

İstanbul Kent Atmosferindeki Aerosollerin Spektral, Konumsal ve Zamansal Analizi

Spectral, Spatial and Temporal Analysis of Aerosol over İstanbul Urban Atmosphere

Funda Yüzlükoğlu^{1,2*}, Kazım Kaba³, Cahit Yeşilyaprak³

¹Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Astronomi ve Astrofizik Anabilim Dalı, 25100, Erzurum /Türkiye.

²Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Fizik Bölümü, 45140, Manisa /Türkiye.

³Atatürk Üniversitesi, Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, 25100, Erzurum /Türkiye.

ARAŞTIRMA MAKALESİ

***Sorumlu yazar:**

Funda Yüzlükoğlu
funda.yuzlukoglu@cbu.edu.tr

doi: 10.48123/rsgis.1489463

Yayın süreci

Geliş tarihi: 24.05.2024
Kabul tarihi: 20.08.2024
Basım tarihi: 26.09.2024

Özet

Atmosferde akışkan hava içinde sıvı ve/veya katı halde asılı bulunan parçacıklar "Atmosferik Aerosol" olarak tanımlanmaktadır. Aerosol hava, iklim, iklim değişikliği, hava kalitesi, halk sağlığı ve astronomi gibi pek çok disiplini etkileyen önemli bir olgudur. Bu çalışmada uzaktan algılama verileriyle İstanbul ili için atmosferik aerosollerin konumsal, zamansal ve spektral özellikleri incelenmiştir. Bu kapsamda İstanbul'un uzun dönem ortalama Aerosol Optik Derinliği (AOD), Angstrom Katsayısı, spektral AOD ve zamansal (aylık, mevsimlik ve yıllık) haritaları üretilerek konumsal, spektral ve zamansal değerlendirmeler yapılmıştır. Çalışmada Suomi-NPP uydusundaki VIIRS algılayıcısından elde edilen aerosol verileri kullanılmıştır. Bu çalışma ile İstanbul için nispeten fazla detay içeren yüksek çözünürlükte, alansal ve zamansal sürekliliğe sahip, en güncel ve pek çok disiplinde yapılan çalışmalara katkı sağlayacak AOD haritaları sunulmuştur. İstanbul ilinin yüksek AOD değerleri kentin güneyinde Marmara Denizi kıyı şeritleri ve nüfus yoğunluğunun yüksek olduğu kıyıya yakın yerler ile Kuzeyde Sarıyer kıyıları ve nispeten Karadeniz'in kara ile buluştuğu kıyı kesimleridir. Kara üzerinde kentin nüfus yoğunluğu ve bitki örtüsü ile ilintili bir AOD değişimi vardır.

Anahtar kelimeler: Aerosol optik derinlik, Mekânsal değişim, Spektral değişim

Abstract

Particles suspended in liquid and/or solid form in the fluid air in the atmosphere are defined as "Atmospheric Aerosol". Aerosol is an important phenomenon that affects many disciplines such as weather climate, climate change, air quality, public health and astronomy. In this study, spatial, temporal and spectral characteristics of atmospheric aerosols for İstanbul province were examined with remote sensing data. In this regard, long-term average, Aerosol Optical Depth (AOD) map, Angstrom exponent map, spectral AOD maps and temporal (monthly, seasonal and annual) maps of İstanbul were produced and spatial, spectral and temporal evaluations were performed. Aerosol data obtained from the VIIRS sensor on the Suomi-NPP satellite was used in this study. AOD maps for İstanbul, which contain relatively more detail, are high resolution, have spatial and temporal continuity, are the most up-to-date and will contribute to studies in many disciplines, have been presented. The high AOD values of İstanbul province are the Marmara Sea coastlines in the south of the city and the places close to the coast where the population density is high, and the Sarıyer coasts in the north and the coastal areas where the Black Sea meets the land. There is an AOD change on land related to the city's population density and vegetation.

Keywords: Aerosol optical depth, Spatial variation, Spectral variation

1. Giriş

Aerosol, bir akışkan içinde asılı bulunan sıvı veya katı parçacıklı yapılar olarak tanımlanmıştır. Aerosoller, fiziksel durumlarına göre sıvı ve katı parçacıklı, boyutlarına göre ise; kaba (coarse), ince (fine) ve ultra ince (ultra fine) olarak tanımlanırlar. Çapı 2.5 µm'den büyük olan parçacıklar kaba, çapı 0.1 - 2.5 µm aralığında olanlar ince ve çapı 0.1 µm'den küçük olan parçacıklar da ultra ince parçacıklı aerosoller olarak tanımlanırlar (Tomasi & Lupi, 2017; Hinds, 1999).

Atmosferde akışkan hava içinde sıvı ve katı halde asılı bulunan parçacıklar "Atmosferik Aerosol (AA)" olarak tanımlanmaktadır. Bu parçacıklı maddeler kaynaklarına göre; doğal ve insan kaynaklı (antropojenik) olarak ikiye ayrılmaktadır (Tomasi & Lupi, 2017). Denizler, çöl alanları, orman yangınları ve volkanlar doğal aerosol kaynakları iken, endüstriyel faaliyetler, ulaştırma, tarım ve madencilik gibi insan kaynaklı faaliyetler ise antropojenik kaynaklardır. Atmosferdeki partikül maddeler kaynağı, boyutları, fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlı olarak olumlu veya olumsuz etkilere sahiptir. Doğal kaynaklı aerosoller gezegenimizde yaşamın devamı için gerekli olan süreçlerin (bulut oluşumu ve dolayısıyla yağış oluşumu ile saçılmaya neden olarak yer yüzünün enerji dengesine olumlu katkı yapması gibi) devamını sağlarken yapay kaynaklı aerosoller (genellikle doğal kaynaklı aerosollerden daha küçüktür) başta doğa ve insan sağlığı olmak üzere pek çok olumsuz etkilere sahiptir (Tomasi & Lupi, 2017).

Aerosoller atmosferimize yerden yükselen parçacıkların girmesiyle, atmosfer dışından gelen kozmik parçacıklar nedeniyle ve atmosferdeki kimyasal süreçler vasıtasıyla meydana gelir. Atmosfere doğrudan giren aerosoller birincil ve atmosferde kimyasal yolla üretilen aerosoller ise ikincil olarak adlandırılır (Tomasi & Lupi, 2017).

Aerosol optik derinlik (AOD) kısaca belli bir dalga boyundaki elektromanyetik enerjinin aerosollar nedeniyle azalması olarak tanımlanır. Başka bir ifadeyle AOD, atmosferik aerosollerin sönmüleme (saçılma ve soğurma) nedeniyle ışığın iletimini ne kadar engellediğini ifade eden bir parametredir. AOD küresel ölçekte 0-5 arasında değer alabilen (uydu verileri bu ölçektir), ancak sıklıkla 0-1 arasında ve toz kaynakları ve toz taşınımı gibi aşırı meteorolojik hadiseler nedeniyle 1 (bir) üzerinde değer alabilen birimsiz bir niceliktir (MGM, 2023). AOD değerleri yer yüzeyinden atmosferin üzerine uzanan dikey sütun boyunca aerosol miktarının bir ölçüsüdür. AOD değerlerinin büyük olması atmosferdeki aerosol miktarının yüksek olduğunu ve küçük olması (sıfıra yaklaşması) partikül madde açısından temiz bir atmosferin varlığını gösterir. Bir alanda kuvvetli veya çok kuvvetli kum ve toz fırtınaları yaşandığında, AOD değerleri 1'in üzerinde görülebilmektedir (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2023). Angstrom katsayısı (AE) ışığın çeşitli dalga boyuna göre AOD'nin nasıl değiştiğinin bir ölçüsüdür ("spektral bağımlılık" olarak bilinir). AE, aerosol partikül boyutu ile ilgilidir. Kabaca söylemek gerekirse, 1'den küçük AE değerleri, kaba parçacıkların (örn. toz, kül, deniz tuzu/spreyi) optik baskınlığını gösterirken, 1'den büyük değerler ince parçacıkların (örn. duman, endüstriyel kirlilik) baskınlığını gösterir. Aerosol boyutlarının değerlendirilmesi için AE parametresi kullanılmaktadır. AE'nin küçük olması, toz gibi büyük çaplı parçacıkların ortamda daha baskın olduğunu göstermektedir. AE'nin yüksek değerleri ise küçük çaplı aerosollerin ortamda baskın olduğunu ifade eder. Ayrıca AE değerleri kullanılarak belli bir dalga boyunda (örneğin 550 nm) bilenen AOD verisi ölçümü yapılmayan (örneğin 500 nm) başka bir dalga boyuna interpolasyonu yapılarak yeni aerosol bilgisi elde edilebilir (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2023).

Aerosol iklim, iklim değişikliği, hava kalitesi, halk sağlığı ve astronomi gibi pek çok disiplini etkileyen önemli bir olgudur. Bu nedenle Türkiye ve Dünya genelinde farklı disiplinlerde aerosol ile ilgili çeşitli çalışmalar geçmişten günümüze devam etmektedir. Ayrıca son zamanlarda etkileri önemli derecede ortaya çıkan iklim değişikliği de aerosol konusundaki çalışmaların önemini artırmıştır. Bu çalışma İstanbul ilinin aerosol miktarını kapsaması nedeniyle ülkemizde yapılan başlıca aerosol çalışmalarına burada yer verilmiştir. Güllü vd. (1998) Karadeniz aerosolü ve uzak mesafeli atmosferik taşınımını araştırma gemilerinden toplanan verilerle incelemiştir. Kabataş vd. (2014) Sahra çöl tozunun Türkiye'deki partikül madde (PM10) değerlerine katkısını inceleyen çalışma yapmışlardır. Zeydan vd. (2019) "Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer" (MODIS) AOD verilerini kullanarak Türkiye'de PM2.5 miktarını tahmin etmişlerdir. Tuygun vd. (2020) Türkiye genelinde MODIS veri koleksiyonlarını değerlendiren çalışma yapmışlardır. Tuygun vd. (2020) Türkiye'nin güney kıyı bölgesinde, yer ve uydu tabanlı aerosol miktarının yeryüzü sınır tabaka yüksekliği ile ilişkisinin uzun vadeli zamansal analizini yapmışlardır. Özkan vd. (2021) yaptığı çalışmada, Sahra ve Ortadoğu kaynaklı çöl tozlarının Türkiye'deki ekosistemlere etkisini incelemiştir. Karslıoğlu vd. (2022) ve Tezcan vd. (2022) yapılan çalışmalarda Türkiye'de MODIS AOD değerlerinin ve Türkiye ve yakın çevresinde Güneş fotometreleri ile elde edilen AOD verilerinin zamansal ve alansal değişimini incelemiştir. Coşkun vd. (2022) Covid 19 sürecinde Karabük il merkezi ve Zonguldak'ın Ereğli ilçesinde AOD analizini yapmışlardır. Gündoğdu vd. (2022) VIIRS aerosol ürününden günlük PM2.5 miktarını tahmin eden çalışmalarını sunmuşlardır. Tuygun ve Elbir (2023) MODIS AOD verilerini kullanarak makine öğrenme yöntemiyle partikül madde konsantrasyonunu tahmin etmişlerdir. Zeydan vd. (2023) Türkiye için AOD değerlerinin uzun dönem trendini ve AOD ile meteorolojik parametreler ve bitki örtüsü arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Türkiye ve/veya illeri için yapılan bu çalışmalar oldukça önemli olmakla birlikte Türkiye'nin konumunu düşündüğümüzde farklı aerosol kaynaklarına (çöl ve deniz gibi) yakın olması ve iklim değişikliği nedeniyle aerosol konusundaki çalışmalar periyodik olarak tekrarlanmalı ve yapılan çalışmaların sayısı artırılmalıdır.

Bu çalışmada uzaktan algılama verileriyle İstanbul ili için atmosferik aerosolün konumsal, zamansal ve spektral analizleri yapılmıştır. Bu kapsamda farklı dalga boylarında İstanbul'un uzun dönem ortalama, AOD haritaları, Angstrom Katsayısı haritası ve zamansal (aylık, mevsimlik ve yıllık) haritaları üretilerek konumsal, spektral ve zamansal değerlendirmeler yapılmıştır. Çalışmada uzaktan algılama alanında önemli bir yere sahip olan, Suomi-National Polar-Orbiting Partnership (NPP) uydusundaki Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) algılayıcısından elde edilen aerosol verileri kullanılmıştır. Veriler Mart/2012–2023 yılları arasını ve İstanbul ilini kapsamaktadır.

Bu çalışma ile İstanbul ili için detaylı, yüksek çözünürlükte, alansal ve zamansal sürekliliğe sahip, en güncel ve pek çok disiplinde yapılan çalışmalara katkı sunacak AOD haritaları ve AE haritası sunulmuştur. Literatürde nispeten daha düşük piksel çözünürlüklü Türkiye AOD haritaları (genelde MODIS verileri) bulunmakla birlikte İstanbul gibi önemli bir kent için aerosol bilgisi sağlayan haritalar ne MGM kaynaklarında ne de akademik çalışmalarda bulunmamaktadır. Türkiye AOD haritaları önemli bilgiler sunmakla birlikte ülkenin çeşitli bölgelerindeki yerel toz kaynakları için daha detaylı haritalara ihtiyaç vardır. Bu çalışma ise İstanbul aerosol desenini detaylı bir şekilde ortaya koymaktadır. Ayrıca VIIRS, MODIS yerini alacak şekilde tasarlanmış daha gelişmiş algoritmalar ile veri sağlayan bir algılayıcıdır. Bu nedenlerle bu çalışmanın önemli bir eksikliği gidermesi amaçlanmaktadır.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışma da Suomi-NPP uydusundaki VIIRS algılayıcısından elde edilen aerosol ürünü kullanılmıştır. İstanbul ili için AOD değerleri spektral, mekânsal ve zamansal ve AE değerleri de konumsal olarak analiz edilmiştir. Uzaktan algılama alanında yer, atmosfer ve buzullar ile ilgili çalışmalara MODIS algılayıcısı 1999'dan beri veri sağlayan ve çeşitli disiplinlerde sıklıkla kullanılan önemli bir cihazdır. Bu algılayıcıdan aerosol verileri de üretilmesine karşın konumsal kapsama ve yersel çözünürlük dezavantaj oluşturmaktadır. MODIS aerosol ürünlerindeki eksiklerin üstesinden gelmek için 6 km yersel çözünürlüğe sahip olan Suomi-NPP uydusundaki VIIRS algılayıcısından elde edilen aerosol ürünü (AERDB_L2_VIIRS_SNPP) çalışmada kullanılmıştır. Bu ürün 2012'den günümüze sağlanmaktadır. Konumsal ve zamansal kapsama ile yersel çözünürlük dikkate alındığında bu ürünün kullanımı uygun bir seçim olmuştur.

Kutupsal yörüngeli Suomi-NPP uydusu NASA için uzaya fırlatılacak gelecek nesil uydu sisteminin kritik bir ilk adımıdır. NASA tarafından geliştirilen ve NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) tarafından yönetilen uydu 28 Ekim 2011'de Vandenberg tesisinden Delta-2 roketi ile fırlatılmıştır. Suomi-NPP uydusu çıkış evresi için (ascending node) ekvatoru yerel saat ile 13.30'da geçmektedir. Bu uydu dünyanın etrafındaki yörüngesinden (824 km) günde yaklaşık 14 defa geçiş yapar ve neredeyse yer yüzeyinin tamamına yakınına kayıt eder (STAR Calibration Center, 2023). Suomi-NPP uydusunun taşıdığı cihazlardan biri de VIIRS algılayıcısıdır. Bu cihaz 22 spektral kanala sahip olup 0.412 ile 12.012 µm arasında kayıt yapmaktadır. Bu kanallar M (Moderate resolution), I (Imaging resolution) ve DNB (Day/Night band) olmak üzere üç gruba ayrılmıştır. 16 M kanalı, beş I kanalı ve bir tane de DNB kanalı mevcuttur. M kanalları ve DNB kanalı 750 m yersel çözünürlüğe sahip iken I kanalları 375 m yersel çözünürlüğe sahiptir. M kanalları 11 solar ve 5 termal kanaldan, I kanalları ise 3 solar ve 2 termal kanaldan oluşmaktadır. DNB pankromatik kanalı 0.50 ile 0.90 µm spektral genişlikte gece-gündüz kayıt yapan kanaldır (STAR Calibration Center, 2023). AERDB_L2_VIIRS_SNPP ürünü Suomi-NPP VIIRS algılayıcısından elde edilen çeşitli veri setlerine sahip aerosol ürünüdür (LAADS DAAC, 2024). Bu ürün küresel ölçekte, uydu alt noktasında 6 km yersel çözünürlükte, kara yüzeyinde DB (Deep Blue) ve su yüzeyinde SOAR (Satellite Ocean Aerosol Retrieval) algoritmalarıyla, 550 nm referans dalga boyunda ve 6 dakikalık kayıtlar olarak üretilmektedir (Sayer vd., 2018). Ürün çalışma alanını ve 2012-2023 yılları arasını kapsayacak şekilde LAADS DAAC (Level-1 and Atmosphere Archive and Distribution System -Distributed Active Archive Center) sisteminden temin edilmiştir.

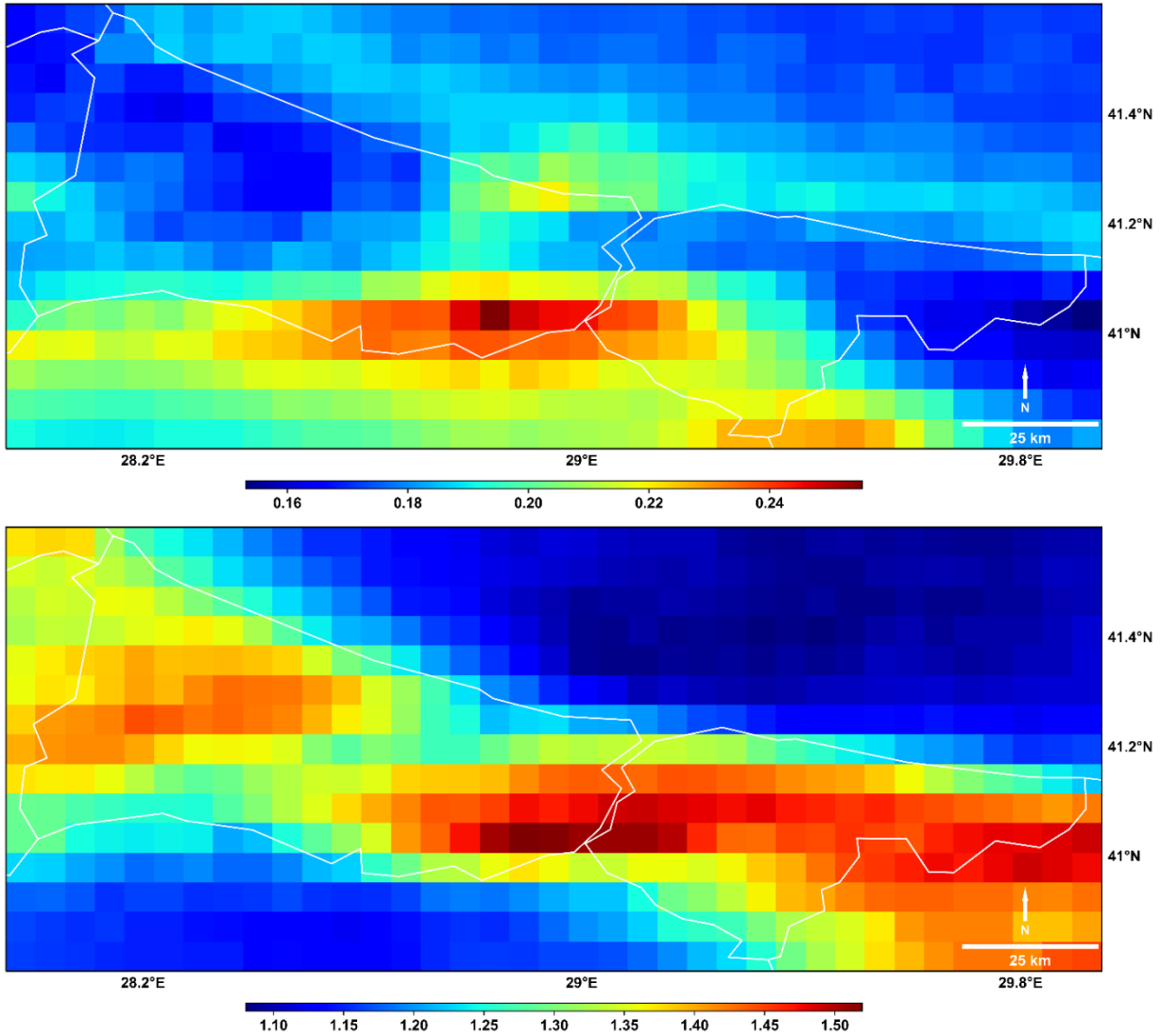
Proje çalışma alanı -17 ve 99 derece boylamları arası ile 13-55 derece kuzey enlemleri arasını kapsamaktadır. Türkiye etrafındaki farklı kaynakların ürettiği aerosollerin hava akımlarıyla taşınması nedeniyle geniş alanların incelenmesi aerosol takibi ve yönetimi hakkında daha kapsamlı bilgi sağlayacaktır. Öte yandan bu durum daha küçük alanlar için detay kaybına neden olacaktır. Bu nedenle bu çalışma geniş alan için üretilen aerosol verilerinden daha ayrıntılı bir analiz için bu alan içinde kalan nispeten küçük alan olan İstanbul ili ve çevresi için hazırlanmıştır. AERDB_L2_VIIRS_SNPP ürünü 2012 Mart ayından günümüze kadar veri sağlamaktadır. Bu çalışma için ise Mart/2012 – 2023 tarihleri arasını ve çalışma alanını kapsayan 6 dakikalık kayıtlardan oluşan veriler kullanılmıştır. Çalışmada 6 dakikalık görüntülerden her gün için 20 – 30 arası görüntü koordinatlandırılarak (georeferencing) ve birleştirilerek (image mosaicing) çalışma alanını (-17 ve 99 derece boylamları arası ile 13-55 derece kuzey enlemleri arası) kapsayan görüntüler GeoTIFF dosya formatında hazırlanmıştır. Bu görüntüler 6 km (0.054 derece) yersel piksel çözünürlüğünde, Coğrafi koordinat sisteminde, Coğrafi enlem-boylam projeksiyonunda ve WGS84 datum ve elipsoidinde olacak şekilde üretilmiştir.

Kentleşme, arazi kullanımı, bitki örtüsü ve diğer birçok konuda zaman içinde çeşitli değişiklikler meydana gelebilir. Bu değişikliklerin tespiti ve elde edilen çıkarımlar oldukça önemlidir. Çalışılan alan içindeki değişiklikleri gösteren farklı veri yapılarının ve tematik değişikliklerin ölçülmesine değişim tespiti denir (Ramachandra & Kumar, 2004). Değişim analizindeki temel ilke, görüntülerin farklı tarihlerde olması ve aynı mevsimsel dönem ve meteorolojik koşullarda algılanmasıdır (Sarıyılmaz, 2012).

Bir alandaki değişimin tespiti, zaman serisindeki iki görüntü arasındaki görüntü farklılıkları veya sınıflandırma sonrası karşılaştırma gibi teknikler kullanılarak gerçekleştirilebilir (Jensen, 1996). Çeşitli yöntemlerle elde edilen verilerin kronolojik sıraya göre toplanması bilgi edinmede oldukça önemlidir. Günlük fiyat verilerinden ay ve yıl bazında fiyat değişimleri, günlük sıcaklık verilerinden yıl cinsinden ortalama sıcaklık, satış rakamlarından yıllık ihracat miktarı gibi bilgiler alınabilir. Belirli aralıklarla elde edilen gözlem verilerinden alan değişimini analiz etmek mümkündür (Cryer & Chan, 2008). Belirli bir zaman içerisinde kronolojik olarak verilerin toplanması sonucunda oluşan kümeye zaman serisi denir. Zaman serisinin amacı, zaman içindeki değişimi anlamak ve geleceğe yönelik verileri en doğru şekilde tahmin etmektir (Allen, 1964). Bu çalışmada da konumsal ve zamansal değişim tespiti için bu yöntemlerden faydalanılmıştır.

3. Bulgular

Çalışma kapsamında AOD ve AE değerlerinin alansal analiz için uzun dönem ortalama haritalar üretilmiştir. Bu kapsamda İstanbul'un 550 nm referans dalga boyunda uzun dönem (2012-2023) ortalama AOD (üst) ve uzun dönem (2012-2023) ortalama AE (alt) haritası Şekil 1'de verilmiştir. Uzun dönem ortalama AOD haritasında minimum, maksimum, ortalama, medyan ve standart sapma değerleri 0,1531, 0,2554, 0,1894, 0,1840 ve 0,0191 olarak gerçekleşmiştir. AOD haritasında kentin yüksek (kırmızı renkler) ve düşük (mavi renkler) aerosol içeren alanları görülebilir. İstanbul ilinin yüksek AOD değerleri kentin Güneyinde Marmara Denizi kıyı şeritleri ve nüfus yoğunluğunun yüksek olduğu kıyıya yakın yerler ile Kuzeyde Sarıyer kıyıları ve nispeten Karadeniz'in tüm İstanbul kara sınırı ile bulunduğu kıyıya paralel (haritada turkuaz/yeşil renkli şerit) kesimleridir. Düşük AOD değerleri ise Çatalca ve Şile (Güney batısı hariç) ilçeleri olarak hesaplanmıştır. Kara üzerinde ise kentin nüfus yoğunluğu ve bitki örtüsü ile ilintili bir AOD değişimi vardır.

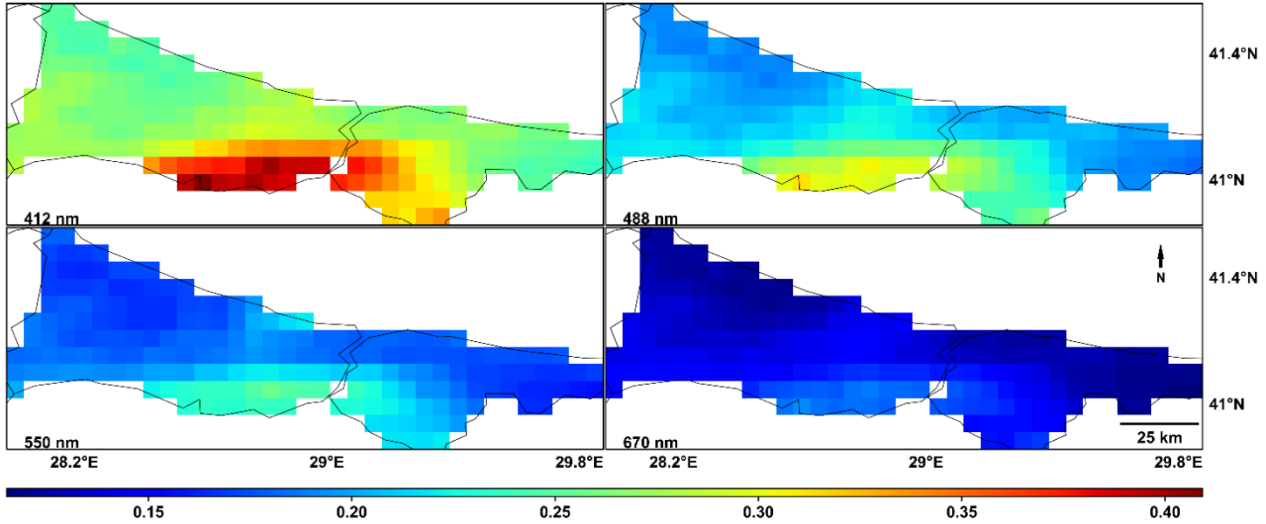


Şekil 1. İstanbul'un uzun dönem (2012-2023) ortalama AOD (üst) ve AE (alt) haritaları

AOD kara üzerinde kentin nüfus yoğunluğu (<https://www.beylikduzu.istanbul/BBIImages/Slider/Image/2020-yili-%CC%87lc%CC%A7elere-go%CC%88re-nu%CC%88fus-yog%CC%86unlug%CC%86u.pdf>) ile doğru orantılı, bitki örtüsü (Okumuş & Terzi, 2021) ile ters orantılıdır. Su üzerinde Marmara denizinde Karadeniz'den daha yüksek değerler görülmektedir. Uzun dönem ortalama AE haritasında minimum, maksimum, ortalama, medyan ve standart sapma değerleri 1,0802, 1,5195, 1,2579, 1,2399 ve 0,1308 olarak gerçekleşmiştir. AE haritasında kentin yüksek (kırmızı renkler) ve düşük (mavi renkler) AE değerleri içeren alanları görülebilir. İstanbul ilinin yüksek AE değerleri batıda Tekirdağ – Silivri sınırına yakın alanlar, İstanbul boğazının çevresi ve doğuda İstanbul-Kocaeli sınırı çevresi olarak hesaplanmıştır. Düşük AE değerleri ise su yüzeyinde (Marmara ve Karadeniz) ve sahil/kıyı kesimlerinde görülmektedir. Genel olarak 1'den küçük AE değerleri su yüzeyinde ve 1'den büyük AE değerleri kara yüzeyinde hesaplanmıştır. İki harita birlikte incelendiğinde kara yüzeyinde genelde düşük AOD değeri olan alanlarda büyük AE değerleri olduğu görülür. Bu ise aerosol parçacıklarının küçük boyutlu ve antropojenik olduğunu gösterir. Yüksek AOD değeri olan Sarıyer çevresinde nispeten düşük AE değerleri görülmektedir. Boğazın Marmara denizi tarafında ise hem yüksek AOD hem de AE değerleri görülmektedir. Bu alanda çok miktarda küçük boyutlu parçacıklardan oluşan aerosol olduğu anlaşılır.

Uydu görüntülerinden türetilen veya yer tabanlı AOD ürünü ile yer tabanlı ölçümlerden elde edilen PM10 değerleri arasında zamana ve bölgeye bağlı olarak değişik şiddette (zayıf, orta ve güçlü) ilişki görülmektedir (Kong vd., 2016). Ünal vd. (2011) İstanbul için 2005 – 2009 yıllarını kapsayan PM10 konsantrasyonlarının mekânsal ve zamansal değişimleri üzerinde meteorolojik faktörlerin ve emisyon kaynaklarının etkisini ele aldıkları çalışmada şehir genelinde PM10 değerlerinin önemli değişimler gösterdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca çalışmada trafik ve sanayi bölgelerinde PM10 değerlerinin hava kalitesi sınırını aştığı bilgisi verilmektedir. Çalışmadaki PM10 dağılımına benzer durumlar, veriler farklı zaman dilimini kapsıyor olsa da bu çalışmadaki İstanbul AOD değerlerinde de görülmektedir. Hatzianastassiou vd. (2009) Doğu Akdeniz için yaptıkları çalışma İstanbul'u kapsamakta ve 1980 – 2005 yılları arasındaki uydu verilerinden (TOMS ve MODIS algılayıcılarından elde edilen) konumsal ve zamansal analiz sunmaktadır. Çalışmada İstanbul'un düşük aerosol değerlerinin sebebini fazla yağış ve hâkim rüzgâr etkisi nedeniyle olduğu belirtilmiştir. Ayrıca çalışmada örnek bir toz taşınım analizi sonucunda Kuzey Afrika'dan yayılan tozun bu olayda İstanbul'u etkilemediği tespit edilmiştir.

Çetin vd. (2017) İstanbul için poliklorlu bifeniller (PCB'ler) ve polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH'lar) gibi organik kirleticilerin konumsal ve zamansal dağılımını araştırdıkları çalışmalarında kent trafiğinin ve nüfus artışının organik kirleticiler ve insan sağlığına etkileri açısından daha fazla çalışılması gerektiğini belirtmişlerdir. Karaca vd. (2010) İstanbul'da yol (TEM ve E5) yakınlarındaki kurşun konsantrasyonlarını ele aldıkları çalışmada, kurşunsuz yakıtların kullanımıyla havadaki kurşun miktarının düştüğünü belirtmişlerdir. Aerosol çalışmaları da benzer şekilde birçok disiplinin için önemli bilgiler sunmakta ve periyodik olarak tekrarlanmalıdır çünkü zamansal ve alansal değişim süreklilik göstermektedir.



Şekil 2. İstanbul'un farklı dalga boylarında (412, 488, 550 ve 670 nm) uzun dönem (2012-2023) ortalama AOD haritaları

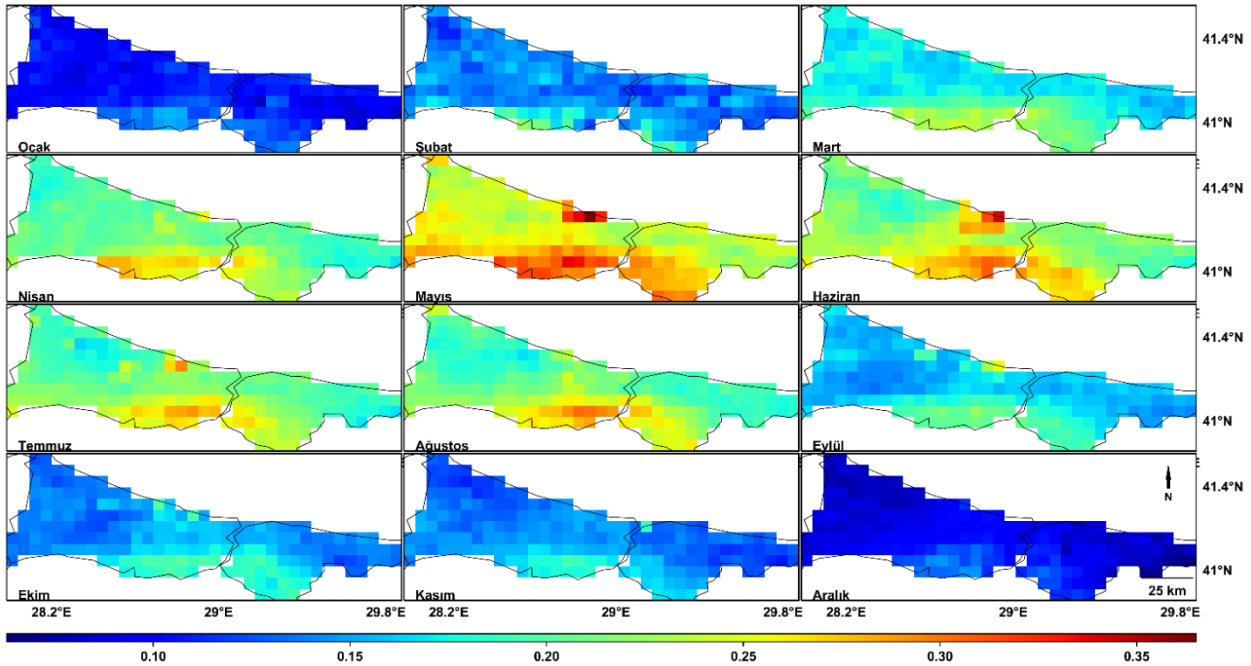
İstanbul'un kara yüzeyi için dört farklı dalga boyunda (412, 488, 550 ve 670 nm) uzun yıllık ortalama AOD haritaları Şekil 2'de ve bu haritaların temel istatistik değerleri de Tablo 1'de verilmiştir. Haritalardan ortalama AOD değerleri spektral olarak karşılaştırılabilir. Haritalar incelendiğinde tüm dalga boyları için kara yüzeyinde yüksek ve düşük aerosol bölgeleri görülebilir. Haritalarda AOD değerleri her bir dalga boyunda farklı şiddette olsa da haritalar benzer değişim deseni göstermiştir. Spektral açıdan aerosol miktarı dalga boyu ile ters orantılıdır.

Dalga boyu arttıkça aerosol tespitinin azaldığı görülmektedir (Şekil 2). Bu durum Tablo 1'deki nicel değerlerden net olarak görülebilir. 412 nm dalga boyu için ortalama AOD 0,2871 iken 488 nm için 0,2221, 550 nm için 0,1902 ve 670 nm için 0,1419 olarak hesaplanmıştır. Tablodan medyan değerlerin ise 412 nm dalga boyu için 0,2727, 488 nm için 0,2137, 550 nm için 0,1830 ve 670 nm için 0,1399 olduğu görülebilir. Spektrumun kısa dalga boyu bölgesinde saçılma baskın iken dalga boyu arttıkça soğurma etkisi de artar. Spektrumun farklı bölgelerini konu alan çalışmalar için bu kritik öneme sahiptir. Bu nedenle aerosolün spektral tespiti disiplinler arası çalışmalar için önemli katkı sunacaktır. Örneğin iklim değişikliği çalışmalarında aerosolün güneş ışınımını saçması ve soğurması dünyanın enerji bütçesi için olumlu ve olumsuz (artı ve eksi) katkı yapar. Bu nedenle bu etkinin birlikte değerlendirilmesi için dalga boyu dikkate alınarak yapılan çalışmalar daha doğru sonuç verecektir.

Tablo 1. İstanbul'un farklı dalga boylarında uzun dönem (2012-2023) ortalama AOD temel istatistik değerleri

| Dalga boyu | Minimum | Maksimum | Ortalama | Medyan | Standart sapma |
|------------|---------|----------|----------|--------|----------------|
| 412 nm | 0,2377 | 0,4092 | 0,2871 | 0,2727 | 0,0411 |
| 488 nm | 0,1828 | 0,3121 | 0,2221 | 0,2137 | 0,0306 |
| 550 nm | 0,1559 | 0,2554 | 0,1902 | 0,1830 | 0,0226 |
| 670 nm | 0,1151 | 0,1926 | 0,1419 | 0,1399 | 0,0184 |

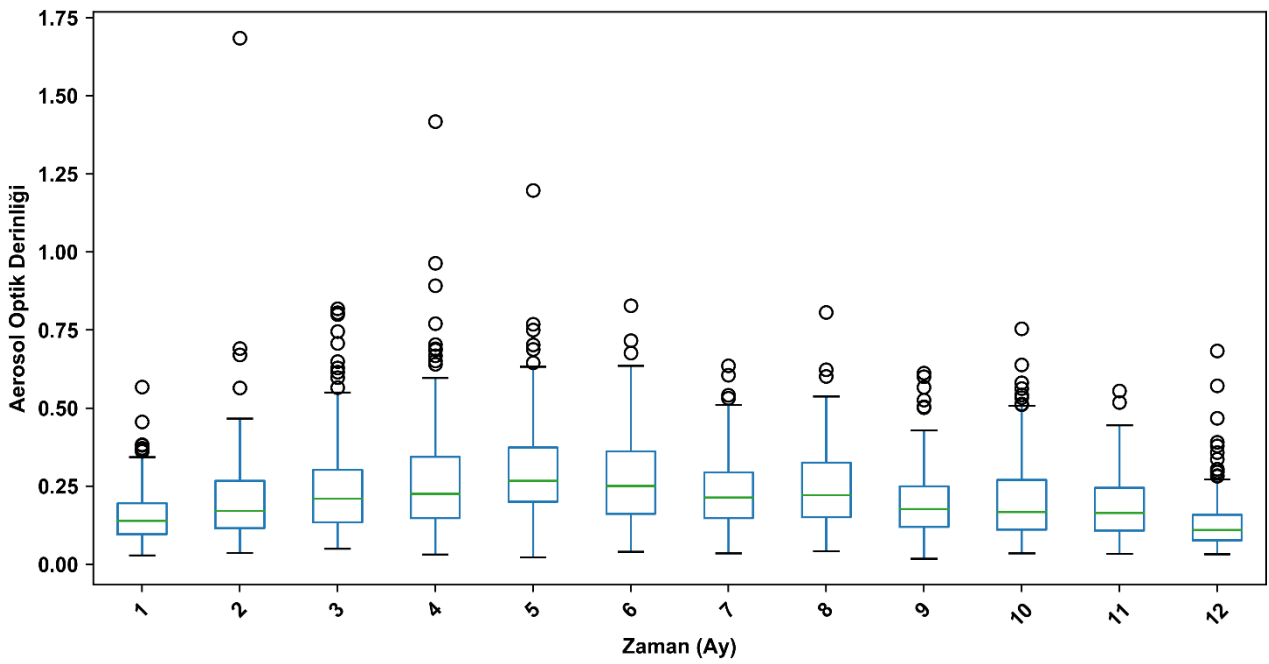
VIIRS 550 nm dalga boyunda kara ve su yüzeyi için aerosol bilgisi sağlaması, geleneksel olarak aerosol çalışmalarında bu spektral bandın yaygın kullanılması ve uydu veri/ürün sağlayıcıları tarafından yaygın bir referans dalga boyu olması nedeniyle aylık, mevsimlik ve yıllık haritaların üretilmesinde bu dalga boyunda sağlanan AOD verileri kullanılmıştır. Şekil 3'te İstanbul ili için uzun dönem aylık ortalama AOD haritaları verilmiştir. Bu haritaların istatistiksel değerleri de Tablo 2'de verilmiştir. Günlük uydu görüntülerinden ortalama alınarak türetilen veri setinin kutu grafiği de Şekil 4'te verilmiştir. Şekil 3 ve Tablo 2'den İstanbul için uzun dönem aylık haritalarda tüm aylar dikkate alındığında İstanbul kara yüzeyinde ortalama AOD 0,0962 (Aralık) ile 0,2601 (Mayıs) aralığında değişmektedir. En yüksek ortalama AOD değerleri sırasıyla Mayıs, Haziran, Temmuz, Ağustos ve Nisan aylarında iken en düşük ortalama AOD değerleri sırasıyla Aralık, Ocak, Kasım ve Şubat aylarında hesaplanmıştır. İstanbul için Mayıs ayı aerosol miktarının en yüksek olduğu ay olup Haziran-Ağustos aylarında yüksek aerosol konsantrasyonu görülürken Eylül ve Ekim ayları aerosol miktarının düşüğe geçtiği ve Aralık ile Ocak ayları en küçük değerlerin hesaplandığı aylardır. Aerosol miktarının yüksek olduğu aylarda çevredeki doğal aerosol kaynaklarının (çöller, denizler, orman yangınları vb.) daha aktif ve insan faaliyetlerinin (gezi, seyahat, ulaşım gibi) daha yoğun olduğu aylardır. Öte yandan aerosol miktarının düşük olduğu aylarda ise hem aerosol kaynaklarının etkinliği azalmakta hem de yağışların bu aylarda sık olması aerosol miktarının düşük kalmasını açıklar. Şekil 4'ten aylık verilerin dağılımı, medyan değerleri ve aykırı değerler karşılaştırılabilir.



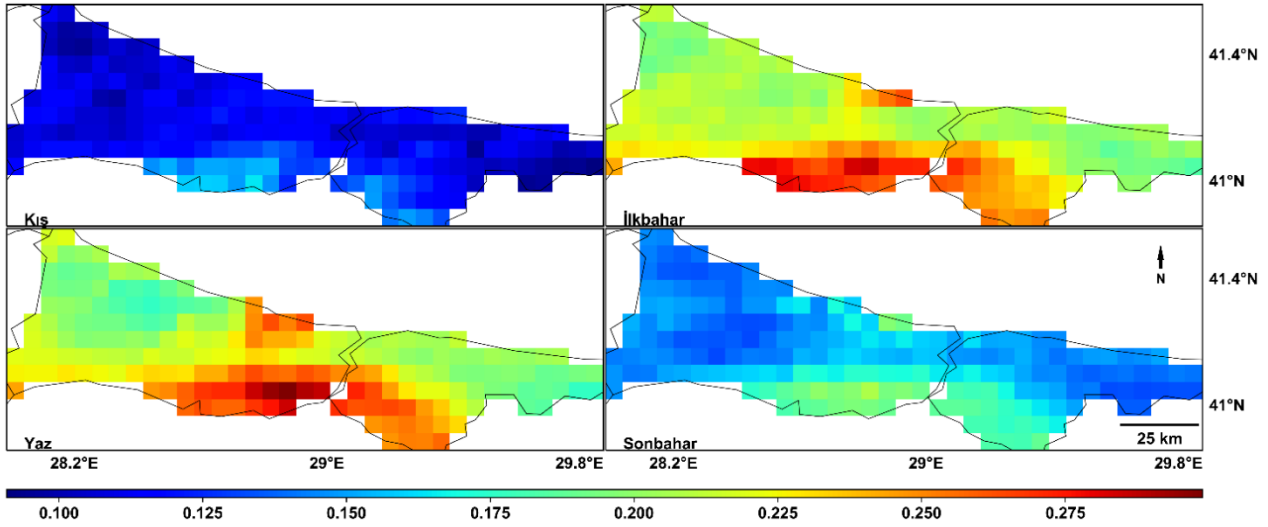
Şekil 3. İstanbul'un uzun dönem (2012-2023) aylık ortalama AOD haritaları

Tablo 2. İstanbul'un uzun dönem (2012-2023) aylık ortalama AOD temel istatistik değerleri

| Aylar | Minimum | Maksimum | Ortalama | Medyan | Standart sapma |
|-------|---------|----------|----------|--------|----------------|
| 1 | 0,0811 | 0,1551 | 0,1087 | 0,1059 | 0,0152 |
| 2 | 0,1091 | 0,2225 | 0,1441 | 0,1419 | 0,0193 |
| 3 | 0,1466 | 0,2433 | 0,1829 | 0,1753 | 0,0219 |
| 4 | 0,1680 | 0,2815 | 0,2129 | 0,2064 | 0,0247 |
| 5 | 0,2107 | 0,3651 | 0,2601 | 0,2547 | 0,0277 |
| 6 | 0,1781 | 0,3425 | 0,2329 | 0,2255 | 0,0307 |
| 7 | 0,1643 | 0,2941 | 0,2153 | 0,2110 | 0,0272 |
| 8 | 0,1687 | 0,3033 | 0,2144 | 0,2058 | 0,0301 |
| 9 | 0,1339 | 0,2561 | 0,1665 | 0,1618 | 0,0205 |
| 10 | 0,1184 | 0,2016 | 0,1530 | 0,1483 | 0,0205 |
| 11 | 0,1075 | 0,1940 | 0,1426 | 0,1410 | 0,0174 |
| 12 | 0,0627 | 0,1451 | 0,0962 | 0,0918 | 0,0165 |

**Şekil 4.** İstanbul'un aylık ortalama AOD değerleri

Şekil 5'te İstanbul kara yüzeyi için uzun yıllık mevsimsel ortalama AOD haritaları verilmiştir. Bu haritaların istatistiksel değerleri de Tablo 3'te verilmiştir. İlkbahar ve yaz mevsimlerinde diğer mevsimlere göre daha yüksek aerosol içeriği haritalardan görülmektedir. Haritalardan kış ve sonbahar mevsimlerinde aerosol miktarının daha az olduğu görülür. Tablo 3'ten bu haritaların sayısal değerlerine bakıldığında ortalama AOD değerleri büyükten küçüğe ilkbahar, yaz, sonbahar ve kış şeklinde sıralanır. AOD değerlerinin mevsimsel değişimi böyle iken Ünal vd. (2011) İstanbul için PM10 konsantrasyonlarının genel zamansal deseni için kışın yüksek ve yazın ise düşük konsantrasyonlarda olduğunu belirtmişlerdir. Başlıca aerosol kaynağı olan çöllerin ilk bahar ve yazın daha aktif olması ve PM10 kaynaklarının ise diğer mevsimlerde etkin olması bu farklılığı oluşturmuştur. Bu ise iki veri arasındaki korelasyonu düşüren bir etkidir. Hatzianastassiou vd. (2009) İstanbul için maksimum aerosol değerlerinin ilkbahar ve yaz mevsimlerinde minimum değerlerin ise kış mevsiminde olduğu belirtilmiştir. Bu bulgular bu çalışma ile uyum göstermektedir. Ayrıca, o çalışmada antropojenik etkinin göstergesi olarak kullanılan sülfat seviyeleri ile AOD mevsimsel değişimi arasında önemli korelasyon bulunduğu belirtilmiştir.

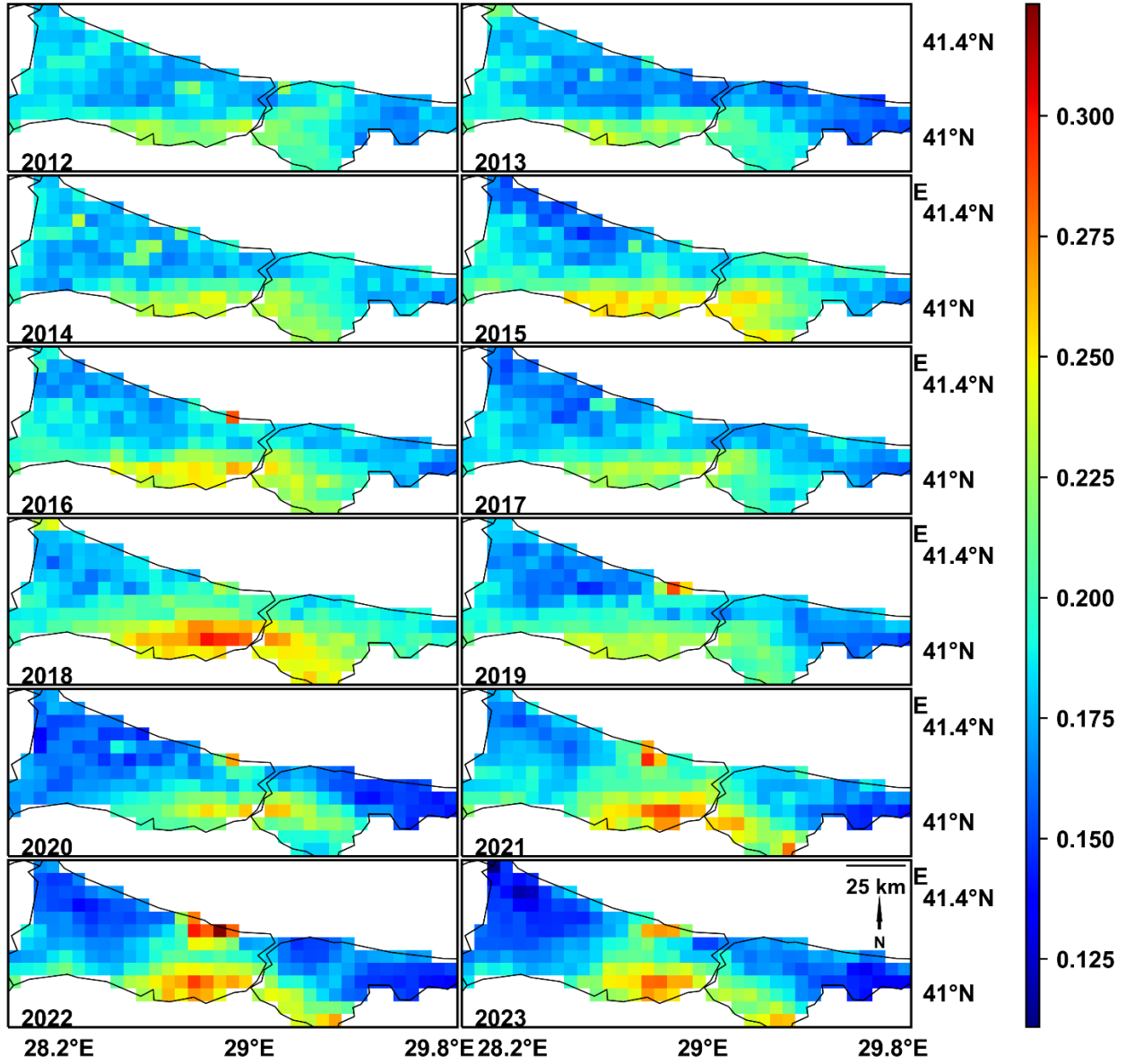


Şekil 5. İstanbul'un uzun dönem (2012-2023) mevsimlik ortalama AOD haritaları

Tablo 3. İstanbul'un uzun dönem (2012-2023) mevsimlik ortalama AOD istatistik değerleri

| Mevsimler | Minimum | Maksimum | Ortalama | Medyan | Standart sapma |
|-----------|---------|----------|----------|--------|----------------|
| Kış | 0,0909 | 0,1643 | 0,1158 | 0,1125 | 0,0146 |
| İlkbahar | 0,1840 | 0,2854 | 0,2210 | 0,2127 | 0,0236 |
| Yaz | 0,1762 | 0,2988 | 0,2207 | 0,2149 | 0,0278 |
| Sonbahar | 0,1315 | 0,2072 | 0,1557 | 0,1504 | 0,0180 |

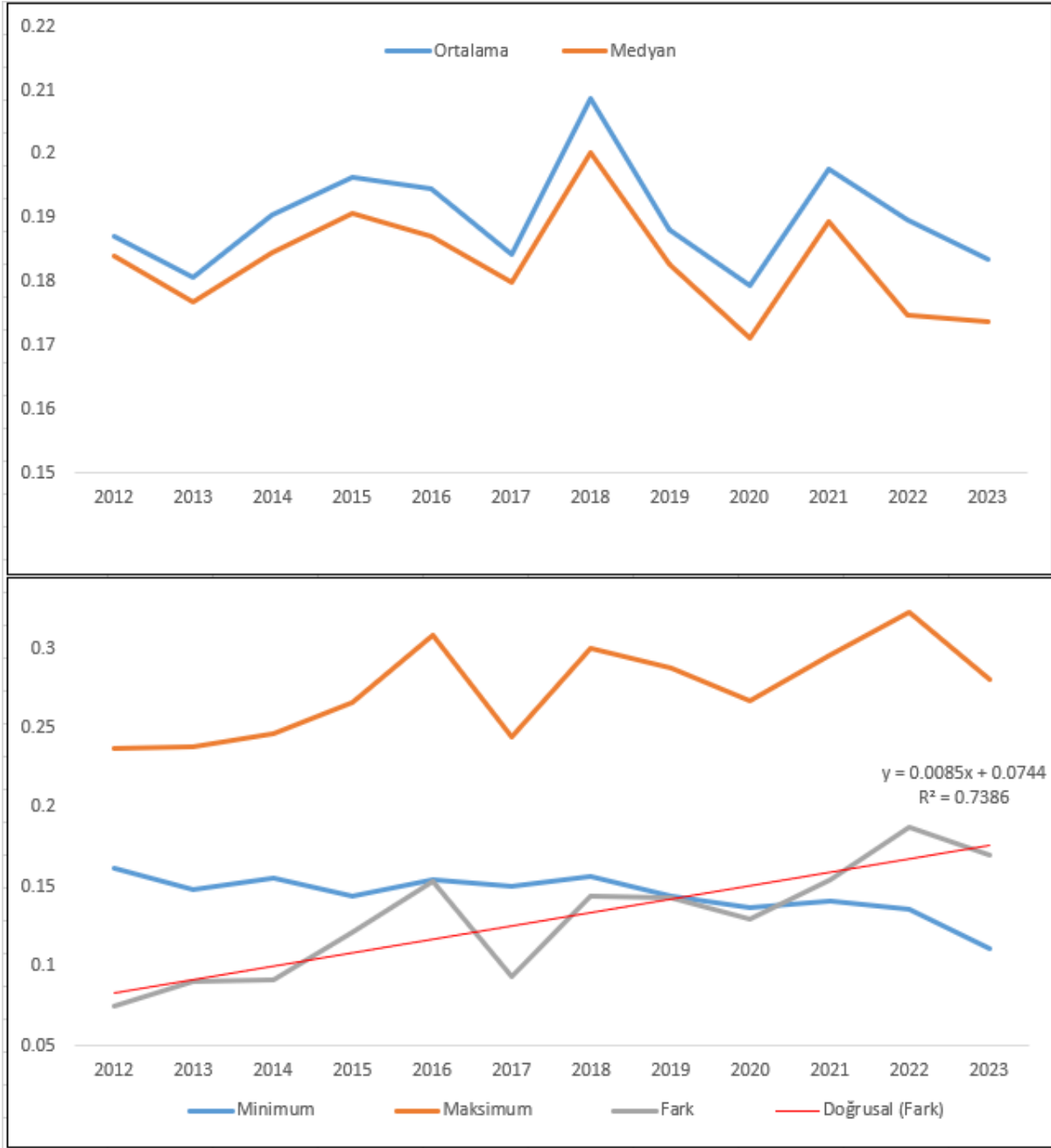
Şekil 6'da İstanbul için yıllık ortalama AOD haritaları verilmiştir. Bu haritaların istatistiksel değerleri de Tablo 4 ve Şekil 7'de verilmiştir. İstanbul kara yüzeyi için alansal aerosol dağılımı haritalardan açıkça görülebilir. Tablo 4 ve Şekil 7'den İstanbul için ortalama ve medyan AOD değerleri (üst panel) zamansal olarak yıllar içinde kararlı bir dağılım göstermiştir. Ancak 2018 yılında aerosol miktarının nispeten daha yüksek hesaplandığı görülmektedir. İstanbul kara yüzeyinde ortalama AOD 0,1794 (2020) ile 0,2086 (2018) aralığında değişmektedir. Medyan AOD değerleri de ortalama değerlere benzer değişim göstermektedir. Şekil 7'de İstanbul AOD değerlerinin minimum, maksimum ve bunların farkı (alt panel) incelendiğinde, maksimum değerleri artış eğilimi ve minimum değerler azalma eğilimi göstermiştir. Bu fark grafiğinden daha açık görülebilir. Bu grafiklere göre İstanbul AOD değerleri daha geniş bir değer aralığında değişim göstermektedir. Ayrıca yıllar içinde yüksek aerosol içeren alanların aerosol miktarı artarken düşük aerosol içeren bölgelerde de aerosol miktarının azaldığı anlaşılmaktadır.



Şekil 6. İstanbul'un yıllık ortalama AOD haritaları

Tablo 4. İstanbul'un yıllık ortalama AOD temel istatistik değerleri

| Yıllar | Minimum | Maksimum | Ortalama | Medyan | Standart sapma |
|--------|---------|----------|----------|--------|----------------|
| 2012 | 0,1618 | 0,2369 | 0,1872 | 0,1839 | 0,0157 |
| 2013 | 0,1479 | 0,2378 | 0,1807 | 0,1768 | 0,0183 |
| 2014 | 0,1556 | 0,2468 | 0,1905 | 0,1844 | 0,0196 |
| 2015 | 0,1445 | 0,2663 | 0,1964 | 0,1906 | 0,0279 |
| 2016 | 0,1549 | 0,3083 | 0,1946 | 0,1870 | 0,0260 |
| 2017 | 0,1508 | 0,2446 | 0,1842 | 0,1799 | 0,0194 |
| 2018 | 0,1562 | 0,3002 | 0,2086 | 0,2002 | 0,0306 |
| 2019 | 0,1442 | 0,2875 | 0,1881 | 0,1827 | 0,0229 |
| 2020 | 0,1373 | 0,2670 | 0,1794 | 0,1710 | 0,0281 |
| 2021 | 0,1409 | 0,2956 | 0,1977 | 0,1893 | 0,0325 |
| 2022 | 0,1359 | 0,3232 | 0,1897 | 0,1748 | 0,0388 |
| 2023 | 0,1109 | 0,2810 | 0,1835 | 0,1738 | 0,0365 |



Şekil 7. İstanbul'un yıllık ortalama AOD temel istatistik değerleri (Tablo 4 ile aynı)

4. Sonuçlar

Bu çalışmada uzaktan algılama verileriyle İstanbul ili için atmosferik aerosol özelliklerinin konumsal, zamansal ve spektral analizleri yapılmıştır. Bu kapsamda İstanbul'un AOD ve AE değerleri incelenmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlar önceki bölümde detaylı verilmiş ve bu bölümde de aşağıda özet bir listesi sunulmuştur.

- İstanbul ilinin yüksek AOD değerleri kentin Güneyinde Marmara Denizi kıyı şeritleri ve nüfus yoğunluğunun yüksek olduğu kıyıya yakın yerler ile Kuzeyde Sarıyer kıyıları ve nispeten Karadeniz'in kara ile buluştuğu kıyı kesimleridir. Düşük AOD değerleri ise Çatalca ve Şile (Güney batısı hariç) ilçeleri olarak hesaplanmıştır.
- Kara üzerinde ise kentin nüfus yoğunluğu ve bitki örtüsü ile ilintili bir AOD değişimi vardır. AOD kara üzerinde kentin nüfus yoğunluğu ile doğru orantılı, bitki örtüsü ile ters orantılıdır. Su üzerinde Marmara denizinde Karadeniz'den daha yüksek değerler görülmektedir.

- İstanbul ilinin yüksek AE değerleri batıda Tekirdağ – Silivri sınırına yakın alanlar, İstanbul boğazının çevresi ve doğuda İstanbul-Kocaeli sınırı çevresi olarak hesaplanmıştır. Düşük AE değerleri ise su yüzeyinde (Marmara ve Karadeniz) ve kıyı kesimlerinde görülmektedir.
- Spektral açıdan aerosol miktarı dalga boyu ile ters orantılı olup dalga boyu arttıkça aerosol tespitinin azaldığı görülmüştür.
- İstanbul aerosol değerleri zamansal olarak incelendiğinde yüksek AOD değerleri sırasıyla Mayıs, Haziran, Temmuz, Ağustos ve Nisan aylarında iken en düşük AOD değerleri sırasıyla Aralık, Ocak, Kasım ve Şubat aylarında hesaplanmıştır.
- İstanbul için Mayıs ayı aerosol miktarının en yüksek olduğu ay olup Haziran-Ağustos aylarında yüksek aerosol konsantrasyonu görülürken Eylül ve Ekim ayları aerosol miktarının düşüğe geçtiği ve Aralık ile Ocak ayları en küçük değerlerin hesaplandığı aylardır.
- Mevsimsel anlamda İstanbul için yüksek AOD değerleri ilkbahar ve yaz mevsimlerinde ve düşük AOD değerleri kış ve sonbahar mevsimlerinde görülmektedir.
- İstanbul için aerosol miktarı yıllar içinde kararlı bir dağılım göstermiştir. Ancak 2018 yılında aerosol miktarı nispeten daha yüksek hesaplanmıştır.
- İstanbul maksimum AOD değerleri artış eğilimi ve minimum değerler azalma eğilimi göstermiştir. Böylece İstanbul AOD değerleri daha geniş bir değer aralığında değişim göstermiştir.

Teşekkür

Bu çalışma Atatürk Üniversitesi Astrofizik Araştırma ve Uygulama Merkezi (ATASAM), Doğu Anadolu Gözlemevi (DAG) Projesi (Proje No: 2011K120230) ve Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Kurumu (TÜBİTAK) 2218 Programı (Proje No: 118C467) kapsamında desteklenmiştir. ATASAM, DAG ve TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- Allen, R. G. D. (1964). Sampling for current economic statistics. *Journal of the Royal Statistical Society Series A (General)*, 127(1), 76-88.
- Coşkun, M., Şahiner, H., & Canbulat, O. (2022). Covid 19 Sürecinde Coğrafi Özellikler ve Atmosfer Kararlılığına Göre Karabük İl Merkezi ve Zonguldak'ın Ereğli İlçesinde Aerosol Optik Derinlik Analizi. *International Journal of Geography and Geography Education*, 45, 380-403.
- Cryer, J. D. & Chan, K. S. (2008). *Time Series Analysis: With Applications in R*. Springer.
- Çetin, B., Ozturk, F., Keles, M., & Yurdakul, S. (2017). PAHs and PCBs in an Eastern Mediterranean megacity, Istanbul: Their spatial and temporal distributions, air-soil exchange and toxicological effects. *Environmental Pollution*, 220, 1322-1332. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.11.002>
- Güllü, G., Ulutaş, F., Belli, D., Erduran, S., Keskin, S., & Tuncel, G. (1998). The Black Sea aerosol a long range atmospheric transport. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 22(4), 289-303.
- Gündoğdu, S., Tuygun, G. T., Li, Z., Wei, J., & Elbir, T. (2022). Estimating daily PM_{2.5} concentrations using an extreme gradient boosting model based on VIIRS aerosol products over southeastern Europe. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 15(12), 2185-2198.
- Hatzianastassiou, N., Gkikas, A., Mihalopoulos, N., Torres, O., & Katsoulis, B. D. (2009). Natural versus anthropogenic aerosols in the eastern Mediterranean basin derived from multiyear TOMS and MODIS satellite data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D24), Article D24202. <https://doi.org/10.1029/2009JD011982>
- Hinds, W. C. (1999). *Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles* (1st Edition). John Wiley & Sons.
- Jensen, J. R. (1996). *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective* (Second Edition). Prentice Hall.
- Kabataş, B., Unal, A., Pierce, R. B., Kindap, T., & Pozzoli, L. (2014). The contribution of Saharan dust in PM₁₀ concentration levels in Anatolian Peninsula of Turkey. *Science of the Total Environment*, 488, 413-421.
- Karaca, F., Alagha, O., & Erturk, F. (2010). Atmospheric lead concentrations near roadways in a suburban part of Istanbul. *International Journal of Environment and Pollution*, 41(1-2), 38-50. <https://doi.org/10.1504/IJEP.2010.032244>
- Karslıoğlu, S., Tezcan, E., Tuygun, G. T., & Elbir, T. (2022). Türkiye'de Terra ve Aqua MODIS uydularından elde edilen aerosol optik derinliğinin zamansal ve mekansal değişimi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 24(70), 303-316.
- Kong, L., Xin, J., Zhang, W., & Wang, Y. (2016). The empirical correlations between PM_{2.5}, PM₁₀ and AOD in the Beijing metropolitan region and the PM_{2.5}, PM₁₀ distributions retrieved by MODIS. *Environmental pollution*, 216, 350-360. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.05.085>

- LAADS DAAC. (2024). *AERDB_L2_VIIRS_SNPP - VIIRS/SNPP Deep Blue Aerosol L2 6-Min Swath 6 km*. 23 Mayıs 2024'te https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/missions-and-measurements/products/AERDB_L2_VIIRS_SNPP adresinden alındı.
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (2023). *Araştırma Raporu: Türkiye ve Çevresi Aerosol (Toz Taşınımı) Analizleri 2003-2022*. 20 Mayıs 2024'de https://mgm.gov.tr/FILES/genel/raporlar/BatiAsya_2003_2022_TOZ_Degerlendirme_20230202.pdf adresinden alındı.
- Okumuş, D. E., & Terzi, F. (2021). Evaluating the role of urban fabric on surface urban heat island: The case of Istanbul. *Sustainable Cities and Society*, 73, Article 103128. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103128>
- Özkan, S. (2021). Sahra ve Ortadoğu Kaynaklı Çöl Tozlarının Türkiye'deki Ekosistemlere Etkisi. *Avrasya Uluslararası Araştırmalar Dergisi*, 9(28), 413-426.
- Ramachandra, T. V., & Kumar, U. (2004, September 12-14). *Geographic Resources Decision Support System for land use, land cover dynamics analysis* [Conference presentation]. FOSS/GRASS Users Conference, Bangkok, Thailand.
- Sarıyılmaz, F. B. (2012). *Zaman Serileri ile Değişim Analizi: İstanbul Sarıyer Örneği* [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/>
- Sayer, A. M., Hsu, N. C., Lee, J., Bettenhausen, C., Kim, W. V., & Smirnov, A. J. J. O. G. R. A. (2018). Satellite Ocean Aerosol Retrieval (SOAR) algorithm extension to S-NPP VIIRS as part of the "Deep Blue" aerosol project. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(1), 380-400.
- STAR Calibration Center. (2023). 23 Mayıs 2024'te <https://ncc.nesdis.noaa.gov/VIIRS/> adresinden alındı.
- Tezcan, E., Karslıoğlu, S., Tuygun, G. T., & Elbir, T. (2022). Türkiye ve Yakın Çevresinde Güneş Fotometreleri ile Elde Edilen Aerosol Optik Derinliği Verisinin Zamansal ve Mekansal Değişimi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 10(3), 1241-1254.
- Tomasi, C., & Lupi, A. (2017). Primary and secondary sources of atmospheric aerosol. In C. Tomasi, S. Fuzzi & A. Kokhanovsky (Eds.), *Atmospheric Aerosols: Life Cycles and Effects on Air Quality and Climate* (pp. 1-86). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9783527336449.ch1>
- Tuygun, G. T., & Elbir, T. (2020). Long-term temporal analysis of the columnar and surface aerosol relationship with planetary boundary layer height at a southern coastal site of Turkey. *Atmospheric Pollution Research*, 11(12), 2259-2269.
- Tuygun, G. T., Ozdemir, E., & Elbir, T. (2020). Evaluation of MODIS C6 and C6. 1 Dark Target AOD products over Turkey based on NDVI and aerosol type. *Atmospheric Pollution Research*, 11(12), 2335-2349.
- Tuygun, G. T., & Elbir, T. (2023). Estimation of particulate matter concentrations in Türkiye using a random forest model based on satellite AOD retrievals. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 37(9), 3469-3491.
- Ünal, Y. S., Toros, H., Deniz, A., & Incecik, S. (2011). Influence of meteorological factors and emission sources on spatial and temporal variations of PM10 concentrations in Istanbul metropolitan area. *Atmospheric Environment*, 45(31), 5504-5513. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.06.039>
- Zeydan, Ö., & Wang, Y. (2019). Using MODIS derived aerosol optical depth to estimate ground-level PM2. 5 concentrations over Turkey. *Atmospheric Pollution Research*, 10(5), 1565-1576.
- Zeydan, Ö., Tariq, S., Qayyum, F., Mehmood, U., & Ul-Haq, Z. (2023). Investigating the long-term trends in aerosol optical depth and its association with meteorological parameters and enhanced vegetation index over Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(8), 20337-20356.