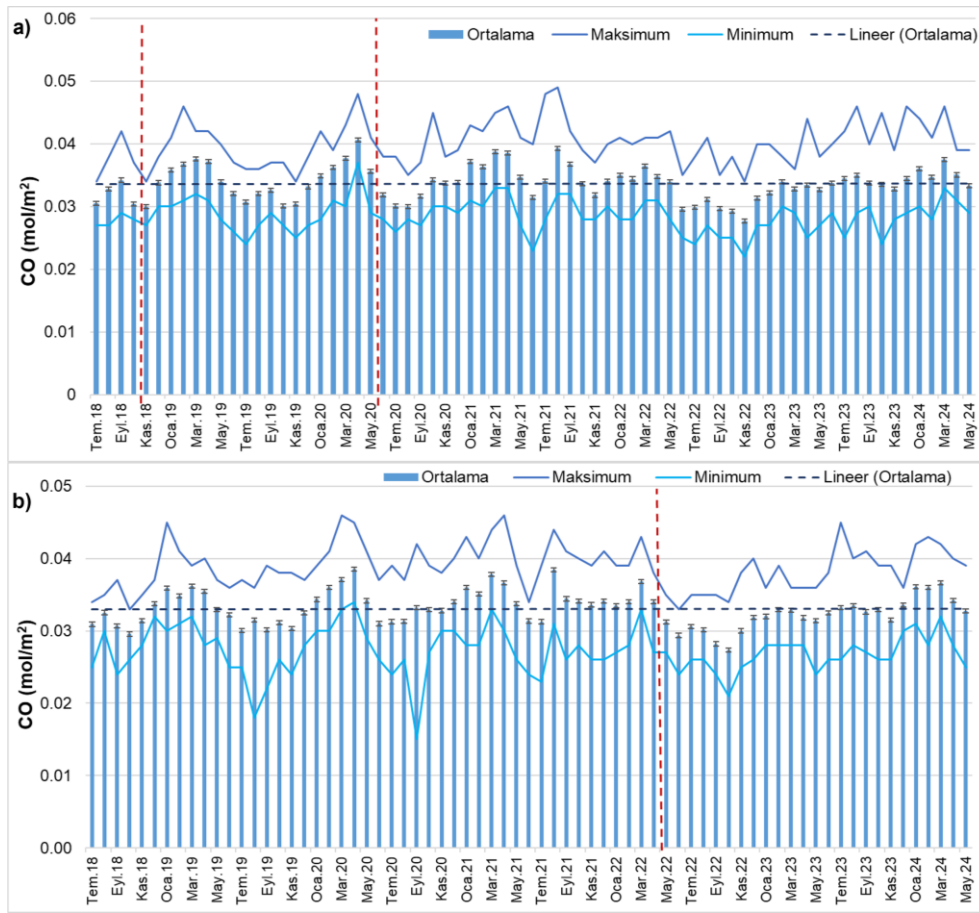
p değeri	Yorumu
$p > 0.10$	İstatistiksel olarak anlamlı farklılık saptanmamıştır.
$0.05 \leq p < 0.10$	Anlamlılık eğilimi (sınırdan anlamlılık)
$0.01 \leq p < 0.05$	İstatistiksel anlamlılık
$0.001 \leq p < 0.01$	Yüksek düzeyde istatistiksel anlamlılık
$p < 0.001$	Çok yüksek düzeyde istatistiksel anlamlılık

3. Bulgular ve Tartışma

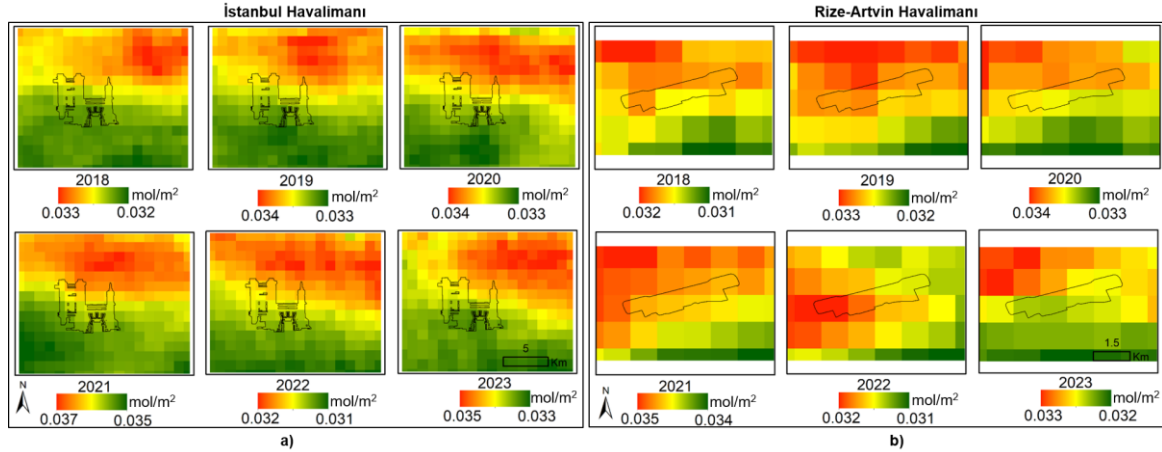
İstanbul ve Rize-Artvin Havalimanlarının hava kalite parametrelerinin Çizelge 1’de verilen zaman aralıkları dikkate alınarak her parametre için GEE platformu ile sırasıyla zaman serisi grafikleri üretilmiş ve değerlendirilmiştir. Grafikler üzerinde İstanbul Havalimanı’nın ilk iki ve üçüncü pistlerinin ve Rize Havalimanı’nın kullanıma açıldığı tarihler kesikli kırmızı çizgi ile gösterilmiştir. Her parametre için ayrıca yıllık ortalama dağılım haritaları üretilerek bölgesel olarak değerlendirilmiştir.

3.1. Karbon Monoksit (CO)

İlk olarak CO parametresinin İstanbul Havalimanı ve Rize-Artvin Havalimanı için zaman serisi analizleri gerçekleştirilmiştir. İstanbul Havalimanı üzerinde oluşturulan aylık zaman serisi grafikleri incelendiğinde (Şekil 4a), zaman serisinin mevsimsel salınımlar şeklinde olduğu ve yaz-sonbahar mevsimlerinde azalırken kış-ilkbahar mevsimlerinde arttığı görülmektedir. Ancak 2023 yılında, mevsimsel salının aksine yıl boyu benzer bir salınım göstermiştir. İstanbul Havalimanı’nın kullanıma açıldığı tarihten itibaren aylık toplam uçak trafiği sayıları incelendiğinde (Şekil 3), 2018 yılında 350 uçak trafiği ile başlayan hava taşımacılığı serüvenine 2023 yılı sonunda 40 bin uçak trafiği ile devam etmiştir. Uçak trafiği ile CO parametresi beraber değerlendirildiğinde, 2023 yılına kadar salınımların ters yönde olduğu görülmüştür. Ancak 2023 yılı özelinde bakıldığında zaman serilerinde bir tutarlılık olduğu görülmüştür.



Şekil 4. CO parametresinin GEE ile elde edilen aylık zaman serileri: a) İstanbul Havalimanı, b) Rize-Artvin Havalimanı.



Şekil 5. CO parametresinin a) İstanbul Havalimanı ve b) Rize-Artvin Havalimanı üzerinde 2018-2023 zaman aralığında yıllık ortalama sonuçları.

Rize-Artvin Havalimanı üzerinde alınan CO parametresinin aylık zaman serisinde (Şekil 4b) ise kullanıma açıldığı tarihten itibaren 2022 yılında bir azalma görüldü de 2023 yılında artış görülmüştür. Her iki havalimanında da 2022 yılında azalma olması dikkat çeken bir diğer unsurdur. Ancak genel trende bakıldığında her iki havalimanında da CO konsantrasyonunun stabil olduğu görülmektedir. CO parametresinin ilgili havalimanlarındaki yıllık ortalama görselleri ise Şekil 5'te verilmiştir. İstanbul Havalimanı'nın kuzey kesimlerinde CO miktarının fazla olduğu görülürken, güney kesimlerinde azaldığı görülmektedir. 2018-2021 yıllarında artış görülürken 2022 yılında düşüş

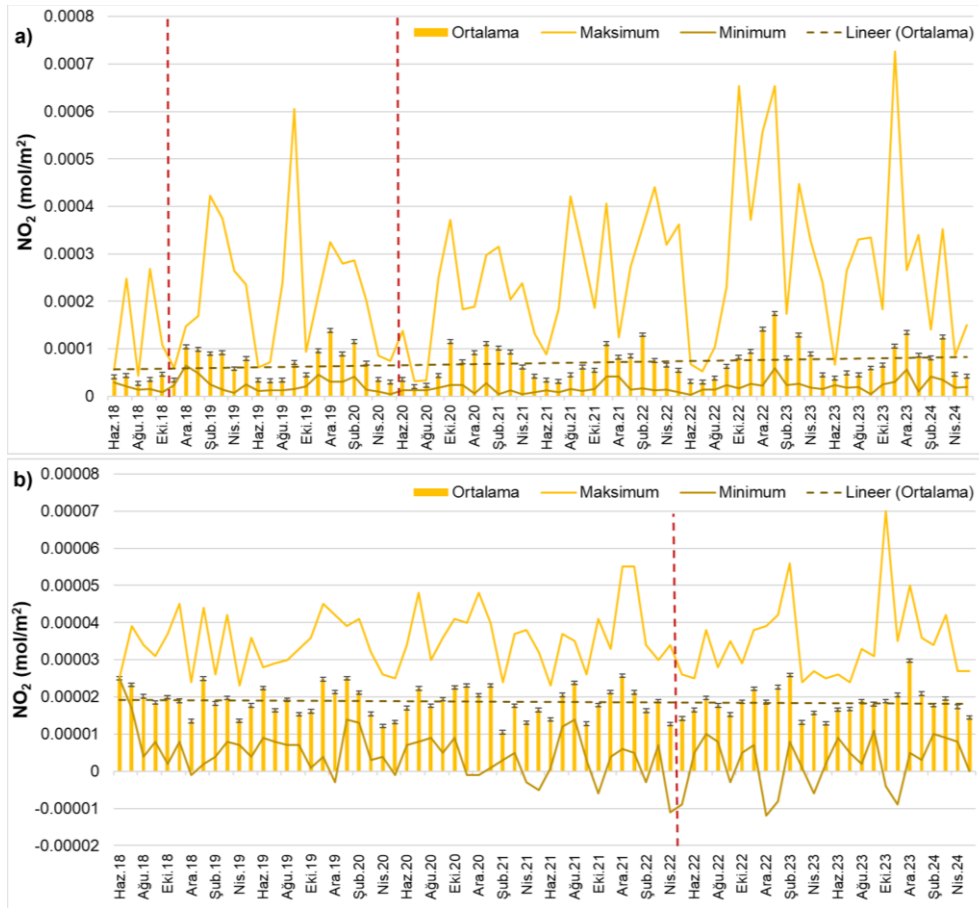
olduğu görülmektedir. 2023 yılında ise tekrar artışa geçmiştir. Rize-Artvin Havalimanı'nda ise kuzeybatı yönünde CO miktarının yüksek olduğu güneydoğu kesimlerinde ise daha düşük olduğu görülmektedir. İstanbul Havalimanı'nda olduğu gibi Rize-Artvin Havalimanı'nda da 2018-2021 yıllarında artış görülürken, 2022 yılında azalarak 2023 yılında tekrar arttığı görülmektedir.

3.2. Nitrojen Dioksit (NO₂)

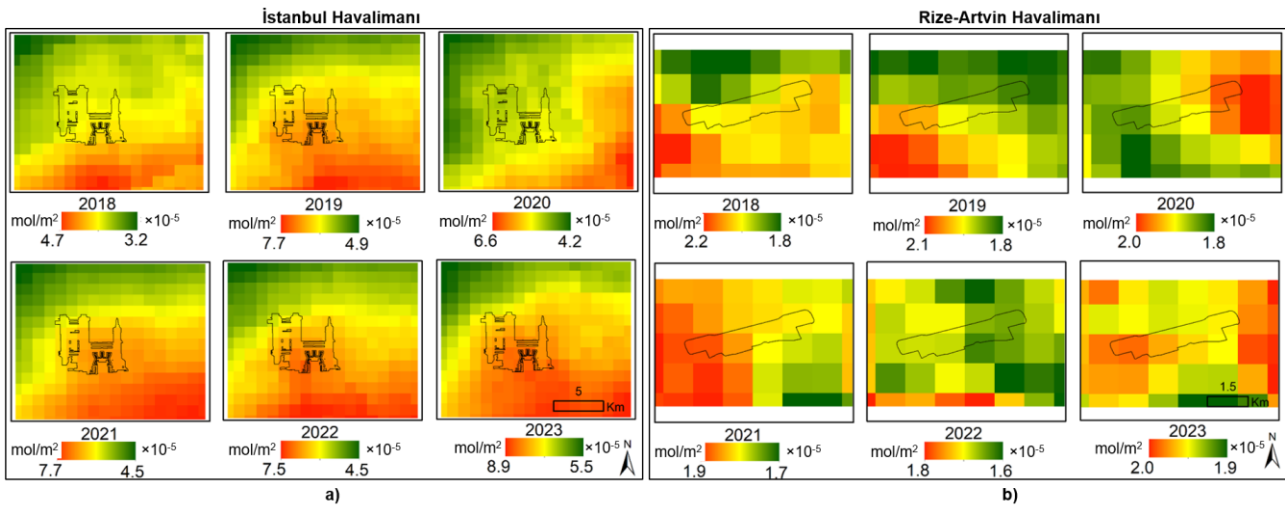
Aylık NO₂ zaman serileri her iki havalimanı için de üretilerek Şekil 6'da verilmiştir. Zaman serisi grafikleri

incelendiğinde, İstanbul Havalimanı'nda yaz aylarında (Haziran-Ağustos) daha stabil ve nispeten az miktarda seyredirken, kış aylarında yoğun olduğu görülmektedir. Ayrıca son yıllarda miktarının arttığı da tespit edilen bir diğer durumdur. Dolayısıyla genel trendinin de arttığı görülmektedir. 2020 yılı Nisan-Haziran zaman aralığında NO₂ değerlerinin diğer yıllara göre düşük olması, Türkiye'de 2020 yılında görülen COVID-19 salgınına ve dolayısıyla getirilen uçuş kısıtlamalarına bağlanabilmektedir. Rize-Artvin Havalimanı'nda ise

havalimanı kullanıma açılmadan önceki sene olan 2021 yılından itibaren NO₂ değerlerinin arttığı ancak 2023 yılında yaz aylarında azalarak stabil bir hareket gösterdiği görülmektedir. Genel trend ise nispeten azalarak seyretmektedir. Ayrıca ortalama zaman serileri daha stabil ilerlerken, maksimum ve minimum değerlerde ani sıçramalar olduğu görülmektedir. Parametrelerin günlük değişimlerinde meydana gelen değişkenlikler bu gazların atmosfere sürekli emisyonundan sorumlu olan araçların aktivite yoğunluğuna bağlıdır (Hashim vd. 2021).



Şekil 6. NO₂ parametresinin GEE ile elde edilen aylık zaman serileri: a) İstanbul Havalimanı, b) Rize-Artvin Havalimanı.

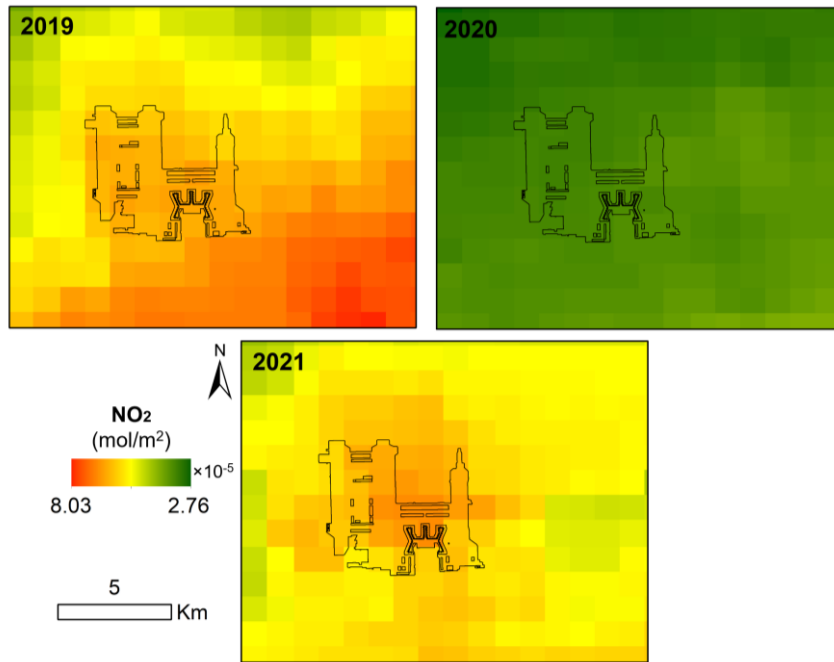


Şekil 7. NO₂ parametresinin a) İstanbul Havalimanı ve b) Rize-Artvin Havalimanı üzerinde 2018-2023 zaman aralığında yıllık ortalama sonuçları.

Yıllık ortalama NO₂ haritaları oluşturularak Şekil 7’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, İstanbul Havalimanı üzerinde NO₂ miktarının arttığı, 2020 yılında ise zaman serileriyle ilişkili olarak azaldığı görülmektedir. Sadece havalimanı trafiği değil, havalimanına ulaşım için İstanbul Havalimanı’nın güneyinde yer alan Kuzey Marmara Otoyolu da NO₂ parametresinin değerlendirmesinde dikkate alınması gereken bir diğer unsurdur. Şekil 7a’da verilen yıllık ortalama NO₂ sonuçlarında havalimanının güneyinde yüksek NO₂ değerlerinde görülen yoğunluk da bu durumu kanıtlar niteliktedir. Şekil 7b’de verilen Rize-Artvin Havalimanı’na ait yıllık ortalama NO₂ dağılımında ise 2018, 2019 ve 2021 yıllarında havalimanının batısında NO₂ değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir. Havalimanının kullanıma açıldığı 2022 yılında en düşük değerlere rastlanırken, 2023

yılında havalimanı genelinde NO₂ değerlerinde artış olduğu görülmektedir.

COVID-19 salgınının etkileri Şekil 6’da verilen zaman serilerinde görülsede salgın sırasında getirilen uçuş kısıtlamaları sonrası NO₂ parametresinin bölgedeki dağılımının nasıl etkilendiğinin görülebilmesi amacıyla, 2019, 2020 ve 2021 yılları Nisan ayına ait NO₂ haritaları hazırlanarak Şekil 8’de verilmiştir. Nisan ayı, Türkiye’de COVID-19 salgını nedeniyle sokağa çıkma yasağının uygulandığı ve dolayısıyla uçak seferlerinin kısıtlanmaya başlandığı aydır. Şekil 8’de verilen sonuçlar incelendiğinde 2019’da yüksek olan NO₂ değeri, 2020’de insan faaliyetlerinin azalmasıyla bölge genelinde düşmüştür. 2021 Nisan ayında da eski faaliyetlerini sürdürmeye devam etmiştir.



Şekil 8. 2019, 2020 ve 2021 yılları Nisan ayının İstanbul Havalimanı özelinde NO₂ haritası.

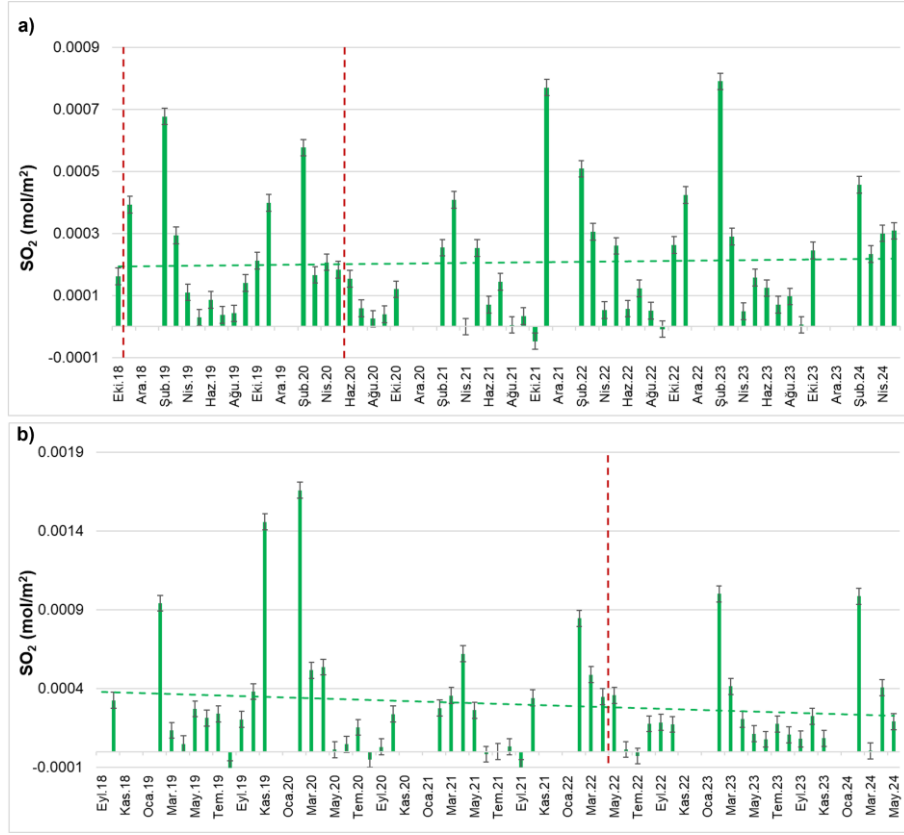
3.3. Sülfür Dioksit (SO₂)

GEE üzerinden elde edilen aylık ortalama SO₂ zaman serileri incelendiğinde (Şekil 9), Kasım-Ocak zaman aralığında veri olmadığı görülmüştür. Bunun nedeni derin bulut tabakası veya örneklenen kirleticilerin düşük konsantrasyonları olabilmektedir (Mendez-Espinosa vd. 2020). İstanbul Havalimanı üzerinde SO₂ zaman serisi trendinin artan bir trend sergilediği görüldürken, 2023 yılı Şubat ayında ortalama değerin en yüksek değere ulaştığı görülmüştür. Genel olarak mevsimsel bir hareketin hakim olduğu söylenebilmektedir. Kış aylarında SO₂ değeri yüksek olurken yaz aylarında nispeten daha az olduğu görülmektedir. Rize-Artvin Havalimanı’nda ise kullanıma açıldığı tarihten sonra düşük değerlerde seyretse de

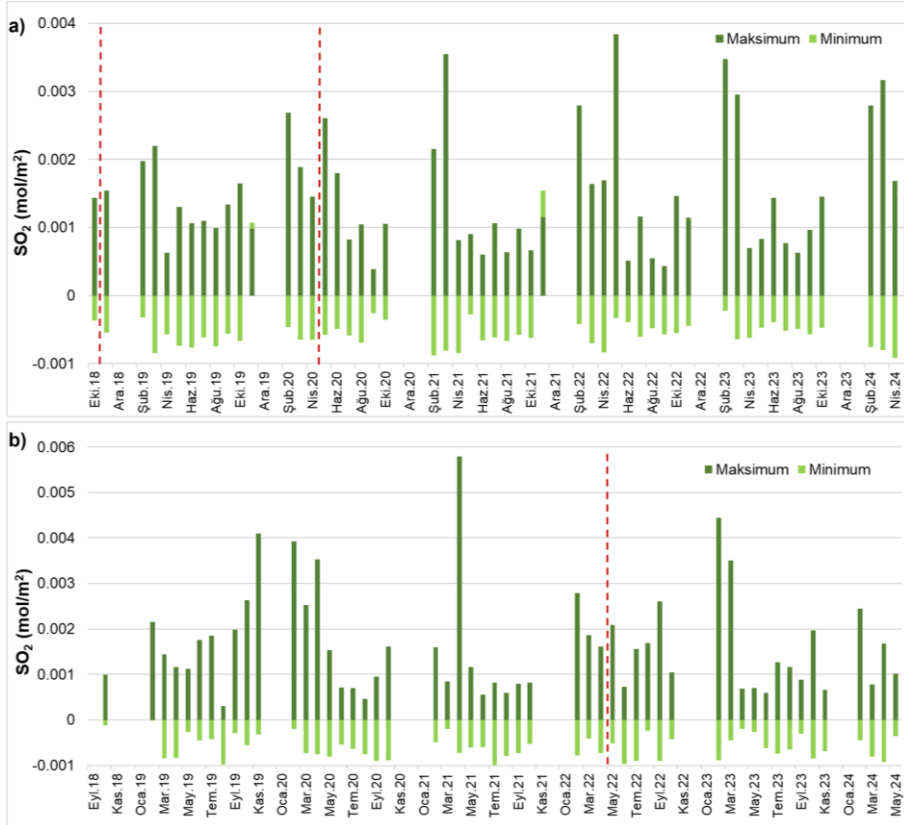
benzer mevsimsel hareket burada da görülmektedir. Genel eğilime bakıldığında ise azalan bir trend gösterdiği görülmektedir. Maksimum ve minimum değerler ise Şekil 10’da verilmiştir. İstanbul Havalimanı’nda maksimum değer 2022 yılında görülürken, 2024 yılına doğru azalmaya başlamıştır. Şubat-Haziran zaman aralığında değerler yüksek seyrederken, yaz ve sonbahar aylarında daha düşük seyretmektedir. Rize-Artvin Havalimanı’nda ise 2021 yılı Nisan ayında en yüksek değere ulaşılmıştır. Havalimanı açıldıktan sonra ise 2023 yılında yüksek değerler görülmüştür. İstanbul havalimanı ile benzer bir mevsimsel eğilim olduğu görülmüştür. Her iki havalimanı verilerinde de minimum değerlerin negatif değerler olduğu görülmektedir. Verilerdeki gürültü nedeniyle,

özellikle temiz veya düşük SO_2 emisyonlarına sahip bölgeler için negatif değerler sıklıkla gözlemlenmektedir. Uç değerler haricinde (örn. $< -0,001 \text{ mol/m}^2$), bu

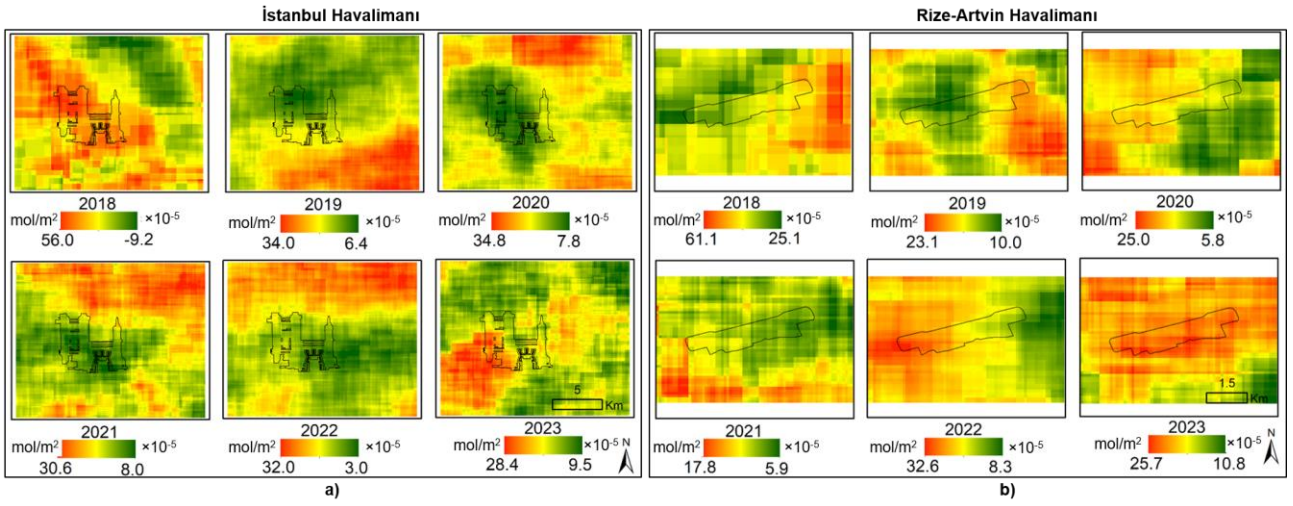
değerlerin filtrenmemesi önerilmektedir (Theys vd. 2023).



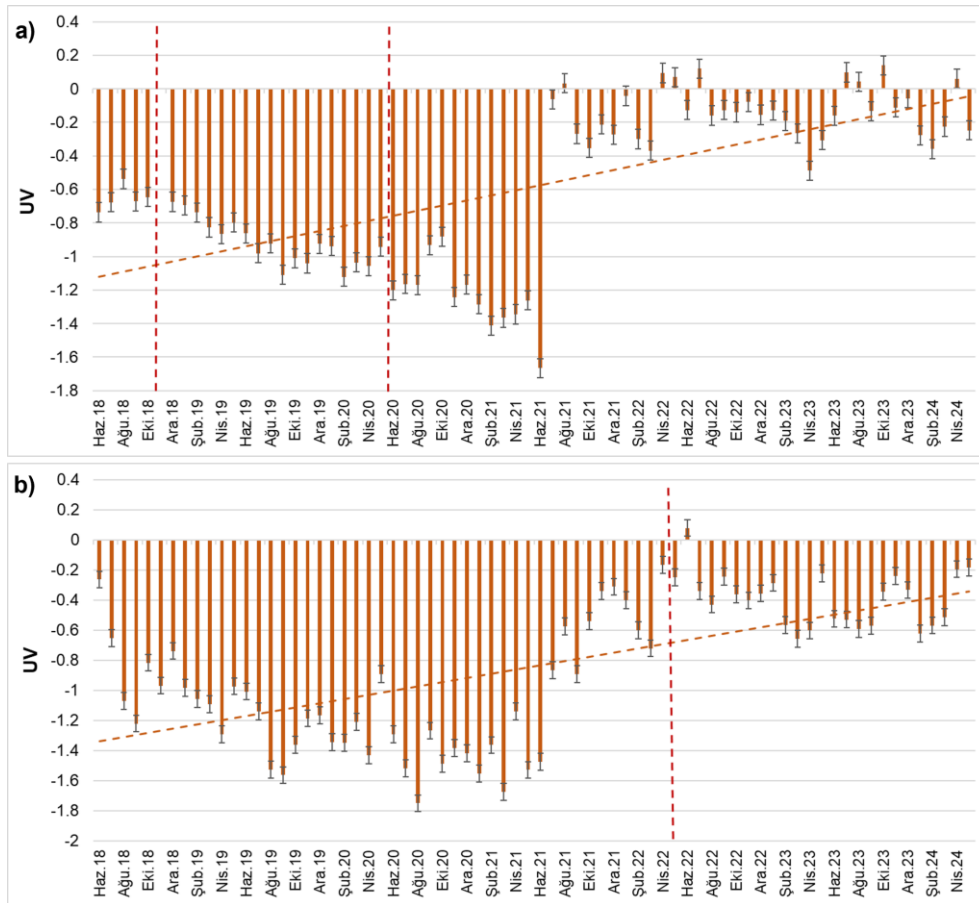
Şekil 9. SO_2 parametresinin GEE ile elde edilen aylık ortalama zaman serileri: a) İstanbul Havalimanı, b) Rize-Artvin Havalimanı.



Şekil 10. SO_2 parametresinin GEE ile elde edilen aylık maksimum ve minimum zaman serileri: a) İstanbul Havalimanı, b) Rize-Artvin Havalimanı.



Şekil 11. SO₂ parametresinin a) İstanbul Havalimanı ve b) Rize-Artvin Havalimanı üzerinde 2018-2023 zaman aralığında yıllık ortalama sonuçları.



Şekil 12. UV Aerosol parametresinin GEE ile elde edilen aylık zaman serileri: a) İstanbul Havalimanı, b) Rize-Artvin Havalimanı.

Şekil 11’de yıllık ortalama SO₂ dağılımı haritaları verilmiştir. İstanbul Havalimanı’nda 2018 yılında en yüksek değerler görülürken, 2023 yılına doğru bir azalma görülmektedir. Rize-Artvin Havalimanı’nda ise 2018 yılında maksimum değerlere rastlanırken, 2021 yılında en düşük değerleri gösterdiği görülmektedir. Kullanıma açıldığı 2022 yılından sonra havalimanı üzerinde yoğunluk olduğu görülmektedir ancak 2023 yılında yine değerlerde düşüş görülmektedir.

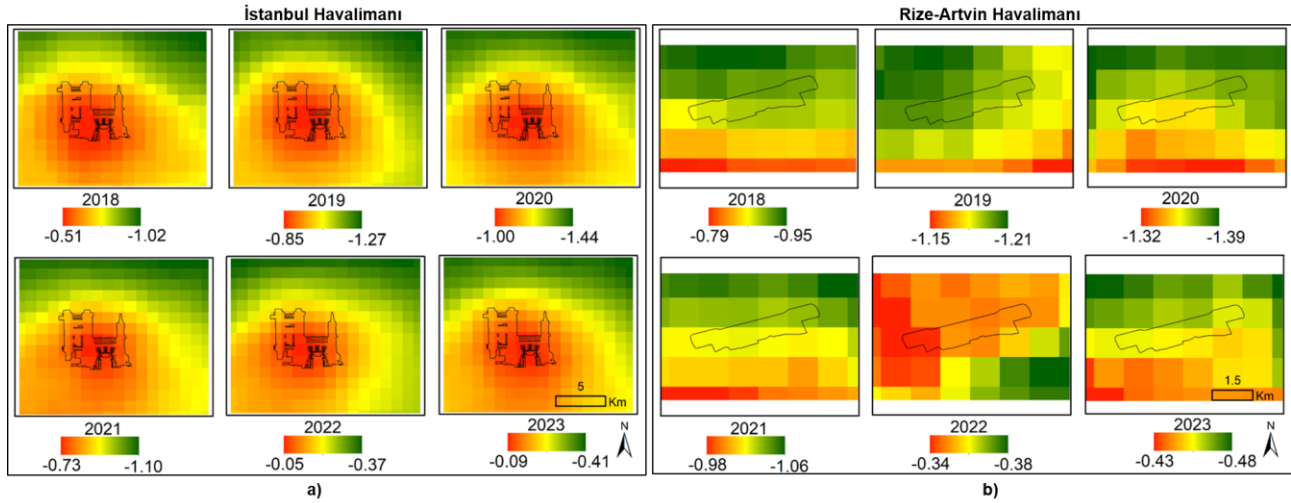
3.4. UV Aerosol İndeks

Şekil 12a’da UV aerosol indeks parametresinin İstanbul Havalimanı için oluşturulan zaman serisi grafiği incelendiğinde, sürekli negatif değerlerde seyreden UV parametresi, Temmuz 2021 itibarıyla pozitif değerlerde de seyretmeye başlamıştır. Aynı zamanda değerlerde keskin bir artış olduğu görülmektedir. Bu sebeple artan bir trendin olduğu söylenebilmektedir. Rize Havalimanı’nda ise Haziran 2020’ye doğru azalma eğilimi olurken, sonrasında UV değerinde artış görülmüştür (Şekil 12b).

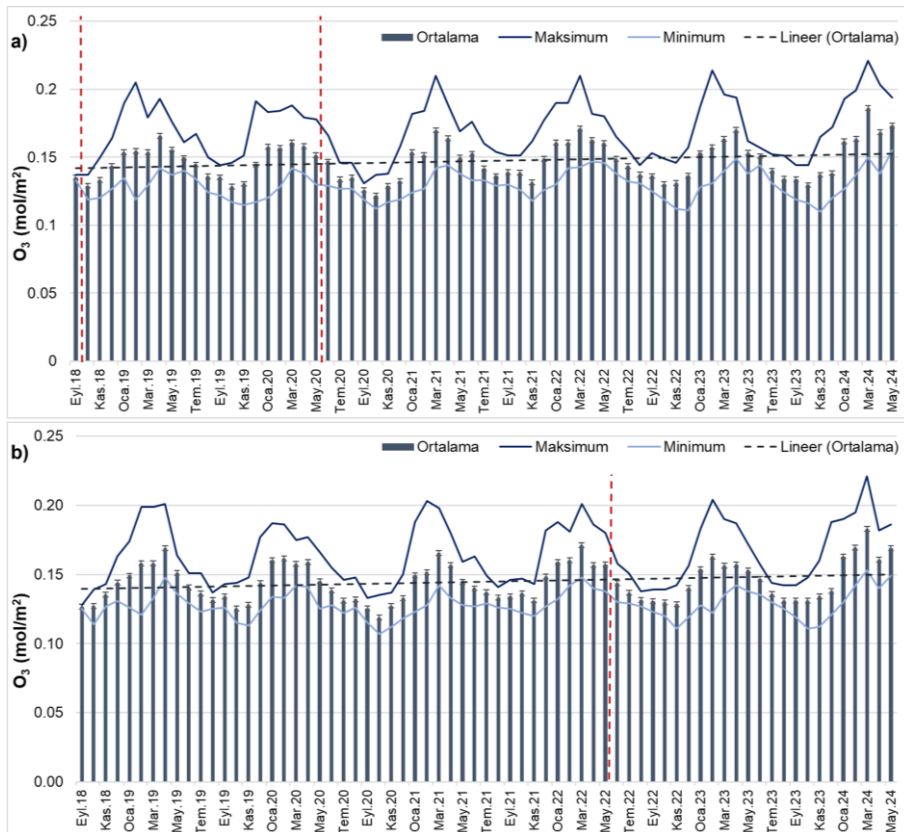
Dolayısıyla zaman serisi trendi de artış eğilimi göstermektedir. Her iki havalimanında da Temmuz 2021’de artış olması dikkat çekmektedir.

Havalimanlarında UV parametresinin yıllık ortalama görselleri 2018-2023 zaman aralığı için GEE üzerinden her iki havalimanı için de hazırlanarak Şekil 13’te verilmiştir. İstanbul Havalimanı’nda yıllık değişimler incelendiğinde, altı yılda da havalimanı üzerinde değerlerin yüksek olduğu görülmektedir. Ancak yıllık ortalama değerlerin negatif olması da saçılan aerosollerin varlığını ifade etmektedir.

2018-2020 yılları arasında UV değerleri düşerken, 2021-2023 zaman aralığında artış göstermiştir. Benzer durumun Rize-Artvin Havalimanı üzerinde de gerçekleştiği görülmektedir. Kullanıma açıldığı 2022 yılında Rize-Artvin Havalimanı üzerinde UV değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir. Ancak 2023 yılında bu durum devamlılığını sürdürmemiştir. Rize-Artvin Havalimanı’nın İstanbul Havalimanı kadar büyük alan kaplamıyor olması ve yolcu trafiğinin de az olması, UV değerlerinin daha düşük olmasına neden olarak gösterilebilmektedir.



Şekil 13. UV Aerosol parametresinin a) İstanbul Havalimanı ve b) Rize-Artvin Havalimanı üzerinde 2018-2023 zaman aralığında yıllık ortalama sonuçları.



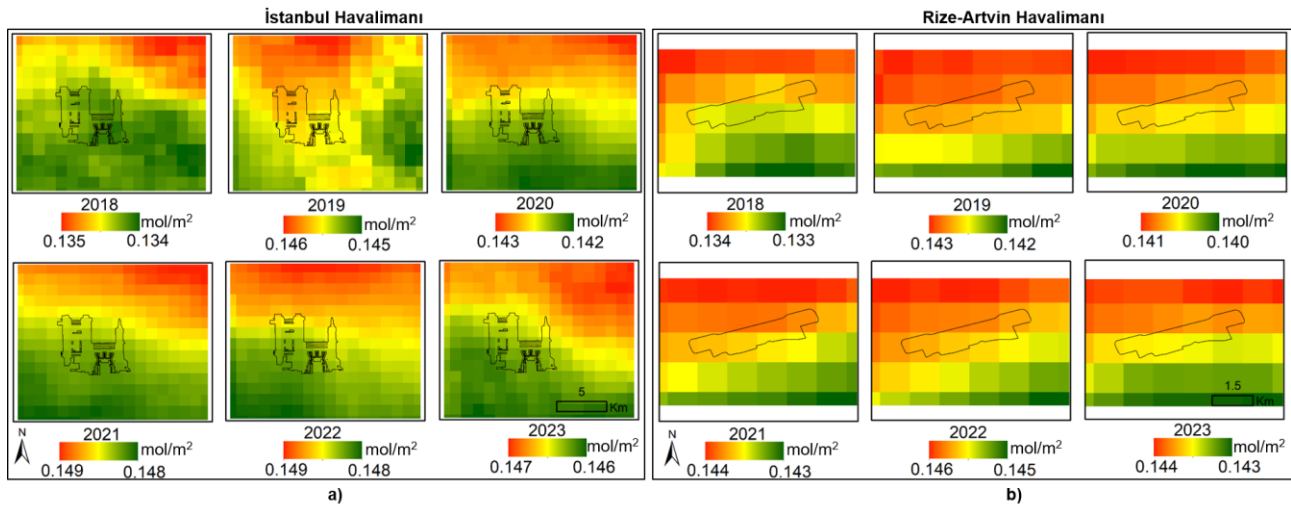
Şekil 14. O₃ parametresinin GEE ile elde edilen aylık zaman serileri: a) İstanbul Havalimanı, b) Rize-Artvin Havalimanı.

3.5. Ozon (O_3)

Şekil 14a'da İstanbul Havalimanı üzerinde O_3 parametresinin aylık zamansal değişimi gösterilmiştir. Mevsimsel bir trend gösteren parametre kış ve ilkbahar mevsimlerinde artış gösterirken, yaz ve sonbahar mevsimlerinde azalmaktadır. NO_2 parametresi ile uyumlu bir trend gösteriyor gibi görünse de, NO_2 parametresi azalmaya başladığında O_3 parametresinin artış göstermeye başladığı görülmektedir. Bu durum, Dentener vd. (2020) tarafından belirtilen durumu destekler niteliktedir. Benzer durum, Şekil 14b'de verilen Rize-Artvin Havalimanı'nın O_3 ve NO_2 zaman serilerinde de görülmüştür. Her iki havalimanında da aylık O_3 zaman serileri incelendiğinde, artan bir eğilimin varlığı dikkat çekerken, maksimum ve ortalama değerlerin 2024 yılı Mart ayında en yüksek değerlere ulaştığı görülmektedir.

Her iki havalimanına ait yıllık ortalama O_3 haritaları Şekil 15'te verilmiştir. 2018 yılında en düşük değerlerin görüldüğü İstanbul Havalimanı'nda 2019 yılında havalimanı üzerinde O_3 değerlerinde artış olduğu görülmektedir. 2020 yılında düşüş görülse de 2021 itibariyle tekrar artmaya başlamıştır. Genellikle havalimanının kuzey kesimlerinde O_3 yüksek bulunurken, güneyde nispeten daha düşük değerlerle seyretnmektedir.

İstanbul Havalimanı'na benzer şekilde, Rize-Artvin Havalimanı'nda da 2018 yılı O_3 dağılımının en düşük olduğu yıl olmuştur. Ancak, Rize-Artvin Havalimanının kullanıma açıldığı 2022 yılında en yüksek O_3 dağılımının olması dikkat çeken önemli bir detaydır. Havalimanının kuzey kesimlerinde O_3 değerleri yüksek olurken, güney kesimlerinde nispeten daha düşük olduğu görülmektedir. Her iki havalimanında benzer durumun görülmesi, havalimanlarının denizde veya deniz kıyısında inşa edilmelerinin etkisinin olması ihtimalini kuvvetlendirmiştir. Çünkü deniz-kara meltemi sirkülasyonu, kıyı kentlerinde atmosferik kirleticilerin taşınmasında önemli bir rol oynamaktadır (Mao ve Talbot 2004, Wagner vd. 2012). Wang vd. (2018) tarafından düşük deniz rüzgarı hızının, kirleticilerin kara üzerinde birikmesine elverişli olduğu tespit edilmiştir. Her iki havalimanının da hırçın yapısıyla bilinen Karadeniz'e kıyısının olması sebebiyle, denize yakın kısımlarda O_3 parametrelerinin yüksek çıkmasının deniz-kara meltemi ve rüzgar hızı ile ilişkili olabileceği düşünülmektedir. Özellikle, İstanbul Havalimanı'nda deniz alanlarında O_3 değerleri en yüksek değerleri gösterirken, kıyı kesimlerde ve dolayısıyla havaalanı bölgelerinde de değerlerin yüksek olduğu ve denizden uzaklaştıkça azalması da bu durumu destekler niteliktedir.



Şekil 15. O_3 parametresinin a) İstanbul Havalimanı ve b) Rize-Artvin Havalimanı üzerinde 2018-2023 zaman aralığında yıllık ortalama sonuçları.

3.6. Genel Değerlendirme

Uçak emisyonlarından kaynaklanan beş hava kalite parametresinin aylık zaman serisi analizi Sentinel-5P uydu verileri ile İstanbul Havalimanı ve Rize-Artvin Havalimanı özelinde gerçekleştirilmiştir. Birçok çalışma Sentinel-5P uydu verilerinin yersel hava kalite verileri ile yüksek korelasyon gösterdiğini ve atmosferik parametrelerin konsantrasyonlarını iyi yansıttığını ifade etmiştir (Zheng vd. 2019, Sharifi ve Felegari 2022). Ancak çalışma alanının kapsamının dar olduğu bölgelerde Sentinel-5P gibi

atmosferik uydularla çalışmak zorlaşmaktadır. İstanbul Havalimanı kapsama alanı ile geniş bir alana yayılsa da Rize-Artvin Havalimanı oldukça küçük bir bölgede kalmaktadır ve uydu verileri ile elde edilen zaman serilerinin yorumlanması tek başına yeterli olmamaktadır.

Her iki havalimanında da yersel hava kalite istasyonları bulunmadığından ve en yakın istasyonların havalimanlarından oldukça uzakta olması, elde edilen zaman serilerinin yersel veriler ile doğrulanmasını mümkün kılmamaktadır. Bu sebeple, hava kalitesinin uçuş

trafiği ile olan ilişkisinin gözlemlenmesinde, aylık zaman serileri üretilmiş ve bunlara bağlı olarak her iki değişken arasındaki korelasyon değerleri hesaplanmış ve Çizelge 3'te verilmiştir. Yıl bazında da gerçekleştirilen değerlendirme sonucunda, CO, NO₂, O₃ ve SO₂ parametreleri 2020 yılı hariç negatif korelasyon gösterirken, UV parametresi 2019 yılı dışında pozitif korelasyon göstermiştir. Özellikle NO₂ ve SO₂ parametrelerinin 2020 yılında pozitif ve yüksek korelasyon göstermesi (sırasıyla 0.66 ve 0.60), COVID-19 salgını ile ilişkilendirilebilmektedir. Birçok çalışma COVID-19 salgını sonrasında insan faaliyetlerinin azalması ile hava kalite parametrelerinde iyileşme olduğunu ortaya koymuştur (Ghasempour vd. 2021, Muniraj vd. 2023). 2020 yılında da COVID-19 salgını sebebiyle insan faaliyetlerinin azalması ile baskın kirletici etkenlerin azalması, havayolu faaliyetlerinin hava kalite parametrelerine etkilerini NO₂ ve SO₂ parametrelerinde görülen pozitif korelasyon ile ortaya koymaktadır. UV parametresi ise 2021 yılında aylık uçak trafiği ile oldukça yüksek bir korelasyon (0.91) göstermiştir ve dört yıllık periyotta da yüksek korelasyon (0.61) göstermektedir.

Rize-Artvin Havalimanı'nda ise hava kalite parametreleri, aylık uçak trafiği verisi ile genel olarak negatif korelasyon gösterse de NO₂ parametresi 2022 yılında 0.73, CO parametresi ise yaklaşık olarak iki yıllık periyotta 0.41 korelasyon göstermiştir. UV parametresinin korelasyonu ise 2022 yılında negatif iken 2023 yılında pozitif olmaktadır.

Çizelge 3. İstanbul Havalimanı ve Rize-Artvin Havalimanı özelinde aylık uçak trafiği ve hava kalite parametreleri arasındaki korelasyon değerleri.

Yıl \ Parametre	CO	NO ₂	O ₃	UV	SO ₂
İstanbul Havalimanı					
2019	-0.80	-0.45	-0.52	-0.73	-0.69
2020	-0.05	0.66	0.16	0.09	0.60
2021	-0.26	-0.39	-0.75	0.91	-0.21
2022	-0.77	-0.53	-0.72	0.37	-0.19
2023	0.48	-0.69	-0.51	0.43	-0.61
2019-2023	-0.44	0.03	-0.17	0.61	-0.17
Rize-Artvin Havalimanı					
2022	-0.22	0.73	-0.89	-0.45	-0.56
2023	0.01	-0.27	-0.72	0.26	-0.77
2022-2023	0.41	0.07	-0.42	-0.29	-0.32

Uçak trafiği verilerinin hava kalite parametreleri üzerindeki etkilerinin araştırılması için Granger Nedensellik testi uygulanmıştır. Granger Nedensellik testi uygulanmadan önce zaman serilerine Artırılmış Dickey Fuller (ADF) testi uygulanmıştır ve zaman serilerinin durağanlığı belirlenmiştir. Durağan olmayan zaman serilerine fark alma işlemi uygulanarak Granger

Nedensellik testine tabi tutulmuşlardır. Çizelge 4'te İstanbul Havalimanı özelinde gerçekleştirilen test sonuçları (F testi sonucu ve p değeri) verilmiştir. p değerleri Çizelge 2'de verilen kategorizasyona göre verilmiştir. Çizelge 4'te verilen lag ifadesi ise gecikme süresini ifade etmektedir. Gecikme süreleri 1 ve 2 olarak uygulanmıştır.

Çizelge 4. İstanbul Havalimanı özelinde parametreler arasında gerçekleştirilen Granger Nedensellik testi sonucu.

Veri	Parametre	F-testi (lag:1)	p	F-testi (lag:2)	p
Tüm Uçak Trafiği	CO	0.1059	0.7460	2.4184*	0.0977*
	NO ₂	0.1921	0.6626	0.9140	0.4064
	O ₃	0.9668	0.3292	2.7007*	0.0753*
	UV	0.8223	0.3680	0.6023	0.5509
	SO ₂	0.0924	0.7625	0.2530	0.7776
CO	NO ₂	2.6555	0.1083	0.4036	0.6697
	O ₃	2.8960*	0.0938*	3.5022**	0.0365**
	UV	5.4120**	0.0233**	4.7313**	0.0125**
	SO ₂	0.9250	0.3411	1.2391	0.2996
NO ₂	CO	11.0939***	0.0015***	6.8069***	0.0022***
	O ₃	2.4286	0.1242	1.7471	0.1832
	UV	0.5165	0.4751	0.2503	0.7794
	SO ₂	2.5552	0.1166	1.4846	0.2377
O ₃	CO	0.4146*	0.5220*	2.7951*	0.0692*
	NO ₂	5.9024**	0.0180**	6.8438***	0.0021***
	UV	0.0106	0.9183	0.1270	0.8810
	SO ₂	3.2658*	0.0771*	3.9709**	0.0260**
UV	CO	0.9662	0.3295	0.2094	0.8117
	NO ₂	0.5076	0.4789	0.4154	0.6620
	O ₃	0.4852	0.4887	1.9154	0.1565
	SO ₂	3.4049*	0.0713*	2.3165	0.1105
SO ₂	CO	0.1616	0.6896	0.6101	0.5478
	NO ₂	0.4258	0.5172	0.7373	0.4842
	O ₃	1.7052	0.1980	0.3779	0.6875
	UV	0.0006	0.9813	0.1921	0.8259

Çizelge 2'de verilen aralıklar dikkate alınarak: *, 0.05≤p<0.10, **, 0.01≤p<0.05, ***, 0.001≤p<0.01.

Çizelge 4'te elde edilen sonuçlar doğrultusunda, tüm uçak trafiğinin CO ve O₃ parametreleri üzerindeki etkisinin 1 aylık gecikme süresinde istatistiksel olarak anlamlı olmadığı ancak 2 aylık gecikme süresinde istatistiksel olarak anlamlılık eğiliminde olduğu belirlenmiştir. NO₂, UV ve SO₂ parametreleri üzerinde ise istatistiksel olarak anlamlı bulunamamıştır. Uçuş trafiğinin SO₂ parametresi üzerinde anlamlı bir etkisinin tespit edilememesi, SO₂ parametresinin daha çok ısıtma ve soğutma faaliyetlerinden kaynaklanması ile ilişkilendirilebilmektedir (Ghasempour vd. 2021). Bu faaliyetlerin yoğun olduğu dönemler olan kış aylarında yoğunluğunun yüksek, yaz aylarında ise düşük olması da bu durumla açıklanabilmektedir.

İstanbul Havalimanı'nda parametrelerin birbiri üzerindeki etkisi incelendiğinde, NO₂ parametresinin sadece CO parametresi üzerinde etkisi olduğu ve etkisinin yüksek düzeyde istatistiksel olarak anlamlı olduğu belirlenmiştir. CO ve O₃ parametreleri arasında geri beslemeli bir ilişki

olduğu ve birbiri üzerindeki etkisinin çok yüksek düzeyde istatistiksel anlamlı olduğu tespit edilmiştir. UV parametresinin sadece SO₂ parametresi üzerinde etkisi olduğu, SO₂ parametresinin ise hiçbir parametreyi etkilemediği belirlenmiştir. CO parametresinin UV üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi olduğu ancak, geri beslemeli bir ilişki olmadığı belirlenmiştir. O₃ parametresinin ise NO₂ ve SO₂ parametreleri üzerinde de istatistiksel olarak anlamlı bir etkisinin olduğu tespit edilmiştir.

Benzer süreç Rize-Artvin Havalimanı için de uygulanmıştır ve Çizelge 5'te test sonuçları (F testi sonucu ve p değeri) verilmiştir.

Çizelge 5. Rize-Artvin Havalimanı özelinde parametreler arasında gerçekleştirilen Granger Nedensellik testi sonucu.

Veri	Parametre	F-testi (lag:1)	p	F-testi (lag:2)	p
Tüm	CO	0.5417	0.5915	1.0493	0.3179
	NO ₂	0.6419	0.4320	2.7195*	0.0929*
	O ₃	0.0304	0.8632	1.0172	0.3815
	UV	0.4553	0.5072	0.1002	0.9051
Trafik	SO ₂	1.5764	0.2285	1.2968	0.3091
	NO ₂	2.2093	0.1528	0.9549	0.4046
	O ₃	0.0019	0.9656	0.4528	0.6433
	UV	3.7538*	0.0669*	0.7293	0.4967
CO	SO ₂	0.0586	0.8122	1.2608	0.3214
	NO ₂	0.6204	0.4401	0.6034	0.5582
	O ₃	0.6831	0.4183	0.6664	0.5265
	UV	3.7470*	0.0665*	1.7841	0.1964
NO ₂	SO ₂	0.8910	0.3612	0.1965	0.8244
	CO	0.8336	0.3721	0.8471	0.4460
	NO ₂	4.5347**	0.0458**	3.3919*	0.0576*
	UV	0.5943	0.4498	0.8873	0.4300
O ₃	SO ₂	5.9556**	0.0286**	2.9396*	0.0949*
	CO	2.3779	0.1387	0.4108	0.6695
	NO ₂	3.2382*	0.0863*	0.4465	0.6468
	O ₃	0.1500	0.7027	0.9221	0.4167
UV	SO ₂	1.2033	0.2912	0.5401	0.5974
	CO	0.2658	0.6142	2.1699	0.1606
	NO ₂	2.4796	0.1376	1.1182	0.3614
	O ₃	1.6224	0.2235	2.6221	0.1172
SO ₂	UV	0.0061	0.9389	0.3187	0.7336

Çizelge 2'de verilen aralıklar dikkate alınarak: *, 0.05≤p<0.10, **, 0.01≤p<0.05.

Çizelge 5 incelendiğinde, Rize-Artvin Havalimanı'nda tüm uçak trafiği ile parametreler arasındaki ilişki incelendiğinde, uçak trafiğinin sadece NO₂ parametresi üzerinde istatistiksel olarak anlamlılık eğiliminde bir etkisi olduğu tespit edilmiştir. Çizelge 3'te verilen korelasyon sonuçlarında da yine NO₂ parametresi ile korelasyonunun olması bu durumu destekler niteliktedir.

Parametrelerin birbiri üzerindeki etkisi incelendiğinde, CO parametresinin UV parametresi üzerindeki etkisi, istatistiksel olarak anlamlılık eğilimi göstermiştir. NO₂ ve UV parametrelerinin ise birbiri üzerinde geri beslemeli bir ilişkisi olduğu görülmektedir. SO₂ parametresinin diğer

parametreler üzerinde bir etkisi olmadığı görülürken, İstanbul Havalimanı'nda olduğu gibi O₃ parametresinin NO₂ ve SO₂ parametreleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi olduğu görülmektedir. Genel olarak sonuçların İstanbul Havalimanı'nda elde edilen sonuçlardan farklı olmasının sebebi, havalimanının hizmete Mayıs 2022'de başlamış olması ve uçak trafiğinin daha az olması gösterilebilmektedir.

Sentinel-5P verisi hava kalite parametrelerinin takibinde önemli bir çağın başlangıcı olmuştur. Sadece nokta bazlı yersel analizlerle değil, hava kalite parametrelerinin mekansal dağılımının belirlenmesi için de önemli bir veri kaynağı sunmaktadır. Özellikle kentsel alanlardaki kirlenme aktivitelerinin belirlenmesi (Ayoobi vd. 2022, Morillas vd. 2024b) ve insan faaliyetlerinin azaldığında etkilerinin izlenebilmesi (örn. COVID-19 pandemi süreci) (Mathew vd. 2024, Morillas vd. 2024a) açısından değerli bir gelişmedir. Elde edilen tüm bulgular ışığında Sentinel-5P uydu verileri değerlendirildiğinde, özellikle NO₂ ve CO parametreleri üzerinde uçuş faaliyetlerinin etkisi olduğu belirlenmiştir. Sentinel-5P uydu verileri ile kentsel alanlarda gerçekleştirilen çalışmalarda da NO₂ parametresinin değişiminde havayolu aktivitelerinin etkileri ortaya konulmuştur (Shikwambana ve Kganyago 2021, Morillas vd. 2024b). Ayrıca yersel ölçümlerle gerçekleştirilen çalışmalar da NO₂ ve CO parametrelerinin havayolu faaliyetlerindeki önemini ortaya koymuştur (Popescu vd. 2011). Sentinel-5P verileri genel değerlendirme yapılabilmesi açısından oldukça önemli bir veri olsa da detaylı değerlendirmelerin gerçekleştirilebilmesi için mekansal çözünürlüğü yetersiz kalmaktadır ve yersel ölçümlere gereksinim duyulmaktadır. Ayrıca uydu verileri, uydu geçiş saatleri ile sınırlı kalırken, yersel ölçümler gün içerisinde belirli aralıklarla gerçekleştirilebilmektedir. Dolayısıyla hem yersel hem de uzaktan algılama verilerinin entegre kullanımı daha kararlı ve anlamlı bir havayolları hava kalitesi takip sistemi kurulmasına olanak sağlayacaktır.

4. Sonuçlar

Hava kalite parametreleri, insan sağlığını etkileyen ve takip edilmesi gereken önemli parametrelerdir. Kentleşmenin artışı ve buna dayalı olarak ulaşım sistemlerinin gelişmesinin, hava kalite parametreleri üzerinde olumsuz etkileri bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında, var olan bir ekosistemin tahrip edilerek yerine havalimanı inşa edilmesinin ve uçak trafiğinden kaynaklanan emisyonların hava kalitesine olası etkileri incelenmiştir. Bu amaçla, analizler sulak alanların ıslah edilmesiyle elde edilen alan üzerine inşa edilen İstanbul Havalimanı ve Türkiye'de deniz dolgusu üzerine inşa

edilen ikinci havalimanı olan Rize-Artvin Havalimanı üzerinde incelemeler gerçekleştirilmiştir.

Türkiye kapsamında, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından web ortamında Sürekli İzleme Merkezi oluşturularak hava kalite istasyonları ile nokta bazlı olarak hava kalite parametreleri takip edilmektedir. Ülkesel ölçekte bu sistemin önemli bir yeri olsa da lokal ölçekte istasyon sayılarının sınırlı olması mekânsal analizleri kısıtlamaktadır. Bu noktada, 2018 yılından beri servis edilen Sentinel-5P uydu verileri ile hava kalite parametrelerinin mekânsal dağılımları analiz edilebilmektedir. Bu veri kaynağı, özellikle kirletici kaynaklarının belirlenmesinde etkili bir rol oynamaktadır. Bu doğrultuda, seçilen iki havalimanı üzerinde hava kalite parametrelerinin değişimi zaman serisi analizleri ile incelenmiştir. COVID-19 salgını sırasında uygulanan uçuş kısıtlamalarının hava kalite parametrelerinin azalmasında etkisinin görülmesinin yanı sıra her iki havalimanının Karadeniz'e kıyısı olması sebebiyle deniz-kara meltemi sirkülasyonunun etkilerinin ozon parametresi üzerindeki etkileri gözlenmiştir. CO parametresinin zaman serisi trendinin havalimanları inşa edildikten sonra da stabil ilerlediği, UV, SO₂, NO₂ ve O₃ parametrelerinin ise özellikle son yıllarda artış gösterdiği tespit edilmiştir.

DHMI tarafından servis edilen aylık tüm uçak trafiği verileri kullanılarak hava kalite parametrelerinin aylık hava kalite parametreleri üzerindeki etkisi korelasyon analizi ve Granger Nedensellik testi ile incelenmiş ve anlamlı sonuçlar elde edilmiştir. Mevcut hava kalite istasyonlarının havalimanlarına uzak olması sebebiyle, elde edilen sonuçların yer gerçeklik verisiyle ilişkisine yönelik bir değerlendirme mümkün olamamıştır ancak istatistiksel ve görsel analizler ile uçak trafiğinin hava kalitesi üzerindeki etkileri çok yönlü olarak ortaya konmuştur. İstasyon verileri ile uydu verilerinin entegre edilerek bir hava kalitesi izleme sisteminin kurulması, sadece nokta bazlı değil mekânsal değerlendirmelere ve beraberinde kirletici kaynaklarının kolaylıkla belirlenmesine olanak sağlayacaktır. Böylece, doğal habitatlar üzerine inşa edilen havalimanı gibi yeni ulaşım altyapılarının da hava kalitesine etkileri yüksek doğruluklarda takip edilebilecektir.

Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Araştırma, Fikir Sahibi, Kaynaklar, Araştırma, Metodoloji, Analiz ve yorumlama, Yazma – orijinal taslak, Görselleştirme, Yazma – orijinal taslak

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği/ Data Availability Statement

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, ücretsiz servis edilen kaynaklardan elde edilmiştir.

5. Kaynaklar

- Abida, R., El Amraoui, L., Ricaud, P., Lahoz, W., Eskes, H., Segers, A., ... and Veihelmann, B., 2016. Impact of spaceborne carbon monoxide observations from the S-5P platform on tropospheric composition analyses and forecasts. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **2016(2)**, 1-1.
- Adhikari, A., and Yin, J., 2020. Short-term effects of ambient ozone, PM2.5, and meteorological factors on COVID-19 confirmed cases and deaths in Queens, New York. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **17(11)**, 4047. <https://doi.org/10.3390/ijerph17114047>
- Asadifard, E., and Masoudi, M., 2018. Status and prediction of carbon monoxide as an air pollutant in Ahvaz City, Iran. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, **16(3)**, 203-213. <https://doi.org/10.22124/cjes.2018.3061>
- Ayoobi, A. W., Ahmadi, H., Inceoglu, M., and Pekkan, E., 2022. Seasonal impacts of buildings' energy consumption on the variation and spatial distribution of air pollutant over Kabul City: application of Sentinel-5P TROPOMI products. *Air Quality, Atmosphere & Health*, **15(1)**, 73-83. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-34774-9>
- Beirle, S., Borger, C., Dörner, S., Li, A., Hu, Z., Liu, F., ... and Wagner, T., 2019. Pinpointing nitrogen oxide emissions from space. *Science Advances*, **5(11)**, eaax9800. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax9800>
- Birinci, E., Denizoglu, M., Özdemir, H., Özdemir, E. T., and Deniz, A., 2023. Ambient air quality assessment at the airports based on a meteorological perspective. *Environmental Monitoring and Assessment*, **195(12)**, 1542. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-12135-3>
- Bodah, B. W., Neckel, A., Maculan, L. S., Milanes, C. B., Korcelski, C., Ramírez, O., ... and Oliveira, M. L., 2022. Sentinel-5P TROPOMI satellite application for NO₂ and CO studies aiming at environmental valuation. *Journal of Cleaner Production*, **357**, 131960. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131960>
- Catane, S. G., Flora, J. R. R., Carag, J. W. M., Capino, J. B., Go, C. M., and Panganiban, A. L. L., 2024. Development in an environmentally critical coastal area: The risk perception on natural hazards and the New Manila International Airport by fishing communities in Talipitip, Philippines. *Ocean & Coastal Management*, **253**, 107127. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2024.107127>

- Cavalié, O., Cappa, F., and Pinel-Puységur, B., 2023. Three decades of coastal subsidence in the slow-moving Nice Côte d'Azur Airport area (France) revealed by InSAR (interferometric synthetic-aperture radar): insights into the deformation mechanism. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **23(10)**, 3235-3246.
<https://doi.org/10.5194/nhess-23-3235-2023>
- Cullis, C. F., and Hirschler, M. M., 1980. Atmospheric sulphur: natural and man-made sources. *Atmospheric Environment* (1967), **14(11)**, 1263-1278.
[https://doi.org/10.1016/0004-6981\(80\)90228-0](https://doi.org/10.1016/0004-6981(80)90228-0)
- 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.
<https://doi.org/10.53433/yyufbed.1119418>
- De Nevers, N., 2010. Air pollution control engineering. Waveland press.
- Dentener, F., Emberson, L., Galmarini, S., Cappelli, G., Irimescu, A., Mihailescu, D., ... and van den Berg, M., 2020. Lower air pollution during COVID-19 lock-down: improving models and methods estimating ozone impacts on crops. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, **378(2183)**, 20200188.
<https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0188>
- Durmaz, V., Küçükönel, H., Özen, M., ve Banar, M., 2007. Havaalanı faaliyetlerinin çevresel etkilerini azaltmaya yönelik mevzuat. *Sosyal Bilimler*, **5(1)**, 66-87.
- Dursun, S., Kunt, F., and Taylan, O., 2015. Modelling sulphur dioxide levels of Konya city using artificial intelligent related to ozone, nitrogen dioxide and meteorological factors. *International Journal of Environmental Science and Technology*, **12**, 3915-3928.
<https://doi.org/10.1007/s13762-015-0821-2>
- Ekici, S., and Şöhret, Y., 2021. A study on the environmental and economic aspects of aircraft emissions at the Antalya International Airport. *Environmental Science and Pollution Research*, **28**, 10847-10859.
<https://doi.org/10.1007/s11356-020-11306-w>
- Elbir, T., 2008. Estimation of engine emissions from commercial aircraft at a midsized Turkish airport. *Journal of Environmental Engineering*, **134(3)**, 210-215.
- El-Khoury, C., Alameddine, I., Zalzal, J., El-Fadel, M., and Hatzopoulou, M., 2021. Assessing the intra-urban variability of nitrogen oxides and ozone across a highly heterogeneous urban area. *Environmental Monitoring and Assessment*, **193**, 1-22.
<https://doi.org/10.1007/s10661-021-09414-2>
- Fares, S., Park, J. H., Ormeno, E., Gentner, D. R., McKay, M., Loreto, F., ... and Goldstein, A. H., 2010. Ozone uptake by citrus trees exposed to a range of ozone concentrations. *Atmospheric Environment*, **44(28)**, 3404-3412.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.06.010>
- Ghasempour, F., Sekertekin, A., and Kutoglu, S. H., 2021. Google Earth Engine based spatio-temporal analysis of air pollutants before and during the first wave COVID-19 outbreak over Turkey via remote sensing. *Journal of Cleaner Production*, **319**, 128599.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128599>
- Gökçe, A., 2002. İMKB'de fiyat-hacim ilişkisi: granger nedensellik testi. *Gazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, **4(3)**, 43-48.
- Granger, C. W., 1969. Investigating causal relations by econometric models and cross-spectral methods. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, **37(3)**, 424-438.
<https://doi.org/10.2307/1912791>
- Gürçam, S., Konuralp, E., and Ekici, S., 2021. Determining the effect of air transportation on air pollution in the most polluted city in Turkey. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, **93(2)**, 354-362.
<https://doi.org/10.1108/AEAT-08-2020-0176>
- Halder, B., Ahmadianfar, I., Heddarn, S., Mussa, Z. H., Goliatt, L., Tan, M. L., ... and Yaseen, Z. M., 2023. Machine learning-based country-level annual air pollutants exploration using Sentinel-5P and Google Earth Engine. *Scientific Reports*, **13(1)**, 7968.
<https://doi.org/10.1038/s41598-023-34774-9>
- Hashim, B. M., Al-Naseri, S. K., Al-Maliki, A., and Al-Ansari, N., 2021. Impact of COVID-19 lockdown on NO₂, O₃, PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations and assessing air quality changes in Baghdad, Iraq. *Science of the Total Environment*, **754**, 141978.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141978>
- Hou, Y., Wang, L., Zhou, Y., Wang, S., Liu, W., and Zhu, J., 2019. Analysis of the tropospheric column nitrogen dioxide over China based on satellite observations during 2008–2017. *Atmospheric Pollution Research*, **10(2)**, 651-655.
<https://doi.org/10.1016/j.apr.2018.11.003>
- Jeoloji Mühendisleri Odası (JMO), 2014. Çevre Jeolojisi Açısından 3. Havaalanı.
https://www.jmo.org.tr/resimler/ekler/7c4e57139a05e51_ek.pdf
- Jiang, L., and Lin, H., 2010. Integrated analysis of SAR interferometric and geological data for investigating long-term reclamation settlement of Chek Lap Kok Airport, Hong Kong. *Engineering Geology*, **110(3-4)**, 77-92.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.11.005>
- Kanniah, K. D., Kamarul Zaman, N. A. F., and Perumal, K., 2021. Analysis of NO₂ tropospheric column amount at airports in Malaysia before and during COVID-19

- pandemic using SENTINEL-5P tropomi data. The *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **43**, 399-403.
<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2021-399-2021>
- Kesgin, U., 2006. Aircraft emissions at Turkish airports. *Energy*, **31(2-3)**, 372-384.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2005.01.012>
- Kooreman, M. L., Stammes, P., Trees, V., Sneep, M., Tilstra, L. G., de Graaf, M., ... and Veefkind, J. P., 2020. Effects of clouds on the UV Absorbing Aerosol Index from TROPOMI. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, **13(12)**, 6407-6426.
<https://doi.org/10.5194/amt-13-6407-2020>
- Kul, S., 2014. İstatistik Sonuçlarının Yorumu: P Değeri ve Güven Aralığı Nedir?/Interpretation of Statistical Results: What Is P Value and Confidence Interval?. *Plevra Bülteni*, **8(1)**, 11.
- Kurniawan, J. S., and Khaldi, S., 2011. Comparison of methodologies estimating emissions of aircraft pollutants, environmental impact assessment around airports. *Environmental Impact Assessment Review*, **31(3)**, 240-252.
<https://doi.org/10.1016/j.eiar.2010.09.001>
- Lee, D. S., Pitari, G., Grewe, V., Gierens, K., Penner, J. E., Petzold, A., ... and Sausen, R., 2010. Transport impacts on atmosphere and climate: Aviation. *Atmospheric Environment*, **44(37)**, 4678-4734.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.06.005>
- Liu, X., Zhao, C., Zhang, Q., Yang, C., and Zhang, J., 2019. Characterizing and monitoring ground settlement of marine reclamation land of Xiamen New Airport, China with Sentinel-1 SAR datasets. *Remote Sensing*, **11(5)**, 585.
<https://doi.org/10.3390/rs11050585>
- Magro, C., Nunes, L., Gonçalves, O. C., Neng, N. R., Nogueira, J. M., Rego, F. C., and Vieira, P., 2021. Atmospheric trends of CO and CH4 from extreme wildfires in Portugal using Sentinel-5P TROPOMI level-2 data. *Fire*, **4(2)**, 25.
<https://doi.org/10.3390/fire4020025>
- Makineci, B. H., Arıkan, D., Alkan, D., and Karasaka, L., 2023. Spatio-temporal Analysis of Sentinel-5P Data of Konya City Between 2019-2021. *Harita Dergisi*, **170**, 23-40.
- Mao, H., and Talbot, R., 2004. Role of meteorological processes in two New England ozone episodes during summer 2001. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **109(D20)**.
<https://doi.org/10.1029/2004JD004850>
- Mathew, A., Shekar, P. R., Nair, A. T., Mallick, J., Rathod, C., Bindajam, A. A., ... Abdo, H. G., 2024. Unveiling urban air quality dynamics during COVID-19: a Sentinel-5P TROPOMI hotspot analysis. *Scientific Reports*, **14(1)**, 21624.
<https://doi.org/10.1038/s41598-024-72276-4>
- Mendez-Espinosa, J. F., Rojas, N. Y., Vargas, J., Pachón, J. E., Belalcázar, L. C., and Ramírez, O., 2020. Air quality variations in Northern South America during the COVID-19 lockdown. *Science of the Total Environment*, **749**, 141621.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141621>
- Morillas, C., Alvarez, S., Pires, J. C., Garcia, A. J., and Martinez, S., 2024a. Impact of the implementation of Madrid's low emission zone on NO2 concentration using Sentinel-5P/TROPOMI data. *Atmospheric Environment*, **320**, 120326.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2024.120326>
- Morillas, C., Alvarez, S., Serio, C., Masiello, G., and Martinez, S., 2024b. TROPOMI NO2 Sentinel-5P data in the Community of Madrid: A detailed consistency analysis with in situ surface observations. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, **33**, 101083.
<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.101083>
- Muhammad, S., Long, X., and Salman, M., 2020. COVID-19 pandemic and environmental pollution: A blessing in disguise?. *Science of The Total Environment*, **728**, 138820.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138820>
- Muniraj, K., Panneerselvam, B., Devaraj, S., Jesudhas, C. J., and Sudalaimuthu, K., 2023. Evaluating the effectiveness of emissions reduction measures and ambient air quality variability through ground-based and Sentinel-5P observations under the auspices of COVID pandemic lockdown in Tamil Nadu, India. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, **103(13)**, 3109-3120.
<https://doi.org/10.1080/03067319.2021.1902997>
- Penning de Vries, M. J. M., Beirle, S., and Wagner, T., 2009. UV aerosol indices from SCIAMACHY: introducing the SCattering Index (SCI). *Atmospheric Chemistry and Physics*, **9(24)**, 9555-9567.
<https://doi.org/10.5194/acp-9-9555-2009>
- Pinder, R. W., Klopp, J. M., Kleiman, G., Hagler, G. S., Awe, Y., and Terry, S., 2019. Opportunities and challenges for filling the air quality data gap in low-and middle-income countries. *Atmospheric Environment*, **215**, 116794.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.06.032>
- Popescu, F., Ionel, I., and Talianu, C., 2011. Evaluation of Air Quality in Airport Areas by Numerical Simulation. *Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ)*, **10(1)**, 115-120.
- Rosner, B., 2010. Fundamentals of Biostatistics, 7th edition. Brooks/Cole, Boston/USA.

- Seker, D. Z., Kaya, S., Alkan, R. M., Tanik, A., and Saroglu, E., 2008. 3D coastal erosion analysis of Kilyos-Karaburun region using multi-temporal satellite image data. *Fresenius Environmental Bulletin*, **17(11b)**, 1977-1982.
- Schäfer, K., Jahn, C., Sturm, P., Lechner, B., and Bacher, M., 2003. Aircraft emission measurements by remote sensing methodologies at airports. *Atmospheric Environment*, **37(37)**, 5261-5271. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2003.09.002>
- Sharifi, A., and 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. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2022.2120780>
- Shikwambana, L., and Kganyago, M., (2021). Assessing the responses of aviation-related SO₂ and NO₂ emissions to COVID-19 lockdown regulations in South Africa. *Remote Sensing*, **13(20)**, 4156. <https://doi.org/10.3390/rs13204156>
- Shojaie, A., and Fox, E. B., 2022. Granger causality: A review and recent advances. *Annual Review of Statistics and Its Application*, **9(1)**, 289-319. <https://doi.org/10.1146/annurev-statistics-040120-010930>
- Song, N. Q., Wang, N., and Lin, W. N., 2022. Assessment of the impact of artificial island airport reclamation on marine ecosystem health: A case study of the Dalian offshore airport, China. *Ocean & Coastal Management*, **226**, 106281. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2022.106281>
- Takım, A., 2010. Türkiye’de GSYİH ile ihracat arasındaki ilişki: granger nedensellik testi. *Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, **14(2)**, 315-330.
- Theys, N., Romahn, F., Wagner, T., 2023. S5P Mission Performance Centre Sulphur Dioxide [L2_SO2_] Readme, pp. 1–18, S5P-MPC-BIRA-PRF-SO₂, <https://sentinel.esa.int/documents/247904/3541451/Sentinel-5P-Sulphur-Dioxide-Readme.pdf>.
- Transportation Research Board (TRC), 2021. Critical Issues in Aviation and the Environment 2021. Washington, D.C. <https://sites.google.com/site/trbav030/publications>
- Turnacıgil, A., 2008. Yeniköy Ağaçlı Civarındaki Maden Ocaklarının Rehabilitasyonu, Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 134.
- Unal, A., Hu, Y., Chang, M. E., Odman, M. T., and Russell, A. G., 2005. Airport related emissions and impacts on air quality: Application to the Atlanta International Airport. *Atmospheric Environment*, **39(32)**, 5787-5798. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.05.051>
- Virghileanu, M., Săvulescu, I., Mihai, B. A., Nistor, C., and 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. <https://doi.org/10.3390/rs12213575>
- Wagner, N. L., Riedel, T. P., Roberts, J. M., Thornton, J. A., Angevine, W. M., Williams, E. J., ... and Brown, S. S., 2012. The sea breeze/land breeze circulation in Los Angeles and its influence on nitryl chloride production in this region. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **117(D21)**. <https://doi.org/10.1029/2012JD017810>
- Wang, H., Lyu, X., Guo, H., Wang, Y., Zou, S., Ling, Z., ... and Shen, J., 2018. Ozone pollution around a coastal region of South China Sea: interaction between marine and continental air. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **18(6)**, 4277-4295. <https://doi.org/10.5194/acp-18-4277-2018>
- Yağmur, N., ve Musaoğlu, N., 2022. Havalimanlarında yapısal değişimlerin PSInSAR tekniği ile belirlenmesi: İstanbul Havalimanı örneği. *Harita Dergisi*, **168**, 28-37.
- Zeydan, Ö., and Şekertekin, Y. Y., 2022. GIS-based determination of Turkish domestic flights emissions. *Atmospheric Pollution Research*, **13(2)**, 101299. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.101299>
- Zheng, Z., Yang, Z., Wu, Z., and Marinello, F., 2019. Spatial variation of NO₂ and its impact factors in China: An application of sentinel-5P products. *Remote Sensing*, **11(16)**, 1939. <https://doi.org/10.3390/rs11161939>
- Zhuo, G., Dai, K., Huang, H., Li, S., Shi, X., Feng, Y., ... and Deng, J., 2020. Evaluating potential ground subsidence geo-hazard of Xiamen Xiang'an new airport on reclaimed land by SAR interferometry. *Sustainability*, **12(17)**, 6991. <https://doi.org/10.3390/su12176991>

İnternet kaynakları

- 1- European Space Agency (ESA). 2024. <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s5p-mission>
- 2- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (ÇŞİDB). 2023. Ulaştırma Türlerine Göre Taşınan Yolcu ve Yük Miktarı. <https://cevreselgostergeler.csb.gov.tr/ulastirma-turlerine-gore-tasinan-yolcu-ve-yuk-miktari-i-85789>
- 3- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Sürekli İzleme Merkezi (ÇŞİDB-ŞİM). 2024. <https://sim.csb.gov.tr/Intro/ParametersMeta>
- 4- Google Earth Engine (GEE). 2024. <https://earthengine.google.com/>