



T.C.  
**ÇEVRE, ŞEHİRCİLİK VE İKLİM  
DEĞİŞİKLİĞİ BAKANLIĞI**  
METEOROLOJİ GENEL MÜDÜRLÜĞÜ



**TÜRKİYE VE ÇEVRESİ  
TOZ TAŞINIMI RAPORU  
(2003-2025 DÖNEMİ)**



Ankara, 2026





T.C.

ÇEVRE, ŞEHİRCİLİK VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ BAKANLIĞI  
METEOROLOJİ GENEL MÜDÜRLÜĞÜ



# Türkiye ve Çevresi Toz Taşınımı Raporu (2003-2025 Dönemi)

Araştırma Dairesi Başkanlığı  
Atmosfer Modelleri Şube Müdürlüğü

Ankara, 2026



## ÖNSÖZ



Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM), sahip olduğu otomatik gözlem sistemleri ile atmosferi anlık olarak izlemekte; kuvvetli meteorolojik olayların yol açabileceği olumsuz etkilerin en aza indirilmesi ve gerekli önlemlerin zamanında alınabilmesi amacıyla etki temelli, renk kodlu meteorolojik erken uyarılar hazırlayarak halkımızı bilgilendirmektedir.

Meteoroloji Genel Müdürlüğü yaklaşık olarak yüz yıllık meteorolojik veri bankası konumundadır. Kurumumuz sahip

olduğu bu veri setini ülke menfaatleri doğrultusunda üniversiteler, araştırma kuruluşları ve diğer kamusal kuruluşlarla tam bir eşgüdüm içerisinde kullanmakta ve ortak faaliyetlerde bulunmaktadır.

İklim değişikliğinin olumsuz etkilerine en çok maruz kalacak bölgelerden biri olan Akdeniz Havzası'nda yer alan Türkiye, bu etkileri her geçen gün daha yoğun bir şekilde yaşamaktadır. Özellikle 2000'li yıllardan itibaren sayı, şiddet ve sıklığında artış gösteren meteorolojik karakterli afetler, meteorolojik tahmin ve erken uyarıların önemini daha da artırmıştır. Sel ve taşkınlar, orman yangınları ve kuraklık gibi olayların yanı sıra sınır aşan atmosferik hadiselerden biri olan kum ve toz taşınımı da hem çevresel hem de sosyo-ekonomik etkileri nedeniyle öne çıkmaktadır. Modern bilgi ve teknoloji çağında doğa olaylarının oluşumuna engel olunamamakla birlikte, bu olayların afete dönüşmesini önlemek, can ve mal kayıplarını azaltmak ve toplumsal hayat üzerindeki etkilerini en aza indirmek; Kurumumuzca yürütülen gözlem, tahmin ve erken uyarı çalışmaları sayesinde mümkün olabilmektedir. Bu kapsamda atmosfer modelleri, hava kirliliği ve asit yağmurları, hidrometeoroloji, tıbbi meteoroloji ve çevre konularında da çalışmalar sürdürülmektedir.

İnsan sağlığı üzerinde olumsuz etkiler oluşturan ve günümüzde sıkça gündeme gelen meteorolojik olaylardan biri olan kum ve toz fırtınaları kapsamında, Kurumumuzca her yıl "Türkiye ve Çevresi Toz Taşınımı Raporu" hazırlanmaktadır. Bu raporda, tozların karakteristik özelliklerinin daha iyi anlaşılmasına ve toz taşınımının mevcut ve gelecekteki olumsuz etkilerinin azaltılmasına yardımcı olunması hedeflenmiştir.

**Volkan Mutlu COŞKUN**

**METEOROLOJİ GENEL MÜDÜRÜ**



## ÖZET

Dünya ekosistemi için büyük önem taşıyan ve atmosferdeki en baskın aerosol çeşitlerinden biri olan mineral toz partiküllerinin (çöl tozları) görece büyük olanları toz kaynak alanlarının yakınlıklarına çökelirken, küçük olanlar atmosferin üst tabakalarına yükselerek binlerce kilometre mesafeye kadar taşınabilmektedir.

Dünyadaki başlıca toz kaynakları; Afrika (Sahra Çölü), Arabistan Yarımadası, Asya (Gobi ve Taklamakan Çölleri), Güney Amerika ile Avustralya'da bulunan çöllerdir. Sahra bölgesinden atmosfere salınan yıllık toz miktarı, tüm kaynaklardan salınan miktarın yaklaşık yarısını oluşturur. Sahra'dan sonra Orta Doğu ile Orta ve Güney Asya, en önemli diğer toz kaynak alanlarıdır. Kuzey Afrika ve Orta Doğu kaynaklı tozlar, dünya yıllık toz emisyonlarının %80'inden fazlasını oluşturmaktadır. Ülkemiz de coğrafi konumu itibarı ile dünyadaki en önemli iki toz kaynağı olan Afrika ve Orta Doğu kaynaklı çöl tozlarının etkisi altında bulunmaktadır.

Bu kapsamda, bağlı bulunduğumuz Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından toz taşınımı konusunda Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı uygulaması ile Türkiye'de hava kalitesi konusunda kamuoyu bilgilendirilerek hava kalitesini iyileştirmeye yönelik politikalar geliştirilmektedir.

Bununla birlikte; Ülkemiz, Orta Doğu, Kuzey Afrika ve Orta Asya ülkeleri için toz taşınımı tahmin ürünleri üretilmekte ve Kurumumuzun internet sayfasında kamuoyuyla paylaşılmaktadır. Tahminler, yer seviyesi toz konsantrasyonlarını ve atmosferdeki toz aerosollerinin dikey derinliklerini (Toz Aerosol Optik Derinliği, AOD) içermektedir.

Kum ve toz fırtınaları ile atmosfere karışan çöl tozlarının uzun mesafeler kat ederek okyanus ve Amazonlar'a değerli mineralleri taşıdığı ve gübreleme etkisi yaptığı bilinmekle birlikte; insan sağlığı, ulaşım sektörü ve sosyo-ekonomik hayat üzerinde olumsuz etkilerinin bulunduğu da bir gerçektir. Özellikle kronik sağlık sorunları yaşayanlar, hamile, yaşlı ve çocuklar için ciddi bir risk teşkil etmektedir. Toz taşınımının hava kirliliğini artırması sonucunda solunum yolu hastalıkları, enfeksiyonlar ve alerjik reaksiyonlarda artış gözlenmektedir. Kum ve toz fırtınalarının, doğru bir şekilde tahmin edilmesi ve erken uyarı sistemlerinin devreye girmesi, yetkililerin bu konuda gerekli önlemleri alması, halk sağlığının korunması ve olumsuz etkilerle mücadele edilebilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada 2003 – 2025 dönemi uzun yıllar Aerosol Optik Derinlik (AOD) ve Angstrom Exponent (AE) alansal ortalamaları incelenmiş; tozların karakteristik özelliklerinin daha iyi anlaşılmasına ve toz taşınımının mevcut ve gelecekteki olumsuz etkilerinin azaltılmasına yardımcı olunması hedeflenmiştir.

Yapılan değerlendirmeler sonucunda Türkiye genelinde aerosol yoğunluğu yıllar içinde değişkenlik göstermekle birlikte, son yıllarda hafif bir azalma eğilimi sergilemektedir. Suriye ve Irak llerinden taşınan mineral tozların ağırlıklı olarak Türkiye'nin güneydoğusunu etkilediği ve bu bölgenin en yüksek aerosol yüküne sahip olduğu görülmektedir. Nitekim 2003–2025 döneminde kuvvetli ve ekstrem tozlu günlerin en fazla görüldüğü bölge, yıllık ortalama yaklaşık 25 gün ile Güneydoğu Anadolu olurken, Türkiye genelinde yıllık ortalama tozlu gün sayısı yaklaşık 9 gün olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, lkemizin tüm bölgelerinde en yoğun toz olaylarının özellikle ilkbahar aylarında (Nisan–Mayıs) gerçekleştiği, yaz ve kiş aylarında ise tozlu gün sayılarının azaldığı belirlenmiştir.

# İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ .....	1
ÖZET .....	3
İÇİNDEKİLER .....	5
ŞEKİLLER VE TABLOLAR .....	6
1. TÜRKİYE VE ÇEVRESİ 2003-2025 DÖNEMİ TOZ TAŞINIMI AEROSOL ANALİZLERİ .7	
1.1 Atmosferde Bulunan Aerosoller (Partikül Maddeler) .....	7
1.2. Kum ve Toz Fırtınaları .....	8
1.3. Dünyadaki Toz Kaynak Alanları.....	10
2. GÖZLEM VERİLERİ VE YÖNTEM .....	13
3. HESAPLAMALAR VE BULGULAR.....	14
3.1. Küresel Toz Taşınımı Aerosol Analizi ve Değerlendirmeleri.....	14
3.2. Türkiye Toz Taşınımı Aerosol Analizi ve Değerlendirmeleri .....	20
3.2.1. Aerosollerin Alansal Değişimi.....	20
3.2.2. Aerosollerin Zamansal Değişimi .....	21
3.2.3. Kuvvetli ve Ekstrem Tozlu Gün Sayıları.....	26
4. MGM TOZ TAŞINIMI TAHMİNLERİ.....	31
KAYNAKLAR .....	32

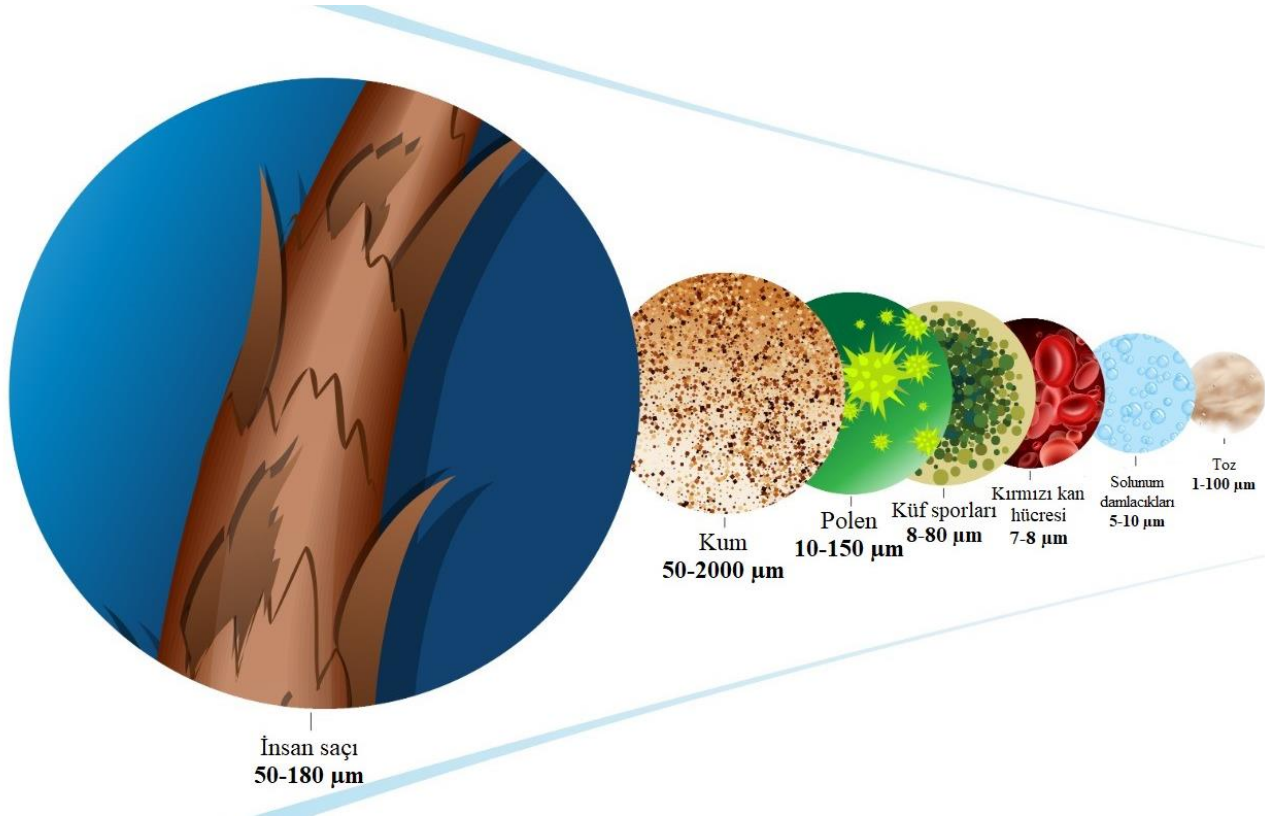
# ŞEKİLLER VE TABLOLAR

<b>Şekil 1.</b> Atmosferde Bulunan Aerosollerin Büyüklükleri (World Air Quality Report, 2022) .....	7
<b>Şekil 2.</b> Afrika, Orta Doğu ve Asya'daki Önemli Toz Kaynak Alanları (Muhs ve diğerleri, 2014).....	11
<b>Şekil 3.</b> Atmosfere Atılan Toz Miktarları (De Longueville ve diğerleri, 2010).....	12
<b>Şekil 4.</b> Büyük Akdeniz Havzası Alanı.....	13
<b>Şekil 5.</b> Çalışma Bölgelerinin Yıllık Alansal Ortalama AOD Değişimleri.....	15
<b>Şekil 6.</b> Çalışma Bölgelerinin Yıllık Alansal Ortalama AE Değişimleri.....	17
<b>Şekil 7.</b> Çalışma Bölgelerinin Aylık Alansal Ortalama AOD Değişimleri.....	18
<b>Şekil 8.</b> Çalışma Bölgelerinin Aylık Alansal Ortalama AE Değişimleri.....	19
<b>Şekil 9.</b> Türkiye Uzun Yıllar Aerosol Optik Derinliği (AOD) Ortalamaları.....	20
<b>Şekil 10.</b> Türkiye Uzun Yıllar Angstrom Exponent (AE) Ortalamaları.....	21
<b>Şekil 11.</b> AOD ve AE Analizi Yapılan Bölgeler.....	22
<b>Şekil 12.</b> Türkiye Yıllık Alansal Ortalama Aerosol Optik Derinliği (AOD) Değişimleri.....	23
<b>Şekil 13.</b> Türkiye Yıllık Alansal Ortalama Angstrom Exponent (AE) Değişimleri.....	24
<b>Şekil 14.</b> Türkiye Aylık Alansal Ortalama Aerosol Optik Derinliği (AOD) Değişimleri.....	25
<b>Şekil 15.</b> Türkiye Aylık Alansal Ortalama Angstrom Exponent (AE) Değişimleri.....	25
<b>Şekil 16.</b> Türkiye'de Bölgelerin Yıllara Göre Kuvvetli ve Ekstrem Tozlu Gün Sayıları.....	28
<b>Şekil 17.</b> Türkiye'de Bölgelerin Aylara Göre Kuvvetli ve Ekstrem Tozlu Gün Sayıları.....	29
<b>Tablo 1.</b> AB, Güncellenmiş Direktife Göre Ortam Hava Kalitesi Standartları .....	8
<b>Tablo 2.</b> Çöllerden Atmosfere Atılan Toz Emisyonları (Tanaka ve Chiba, 2006) .....	12
<b>Tablo 3.</b> Çalışma Bölgeleri Alansal Ortalama AOD Değerlerinin Yıllık Değişimi.....	15
<b>Tablo 4.</b> Çalışma Bölgeleri Alansal Ortalama AE Değerlerinin Yıllık Değişimi.....	16
<b>Tablo 5.</b> Çalışma Bölgeleri Alansal Ortalama AOD Değerlerinin Aylık Değişimi (2003-2025).....	18
<b>Tablo 6.</b> Çalışma Bölgeleri Alansal Ortalama AE Değerlerinin Aylık Değişimi (2003-2025) .....	19
<b>Tablo 7.</b> Çalışma Bölgeleri Alansal Ortalama AOD Değerlerinin Yıllık Değişimi.....	22
<b>Tablo 8.</b> Çalışma Bölgeleri Alansal Ortalama AOD Değerlerinin Aylık Değişimi (2003-2025).....	24
<b>Tablo 9.</b> Türkiye'de Bölgelerin Yıllara Göre Kuvvetli ve Ekstrem Tozlu Gün Sayıları (2003-2025) .....	27
<b>Tablo 10.</b> Türkiye'de Bölgelerin Aylara Göre Kuvvetli ve Ekstrem Tozlu Gün Sayıları (2003-2025) .....	29
<b>Tablo 11.</b> Türkiye'de Bölgelere Göre Yıllık Ortalama Kuvvetli ve Ekstrem Tozlu Gün Sayıları .....	30

# 1. TÜRKİYE VE ÇEVRESİ 2003-2025 DÖNEMİ TOZ TAŞINIMI AEROSOL ANALİZLERİ

## 1.1 Atmosferde Bulunan Aerosoller (Partikül Maddeler)

Aerosoller (partikül maddeler), atmosferde katı ve sıvı halde asılı olan küçük parçacıklar olarak tanımlanmaktadır. Atmosferdeki partikül maddeler ile insan saçı, kum, polen, küf sporları, kırmızı kan hücresi, solunum damlacıklarının boyutları Şekil 1’de kıyaslanmıştır.



Şekil 1. Atmosferde Bulunan Aerosollerin Büyüklükleri (World Air Quality Report, 2022)

Atmosferde bulunan su buharının, yoğuşma çekirdeği olarak aerosollerin üzerinde yoğuşması ile bulutların oluşumuna katkısı olduğu bilinmektedir. Bu küçük parçacıklar, yağmur ve kar yağışı şeklinde yeryüzüne ulaşırlar.

Partikül maddeler, kaynaklarına göre doğal veya insan kaynaklı (antropojenik) olarak adlandırılır. Deniz spreyleri, çöl tozları ve volkanlar başlıca doğal kaynaklar olarak bilinirken endüstriyel veya evsel yanma, ulaştırma, tarım, inşaat ve madencilik gibi insan faaliyetleri, antropojenik kaynaklar olarak tanımlanır.

Atmosferdeki partikül maddeler; kaynakları, büyüklükleri, çeşitli fiziksel ve kimyasal özellikleriyle, insan sağlığı üzerinde olumsuz etkilere sahiptir. Antropojenik aerosoller, genellikle, doğal kaynaklardan bırakılanlara göre çok daha küçüktür ve insan sağlığı açısından daha zararlıdır.

## 1.2. Kum ve Toz Fırtınaları

Atmosferdeki en baskın aerosol çeşitlerinden biri olan mineral toz partikülleri (çöl tozları), dünya ekosistemi için büyük önem taşır. Toz taşınımının temel nedeni, kuraklık ve çölleşme olarak bilinmektedir. Çöllerden kalkan tozlar, atmosferin üst tabakalarına yükselerek uzun mesafeler kat eder. Görece daha büyük toz parçacıkları kaynak alanlarının yakınlarında çökelirken, küçük olanlar ise binlerce kilometre yol kat edebilmektedir.

Türkiye, “Tozlu Kuşak” olarak ifade edilen Afrika, Orta Doğu ve Asya çöllerinin neredeyse tam ortasında yer almaktadır. Bu durum, Orta Doğu ve Afrika ile birlikte nadiren de olsa Orta Asya’dan taşınan çöl tozlarına maruz kalınmasına sebep olmaktadır. Çöl tozları hava kalitesini olumsuz yönde etkilemekte, önemli sağlık sorunlarına yol açmakta, ekonomik kayıplara ve uluslararası siyasi sorunlara yol açmaktadır. Suriye ve Irak sınırına yakın yerleşimlerimiz başta olmak üzere, Güneydoğu Anadolu Bölgesi ve Konya - Karaman Havzası toz taşınımından en fazla etkilenen yörelerimizdir (Dündar, 2019).

Yapılan çalışmalarda, ülkemize taşınan çöl kökenli tozların miktarı milyonlarca tonla ifade edilmektedir. Uzun dönemli çalışmalar, ortalama toz yükünün yıllık 20 milyon ton seviyesine ulaştığını göstermektedir. Anadolu’ya taşınan tozların % 80’e varan kısmı ilkbahar ayları içerisinde ve her taşınım olayı birkaç günlük periyotlar halinde gerçekleşmektedir (Şengün ve Kiranşan, 2012).

Avrupa Birliği (AB) tam üyelik süreci kapsamında, kentsel hava kalitesinin iyileştirilmesi ve mevzuatın AB normlarıyla uyumlu hale getirilmesi amacıyla Türkiye’de 2019 yılında önemli bir düzenleme yapılmış; 24 saatlik ortalama PM10 sınır değeri, o dönem AB’de uygulanan seviye olan 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  olarak belirlenmiştir. Bu sınır değer bir takvim yılı içerisinde en fazla 35 gün aşılmasına izin verilmektedir. Söz konusu düzenleme halen yürürlükte olmakla birlikte, Avrupa Birliği 2024 yılında hava kalitesi mevzuatında PM10’a ilişkin limitleri önemli ölçüde sıkılaştırma yönünde adımlar atmıştır. Bu kapsamda, 24 saatlik PM10 için belirlenen günlük sınır değer 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ’te 45  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ’e düşürülmüş, bir yıl içinde izin verilen aşım sayısı ise 35 günden 18 güne indirilmiştir. Bununla birlikte, yıllık ortalama PM10 sınır değeri de %50 oranında azaltılarak 40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ’ten 20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  seviyesine çekilmiştir (Tablo 1). Söz konusu düzenlemeler, hava kirliliğinin sağlık üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmayı hedeflemektedir (European Environment Agency, 2025).

**Tablo 1.** AB Direktifine Göre Ortam Hava Kalitesi Standartları

	Ortalama Süre	Limit Değerler	Yılda Limit Aşım Sayısı
PM 2.5	1 gün	25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	18 gün/yıl
	1 yıl	10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	-
PM 10	1 gün	45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	18 gün/yıl
	1 yıl	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	-

Türkiye’de 2025 yılı itibarıyla PM10 için Avrupa Birliği’nde öngörülen daha düşük sınır değerler henüz mevzuata dâhil edilmemiştir. Bunun temel nedenlerinden biri, Sahra ve Orta Doğu kaynaklı çöl tozu taşınımlarının Türkiye’de, özellikle Akdeniz havzasındaki diğer ülkelerde olduğu gibi, PM10 seviyelerini doğal olarak yükselterek hava kalitesi standartlarının sağlanmasını güçleştirmesidir.

AB normlarına göre; eğer sınır ötesi toz taşınımı gibi yerleşim birimi dışından kaynaklanan doğal bir PM10 kaynağının olduğu ispatlanır ve bu kaynağın kentsel hava kalitesine olan katkısı belirlenirse, bu miktar, sınır değerine dâhil edilmemektedir. Bu nedenle, özellikle Afrika ve Orta Doğu başta olmak üzere, Türkiye dışından ve içinden gerçekleşecek toz taşınımlarının izlenmesi, tahmin edilmesi ve miktarlarının hesaplanması, hem hava kalitesi yönetimi hem de mevzuat uyum süreci açısından kritik bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır (Dündar, 2019).

Kuraklık ve olağanüstü kuraklık gibi gelecekte yaşanacak ani iklim olaylarında tozun etkisi belirsizdir. Bunun nedeni ise kısmen atmosferdeki toz emisyonlarının ve toz yüklenme miktarlarının iklim değişikliğine olan etkisinin oldukça belirsiz olmasıdır (Tegen ve Schepanski, 2018; Webb ve Pierre, 2018). Gelecekte çöl tozlarının iklim değişikliğine etkisinin tahmin edilmesinde yaşanan zorluğun altında ise bu tozların; emisyonların, arazi kullanımı/arazi örtüsü, kuraklaşma, iklim değişikliğine ekolojik tepkiler vb. arazi özelliklerinin ve atmosferin durumundaki değişikliklere bağlı olduğu gerçeği yatmaktadır (Tegen ve Schepanski, 2018). Küresel olarak toz konsantrasyonunun gelecekte artan bir eğilim izleyeceğine dair kanıtlar olsa da (Allen ve diğerleri, 2016; Tegen ve Schepanski, 2018) toz konsantrasyonundaki değişim, büyük ölçüde yağış düzenlerindeki ve atmosferik dolaşımdaki değişikliklere bağlıdır (Allen ve diğerleri, 2016; Kok ve diğerleri, 2018).

Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC), başlıca iklim değişkenlerinden biri olan atmosferik aerosollerin önemli bir bileşeni olarak tozu kabul etmektedir. Boyutlarına, türlerine ve konumlarına bağlı olarak doğal ve antropojenik aerosoller, güneş radyasyonunu soğurarak ve yansıtarak dünyanın radyasyon bütçesini etkilemektedir (NEO, 2024). IPCC’nin güncel iklim öngörülerine göre, kuraklık hadisesinin sıklığının ve şiddetinin artmasıyla birlikte, kum ve toz fırtınalarının daha yoğun yaşanması beklenmektedir.

Güncel iklim projeksiyonları, Türkiye'nin gelecekte önemli sıcaklık artışları ve yağış azalmasıyla karşı karşıya kalacağını göstermektedir. IPCC (2021)’ye göre küresel ortalama sıcaklıklar 1°C’ı aşarken Türkiye’de bu artış 1.5°C’ı geçmiştir. Rapor; ülkemizin tümü için sanayi öncesi döneme göre 5°C’a varan sıcaklık artışı ve yine ülkenin güney ve batı kesimleri için %30'lara varan yağış azalması öngörmektedir.

Literatürde, özellikle demir bakımından zengin çöl tozlarının, okyanus ve deniz ekosistemlerini desteklediği, benzer şekilde karasal ekosistemler üzerinde de olumlu etkiler yaratabildiği belirtilmektedir (Rodríguez ve diğerleri, 2023). Ayrıca atmosferde bulunan su buharı, yoğunlaşma

çekirdeği görevi gören aerosol parçacıkları üzerinde yoğunlaşarak bulut oluşum sürecine katkı sağlamaktadır. Aerosollerin sayısı, boyutu ve kimyasal bileşimi, bulut damlacıklarının oluşumunu ve gelişimini doğrudan etkileyerek bulutların mikrofiziksel özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu etkileşim, yalnızca bulut oluşumunu değil, aynı zamanda yağış süreçlerini, bulutların optik özelliklerini ve dolaylı olarak iklim sistemini de etkilemektedir. Bu yönleriyle mineral tozlar, iklim sistemi ve ekosistemler açısından yalnızca bir kirletici değil, aynı zamanda doğal bir taşıyıcı olarak da değerlendirilmektedir.

Bununla birlikte, kum ve toz fırtınalarının olumsuz etkileri, küresel ölçekte giderek daha belirgin hale gelmektedir. Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO) raporları, kum ve toz fırtınalarının insan sağlığı, ekonomi ve ekosistemler üzerinde olumsuz etkiler yaratarak günümüzde 150'den fazla ülkede yaklaşık 330 milyon insanı etkilediğini ortaya koymaktadır (WMO, 2025). Rüzgârlarla taşınan toz partikülleri, çoğu zaman kaynak alanlarından binlerce kilometre uzaklıktaki bölgelerde bile nüfusun günlük maruziyetine neden olmaktadır.

Kum ve toz fırtınalarına maruz kalan bireylerin günlük yaşamı önemli ölçüde olumsuz etkilenmektedir. Özellikle solunum ve kalp-damar hastalığı bulunan bireyler, yaşlılar ve çocuklar, bu olaylara karşı en hassas gruplar arasında yer almaktadır. Afrika'da yapılan çalışmalarda, toz fırtınaları ile çocuklarda görülen menenjit vakaları arasında anlamlı bir ilişki bulunduğu ortaya konularak, bu doğal olayların halk sağlığı üzerindeki riskleri açıkça gösterilmiştir (Perez, 2010).

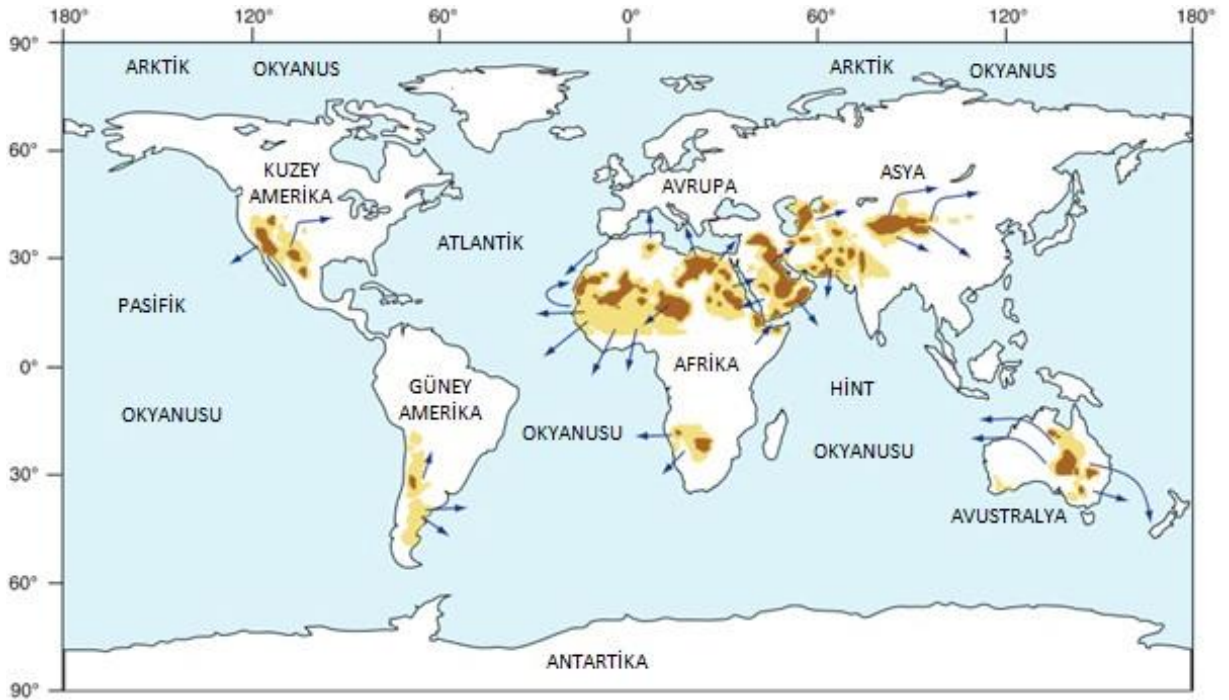
Ayrıca toz fırtınaları, görüş mesafesini ciddi biçimde düşürerek kara, hava ve deniz ulaşımını da olumsuz yönde etkilemektedir. Toz kaynak alanlarına yakın bölgelerde, fırtına dönemlerinde havaalanı operasyonlarının durdurulması, karayollarında ise can ve mal kayıplarına yol açabilen trafik kazalarının artması sıkça karşılaşılan sonuçlar arasında yer almaktadır. Bu durum, kum ve toz fırtınalarının yalnızca çevresel değil, aynı zamanda sosyo-ekonomik bir risk unsuru olduğunu da ortaya koymaktadır.

### **1.3. Dünyadaki Toz Kaynak Alanları**

Atmosfere karışan toz emisyonlarının büyük bölümü doğal toz kaynak alanlarından salınmakla birlikte, insan faaliyetlerinin küresel toz bütçesi üzerindeki rolü giderek daha belirgin hale gelmektedir (Ginoux ve diğerleri, 2012). Yapılan modelleme çalışmalarına göre, atmosfere salınan toplam toz yükünün yaklaşık %5–60'lık kısmı antropojenik kökenlidir ve bu oran, kullanılan yöntemler ve ölçeklere bağlı olarak geniş bir belirsizlik aralığına sahiptir (Siyu Chen ve diğerleri, 2023). Paleo-toz kayıtları; arazi kullanımındaki değişimler, tarımsal faaliyetler ve arazi bozulumu gibi insan kaynaklı etkilerin, sanayi öncesi dönemden (1750) 20. yüzyılın sonlarına kadar küresel toz emisyonlarını yaklaşık iki katına çıkarmış olabileceğini göstermektedir (Hooper ve Marx, 2018).

Dünya'daki başlıca toz kaynak alanları; Afrika (Sahra Çölü), Arabistan Yarımadası, Asya (Gobi - Taklamakan Çölleri) ile Güney Amerika ve Avustralya'da bulunan çöllerdir. Toz emisyonları ve taşınım süreçleri; rüzgâr hızı, yağış rejimi ve bitki örtüsündeki değişimler gibi meteorolojik ve çevresel faktörler tarafından kontrol edilmektedir (Ridley ve diğerleri, 2014, Wang ve diğerleri, 2015, Pu ve Ginoux, 2018). Bu süreçler sonucunda her yıl Dünya'dan atmosfere salınan toz miktarı yaklaşık olarak 2 milyar ton civarındadır (De Longueville ve diğerleri, 2010; WMO, 2025). Atmosfere salınan toplam yıllık toz miktarının yaklaşık yarısını oluşturan Sahra Çölü, dünyanın ve özellikle kuzey yarımkürenin en önemli ve baskın toz kaynağı konumundadır (Awadh, 2023). Sahra'dan sonra gelen önemli toz kaynak alanları sırasıyla Orta Doğu ile Orta ve Güney Asya'dır. Son araştırmalara göre, Kuzey Afrika ve Orta Doğu'dan kaynaklanan toz emisyonları birlikte değerlendirildiğinde, dünya genelindeki yıllık toz salımlarının %80'inden fazlasını oluşturmakta ve kıtalar ile okyanuslar üzerinden yüzlerce, hatta binlerce kilometre taşınabilmektedir (WMO, 2025).

Genel olarak, Batı Asya'nın en önemli birincil toz kaynakları arasında Arabistan Yarımadası ile Suriye, Irak ve İran'ın yer aldığı alan (Şekil 2) kabul edilmektedir (Prospero ve diğerleri 2002; De Longueville ve diğerleri, 2010; Bolorani ve diğerleri, 2013; Muhs ve diğerleri, 2014; WMO and UNEP, 2013).



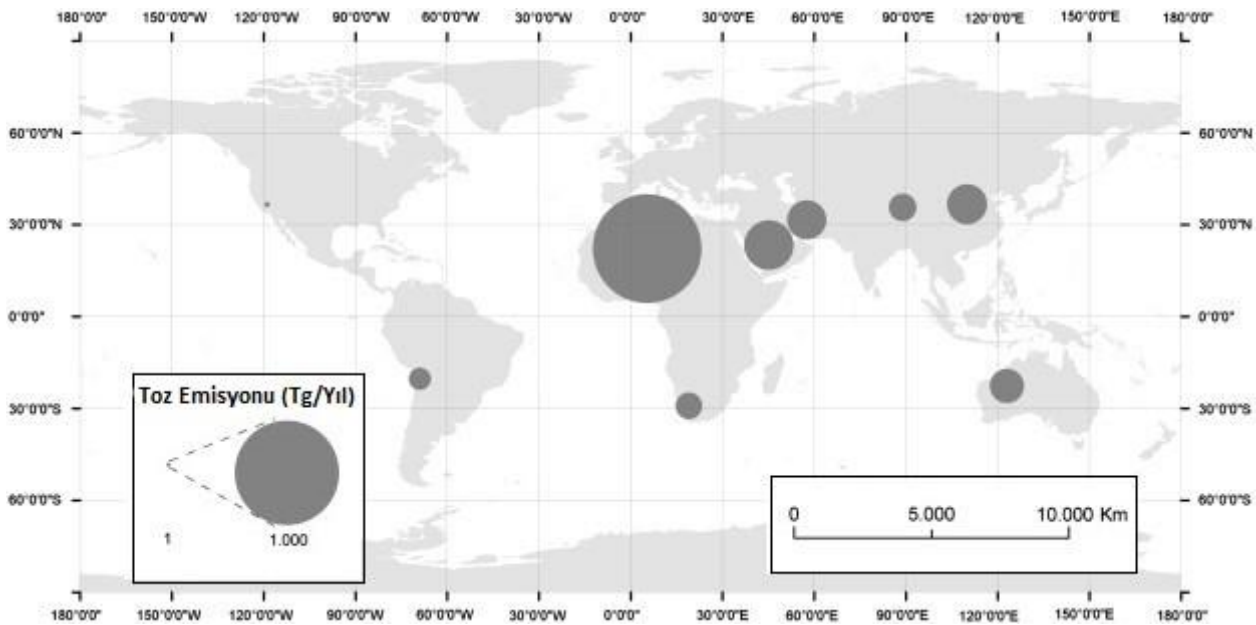
Şekil 2. Afrika, Orta Doğu ve Asya'daki Önemli Toz Kaynak Alanları (Muhs ve diğerleri, 2014)

Tanaka ve Chiba tarafından 2006 yılında gerçekleştirilen bir çalışmada, Dünya üzerindeki başlıca toz kaynak alanları ile bu alanlardan atmosfere salınan yıllık toz miktarları küresel ölçekte nicel olarak hesaplanmıştır. Söz konusu hesaplamalar, De Longueville ve arkadaşları (2010) tarafından haritalandırılarak mekânsal dağılımları ortaya konmuştur (Şekil 3).

**Tablo 2.** ölllerden Atmosfere Atılan Toz Emisyonları (Tanaka ve Chiba, 2006)

	Emisyon (Tg/yıl)	Kuru ökeltme (Tg/yıl)	Islak ökeltme (Tg/yıl)	Yük (Tg)	Kuru Yaşam Süresi (Gün)	Islak Yaşam Süresi (Gün)	Toplam Yaşam Süresi (Gün)
<b>Kuzey Afrika</b>	1087	723 (67%)	363 (33%)	9.09	4.6	9.1	3.1
<b>Arap Yarımadası</b>	221	129 (58%)	92 (42%)	1.65	4.7	6.6	2.7
<b>Merkez Asya</b>	140	94 (67%)	46 (33%)	1.05	4.1	8.3	2.7
<b>Batı Çin</b>	68	39 (57%)	29 (43%)	0.42	3.9	5.2	2.2
<b>Doğu Çin</b>	146	90 (62%)	56 (38%)	0.67	2.7	4.3	1.7
<b>Kuzey Amerika</b>	2	1 (59%)	1 (41%)	0.01	3.9	5.5	2.3
<b>Güney Amerika</b>	44	20 (45%)	24 (55%)	0.30	5.5	4.6	2.5
<b>Güney Afrika</b>	63	41 (64%)	23 (36%)	0.47	4.2	7.6	2.7
<b>Avustralya</b>	106	65 (61%)	41 (39%)	0.92	5.2	8.2	3.2
<b>Toplam</b>	1877	1202 (64%)	675 (36%)	14.6	4.4	7.9	2.8

Bu çalışmanın sonuçlarına göre, çöl kaynaklı mineral toz emisyonlarının yıllık toplamı yaklaşık 1877 Tg (~1,9 milyar ton) olarak hesaplanmıştır (Tablo 2). Literatürde farklı yöntem ve modeller kullanılarak yapılan çalışmalarda bu miktarın genel olarak 1000–2000 Tg (1–2 milyar ton) aralığında değiştii bildirilmektedir. Tanaka ve Chiba (2006) tarafından sunulan bulgular, küresel toz emisyonlarının %51–69’unun Kuzey Afrika kaynaklı olduğunu, Arabistan Yarımadası (Orta Doğu veya Batı Asya) kaynaklı emisyonların ise toplamın yaklaşık %7–28’ini oluşturduğunu göstermektedir. Bu değerlendirmelere göre, Türkiye’nin çevresinde yer alan toz kaynak alanları, küresel toz emisyonlarının %70’inden fazlasını oluşturmaktadır. Güncel alışmalar ise Kuzey Afrika ve Orta Doğu’nun küresel toz bütçesindeki payının arttığını ve günümüzde toplam emisyonların %80’inden fazlasının bu bölgelerden kaynaklandığını ortaya koymaktadır.



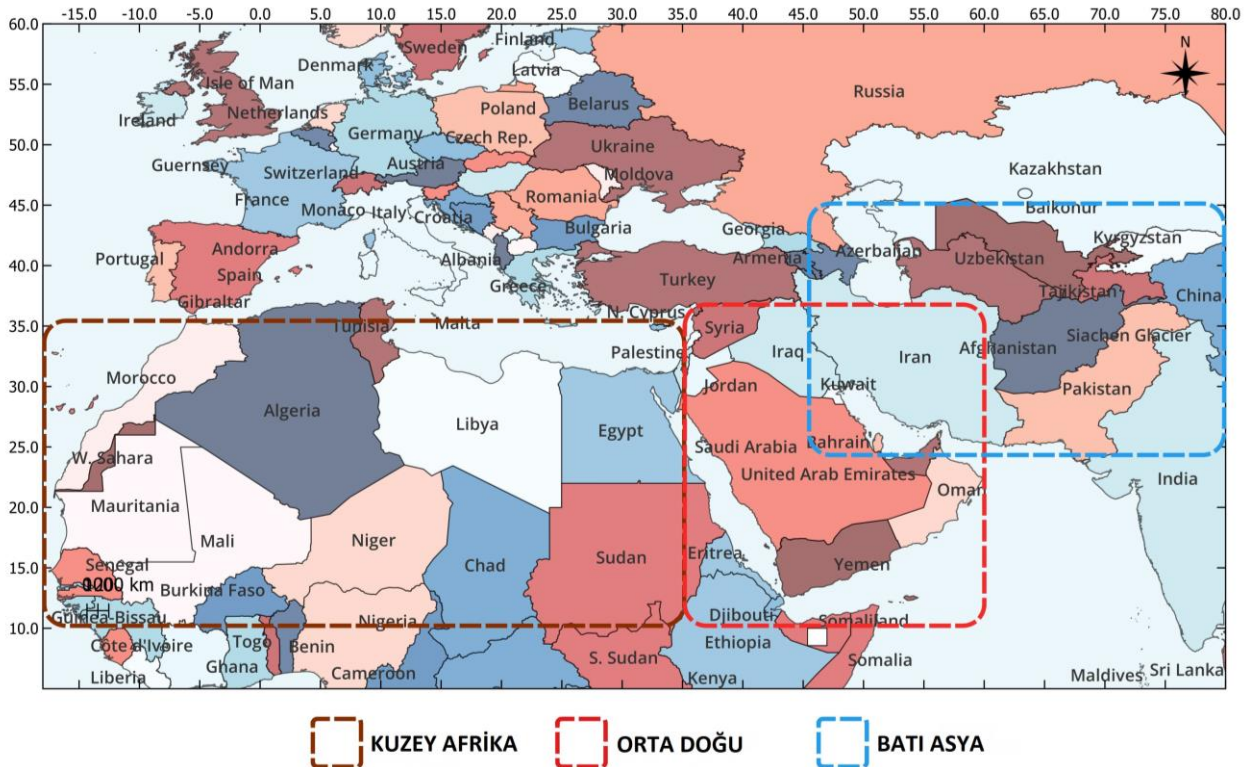
**Şekil 3.** Atmosfere Atılan Toz Miktarları (De Longueville ve diğerleri, 2010)

## 2. GÖZLEM VERİLERİ VE YÖNTEM

Yapılan çalışmada, NASA Aqua uydusu üzerinde bulunan MODIS cihazına ait Aerosol Optik Derinliği (AOD) ve Angstrom Exponent (AE) verileri (ver 6.1) kullanılmış olup belirlenen bölgeler için ortalama AOD ve AE değerlerinin alansal ve zamansal değişimleri incelenmiştir.

Atmosferdeki en yaygın aerosollerden birisi olan tozlar, büyük partikül çaplarına bağlı olarak yüksek Aerosol Optik Derinlik (AOD) ve düşük Angstrom Exponent (AE) değerine sahiptirler. MODIS aerosol ürünleri küresel olarak, okyanuslar ve kıtaların üzerindeki aerosollerin optik derinliğini görüntülemektedir. Aerosol Optik Derinliği, genellikle 0-1 değerleri arasında değişim gösteren birimsiz bir parametredir. Atmosferdeki aerosollerin miktarı arttıkça AOD değeri de artmaktadır. Bir alanda kuvvetli veya çok kuvvetli kum ve toz fırtınaları yaşandığında, AOD değerleri 1'in üzerinde de görülebilmektedir.

Bu çalışmada, NASA'nın internet sitesinden (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>) temin edilen AOD ve AE verilerinin analizi yapılmıştır. Parçacık büyüklüklerinin tespiti ve değerlendirilmesi için Angstrom Exponent (AE) parametresi kullanılmaktadır. Angstrom Exponent; MODIS, MISR ve SeaWiFS gibi uydu gözlemlerinin farklı kanallarında yapılan ölçümler kullanılarak hesaplanmaktadır. AE'nin küçük değerlerde olması; aerosol çaplarının büyük olduğunu, yani toz gibi büyük çaplı parçacıkların ortamda daha baskın olduğunu göstermektedir. AE'nin yüksek değerlerde olması ise antropojenik emisyonlar gibi küçük çaplı aerosollerin ortamda çok daha fazla ve baskın olduğunu ifade etmektedir.



Şekil 4. Büyük Akdeniz Havzası Alanı

### 3. HESAPLAMALAR VE BULGULAR

#### 3.1. Küresel Toz Taşınımı Aerosol Analizi ve Değerlendirmeleri

MODIS - Aqua uydusundan 2003-2025 yılları için elde edilen alansal ortalama Aerosol Optik Derinliği (AOD) verilerine göre (Tablo 3 ve Şekil 5); küresel ölçekte uzun dönemde önemli bir değişiklik görülmemesine rağmen, bölgesel ölçekte artış ve azalma eğilimlerinin olduğu görülmektedir. Bu durum, aerosol yükünün küresel ortalama göre dengeli seyretmekle birlikte, bölgesel kaynaklar ve atmosferik dolaşım koşullarına bağlı olarak zamansal ve mekânsal değişkenliğinin fazla olabileceğini göstermektedir.

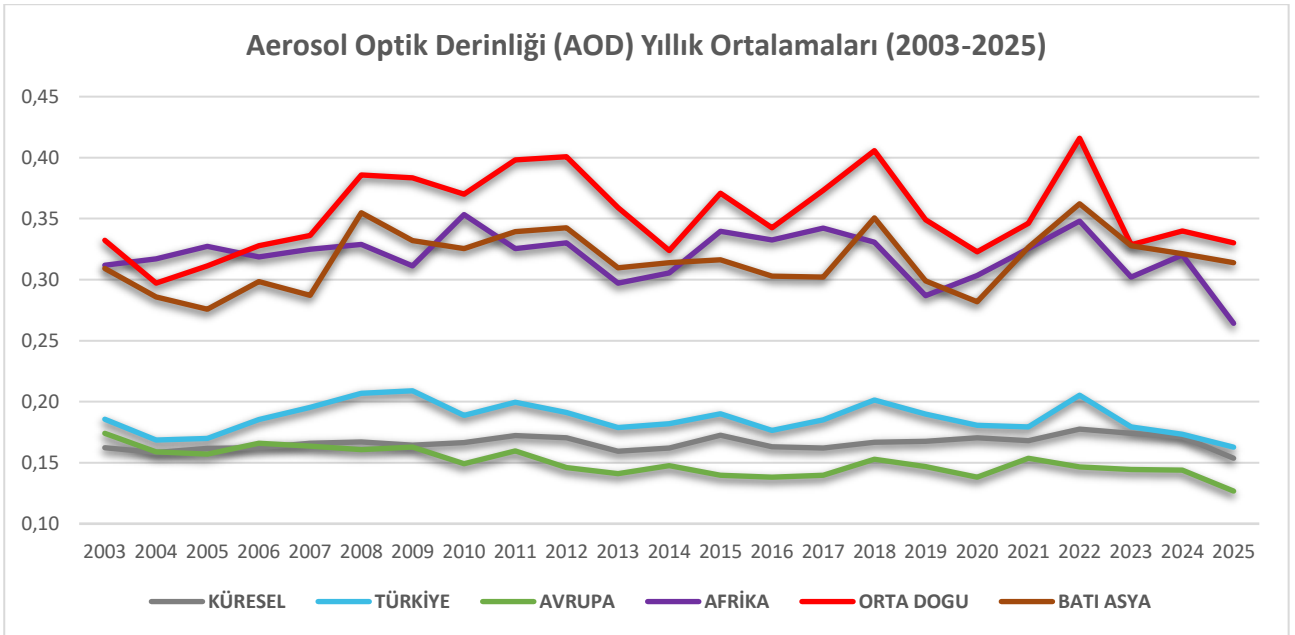
Alansal AOD ortalama değerlerinin bölgelerde yüksekten düşüğe doğru sıralanışı; Orta Doğu, Afrika, Batı Asya, Türkiye, Küresel (Dünya) ve Avrupa şeklinde belirlenmiştir. Sahra, Arap Yarımadası ve çevresindeki geniş çöl alanlarından kaynaklanan mineral toz emisyonlarının bu bölgelerde baskın aerosol türü olması nedeniyle Orta Doğu, Afrika ve Batı Asya atmosferi için hesaplanan AOD ortalamaları; Türkiye, Avrupa ve Küresel ortalama kıyasla belirgin şekilde daha yüksek bulunmuştur. Buna karşılık Avrupa, tüm dönem boyunca en düşük AOD seviyelerine sahip olup, sınırlı doğal toz kaynakları ve antropojenik emisyonların görece daha etkin kontrol edilmesi nedeniyle diğer bölgelerden ayrılmaktadır.

Türkiye için hesaplanan AOD değerleri, küresel ortalamanın üzerinde, ancak Afrika ve Orta Doğu'nun belirgin şekilde altında konumlanmakta olup, ülkemizin hem yerel antropojenik aerosol kaynaklarından hem de coğrafi konumu itibarıyla Afrika ve Orta Doğu kökenli uzun menzilli toz taşınımından etkilenen bir geçiş bölgesi niteliğinde olduğunu ortaya koymaktadır.

Zaman serileri incelendiğinde, tüm bölgelerde yıllar arası belirgin dalgalanmalar dikkat çekmekte; özellikle 2008–2009, 2011–2013 ve 2018–2023 dönemlerinde Afrika, Orta Doğu ve Batı Asya bölgelerinde eş zamanlı AOD değişimleri gözlenmektedir. Bu dönemler, geniş ölçekli çöl tozu emisyonlarının ve atmosferik taşınım koşullarının aerosol yükü üzerindeki etkisinin arttığı zaman aralıkları olarak değerlendirilebilir. Türkiye'de ise bu dönemlere karşılık gelen AOD değişimlerinin benzer bir zamansal desen izlemekle birlikte daha sınırlı genlikte gerçekleştiği gözlenmiş olup, bu durum ülke üzerindeki aerosol yükünün uzak mesafeli toz taşınımına duyarlı olduğunu ancak kaynak bölgelere kıyasla etkisinin zayıfladığını göstermektedir. Uzun dönemli eğilimler değerlendirildiğinde, tüm bölgelerde AOD ortalamalarının 2022 yılından itibaren genel olarak azalma eğilimine girdiği, özellikle 2023 yılında Afrika ve Orta Doğu'da AOD miktarında yaşanan keskin düşüşün Küresel ölçekte ortalamaları çok değiştirmese bile Türkiye'de de gözlemlendiği görülmektedir (Şekil 5).

**Tablo 3.** Çalışma Bölgeleri Alansal Ortalama AOD Değerlerinin Yıllık Değişimi

YIL	Küresel	Türkiye	Avrupa	Afrika	Orta Doğu	Batı Asya
2003	0,1622	0,1858	0,1741	0,3119	0,3323	0,3093
2004	0,1583	0,1686	0,1589	0,3170	0,2972	0,2859
2005	0,1619	0,1698	0,1571	0,3274	0,3112	0,2758
2006	0,1622	0,1853	0,1660	0,3187	0,3279	0,2984
2007	0,1660	0,1954	0,1636	0,3251	0,3362	0,2872
2008	0,1670	0,2068	0,1608	0,3288	0,3857	0,3547
2009	0,1645	0,2089	0,1627	0,3114	0,3834	0,3321
2010	0,1665	0,1888	0,1491	0,3534	0,3700	0,3254
2011	0,1724	0,1997	0,1596	0,3255	0,3982	0,3395
2012	0,1704	0,1912	0,1461	0,3301	0,4007	0,3425
2013	0,1595	0,1788	0,1410	0,2973	0,3590	0,3098
2014	0,1621	0,1819	0,1477	0,3055	0,3240	0,3140
2015	0,1725	0,1901	0,1397	0,3395	0,3709	0,3162
2016	0,1630	0,1764	0,1382	0,3326	0,3426	0,2946
2017	0,1620	0,1850	0,1398	0,3422	0,3733	0,3022
2018	0,1666	0,2014	0,1527	0,3307	0,4057	0,3505
2019	0,1674	0,1897	0,1468	0,2869	0,3491	0,2991
2020	0,1705	0,1807	0,1382	0,3034	0,3228	0,2818
2021	0,1681	0,1792	0,1537	0,3255	0,3461	0,3265
2022	0,1775	0,2053	0,1465	0,3480	0,4159	0,3622
2023	0,1741	0,1793	0,1445	0,3020	0,3286	0,3278
2024	0,1712	0,1732	0,1439	0,3202	0,3400	0,3212
2025	0,1537	0,1627	0,1268	0,2642	0,3303	0,3140
Ortalama	0,1661	0,1863	0,1503	0,3194	0,3544	0,3165

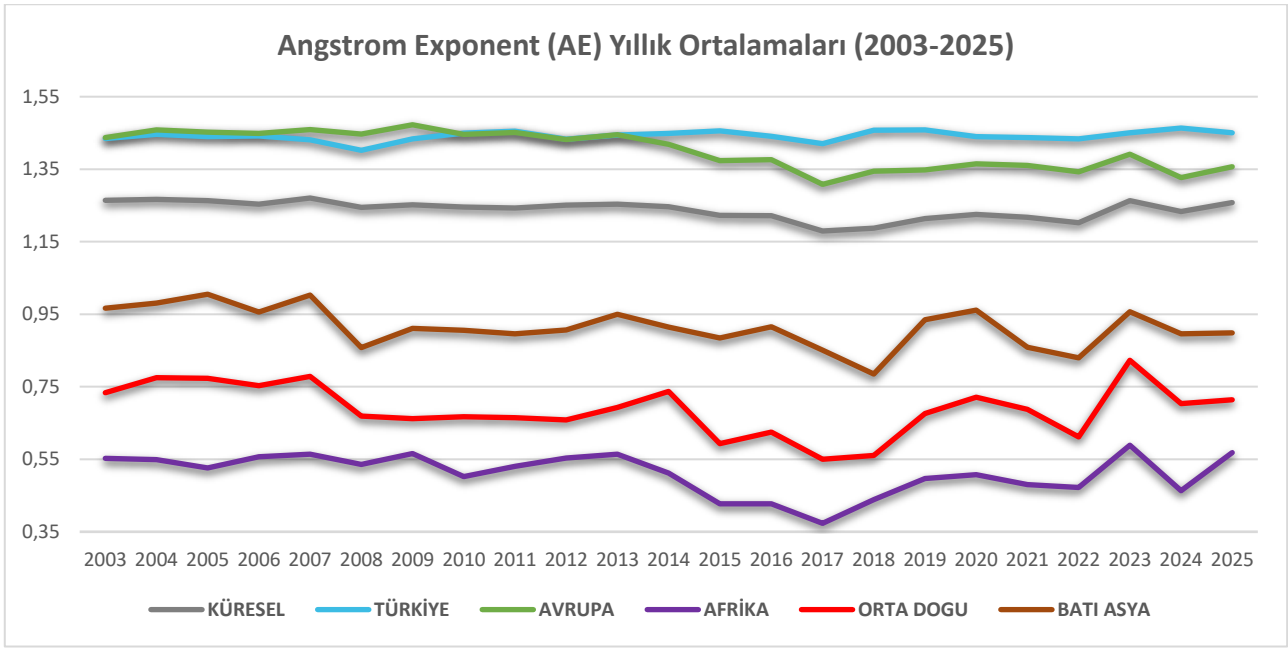


**Şekil 5.** Çalışma Bölgelerinin Yıllık Alansal Ortalama AOD Değişimleri

MODIS - Aqua uydusundan 2003-2025 yılları için elde edilen alansal ortalama Angstrom Exponent (AE) verilerine göre (Tablo 4 ve Şekil 6); Türkiye, Avrupa ve Küresel ölçekte hesaplanan değerlerin görece yüksek olduğu görülmektedir. Yüksek AE değerleri, atmosferde ince aerosol parçacıklarının baskın olduğunu ve bu bölgelerde çöl tozları gibi büyük boyutlu doğal aerosollerden ziyade, çapları daha küçük olan antropojenik kaynaklı aerosollerin (örneğin endüstriyel emisyonlar, trafik kaynaklı partiküller ve ikincil aerosol oluşumları) ön planda olduğunu göstermektedir. Bu durum, özellikle nüfus yoğunluğu ve sanayileşme düzeyi yüksek bölgelerde insan faaliyetlerinin aerosol karakteristiği üzerindeki belirleyici rolünü ortaya koymaktadır.

**Tablo 4.** Çalışma Bölgeleri Alansal Ortalama AE Değerlerinin Yıllık Değişimi

YIL	Küresel	Türkiye	Avrupa	Afrika	Orta Doğu	Batı Asya
2003	1,2646	1,4350	1,4373	0,5523	0,7338	0,9666
2004	1,2665	1,4457	1,4583	0,5489	0,7750	0,9807
2005	1,2636	1,4400	1,4519	0,5263	0,7730	1,0051
2006	1,2539	1,4414	1,4483	0,5573	0,7530	0,9556
2007	1,2704	1,4309	1,4589	0,5637	0,7783	1,0025
2008	1,2445	1,4021	1,4467	0,5356	0,6690	0,8584
2009	1,2514	1,4338	1,4725	0,5653	0,6617	0,9109
2010	1,2460	1,4497	1,4458	0,5020	0,6669	0,9061
2011	1,2429	1,4548	1,4513	0,5303	0,6649	0,8961
2012	1,2510	1,4324	1,4320	0,5531	0,6585	0,9063
2013	1,2537	1,4445	1,4455	0,5640	0,6926	0,9502
2014	1,2463	1,4486	1,4184	0,5116	0,7366	0,9146
2015	1,2223	1,4560	1,3735	0,4275	0,5930	0,8843
2016	1,2218	1,4403	1,3764	0,4275	0,6251	0,9153
2017	1,1795	1,4201	1,3082	0,3733	0,5500	0,8513
2018	1,1870	1,4574	1,3446	0,4383	0,5604	0,7851
2019	1,2141	1,4581	1,3483	0,4972	0,6759	0,9348
2020	1,2251	1,4399	1,3647	0,5072	0,7212	0,9614
2021	1,2175	1,4371	1,3608	0,4803	0,6875	0,8593
2022	1,2020	1,4333	1,3430	0,4721	0,6117	0,8296
2023	1,2631	1,4507	1,3910	0,5887	0,8230	0,9567
2024	1,2336	1,4635	1,3267	0,4637	0,7033	1,8960
2025	1,2581	1,4506	1,3564	0,5687	0,7138	0,8987
<b>Ortalama</b>	<b>1,2382</b>	<b>1,4420</b>	<b>1,4026</b>	<b>0,5111</b>	<b>0,6882</b>	<b>0,9142</b>



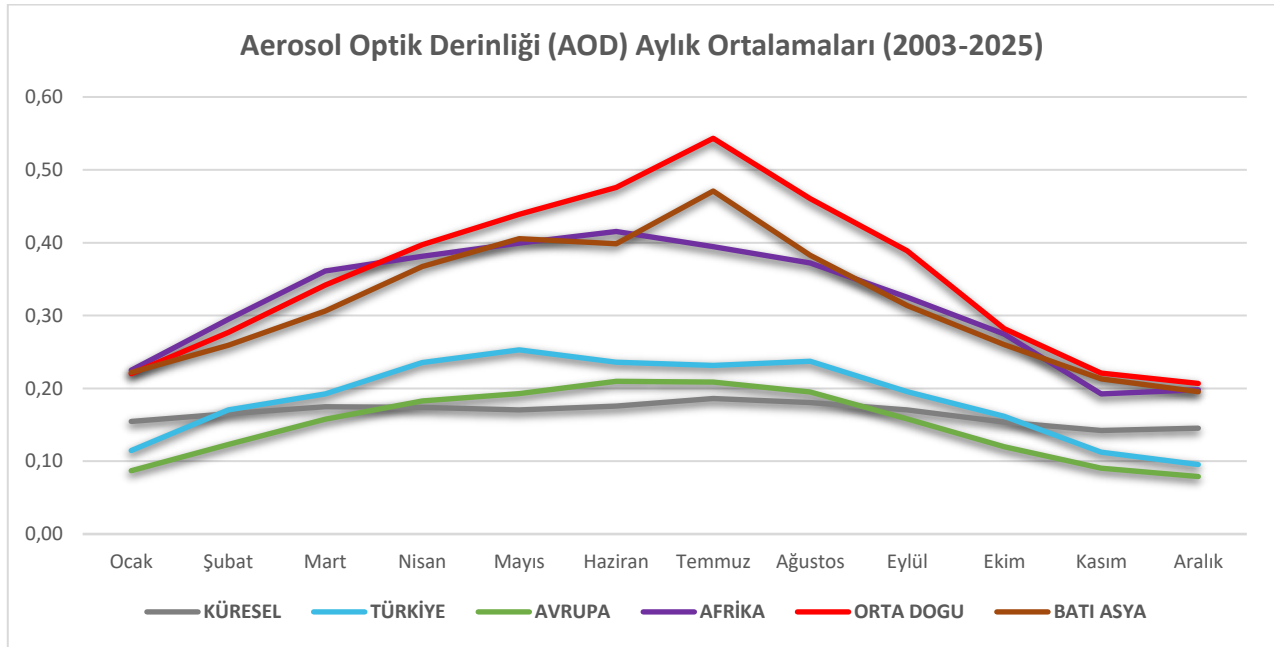
**Şekil 6.** Çalışma Bölgelerinin Yıllık Alansal Ortalama AE Değişimleri

MODIS–Aqua uydusundan 2003–2025 yılları için elde edilen aylık alansal ortalama AOD değerleri (Tablo 5 ve Şekil 7) incelendiğinde, Orta Doğu ve Batı Asya bölgelerinde en yüksek ortalama AOD değerlerinin Temmuz ayında hesaplandığı görülmektedir. Bu durum, yaz döneminde söz konusu bölgelerde çöl kaynaklı mineral toz emisyonlarının artması ve yağışların azalmasıyla birlikte aerosol parçacıklarının atmosferde kalış süresinin uzaması ile ilişkilendirilebilir. Türkiye için ise AOD ortalamalarının ilkbahar aylarında (özellikle Nisan–Mayıs döneminde) daha yüksek değerlere ulaştığı tespit edilmiştir. Bu artışın; başta Sahra ve Orta Doğu kaynaklı uzun menzilli toz taşınımının güçlenmesi olmak üzere, yağışların azalmasıyla atmosferik temizlenme süreçlerinin zayıflaması, Türkiye'nin toz açısından kaynak değil alıcı bölge konumunda bulunması ve bu dönemde sinoptik taşınım koşullarının yaz ortasına kıyasla daha elverişli hale gelmesinin bütünleşik etkisinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

Küresel ölçekte aylık AOD değerlerinin yıl boyunca görece sınırlı bir değişim aralığında seyrettiği ve belirgin bir mevsimsel maksimum veya minimum oluşturmadığı görülmektedir. Buna karşılık Avrupa'da kış döneminde (Kasım–Ocak) AOD ortalamalarının belirgin şekilde azaldığı, yaz aylarında ise sınırlı bir artış eğilimi gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durum, kış aylarında artan yağış ve atmosferik temizlenme süreçlerinin Avrupa bölgesindeki aerosol yükünü azalttığını düşündürmektedir.

**Tablo 5.** Çalışma Bölgeleri Alansal Ortalama AOD Değerlerinin Aylık Değişimi (2003-2025)

AY	Küresel	Türkiye	Avrupa	Afrika	Orta Doğu	Batı Asya
Ocak	0,1546	0,1145	0,0870	0,2247	0,2198	0,2220
Şubat	0,1652	0,1702	0,1228	0,2946	0,2769	0,2593
Mart	0,1748	0,1923	0,1577	0,3613	0,3418	0,3064
Nisan	0,1738	0,2357	0,1826	0,3814	0,3973	0,3672
Mayıs	0,1705	0,2529	0,1929	0,3994	0,4389	0,4054
Haziran	0,1757	0,2360	0,2097	0,4154	0,4756	0,3986
Temmuz	0,1861	0,2317	0,2088	0,3945	0,5433	0,4709
Ağustos	0,1806	0,2373	0,1950	0,3720	0,4606	0,3826
Eylül	0,1705	0,1953	0,1579	0,3252	0,3888	0,3136
Ekim	0,1537	0,1618	0,1200	0,2744	0,2820	0,2598
Kasım	0,1422	0,1122	0,0903	0,1924	0,2208	0,2132
Aralık	0,1454	0,0954	0,0790	0,1981	0,2068	0,1954
Ortalama	0,1661	0,1863	0,1503	0,3194	0,3544	0,3165



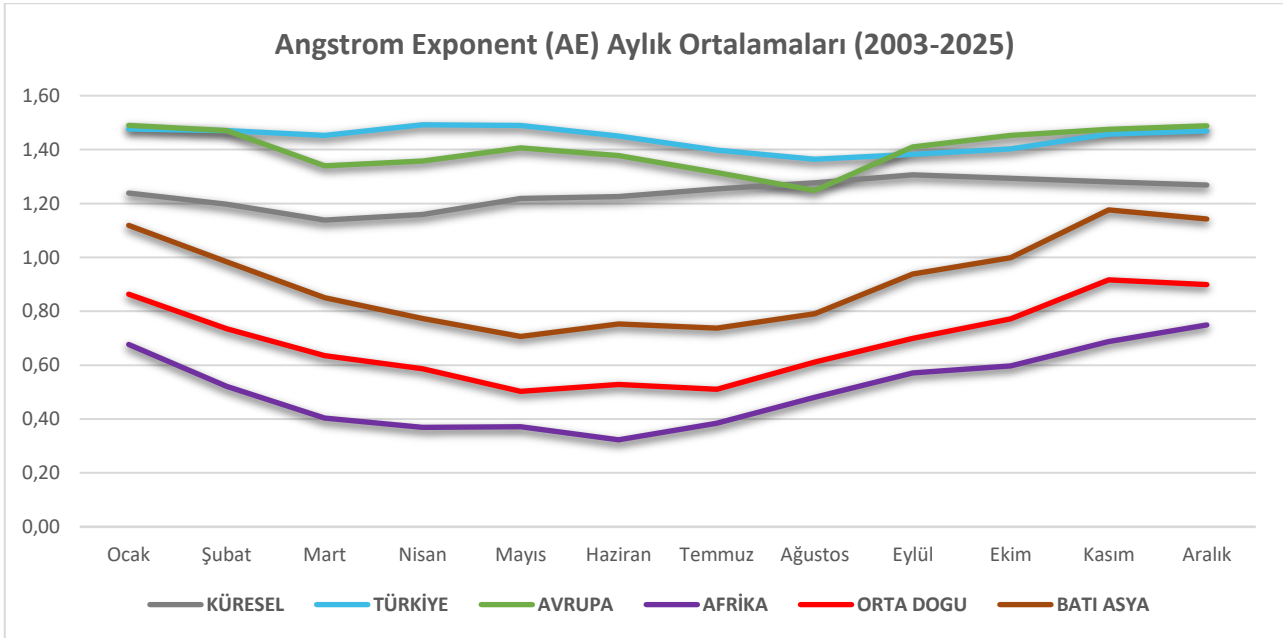
**Şekil 7.** Çalışma Bölgelerinin Aylık Alansal Ortalama AOD Değişimleri

2003–2025 dönemine ait alansal ortalama AE değerlerinin aylık değişimi incelendiğinde (Tablo 6 ve Şekil 8); Türkiye, Avrupa ve küresel ölçekte AE değerlerinin yıl boyunca görece yüksek ( $\approx 1,2-1,5$ ) seyrettiği, bu durumun ince partiküllerin (antropojenik kökenli) baskınlığına işaret ettiği görülmektedir. Tüm bölgelerde AE değerlerinin kış aylarında daha yüksek olup yaz aylarında görece azaldığı görülmektedir. Bu durum; ısınma sezonu emisyonlarının ve durağan atmosfer koşullarının ince partikül birikimini artırdığına, yazın ise büyük çaplı aerosollerin görece katkısına işaret etmektedir.

Buna karşılık Afrika ve Orta Doğu'da AE değerleri yıl boyunca düşük (<1) seyretmekte ve ilkbahar-yaz döneminde minimuma ulaşmaktadır; bu durum çöl tozları gibi mineral aerosollerin baskın olduğunu açıkça göstermektedir.

**Tablo 6.** Çalışma Bölgeleri Alansal Ortalama AE Değerlerinin Aylık Değişimi (2003-2025)

AY	Küresel	Türkiye	Avrupa	Afrika	Orta Doğu	Batı Asya
Ocak	1,2389	1,4760	1,4898	0,6768	0,8637	1,1187
Şubat	1,1974	1,4704	1,4703	0,5216	0,7350	0,9839
Mart	1,1383	1,4525	1,3400	0,4029	0,6346	0,8504
Nisan	1,1591	1,4921	1,3580	0,3688	0,5863	0,7732
Mayıs	1,2188	1,4893	1,4064	0,3712	0,5026	0,7064
Haziran	1,2262	1,4503	1,3773	0,3228	0,5276	0,7530
Temmuz	1,2537	1,3974	1,3149	0,3846	0,5101	0,7376
Ağustos	1,2763	1,3641	1,2481	0,4802	0,6114	0,7912
Eylül	1,3063	1,3830	1,4097	0,5709	0,6992	0,9380
Ekim	1,2939	1,4024	1,4525	0,5965	0,7723	0,9985
Kasım	1,2808	1,4568	1,4757	0,6875	0,9164	1,1761
Aralık	1,2689	1,4698	1,4887	0,7492	0,8990	1,1430
<b>Ortalama</b>	<b>1,2382</b>	<b>1,4420</b>	<b>1,4026</b>	<b>0,5111</b>	<b>0,6882</b>	<b>0,9142</b>



**Şekil 8.** Çalışma Bölgelerinin Aylık Alansal Ortalama AE Değişimleri

## 3.2. Türkiye Toz Taşınımı Aerosol Analizi ve Değerlendirmeleri

### 3.2.1. Aerosollerin Alansal Değişimi

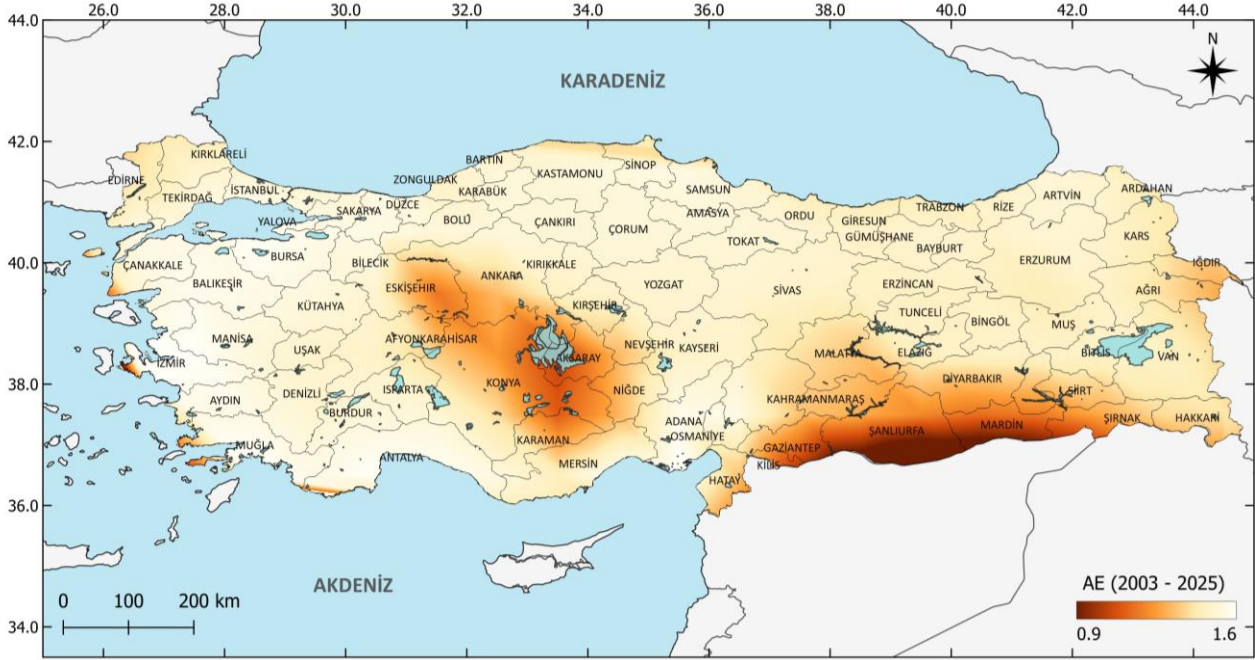
Türkiye atmosferindeki 2003-2025 periyodu için uzun yıllar alansal ortalama Aerosol Optik Derinliği (AOD) değerleri incelendiğinde; en yüksek aerosol yüklerinin Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde yoğunlaştığı ve bu bölgenin belirgin biçimde mineral toz taşınımına maruz kaldığı görülmektedir. Güneydoğu Anadolu'nun yanı sıra, İç Anadolu Bölgesi'nin güneydoğu kesimleri ile Doğu Akdeniz Bölgesi, uzun yıllar AOD ortalamalarının görece yüksek olduğu diğer alanlar olarak öne çıkmaktadır. Bu mekânsal dağılım, söz konusu bölgelerin Orta Doğu ve Kuzey Afrika kaynaklı toz taşınım koridorları üzerinde yer almasıyla uyumludur. Bununla birlikte, Güneydoğu Anadolu dışındaki alanlarda Iğdır, Kars, Ağrı, İzmir ve Ankara çevrelerinde de AOD ortalamalarının yerel olarak yükseldiği belirlenmiştir.

Angstrom Exponent (AE), atmosferdeki aerosol parçacıklarının karakteristik boyutunu yansıtan ve partikül çapı ile ters orantılı bir parametre olup, Şekil 10'da sunulan Türkiye alansal ortalama AE dağılımı AOD haritası ile birlikte değerlendirildiğinde önemli ipuçları sunmaktadır. AOD değerlerinin yüksek olduğu Güneydoğu Anadolu Bölgesi ile İç Anadolu'nun iç ve güney kesimlerinde AE ortalamalarının düşük olması, bu bölgelerde büyük çaplı aerosollerin, başka bir ifadeyle çöl tozu kökenli mineral partiküllerin baskın olduğunu göstermektedir. Bu durum, uzun menzilli toz taşınımının Türkiye'nin güney ve güneydoğusunda aerosol yükünü belirleyen temel süreçlerden biri olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 9. Türkiye Uzun Yıllar Aerosol Optik Derinliği (AOD) Ortalamaları

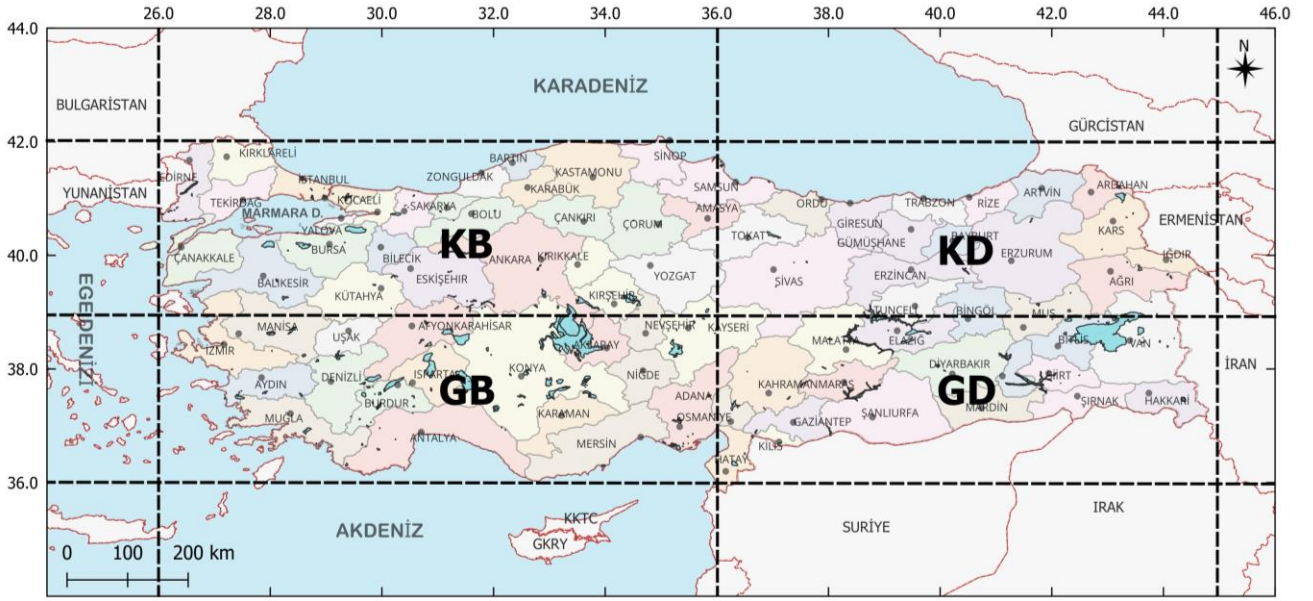
Diğer taraftan, AOD ortalamalarının yüksek olduğu İçdir ve İzmir çevresinde AE değerlerinin de yüksek hesaplanması, bu bölgelerde aerosol yükünün büyük ölçüde ince partiküllerden oluştuğuna işaret etmektedir. Bu mekânsal uyumsuzluk, söz konusu alanlarda mineral tozdan ziyade sanayi, ulaşım ve yerel antropojenik faaliyetler kaynaklı aerosollerin daha baskın olduğunu düşündürmektedir. Benzer şekilde Ankara çevresinde gözlenen görece yüksek AOD–AE birlikteliği, başkentteki yoğun insan faaliyetlerinin aerosol bileşimi üzerindeki etkisini yansıtmaktadır.



Şekil 10. Türkiye Uzun Yıllar Angstrom Exponent (AE) Ortalamaları

### 3.2.2. Aerosollerin Zamansal Değişimi

Atmosferde bulunan aerosollerin bölgesel farklılıklarını ortaya koymak amacıyla Türkiye coğrafyası güneybatı (GB), güneydoğu (GD), kuzeybatı (KB) ve kuzeydoğu (KD) olmak üzere dört alt bölgeye ayrılarak alansal Aerosol Optik Derinliği (AOD) ve Angstrom Exponent (AE) ortalama değerleri analiz edilmiştir. Analizlerde kullanılan bölgesel domain, düzenli grid yapısı nedeniyle idari sınırlarla birebir örtüşmemekte olup, özellikle güneydoğu (GD) alt bölgesi Türkiye sınırlarının yanı sıra Suriye ve Irak'ın kuzey kesimlerini de kapsamaktadır. Dolayısıyla elde edilen bulgular, yalnızca Türkiye sınırları içindeki atmosferik koşulları değil, Türkiye'yi etkileyen bölgesel ölçekli toz taşınım dinamiklerini yansıtan bir değerlendirme niteliğindedir (Şekil 11).



**Şekil 11.** AOD ve AE Analizi Yapılan Bölgeler

Bölgelere göre yıllık alansal AOD ve AE ortalamaları Tablo 7’de verilmiş olup uzun yıllar değerlendirmeye göre en yüksek AOD ortalamaları Türkiye’nin güneydoğu bölümünde hesaplanırken bu bölümü sırasıyla güneybatı, kuzeydoğu ve kuzeybatı bölümleri takip etmektedir. Güneydoğu bölgesinde AOD değerlerinin yüksek seyretmesi, bölgenin Orta Doğu kaynaklı mineral toz taşınımına doğrudan maruz kalmasıyla tutarlıdır. Buna karşılık kuzeybatı ve kuzeydoğu bölgelerinde AOD ortalamalarının görece daha düşük olması, bu bölgelerde doğal toz etkisinin sınırlı olduğuna işaret etmektedir.

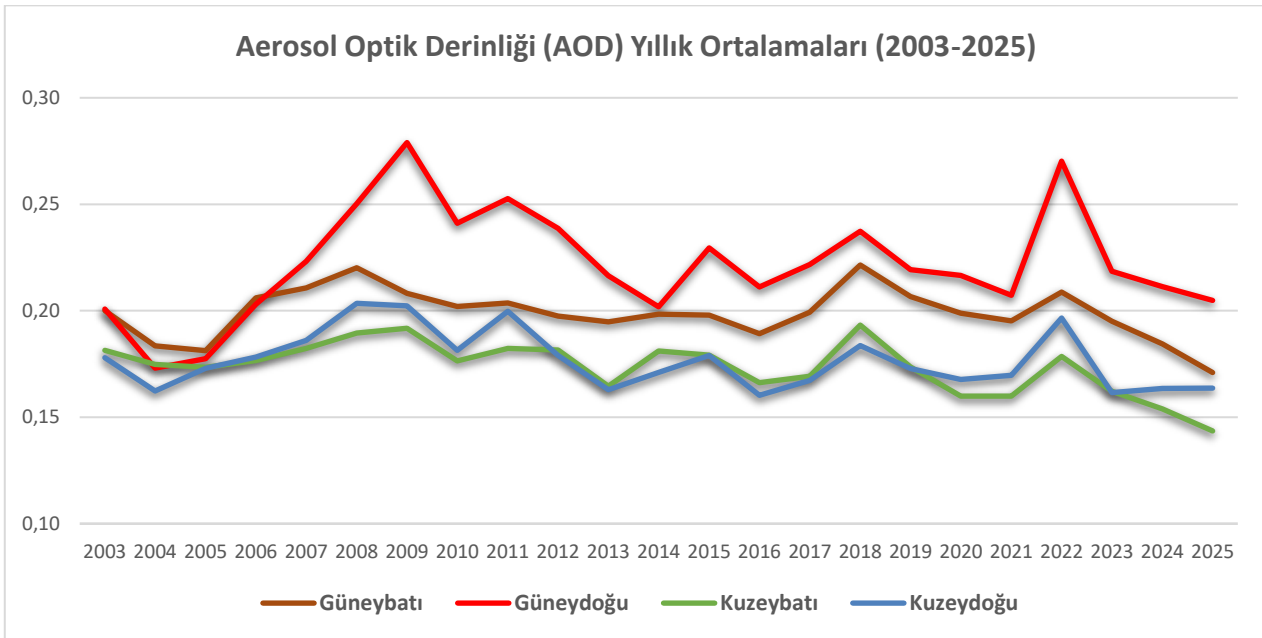
**Tablo 7.** Çalışma Bölgeleri Alansal Ortalama AOD Değerlerinin Yıllık Değişimi

YIL	Aerosol Optik Derinliği (AOD)				Angstrom Exponent (AE)			
	GB	GD	KB	KD	GB	GD	KB	KD
2003	0,2000	0,2007	0,1814	0,1779	1,4488	1,2187	1,4861	1,4701
2004	0,1835	0,1730	0,1747	0,1623	1,4589	1,2510	1,4995	1,4481
2005	0,1812	0,1775	0,1734	0,1729	1,4464	1,2227	1,4908	1,4567
2006	0,2060	0,2031	0,1766	0,1783	1,4528	1,1712	1,5048	1,4777
2007	0,2108	0,2232	0,1823	0,1861	1,4419	1,1482	1,4985	1,4427
2008	0,2202	0,2503	0,1895	0,2035	1,4168	1,0775	1,4898	1,4291
2009	0,2081	0,2790	0,1917	0,2023	1,4822	1,0563	1,5163	1,4581
2010	0,2020	0,2410	0,1764	0,1815	1,4802	1,1294	1,5109	1,4697
2011	0,2037	0,2527	0,1822	0,1997	1,5017	1,1241	1,5190	1,4682
2012	0,1975	0,2387	0,1816	0,1790	1,4656	1,1241	1,5052	1,4159
2013	0,1948	0,2164	0,1645	0,1629	1,4682	1,1856	1,4926	1,4504
2014	0,1984	0,2018	0,1811	0,1710	1,4690	1,2139	1,5052	1,4497
2015	0,1979	0,2296	0,1791	0,1790	1,5023	1,1721	1,5123	1,4587
2016	0,1892	0,2112	0,1662	0,1603	1,4554	1,1678	1,4956	1,4768
2017	0,1993	0,2216	0,1693	0,1672	1,4551	1,0894	1,4926	1,4540
2018	0,2215	0,2373	0,1933	0,1836	1,4951	1,1506	1,5138	1,4756
2019	0,2067	0,2193	0,1736	0,1728	1,4952	1,2647	1,5115	1,4761
2020	0,1989	0,2166	0,1600	0,1677	1,4672	1,2298	1,4993	1,4403

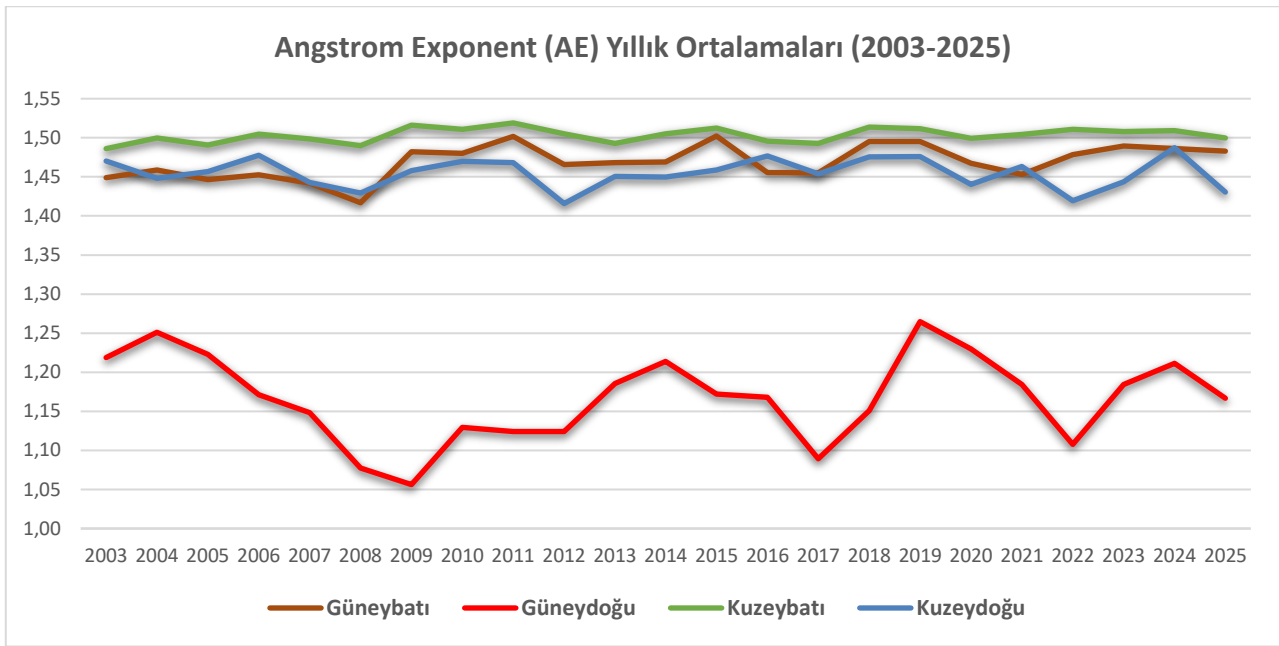
<b>2021</b>	0,1952	0,2073	0,1599	0,1696	1,4529	1,1845	1,5042	1,4632
<b>2022</b>	0,2088	0,2702	0,1786	0,1966	1,4784	1,1076	1,5107	1,4192
<b>2023</b>	0,1951	0,2186	0,1622	0,1615	1,4897	1,1842	1,5080	1,4438
<b>2024</b>	0,1845	0,2114	0,1539	0,1635	1,4864	1,2112	1,5091	1,4874
<b>2025</b>	0,1710	0,2048	0,1435	0,1637	1,4829	1,1669	1,4998	1,4304
<b>Ortalama</b>	<b>0,1989</b>	<b>0,2220</b>	<b>0,1737</b>	<b>0,1766</b>	<b>1,4693</b>	<b>1,1675</b>	<b>1,5033</b>	<b>1,4549</b>

Türkiye atmosferinde bulunan aerosoller, 2003-2025 yılları arasında inişli çıkışlı bir eğilim gösterir; 2009 yılından sonra azalma eğiliminde iken 2022 yılında geçici bir artış yaşanmış ve 2022 yılı itibariyle tüm bölgelerde AOD değerlerinde yeniden bir azalma eğilimi gözlenmiştir (Şekil 12).

AE değerleri açısından değerlendirildiğinde ise, güneydoğu bölgesinde AE ortalamalarının diğer bölgelere kıyasla belirgin biçimde düşük olduğu dikkat çekmekte olup bu durum, güneydoğuda aerosol yükünün ağırlıklı olarak büyük çaplı, yani çöl tozu kökenli mineral partiküllerden oluştuğunu göstermektedir. Buna karşılık kuzeybatı ve kuzeydoğu bölgelerinde AE değerlerinin yüksek seyretmesi, bu bölgelerde ince aerosollerin, başka bir ifadeyle antropojenik kaynaklı emisyonların daha baskın olduğunu ortaya koymaktadır. Güneybatı bölgesi ise hem görece yüksek AOD hem de yüksek AE değerleriyle dikkat çekmekte olup, bu durum bölgenin hem uzun menzilli taşınan aerosollerden hem de yerel antropojenik kaynaklardan etkilendiği düşünülmektedir (Şekil 13).



**Şekil 12.** Türkiye Yıllık Alansal Ortalama Aerosol Optik Derinliği (AOD) Değişimleri



Şekil 13. Türkiye Yıllık Alansal Ortalama Angstrom Exponent (AE) Değişimleri

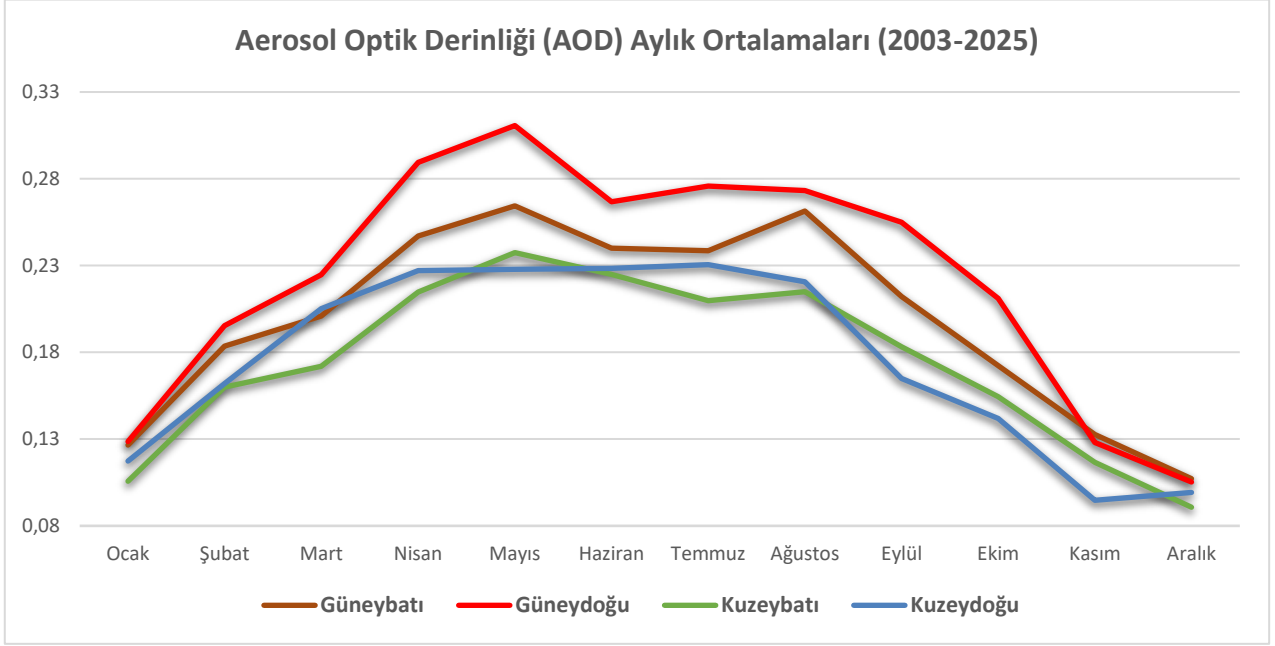
Tablo 8 ve Şekil 14’de verilen 2003-2025 yılları için aylık alansal AOD ortalama değerleri incelendiğinde; Şubat ayından itibaren düzenli olarak artan aerosollerin genel olarak Mayıs ayında en yüksek değere ulaştığı, bu aydan itibaren düzenli şekilde azalarak yıl sonunda en düşük seviyelere indiği görülmektedir. Bu durum, ülkemiz için atmosferdeki aerosol miktarının en yüksek olduğu dönemin ilkbahar mevsimi (Mart–Nisan–Mayıs) olduğunu ortaya koymaktadır. Bölgesel dağılım açısından bakıldığında, Türkiye’nin güneydoğu bölümünde hesaplanan aylık AOD ortalamalarının yılın büyük bölümünde (Kasım–Aralık ayları hariç) diğer tüm bölgelere kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Tablo 8. Çalışma Bölgeleri Alansal Ortalama AOD Değerlerinin Aylık Değişimi (2003-2025)

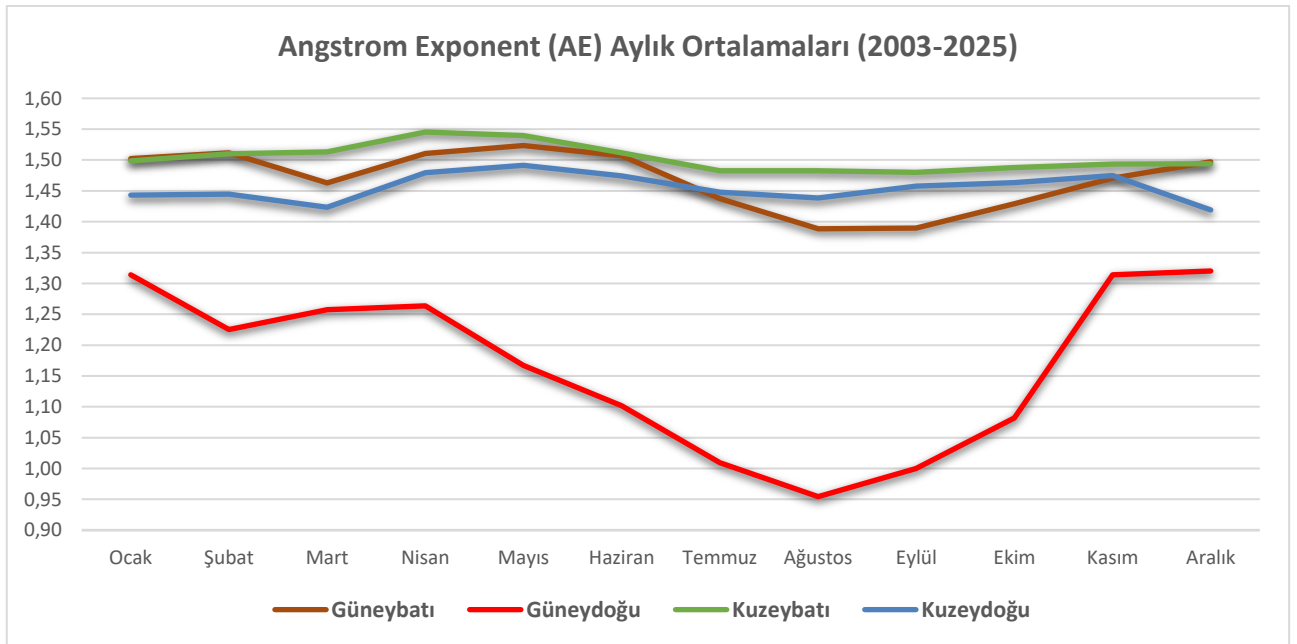
AY	Aerosol Optik Derinliği (AOD)				Angstrom Exponent (AE)			
	GB	GD	KB	KD	GB	GD	KB	KD
Ocak	0,1266	0,1286	0,1057	0,1173	1,5023	1,3142	1,4985	1,4429
Şubat	0,1836	0,1953	0,1600	0,1620	1,5119	1,2253	1,5100	1,4448
Mart	0,2009	0,2247	0,1720	0,2052	1,4629	1,2574	1,5134	1,4236
Nisan	0,2469	0,2894	0,2147	0,2271	1,5108	1,2638	1,5454	1,4797
Mayıs	0,2644	0,3107	0,2375	0,2277	1,5235	1,1671	1,5398	1,4914
Haziran	0,2400	0,2667	0,2250	0,2283	1,5071	1,1017	1,5116	1,4745
Temmuz	0,2385	0,2758	0,2097	0,2305	1,4376	1,0091	1,4827	1,4477
Ağustos	0,2613	0,2732	0,2150	0,2207	1,3885	0,9544	1,4825	1,4386
Eylül	0,2122	0,2549	0,1832	0,1649	1,3895	1,0003	1,4801	1,4576
Ekim	0,1722	0,2110	0,1544	0,1419	1,4290	1,0819	1,4876	1,4635
Kasım	0,1326	0,1280	0,1166	0,0948	1,4706	1,3141	1,4937	1,4747
Aralık	0,1072	0,1053	0,0908	0,0993	1,4972	1,3201	1,4942	1,4191
Ortalama	0,1989	0,2220	0,1737	0,1766	1,4693	1,1675	1,5033	1,4549

Bölgelere göre aylık Angstrom Exponent (AE) ortalamaları incelendiğinde ise, güneydoğu bölümünün yıl boyunca diğer bölgelere kıyasla daha düşük AE değerlerine sahip olduğu dikkat çekmekte olup büyük çaplı aerosollerin atmosferde daha baskın olduğu tespit edilmiştir (Şekil 15).

Sonuç olarak, aylık AOD ve AE değerlerinin birlikte değerlendirilmesi; Suriye ve Irak çöllerinden taşınan mineral tozların Türkiye'nin güneydoğusunu güçlü biçimde etkilediğini ve en yoğun toz taşınımı olaylarının özellikle ilkbahar mevsiminde gerçekleştiğini açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 14. Türkiye Aylık Alansal Ortalama Aerosol Optik Derinliği (AOD) Değişimleri



Şekil 15. Türkiye Aylık Alansal Ortalama Angstrom Exponent (AE) Değişimleri

### 3.2.3. Kuvvetli ve Ekstrem Tozlu Gün Sayıları

Tüm dünyada olduğu gibi Türkiye’de de toz gözlem sistemlerinin olmadığı bölgelerde toz gözlemleri sadece meteorolojik uydular aracılığıyla yapılabilmektedir. Bu kapsamda Meteoroloji Genel Müdürlüğü bünyesinde toz taşınımı analizleri NASA’dan temin edilen AOD ve AE verileri kullanılarak yapılmaktadır.

Toz olayı hadiselerinin yaşandığı günlerin belirlenmesinde kullanılan metotta öncelikle ortalama AOD değeri ve standart sapma değerleri hesaplanmış olup AOD’nin eşik değeri, ortalama AOD değerine standart sapmanın farklı katlarının eklenmesiyle elde edilmiştir. Aerosol optik derinliği değerlerinin, AOD ortalamasına 2 standart sapma değeri eklenmesiyle elde edilen eşik değeri geçtiği günler “Kuvvetli Toz Olayı”; 4 standart sapma değeri eklenmesiyle elde edilen eşik değeri geçtiği günler ise “Ekstrem Toz Olayı” olarak sınıflandırılmaktadır (Gkikas ve diğerleri, 2016). Bu çalışmada ise 2003-2025 dönemi Türkiye alansal ortalama AOD değerleri, tüm bölgeler için normal kabul edilerek ortalama ve standart sapması kullanılmış ve bu yöntemle tozlu günler belirlenmiştir.

Bu kapsamda, Türkiye’nin bölgelere ve mevsimlere göre yapılan toz taşınımı analizleri sonucunda elde edilen Kuvvetli Toz Olayı ve Ekstrem Toz Olayı hadiselerinin yaşandığı gün sayılarını ihtiva eden tablo aşağıda gösterilmektedir (Tablo 9).

Tablo 9 ve Şekil 16 birlikte değerlendirildiğinde, kuvvetli ve ekstrem tozlu günlerin Türkiye genelinde belirgin bir bölgesel asimetri gösterdiği açıkça görülmektedir. En dikkat çekici sonuç, güneydoğu bölgesinin hem kuvvetli hem de ekstrem tozlu gün sayıları açısından açık ara en yüksek değerlere sahip olmasıdır. 2003–2025 dönemi toplamlarında güneydoğuda 123 ekstrem ve 447 kuvvetli tozlu gün kaydedilmiş olup, bu değerler diğer tüm bölgelerin oldukça üzerindedir. Bu durum, bölgenin Suriye ve Irak çöllerine yakınlığı ve bu kaynaklardan gerçekleşen sık ve yoğun uzun menzilli mineral toz taşınımı ile doğrudan ilişkilidir.

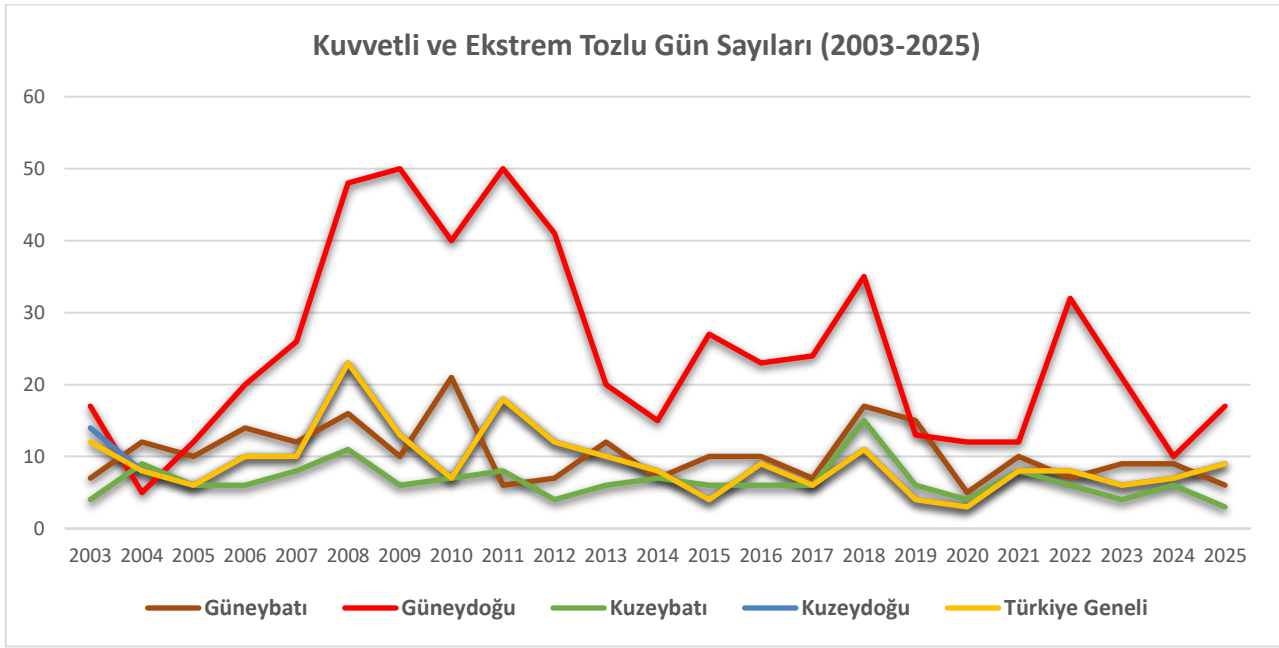
Güneybatı ve kuzeydoğu bölgelerinde tozlu gün sayıları orta düzeyde seyrederken, kuzeybatı bölgesi en düşük değerlere sahip bölge olarak öne çıkmaktadır. Bu tablo, kuzeybatının hem çöl kaynaklarına uzaklığı hem de daha nemli ve yağışlı iklim koşulları nedeniyle toz birikimine daha az elverişli olmasından kaynaklanmaktadır.

Zamana bağlı değişim incelendiğinde, 2007–2012 yılları ile 2018 ve 2022 yıllarında güneydoğu bölgesinde belirgin artışlar dikkat çekmektedir. Bu yıllar, Doğu Akdeniz ve Orta Doğu üzerinde etkili olan kuvvetli sinoptik taşınım koşulları ve kurak dönemlerle uyumludur. Türkiye geneli için de tozlu gün sayılarının bu yıllarda eş zamanlı artış göstermesi, bölgesel toz olaylarının ülke ölçeğine yansıdığını göstermektedir.

Sonuç olarak, kuvvetli ve ekstrem tozlu günlerin mekânsal dağılımı, Türkiye'nin özellikle güneydoğusunun kronik bir alıcı bölge olduğunu; zamansal değişimi ise bölgesel kuraklıklar ve atmosferik dolaşım rejimlerindeki dalgalanmaların toz taşınımını belirleyici şekilde etkilediğini ortaya koymaktadır.

**Tablo 9.** Türkiye’de Bölgelerin Yıllara Göre Kuvvetli ve Ekstrem Tozlu Gün Sayıları (2003-2025)

YIL	Güneybatı		Güneydoğu		Kuzeybatı		Kuzeydoğu		Türkiye Geneli	
	Ekstrem	Kuvvetli	Ekstrem	Kuvvetli	Ekstrem	Kuvvetli	Ekstrem	Kuvvetli	Ekstrem	Kuvvetli
2003	1	6	5	12	1	3	3	11	2	10
2004	2	10	2	3	1	8	0	8	0	8
2005	4	6	3	9	0	6	3	3	3	3
2006	4	10	3	17	2	4	0	10	0	10
2007	1	11	7	19	1	7	3	7	3	7
2008	1	15	10	38	0	11	5	18	5	18
2009	4	6	20	30	1	5	7	6	7	6
2010	1	20	8	32	1	6	1	6	1	6
2011	1	5	17	33	1	7	1	17	1	17
2012	0	7	9	32	0	4	3	9	3	9
2013	3	9	4	16	3	3	0	10	0	10
2014	2	5	4	11	2	5	2	6	2	6
2015	2	8	3	24	2	4	0	4	0	4
2016	1	9	4	19	1	5	0	9	0	9
2017	0	7	2	22	0	6	2	4	2	4
2018	3	14	2	33	2	13	0	11	0	11
2019	0	15	3	10	0	6	1	3	1	3
2020	0	5	2	10	0	4	0	3	0	3
2021	0	10	2	10	1	7	1	7	1	7
2022	1	6	9	23	0	6	3	5	3	5
2023	2	7	2	19	0	4	0	6	0	6
2024	1	8	2	8	2	4	0	7	0	7
2025	0	6	0	17	0	3	0	9	0	9
<b>Toplam Gün Sayısı</b>	<b>34</b>	<b>205</b>	<b>123</b>	<b>447</b>	<b>21</b>	<b>131</b>	<b>35</b>	<b>179</b>	<b>34</b>	<b>178</b>
<b>Yıllık Ortalama Gün Sayısı</b>	<b>1,5</b>	<b>8,9</b>	<b>5,3</b>	<b>19,4</b>	<b>0,9</b>	<b>5,7</b>	<b>1,5</b>	<b>7,8</b>	<b>1,5</b>	<b>7,7</b>



**Şekil 16.** Türkiye’de Bölgelerin Yıllara Göre Kuvvetli ve Ekstrem Tozlu Gün Sayıları

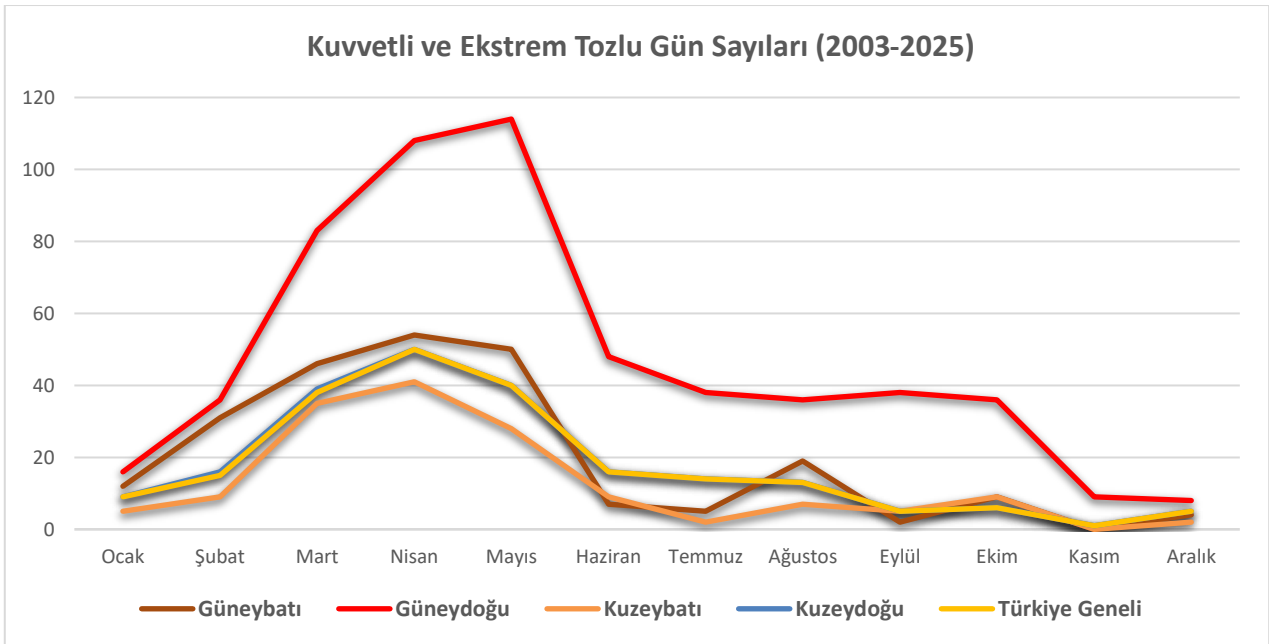
Tablo 10 ve Şekil 17 birlikte değerlendirildiğinde, kuvvetli ve ekstrem tozlu günlerin Türkiye genelinde belirgin bir mevsimsellik ve bölgesel farklılık sergilediği görülmektedir. Tozlu gün sayıları özellikle ilkbahar aylarında (Mart–Mayıs) belirgin şekilde artmakta, bu dönemde hem bölgesel hem de ülke geneli için maksimum değerlere ulaşmaktadır.

Güneydoğu bölgesi, yılın tüm aylarında en yüksek kuvvetli ve ekstrem tozlu gün sayılarına sahip olup, Nisan ve Mayıs aylarında açık bir zirve göstermektedir. Bu durum, bölgenin Suriye ve Irak çöllerine yakın konumu ile ilkbahar aylarında güçlenen güneyli ve güneybatılı sinoptik taşınım koşullarının etkisini yansıtmaktadır. Güneybatı ve kuzeydoğu bölgelerinde de ilkbaharda belirgin artışlar gözlenmekle birlikte, bu değerler güneydoğuya kıyasla daha sınırlı kalmaktadır. Kuzeybatı Bölgesi ise yıl genelinde en düşük tozlu gün sayılarına sahip olup, hem kuvvetli hem de ekstrem olayların oldukça sınırlı olduğu bir bölge olarak öne çıkmaktadır.

Yaz aylarından itibaren tüm bölgelerde tozlu gün sayılarında hızlı bir azalma görülmekte, sonbahar ve kış aylarında ise toz olayları daha seyrek ve zayıf karakter kazanmaktadır. Bu sonuçlar, Türkiye’de toz taşınımının hem zamansal hem de mekânsal dağılımının büyük ölçüde ilkbahar mevsiminde yoğunlaştığını ve güneydoğudan kuzeybatıya doğru azalan bir etki alanı sergilediğini ortaya koymaktadır.

**Tablo 10.** Türkiye’de Bölgelerin Aylara Göre Kuvvetli ve Ekstrem Tozlu Gün Sayıları (2003-2025)

AY	Güneybatı		Güneydoğu		Kuzeybatı		Kuzeydoğu		Türkiye Geneli	
	Ekstrem	Kuvvetli	Ekstrem	Kuvvetli	Ekstrem	Kuvvetli	Ekstrem	Kuvvetli	Ekstrem	Kuvvetli
Ocak	6	6	6	10	0	5	5	4	5	4
Şubat	6	25	11	25	4	5	1	15	1	14
Mart	6	40	23	60	7	28	11	28	10	28
Nisan	5	49	24	84	5	36	6	44	6	44
Mayıs	7	43	30	84	5	23	4	36	4	36
Haziran	0	7	8	40	0	9	2	14	2	14
Temmuz	0	5	6	32	0	2	0	14	0	14
Ağustos	1	18	5	31	0	7	2	11	2	11
Eylül	0	2	4	34	0	5	0	5	0	5
Ekim	1	8	3	33	0	9	2	4	2	4
Kasım	0	0	0	9	0	0	0	1	0	1
Aralık	2	2	3	5	0	2	2	3	2	3
<b>Toplam Gün Sayısı</b>	<b>34</b>	<b>205</b>	<b>123</b>	<b>447</b>	<b>21</b>	<b>131</b>	<b>35</b>	<b>179</b>	<b>34</b>	<b>178</b>
<b>Aylık Ortalama Gün Sayısı</b>	<b>0,1</b>	<b>0,7</b>	<b>0,4</b>	<b>1,6</b>	<b>0,1</b>	<b>0,5</b>	<b>0,1</b>	<b>0,6</b>	<b>0,1</b>	<b>0,6</b>



**Şekil 17.** Türkiye’de Bölgelerin Aylara Göre Kuvvetli ve Ekstrem Tozlu Gün Sayıları

Yıllık ortalama Kuvvetli ve Ekstrem Toz Olay sayılarının bölgesel dağılımına bakıldığında (Tablo 11), bölgeler arasında belirgin farklılıklar görülmektedir. Güneydoğu bölgesi, yıllık ortalama 19,4 kuvvetli ve 5,3 ekstrem tozlu gün ile açık ara en fazla toz olayının yaşandığı bölge konumundadır; toplamda yıllık ortalama 24,8 gün ile diğer bölgelerden belirgin şekilde ayrılmaktadır. Bu durum, bölgenin Orta Doğu kaynaklı çöl tozlarına doğrudan maruziyetini ortaya koymaktadır.

Güneydoğu bölgesini (24.8 gün), 10.4, 9.3, 9.2, 6.6 yıllık ortalama tozlu gün sayıları ile sırasıyla güneybatı, kuzeydoğu, Türkiye geneli ve kuzeybatı bölgeleri takip etmektedir. Genel olarak sonuçlar, Türkiye’de tozlu günlerin sıklığının güneydoğudan kuzeybatıya doğru azaldığını ve bu dağılımın çöl tozu kaynaklarına olan mesafe ile sinoptik taşınım koşullarıyla uyumlu olduğunu göstermektedir.

**Tablo 11.** Türkiye’de Bölgelere Göre Yıllık Ortalama Kuvvetli ve Ekstrem Tozlu Gün Sayıları

	Güneybatı	Güneydoğu	Kuzeybatı	Kuzeydoğu	Türkiye Geneli
<b>Kuvvetli Tozlu Gün sayısı</b>	8,9	19,4	5,7	7,8	7,7
<b>Ekstrem Tozlu Gün sayısı</b>	1,5	5,3	0,9	1,5	1,5
<b>Toplam</b>	<b>10,4</b>	<b>24,8</b>	<b>6,6</b>	<b>9,3</b>	<b>9,2</b>

Bu veriler, Türkiye’nin özellikle güney kesimlerinin Sahra ve Orta Doğu kaynaklı çöl tozu taşınımına karşı daha hassas olduğunu ve bunun yerel hava kalitesi, tarım ve halk sağlığı açısından önemli etkiler yaratabileceğini göstermektedir.

Toz taşınımı yalnızca görüş mesafesinin azalmasına yol açan kısa süreli bir meteorolojik olay değil; solunum ve kalp-damar hastalıklarında artış, tarımsal ürünlerde kalite ve verim kaybı, güneşlenme süresinde azalma ve atmosferik enerji dengesinde değişimler gibi çok boyutlu etkiler üreten çevresel bir süreçtir. Bu yönüyle toz olayları, çevresel, ekonomik ve sağlık boyutları olan bütüncül bir risk alanı olarak değerlendirilmelidir.

Küresel toz yükünün önemli bir bölümünü oluşturan doğal ve antropojenik kökenli tozların, kıtalar ve okyanuslar üzerinden yüzlerce hatta binlerce kilometre taşınabilmesi, bu etkilerin yalnızca kaynak bölgelerle sınırlı kalmamasına neden olmaktadır. Bu durum, toz taşınımını yerel bir hava kalitesi problemi olmaktan çıkararak bölgesel ve küresel ölçekte bir çevre sorunu haline getirmektedir. İklim değişikliğiyle birlikte kuraklık, arazi bozulmaları ve ekstrem hava koşullarının artması, toz olaylarının sıklık ve şiddetinde artış potansiyeline işaret etmektedir.

Bu çerçevede, özellikle Türkiye’nin güney bölgelerinde erken uyarı sistemlerinin güçlendirilmesi, toz taşınımının izlenmesi ve nicel olarak değerlendirilmesine yönelik altyapının geliştirilmesi ve politikaların bölgesel farklılıklar gözetilerek şekillendirilmesi büyük önem taşımaktadır. Aynı zamanda antropojenik tozun kaynakları, özellikleri ve etkilerinin daha iyi anlaşılabilmesi için mikro ölçekten küresel ölçeğe uzanan gözlemsel ve sayısal çalışmaların artırılması, iklim değişikliği–hava kalitesi–insan sağlığı etkileşimlerinin doğru ve bütüncül biçimde ele alınabilmesi açısından kritik bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır.

## 4. MGM TOZ TAŞINIMI TAHMİNLERİ

Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından; Batı Asya, Orta Doğu ve Kuzey Afrika için Toz Taşınımı tahminleri operasyonel olarak üretilmekte ve internet ortamında yayımlanmaktadır. ECMWF-CAMS (European Centre for Medium Range Weather Forecasts-Copernicus Atmosphere Monitoring Service) modeli ile; 3'er saatlik periyotlarla 3 günlük olarak üretilen toz taşınımı tahminleri ve saatlik uydu toz ürünleri, aşağıda verilen web adreslerinde yayımlanmaktadır. Tahminlerde, hem yer seviyesi toz konsantrasyonları hem de atmosferdeki aerosollerin dikey derinlikleri (AOD) bulunmaktadır.

Toz Taşınımı Tahminleri

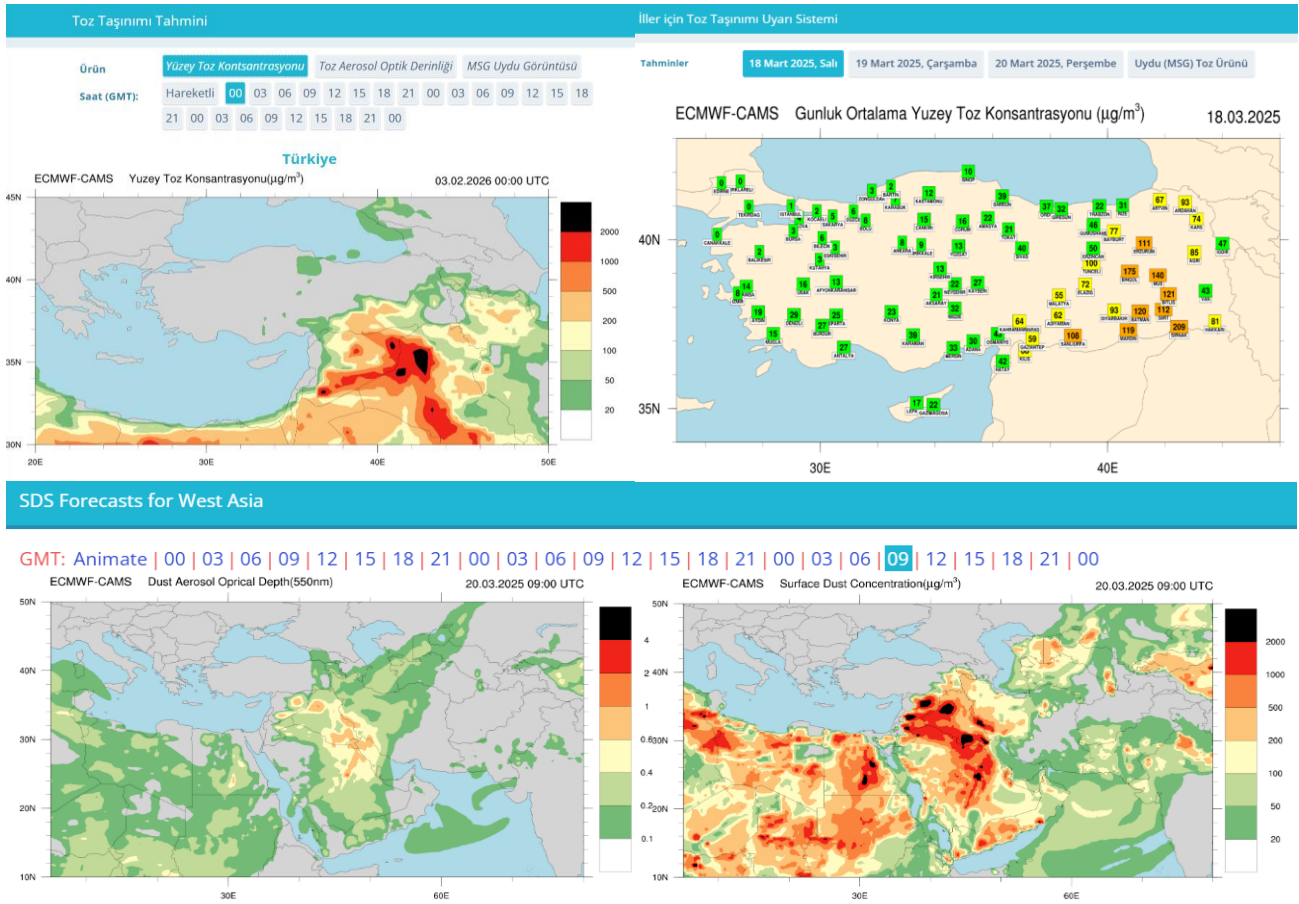
<https://www.mgm.gov.tr/tahmin/toz-tahmini.aspx>

Toz Taşınımı Uyarı Sistemi

<https://www.mgm.gov.tr/tahmin/toz-tasinimi.aspx>

Batı Asya Sanal Toz Taşınımı Tahmin Merkezi

<http://sdsww.mgm.gov.tr/>



## KAYNAKLAR

- Allen, R. J., Landuyt, W., & Rumbold, S. T.** (2016). An increase in aerosol burden and radiative effects in a warmer world. *Nature Climate Change*, 6(3), 269-274.
- Awadh S.M.** (2023). Impact of North African Sand and Dust Storms on the Middle East Using Iraq as an Example: Causes, Sources, and Mitigation. *Atmosphere*. 14(1):180. <https://doi.org/10.3390/atmos14010180>
- Bolorani, A. D., Nabavi, S. O., Azizi, R., & Bahrami, H. A.** (2013). Characterization of dust storm sources in western Iran using a synthetic approach. In *Advances in meteorology, climatology and atmospheric physics* (pp. 415-420). Springer, Berlin, Heidelberg.
- De Longueville, F., Hountondji, Y. C., Henry, S., & Ozer, P.** (2010). What do we know about effects of desert dust on air quality and human health in West Africa compared to other regions?. *Science of the Total Environment*, 409(1), 1-8.
- Dündar C.,** (2019). “Büyük Akdeniz Havzasında Kum ve Toz Fırtınalarının İncelenmesi ve Türkiye’yi Etkileyen Toz Kaynak Bölgelerinin Belirlenmesi”, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara.
- European Environment Agency** (09.04.2025). Benchmark analysis against the standards in the revised directive (EU) 2024/2881, <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/air-quality-status-report-2025/benchmark-analysis-against-the-standards-in-the-revised-directive-eu-2024-2881>
- Foreman, T.** (2018). The effect of dust storms on child health in West Africa. Columbia University: CDEP-CGEG Working Paper.
- Gkikas, A., Basart, S., Hatzianastassiou, N., Marinou, E., Amiridis, V., Kazadzis, S., Pey, J., Querol, X., Jorba, O., Gassó, S., and Baldasano, J. M.:** Mediterranean intense desert dust outbreaks and their vertical structure based on remote sensing data, *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 8609–8642, <https://doi.org/10.5194/acp-16-8609-2016>, 2016
- Ginoux, P., J.M. Prospero, T.E. Gill, N.C. Hsu, and M. Zhao** (2012). Global-scale attribution of anthropogenic and natural dust sources and their emission rates based on MODIS Deep Blue aerosol products. *Reviews of Geophysics*, doi:10.1029/2012rg000388.
- Hooper, J. and S. Marx** (2018). A global doubling of dust emissions during the Anthropocene? *Global and Planetary Change*, doi:10.1016/j.gloplacha.2018.07.003.
- IPCC, 2021:** Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press
- Kok, J.F., D.S. Ward, N.M. Mahowald, and A.T. Evan** (2018). Global and regional importance of the direct dust-climate feedback. *Nature communications*, 9(1), 241, doi:10.1038/s41467-017-02620-y .
- Lian, S., Zhou, L., Murphy, D. M., Froyd, K. D., Toon, O. B., & Yu, P.** (2022). Global distribution of Asian, Middle Eastern, and North African dust simulated by CESM1/CARMA. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(20), 13659-13676.
- Muhs, D. R., Prospero, J. M., Baddock, M. C., and Gill, T. E.** (2014). Identifying sources of aeolian mineral dust: Present and past. In *Mineral Dust* (pp. 51-74). Springer Netherlands.
- OECD.** (2019). OECD Çevresel Performans İncelemeleri Türkiye 2019. <https://www.oecd.org/turkey/oecd-cevresel-performans-incelemeleri-turkiye-2019-653318da-tr>
- Perez, C.**(2010). How does climate influence infectious diseases? Unraveling the effects of dust and climate on meningitis epidemics in the Sahel. The Earth Institute Fellows Symposium. Columbia University, New York, May 10th.

- Prospero J.M., Ginoux P., Torres O., Nicholson S.E., Gill T.E.,** (2002). Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust derived from the NIMBUS7 TOMS absorbing aerosol product, *Rev; Geophysical Journal*, vol 40, p., 2002.
- Pu, B. and P. Ginoux,** (2018). How reliable are CMIP5 models in simulating dust optical depth? *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(16) , 12491–12510, doi:10.5194/acp-18-12491-2018 .
- Ridley, D.A., Heald, C.L., and Prospero, J.M.,** (2014). What controls the recent changes in African mineral dust aerosol across the Atlantic? *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(11), 5735–5747, doi:10.5194/acp-14-5735-2014 .
- Rodríguez, S., Riera, R., Fonteneau, A., Alonso-Pérez, S., & López-Darias, J.** (2023). African desert dust influences migrations and fisheries of the Atlantic skipjack-tuna. *Atmospheric Environment*, 312, 120022.
- Siyu Chen et al.** (2023). Anthropogenic dust: sources, characteristics and emissions. *Environ. Res. Lett.* 18 103002
- Şengün, M. T. & Kiranşan, K.** (2012). Çöl Tozlarının Türkiye’de Doğal ve Beşeri Ortam Üzerine Etkisi. *Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*. 22. 1-15.
- Tanaka, T. Y., & Chiba, M.** (2006). A numerical study of the contributions of dust source regions to the global dust budget. *Global and Planetary Change*, 52(1), 88-104.
- Tegen, I., & Schepanski, K.** (2018). Climate feedback on aerosol emission and atmospheric concentrations. *Current Climate Change Reports*, 4(1), 1-10.
- THHP** (2024). “Kara Rapor 2024: Türkiye’de Hava Kirliliği ve Sağlığa Etkileri”. <https://temizhavahakki.com/kararapor2024/>
- Wang, W., A.T. Evan, C. Flamant, and C. Lavaysse,** (2015). On the decadal scale correlation between African dust and Sahel rainfall: The role of Saharan heat low–forced winds. *Science Advances*, 1(9), e1500646, doi:10.1126/sciadv.1500646 .
- Webb, N.P. and C. Pierre,** (2018). Quantifying anthropogenic dust emissions. *Earth’s Future*, 6(2), 286–295.
- WHO.** 2022. “Fact Sheets: Household Air Pollution.” Geneva: World Health Organization. <https://www.who.int/newsroom/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health>.
- WMO.** 2025. “WMO Airborne Dust Bulletin No. 8 – July 2024”. <https://wmo.int/publication-series/wmo-airborne-dust-bulletin-no-9-july-2025>
- WMO and UNEP,** (2013). “Establishing a WMO Sand and Dust Storm Warning Advisory and Assessment System Regional Node for West Asia: Current Capabilities and Needs”, Technical Report, WMO-No. 1121, ISBN 978-92-63-11121-0, Geneva.
- World Air Quality Report.** IQAir. (n.d.). <https://www.iqair.com/newsroom/world-air-quality-report-press-release-2022>
- European Environment Agency** - <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/air-quality-status-report-2025/benchmark-analysis-against-the-standards-in-the-revised-directive-eu-2024-2881> Web Sayfası, Son Kontrol: 02.02.2026.
- [https://neo.gsfc.nasa.gov/view.php?datasetId=MODAL2\\_M\\_AER\\_OD](https://neo.gsfc.nasa.gov/view.php?datasetId=MODAL2_M_AER_OD), NEO (Nasa Earth Observations) Web Sayfası, Son Kontrol: 26.03.2024.





