



## Uydulardan Elde Edilebilen Aerosol Optik Derinlik Verilerini Kullanarak Zemin Seviyesi İnce Partikül Konsantrasyonlarını Tahmin Etmek İçin Doğrusal Olmayan Bir Model Geliştirilmesi

Talha Kemal Koçak<sup>1\*</sup>, Farshad Ebrahimi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı, Batman Bölge Müdürlüğü, Çevre Koruma Şefliği, Batman, Türkiye

<sup>2</sup> Çevre Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Temple Üniversitesi, Philadelphia, Pa, ABD

E-Posta: [tkkocak@tpao.gov.tr](mailto:tkkocak@tpao.gov.tr), [farshad.ebrahimi@temple.edu](mailto:farshad.ebrahimi@temple.edu)

**Gönderim 19.03.2020; Kabul 20.08.2020**

**Özet:** İnce partiküllerin (PM<sub>2.5</sub>) kardiyovasküler mortalite ve morbidite ile ilişkili olduğu gösterilmiştir. Bu nedenle, halk sağlığını korumak ve düzenleyici kurumların taleplerini karşılamak için PM<sub>2.5</sub> konsantrasyonunun izlenmesi gerekmektedir. Bununla birlikte, hakkında kapsamlı veri elde etmek için bu kadar büyük gözlem ağlarının korunması oldukça maliyetlidir (özellikle de daha az ayrıcalıklı topluluklar için). Uyduların ortaya çıkışı, belirli bir zaman periyodunda herhangi bir yerde veri toplamak için daha ucuz yollar açmış ve bu da hava kalitesi izleme çalışmaları için yeni fırsatlar doğurmuştur. Bu çalışmada uydulardan elde edilebilen aerosol optik derinlik (AOD) verisini ve rüzgar ile sıcaklık gibi meteorolojik parametreleri PM<sub>2.5</sub> ile ilişkilendiren doğrusal olmayan bir model geliştirdik. Çalışma bir aylık (Kasım 2016) zaman dilimini kapsamaktadır ve çalışma alanı Hillsborough Vilayeti'dir (Florida). Modelin R kare değeri 0,53 olarak bulundu ve üç parametrenin (rüzgar, sıcaklık ve AOD) model sonuçlarını iyileştirdiği görüldü. Beklenildiği gibi AOD için regresyon katsayısı pozitif ve rüzgar için ise negatifti. Ancak, sıcaklık için regresyon katsayısı negatifti. Bunun sebebi numunenin azlığından veya sıcaklığın, PM<sub>2.5</sub>'daki sülfat içeriğinin organik karbona oranını artırmasından olabilir. Bu çalışma ampirik modellerin kalitesini değerlendirmek ve uydu verilerinin ne ölçüde güvenilir sonuçlar verebileceğini belirlemek için yapılan uygulamalara bir örnek oluşturmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Aerosol Optik Derinlik, Hava Kalitesi, İnce Partiküller

## Developing A Nonlinear Model to Estimate Ground Level Fine Particle Concentrations Using Aerosol Optical Depth (AOD) Data, Which Can Be Obtained Through Satellites

**Received 19.03.2020; Accepted 20.08.2020**

**Abstract:** Fine particles (PM<sub>2.5</sub>) are shown to be associated with cardiovascular mortality and morbidity. Therefore, there is a need to monitor PM<sub>2.5</sub> concentrations to protect public health as well as to meet the demands of regulatory agencies. However, maintaining such big observational networks to achieve comprehensive data on PM<sub>2.5</sub> is very costly, especially for the less-privileged communities. The emergence of satellites has opened cheaper ways to gather data in any place over several years and this, in turn, has opened new ways of air quality monitoring. In the current study, we developed a non-linear model that correlates aerosol optical depth (AOD) data (obtained from a satellite) and meteorological parameters (wind and temperature) to PM<sub>2.5</sub>. The study was conducted for one month (November 2016) in Hillsborough County, Florida. The R-squared of the model was 0.53. All three parameters (wind, temperature, and AOD) were found to improve model results. The regression coefficient for the AOD was positive while it was negative for the wind as expected. However, the regression coefficient for the temperature was negative. It could be due to the small size of the sample or the fact that temperature increases the ratio of the sulfate content to the organic carbon of PM<sub>2.5</sub>. This study is an example of applications to evaluate the quality of empirical models and to determine to what extent satellite data can yield reliable results.

**Key Words:** Aerosol Optical Depth, Air Quality, Fine Particles

## GİRİŞ

İnce partikül maddeye (PM<sub>2.5</sub>) maruz kalma ile astım ve kardiyopulmoner hastalıklar gibi sağlık sorunlarının arasında güçlü bir ilişki olabileceği tespit edilmiştir <sup>[1]</sup>. Çapları 2.5 mikrondan küçük bu parçacıklar akciğerlere derinlemesine seyahat edebilir ve burun, göz ve akciğer tahrişi gibi kısa süreli etkilere neden olabilir <sup>[2]</sup>. Bu sağlık sorunlarına ek olarak, PM<sub>2.5</sub>'in bulut özelliklerini etkilemek, dünya-atmosfer sisteminin radyasyon bütçesini değiştirmek ve atmosferik dolaşım düzenlerini etkilemek gibi çevre üzerinde olumsuz etkileri de bulunmaktadır <sup>[3]</sup>. Bu sebeplerden dolayı, atmosferdeki PM<sub>2.5</sub> konsantrasyonunu sürekli olarak izlemeye ihtiyaç vardır. Ancak Amerika Birleşik Devletleri (ABD)

\*İlgili E-posta/Corresponding E-mail: [tkkocak@tpao.gov.tr](mailto:tkkocak@tpao.gov.tr)

Çevre Koruma Ajansı (EPA) tarafından ABD genelinde kurulmuş ve yerel hava kirliliği kontrol ajansları tarafından işletilen bir izleme ağı olmasına rağmen, birçok kırsal ve banliyö bölgesi bu oldukça büyük izleme ağı tarafından kapsamaz. Yeterli izleme istasyonu bulunmadığından, EPA hava kalitesi izleme istasyonuna bitişik bölgelere genellikle ortalama bir kirlilik konsantrasyonu atar. Ancak PM<sub>2.5</sub> verilerinin ortalaması, halk sağlığı ve çevre koruma çalışmalarının doğruluğunu olumsuz yönde etkilemekte ve araştırma sonuçlarında bir belirsizlik oluşturmaktadır.

Son birkaç sene içerisinde, uydu verileri hem daha önemli bir hale geldi, hem de çevre yönetimi ile ilgili karar verme süreçlerinde kullanımları geniş alanlara yayıldı <sup>[4]</sup>. Uydu verilerinin ana kullanım alanlarından birisi hava kirliliği seviyesini geniş bir zaman ve mekan ölçeğinde belirleyebilmesidir. Küresel ulaşılabilirliğin kolay olmasının yanı sıra, uydu verilerini toplamak yüksek miktarda finansal kaynak ve insan gücü gerektiren geleneksel izleme istasyonlarından veri toplamaktan daha ucuza gelmektedir.

Hava kalitesi değerlendirme çalışmalarında kullanılmak üzere bol miktarda nitrojen dioksit (NO<sub>2</sub>), sülfür dioksit (SO<sub>2</sub>), amonyak (NH<sub>3</sub>), karbon monoksit (CO), bazı uçucu organik bileşikler (UOB) ve aerosol optik derinlik (aerosol optical depth – AOD) uydu verileri bulunmaktadır <sup>[4]</sup>. AOD kısaca elektromanyetik enerjinin belirli dalga boylarında aerosollar sebebi ile azalması olarak tanımlanabilir. Uydular partikül maddeleri (PM<sub>2.5</sub> ve PM<sub>10</sub>) direk olarak ölçemese de, literatürde bazı çalışmalar AOD'yi partikül maddelere çeviren modeller geliştirmişlerdir.

Bu çalışmanın amacı Liu ve arkadaşları <sup>[5]</sup> tarafından geliştirilen modelin sadeleştirilmiş bir versiyonunu kullanarak Hillsborough Vilayeti (Florida) için uydudan elde edilen AOD verisi ile ABD çevre koruma ajansı hava kalitesi izleme istasyonundan alınan PM<sub>2.5</sub> yüzey seviyesi konsantrasyonu arasında bir ilişkilendirme yapmaktır. Geliştirilen model sıcaklık, rüzgâr ve AOD verilerini girdi olarak almakta ve yüzey seviyesi PM<sub>2.5</sub> konsantrasyonunu tahmin etmektedir. Bu çalışmanın ikincil amacı da sıcaklık ve rüzgâr verilerinin modelin güvenilirliğine etkilerini irdelemektir. Bu amaçlara ulaşmak için materyal ve metodu açıklamadan önce uydular vasıtasıyla uzaktan algılama teknolojisinin kullanımının ve bu teknolojinin partikül maddeler üzerindeki uygulamalarının literatürdeki yerine kısaca bakmak gerekmektedir.

## UZAKTAN ALGILAMA TEKNİĞİ VE BU TEKNİĞİN PARTİKÜL MADDELER ÜZERİNDE KULLANIMI

### *Uzaktan Algılama*

Uzaktan algılama bir objenin yaydığı elektromanyetik enerjiyi analiz ederek o obje hakkında bilgi elde etme tekniğidir. Bu teknik sayesinde uygun bir yaklaşım geliştirilerek sahip olunan veri ile yer seviyesindeki ölçümler arasında ilişki kurulabilir <sup>[6]</sup>. Uzaktan algılama tekniğinin hava kalitesi yönetimi <sup>[7]</sup>, su kirliliği tespiti <sup>[8]</sup>, su kaynakları yönetimi <sup>[9]</sup>, katı atık yönetimi <sup>[10]</sup> ve iklim değişikliği incelemeleri <sup>[11]</sup> gibi çeşitli çevre bilimi alanlarında kullanımı mevcuttur.

Uydulardan elde edilen uzaktan algılama verileri hava kirliliği haritalandırmasında önemli ve oldukça ekonomik bir araç olarak kullanılmaktadır <sup>[12]</sup>. Aerosollar, troposferik ozon (O<sub>3</sub>), troposferik nitrojen dioksit (NO<sub>2</sub>), sülfür dioksit (SO<sub>2</sub>), karbon monoksit (CO) ve formaldehitler (HCHO) gibi hava kirleticileri uyduların yardımı ile izlenebilmektedir <sup>[13]</sup>. Aerosolları tahmin etmek için en yaygın olarak kullanılan veri tipi ise Aerosol Optik Derinlik (AOD) verisidir. Bu çalışmada da PM<sub>2.5</sub> yüzey seviyesi konsantrasyonunu tahmin etmek için AOD verisi kullanılmıştır.

### *Aerosol Optik Derinlik ve Onun Partikül Madde ile Korelasyonu*

Aerosol Optik Derinlik veya kısaca AOD (Aerosol Optik Kalınlık olarak ta bilinir) terimi, dağılım ve absorpsiyon sebebiyle atmosferik aerosollerin ışık iletimini engellemesini ifade eder. AOD aerosol kütle konsantrasyonunun, kütle yıkım veriminin ve higroskopik büyüme faktörünün (bağıl nem ve aerosollerin dikey dağılımı tarafından belirlenen etkili ölçek yüksekliğinin bir ifadesi) bir fonksiyonudur <sup>[7]</sup>. AOD 0 ile 1 arasında değer alabilen birimsiz bir parametredir. Bu değerler atmosferin dikey kolonlarında bulunan partiküllerin miktarı ile ilişkilidir. Sıfıra yaklaşan bir AOD değeri partikül bakımından temiz bir atmosferi gösterir.

Bazı çalışmalar, AOD' nin farklı araçlar kullanılarak partikül madde konsantrasyonunu tahmin etmek için kullanılabileceğini göstermiştir. Wang ve Christopher <sup>[7]</sup> saatlik PM<sub>2.5</sub> konsantrasyonu ile AOD verileri arasında güçlü bir korelasyon (korelasyon katsayısı r=7) bulmuşlardı, ancak aylık ortalama

PM<sub>2.5</sub> konsantrasyonu ve AOD arasındaki tekabül ( $r>9$ ) daha da iyi idi. Arazi kullanım regresyonu ve meteorolojik değişkenlerle birleştirilmiş PM<sub>2.5</sub> ölçüm değerleri de AOD verileri ile doğrusal olarak ilişkilendirilmiş ve sonuçlar her gün için en az % 81 R kare ( $R^2$ ) değeri göstermiştir [14]. Yakın zamanda yapılan bir halk sağlığı çalışmasında, AOD verileri PM<sub>2.5</sub> kirliliği ile akciğer kanseri riski arasındaki ilişkiyi araştırmak için PM<sub>2.5</sub>'in bir vekili olarak kullanılmıştır [15]. Başka bir çalışmada da AOD ve PM<sub>2.5</sub> arasındaki ilişkiyi araştırmak için yeni bir model geliştirilmiş ve güçlü bir korelasyon bulunmuştur [16]. Chu ve arkadaşları [17] ise İtalya'daki bir bölgede MODIS AOD ve PM<sub>2.5</sub> arasında doğrusal bir ilişki ( $r = 0.82$ ) bulmuşlardır. AOD sadece ince partikül madde konsantrasyonunu tahmin etmek için değerli bir veri kaynağı değil, aynı zamanda kaba partikül madde (PM<sub>10</sub>) konsantrasyonu tahmini için de iyi bir veri kaynağıdır. Bir çalışmada, İngiltere, Fransa ve Belçika üzerindeki toplam 80 hava kalitesi ölçüm istasyonundan PM<sub>10</sub> konsantrasyonları, SeaWiFS uydusundan alınan AOD verileri ile karşılaştırılmıştır [18]. Çalışmadaki istatistiksel modeller rüzgar hızı, atmosfer basıncı, bağıl nem, yağış miktarı ve zaman parametrelerini içermektedir. PM<sub>10</sub> konsantrasyonu için çalışmalarında kullandıkları model tahminleri ve ölçümler arasındaki  $R^2$  değeri 0.43'tü.

Sıcaklık, bağıl nem ve gezegensel sınır tabakası gibi meteorolojik koşullar PM<sub>2.5</sub> konsantrasyonunu önemli ölçüde etkiler. PM<sub>2.5</sub> konsantrasyonunu etkileyen diğer süreçler rüzgar, dağılım, fotokimyasal reaksiyonlar için gerekli güneş ışığının mevcudiyetinde değişiklik, sıcaklık gradyanı, mevcut nem ve atmosferik sınır tabakasında kirliliğin seyreltilmesi ile taşınmasıdır [19]. Çoğu yaklaşım, AOD ile PM<sub>2.5</sub> arasında korelasyon sağlamak için sadece basit lineer regresyon gibi istatistiksel yaklaşımlar kullanırken, Liu ve arkadaşları [5], AOD ve PM<sub>2.5</sub> arasındaki korelasyonun meteorolojik koşullardan önemli ölçüde etkilendiğini ve dolayısıyla bu ilişkiyi incelerken meteorolojik parametrelerinde dikkate edilmesi gerektiğini göstermişlerdir.

### ***Orta Çözünürlüklü Görüntüleme Spektrometresi (The Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer – MODIS)***

NASA (Ulusal Havacılık ve Uzay İdaresi) tarafından yörüngeye yerleştirilen Terra ve Aqua uyduları dünyayı küresel ölçekte izleyebilir. Her iki uydu da atmosferik verileri toplamak için geniş spektral aralığa sahip bir sensör olarak "Orta çözünürlüklü Görüntüleme Spektrometresine (MODIS)" sahiptir [20]. AOD verileri Terra ve Aqua uydularında MODIS tarafından toplanır.

MODIS ilk olarak 1999'da Terra ile yeryüzünün görüntülerini elde etmeye başladı [21]. Okyanus ve atmosfer çalışmaları [21, 22] dışında, kuraklık [23], toprak nemi [24], vejetasyon [25] ve tarım [26] araştırmaları için de kullanılmıştır.

2.330 km genişliğinde tarama yapabilen bir şerit ile Modis modülü, 36 farklı spektral bandın yardımıyla dünyadaki hemen hemen her noktayı 1 günde görüntüleyebilir [27]. Terra MODIS'in ilk 20 bandı 0,3 - 4,0  $\mu\text{m}$  (mavi - orta kızılötesi) aralığında ve son 16 bandı ise 3,0 - 14,0  $\mu\text{m}$  (termal - kızılötesi) aralığında çalışır. Terra MODIS platformu optik aerosol derinlik, su buharı, sis, bulut maskesi, yüzey albedo, ekosistem sınıflandırması ve okyanusların yüzeyleri ile ilgili uzaktan algılama verileri sağlayabilir [28]. Bu sebeplerde dolayı da hava kalitesi izleme çalışmalarında birçok yöntemle göre daha pratik ve ekonomiktir.

### **MATERYAL ve METOT**

#### ***Model Yaklaşımı***

AOD, PM<sub>2.5</sub> ile meteorolojik parametreler arasındaki korelasyon eşitlik 1 ile ifade edilebilir [5]:

$$[PM_{2.5}] = e^{x_0+x_1(TEMP)+x_2(DIR)+x_3(NONSPRING)} * WIND^{x_4} * PBL^{x_5} * AOD^{x_6+x_7*NONSPRING} \quad (\text{Eşitlik 1})$$

[PM<sub>2.5</sub>], çevre koruma ajansı (EPA) izleme istasyonlarında ölçülen 24 saatlik konsantrasyonu temsil eder. TEMP yüzey hava sıcaklığı, WIND yüzey rüzgar hızı, PBL karıştırma yüksekliği ve AOD MODIS uydusundan alınan AOD verisidir. NONSPRING ilkbahar için 1, diğer mevsimler için 0 değerini alan bir sabit iken ve DIR rüzgar yönünü ifade eder. AOD, PBL ve rüzgar parametrelerinin güç yasası formları olduğu varsayılır. Bunun nedeni, bu parametrelerin PM<sub>2.5</sub> ile doğrusal olmayan ilişkisidir. Bu çalışmada, bahar mevsiminde sadece yüzey hava sıcaklığı ve yüzey rüzgar hızının AOD

ve PM<sub>2.5</sub> arasındaki korelasyon üzerindeki etkisi ele alınmıştır. Bu nedenle, modelimiz sadeleştirilerek aşağıdaki gibi olur:

$$[PM_{2.5}] = e^{x_0 + x_1(TEMP)} * WIND^{x_2} * AOD^{x_3} \quad (\text{Eşitlik 2})$$

Eşitlik 2'nin katsayılarını hesaplamak için, Matlab'da bir veri matrisi geliştirilmiştir. Doğrusal bir regresyon yaklaşımını kullanmak için eşitlik 2'nin doğal logaritma formunun alınması gereklidir:

$$\ln([PM_{2.5}]) = x_0 + x_1 * Temp + x_2 * \ln(Wind) + x_3 * \ln(AOD) \quad (\text{Eşitlik 3})$$

Eşitlik 3'ü her gün için yazarsak, 30 denklem ve 4 bilinmeyenimiz olacaktır. Bu durumda üstbelirlenimin (overdetermined) söz konusu olduğu doğrusal denklemler sistemi elde edilmiştir.

Bunlara ek olarak PM<sub>2.5</sub> ve AOD verileri basit lineer bir denklem geliştirmek için de kullanılmıştır:

$$PM_{2.5} = a * AOD + b \quad (\text{Eşitlik 4})$$

Eşitlik 3'te olduğu gibi, eşitlik 4 için de 30 denklem geliştirilmiştir. Eşitlik 3 ve 4'te elde edilen yaklaşımlar sırasıyla model 1 ve model 2 olarak değerlendirilmektedir.

### Model Detayları

Model 1 yaklaşımı için kullanılan Eşitlik 3'te görüldüğü gibi PM<sub>2.5</sub> konsantrasyonunu tahmin etmek için sadece AOD verileri değil sıcaklık ve rüzgâr hızı verileri de kullanılmıştır. Bu yüzden 30 günü kapsayan çalışma süresinin her bir günü için ölçüm istasyonlarından ve uydudan elde edilen farklı birer PM<sub>2.5</sub>, AOD, sıcaklık ve rüzgâr hızı bulunmaktadır. Her bir gün için Eşitlik 3 yazılarak toplamda 30 adet denklem elde edilmiştir. Bu denklemler arasındaki en uyumlu fonksiyonu belirlemek için ise denklemdeki katsayıların (X<sub>0</sub>, X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub> ve X<sub>3</sub>) belirlenmesi gereklidir. Bu katsayılar ise “en küçük kare yöntemi” ile Matlab üzerinden hesaplanmıştır. Daha sonra ise Eşitlik 3'ün sağ tarafına, elde edilen katsayılar ile uydu ve istasyonlardan alınan AOD, sıcaklık ve rüzgâr hızı verileri yazılarak her bir gün için (toplamda 30 gün olmak üzere) birer PM<sub>2.5</sub> konsantrasyon tahmini yapılmıştır.

Model 2'de ise sıcaklık ve rüzgâr hızı gibi hiçbir parametrenin etkisiz bakılmaksızın sadece AOD ve PM<sub>2.5</sub> verilerinin birbiri ile doğrusal ilişkisi irdelenmiştir. Eşitlik-4 her gün için yazılarak doğrusal regresyon yöntemi ile a ve b katsayıları hesaplanmıştır. Model-1'de olduğu gibi katsayılar hesaplanırken AOD ve PM<sub>2.5</sub> için uydu ve istasyon verileri kullanılmıştır. Ancak katsayılar elde edildikten sonra uydudan alınan AOD verileri ve katsayılar denklemlerde yerine koyularak her bir gün için birer PM<sub>2.5</sub> konsantrasyon tahmini yapılmıştır.

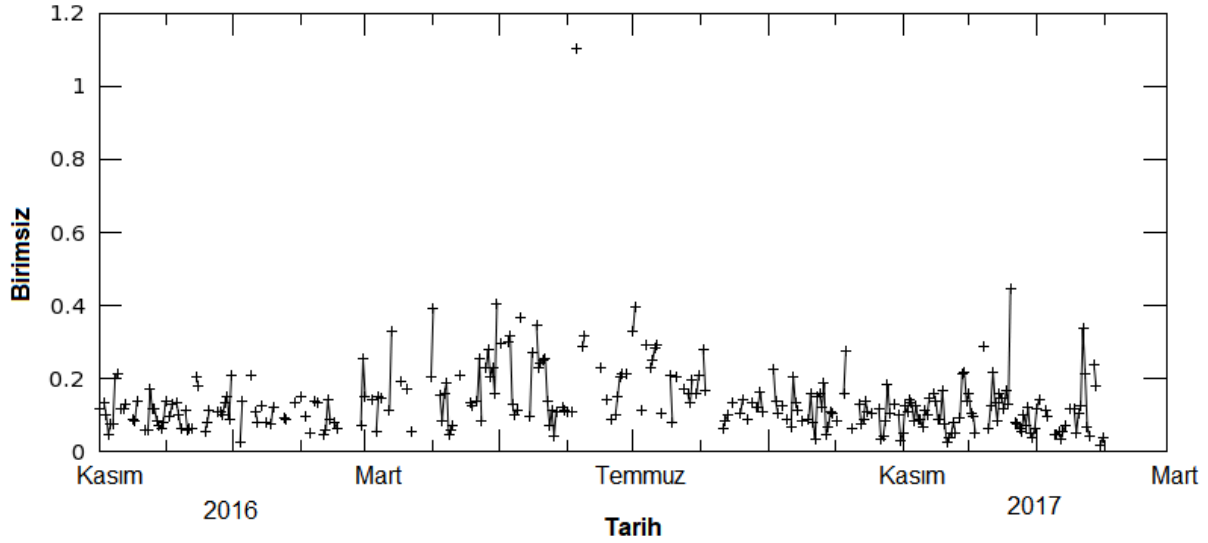
### Veri Toplama

Çalışmada, seviye-3 MODIS aerosol optik derinlik (AOD) verilerinin (10 km uzamsal çözünürlük) toplanmasıyla elde edilen MODIS seviye-3 AOD verileri, 1°×1° çözünürlüğe sahip düzenli bir grid sistemi üzerinde kullanıldı [29]. MODIS seviye-3, verileri günlük, aylık ve 8 günlük olmak üzere üç zamansal düzeyde sağlar. Hillsborough Vilayetin 'deki iki çevre koruma ajansı (EPA) PM<sub>2.5</sub> izleme istasyonunu kapsayan konum için günlük AOD verisi kullanıldı. Bir ay için günlük AOD verileri 11.01.2016 ile 11.30.2016 tarihleri arasında değişmektedir. Çalışmada Ulusal Havacılık ve Uzay İdaresi (NASA) tarafından sağlanan Giovanni, TERRA MODIS'ten AOD verilerini elde etmek için kullanıldı [30]. Giovanni uygulaması, kullanıcılara AOD, bulut sürtünmesi, angstrom üssü ve atmosferik nem gibi Seviye 3 uydu ürünlerinin görüntülenmesini ve analizini sağlayan bir web arayüzüdür.

Bu çalışmada kullanılan AOD verileri TERRA MODIS uydusu veri tabanından elde edildi. Giovanni arayüzünde, belirli bir konumdaki seçilen bir parametrenin ortalama konsantrasyonunu yansıttığı için, veriler “alan ortalama zaman serisi” olarak çıkarıldı. Bu çalışmada değerlendirilecek bir değişken olarak 550 nm aerosol optik derinliğinin alan ortalaması [29, 31] seçilmiştir. Bu değişken, görünür ve kısa dalga kızılötesi spektrum bölümlerinde düşük yüzey yansıtma seviyelerine sahip bulut dışı aerosol özelliklerini tahmin etmek için tasarlanmıştır [31].

Giovanni aracıyla Hillsborough Vilayetin' de bir yıldan fazla günlük AOD ortalaması için bir çizim oluşturuldu (şekil 1). Y eksenini AOD değerlerini (birimsiz) ve X eksenini zamanı (gün) göstermektedir.

Seçilen periyotta (2015-11-01 ve 2017-01-31 arasında) çok sayıda eksik AOD verisi vardı. Bununla birlikte, Kasım 2016'da her gün için AOD değerleri mevcut olduğundan modeli geliştirmek için bu zaman dilimi kullanıldı.



**Şekil 1.** Tarihe karşı 550 nm'lik (Karanlık Hedef) Alan-Aerosol Optik Derinlik verileri (2015-11-01 ve 2017-01-31, Hillsborough Vilayeti)

24 saatlik ortalama  $PM_{2.5}$  konsantrasyonları ( $\mu g/m^3$ ) Çevre Koruma Ajansının (EPA) hava kalitesi veri sistemi olan “Mart'tan (AQS Data Mart)” elde edilmiştir. Çalışmada 2016 yılı için FRM / FEM (Federal Referans Metodu / Federal Eşdeğer Metodu) birikiminin  $PM_{2.5}$  günlük özet verileri kullanıldı<sup>[32]</sup>. Hillsborough Vilayetin’ de  $PM_{2.5}$  konsantrasyonlarını ölçen iki izleme sitesi vardır, bu nedenle her bir siteden günlük konsantrasyonların aritmetik ortalaması alındı ve her gün için ortalama bir değer belirlendi. Benzer şekilde rüzgar hızı (knot) ve sıcaklık (Fahrenheit) verileri AQS Data Mart'tan alındı.

Her iki izleme istasyonundan da sadece birer gün  $PM_{2.5}$  verisinde kayıp vardı. İzleme istasyonu 1'de 11/15/2016 ve izleme istasyonu 2'de 11/30/2016 için hiçbir değer bulunmamaktadır. Bu günler için yalnızca bir istasyonun verileri mevcut olduğundan, ortalamayı temsil etmesi için mevcut değer seçildi. Böylece ayın her günü için bir  $PM_{2.5}$  konsantrasyon değeri elde edilmiş oldu.

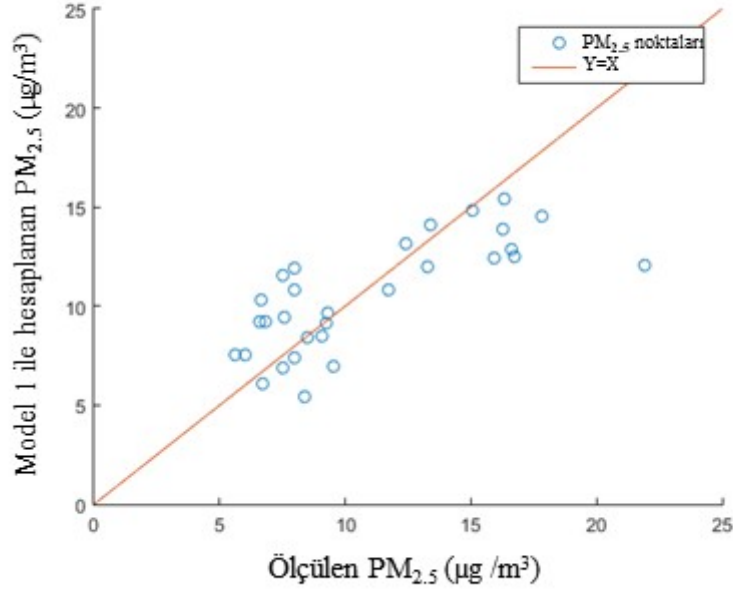
#### ARAŞTIRMA SONUÇLARI ve TARTIŞMA

Eşitlik 3'ün katsayıları doğrusal bir regresyon yaklaşımı kullanılarak hesaplanmış ve şu şekilde bulunmuştur:  $X_0 = 5,247$ ,  $X_1 = -0,038$ ,  $X_2 = -0,535$  ve  $X_3 = 0,277$ . Rüzgarın regresyon katsayısının negatif işareti, yüksek rüzgar hızında modelimizin daha düşük  $PM_{2.5}$  konsantrasyonlarını tahmin edeceğini göstermektedir. Yüksek rüzgar hızı, dikey karıştırmayı geliştiren güçlü türbülans oluşturur. Bu da  $PM_{2.5}$  'in zemin seviyesi konsantrasyonunu azaltacaktır. AOD regresyon katsayısının pozitif işareti de fiziksel olarak mantıklıdır. Atmosferde ne kadar çok aerosol ve parçacık madde varsa, parçacıklar tarafından o kadar fazla ışık saçılır veya emilir. Bununla birlikte, sıcaklık işaretinin pozitif olması bekleniyordu çünkü daha yüksek hava sıcaklığı ikincil partikül oluşum oranını hızlandırmaktadır. Bu çalışmada sıcaklık regresyon katsayısının negatif işareti,  $PM_{2.5}$  'in sülfat kısmının  $PM_{2.5}$  'in organik karbon içeriğine oranı arasındaki korelasyondan kaynaklanabilir. Chin ve arkadaşları<sup>[33]</sup> sıcaklığın yukarıda belirtilen oran ile pozitif bir korelasyona sahip olduğunu göstermiştir. Atmosferde daha yüksek sülfat kütlesi bulunduğundan, daha fazla ışık sönmeye meydana gelir. Bu nedenle, AOD daha düşük bir  $PM_{2.5}$  konsantrasyonuna karşılık gelecektir.

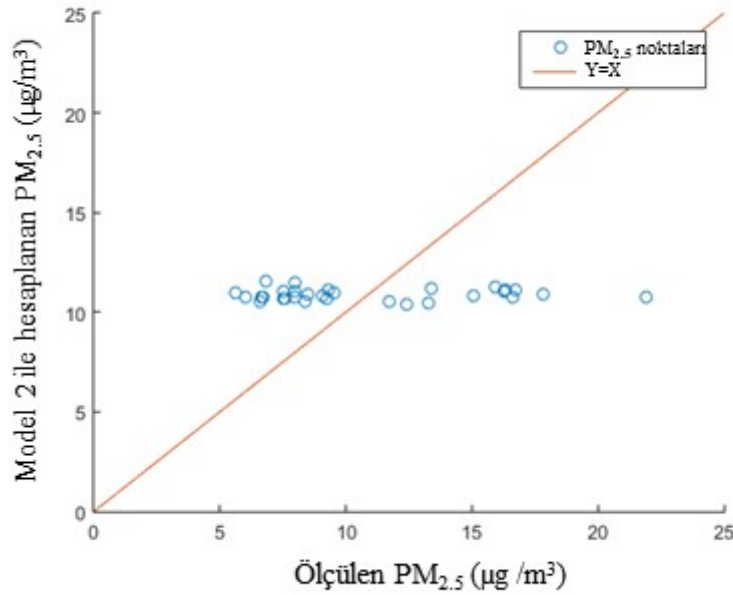
Eşitlik 4'ün katsayıları da basit doğrusal bir regresyon yaklaşımı ile  $a = 5,844$  ve  $b = 10,256$  olacak şekilde hesaplanmıştır.

Kare ortalama hatası model 1 için 8,453 ve model 2 için 18,45 olarak bulundu. Birinci ve ikinci değerler için kök kare ortalama değerleri sırasıyla 2,9 ve 4,29'du. Birinci model için R-kare ( $R^2$ ) değeri 0,53 iken, ikinci model için  $R^2$  değeri 0.04 olarak hesaplandı ki, bu da model 2'nin isabetli bir model olmadığını gösterir.  $PM_{2.5}$  tahmini için standart hata 0,277'dir. Regresyon karelerinin toplamı (SSR) 2,28

ve artık kareler toplamı (RSS) ise 1,99 olarak bulundu. Şekil 2 ve 3, ölçülen  $PM_{2.5}$  'e karşı modeller tarafından hesaplanan  $PM_{2.5}$  konsantrasyonunun dağılım grafiklerini göstermektedir.



Şekil 2. Model 1'de hesaplanan  $PM_{2.5}$  konsantrasyonuna karşı ölçülen  $PM_{2.5}$  konsantrasyonunun dağılım grafiği



Şekil 3. Model 2'de hesaplanan  $PM_{2.5}$  konsantrasyonuna karşı ölçülen  $PM_{2.5}$  konsantrasyonunun dağılım grafiği

Şekil 2 ve 3, verilerin  $Y = X$  doğrusundan sapmalarını göstermektedir. Model 1'deki karşılaştırma daha uyumlu gözükürken, model 2'de yüksek ve düşük konsantrasyonlarda sapmaların daha fazla olduğu gözükmektedir. İzleme istasyonlarından elde edilen  $10,88 (\mu\text{g} / \text{m}^3)$  aylık ortalama  $PM_{2.5}$  konsantrasyonunu karşı, Model 1 bu değeri  $10,98 (\mu\text{g} / \text{m}^3)$  olarak tahmin etmiştir. Model 1  $PM_{2.5}$  konsantrasyonlarının aylık ortalama tahmininin, Çevre Koruma Ajansı (EPA) tarafından ölçülen aylık ortalama  $PM_{2.5}$  konsantrasyonundan istatistiksel olarak önemli ölçüde farklı olup olmadığını araştırmak için, bu değerler arasında % 95 güven aralığı içerisinde tek örneklem t testi gerçekleştirildi (tablo 1). 30 gün boyunca her gün için 1 ortalama değer içeren model 1 tahminleri tek örneklem t testi için değişken olarak alındı.

**Tablo 1.** Model 1 için tek örneklem t testi sonuç tablosu

Tek Örneklem T-Testi						
	Test Değeri = 10.8833					
	t	df	p-değeri	Ortalama Farkı	Farkın 95% Güven Aralığı	
					Alt	Üst
Model 1 Verisi	.189	29	.851	.10008	-.9803	1.1805

Tek örneklem t-testinin sonucu ortalamalar (modellenen ve ölçülen) arasında anlamlı bir farklılık olmadığını belirtiyor çünkü test için p değeri (0,851) önem seviyesinden ( $\alpha=0,05$ ) yüksek olarak bulundu. Bu sonuca göre aylık modellenen  $PM_{2.5}$  ortalaması ( $10,98 \mu g/m^3$ ) % 95 güven aralığı içerisinde istatistiksel olarak ölçülen ortalamadan ( $10,88 \mu g/m^3$ ) farklı değildir.

## SONUÇ

Partiküller kirleticilerdir ve insan vücudunun solunum ve dolaşım sistemi üzerinde olumsuz sağlık etkilerine sahiptir, bu nedenle havadaki konsantrasyonları sürekli izlenmelidir. Hava kalitesi izleme istasyonunda yapılan ölçümler, yalnızca belirli bir bölgedeki hava kalitesini gösterdiği için kullanımı sınırlıdır. Hava kalitesini izlemek için uydu görüntülerinin kullanılması ekonomik ve oldukça etkili bir yönetim sağlar. Bununla birlikte, Aerosol Optik Derinlik (AOD) verilerini ince partiküllerin ( $PM_{2.5}$ ) konsantrasyonu yerine bir suret olarak kullanmak için doğru modelleme yaklaşımları yapılmalıdır.

Bu çalışmada, zemin seviyesinde  $PM_{2.5}$  konsantrasyonunu tahmin etmek için AOD, rüzgar ve sıcaklık parametrelerini kullanan bir model geliştirildi. Genel olarak, meteorolojik parametreleri hesaba katan bir modelde AOD güç fonksiyonunun, basit bir doğrusal regresyon uyumuna kıyasla tahmin sonuçlarının güvenilirliğini geliştirdiği görüldü.

Bu çalışmanın sonuçları belirli bir bölgeyi kapsar. Ayrıca çalışma sonbaharda bir aylık bir zaman dilimini kapsamaktadır. Bu nedenle, daha büyük uzamsal ve zamansal ölçeklerde regresyon katsayıları değişebilir. Model Çevre Koruma Ajansı (EPA) ölçüm istasyonlarına bağımlıdır. Hillsborough Vilayeti gibi oldukça büyük bir alan için rüzgar, sıcaklık ve  $PM_{2.5}$  konsantrasyonlarının ortalama değerlerinin kullanılması da bir belirsizlik seviyesi oluşturmaktadır. Spline regresyon gibi diğer regresyon yaklaşımları,  $PM_{2.5}$  konsantrasyonunun daha doğru bir tahmini için kullanılabilir. Bunlara ek olarak, daha küçük veri çözünürlüğüne sahip yeni uyduların başlatılması model tahminlerinin doğruluğunu artıracaktır, çünkü aerosollerin seviyesi Aura ve Terra'nın kara üzerindeki çözünürlüğünden daha küçük ölçeklerde değişmektedir.

Uydu verilerini kullanmak ve yorumlamak için daha doğru modeller geliştirmenin gerekliliği gittikçe önem kazanmaktadır. Bu çalışmadaki model,  $PM_{2.5}$  konsantrasyonunun doğrudan ölçümünün yapılamadığı bölgelerde tahmin edilmesine katkıda bulunabilir. Buna ek olarak, model uydu ürünlerini meteorolojik parametrelerle birleştirme potansiyeli göstermektedir. Ayrıca model farklı kaynaklardan (ölçüm sahaları veya cihazlar, uzaktan algılama verileri vb.) verilerin entegrasyonunun  $PM_{2.5}$  konsantrasyonu tahminini iyileştirmek için iyi bir fikir olabileceğini göstermiştir.

Daha fazla uydunun ortaya çıkması ve aynı zamanda bu uydulardan elde edilen verilerin işleneceği araçların geliştirilmesi ile insanlar kirleticilerin seviyelerine ilişkin daha kapsamlı verilere erişecektir. Bu teknolojilerin kullanımı hükümetlerin ölçüm alanlarından uzak bölgelerde yaşayan insanlar için çevresel adalet sağlamasına da fırsat sağlayacaktır. Düşük uzamsal çözünürlükte yapılan izlemelerle toz kaynağı oluşturan madencilik ve sondaj işleri gibi sektörlerin kirlilik yönetimi daha pratik ve ekonomik olma potansiyeline sahiptir.

## KAYNAKLAR

- [1] Pope, C., & Dockery, D. (1999). Chapter 31. Epidemiology of particle effects. In S. T. Holgate, H. S. Koren, J. M. Samet, & R. L. Maynard (Eds.), *Air pollution and health* (pp. 673–705).
- [2] Dehghani, Mansooreh & Kashtgar, Laila & Reza Javaheri, Mohammad & Derakhshan, Zahra & Gea, Oliveri Conti & Zuccarello, Pietro & Ferrante, Margherita. (2017). The effects of air pollutants on the mortality rate of lung cancer and leukemia. *Molecular Medicine Reports*. 15: 3390-3397

- [3] Kaufman, Y.J., Tanre, D. and Boucher, O. (2002). A satellite view of aerosols in the climate system. *Nature*, 419, 215-223.
- [4] Duncan BN, AI Prados, LN Lamsal, Y Liu, DG Streets, P Gupta, et al. 2014. Satellite data of atmospheric pollution for U.S. air quality applications: Examples of applications, summary of data end-user resources, answers to FAQs, and common mistakes to avoid. *Atmospheric Environment* 94: 647–662.
- [5] Liu, Yang & Franklin, Meredith & Kahn, Ralph & Koutrakis, Petros. (2007). Using aerosol optical thickness to predict ground-level PM<sub>2.5</sub> concentrations in the St. Louis area: A comparison between MISR and MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 107 (2007) 33-44.
- [6] Davis, S. M., Landgrebe, D. A., Phillips, T. L., Swain, P. H., Hoffer, R. M., Lindenlaub, J. C., & Silva, L. F. (1978). Remote sensing: the quantitative approach. *New York, McGraw-Hill International Book Co., 1978. 405 p.*
- [7] Wang, J., & Christopher, S. A. (2003). Intercomparison between satellite-derived aerosol optical thickness and PM<sub>2.5</sub> mass: implications for air quality studies. *Geophysical research letters*, 30(21).
- [8] Ritchie, J. C., Zimba, P. V., & Everitt, J. H. (2003). Remote sensing techniques to assess water quality. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69(6), 695-704.
- [9] Jha, M. K., Chowdhury, A., Chowdary, V. M., & Peiffer, S. (2007). Groundwater management and development by integrated remote sensing and geographic information systems: prospects and constraints. *Water Resources Management*, 21(2), 427-467.
- [10] Al-Hanbali, A., Alsaadeh, B., & Kondoh, A. (2011). Using GIS-based weighted linear combination analysis and remote sensing techniques to select optimum solid waste disposal sites within Mafrq City, Jordan. *Journal of Geographic Information System*, 3(04), 267.
- [11] Bolch, T. (2007). Climate change and glacier retreat in northern Tien Shan (Kazakhstan/Kyrgyzstan) using remote sensing data. *Global and Planetary Change*, 56(1), 1-12.
- [12] Sifakis, N., & Deschamps, P. Y. (1992). Mapping of Air Pollution Using SPOT Satellite. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 5, 4.
- [13] Martin, R. V. (2008). Satellite remote sensing of surface air quality. *Atmospheric Environment*, 42(34), 7823-7843.
- [14] Kloog, I., Koutrakis, P., Coull, B. A., Lee, H. J., & Schwartz, J. (2011). Assessing temporally and spatially resolved PM<sub>2.5</sub> exposures for epidemiological studies using satellite aerosol optical depth measurements. *Atmospheric environment*, 45(35), 6267-6275.
- [15] Hu, Z., & Baker, E. (2017). Geographical Analysis of Lung Cancer Mortality Rate and PM<sub>2.5</sub> Using Global Annual Average PM<sub>2.5</sub> Grids from MODIS and MISR Aerosol Optical Depth. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 5(06), 183.
- [16] Wang, B. (2017). Retrieval of Aerosol Optical Depth and Correlation Analysis of PM<sub>2.5</sub> Based on GF-1 Wide Field of View Images. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Geological and Environmental Engineering*, 4(12).
- [17] Chu, D., Kaufman, Y., Zibordi, G., Chern, J., Mao, J., Li, C., et al. (2003). Global monitoring of air pollution over land from the Earth Observing System-Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). *Journal of Geophysical Research*, 108(D21) (Art. No. 4661).
- [18] Vidot, J., Santer, R., & Ramon, D. (2007). Atmospheric particulate matter (PM) estimation from SeaWiFS imagery. *Remote sensing of environment*, 111(1), 1-10.
- [19] Gupta, P., and S. A. Christopher (2009), Particulate matter air quality assessment using integrated surface, satellite, and meteorological products: Multiple regression approach, *J. Geophys. Res.*, 114, D14205.
- [20] Barnes, W. L., & Salomonson, V. V. (1992, November). MODIS: A global imaging spectroradiometer for the Earth Observing System. In *Optical Technologies for Aerospace Sensing: A Critical Review* (Vol. 10269, p. 102690G). International Society for Optics and Photonics.
- [21] Remer, L. A., Tanre, D., Kaufman, Y. J., Ichoku, C., Mattoo, S., Levy, R. & Martins, J. V. (2002). Validation of MODIS aerosol retrieval over ocean. *Geophysical research letters*, 29(12).
- [22] King, M. D., Menzel, W. P., Kaufman, Y. J., Tanré, D., Gao, B. C., Platnick, S., ... & Hubanks, P. A. (2003). Cloud and aerosol properties, precipitable water, and profiles of temperature and water vapor from MODIS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(2), 442-458.



- [23] Wan, Z., Wang, P., & Li, X. (2004). Using MODIS land surface temperature and normalized difference vegetation index products for monitoring drought in the southern Great Plains, USA. *International Journal of Remote Sensing*, 25(1), 61-72.
- [24] Qin, J., Yang, K., Lu, N., Chen, Y., Zhao, L., & Han, M. (2013). Spatial upscaling of in-situ soil moisture measurements based on MODIS-derived apparent thermal inertia. *Remote Sensing of Environment*, 138, 1-9.
- [25] Zhang, X., Friedl, M. A., Schaaf, C. B., Strahler, A. H., Hodges, J. C., Gao, F., ... & Huete, A. (2003). Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote sensing of environment*, 84(3), 471-475.
- [26] Xiao, X., Boles, S., Liu, J., Zhuang, D., Frohling, S., Li, C. & Moore, B. (2005). Mapping paddy rice agriculture in southern China using multi-temporal MODIS images. *Remote sensing of environment*, 95(4), 480-492.
- [27] Savtchenko, A., Ouzounov, D., Ahmad, S., Acker, J., Leptoukh, G., Koziana, J., & Nickless, D. (2004). Terra and Aqua MODIS products available from NASA GES DAAC. *Advances in Space Research*, 34(4), 710-714.
- [28] Emili, E., Popp, C., Petitta, M., Riffler, M., Wunderle, S., & Zebisch, M. (2010). PM10 remote sensing from geostationary SEVIRI and polar-orbiting MODIS sensors over the complex terrain of the European Alpine region. *Remote sensing of environment*, 114(11), 2485-2499.
- [29] Ruiz-Arias, J. A., Dudhia, J., Gueymard, C. A., & Pozo-Vázquez, D. (2013). Assessment of the Level-3 MODIS daily aerosol optical depth in the context of surface solar radiation and numerical weather modeling. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(2), 675-692.
- [30] National Aeronautics and Space Administration (n.d.). Giovanni. Retrieved June 21, 2018, from <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>
- [31] Levy, R. C., Remer, L. A., Kleidman, R. G., Mattoo, S., Ichoku, C., Kahn, R., & Eck, T. F. (2010). Global evaluation of the Collection 5 MODIS dark-target aerosol products over land. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(21), 10399-10420.
- [32] Noble, C. A., Vanderpool, R. W., Peters, T. M., McElroy, F. F., Gemmill, D. B., & Wiener, R. W. (2001). Federal reference and equivalent methods for measuring fine particulate matter. *Aerosol Science & Technology*, 34(5), 457-464.
- [33] Chin, M., Ginoux, P., Kinne, S., Torres, O., Holben, B. N., Duncan, B. N., ... & Nakajima, T. (2002). Tropospheric aerosol optical thickness from the GOCART model and comparisons with satellite and Sun photometer measurements. *Journal of the atmospheric sciences*, 59(3), 461-483.