

# Orman Yangını Sonrası Oluşan Hasarın ve Hava Kirlenici Parametrelerin İzlenmesi: Çanakkale Yangını Örneği

Özer Akyürek<sup>1,\*</sup> 

<sup>1</sup>Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Uzaktan Algılama Anabilim Dalı, 41001, Kocaeli.

## Özet

Ormanlar, sahip olduğu biyoçeşitlilik ile sağladığı katkılar açısından yeryüzünün vazgeçilmez bir parçasıdır. Gezegenimizin üçte birine yayılmış durumda olan ormanları etkileyen en önemli faktörlerin başında yangınlar gelmektedir. Orman yangınları yeryüzündeki doğal afetler içerisinde neden oldukları yıkıcı etkiler ile öne çıkmakta, ayrıca çok önemli bir gaz ve aerosol kaynağı olarak nitelendirilmektedirler. Orman yangınlarının takibi, afet izleme ve önleme açısından son derece önemli bir durumdur. Son yıllarda yangınların takibinde sıklıkla kullanılmakta olan Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve Uzaktan Algılama, veri toplama, analiz ve yorumlama bakımından öne çıkan yöntemlerdir. Bu çalışma, 22 Ağustos 2023 tarihinde Çanakkale’de meydana gelen ve 3 gün süren orman yangınının Sentinel-2 ve 5P uzaktan algılama görüntüleri ve CBS yardımıyla analizine odaklanmaktadır. Analizin sonuçları, yangından etkilenen toplam alanın 4191.93 hektara (ha) yayıldığını ve çok çeşitli Arazi Örtüsü / Kullanımı sınıflarını kapsadığını ortaya koymuştur. Özellikle, ormanlar ve tarım arazileri bu bölgede en belirgin hasarı görmüştür. Çalışmada ayrıca yangın sonrasında atmosfere yayılan kirlenici maddelerin yoğunluğunu gösteren Aerosol indeksi değeri ve Azot dioksit (NO<sub>2</sub>) hava kirliliği parametreleri izlenmiş ve uydu görüntüleri aracılığıyla konsantrasyonları belirlenmiştir. Kaydedilen en yüksek NO<sub>2</sub> konsantrasyonu yangının son günü olan 24 Ağustos’ta 0.02624702 mol/m<sup>2</sup> olarak tespit edilmiştir. Üç günlük toplam atmosfere yayılan NO<sub>2</sub> değeri ise 0.06020184 mol/m<sup>2</sup> olarak belirlenmiştir.

## Anahtar Sözcükler

Görüntü İşleme, Hava Kirlenici Parametreleri, Orman Yangını, Sentinel-2 ve 5P

## Monitoring Damage and Air Pollutant Parameters after Forest Fire: A Case Study of Çanakkale Fire

### Abstract

Forests are an indispensable part of the Earth in terms of their biodiversity and contributions. Fires are one of the most important factors affecting forests, which cover one third of our planet. Forest fires are among the most destructive natural disasters on Earth and are also a very important source of gases and aerosols. The monitoring of forest fires is extremely important for disaster monitoring and prevention. Geographic Information Systems (GIS) and remote sensing, which have been widely used in fire monitoring in recent years, are prominent methods in terms of data collection, analysis and interpretation. This study focuses on the analysis of the forest fire that occurred in Çanakkale on August 22, 2023 and lasted for 3 days with the help of Sentinel-2 and 5P remote sensing images and GIS. The results of the analysis showed that the total area affected by the fire was 4191.93 hectares (ha) and covered a wide range of land cover/use classes. In particular, forests and agricultural lands were the most severely affected in this region. The aerosol index and nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>) air pollution parameters, which indicate the concentration of pollutants emitted into the atmosphere after the fire, were monitored and their concentrations determined from satellite imagery. The highest NO<sub>2</sub> concentration recorded was 0.02624702 mol/m<sup>2</sup> on August 24, the last day of the fire. The total amount of NO<sub>2</sub> emitted into the atmosphere for three days was determined to be 0.06020184 mol/m<sup>2</sup>.

### Keywords

Image Processing, Air Pollutant Parameters, Forest Fire, Sentinel-2 and 5P

## 1. Giriş

Orman, belli bir kapalılık düzeyindeki ağaçlar, diğer bitki türleri ve hayvanlarla birlikte topraktaki gözle görülemeyen organizmaların etkileşimde bulunduğu canlı bir sistem ve topluluk olarak tanımlanmaktadır (Orman Genel Müdürlüğü, 2021). Birçok orman diğer ekosistemlerden daha fazla biyolojik çeşitliliğe sahip olduğundan, orman ekosistemleri dünyanın biyolojik çeşitliliğinin kritik bir bileşenidir. Dünya ormanlarının kümülatif genişliği 4,06 milyar hektar (ha) gibi şaşırtıcı bir alanı kapsamakta ve gezegenin karasal alanının yaklaşık % 31’ini kaplamaktadır (Food and Agriculture Organization, 2022). Türkiye, ekolojik açıdan zengin bir çeşitliliğe sahip olan 78 milyon ha’lık bir alana sahiptir. 2020 yılında yapılan tespitlere göre, ülkenin ormanlık alanları 22.9 milyon ha olarak belirlenmiştir.

Bu ormanlık alan, ülkenin toplam alanının %29.4'ünü kaplamaktadır (Orman Genel Müdürlüğü, 2021). Geçmişten günümüze kadar geçen süre içerisinde yüksek mevsimsel sıcaklıklar ve rüzgarlar ciddi yangınlara neden olmuş ve orman varlığına ciddi zararlar vermiştir (Elvan vd., 2021). Dünya üzerindeki doğal arazi örtüsü, kentsel planlamadan sürdürülebilir kalkınmaya, çevresel araştırmalardan doğal kaynakların yönetimine kadar birçok sosyal ve ekonomik faktörü doğrudan etkileyen önemli bir unsurdur. İklim değişikliği, orman sağlığını tehdit eden önemli bir risk faktörü olarak ortaya çıkmaktadır. Güncel kanıtlar, orman yangınlarının ve haşere salgınlarının artan sıklığını ve yoğunluğunu doğrulamaktadırlar. Asırlık bir doğa olayı olan yangın, çağlar boyunca karasal ekosistemler üzerindeki etkisini hissettirmiş ve çeşitli biyomların hatlarını karmaşık bir biçimde şekillendirmiştir (Food and Agriculture Organization, 2022; Lerma-Arce vd., 2023). Yangınlar, arazi örtüsünü hızla değiştiren ve kimyasal değişikliklere neden olarak, doğal ekosistemlere ciddi zararlar veren bir faktör olarak tanımlanmaktadır (Zielinski vd., 2016; Kolanek vd., 2021). Ormansızlaşmanın başlıca tetikleyicileri arasında yangınlar önemli bir yer tutmaktadır. Bu yangınların %95'inden fazlasının kökeninin ihmal ve kasıtlı kundaklamayı da kapsayan insan davranışlarına dayandığının ortaya çıkması dikkat çekicidir (Flannigan vd., 2006; de Rigo vd., 2017).

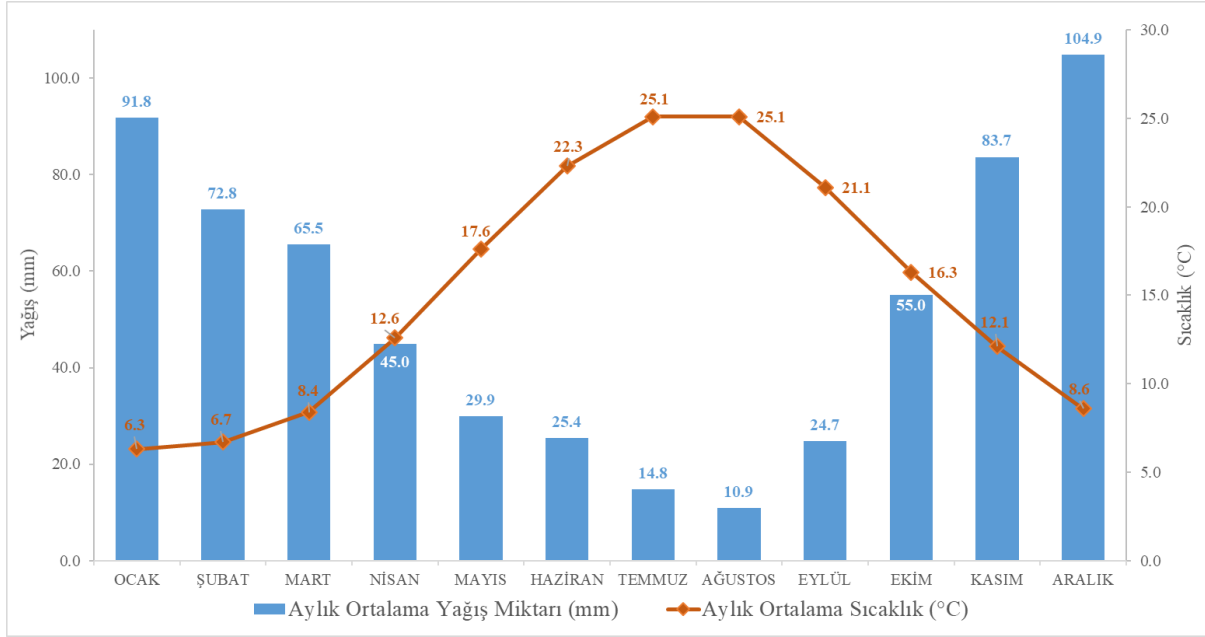
Tüm olumsuz etkilerinin yanında orman yangınları ayrıca dünya çapında çok önemli bir gaz ve aerosol kaynağıdır (Yarragunta vd., 2020; Koluşu vd., 2015; Magro vd., 2021). Son zamanlarda, insan faaliyetlerinin doğrudan bir sonucu olarak atmosferdeki karbondioksit, metan, azot oksit ve ozon gibi aktif gazların artan varlığından kaynaklanan küresel ısınmadaki artış gözle görülür bir hale gelmiştir. Antropojenik eylemlerin itici gücüyle değişen bu iklim manzarası, dünya genelinde ormanlar ve yaban hayat üzerinde önemli bir etki yaratmaktadır (Ray vd., 2019; Volkova vd., 2019; Lerma-Arce vd., 2023). Bu karmaşık etkileşime çarpıcı bir örnek olarak 1984 yılından bu yana küresel ısınma sebebiyle orman yangınlarının iki katına çıkması verilebilir (Mansoor vd., 2022). Orman ekosistemleri 662 milyar ton gibi şaşırtıcı bir karbon stoğu barındırmaktadır; bu, toprak ve bitki örtüsü içinde bulunan Dünya'nın toplam karbon içeriğinin yarısını aşan bir rezervuara denk gelmektedir. Bununla birlikte, iklimsel değişikliklerin bir sonucu olan yangınların tahribatı, bitki örtüsünde tutulan karbonun yaklaşık %10'luk bir bölümünün azalmasıyla ve atmosfere salınmasıyla sonuçlanmaktadır (Grecu vd., 2020; Lerma-Arce vd., 2023).

Hava kalitesi yönetim stratejileri oluşturulurken önemli bir hava kirleticisi kaynağı olan orman yangınları da dikkate alınmalıdır. Orman yangınlarının sonuçlarından bir tanesi yerel, bölgesel ve küresel ölçekte atmosfere salınan çevresel açıdan önemli kirleticisi parametre gaz emisyonlarının farklı çeşitlerde olmasıdır. Atmosfere yayılan kirleticiler arasında partikül madde (PM), karbon dioksit (CO<sub>2</sub>), karbon monoksit (CO), metan (CH<sub>4</sub>), metan olmayan hidrokarbonlar (NMHC) ve azot oksitler (NO<sub>x</sub>) bulunmaktadır (Yarragunta vd., 2020). Literatürdeki epidemiyolojik çalışmalar akciğer kanseri, kardiyopulmoner ölümler ve astım hastalıklarının sebebinin hava kirliliği olduğunu göstermektedir (Jeong & Hong, 2021). Orman yangınlarının neden olduğu duman kirliliği özellikle yangınla mücadelede görev alan personel başta olmak üzere tüm toplum için önemli bir halk sağlığı sorunu oluşturmaktadır (Butt vd., 2020; Koluşu vd., 2015). Ancak orman yangınlarının neden olduğu hava kirliliği olaylarını belirlemek her zaman kolay olmamaktadır. Yangınlar sonucunda atmosfere yayılan kirleticilerin taşınım dağılımı sebebiyle hava kalitesi üzerindeki etkileri çok uzak mesafelerde gerçekleşebilmektedir. Orman yangınları belirli hektarlarla sınırlı olsa da, etkileri hiçbir doğal ve politik sınır gözetmeksizin olay kaynağından çok uzaklarda da görülebilmekte ve hissedilebilmektedir. Meteorolojik koşullara bağlı olarak, kirleticisi parametreler içeren duman bulutları ve pus tabakaları atmosferde uzun süreler kalabilmekte ve canlı sağlığını olumsuz etkilemektedir (Koluşu vd., 2015).

Uzaktan Algılama (UA) platformları son yıllarda hava kalitesinin izlenmesinde kullanılan önemli bir araç haline gelmiştir (Le vd., 2014). Teknolojik ilerleme, Landsat, Sentinel ve SPOT gibi uydu platformlarının yangınlar sırasında ve sonrasında farklı konumsal ve zamansal çözünürlüklerde görüntüler sağladığı yeni bir çağ başlatmıştır. Bu teknolojik sıçrama, etkili afet yönetimi için muazzam sonuçlar doğurmaktadır. Bu platformlar, yangın olaylarının hemen sonrasında kapsamlı bir görüş sunarak, afet azaltma için etkili stratejilerin tasarlanmasına ve uygulanmasına önemli katkılarda bulunmaktadır. CBS'nin mekansal verilerin yönetimindeki etkinliği, analiz kabiliyeti, güçlü görselleştirme ve sunum potansiyeli ile sorgulamalara olanak sağlama yeterliliği çalışmalar için tercih edilen bir araç haline gelmesine neden olmuştur (Roy vd., 2019; Giglio & Roy, 2020; Wooster vd., 2021).

Orman yangınları, iklim değişikliği ve hava kirliliği arasındaki karmaşık etkileşimi anlamaya yönelik çok sayıda çalışma yapılmıştır. Reid vd. (2016), orman yangını kaynaklı dumanın hem insan sağlığı hem de atmosfer üzerindeki etkilerine ilişkin araştırmaları derlemiştir. Goldberg vd. (2019) çalışmalarında Kuzey Amerika'nın üç büyük kenti olan New York, Chicago ve Toronto için NO<sub>x</sub> değerlerini TROPOMI görüntüleri ile incelemiştir. Volkova vd. (2019), Avustralya'daki büyük yangınlardan sonra atmosfere salınan sera gazı emisyonlarını incelemiştir. Yangınlardan sonra atmosfere salınabilecek sera gazlarını tahmin etmeye çalışmışlardır. Zheng vd. (2019) çalışmalarında 2018 yılı için Çin'in iki eyaletindeki NO<sub>2</sub> seviyelerini TROPOMI görüntüleri ile analiz etmişlerdir. Çolak ve Sunar (2020) CBS ile Akdeniz bölgesindeki ormanların yangın risk durumlarını İzmir Menderes bölgesinde meydana gelen yangın üzerinden araştırmışlardır. Yarragunta vd. (2020) çalışmalarında kuzey batı Himalayalarda iki farklı tarihte çıkan orman yangınları sonrası atmosfere salınan hava kirleticisi gazlardan olan ozon, karbon monoksit ve azot oksitlerin dağılımını incelemiştir. Minallah vd. (2021) yaptıkları çalışmalarında 2019 yılında Avustralya'da çıkan orman yangınları sonrasında atmosfere karışan hava kirleticilerini TROPOMI görüntüleri ile analiz etmişlerdir. Analizleri sonucunda inceledikleri bütün kirleticisi parametrelerde %100'ün üzerinde artışların olduğunu belirlemiştir.





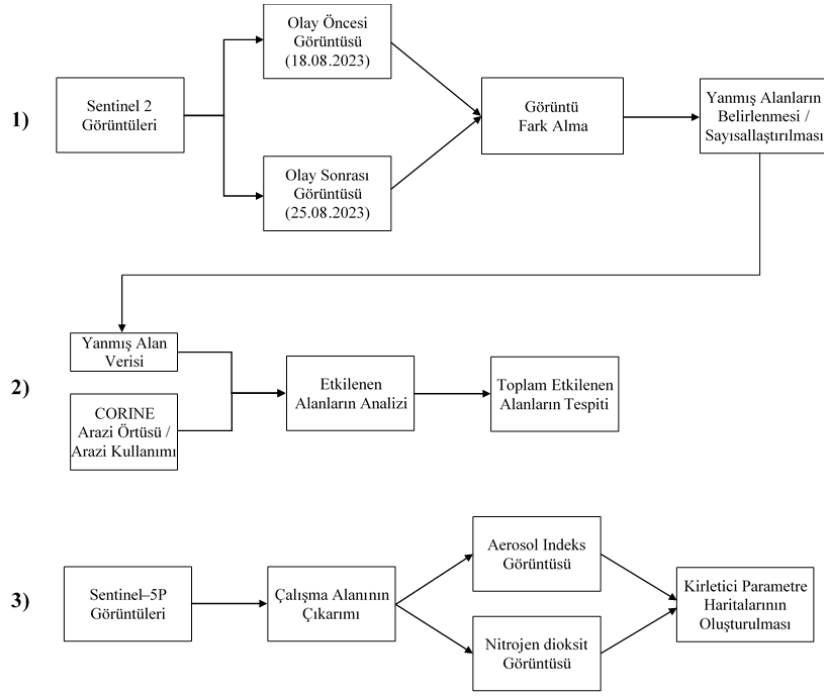
Şekil 2: Çanakkale iklim verileri (1929–2022) (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2023)

## 2.2 Veri seti

Bu çalışmada, Avrupa Çevre Ajansı'nın Kopernik Arazi İzleme Servisi (Copernicus Land Monitoring Service) tarafından sağlanan CORINE AÖ/AK bilgilerini içeren vektör verileri ile farklı konumsal çözünürlük değerlerine sahip (10, 20 ve 60 m) Avrupa Uzay Ajansı'nın kontrolünde bulunan Sentinel-2 ve 5P UA görüntüleri kullanılmıştır. Kullanılan Sentinel-2 görüntüleri atmosferik olarak düzeltilmiş ve yeryüzü yansımaya değerlerine sahip Seviye 2A (Level-2A) görüntüleridir. Multispektral uydu görüntüleri (Sentinel-2), Atmosferik Penetrasyon Bant Kombinasyonu (R:12, G:11, B:8A) ve görüntü fark alma tekniğinden faydalanarak yangından etkilenen alanların doğru bir şekilde elde edilmesi amacıyla, yangın olayından önce ve sonra olarak kullanılmıştır. Ayrıca, Sentinel-5P uydu görüntüleri, yangının neden olduğu Aerosol İndeks (Aİ) ve Azot dioksit (NO<sub>2</sub>) olmak üzere hava kirlenici ölçümlerini tespit ve analiz etmek için kullanılmıştır.

Atmosferik izleme amacıyla kullanılan ilk Kopernik görevi olan Sentinel-5P, TROPOsferik İzleme Aracını (TROPO Monitoring Instrument, TROPOMI) taşımaktadır. Bu araç, azot dioksit, ozon, formaldehit, kükürt dioksit, metan, karbon monoksit ve aerosoller dahil olmak üzere, hem hava kalitesini hem de iklimi etkileyen çeşitli hava kirlenici gazların izlenebilmesini sağlamaktadır. Pasif UA tekniklerini kullanan TROPOMI, ultraviyolede kısa dalga kızılötesine kadar dalga boylarını kapsayan, nadir görüşlü bir görüntüleme spektrometresi yardımıyla algılama yapmaktadır. Push-broom konfigürasyonunda çalışan cihaz, dünya yüzeyinde yaklaşık 2600 km'lik bir alan genişliği kapsamakta ve nadirde ki, piksel boyutu tüm spektral bantlar için 5,5 x 3,5 km (6 Ağustos 2019'dan önce: 7 x 3,5 km) ve SWIR bantları için 7x7 km'dir (<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/home>).

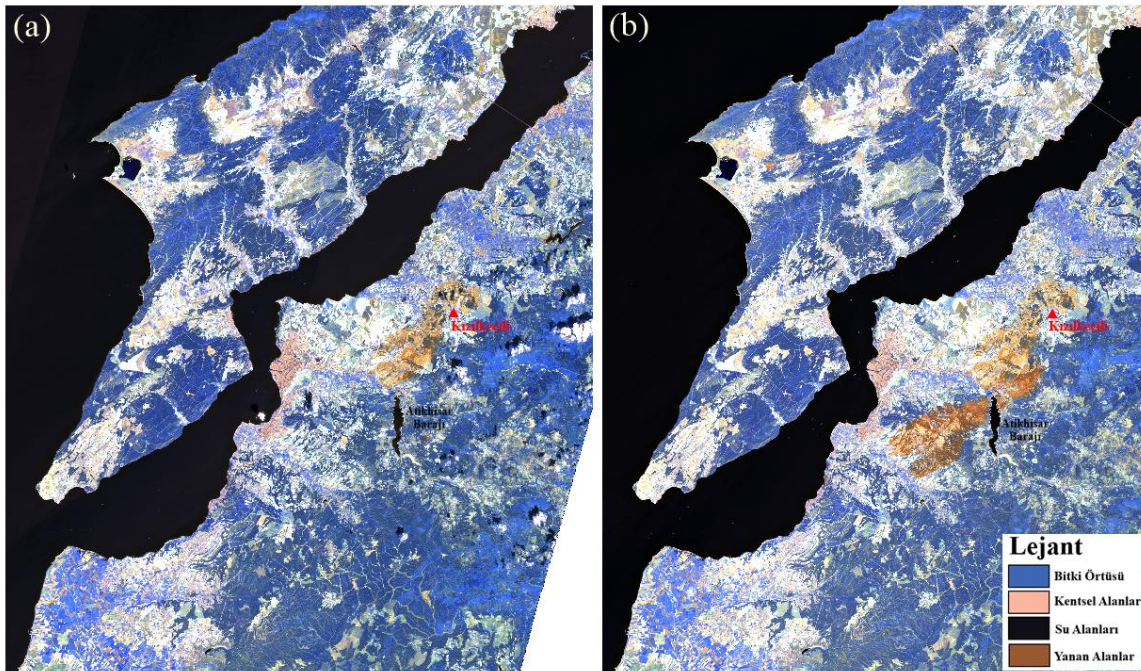
Tüm bu veriler kullanılarak orman yangınının Çanakkale'deki etkilerinin CBS ve UA teknikleri ile incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada gerçekleştirilen metodolojik iş akışı Şekil 3'te gösterilmektedir. İş akışının ilk aşamasında, Sentinel-2 görüntüleri kullanılarak yanan alanların belirlenmesi işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu, atmosferik penetrasyon bant kombinasyonunun uygulanması ve görüntü farkı metodolojisinin kullanılması yoluyla sayısallaştırma işlemi yapılarak gerçekleştirilmiştir. Yanan alanların belirlenmesi işlemi, olay öncesi ve sonrası görüntülerin karşılaştırılması yöntemiyle yapılmıştır. Daha sonraki aşamada, yanan alanın çeşitli AÖ/AK sınıflarında neden olduğu tahribatın boyutu değerlendirilmiştir. Bunun için, AÖ/AK ve yanan bölgeyi kapsayan veri kümeleri CBS içerisinde üst üste bindirilerek yangından etkilenen bölgelerin belirlenmesi sağlanmıştır. Son aşamada, Sentinel-5P görüntüleri kullanılarak yangın olayından kaynaklanan hava kirlenici parametrelerin analizi yapılmıştır. Bu analiz, açık kaynak kodlu Python yazılımı ortamında geliştirilen özel kod blokları aracılığıyla gerçekleştirilmiş ve sonuç olarak hava kirlenici parametrelerin dağılımını gösteren kirlilik haritaları oluşturulmuştur. Aİ görüntüsü, yangın sırası ve sonrasında atmosfere karışan kirlenici parametrelerin yoğunluğunu göstermektedir. Özellikle, orman yangınlarından kaynaklanan önemli emisyonlardan biri olan NO<sub>2</sub> kirlenicisine karşılık gelen yoğunluk değerleri, uydudan elde edilen görüntülere dayalı olarak troposferik dikey sütun miktarları olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3: Metodolojik iş akış şeması

### 3. Bulgular

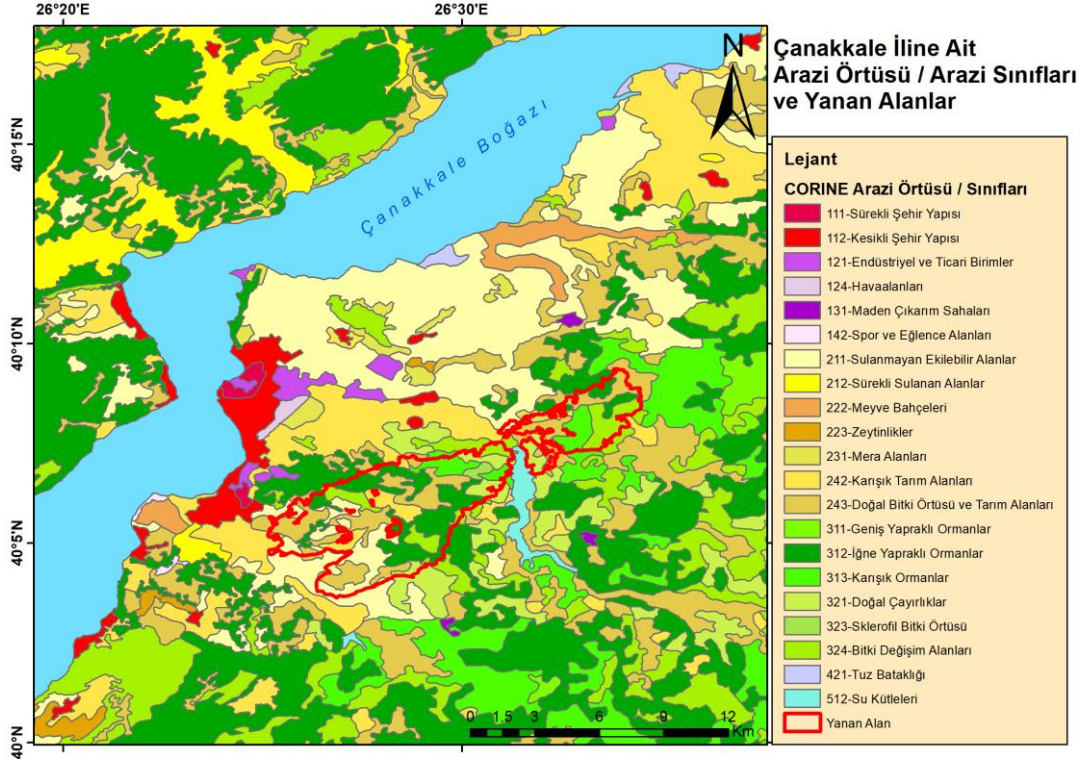
Çalışmanın ilk bölümünde, Çanakkale yangınının boyutunu, sınırlarını görmek ve belirlemek için Sentinel-2 UA platformu tarafından 20 m konumsal çözünürlüğe sahip yangın öncesi 18.08.2023 tarihine ait ve sonrası 25.08.2023 tarihine ait görüntüler kullanılmıştır. Şekil 4'te gösterilen Sentinel-2 görüntülerindeki atmosferik penetrasyon bant kombinasyonu (R:12, G:11, B:8A) ve görüntü fark alma yöntemi kullanılarak yanan alanların sınırları sayısallaştırılmıştır. Bu bant kombinasyonunun kullanılmasının nedeni; elektromanyetik spektrumun görünür bölgesinden bantlar içermemesi, dolayısıyla görüntü üzerinde azaltıcı etkisi olan duman ve pus gibi atmosferik partiküllerin bozucu etkilerinin en aza indirilmesidir. Atmosferik penetrasyon bant kombinasyonu, yanmış alanları diğer bant kombinasyonlarına göre daha net bir şekilde ortaya çıkarabilmektedir.



Şekil 4: Çanakkale yangınına ait (a) önce ve (b) sonra görüntüleri (R:12, G:11, B:8A)

Şekil 4-a'da Çanakkale şehir merkezinin doğusunda Atikhisar barajı üzerinde bulunan ve kahverengi ile görülmekte olan bölge 16 Temmuz 2023'te Çanakkale merkeze bağlı Kızılkeçili köyü yakınlarında meydana gelen orman yangınında tahrip olan bölgeyi göstermektedir. Bu çalışmada bahsi geçen orman yangınına ait herhangi bir araştırma yapılmamıştır.

Çalışma bölgesi AÖ/AK açısından değerlendirildiğinde, çeşitli ekolojik bölgelerin varlığı ortaya çıkmaktadır. Bunlar bitki değişim alanları, iğne yapraklı orman, karışık orman, doğal çayırliklar ve sklerofil bitki örtüsü gibi ağaçlık bölgelerin yanı sıra mera alanlarını da kapsamaktadır. Ayrıca, arazide sulanmayan ekilebilir alanlar, karışık tarım alanları ve yerleşim bölgeleri de bulunmaktadır. Yanmış bölge ve çevresindeki AÖ/AK sınıflarının dağılımı Şekil 5'te gösterilmektedir.



Şekil 5: Yanan alan etrafında bulunan arazi örtüsü / arazi kullanımı sınıfları

Çalışmanın ikinci bölümü uydu görüntüleri ile yanmış alanlar belirlendikten sonra, bu alanların AÖ/AK ile zarar miktarı tespit edilmesini içermektedir. Yangından etkilenen bölgelerin ayrıntılı bir dökümü Tablo 1'de sunulmuş ve istatistiksel bilgileri verilmiştir. Analizler sonucunda 4191.93 ha'lık bir alanın yangından etkilendiği tespit edilmiştir. Yangından etkilenen bölge çeşitli AÖ/AK sınıflarını kapsamaktadır. Yangından en çok etkilenen alanlar 2133.02 ha ile Ormanlık alanlar ve 2058.91 ha ile tarım alanlarıdır. Bu alanlar arasında, doğal bitki örtüsü ile birlikte bulunan tarım alanları 1170.64 ha ile en olumsuz etkilenen sınıf olarak öne çıkmaktadır. İkinci olarak, 958.58 ha'lık alanla iğne yapraklı ormanlar önemli ölçüde zarar görmüştür. Ardından, 588.88 ha ile sulanamayan ekilebilir alanlar hasara maruz kalmıştır. Yangından en az etkilenen sınıf 47.88 ha ile sklerofil bitki örtüsüdür.

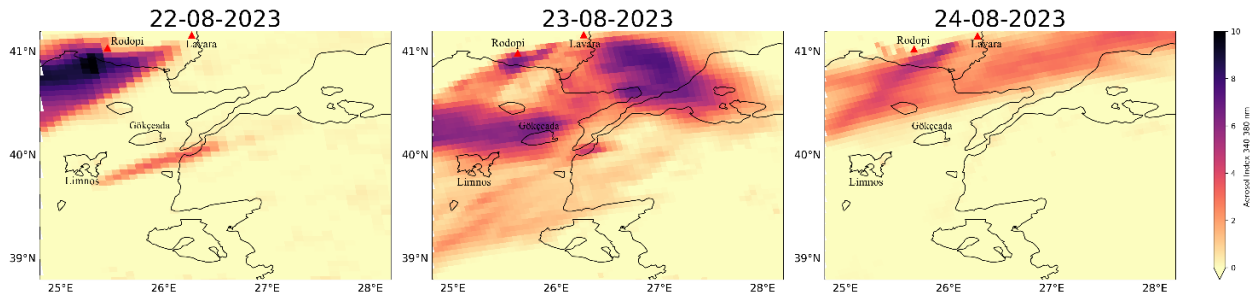
Tablo 1: Çanakkale yangınından etkilenen alanlar

	Yanan alan	Toplam etkilenen (ha)	
			4191.93
Arazi örtüsü/ arazi kullanımı	Sulanamayan Ekilebilir Alanlar		588.88
	Mera Alanları		44.10
	Karışık Tarım Alanları		255.29
	Doğal Bitki Örtüsü ile Birlikte Bulunan Tarım Alanları		1170.64
	İğne Yapraklı Ormanlar		958.58
	Karışık Ormanlar		351.56
	Doğal Çayırliklar		271.18
	Sklerofil Bitki Örtüsü		47.88
	Bitki Değişim Alanları		503.82

UA teknolojisindeki gelişmeler ile birlikte artık yeryüzünün incelenmesinin yanında onu çevreleyen atmosfer katmanlarındaki değişimlerin de izlenmesi mümkün hale gelmiştir. Sentinel-5P algılayıcısı atmosferin stratosfer ve troposfer katmanlarındaki hava kirletici parametrelerinin ve aerosollerin takibinin yapılabilmesini mümkün kılmıştır. Ülkelerin hava kalitesini belirlemek amacıyla oluşturdukları Hava Kalitesi İzleme istasyonları (Türkiye’de 199 adet istasyon bulunmakta) sadece yeryüzünden belirli bir mesafeye kadar (yaklaşık 50–100 m) ölçüm yapabilmekte ve yeryüzüne yakın bölgelerin hava kalitesi hakkında bilgi verebilmektedir.

Ancak kirletici parametrelerin atmosfer katmanlarında ne oranda bulunduğunu ve hangi yönde ne kadar hareket ettiği veya edebileceğini belirleyebilmek bu gözlem uyduları ile elde edilen bilgiler sayesinde mümkün olmuştur. Sağlıklı bir insan günde 25.000 kez soluk alıp vermekte ve bu da yaklaşık 11 m<sup>3</sup>’lük havanın akciğerlere girip çıkması anlamına gelmektedir. Atmosferde bulunan kirletici maddelerin takibi bu nedenle insanlar ve diğer canlılar için çok önemli bir hale dönüşmektedir. Atmosferdeki havanın bileşiminde bulunan kirletici parametrelerin konsantrasyonlarındaki en ufak değişiklikler insanlar üzerinde kronik akciğer bozuklukları, astım, bronşit ve kanser gibi olumsuz sonuçlara neden olmaktadır. Çalışmanın son bölümünde UA görüntüleri kullanılarak yangının tetiklediği hava kirletici parametrelerinin ve dumanın davranışının izlenilmesine odaklanılmıştır. İlk aşamada, yangın esnasında meydana gelen dumanın atmosfere dağılıma şekli ve kapsamı incelenmiştir. Bu analiz 22–23–24.08.2023 tarihlerini kapsayan Aİ görüntüleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada kullanılan Aİ görüntüleri, çeşitli uydulardan elde edilen kırk yılı aşkın bir geçmişe sahiptir. Ultra Viyole Aerosol İndeksi (UVAI) olarak adlandırılan bu Aİ parametresi, belirli bir dalga boyu çifti göz önünde bulundurularak ultraviyole (UV) dalga boyu aralığındaki spektral farklılıklara dayanmasıyla belirgin bir şekilde karakterize edilmektedir. Gerçek ve modellenmiş yansıma arasındaki fark bir artış değere yol açmakta, pozitif kalıntılar duman ve toz gibi UV emici aerosollerin varlığına işaret ederken, bulutlar neredeyse sıfır kalıntılarla ilişkilendirilmektedirler. Bunların aksine, güçlü negatif kalıntılar, sülfat aerosolleri de dahil olmak üzere emici olmayan aerosolleri göstermektedir. Aİ’nin çok yönlülüğü, onu çöl tozu, volkanik kül ve orman yangını kaynaklı dumanı kapsayan aerosol bulutlarını izlemek için paha biçilmez bir araç haline getirmektedir (Zweers, 2018).

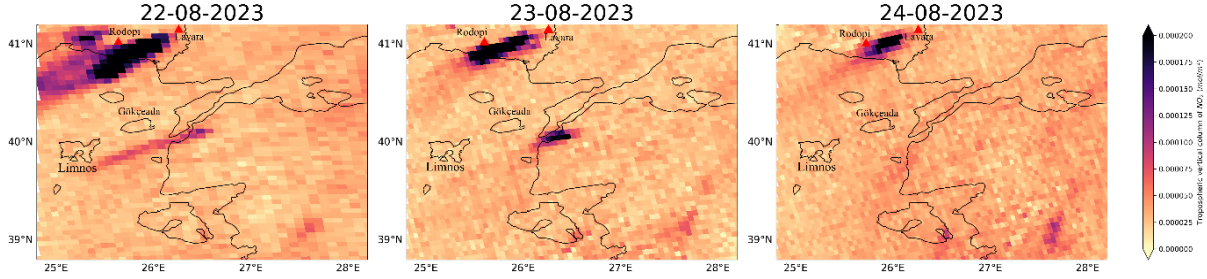


Şekil 6: Yangın esnasında atmosfere yayılan aerosol indeks değerleri

Şekil 6 yangın sırasında atmosferdeki Aİ değerlerini göstermektedir. 22 Ağustos tarihli görüntü incelendiğinde, Çanakkale yangın bölgesinden başlayarak yaklaşık 110 km güneybatıya Limnos adasının güneyine kadar ulaşan Aerosol değerleri net bir şekilde görülebilmektedir. Ayrıca aynı tarihlerde Yunanistan’da meydana gelen Rodopi ve Lavara yangınlarından atmosfere yayılan Aerosol değerleri de yine aynı görüntü içerisinde yer almaktadır. 23 Ağustos tarihli görüntüde ise Yunanistan’da meydana gelen yangınlar sonucu atmosfere yayılan Aerosollerin, tüm güney Trakya’yı, batıda Erdek, güney ve güneybatıda ise Gökçeada ve Limnos adasına kadar geniş bir alanda etkilediği görülmektedir. Aynı gün Çanakkale’de devam eden yangının yoğunluğunu artırarak Çanakkale şehri üzerinde bir Aerosol tabakası oluşturduğu gözlemlenmektedir. 24 Ağustos tarihli görüntü incelendiğinde ise Çanakkale yangının Aerosol etkisinin kaybolduğu, Yunanistan yangınlarının ise etkisini azalmış bir şekilde halen devam ettiği görülmektedir.

Son olarak, yangın sırasında açığa çıkan NO<sub>2</sub> kirletici parametresi konsantrasyonları üzerinde bir analiz yapılmıştır. Azot dioksit (NO<sub>2</sub>) ve azot oksit (NO), topluca azot oksitler (NO<sub>x</sub>) olarak adlandırılır ve dünya atmosferinde önemli eser gazlar olarak yer alır. Bu gazlar hem troposferde hem de stratosferde dağılım göstermektedir. Atmosfere salınımları, topraktaki mikrobiyolojik faaliyetler, orman yangınları ve yıldırım gibi doğal süreçlerin yanı sıra, özellikle fosil yakıtların ve biyokütle yanması gibi insan faaliyetlerinden de kaynaklanmaktadır. Gün ışığı koşullarında, ozon (O<sub>3</sub>) içeren bir fotokimyasal döngü NO'nun NO<sub>2</sub>'ye (veya tersi) dönüşümünü kolaylaştırır. Troposfer içindeki NO<sub>2</sub>'nin insan sağlığı üzerindeki doğrudan etkisi göz önüne alındığında, hava kalitesi konularında çok önemli bir rol üstlenmektedir (Geffen vd., 2022). Şekil 7, Çanakkale yangını sırasında atmosfere karışan NO<sub>2</sub> kirletici parametresinin troposferik dikey sütun yoğunluğunu göstermektedir. Aİ haritalarında olduğu gibi NO<sub>2</sub> kirletici parametresi Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden elde edilen bilgilere göre bölgede bulunan güneybatı yönlü ortalama hızı 25 km/sa, maksimum hızı ise 50 km/sa'ye ulaşan yoğun ve sert rüzgar sebebiyle güneybatı yönüne doğru yaklaşık 110 km'lik bir mesafeye saçılım göstermiştir. 22 Ağustos günü Çanakkale yangınının sebep olduğu NO<sub>2</sub>'nin troposferik toplam sütun yoğunluğu UA görüntülerinden 0.01286901 mol/m<sup>2</sup> olarak tespit edilmiştir. 23 Ağustos'ta ve sonrasında rüzgarın etkisinin azalmasıyla birlikte NO<sub>2</sub> değerleri herhangi bir yönde saçılım hareketi sergilemeyip Çanakkale kenti üzerinde yoğunlaşmıştır.

Bu güne ait tespit edilen troposferik toplam sütun yoğunluğu ise  $0.02108581 \text{ mol/m}^2$  dir. 24 Ağustos gününe ait görüntü incelendiğinde ise yangın kontrol alınmaya başlanmış olmasına rağmen, yangın bölgesinde ve çevresinde görüntü üzerinde herhangi bir  $\text{NO}_2$  yoğunluk değerine rastlanmamış olsa da troposferdeki toplam sütun yoğunluğu  $0.02624702 \text{ mol/m}^2$  olarak üç günlük değer içerisindeki en yüksek değer olarak tespit edilmiştir. Bunun sebebinin yangının kontrol altına alınmaya başlanmasıyla birlikte yangının sebep olduğu duman yoğunluğunun azalmasına rağmen atmosferdeki fotokimyasal döngü sebebiyle  $\text{NO}_2$  değerinin artmaya devam etmesi şeklinde yorumlayabilmek mümkündür.



Şekil 7:  $\text{NO}_2$  troposferik düşey sütun değerleri ( $\text{mol/m}^2$ )

#### 4. Sonuç ve Tartışma

Bu çalışmada 22 Ağustos 2023 günü Çanakkale’de meydana gelen ve 3 gün süren orman yangının neden olduğu tahribatın boyutu ve yangın nedeniyle atmosfere karışan hava kirlenici parametrelerinin takibinin yapılması amaçlanmıştır. Öncelikle yangının sınırlarını belirlemek için Sentinel-2 UA görüntüleri kullanılmıştır. Yangının öncesi ve sonrasına ait görüntülerin atmosferik penetrasyon bantlarının fark alma yöntemiyle tespit edilen sınırlarına göre, yangının sebep olduğu hasarı belirlemek için CORINE AÖ/AK verilerinden faydalanılmıştır. Hava kirlenici parametrelerini belirlemek için ise Sentinel-5P UA platformu ile elde edilen görüntüler incelenerek yangın sonrası atmosfere salınan kirlenici yoğunlukları belirlenmiş ve haritalandırılmıştır.

Orman yangınları, AÖ/AK’nın hızlı bir şekilde değişmesine veya tahrip olmasına neden olan doğal afetler arasında önemli bir faktördür. Çalışmada yapılan CBS analizleri  $4191.93 \text{ ha}$ ’lık çoğunlukla tarım arazisi ve ormanlık alana ait arazi örtüsünün tahrip olduğunu ortaya çıkarmıştır. Yangın sonrasında yapılan arazi çalışmaları ile Türkiye Cumhuriyeti Tarım ve Orman Bakanlığı tarafından yangından etkilenen alanın  $4080 \text{ ha}$ ’lık bir alan olduğu açıklanmıştır. Uydu görüntüleri ile entegre bir şekilde çalışan CBS ile hasar tespiti ve analizi, etkilenen arazi örtüsü detayında saatler içerisinde elde edilebilmektedir. Bu nedenle bu yöntemlerin afet yönetiminde etkili politika belirleme amacıyla hızlı karar vermeye olan katkıları kritik önemi ile ön plana çıkmaktadır. Bu durum, [de Rigo vd. \(2017\)](#), [Doerr ve Santín \(2016\)](#), [Flannigan vd. \(2006\)](#), [Kalabokidis vd. \(2013\)](#), [Ray vd. \(2019\)](#) ile [Khabarov vd. \(2016\)](#) dahil olmak üzere çeşitli araştırmacılar tarafından da ilgili çalışmalarda vurgulanmıştır.

Orman yangınlarının bir diğer önemli etkisi de kirlenici parametrelerin atmosfere dağılımına önemli katkıda bulunmasıdır. Orman yangınları sırasında meydana gelen duman emisyonu, atmosferdeki aerosol ve kirlenici parametre konsantrasyonlarında ani artışlara yol açmaktadır. Bu durum [Johnston vd. \(2012\)](#), [Lamarque vd. \(2010\)](#), [Lasslop vd. \(2020\)](#), [Tosca vd. \(2013\)](#), [van der Werf vd. \(2010\)](#), [Zhou vd. \(2021\)](#) ve [Ray vd. \(2019\)](#) tarafından yapılan araştırma çalışmalarında ele alınmıştır. Bu çalışmada yangın sebebiyle troposfere yayılan 3 günlük toplam  $\text{NO}_2$  değeri  $0.06020184 \text{ mol/m}^2$  olarak tespit edilmiştir. Bu değer kirlenici parametrenin troposferdeki dikey sütun dağılımıdır ve hava kalitesi izleme istasyonlarında ölçülen değerler ile karıştırılmamalıdır. Bu konsantrasyon değerlerinin düzenli bir şekilde takibinin yapılması yeryüzünde yaşayan canlıların sağlığı için son derece önemli bir konudur. Mevcut literatürdeki bu çalışmaların bulgularıyla uyumlu olarak, bu çalışma da benzer sonuçlar ortaya koymaktadır.

Günümüzde CBS, veri tabanlarının oluşturulması, çeşitli kaynaklardan toplanan verilerin işlenmesi, analiz edilmesi, sorgulanması ve sürekli olarak güncellenmesi için vazgeçilmez bir araç olarak durmaktadır. Aynı zamanda, UA, veri toplama ve analiz için güçlü bir yöntem olarak çalışmakta ve genellikle CBS ile birlikte çalışmaktadır. Hayati bir varlık olan bilgi, afet yönetimi ve müdahalesi alanında ön plana çıkmaktadır. Bu durum, bilgi üretmek ve analiz etmek için kullanılan CBS ve UA’nın afet yönetim sistemleri içinde ayrılmaz bileşenler olarak oynadıkları önemli rolün altını çizmektedir. Uydu görüntülerinden yararlanan CBS, afet yönetiminin her aşamasında fayda sağlamakta ve birçok ülkede afetlerin etkisini azaltmak için tercih edilen bir araç olarak ortaya çıkmaktadır. CBS ve UA’nın ortak becerisi, karar vericileri sivil korumayı güvence altına alan ihtiyatlı eylemlere yönlendirmektedir.

CBS’nin UA verileriyle desteklenen sinerjisi sayesinde afet sonrası senaryoların hızlı bir şekilde oluşturulması mümkün hale gelmektedir. Bu birleşme, hem bir afet olayının öncesinde, sırasında ve sonrasında karar verici kurum ve kuruluşların yanı sıra bu kararların uygulanmasından sorumlu olanlar için de geniş olanaklar sunmaktadır. Bu teknolojilerin bir araya gelmesi, planlama ve karar alma sürelerini kısaltırken aynı zamanda güçlü simülasyon yeteneklerini de beraberinde getirmektedir. Bu da sahadaki müdahalelerin doğruluğunu artırmakta ve bu tür sistemlerin benimsenmesi günden güne artmaktadır.



## Teşekkür

Yazar, çalışmanın veri setlerinden CORINE verisini sağlayan Kopernik Arazi İzleme Servisine (Copernicus Land Monitoring Service) ve Sentinel–2 ve 5P uydu görüntülerini sağlayan Avrupa Uzay Ajansı'na (European Space Agency) teşekkür eder.

## Kaynaklar

- Butt, E. W., Conibear, L., Reddington, C. L., Darbyshire, E., Morgan, W. T., Coe, H., Artaxo, P., Brito, J., Knote, C., & Spracklen, D. V. (2020). Large air quality and human health impacts due to amazon forest and vegetation fires. *Environmental Research Communications*, 2(9), Article 095001. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/abb0db>
- Çanakkale. (2006, Ağustos 12). In *Wikipedia*. <https://tr.wikipedia.org/wiki/%C3%87anakkale>
- Çanakkale Belediyesi. (t.y.). *Coğrafi yapı*. 28 Ağustos 2023'de <https://www.canakkale.bel.tr/tr/sayfa/1125-cografya-yapi> adresinden alındı.
- Çanakkale İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü. (t.y.). *Coğrafya*. 29 Ağustos 2023'de <https://canakkale.ktb.gov.tr/TR-70467/Cografya.Html> adresinden alındı.
- Çolak, E., & Sunar, F. (2020). Evaluation of forest fire risk in the Mediterranean Turkish forests: A case study of Menderes region, Izmir. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 45, Article 101479. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101479>
- Doerr, S. H., & Santín, C. (2016). Global trends in wildfire and its impacts: perceptions versus realities in a changing world. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 371(1696), Article 20150345. <https://doi.org/10.1098/rstb.2015.0345>
- Elvan, O. D., Birben, S., Özkan, U. Y., Yıldırım, H. T., & Türker, Y. Z. (2021). Forest fire and law: an analysis of Turkish forest fire legislation based on Food and Agriculture Organization criteria. *Fire Ecology*, 17(1), Article 12. <https://doi.org/10.1186/s42408-021-00102-7>
- Food and Agriculture Organization. (2022). *The State of the World's Forests 2022. Forest pathways for green recovery and building inclusive, resilient and sustainable economies*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). <https://doi.org/10.4060/cb9360en>
- Flannigan, M. D., Amiro, B. D., Logan, K. A., Stocks, B. J., & Wotton, B. M. (2006). Forest fires and climate change in the 21<sup>ST</sup> century. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 11(4), 847–859. <https://doi.org/10.1007/s11027-005-9020-7>
- Geffen, J. V., Eskes, H. J., Boersma, K. F., & Veefkind, J. P. (2022). *TROPOMI ATBD of the total and tropospheric NO<sub>2</sub> data products*. Royal Netherlands Meteorological Institute. <https://sentinel.esa.int/documents/247904/2476257/sentinel-5p-tropomi-atbd-no2-data-products>
- Giglio, L., & Roy, D. (2020). On the outstanding need for a long-term, multi-decadal, validated and quality assessed record of global burned area: caution in the use of advanced very high resolution radiometer data. *Science of Remote Sensing*, 2, Article 100007. <https://doi.org/10.1016/j.srs.2020.100007>
- Goldberg, D. L., Lu, Z., Streets, D. G., de Foy, B., Griffin, D., McLinden, C. A., Lamsal, L. N., Krotkov, N. A., & Eskes, H. (2019). Enhanced Capabilities of TROPOMI NO<sub>2</sub>: Estimating NO<sub>x</sub> from North American Cities and Power Plants. *Environmental Science & Technology*, 53(21), 12594–12601. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b04488>
- Greco, S. P., Sluser, B. M., & Mihailescu, B. C. (2019). Statistical approach of environmental quality management and political decision-making at local level: case study Iași city, Romania. *Environmental Engineering and Management Journal*, 19(3), 517–530. <https://doi.org/10.30638/eemj.2020.050>
- Jeong, U., & Hong, H. (2021). Assessment of tropospheric concentrations of NO<sub>2</sub> from the TROPOMI/Sentinel-5 precursor for the estimation of long-term exposure to surface NO<sub>2</sub> over South Korea. *Remote Sensing*, 13(10), Article 1877. <https://doi.org/10.3390/rs13101877>
- Johnston, F. H., Henderson, S. B., Chen, Y., Randerson, J. T., Marlier, M., DeFries, R. S., Kinney, P., Bowman, D. M., & Brauer, M. (2012). Estimated global mortality attributable to smoke from landscape fires. *Environmental Health Perspectives*, 120(5), 695–701. <https://doi.org/10.1289/ehp.1104422>
- Kalabokidis, K., Palaiologou, P., & Finney, M. (2013, July 1–4). *Fire behavior simulation in Mediterranean forests using the minimum travel time algorithm* [Conference presentation]. 4th Fire Behavior and Fuels Conference, St. Petersburg, Russia. [https://www.fs.usda.gov/rm/pubs\\_other/rmrs\\_2014\\_kalabokidis\\_k001.pdf](https://www.fs.usda.gov/rm/pubs_other/rmrs_2014_kalabokidis_k001.pdf)
- Khabarov, N., Krasovskii, A., Obersteiner, M., Swart, R., Dosio, A., San-Miguel-Ayanz, J., Durrant, T., Camia, A., & Migliavacca, M. (2014). Forest fires and adaptation options in Europe. *Regional Environmental Change*, 16(1), 21–30. <https://doi.org/10.1007/s10113-014-0621-0>
- Kolanek, A., Szymanowski, M., & Raczyk, A. (2021). Human activity affects forest fires: the impact of anthropogenic factors on the density of forest fires in Poland. *Forests*, 12(6), Article 728. <https://doi.org/10.3390/f12060728>
- Kolusu, S. R., Marsham, J. H., Mulcahy, J., Johnson, B., Dunning, C., Bush, M., & Spracklen, D. V. (2015). Impacts of Amazonia biomass burning aerosols assessed from short-range weather forecasts. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(21), 12251–12266. <https://doi.org/10.5194/acp-15-12251-2015>
- Lamarque, J. F., Bond, T. C., Eyring, V., Granier, C., Heil, A., Klimont, Z., Lee, D., Liousse, C., Mieville, A., Owen, B., Schultz, M. G., Shindell, D., Smith, S. J., Stehfest, E., Van Aardenne, J., Cooper, O. R., Kainuma, M., Mahowald, N., McConnell, J. R., . . . van Vuuren, D. P. (2010). Historical (1850–2000) gridded anthropogenic and biomass burning emissions of reactive gases and aerosols: methodology and application. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(15), 7017–7039. <https://doi.org/10.5194/acp-10-7017-2010>
- Lasslop, G., Hantson, S., Harrison, S. P., Bachelet, D., Burton, C., Forkel, M., Forrest, M., Li, F., Melton, J. R., Yue, C., Archibald, S., Scheiter, S., Arneeth, A., Hickler, T., & Sitch, S. (2020). Global ecosystems and fire: Multi-model assessment of fire-induced tree-cover and carbon storage reduction. *Global Change Biology*, 26(9), 5027–5041. <https://doi.org/10.1111/gcb.15160>

- Le, T. H., Thanh Nguyen, T. N., Lasko, K., Ilavajhala, S., Vadrevu, K. P., & Justice, C. (2014). Vegetation fires and air pollution in Vietnam. *Environmental Pollution*, 195, 267–275. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.07.023>
- Lerma-Arce, V., Yagüe-Hurtado, C., Van den Berg, H., García-Folgado, M., Oliver-Villanueva, J. V., Benhalima, Y., Marques-Duarte, I., Acácio, V., Rego, F., López-Senespleda, E., Menéndez-Miguélez, M., Ruiz-Peinado, R., Petillon, T., Jalabert, S., Carbó-Valverde, E., Gimeno-García, E., Aleix-Amurrio, R., & Lorenzo-Sáez, E. (2023). Development of a model to estimate the risk of emission of greenhouse gases from forest fires. *Fire*, 6(1), Article 8. <https://doi.org/10.3390/fire6010008>
- Magro, C., Nunes, L., Gonçalves, O., Neng, N., Nogueira, J., Rego, F., & Vieira, P. (2021). Atmospheric trends of CO and CH<sub>4</sub> from extreme wildfires in Portugal using Sentinel-5P TROPOMI Level-2 data. *Fire*, 4(2), Article 25. <https://doi.org/10.3390/fire4020025>
- Mansoor, S., Farooq, I., Kachroo, M. M., Mahmoud, A. E. D., Fawzy, M., Popescu, S. M., Alyemeni, M., Sonne, C., Rinklebe, J., & Ahmad, P. (2022). Elevation in wildfire frequencies with respect to the climate change. *Journal of Environmental Management*, 301, Article 113769. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113769>
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (2023). *Meteoroloji Genel Müdürlüğü Resmi İstatistikler*. 29 Ağustos 2023'de <https://www.mgm.gov.tr/Veridegerlendirme/Il-ve-Ilceler-Istatistik.aspx?M=CANAKKALE> adresinden alındı.
- Minallah, N., Khan, M., Khan, W., Sethi, M. A., & Khan, A. S. (2021). Impact analysis of wildfire by means of satellite based cyber-physical system. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 10(6), 325–335.
- Orman Genel Müdürlüğü. (2021). *2020 Türkiye orman varlığı*. T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Orman Genel Müdürlüğü.
- Ray, T., Malasiya, D., Dar, J. A., Khare, P. K., Khan, M. L., Verma, S., & Dayanandan, A. (2019). Estimation of greenhouse gas emissions from vegetation fires in central India. *Climate Change and Environmental Sustainability*, 7(1), Article 32. <https://doi.org/10.5958/2320-642x.2019.00005.x>
- Reid, C. E., Brauer, M., Johnston, F. H., Jerrett, M., Balmes, J. R., & Elliott, C. T. (2016). Critical review of health impacts of wildfire smoke exposure. *Environmental Health Perspectives*, 124(9), 1334–1343. <https://doi.org/10.1289/ehp.1409277>
- Rigo, D., Libertà, G., Durrant, T. H., Vivancos, T. A., & San-Miguel-Ayanz, J. (2017). *Forest fire danger extremes in Europe under climate change: variability and uncertainty* (EUR 28926 EN, JRC108974). Publications Office of the European Union. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC108974>
- Roy, D. P., Huang, H., Boschetti, L., Giglio, L., Yan, L., Zhang, H. H., & Li, Z. (2019). Landsat-8 and Sentinel-2 burned area mapping - A combined sensor multi-temporal change detection approach. *Remote Sensing of Environment*, 231, Article 111254. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111254>
- Tosca, M. G., Randerson, J. T., & Zender, C. S. (2013). Global impact of smoke aerosols from landscape fires on climate and the Hadley circulation. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(10), 5227–5241. <https://doi.org/10.5194/acp-13-5227-2013>
- van der Werf, G. R., Randerson, J. T., Giglio, L., Collatz, G. J., Mu, M., Kasibhatla, P. S., Morton, D. C., DeFries, R. S., Jin, Y., & van Leeuwen, T. T. (2010). Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997–2009). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(23), 11707–11735. <https://doi.org/10.5194/acp-10-11707-2010>
- Volkova, L., Roxburgh, S. H., Surawski, N. C., Meyer, C. M., & Weston, C. J. (2019). Improving reporting of national greenhouse gas emissions from forest fires for emission reduction benefits: An example from Australia. *Environmental Science & Policy*, 94, 49–62. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.12.023>
- Wooster, M. J., Roberts, G. J., Giglio, L., Roy, D. P., Freeborn, P. H., Boschetti, L., Justice, C., Ichoku, C., Schroeder, W., Davies, D., Smith, A. M., Setzer, A., Csiszar, I., Strydom, T., Frost, P., Zhang, T., Xu, W., de Jong, M. C., Johnston, J. M., . . . San-Miguel-Ayanz, J. (2021). Satellite remote sensing of active fires: History and current status, applications and future requirements. *Remote Sensing of Environment*, 267, Article 112694. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112694>
- Yarragunta, Y., Srivastava, S., Mitra, D., & Chandola, H. C. (2020). Influence of forest fire episodes on the distribution of gaseous air pollutants over Uttarakhand, India. *GIScience & Remote Sensing*, 57(2), 190–206. <https://doi.org/10.1080/15481603.2020.1712100>
- Zheng, Yang, Wu, & Marinello. (2019). Spatial variation of NO<sub>2</sub> and its impact factors in China: an application of Sentinel-5P products. *Remote Sensing*, 11(16), Article 1939. <https://doi.org/10.3390/rs11161939>
- Zhou, Y., Yan, H., & Luo, J. J. (2021). Impacts of Amazon fire aerosols on the subseasonal circulations of the mid-high latitudes. *Frontiers in Earth Science*, 8, Article 609554. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.609554>
- Zielinski, T., Petelski, T., Strzalkowska, A., Pakszys, P., & Makuch, P. (2016). Impact of wild forest fires in Eastern Europe on aerosol composition and particle optical properties. *Oceanologia*, 58(1), 13–24. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2015.07.005>
- Zweers, D. C. S. (2022). *TROPOMI ATBD of the UV aerosol index*. Royal Netherlands Meteorological Institute. <https://sentinel.esa.int/documents/247904/2476257/Sentinel-5P-TROPOMI-ATBD-UV-Aerosol-Index.pdf>