

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**TÜRKİYE’DE HAVA KİRLİLİĞİ KONSANTRASYON DEĞERLERİNİN
METEOROLOJİK DEĞİŞKENLER İLE ARASINDAKİ İLİŞKİLERİN
BELİRLENMESİ VE KİRLETİCİ KONSANTRASYONLARININ DOĞASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Enes BİRİNCİ

Meteoroloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Atmosfer Bilimleri Programı

ARALIK 2023

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**TÜRKİYE’DE HAVA KİRLİLİĞİ KONSANTRASYON DEĞERLERİNİN
METEOROLOJİK DEĞİŞKENLER İLE ARASINDAKİ İLİŞKİLERİN
BELİRLENMESİ VE KİRLETİCİ KONSANTRASYONLARININ DOĞASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Enes BİRİNCİ
(511211009)**

Meteoroloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Atmosfer Bilimleri Programı

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Emrah Tuncay ÖZDEMİR
Eş Danışman: Prof. Dr. Ali DENİZ**

ARALIK 2023

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 511211009 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Enes BİRİNCİ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "TÜRKİYE'DE HAVA KİRLİLİĞİ KONSANTRASYON DEĞERLERİNİN METEOROLOJİK DEĞİŞKENLER İLE ARASINDAKİ İLİŞKİLERİN BELİRLENMESİ VE KİRLLETİCİ KONSANTRASYONLARININ DOĞASI" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Emrah Tuncay ÖZDEMİR**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Eş Danışman : **Prof. Dr. Ali DENİZ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Öğr. Gör. Dr. Hüseyin ÖZDEMİR**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Haldun KARAN
TÜBİTAK

Doç. Dr. Hakkı BALTACI
Gebze Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 27 Kasım 2023
Savunma Tarihi : 20 Aralık 2023





Destęini esirgemeyen tüm sevdiklerime,



ÖNSÖZ

Öncelikle tez çalışmam sırasında desteklerini esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Emrah Tuncay ÖZDEMİR'e ve eş danışman hocam Prof. Dr. Ali DENİZ'e, çalışmalarım da her zaman yanımda bulunan ve desteklerini sürdüren Öğr. Gör. Dr. Hüseyin ÖZDEMİR hocama, akademik olarak gelişmem de katkısı olan Meteoroloji Mühendisliği Bölümündeki tüm öğretim üyesi hocalarıma, sonrasında her konuda her zaman destekleriyle yanımda olan başta çok değerli aileme ve sevgili kardeşlerime, ayrıca her zaman desteklerini esirgemeyen saygıdeğer arkadaşlarıma minnetlerimi sunarım.

Hava Kalitesi verilerini sağlayan İstanbul Büyükşehir Belediyesi'ne ve Çevre Şehircilik Ve İklim Değişikliği Bakanlığı'na teşekkür ederim. Ayrıca, bu tez projesi İTÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 44538 no'lu proje kapsamında desteklenmektedir.

Önümüzdeki yıllarda daha da çok çalışarak ülkemize katkı sağlamayı hedef alarak durmadan çalışacağıma ve tezin yeni yapılacak çalışmalara katkı sağlamasını temenni ediyorum.

Aralık 2023

Enes BİRİNCİ
Meteoroloji Mühendisi



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR.....	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	3
1.2 Literatür Araştırması	3
2. HAVA KİRLETİCİLERİ İLE METEOROLOJİK DEĞİŞKENLER ARASINDAKİ İLİŞKİ.....	7
2.1 Giriş	7
2.2 Çalışma Alanı ve Veri	8
2.3 Materyal ve Metot	9
2.3.1 Lineer regresyon modeli	10
2.3.2 Pearson korelasyon katsayısı.....	10
2.3.3 Spearman's rank korelasyon katsayısı	11
2.3.4 Kendall Tau korelasyon katsayısı	11
2.3.5 Auto korelasyon fonksiyonu	11
2.3.6 Cross korelasyon fonksiyonu	11
2.3.7 Zaman serisi analizleri ve nonlinear analiz	12
2.4 Tartışma ve Sonuçlar.....	12
3. UZUN MESAFELİ TOZ TAŞINIMININ HAVALİMANLARINA VE HAVA KALİTESİNE OLAN ETKİLERİ	21
3.1 Giriş	21
3.2 Çalışma Alanı ve Veri	22
3.3 Materyal ve Metot	25
3.3.1 Metar ve Speci analizleri.....	25
3.3.2 Sinoptik haritalar	25
3.3.3 Uydu görüntüleri	26
3.3.4 BSC-DREAM8b model.	26
3.3.5 HYSPLIT analizi.....	26
3.4 Tartışma ve Sonuçlar.....	27
4. MARMARA BÖLGESİ'NDEKİ TOZ FIRTINALARININ İNCELENMESİ	35
4.1 Giriş	35
4.2 Çalışma Alanı ve Veri	36
4.3 Materyal ve Metot	38

4.3.1 Metar ve Speci analizleri.....	38
4.3.2 HYSPLIT analizi.....	40
4.4 Tartışma ve Sonuçlar.....	40
5. ATMOSFERİN DİNAMİK YAPISININ HAVA KİRLİLİĞİNE OLAN ETKİLERİ.....	47
5.1 Giriş.....	47
5.2 Çalışma Alanı ve Veri.....	48
5.3 Materyal ve Metot.....	49
5.3.1 Yukarı seviye ve yer kartı haritaları.....	49
3.3.2 Atmosferik sondaj ve ERA5 verileri.....	49
3.3.1 Ceilometer.....	50
5.4 Tartışma ve Sonuçlar.....	51
6. ATMOSFERİN KAOTİK YAPISININ PARTİKÜL MADDEYE ETKİSİ... 61	61
6.1 Giriş.....	61
6.2 Çalışma Alanı ve Veri.....	62
6.3 Materyal ve Metot.....	63
6.3.1 Recurrence analizi.....	63
6.3.2 Gecikme zamanı ve gömme boyutu.....	64
6.3.3 Maksimum Lyapunov eşitliği.....	64
6.3.4 Korelasyon boyutu.....	65
6.4 Tartışma ve Sonuçlar.....	66
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	71
KAYNAKLAR.....	75
EKLER.....	85
ÖZGEÇMİŞ.....	89

KISALTMALAR

PM	: Partikül Madde
METAR	: Havacılık Amaçlı Rutin Hava Raporu
SPECI	: Havacılık Amaçlı Seçilmiş Özel Hava Raporu
MSG	: Meteosat Second Generation
MODIS	: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
HYSPLIT	: The Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model
HKİİ	: Hava Kalitesi İzleme İstasyonu
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
PCC	: Pearson Korelasyon Katsayısı
ACF	: Auto Korelasyon Fonksiyonu
CCF	: Cross Korelasyon Fonksiyonu
AHKİ	: Avrupa Hava Kalitesi İndeksi
hPa	: Hektopaskal
OMGİ	: Otomatik Meteoroloji Gözlem İstasyonu
DLNM	: Distributed Lag Non-Linear Model
NDVI	: Normalleştirilmiş Bitki Örtüsü Farkı Endeksi
RAQMS	: Regional Air Quality Modeling System
SEVIRI	: Spinning Enhanced Visible and InfraRed Image
MGM	: Meteoroloji Genel Müdürlüğü
PBL	: Planetary Boundary Layer
AMI	: Average Mutual Information
CALIPSO	: Cloud – Aerosol LIDAR Infrared Pathfinder Satellite Observations
GFS	: Global Forecast System
RGB	: Red Green Blue
KN	: KNOT
ECMWF	: The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
ERA5	: ECMWF Reanalysis v5
İTÜ	: İstanbul Teknik Üniversitesi
LIDAR	: An Acronym For Light Detection And Ranging
PBL	: Planetary Boundary Layer



SEMBOLLER

β_0	: y ekseninin kesişim değeri
β_1	: Regresyon katsayısı
r	: Korelasyon değeri
μg	: Mikrogram
Ω	: Omega
z	: Yükseklik
T	: Sıcaklık
T_d	: Çiy noktası sıcaklığı
N	: Veri sayısı
R_{ij}	: Yineleme matrisi
ϵ_i	: Eşik mesafesi
λ	: Lyapunov üssü
NO_x	: Azot Oksitler
NO	: Azot Monoksit
NO_2	: Azot Dioksit
PM_{10}	: Çapı 10 μm veya daha küçük parçacık
$PM_{2.5}$	: Çapı 2,5 μm veya daha küçük parçacık
O_3	: Ozon
SO_2	: Kükürt Dioksit



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : PM ₁₀ konsantrasyonun 2011-2018 yılları arasındaki yıllık ortalama, maksimum, minimum, günlük maksimum, 8 ve 24 saatlik ortalama yuvarlama değerleri.	13
Çizelge 2.2 : 2011-2018 yılları arasında rüzgar yönü ve şiddeti, sıcaklık ve bağıl nem değerlerinin ortalama, maksimum ve minimum değerleri (WS: Rüzgar Şiddeti, T: Sıcaklık, RH: Bağıl Nem).	14
Çizelge 3.1 : Türkiye, Libya ve Mısır için havalimanı bilgileri.	24
Çizelge 3.2 : Metar ve Speci kodlarının açıklamaları.....	25
Çizelge 4.1 : Havalimanları ile HKİİ arasındaki mesafe ve ölçülen PM.....	38
Çizelge 4.2 : 2012-2021 yılları arasında toz ve kum fırtınalarının sıklığı.....	39
Çizelge 4.3 : İstanbul Sabiha Gökçen Uluslararası Havalimanı, Balıkesir Merkez Havalimanı ve Bursa Yenişehir Havalimanındaki toz olayları ve rüzgar ölçümleri.	42
Çizelge 5.1 : 30 Aralık 2022 ile 4 Ocak 2023 arasındaki enverziyon seviyeleri.....	59
Çizelge 5.2 : 27.02.2022 ile 07.01.2023 tarihleri arasında PM _{2.5} maksimum, minimum, ortalama, standart sapma ve veri yüzde değerleri.....	60
Çizelge 6.1 : Gömme boyutuna göre maksimum Lyapunov değerleri.	69



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Türkiye'nin coğrafi konumu.	9
Şekil 2.2 : Atatürk Uluslararası Havalimanı ve Yenibosna HKİİ'nin İstanbul'daki konumu.	9
Şekil 2.3 : Rüzgar şiddeti (m/s) ile PM ₁₀ konsantrasyonu (µg/m ³) arasındaki doğrusal ilişki grafiği.	16
Şekil 2.4 : Rüzgar hızı ve yönünün 8 yıllık ortalama şiddeti ve yön grafiği.	16
Şekil 2.5 : Günlük maksimum PM ₁₀ konsantrasyonunun 2011 ile 2018 yılları arasındaki hava kalitesi sınıflandırılması.	17
Şekil 2.6 : NO _x , NO, NO ₂ , PM ₁₀ , PM _{2.5} , O ₃ ve SO ₂ konsantrasyonlarının 2021 ile 2022 yılları arasındaki zaman serisi analizleri.	17
Şekil 2.7 : Arnavutköy HKİİ korelasyon grafiği.	18
Şekil 2.8 : Meteorolojik değişkenlerle hava kirleticileri arasında korelasyon matrisi.	18
Şekil 3.1 : Kuzey Afrika ve Türkiye'deki uluslararası havalimanları.	23
Şekil 3.2 : 7 Nisan 00:00 UTC 2013 yüzey basınç haritası ve 10 m'deki rüzgar yönü.	28
Şekil 3.3 : 7 Nisan 12:00 UTC 2013 yüzey basınç haritası ve 10 m'deki rüzgar yönü.	28
Şekil 3.4 : 6 Nisan 2013 TERRA uydu görüntüsü.	29
Şekil 3.5 : 7 Nisan 2013 TERRA uydu görüntüsü.	29
Şekil 3.6 : 8 Nisan 2013 TERRA uydu görüntüsü.	30
Şekil 3.7 : 6, 7, 8 Nisan 00:00 UTC 2013 BSC-DREAM8b tahmini.	31
Şekil 3.8 : 8 Nisan 13:00 UTC 2013 HYSPLIT İncirlik geri yörünge analizi.	32
Şekil 3.9 : 7, 8, 9 Nisan 2013 Türkiye havalimanlarında günlük PM ₁₀ konsantrasyonu.	33
Şekil 4.1 : Türkiye'nin Marmara bölgesindeki havalimanları ve HKİİ'lerin konumu.	37
Şekil 4.2 : Toz gerçekleştiği zaman PM ₁₀ konsantrasyon değerleri (Url-2).	41
Şekil 4.3 : 24.03.2016 İstanbul Sabiha Gökçen Uluslararası Havalimanı için geriye doğru yörünge analizi.	44
Şekil 4.4 : 01.02.2015 Bursa Yenişehir Havalimanı için geriye doğru yörünge analizi.	45
Şekil 5.1 : Ceilometer ve HKİİ'lerin İstanbul'daki konumu	48
Şekil 5.2 : 30.12.2022 500 hPa jeopotansiyel yüksekliği.	51
Şekil 5.3 : 31.12.2022 500 hPa jeopotansiyel yüksekliği.	52
Şekil 5.4 : 01.01.2023 500 hPa jeopotansiyel yüksekliği.	52
Şekil 5.5 : 02.01.2023 500 hPa jeopotansiyel yüksekliği.	52
Şekil 5.6 : 03.01.2023 500 hPa jeopotansiyel yüksekliği.	53
Şekil 5.7 : 04.01.2023 500 hPa jeopotansiyel yüksekliği.	53
Şekil 5.8 : 05.01.2023 500 hPa jeopotansiyel yüksekliği.	54
Şekil 5.9 : 1 Ocak 2023 17:57 İstanbul Boğazı.	55

Şekil 5.10 : 27 Aralık 2022 ile 07 Ocak 2023 arasındaki saatlik basınç değişimi (url-2).	55
Şekil 5.11 : 27 Aralık 2022 ile 07 Ocak 2023 arasındaki saatlik rüzgar şiddeti değişimi (url-2).	56
Şekil 5.12 : 01 Ocak 00:00 UTC için yüzey basıncı grafiği	56
Şekil 5.13 : 1 Ocak 06:00 UTC için yüzey basıncı grafiği.	57
Şekil 5.14 : Ortalama sınır tabakası yüksekliği.	58
Şekil 6.1 : İstanbul ve Yenibosna HKİİ'nin konumu.	63
Şekil 6.2 : Günlük PM ₁₀ (µg/m ³) konsantrasyonu.	66
Şekil 6.3 : PM ₁₀ 'un gömme boyutunun hesaplanması.	67
Şekil 6.4 : Maksimum Lyapunov üssü değerleri.	68
Şekil 6.5 : PM ₁₀ için korelasyon boyutu ve toplamı.	69
Şekil A.1 : PM ₁₀ konsantrasyonun saatlik, haftalık ve aylık değişimleri.	86
Şekil A.2 : PM ₁₀ konsantrasyonun 2011-2018 yılları arasındaki özet grafiği.	86
Şekil B.1 : 2011- 2018 yılları arasındaki rüzgar şiddeti ve yön değerlerinin K-means cluster dağılımı.....	87
Şekil B.2 : 5 Nisan 2013 00:45 UTC Calipso görüntüsü.....	87

TÜRKİYE’DE HAVA KİRLİLİĞİ KONSANTRASYON DEĞERLERİNİN METEOROLOJİK DEĞİŞKENLER İLE ARASINDAKİ İLİŞKİLERİN BELİRLENMESİ VE KİRLETİCİ KONSANTRASYONLARININ DOĞASI

ÖZET

Hava kirleticileri doğal kaynaklar ve antropojenik kaynaklar olarak iki sınıfta incelenebilmektedir. Hava kirleticileri volkanik patlamalar, orman yangınları, toz fırtınaları ile oluşmakla beraber antropojenik kaynaklarla da motorlu taşıtlar, ısınma ve endüstriyel olarak sıralanabilir. Bu kirleticiler atmosferi ve çevreye zararlı etkileri bulunmaktadır. Hava kirleticilerden biri olan çapı 10 µm ve daha küçük parçacık (PM₁₀), İstanbul'da kış aylarında düzenli olarak meydana gelmektedir. PM₁₀ birçok faktörden etkilenmektedir. Bu faktörler arasında çeşitli meteorolojik değişkenler ve klimatolojik faktörler bulunmaktadır. Bu çalışma beş ana başlıktan oluşmaktadır. Bu çalışma ile kirliliği sebep olan atmosferin dinamik ve fiziksel yapısı, kimyasal süreçler, uzun mesafeli toz taşınımı, antropojenik faktörler, yerel faktörler ve kirleticilerin yapısı incelenerek kirliliğe neden olan bütün faktörlerin etkisi ortaya çıkartılmıştır. İlk olarak PM₁₀ ile meteorolojik değişkenler (rüzgar şiddeti, rüzgar yönü, sıcaklık ve bağıl nem) arasındaki ilişkiyi belirlemek, kirletici konsantrasyonlarının birbirleri arasındaki ilişkiyi belirlemek ve NO_x, NO, NO₂, PM₁₀, PM_{2.5}, O₃ ve SO₂ kirleticileri ile meteorolojik değişkenler arasındaki ilişkiyi belirlemek ve bu sonuçları yorumlamaktır. PM₁₀ değerleriyle birlikte meteorolojik veriler 2011'den 2018 yılına kadar incelenmiştir. İlişkiyi belirlemek için doğrusal regresyon, Pearson korelasyon katsayısı, Spearman's rank korelasyonu, Kendall Tau korelasyonu, otokorelasyon fonksiyonu (ACF), cross korelasyon fonksiyonu (CCF) kullanılmıştır. Görselleştirmeler R programı (openair) paketleri kullanılarak yorumlanmıştır. Çalışmada rüzgar şiddeti ve hızı, sıcaklık ve bağıl nem ile PM₁₀ arasındaki ilişki belirlenmiştir. PM₁₀ konsantrasyonunun Ocak ve Şubat ayları arasında maksimum olduğu görülmüştür. PM₁₀ konsantrasyonları bağıl nem ve rüzgar yönü ile pozitif bir ilişkiye sahipken, rüzgar şiddeti ve sıcaklık ile negatif bir ilişki olduğu belirlenmiştir. Bağıl nem ve sıcaklık için korelasyon değerleri sırasıyla 0,01 ve -0,15 olarak bulunmuştur. Ayrıca rüzgar şiddeti ile PM₁₀ arasındaki ilişki doğrusal regresyon modelinden hesaplanmış ve tahmin edilen değer -0,12 iken, rüzgar yönü değerine bakıldığında ise yaklaşık 0,02 olarak bulunmuştur. NO_x, NO, NO₂, PM₁₀, PM_{2.5}, O₃ ve SO₂ verileri için 2021-2022 yılları arasındaki veriler kullanılmıştır. Kirleticilerin birbirleri arasındaki ilişkiyi belirleme de ve NO_x, NO, NO₂, PM₁₀, PM_{2.5}, O₃ ve SO₂ ile meteorolojik değişkenler arasındaki ilişkiyi belirlemede Pearson korelasyon katsayısı kullanılmıştır. PM_{2.5} ile NO₂ arasında 0.63'lük bir korelasyon değeri ile pozitif bir ilişki olduğu bulunmuştur. En yüksek korelasyon değeri rüzgar şiddeti ile O₃ arasında (r=0.26) olarak bulunmuştur.

İkinci bölümde, uzun mesafeli toz taşınımının hava kalitesi ve havacılığa olan etkisi de oldukça önemlidir. Bu yüzden bir olay incelemesinde orta Akdeniz'de bulunan 995 hPa değerindeki bir siklon gelişerek Türkiye'ye doğru hareket etmiştir. Sahra Çölü

üzerinden kalkan tozların bu sistemle taşınımı sonucunda Türkiye’de bulunan 13 havalimanında 7-10 Nisan 2013 tarihleri arasındaki farklı zaman dilimlerinde toz pusu, geniş alana yayılmış toz ve savrulan toz hadiselerinin gözlemlenmesine neden olmuştur. Güneyli rüzgarlarla birlikte Kapadokya Havalimanı’nda savrulan toz hadisesiyle birlikte hakim rüyet 3800 m’ye kadar düşerek bu siklon geçişinde havalimanlarında ölçülen en düşük değer olmuştur. Bu çalışmada; Kuzey Afrika ve Türkiye üzerinde bulunan havalimanlarının Havacılık Amaçlı Rutin Hava Raporu (Metar) ve Havacılık Amaçlı Seçilmiş Özel Hava Raporu (Speci) rasatları 3-11 Nisan tarihleri için değerlendirilmiştir. Libya’da bulunan Benina Havalimanı’nda hakim rüyet siklon ile birlikte 6 Nisan 2013 tarihinde 50 m’ye kadar düşmüştür. Bu bölümde, uzun mesafeli toz taşınımının Türkiye’deki havalimanlarındaki hakim rüyete etkilerinin değerlendirilmesini ve Hava Kalitesi İzleme İstasyonları (HKİİ) tarafından ölçülen PM₁₀ değerlerinin epizodik değişimleri incelenmiştir. Uzun mesafeli toz taşınımını belirlemek için toz taneciklerinin yörüngelerini belirlemek için Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) model çıktıları kullanılmıştır. Analizler için toz Red Green Blue (RGB) ve Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) uydu görüntüleri, Cloud – Aerosol LIDAR Infrared Pathfinder Satellite Observations (CALIPSO) görüntüleri, BSC-DREAM8b model çıktıları, Global Forecast System (GFS) sinoptik haritaları kullanılmıştır. Ayrıca HKİİ’lerden elde edilen PM₁₀ değerleri incelenmiştir. CALIPSO görüntülerinden elde edilen verilere göre Doğu Akdeniz üzerindeki tozun varlığı 5 km’ye kadar çıkmaktadır. Bazı hava kalitesi ölçüm istasyonlarından elde edilen epizodik değerler ise saatlik ortalama olarak Karaman 900 µg/m³ ve Yozgat 782 µg/m³’tür.

Üçüncü bölümde, uzun mesafeli toz taşınımının ne sıklıkla Türkiye’ye geldiği ve toz taşınımının Partikül Madde (PM) üzerine etkilerini belirlemek oldukça önemlidir. Bu yüzden, toz taneciklerinden bulunan doğal mineral toz PM konsantrasyonlarını yükseltir. Böylece, konsantrasyonların yükselmesiyle birlikte hava kalitesi düşmektedir. Başlıca toz kaynaklarından biri olan Sahra Çölü’nden gelen toz taşınımı, Türkiye’nin de aralarında bulunduğu Doğu Akdeniz havzasını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu bölümde, uzun mesafeli toz taşınımının Türkiye’deki havalimanlarında görülme sıklığı ve bu havalimanlarına en yakın HKİİ’lerden ölçülen PM konsantrasyonları üzerindeki etkisini araştırmaktadır. Uzun mesafeli toz taşınımını belirlemek için üç farklı yaklaşım kullanılmıştır. Öncelikle çalışma bölgesindeki havaalanlarındaki meteorolojik koşullara ilişkin Metar ve Speci raporları incelenmiştir. Bu nedenle, toz olayı günlerinin belirlenmesinde, çalışma alanındaki 11 havalimanında 2012-2021 yılları arasında kaydedilen Metar ve Speci kodları kullanılmıştır. Daha sonra havalimanlarına en yakın HKİİ’lerden elde edilen saatlik PM ölçümleri alınarak veri seti analiz edilmiştir. Son olarak, toz hadiselerini doğrulamak ve tozun kaynağını bulmak için bölgesel atmosferik toz modeli sonuçları ve HYSPLIT geri yörünge analizi kullanıldı. Sonuçlar, çalışma döneminde 163 toz olayının meydana geldiğini, bunların %17’sinin Kuzey Afrika’dan ve %12’sinin Akdeniz bölgesinden geldiğini göstermiştir.

Dördüncü bölümde, hava kirliliğini arttıran en önemli faktörlerden birisi de atmosferin dinamik yapısıdır. Bu çalışmada, İstanbul üzerinde 30 Aralık 2022 ile 5 Ocak 2023 tarihleri arasında meydana gelen atmosferik engelleme hava kirliliği emisyon değerlerinin önemli ölçüde arttırdığı ve konsantrasyon değerlerinin hava kalitesi sınır değerlerini aştığı tespit edilmiştir. 500 hPa yukarı seviyesi haritaları incelenerek blokaj analiz edilmiştir. Blokajın etkisini belirlemek için İstanbul’da bulunan HKİİ’lerden

alınan saatlik kirletici verileri, ECMWF Reanalysis v5 (ERA5)'te elde edilen yeniden analiz verileri, enverziyon seviyeleri, meteorolojik ve sinoptik analiz ve Ceilomete kullanılarak incelemeler yapılmıştır. İstatistiksel hesaplamalar ve veri görselleştirmeleri R ve Grads programı kullanılarak yapıldı. İstanbul'da 30 Aralık 2022'de etkisini gösteren Omega blokajı, 1 Ocak ve 2 Ocak 2023'te ciddi etki göstererek, PM_{10} ve $PM_{2.5}$ konsantrasyon değerlerini sırasıyla 572,8 ve 254,20 $\mu g/m^3$ seviyesine çıkararak pik değerlere ulaşmıştır. Ayrıca incelenen dönemde hemen hemen tüm istasyonlarda ortalama konsantrasyon değerlerinin Ocak ve Şubat ayı ortalamalarından yüksek olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak İstanbul'un bu tarihler arasında hava kalitesi açısından "poor - zayıf" olduğu belirlenmiştir. Blokajın, Ozon (O_3) $\mu g/m^3$ konsantrasyonunu etkilemediği tespit edilmiştir. Fotoğraflarla İstanbul'da görülen engellenmenin etkisiyle kirletici konsantrasyonlarının arttığı görülmüştür. Son olarak uzaktan algılama yöntemiyle çalışan Ceilometer cihazı ile elde edilen verilere göre bulut taban yükseklikleri incelenmiştir.

Beşinci bölümde, PM_{10} konsantrasyonlarının yapısı incelenmiştir. Lorenz dinamik dinamik sistemine göre PM_{10} değerlerinin kaos teorisinin (kaos-teorik) bakış açısıyla incelenmesi çok önemlidir. PM_{10} zaman serisindeki kaotik özellikleri sezgisel bakış açısıyla incelenebilmektedir. Son zamanlarda, PM_{10} zaman serisi verilerindeki kaosun dinamik yönlerini değerlendirmek için faz uzaylarının yeniden yapılandırılması kullanılmıştır. İstanbul Yenibosna HKİİ'lerden 2011-2022 yılları arasında günlük PM_{10} değerleri alınmıştır. PM değerlerinin kaos analizini, recurrence analizi, gecikme süresi ve yerleştirme boyutu, maksimum Lyapunov üssü ve korelasyon boyutu ve toplamı kullanılarak yapılmıştır. R programının "nonlinearTseries" paketini kullanarak analizler yapılmıştır. PM_{10} değişim süreçlerinin dinamiklerinin doğrusal olmama, durağan olmama ve kaosla karakterize edildiği gözlemlenmiştir. PM_{10} zaman serisinde bulunan kaotik özellikler, maksimum Lyapunov üssünün pozitif bir değer olması ve faz uzayına yansıtıldığında çekicilerin açılmamış yapısı nedeniyle kaynaklanmaktadır. Ayrıca, yeniden inşa aşamasında karakteristik olarak gözlenen yapısal desenler, yani beyaz bantlarla bölünmüş çapraz çizgiler, kaotik özelliklerin varlığına işaret etmektedir. Ayrıca PM_{10} değerleri için gecikme süresi ve gömme boyutu hesaplanmıştır.



DETERMINATION OF THE RELATIONSHIPS BETWEEN AIR POLLUTION CONCENTRATION VALUES AND METEOROLOGICAL VARIABLES IN TURKEY AND THE NATURE OF POLLUTANT CONCENTRATIONS

SUMMARY

Air pollutants can be divided into two classes: natural sources and anthropogenic sources. Air pollutants are produced by volcanic eruptions, forest fires and dust storms, but also by anthropogenic sources such as motor vehicles, domestic heating and industrial resources. These pollutants have harmful effects on the atmosphere and the environment. Particles with a diameter of 10 μm and smaller (PM_{10}), one of the air pollutants, occur regularly in İstanbul during the winter months. PM_{10} is affected by many factors. These factors include various meteorological variables and climatological factors. This study consists of five main headings. In this study, the effects of all factors causing pollution were revealed by examining the dynamic and physical structure of the atmosphere that causes pollution, chemical processes, long-range dust transport, anthropogenic factors, local factors and the structure of pollutants. Firstly, to determine the relationship between PM_{10} and meteorological variables (wind speed and direction, temperature and relative humidity), to determine the relationship between pollutant concentrations and to determine the relationship between NO_x , NO , NO_2 , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, O_3 and SO_2 pollutants and meteorological variables. And then interpret these results. Meteorological data with PM_{10} values were examined from 2011 to 2018. Linear regression, Pearson correlation coefficient (PCC), Spearman's rank correlation, Kendall Tau correlation, autocorrelation function (ACF), cross correlation function (CCF) were used to determine the relationship. Visualizations were interpreted using the R program (openair) packages. In the study, the relationship between wind speed and direction, temperature and relative humidity and PM_{10} was determined. It has been found that PM_{10} concentration is maximum between January and February. While PM_{10} concentrations had a positive relationship with relative humidity and wind direction, it was determined that there was a negative relationship with wind speed and temperature. Correlation values for relative humidity and temperature were found to be 0,01 and -0,15, respectively. Also, the relationship between wind speed and PM_{10} was calculated from the linear regression model and while the predicted value was -0,12, when the wind direction value was considered, it was found to be approximately 0,02. NO_x , NO , NO_2 , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, O_3 and SO_2 data were used between 2021 and 2022. Pearson correlation coefficient was used to determine the relationship between pollutants and to determine the relationship between NO_x , NO , NO_2 , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, O_3 and SO_2 and meteorological variables. It was found that there was a positive relationship between $\text{PM}_{2.5}$ and NO_2 , with a correlation value of 0.63. The highest correlation value was found between wind speed and O_3 ($r=0.26$).

In the second part, the effect of long-range dust transport on air quality and aviation is also very crucial. Therefore, in a case study, a 995 hPa cyclone located in the central Mediterranean developed and moved toward Türkiye. As a result of the transportation of dust over the Sahara Desert with this system, dust haze, and blowing dust events were observed at 13 airports in Türkiye in different periods between 7-10 April 2013. With the dust blowing at Cappadocia Airport with the southerly winds, the prevailing visibility dropped to 3800 m, becoming the lowest value measured at the airports during this period. Aviation Routine Weather Report (Metar) and Aviation Selected Special Weather Report (Speci) observations of airports located in North Africa and Türkiye were examined for the dates 3-11 April 2013. The prevailing visibility at Benina Airport in Libya decreased to 50 m with the cyclone on April 6, 2013. In this section, the effects of long-range dust transport on the prevailing visibility at airports in Türkiye are evaluated and the episodic changes of PM₁₀ values measured by Air Quality Monitoring Stations are examined. Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) model outputs were used to determine the trajectories of dust particles to determine long-range dust transport. Dust Red Green Blue (RGB) and Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) satellite images, Cloud – Aerosol LIDAR Infrared Pathfinder Satellite Observations (CALIPSO) images, BSC-DREAM8b model outputs, Global Forecast System (GFS) synoptic maps were used for analyses. Additionally, PM₁₀ values obtained from HKİİs were examined. According to the data obtained from CALIPSO images, the presence of dust on the Eastern Mediterranean reaches up to 5 km. Episodic values obtained from some air quality measurement stations are 900 µg/m³ in Karaman and 782 µg/m³ in Yozgat on an hourly average.

In the third section, it is essential to determine how often long-range dust transport comes to Türkiye and the effects of dust transport on Particulate Matter (PM). Therefore, natural mineral dust found in dust particles increases PM concentrations. Thus, as concentrations increase, air quality decreases. Dust transport from the Sahara Desert, one of the main dust sources, significantly affects the Eastern Mediterranean basin, including Türkiye. This section investigates the events of long-range dust transport at airports in Türkiye and its impact on PM concentrations. Air quality monitoring stations were chosen closest to these airports. Three different approaches have been used to determine long-range dust transport. First, Metar and Specı reports regarding the meteorological conditions at the airports in the study region were examined. For this reason, Metar and Specı codes recorded between 2012 and 2021 at 11 airports in the study area were used to determine dust event days. Then, the data set was analyzed by taking hourly PM measurements obtained from the HKİİ closest to the airports. Finally, regional atmospheric dust model results and HYSPLIT backward trajectory analysis were used to confirm dust events and find the source of the dust. The results showed that during the study period, only 17% of the dust came from North Africa and 12% came from the Mediterranean.

In the fourth section, one of the most important factors that increases air pollution is the dynamic structure of the atmosphere. In this study, it was determined that the atmospheric blocking that occurred over İstanbul between December 30, 2022, and January 5, 2023 significantly increased air pollution emission values and concentration values exceeded air quality limit values. The blocking was analyzed by examining the charts of the upper 500 hPa level. To determine the effect of the blocking event, hourly pollutant data received from HKİİs in İstanbul, reanalysis data obtained from ECMWF Reanalysis v5 (ERA5), inversion levels, meteorological and synoptic analysis, and Ceilometer were analyzed. Statistical calculations and visualizations were performed

using R and Grads programs. The Omega blocking, which had a significant impact on İstanbul on December 30, 2022, and January 1 and 2, 2023, reached peak values of PM_{10} and $PM_{2.5}$ concentration values of 572.8 and 254.20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Also, it was determined that the average concentration values at almost all stations during the examined period were higher than the averages for January and February. As a result, it was determined that İstanbul was "poor" in terms of air quality between these dates. It has been determined that the blocking does not affect the Ozone (O_3) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ concentration. Photographs show that pollutant concentrations increased due to the blocking seen in İstanbul. Finally, cloud base heights were examined according to the data obtained with the Ceilometer device, which operates with the remote sensing method.

In the fifth section, the structure of PM_{10} concentrations was examined. According to the Lorenz dynamic system, it is crucial to examine PM_{10} values from the perspective of chaos theory (chaos-theoretical). Recently, the reconstruction of phase spaces has been used to evaluate dynamic aspects of chaos in PM_{10} time series data. Daily PM_{10} values were taken from İstanbul Yenibosna HKİİs between 2011 and 2022. Chaos analysis of PM values was performed using recurrence analysis, delay time and embedding dimension, maximum Lyapunov exponent and correlation dimension and correlation sum. Analyzes were made using the "nonlinearTseries" package of the R program. It has been observed that the dynamics of PM_{10} exchange processes are characterized by non-linearity, non-stationarity and chaos. The chaotic features found in the PM_{10} time series are due to the maximum Lyapunov exponent being a positive value and the unexpanded nature of the attractors when projected onto the phase space. Moreover, structural patterns characteristically observed during the reconstruction phase, namely diagonal lines divided by white bands, indicate the presence of chaotic features. Additionally, the delay time and embedding dimension were calculated for PM_{10} values.

1. GİRİŞ

Atmosferde Partikül Madde (PM), atmosferdeki birçok küçük parçacıktan oluşan katı veya sıvı parçacıklardan oluşur ve çapları 0,001 ile 100 mikrometre (μm) arasında değişmektedir (Li ve diğ, 2015). Dünyanın nüfusunun artmasıyla birlikte hava kirliliği ciddi bir sorun haline gelmiştir. Atmosfer içerisinde NO_2 , PM_{10} ve $\text{PM}_{2.5}$ gibi çeşitli elementleri içerir ve bölgenin iklimi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Steinfeld, 1998). Hava kirliliği genellikle doğal kaynaklardan dış etkenlere kadar farklı yönlerden etkilenmektedir ve PM_{10} insan faaliyetleri (örneğin endüstriyel kaynaklar, evsel ısıtma kaynakları) ve doğal kaynaklar (örneğin çöl tozu, orman yangınları) yoluyla atmosfere salınmaktadır (Özdemir, 2019). Bu yüzden hava kirliliği, son zamanlarda dünyanın karşı karşıya olduğu en tehlikeli sorunlardan biridir. Hızlı sanayileşme nedeniyle giderek daha ciddi hale gelmekte ve yalnızca sağlığımız üzerinde değil aynı zamanda çevremiz üzerinde de olumsuz etkiye sahiptir. Hava kirlleticilerin hareketi ve dönüşümü, karmaşık bir olgu olduğundan kirleticilerin emisyonları ve iklim koşulları gibi birçok faktörle, hava kirleticilerin zaman içindeki evrimiyle ilişkilidir. İstanbul'un hızlı sanayileşmesiyle birlikte hava kirliliğinin izlenmesi ve tahmin edilmesi önem kazanmıştır. Bugün İstanbul'da 15 milyondan fazla insan yaşamaktadır (Url-1). İstanbul'un temel sorunlarından biri de hava kirliliğidir. PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, SO_x vb. kirleticiler İstanbul'daki 24 hava kalitesi istasyonunda ölçülmektedir (Url-2). Bu nedenle şehirlerdeki hava kalitesi takibi oldukça önemlidir ve hava kalitesinin değişmesi insanların sağlığını olumsuz olarak etkilemektedir (He ve diğ, 2019; Liu ve diğ, 2018). PM_{10} konsantrasyonlarının sıklıkla sağlık sorunlarıyla ilişkili olduğunu bulunmuştur ve bu ilişkiler kalp sağlığı, kan basıncı ve akciğer hastalıkları olduğu tespit edilmiştir (Shakerkhatibi ve diğ, 2015). Bir bölgenin hava kirliliğinin analiz edilebilmesi için mutlaka meteorolojik çalışmalara da yer verilmesi gerekmektedir. Çünkü meteorolojik bakış açısıyla daha detaylı analizler yapılabilmektedir (Mishra ve ark. 2016).

Lorenz dinamik sistemine göre doğrusal olmama atmosferik sistemlerin doğasında vardır (Lorenz, 1963). Özellikle 1980'li yılların sonlarına doğru Takens teoremi kullanılarak doğrusal olmayan yöntemlerin kullanıldığı zaman serisi analizleri yapılmaya başlanmıştır (Takens, 1981). Bunların yanı sıra, hava kirliliği bir bölgeden başka bir bölgeye kıtalararası taşınım yoluyla da taşınabilmektedir. Dünyanın farklı bölgelerinde meydana gelen toz fırtınaları, yer altı ve üst atmosferin saçılma kapasitesini etkileyerek çevreyi büyük ölçüde etkilemektedir (Ginoux ve diğ, 2012). Özellikle yarı kurak ve kurak bölgelerde yoğun yüzey ısınması ve dik atmosferik basınç değişimleriyle toz fırtınaları meydana gelmektedir. Böylece yoğun kum ve toz tanecikleriyle yüzeylerden atmosfere doğru rüzgar erozyonuna neden olmaktadır (UNEP, WMO ve UNCCD, 2016). Kuzey yarımkürede Sahra Çölü en önemli ve kalıcı toz kaynağı olarak tanımlanmaktadır (Prospero ve diğ, 2002). Küresel toz üretiminin neredeyse %70'i Sahra Çölü'nden gelmektedir. Ayrıca toz olayları Kuzey Amerika, Güney Amerika, Avrupa, Ortadoğu ve Türkiye'ye, Akdeniz'e, Kızıldeniz'e ve Atlantik Okyanusu'na kadar uzun mesafelere taşınabilmektedir (Goudie ve Middleton, 1992). Bunların yanı sıra hava kirletici konsantrasyonlarının artması atmosferin dinamik yapısıyla da ilişkilidir. Durağan hava koşulları nedeniyle kirleticiler belirli bir bölgede birkaç gün veya daha uzun süre havada asılı kalabilmektedir. Durağan siklonların veya antisiklonların, birçok nemin bir kısmını bağlayan blokaj oluşumu nedeniyle durağan hava sistemlerinin etkisi olduğu iyi bilinmektedir (Carrae ve diğ, 2004). Blokaj olaylarının Ozon (O_3), nitrojen dioksit (NO_2) ve $PM_{2.5}$ gibi hava kirleticilerini arttırdığı gözlemlenmiştir (Dempsey, 2018). Engelleme, hava olaylarının boyutunun incelenmesinin yanı sıra, hava kalitesini de etkileyebilmektedir. Atmosferik engellenme nedeniyle karbon monoksit (CO) ve NO_2 gazlarının nasıl değiştiği, Moskova'nın Ruya şehrinde yapılan bir çalışmada anlatılmaktadır (Shahgedanova ve diğ, 1998). Blokaj olayı meydana geldiğinde okyanus üzerinden taşınması gereken nemli havanın yerine NO_2 konsantrasyonu olarak Auckland, Yeni Zelanda'daki NO_2 konsantrasyon sınır değerleri aşılmıştır (Jiang ve diğ, 2014).

Bu yapılan çalışmayla birlikte atmosferin dinamik ve fiziksel süreçlerinin yanı sıra antropojenik faktörler ve kıtalararası toz taşınımı olayları da hava kirliliğini arttırabilmektedir. Böylece, kirletici kaynaklarını belirlemede ve atmosferin dinamik ve fiziksel yapısı, antropojenik etkiler ve diğer kaynakları anlamak önemli bir rol oynamaktadır.

1.1 Tezin Amacı

Bir bölgede hava kirliliğinin artmasına atmosferin dinamik ve fiziksel süreçlerinin rol oynadığı, yerel kaynakların etkilediği, antropojenik kaynakların etkilediği, kimyasal süreçlerin etkilediği ve toz bölgeleri olan çöller gibi, bu bölgelerden uzun mesafeli olarak tozun taşınması etkili olabilmektedir. Bu yüzden, kirleticilerin artmasına neden olan süreçleri anlamak ve yorumlayabilmek için detaylı analizlerin yapılması gerekmektedir.

Bu çalışmada İstanbul'da rüzgar şiddeti ve yönü, bağıl nem ve sıcaklık değerleri saatlik ortalama PM_{10} değerleri karşılaştırılarak korelasyon analizleri yapılmıştır. Sonuç olarak meteorolojik değişkenler ile PM_{10} konsantrasyonları arasında olası bir ilişki ortaya çıkarılmıştır. NO_x , NO , NO_2 , PM_{10} , $PM_{2.5}$, O_3 ve SO_2 kirleticilerinin birbirleri arasındaki korelasyon değerlerine de bakılmıştır. Bu kirleticilerin 12 adet meteorolojik değişkenle ilişkisi de belirlenmiştir. Ayrıca, uzun mesafeli toz taşınımının Türkiye'deki havalimanlarında hakim rüyet üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Diğer bir yaklaşım, atmosferin dinamik yapısının PM_{10} , $PM_{2.5}$ ve O_3 konsantrasyonları üzerine etkilerini incelemek ve analiz etmektir. Bu yüzden omega blokajının hava kirliliği üzerinde ki etkilerini belirlemek için sinoptik haritalar ve meteorolojik analizler yapılmıştır. Öte yandan, uzun mesafeli toz taşınımının hangi sıklıkla meydana geldiğini belirlemek için havalimanlarından kodlanan Metar ve Speci rasatlarıyla “toz hadisesi” olan günler belirlenmiştir. Bu “toz hadisesi” olan günlerde havalimanlarına en yakın HKİİ’lerden tarafından ölçülen PM_{10} ve $PM_{2.5}$ değerleri üzerindeki değişim incelenmiştir. Son olarak, PM_{10} değerlerinin kaotik davranışını belirleyerek, kirleticinin yapısı analiz edilmiştir.

Bu yapılan tez çalışmasında hava kirletici konsantrasyon değerlerine arttıran faktörler incelenerek kaynak bölgeler tespit edilmiş, bunlara neden olan atmosferin dinamik ve fiziksel yapısı belirlenerek hava kirliliğini etkileyen tüm faktörler detaylıca incelenmiştir.

1.2 Literatür Araştırması

Bu tez çalışması 5 ana başlıktan oluşmaktadır. Bu beş ana başlıktaki konularla ilgili dünyada kabul görmüş çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Meteorolojik değişkenler PM_{10} konsantrasyonunu birçok yönden etkilemektedir. Bu faktörler hava sıcaklığı, bağıl nem, günlük toplam yağış, toplam bulut kapalılığı, rüzgar şiddeti ve yönüdür (Yamaji ve diğ, 2010). İstanbul Atatürk Uluslararası Havalimanı'nda yapılan bir çalışmada, yüksek basınçlı sistemlerde havanın genellikle durağan olması nedeniyle yüzey basıncının hava kirliliği üzerindeki etkisi önemlidir. Bu da diverjansın alanlarının olması nedeniyle parçacıklar yükselemediği için yer seviyesinde kirlilik seviyesinin artmasına neden olmaktadır (zdemir ve diğ, 2020). Alçak basınçlı sistemlerde genellikle yağmurlu ve rüzgarlı bir hava görülür. Yağmurla birlikte genel olarak havadaki kirleticiler dağılabılır veya kebilemektedir (Yavuz ve diğ, 2022). Küresel çapta kabul görmüş uygulamalarla yapılan PM_{10} ile meteorolojik değişkenler arasındaki ilişkiyi belirlemek amacıyla birçok çalışma yapılmıştır (Plocoste ve diğ, 2018; Plocoste ve diğ, 2020; Markozannes ve diğ, 2022; Mueller ve diğ, 2021; Fallahizadeh ve diğ, 2021).

PM 'nin hava kalitesi, iklim ve hakim rüyet üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle son yıllarda atmosferik PM çalışmalarına büyük önem verilmiştir. PM kaynakları antropojeniktir (rneğin araç trafiği ve konut ısıtması) ve doğaldır (rneğin çöl tozu ve volkanlar). Ayrıca, büyük miktarlardaki doğal toz taşınımı PM konsantrasyonlarını önemli ölçüde etkilemekte ve PM_{10} ve $PM_{2.5}$ günlük sınır değerlerinin aşılmasına neden olabilmektedir (Ozdemir ve diğ, 2012). Türkiye'de uydu görüntüleri, sinoptik haritalar ve toz fırtınalarını incelemek için Metar ve Speci raporları kullanılmıştır. Sonuç olarak Kuzey Afrika'dan gelen toz fırtınasının güneyden gelen kuvvetli rüzgarlarla Türkiye'ye taşındığı ve PM_{10} değerlerini artırdığı gözlenmiştir (Sirdas ve diğ, 2017; zdemir, 2019). Başka bir çalışmada Arap Yarımadasındaki toz fırtınalarının kökenini gözlemlemek için Hibrit Tek Parçacık Lagrangian Entegre Yörünge modeli (HYSPLIT) modeli kullanılmıştır (zdemir ve diğ, 2018; Weston ve diğ, 2020). Uydu verileri aynı zamanda toz taşınımının nereden gerçekleştiğini belirlemek için de sıklıkla kullanılmaktadır (Senghor ve diğerleri. 2021). Sahra l tozlarının genellikle bahar döneminde Türkiye'ye taşındığı grlmştir (Baltaci, 2021). Ancak özellikle kentleşmiş bölgelerde PM konsantrasyonundaki değişimi anlamak için antropojenik kaynaklar dikkate alınmalıdır. İstanbul'daki oyun alanlarındaki PM kirliliğine ilişkin bir vaka çalışmasında, şehrin hem yerel antropojenik kaynaklardan hem de Sahra lnden doğal kaynakların taşınmasından etkilendiği ve bunun sonucunda PM_{10} ve $PM_{2.5}$ konsantrasyonlarının yüksek olduğu

tespit edilmiştir (Özdemir ve diğ, 2012). Türkiye'de yakın zamanda yapılan bir araştırmada, Türkiye'nin güneydoğusunu etkileyen beş toz taşınım olayını incelemiş ve PM₁₀ konsantrasyonundaki değişimi araştırmıştır (Baltacı ve Ezber, 2022).

Toz fırtınaları sırasında büyük toz kütleleri şiddetli bir şekilde atmosfere aktarılır. Yani toz fırtınaları, toz parçacıklarını atmosferde düşey olarak yükseklerle taşıyabilen ve görüş mesafesini 1000 m'nin altına veya daha da altına düşürebilen güçlü rüzgarlardan kaynaklanmaktadır (She ve diğ, 2018). Ayrıca, toz fırtınalarının yaydığı toz aerosolleri belirli bir bölge veya alanın hava kalitesini olumsuz şekilde etkileyerek tarım sektörünü etkilemektedir (Elsayed ve diğ, 2021). Toz fırtınaları sırasında hava taşımacılığı oldukça etkilenir; Kalkış ve iniş yönetimi zordur ve PM₁₀ parçacıkları motorun yanma odası duvarlarını ve türbin kanadı yüzeylerini aşındırabilmektedir (De Villiers ve Van Heerden, 2007). 1994-2003 dönemi için, toz ve toz fırtınalarının havalimanını etkilediği ve hakim görüş mesafesinin 5000 m'nin altına düştüğü koşullar için Abu Dabi Havalimanı'nda istatistiksel analiz yapılmıştır. Bulunan sonuçlardan biri, rüzgar hızı 20 knot ve üzerinde olduğunda hakim rüyetin sıklıkla 2000 m'ye, hatta 1000 m veya daha azına düşmesidir (De Villiers & Van Heerden, 2007). Başka bir çalışmada, toz fırtınalarını incelemek için MODIS uydu görüntüleri NCEP-NCAR Yeniden Analiz Verileri kullanılarak 60'tan fazla toz fırtınası sınıflandırılmıştır (Hamidi ve ark. 2013).

Atmosferdeki engelleme olayları hava kirliliğini etkilemektedir. Doğu Asya bölgesinde yapılan bir çalışmada yüksek basınç sisteminin 15 gün boyunca bölgede kaldığı ve PM₁₀ üzerinde etki yaparak ülke genelinde puslu günlere yol açtığı tespit edilmiştir (Cho ve diğ, 2022). PM₁₀ ve PM_{2.5} gibi hava kirleticilerini tahmin ederken bu kirleticilerin hem dinamiklerini hem de kimyasını incelemek çok önemlidir. Mexico City'de yapılan bir çalışmada O₃, CO ve kükürt dioksit (SO₂) gibi kirleticilerin hem dinamiklerini hem de kimyasını anlamak için nonlinear dinamik analiz yapılarak kirleticilerin dinamiği incelenmiştir (Raga ve Le Moyne, 1996). Ayrıca Anna Nagar ve Kilpauk'da yapılan araştırmalarında günlük PM₁₀ verilerini de dikkate alarak Lyapunov denklemini kullanarak ticari ve konut amaçlı kentsel alanların fraktal yapısını araştırmışlardır (Selvi ve diğ, 2022). Ancak, zaman serilerinde kaos doğrulanmış olsa da zaman serilerindeki geçişleri anlamlandırmak için daha fazla dinamik değişkenin incelenmesi gerekli olduğu belirlenmiştir (Yu ve diğ, 2011). Ayrıca Mexico City'deki kentsel hava kirliliğinin kaotik davranışı belirlemek için

recurrence analizi kullanılmıştır (Aceves-Fernandez, 2014). $PM_{2.5}$ tahmini için faz uzayı diyagramları kullanılmıştır (Yang ve diğ, 2023). Hava kirliliğinin evrimsel özelliklerinin ölçümleri kaos teorisine dayalı olarak incelenmiştir (Xu ve Xu, 2022).



2. HAVA KİRLETİCİLERİ İLE METEOROLOJİK DEĞİŞKENLER ARASINDAKİ İLİŞKİ^{1,2}

2.1 Giriş

Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK)'e göre, İstanbul, 15 milyon 840 bin kişilik nüfusuyla Türkiye'nin en fazla nüfusa sahip, ülkenin sanayi ve kültür açısından en önemli şehridir (Url-1). Hava kirliliği seviyelerinin ölçülmesi ve tahmin edilmesi son derece önemlidir çünkü hava kirliliği çeşitli atmosferik özellikleri çeşitli şekillerde etkilemektedir (Nogarotto ve Pozza, 2020). Hava kalitesi emisyon seviyelerine, bölgenin topoğrafyasına ve basınç, rüzgar, bağıl nem, yağış gibi meteorolojik değişkenlere bağlıdır (Özdemir ve diğ, 2020). Bu bölümde atmosferdeki kirleticilerden biri olan PM₁₀ ile meteorolojik faktörler arasındaki ilişki belirlenmiştir. Yapılan bir çalışmada ise sadece rüzgar hızının PM₁₀ ve PM_{2.5} üzerindeki etkisi araştırılmıştır (Cheewinsiriwat ve diğ, 2022). Ayrıca, NO_x, NO, NO₂, PM₁₀, PM_{2.5}, O₃ ve SO₂ kirleticilerinin birbirleri arasındaki ilişki ve bu kirleticilerin 12 adet meteorolojik değişken arasındaki ilişki belirlenmiştir. Bu bölümde 2011-2018 yılları arasında Yenibosna HKİİ'de saatlik ortalama PM₁₀ değerleri ve İstanbul Atatürk Uluslararası Havalimanı'nda rüzgar şiddeti, rüzgar yönü, bağıl nem ve sıcaklık değerleri kullanılmıştır. Diğer kirleticiler için meteorolojik ve kirletici verileri 2021 ile 2022 yılları arasında İstanbul'da bulunan 3 adet uluslararası havalimanından elde edilen veriler ve bunlara en yakın HKİİ'den alınmıştır. Yenibosna HKİİ, Atatürk Uluslararası Havalimanı'na en yakın HKİİ'dir. Saatlik ortalama PM₁₀ değerleri ile meteorolojik değişkenler karşılaştırılmıştır. Çalışmada PM_{2.5} ve diğer kirleticilerin kullanılmamasının nedeni PM₁₀ dışındaki kirleticilerin daha sonra HKİİ'de toplanmaya başlanmasıdır. Sonuç olarak meteorolojik değişkenler ile PM₁₀

¹ Bu bölümde yapılan çalışma aşağıda belirtilen SCI dergide yayımlanmıştır. Birinci, E., Deniz, A. & Özdemir, E.T. The relationship between PM₁₀ and meteorological variables in the mega city Istanbul. Environ Monit Assess 195, 304 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10866-3>

² Bu bölümde yapılan çalışma SCI bir dergiye gönderilmiştir. Birinci, E., Çeker, A.O., Plocoste, T., Calif, R., Ozdemir, H. & Özdemir, E.T. Determination of Relationships Between Air Pollutants and Meteorological Variables in Megacity İstanbul

konsantrasyonları arasında olası bir ilişki ortaya çıkarılmıştır. Ayrıca, NO_x , NO , NO_2 , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, O_3 ve NO_x kirleticilerin de birbirleriyle arasındaki ilişki ve meteorolojik değişkenlerle arasındaki ilişkiler incelenmiştir.

2.2 Çalışma Alanı ve Veri

İstanbul, Türkiye'nin batısında bulunmaktadır. Atatürk Uluslararası Havalimanı enlem ve boylamında ($40^\circ 58' 34''$ N - $028^\circ 48' 50''$ E, rakım: 50 m) mega şehir İstanbul'un Avrupa yakasında ve şehrin güney kesiminde yer almaktadır. Marmara Denizi kıyısında yer alan Atatürk Uluslararası Havalimanına yakın olan HKİİ, havalimanının yaklaşık 2,3 km kuzeyinde yer almaktadır. Şekil 2.1'de Türkiye'nin coğrafi konumu ve Şekil 2.2'de Atatürk Uluslararası Havalimanı ve Yenibosna HKİİ'nin konumu gösterilmiştir. Metar ve Speci raporları düzenli bir hava trafik akışını sağlamayı amaçlayan uluslararası standartlaştırılmış raporlardır (Novotny ve diğ, 2021). Atatürk Uluslararası Havalimanı'nda Meteoroloji Dairesi tarafından yayınlanan Metar raporlarıyla meteorolojik değişkenlere erişilebilmektedir. Metar raporları Uluslararası havalimanlarında yarım saatte bir, yurtiçi havalimanlarında ise saatte bir ölçülmektedir. Atatürk Uluslararası havalimanında Metar raporları her yarım saatte bir ölçülmektedir ve bu veriler Iowa State Üniversitesinden açık kaynak şeklinde erişim sağlanabilmektedir. Bu veriler (University of Iowa State)'den alınmıştır (Url-3). PM_{10} değerleri Atatürk Havalimanı'na yaklaşık 2,3 km uzaklıktaki Yenibosna HKİİ'de ($40^\circ 59' 56''$ K - $28^\circ 49' 36''$ D; rakım: 28 m) ölçülmüştür. PM_{10} konsantrasyon ölçümü konusunda, Enviorenment SA MP101M ile havadaki PM_{10} (Toz) oranının ölçülmesi için kullanılır. Genellikle filtreye beta ışınlarını yansıtıcı arasına diyafram yerleştirilir. Bu diyafram referans bir değer elde etmek için kullanılır. PM_{10} ölçümünü yapan beta zayıflatma cihazı, optik teknoloji ile ince tozların sürekli ve eş zamanlı ölçümünü sağlar ve Avrupa standartları (EN 14907) tarafından onaylanmıştır. US EPA tarafından Federal Eşdeğer Yöntem (FEM) kullanılarak bu cihaz sayesinde PM_{10} değerleri hassas beta atenüasyon takibi ile ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) olarak ölçülmüştür (Url-2). Veriler saatlik veriler olup ortalama değerleri içermektedir. Kullanılan veriler 2011 yılının 1 Ocak gününün 00:00 saatinde başlayıp 2018 yılı 31 Aralık gününün 23:00 saatinde sona ermektedir. Tüm hesaplamalar yapılmadan önce PM_{10} konsantrasyon verileri UTC zamanına çevrilmiştir. Çünkü Metar ve Speci verileri UTC zamanlı verilerdir ancak PM_{10} verileri yerel saate göre depolanmaktadır. İstatistiksel olarak sonuçların doğruluğu için tüm

veriler UTC zaman dilimine göre çevrilmiş ve korelasyon hesaplamaları, grafikler ve görselleştirmeler daha sonra yapılmıştır.



Şekil 2.1: Türkiye'nin coğrafi konumu



Şekil 2.2: Atatürk Uluslararası Havalimanı ve Yenibosna HKİİ'nin İstanbul'daki konumu

2.3 Materyal Metot

Elde edilen verilerle hesaplamalar ve grafikler tamamlanmadan önce eksik veriler ve hatalı veriler zaman serisinden çıkarılmıştır. İncelemede eksik veri oranı %7 olarak belirlenmiştir. Gerekli hesaplamalar ve çizimler yapılmadan önce uygun veriler hazırlanmış ve bu çalışmada kullanılmıştır. Temizleme işlemi sonrasında verilerin hazırlanması için excel yazılımı kullanılarak temizlenen meta veriler saatlik

ortalamaları alınarak R studio programına hazır hale getirilmiştir. Bu çalışmada R programı ile doğrusal regresyon, Pearson korelasyonu, Spearman korelasyonu, Kendall tau korelasyonu, otokorelasyon fonksiyonu (ACF) ve cross korelasyon fonksiyonu (CCF) kullanılarak hesaplamalar ve görsel çizimler yapılmıştır. R studio programında kullanılan paketin adı 'OPEN AIR' paketidir (Carslaw ve Ropkins, 2012).

2.3.1 Lineer regresyon modeli

Doğrusal regresyon modeli birçok çalışmada kolaylıkla ve sıklıkla kullanılmaktadır. Ayrıca, bir problemi de çözmeyi tahmin etmek için de kullanılmaktadır. Aynı sınıftaki örneklerle sahip bir teoriye dayanarak denklem (2.1)'deki gibi ifade edilir (Korkmaz, 2021).

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_n x_n \quad (2.1)$$

Denklem 2.1'de y bağımlı değişken, x bağımsız değişken, β_0 y ekseninin kesişim değeri ve β_1 regresyon katsayısıdır. PM₁₀ konsantrasyonu ile rüzgar şiddeti ve rüzgar yönü arasındaki ilişkiyi belirlemek için doğrusal regresyon modeli kullanılarak bir program yazılmıştır. Burada bağımlı değişken PM₁₀ konsantrasyonu iken bağımsız değişkenler rüzgar hızı ve yönüdür.

2.3.2 Pearson korelasyon katsayısı

Pearson korelasyon katsayısı (PCC), rastgele seçilen iki değer arasında güçlü bir doğrusal ilişki olup olmadığını ölçmektedir ve veri analizi, sınıflandırma, gruplandırma gibi birçok istatistiksel alanda kullanılmaktadır (Zhou ve diğ, 2016). PCC, iki değişken arasında doğrusal bir korelasyon olup olmadığını gösterir ve PCC denklem (2.2)'deki gibi ifade edilir (Deng ve diğ, 2021).

$$r_{\bar{x}, \bar{y}} = \frac{N \sum_{i=1}^N x_i y_i - \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i}{\sqrt{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - (\sum_{i=1}^N x_i)^2} \sqrt{N \sum_{i=1}^N y_i^2 - (\sum_{i=1}^N y_i)^2}} \quad (2.2)$$

Her örnek, vektörlerin bileşenleri olarak temsil edilebilecek N gözlem içerir. korelasyon katsayısı [-1,1] arasında değişmektedir. Pearson korelasyonunun temel özellikleri şunlardır (Deng ve diğ, 2021):

- (i) Korelasyon 0'dan büyükse $\bar{X}$ ile $\bar{Y}$ arasında pozitif bir korelasyon vardır.
- (ii) Korelasyon 0'a eşitse $\bar{X}$ ile $\bar{Y}$ arasında doğrusal bir korelasyon yoktur.

(iii) Korelasyon 0'dan küçükse $\bar{X}$ ile $\bar{Y}$ arasında negatif bir korelasyon vardır.

(iv) $|r_{\bar{X},\bar{Y}}|$ Sonuç ne kadar büyük olursa, $\bar{X}$ ve $\bar{Y}$ arasındaki doğrusal korelasyon da o kadar güçlü olur.

2.3.3 Spearman's rank korelasyon katsayısı

Spearman korelasyon katsayısı genellikle iki değişken arasındaki doğrusal olmayan korelasyonun değerlendirildiği çalışmalarda kullanılmaktadır ve bu yöntem genellikle sürekli değişkenler için kullanılmaktadır (Li ve diğ, 2021). Genellikle bu denklem reel değerlerin sırasını ayrı ayrı hesaplar ve aralarındaki ilişkileri belirlemektedir. Spearman'ın rank korelasyon katsayısı denklem (2.3)'teki formüle göre hesaplanmaktadır (Hauke ve Kossowski, 2011).

$$R_s(X_i, Y_i) = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^k (X_i^l - Y_i^l)^2}{k(k^2 - 1)} \quad (2.3)$$

2.3.4 Kendall Tau korelasyon katsayısı

Kendall Tau korelasyonu, Spearman's rank korelasyon katsayısına doğrusal olmayan korelasyonu ölçmenin başka bir alternatif yöntemidir. Bu korelasyon katsayısı Spearman korelasyon katsayısından daha etkilidir (Etage ve diğ, 2021). Kendall tau korelasyon katsayısı denklem (2.4)'teki gibi hesaplanır (Ashoor ve Naji, 2021).

$$\tau = \frac{(C-D)}{\frac{n(n-1)}{2}} \quad (2.4)$$

2.3.5 Auto korelasyon fonksiyonu

Auto korelasyon katsayısı (ACF), sinyallerin dinamik özelliklerini tanımlamak ve belirli bir sinyalin gelecekte belirli bir anı ne ölçüde etkileyebileceğini ortaya çıkarmak için kullanılır. ACF sinyali $s(t)$ olarak tanımlanırsa denklem (2.5)'teki formüle edilebilir (Harker ve diğ, 2013).

$$\tilde{R}_s[k] = \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} s[n]s[n+k], k=0, \dots, M-1 \quad (2.5)$$

2.3.6 Cross korelasyon fonksiyonu

Cross Korelasyon fonksiyonu, iki fonksiyonun benzerliğini ölçmek ve aralarında bir korelasyon olup olmadığını belirlemek için kullanılır, f ve g fonksiyonlarının

gecikmesindeki CCF fonksiyonu denklem (2.6)'daki gibi ifade edilir (Zarei ve diğ, 2021).

$$(f * g)(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f^*(t)g(t + \tau)dt \quad (2.6)$$

2.3.7 Zaman serisi analizleri ve nonlinear analiz

Burada NO_x, NO, NO₂, PM₁₀, PM_{2.5}, O₃ ve NO_x kirleticilerinin 2021 ile 2022 arasında İstanbul'da bulunan bazı istasyonlardan alınan veriler ile kirleticilerin zaman serileri çizdirilmiştir. Ayrıca, nonlinear analiz için distributed lag non-linear model (DLNM) kullanılarak meteorolojik değişkenlerin kirleticiler üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

2.4 Tartışma ve Sonuçlar

Öncelikle Atatürk Uluslararası Havalimanı için incelenen tüm değişkenlerin 2011-2018 yılları arasındaki değerleri Çizelge 2.1'de özetlenmiştir. Atatürk Uluslararası Havalimanı için 8 yıllık ortalama PM₁₀ değeri 54,3 (µg/m³) olarak bulunmuştur. Çalışma dönemi boyunca en düşük PM₁₀ konsantrasyon değeri 1 µg/m³ olmuştur. Bu dönemde en yüksek PM₁₀ değeri 1 saat için 818 (µg/m³) olmuştur. PM₁₀ konsantrasyonunun hava kalitesine göre yorumlanması Avrupa Hava Kalitesi Endeksi (AHKE) (Url-4) kullanılarak belirlenmiştir. AHKE'ye göre ortalama PM₁₀ konsantrasyon değeri “kötü” olarak belirlenmiştir ve hava kalitesi iyi olan bir alan için maksimum PM₁₀ değeri yaklaşık 40 kat daha fazladır. Ayrıca PM₁₀ değerlerinin her yıl için, 8 saatlik ve 24 saatlik yuvarlanma değerleri Çizelge 2.1'de gösterilmektedir. PM₁₀ konsantrasyonunun günlük maksimum olduğu yıllar sırasıyla 2014 ve 2015 yıllarıdır. Bu yıllarda konsantrasyon değerleri sırasıyla 304 ve 306 µg/m³ olmuştur. Günlük minimum değerine ulaştığı yıl ise 2017 yılıdır. Bu yılda günlük minimum PM₁₀ konsantrasyonu 165 µg/m³ olarak bulunmuştur. PM₁₀ konsantrasyonlarının yanı sıra meteorolojik değişkenler olarak rüzgar şiddeti ve yönü, sıcaklık ve bağıl nem değerleri de özetlenmiştir (Çizelge 2.2). 8 yıllık ortalama, maksimum ve minimum değerler sırasıyla Çizelge 2.2'de gösterilmektedir. Atatürk Uluslararası Havalimanı'nda ölçülen rüzgar şiddeti ve yönüne göre 8 yılda ortalama 8,5 m/s olarak gerçekleşmiştir. Atatürk Uluslararası Havalimanı'nda hakim rüzgar genellikle kuzeydoğudan esmektedir. Bu 8 yıl boyunca rüzgar şiddetinin maksimum olduğu yıl 2015 yılında 31 m/s olduğu tespit edilmiştir. Atatürk Uluslararası Havalimanı'nda bu

dönemde ortalama sıcaklık 16,16 °C olarak bulunmuştur. Sıcaklığın maksimum değeri 2017 yılında 32,15 °C olarak bulunmuştur. Bu dönemde sıcaklığın maksimum değeri yaklaşık 28-32,15 °C arasında değişmektedir. Eş zamanlı olarak 2017 yılında ölçülen minimum sıcaklık değeri -3,92 °C olarak belirlenmiştir. Minimum sıcaklık değeri ise 8 yıl boyunca -4 ile 4,13 °C arasında değişmektedir. Son olarak havalimanındaki bağıl nem değerlerine bakıldığında 8 yıllık ortalama bağıl nem değeri %67,63 olarak tespit edilmiştir. 2015 ve 2014 yıllarında maksimum bağıl nem değeri %70,69 arasında ölçülmüştür ve maksimum bağıl nem değerleri yaklaşık %65-71 arasında değişmektedir. Minimum bağıl nem değeri 2016 yılında %32,46 olarak ölçülmüştür ve bu dönemde minimum değerler %32-44 civarında değişmektedir. Çizelge 2.2'de rüzgar yön değerleri dahil edilmemiştir. PM₁₀ değerinin maksimum olduğu 2015 yılında rüzgar şiddeti ortalama 8,80 m/s, sıcaklık 16,22 °C ve bağıl nem %68,76 olarak gerçekleşmiştir. PM₁₀ değerinin minimum olduğu yıl 2018 olup, bu yıl ortalama rüzgar şiddeti değeri 9,14 m/s, sıcaklık 15,69 °C ve bağıl nem %67,54 olarak gerçekleşmiştir. 2015 yılına göre 2018 yılında görüleceği üzere rüzgar şiddetinin artmış olması PM₁₀ konsantrasyon değerinin düşürdüğü anlamına gelmektedir. Çünkü Rüzgar şiddeti ile PM₁₀ arasında negatif bir ilişki vardır. Bağıl nem değeri ise iki sene içinde hemen hemen aynı kalmıştır. Dolayısıyla bağıl nemin PM₁₀ konsantrasyonu üzerinde ciddi bir etkisi olduğu söylenemez. Korelasyon sonuçlarında da bağıl nem ve PM₁₀ arasında zayıf bir korelasyonun olduğu bulunmuştur. Son olarak sıcaklık değerlerine bakıldığında 2015 yılında ortalama sıcaklık değeri 2018 yılına göre daha fazla olmuştur.

Çizelge 2.1: PM₁₀ konsantrasyonunun 2011-2018 yılları arasındaki yıllık ortalama, maksimum, minimum, günlük maksimum, 8 ve 24 saatlik ortalama yuvarlama değerleri.

PM ₁₀ (µg/m ³)	Ortalama	Min	Maks.	Maks. Günlük	Maks. 8-saat Yuvarlama Ort.	Maks. 24-saat Yuvarlama Ort.
2011	59,2	2,9	718	290	508	345
2012	52,7	2,1	504	181	372	194
2013	56,5	2,4	642	259	519	34
2014	55,5	3	642	304	566	351
2015	63,1	1,4	818	306	614	427
2016	54,4	1,5	567	248	478	274
2017	51,9	1	407	165	311	171
2018	42,8	2	414	217	360	228

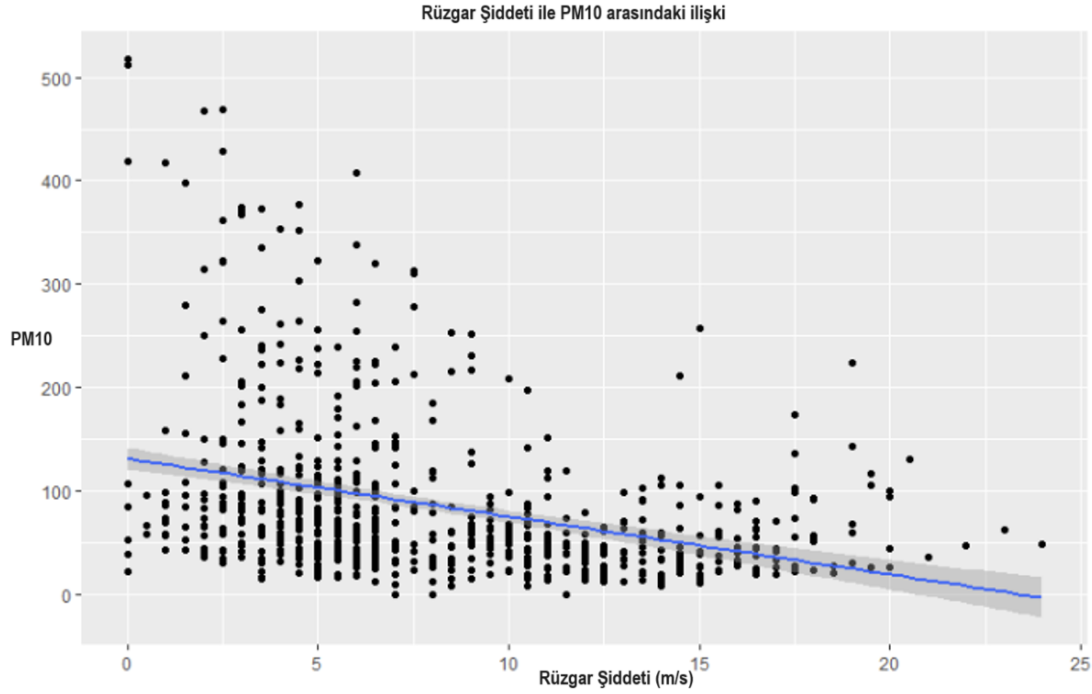
Çizelge 2.2: 2011-2018 yılları arasında rüzgar yönü ve şiddeti, sıcaklık ve bağıl nem değerlerinin ortalama, maksimum ve minimum değerleri (WS: Rüzgar Şiddeti, T: Sıcaklık, RH: Bağıl Nem).

Yıl	Ortalama Değerler			Maksimum Değerler			Minimum Değerler	
	WS (m/s)	T (°C)	RH (%)	WS (m/s)	T (°C)	RH (%)	T (°C)	RH (%)
2011	8,6	15,2	67,66	27	28,5	67,66	0,4	35,84
2012	8,24	16,46	66,98	29,5	29,44	66,98	-3,35	37,46
2013	7,96	16,63	65,67	24,5	55	65,67	-1,88	35,43
2014	7,69	16,73	70,69	30	55	70,69	1,33	43,47
2015	8,8	16,22	68,76	31	30,44	68,76	-3,6	43,39
2016	9,12	16,99	65,74	30,5	29	65,74	-2,1	32,46
2017	8,48	15,39	68,04	28	32,15	68,04	-3,92	42,5
2018	9,14	15,69	67,54	28,5	29,17	67,54	4,13	34,22

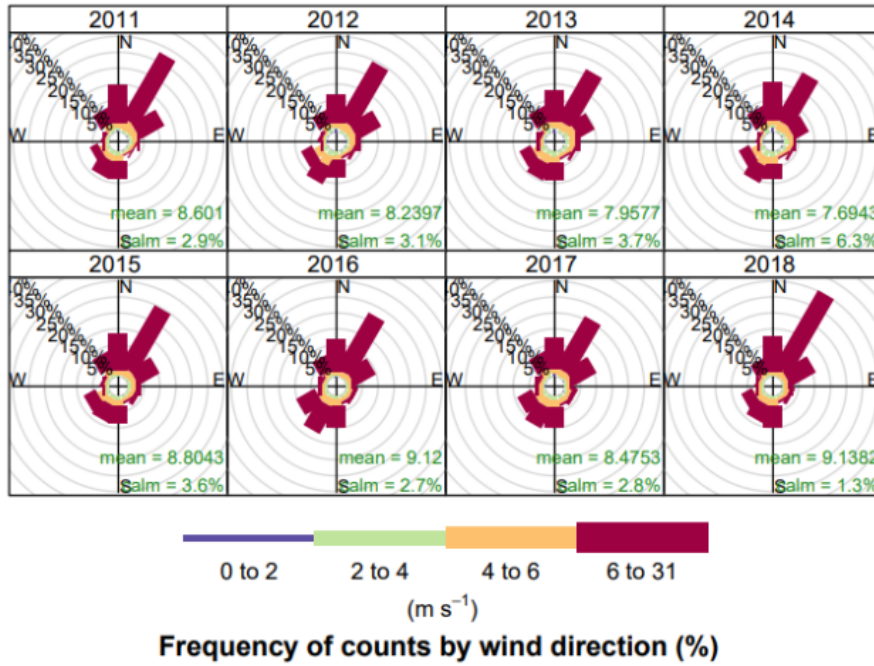
Bu çalışmada PM₁₀ değerleri ile meteorolojik değişkenler arasında bir ilişki olup olmadığını belirlemek için çoklu doğrusal regresyon, PCC, Spearman korelasyon katsayısı, Kendal tau katsayısı, ACF ve CCF kullanılmıştır. İlk olarak Atatürk Uluslararası Havalimanı için rüzgar yönü ve şiddeti ile PM₁₀ konsantrasyonu arasındaki doğrusal regresyon modeli kullanılarak değerler hesaplanmıştır. Model sonuçlarına göre rüzgar şiddeti için tahmin edilen katsayı değeri -0,12, rüzgar yönü için tahmin edilen katsayı değeri ise 0,03 olarak bulunmuştur. Yani rüzgar şiddeti ile PM₁₀ değeri arasında negatif bir korelasyon olduğu görülmüştür ancak sonuç istatistiksel olarak anlamlı değildir. Rüzgar şiddeti arttıkça PM₁₀ konsantrasyonu azalmakta, rüzgar şiddeti azaldıkça PM₁₀ değeri artmaktadır. Öte yandan Atatürk Uluslararası Havalimanı için rüzgar yönü kuzeybatıya veya batıya döndüğünde PM₁₀ konsantrasyonu arttığı söylenebilir. Rüzgar yönü kuzeye ve doğuya döndükçe PM₁₀ konsantrasyonu azalmaktadır. Şekil 2.3 rüzgar şiddeti ile PM₁₀ değerleri arasındaki doğrusal korelasyon grafiğini, Şekil 2.4 ise sekiz yıllık ortalama rüzgar şiddeti ve yönünü göstermektedir. Şekil 2.4'de gösterilen rüzgar gülü grafiğinde yıllık ortalamalar ve o yıldaki sakinlik yüzdesi gösterilmektedir, yani rüzgarın ortalama hızı 1 knot değerinin altında olduğu yüzdeyi göstermektedir (Jeong ve diğ, 2013). Şekil 2.3'e göre şiddeti ile PM₁₀ konsantrasyonu arasında negatif bir ilişki olduğu görülmüştür. Yani yüksek rüzgar şiddetleri düşük konsantrasyon değerlerini ifade etmektedir. Şekil 2.4'de ise Atatürk Uluslararası Havalimanının rüzgar yönü genellikle

kuzey doğulu olduğu görülmüştür. Rüzgar şiddetlerinin ortalama değerleri ise genel 8 m/s olduğu bulunmuştur. Şekil 2.5’de 2011-2018 yılları arasındaki günlük maksimum PM₁₀ konsantrasyon değerlerinin aylık ve saatlik olarak değişimi gösterilmiştir. Burada görüldüğü üzere neredeyse tüm günler Avrupa Hava Kalitesi İndeksi (AHKİ) göre “kötü” ve üzeri seviyededir. Burada görüldüğü üzere PM₁₀ konsantrasyonu 06-09 saatleri arasında “Extremely poor – Aşırı kötü” ve kış aylarında genelde “poor – kötü” üzeridir. Genellikle hava kalitesi yaz aylarında diğer aylara göre iyi olduğu görülmüştür. Bunun nedeni yaz aylarında ısınmadan kaynaklı emisyonların daha az olması, İstanbul’da yaşayan insanların yaz aylarında şehirden ayrılması ve sıcaklıkla PM₁₀ konsantrasyonunun negatif olmasından kaynaklı sıcaklıkların yüksek olması nedeniyle konsantrasyonların düşük olduğu söylenebilir. Şekil 2.6’da ise NO_x, NO, NO₂, PM₁₀, PM_{2.5}, O₃ ve SO₂ kirleticilerinin 2021 ile 2022 arasındaki zaman serisi değişimi gösterilmektedir. Burada PM konsantrasyonları bazı zamanlarda pik değerlere ulaştığı görülmüştür. Bunun nedeni uzun mesafeli toz taşınımının gerçekleştiği zamanlarda PM konsantrasyonlarını pik değerlere ulaşmasını sağlamaktadır. NO₂ konsantrasyonlarının 0-100 µg/m³ arasında salınım yaptığı görülmüştür. Ayrıca, Şekil 2.7’de Arnavutköy HKİİ’den alınan kirletici konsantrasyonlarının birbirleri arasındaki korelasyon değeri gösterilmektedir. Şekil 2.7’ye göre PM_{2.5} ile NO₂ arasında 0.63’lük bir korelasyon değeri ile pozitif bir ilişki olduğu bulunmuştur. Ayrıca, O₃’ün diğer tüm kirleticiler ile negatif bir korelasyon olduğu bulunmuştur ve en yüksek korelasyon değeri -0.67 ile NO₂’dir. Son olarak, İstanbul Uluslararası Havalimanından alınan meteorolojik veriler ile Arnavutköy HKİİ’den alınan kirleticiler arasındaki korelasyon değerleri Şekil 2.8’de gösterilmiştir. Şekil 2.8’de kirleticiler ile meteorolojik değişkenler arasında anlamlı bir ilişki bulunamamıştır. O₃’ün rüzgar yönü ile -0,24’lük negatif bir korelasyon değeri olduğu bulunmuştur. Birinci seviyedeki bulut yüksekliklerinin ozonla pozitif bir korelasyon içerisinde olduğu ve değerinin 0,25 olduğu bulunmuştur. NO₂’nin rüzgar şiddeti ile arasında -0,37’lik bir korelasyon değeri ile neagatif bir ilişkisi olduğu bulunmuştur. NO₂ kirleticisi meteorolojik değişkenlerden olan rüzgar şiddetinden en çok etkilendiği değişken olmuştur. Ayrıca, en yüksek korelasyon değeri rüzgar şiddeti ile O₃ arasında (r=0.26) olarak bulunmuştur. Sonuç olarak, korelasyon sonuçları meteorolojik değişkenler ile kirleticiler arasında istatistiksel olarak anlamlı ilişkiler bulunamamıştır. Ancak kirleticilerin birbirleri arasındaki korelasyon değerleri oldukça yüksektir. Bu da herhangi bir kirleticideki artış diğer bir kirleticiyi pozitif ve/veya negatif olarak

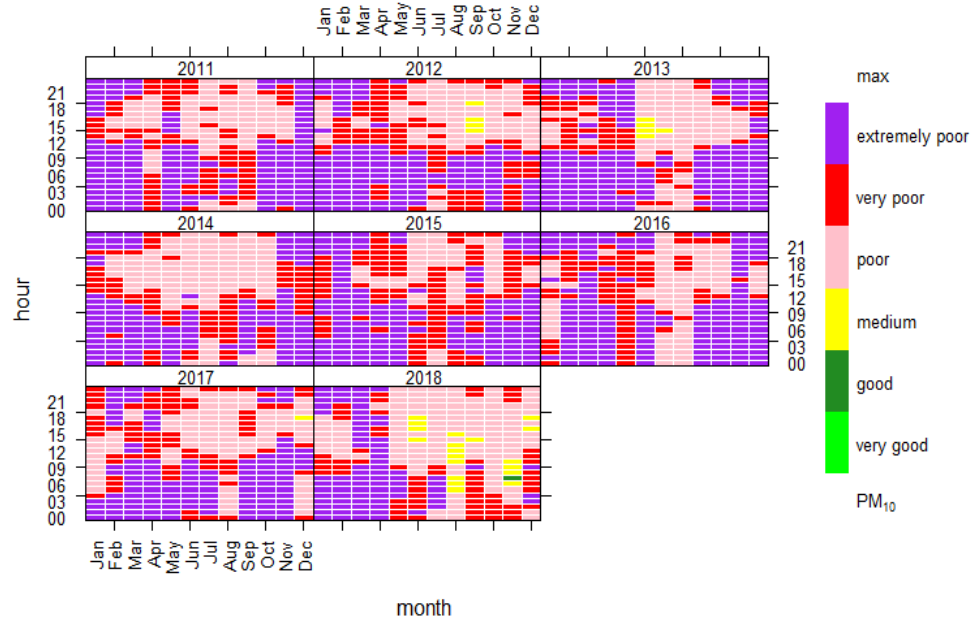
etkileyebilmektedir. Ayrıca çalışmada kirleticilerin meteorolojik değişkenler arasındaki korelasyon sonuçları yıllık, hafta içindeki günler, hafta sonu günleri ve mevsimsellik olarak ayrı ayrı incelenmiştir.



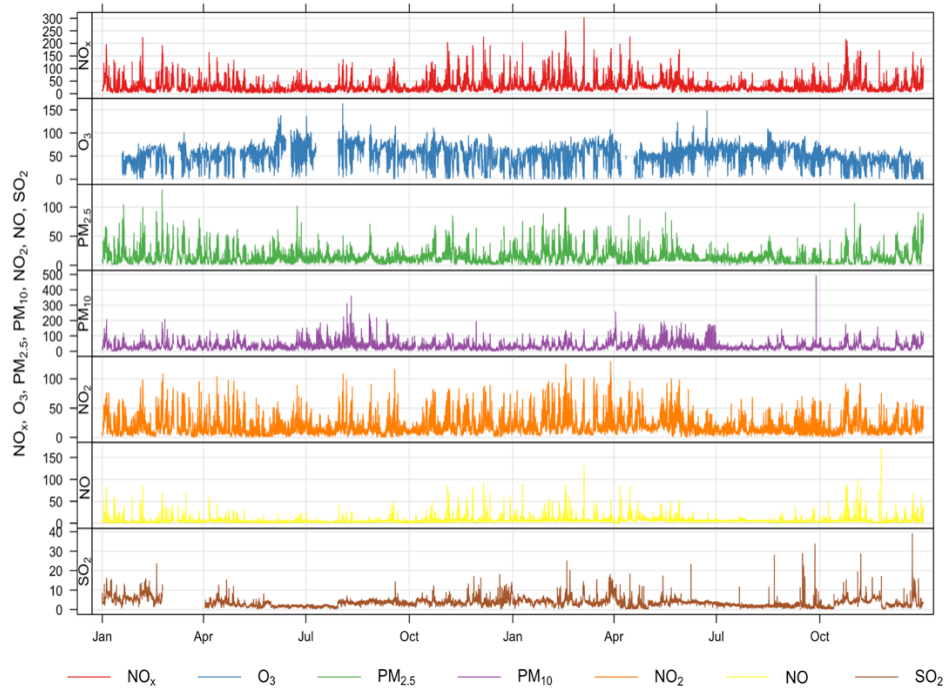
Şekil 2.3: Rüzgar şiddeti (m/s) ile PM₁₀ konsantrasyonu (µg/m³) arasındaki doğrusal ilişki grafiği



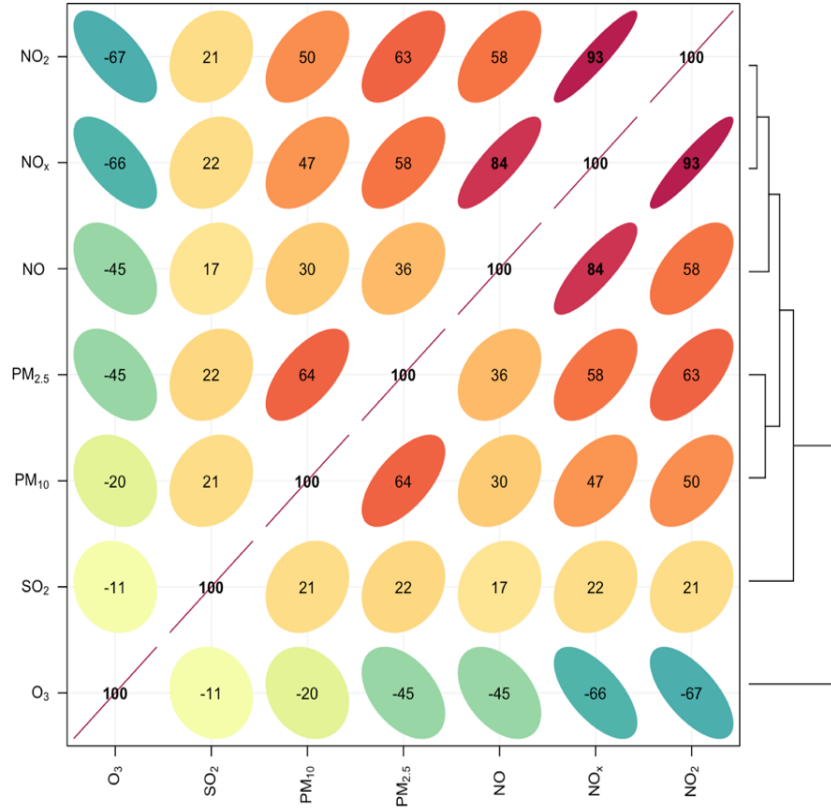
Şekil 2.4: Rüzgar hızı ve yönünün 8 yıllık ortalama şiddeti ve yön grafiği



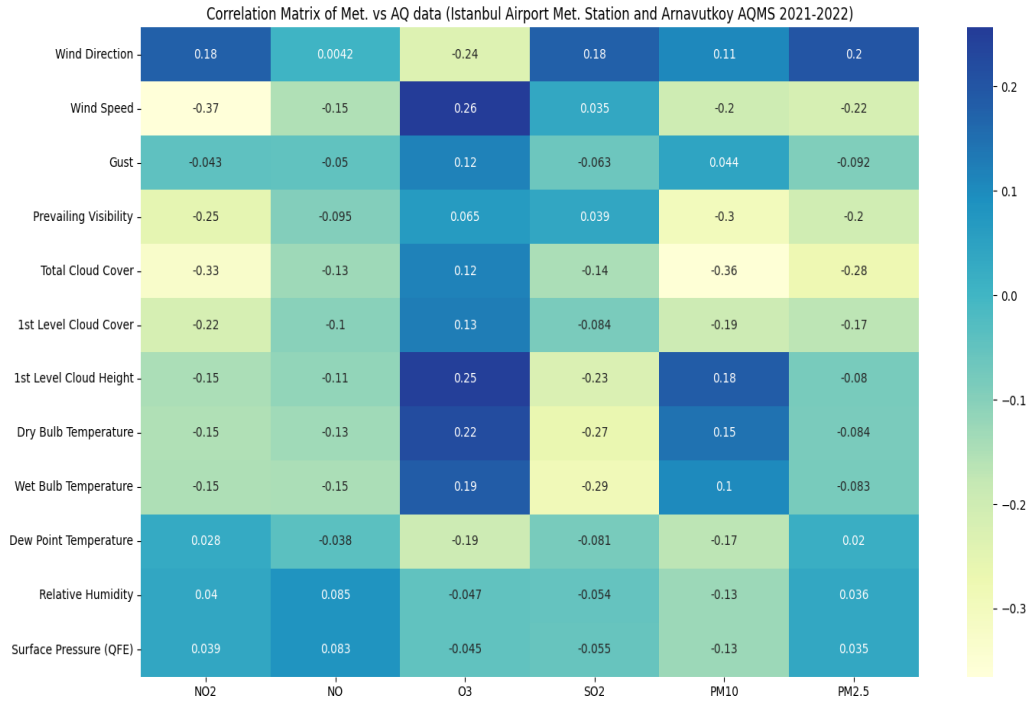
Şekil 2.5: Günlük maksimum PM₁₀ konsantrasyonunun 2011 ile 2018 yılları arasındaki hava kalitesi sınıflandırılması



Şekil 2.6: NO_x, NO, NO₂, PM₁₀, PM_{2.5}, O₃ ve SO₂ konsantrasyonlarının 2021 ile 2022 yılları arasındaki zaman serisi analizleri



Şekil 2.7: Arnavutköy HKİİ korelasyon grafiği



Şekil 2.8: Meteorolojik değişkenlerle hava kirleticileri arasında korelasyon matrisi

Bu bölümde PM_{10} ile meteorolojik değişkenler (rüzgar şiddeti ve yönü, sıcaklık ve bağıl nem) arasındaki ilişki belirlenmiştir. Ayrıca, NO_x , NO , NO_2 , PM_{10} , $PM_{2.5}$, O_3 ve SO_2 kirleticilerinin 2021 ile 2022 arasındaki zaman serisi analizleri ve korelasyon matrisleri yapılarak ilişkiler belirlenmiştir. İstanbul'da PM_{10} konsantrasyonunun saatlik, haftalık, aylık ve mevsimsel değişimleri tespit edilmiştir. Özetlemek gerekirse, PM_{10} 'un rüzgar hızı ve sıcaklık ile negatif, rüzgar yönü ve bağıl nem ile pozitif ilişkili olduğu bulunmuştur. Bu bölümde bir önceki çalışmalara ek olarak meteorolojik değişkenler ile PM_{10} arasındaki korelasyonun belirlenmesi amacıyla birçok korelasyon formülü kullanılmıştır. Tüm istatistiksel analizler birbirleriyle karşılaştırılarak sonuçlar yorumlanmıştır. Ayrıca günlük ve aylık PM_{10} konsantrasyonu takvim halinde görselleştirilerek mevsimsel değişim gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, PM_{10} konsantrasyonları bağıl nem ve rüzgar yönü ile pozitif bir ilişkiye sahipken, rüzgar şiddeti ve sıcaklık ile negatif bir ilişkiye sahiptir. Bağıl nem ve sıcaklık için korelasyon değerleri sırasıyla 0,01 ve -0,15 olarak bulunmuştur. Pearson korelasyonu, Spearman rank's korelasyonu ve Kendall Tau korelasyonu her 3 değişken için de yaklaşık olarak aynı korelasyon sonuçlarını vermiştir. Rüzgar şiddeti ile PM_{10} arasındaki en güçlü korelasyon PCC'de bulundu. Korelasyon katsayılarının benzer sonuçlar verdiği ve ilişkilerin doğruluğunu gösterdiği görülmektedir. ACF fonksiyonuna göre PM_{10} ile rüzgar şiddeti arasında bir ilişki gösterirken, CCF fonksiyonu ise negatif bir ilişki göstermiştir. Atatürk Uluslararası Havalimanı için rüzgar yönü kuzeybatıya veya batıya döndüğünde PM_{10} konsantrasyonu artmaktadır. Aylık bazda PM_{10} konsantrasyonu Aralık ve Mart ayları arasında yüksek olduğu bulunmuştur. PM_{10} değerlerinin en düşük olduğu aylar Temmuz ve Ağustos ayları olduğu bulunmuştur. $PM_{2.5}$ ile NO_2 arasında 0.63'lük bir korelasyon değeri ile pozitif bir ilişki olduğu bulunmuştur. Ayrıca, O_3 'ün diğer tüm kirleticiler arasında negatif bir ilişki olduğu bulunmuştur.



3. UZUN MESAFELİ TOZ TAŞINIMIN HAVALİMANLARINA VE HAVA KALİTESİNE OLAN ETKİLERİ³

3.1 Giriş

Türkiye, toz kaynağı bölgesine coğrafi yakınlığı nedeniyle hem Sahra çölü üzerinden hem de Arap yarım adasından gelen toz fırtınası olaylarına maruz kalmaktadır (Baltacı ve Ezber, 2022). Araştırmacılar, Sahra'da yüksek PM konsantrasyonlarına neden olan atmosferik hareketleri daha iyi anlamak için sinoptik haritalar ve uzaktan algılama yöntemlerini kullanmışlardır. Sahra toz parçacıklarının taşınma mekanizması üzerindeki rolü Türkiye için araştırılmış olup, toz fırtınası olaylarının gözlemler, modeller ve uzaktan algılama ürünleri kullanılarak daha iyi anlaşılması gerekmektedir. (Baltacı ve diğ., 2019). Türkiye'de toz taşınımının tahmin edilmesi ve gözlemlenmesine yönelik çalışmalarda, 18 Nisan 2012 tarihinde İstanbul Sabiha Gökçen ve Samandıra Havalimanı'nda meydana gelen savrulan kum (BLSA) hadisesi uydu görüntüleri kullanılarak analiz edilmiştir (Deniz ve diğ., 2013). Aynı şekilde 18 Nisan 2012 tarihinde tüm Türkiye havalimanlarında meydana gelen toz ve kum olaylarının kaynak bölgesinin bulunması için çalışmalar HYSPLIT modeli uygulanarak geri yörünge analizi yapılmıştır (Sirdas ve diğ., 2017; Özdemir, 2019).

Bu bölümde, Türkiye'deki havalimanlarında uzun mesafeli toz taşınımının hakim rüyet üzerindeki etkilerini değerlendirmeyi ve Orta Akdeniz'de meydana gelen siklonun Türkiye'ye doğru hareket etmesi ve 7-10 Nisan 2013 tarihleri arasında bir toz olayına neden olması nedeniyle PM₁₀ değerlerindeki epizodik değişimleri incelemeyi amaçlamaktadır. Bazı literatür çalışmalarında toz analizi genellikle aerosol optik derinliğine veya saçılma açısına bağlı değerlere bakılarak yapıldığından, aerosol kontrolü kullanılarak toz üzerinde araştırmalar yapılmıştır (Scott ve diğ., 2022). Ayrıca

³ Bu bölümde yapılan çalışma aşağıda belirtilen SCI dergide yayımlanmıştır. Birinci, E., Özdemir, E.T. & Deniz, A. An investigation of the effects of sand and dust storms in the North East Sahara Desert on Turkish airports and PM₁₀ values: 7 and 8 April, 2013 events. Environ Monit Assess 195, 708 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11288-5>

başka bir çalışmada gözlemlenen gökyüzü parlaklığının açısal dağılımı ışınım aktarım simülasyonları ile karşılaştırılarak toz analizi yapılmıştır (Chen-Chen ve diğ, 2021). Toz fırtınasının etkileri ravinsonde, yer istasyonları ve simülasyon modelleri ile de araştırılmıştır (Kocha ve diğ, 2012). Ayrıca, toz fırtınasını belirlemek için Normalleştirilmiş Bitki Örtüsü Farkı Endeksi (NDVI) kullanılmıştır (Ebrahimi Khusfi ve diğ, 2020). Regional Air Quality Modeling System (RAQMS) kullanılarak toz fırtınasından kaynaklanan mineral tozu yapısı araştırılmıştır (Liang ve diğ, 2022). El Niño güney salınımı (ENSO) verileri ve kuraklık indeksleri kullanılarak da toz fırtınaları araştırılmıştır (Kelley ve Ardon-Dryer, 2021). Bu bölümde yapılan çalışmanın diğer çalışmalardan farkı birden fazla yöntemin kullanılmasıdır. Bunun için HYSPLIT model çıktıları, analizler için toz RGB ve MODIS uydu görüntüleri, CALIPSO görüntüleri, BSC-DREAM8b model çıktıları dikkate alınmış ve GFS'de sinoptik haritalar kullanılarak kapsamlı bir araştırma yapılmıştır.

3.2 Çalışma Alanı ve Veri

Çalışma alanı Türkiye ve Kuzey Afrika'daki uluslararası havalimanlarını içermektedir. Kuzey Afrika'daki 5, Türkiye'deki 13 havalimanının verileri analiz edilerek çalışmalar yapılmıştır. Şekil 3.1'de ArcMap kullanılarak çizilen havalimanlarının konumları gösterilmektedir. Türkiye'nin en batı noktası Cengiz Topel (LTBQ) havalimanı, en doğu noktası ise Ağrı (LTCO) havalimanıdır. Metar ve Speci rasatları, uluslararası kodlarla yazılmış, o bölgenin güncel hava koşullarını veren ve düzenli hava trafiği için kullanılan kısa raporlardır (Novotny ve diğ, 2021). Bu çalışmada rüzgar yönü ve şiddetinin, hava koşulları, görüş mesafesi, bulut taban yüksekliği, sıcaklık ve basınç gibi değişkenler kayıt altına alınmaktadır ve her havalimanında yarım saat süreyle yayınlanmaktadır. Metar raporlarının 30 dakikada (ve Speci raporlarının 50 dakikada) alınabilmesi için her havalimanı için belirlenen tarih aralığında Iowa State University'nin Metar ve Speci verilerinden indirilmiştir (Url-3). Toz taşınımını belirlemek için Meteosat Second Generation (MSG) uydu görüntüleri kullanılmıştır (Url-5). Toz fırtınasının meydana geldiği andaki PM_{10} konsantrasyonlarının belirlenmesi için Türkiye'deki havalimanlarına en yakın HKİİ'lerden saatlik ortalama PM_{10} ($\mu g/m^3$) değerleri alınmıştır.



Şekil 3.1: Kuzey Afrika ve Türkiye'deki uluslararası havalimanları

Hava parselinin nereden geldiğini belirlemek için HYSPLIT modeli kullanılmıştır. Bu sayede toz parçacıklarının uzun mesafeli olarak taşındığı tespit edilmiştir. Ayrıca, toz ve kum taşınımını göstermek için AQUA, TERRA, MODIS kullanılarak analizler yapılmıştır. Toz taşınımının belirlenebilmesi için ayrıca sinoptik haritalarda kullanılmıştır. Çizelge 3.1'de kullanılan havalimanları ve koordinatları gösterilmektedir.

Çizelge 3.1: Türkiye, Libya ve Mısır için havalimanı bilgileri.

Havalimanı Bilgileri	
Havalimanları	Koordinatlar
Mısır	
Borg El	30° 55' 04" N 29° 41' 47" E
Assiut	27° 02' 47" N 31° 00' 43" E
Luxor	25° 40' 15" N 32° 42' 23" E
Marsa Matruh	31° 19' 31" N 27° 13' 18" E
Libya	
Benina (Benghazi)	32° 05' 49" N 20° 16' 10" E
Türkiye	
İncirlik	37° 00' 07" N 35° 25' 33" E
Adana	36° 58' 55" N 35° 16' 49" E
Ağrı	39° 39' 16" N 43° 01' 38" E
Cengiz Topel	40° 44' 06" N 30° 05' 00" E
Etimesgut	39° 56' 59" N 32° 41' 19" E
Gaziantep	36° 56' 52" N 37° 28' 44" E
Hatay	36° 22' 20" N 36° 17' 55" E
Kapadokya	38° 46' 08" N 34° 31' 35" E
Erkilet	38° 46' 13" N 35° 29' 43" E
Mardin	37° 13' 58" N 40° 38' 26" E
Merzifon	40° 49' 45" N 35° 31' 19" E
Siirt	37° 58' 00" N 41° 50' 00" E
Tokat	40° 18' 42" N 36° 22' 25" E

3.3 Materyal ve Metot

3.3.1 Metar ve Speci analizi

Libya ve Mısır için Metar ve Speci gözlemleri 03 Nisan 2013 00:00 UTC ile 10 Nisan 2013 00:00 UTC arasında değerlendirilmiştir (Url-3). Bu çalışma kapsamında alınan Metar ve Speci gözlemlerinde kullanılan kısaltmalar Çizelge 3.2’de gösterilmektedir. Metar ve Speci raporlarının toz ve sis analizleri İstanbul Türkiye’de yapılan bir çalışmada kullanılmıştır (Özdemir ve diğ, 2018).

Çizelge 3.2: Metar ve Speci kodlarının açıklamaları.

Kod	Tanımı
BLDU	Savrulan Toz
-	Hafif Yağmur Sağanağı
SHRA	Mutedil Yağmur Sağanağı
TSRA	Orajla Birlikte Mutedil Sağanak Yağmur
DS	Toz Fırtınası
DU	Geniş Alana Yayılmış Toz
DRSA	Sürüklenen Kum
DRDU	Sürüklenen Toz
HZ	Kuru Duman
SS	Kum Fırtınası

3.3.2 Sinoptik haritalar

Bu bölüm Sinoptik haritaların yorumlanmasını içermektedir. Sinoptik bir harita üzerinde deniz seviyesindeki basıncın dağılımı, soğuk ve sıcak cephelerin analizi gibi hava kütlelerini analiz etmek için kullanılmaktadır. Ayrıca meteorolojik değişkenler ve devam eden meteorolojik koşullar sinoptik bir harita üzerinde gösterilmektedir (Url-6). Deutscher Wetterdienst tarafından hazırlanan yüzey haritaları ve GFS analiz ürünlerinin 850 hPa, 700 hPa, 500 hPa ve 300 hPa üst düzey haritaları Wetter3 web

sitesinde yayınlanmaktadır. Bu haritalardan bazıları 7 ve 8 Nisan 2013 tarihlerinde sinoptik analizler için kullanılmıştır (Url-7).

3.3.3 Uydu Görüntüleri

Toz taşınımını analiz etmek için Meteosat İkinci Nesil (MSG) uydusundan alınan toz ürünü görüntüleri kullanılmıştır. Toz taşınım ürünü, MSG IR kanallarındaki birleşik dust RGB ürünüdür. Toz ürünü, resimdeki tozun (pembe renkte) gelişiminin ve hareketinin 24 saat süreyle gözlemlenmesine olanak sağlamaktadır. Dust RGB uydu görüntüleri, Spinning Enhanced Visible and InfraRed Image (SEVIRI) kanallarının IR8.7, IR10.8 ve IR12.0'ın bir birleşimidir (Url-8). Bu toz RGB uydu görüntüsü Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) aracılığıyla alınmıştır. Uydu görüntülerinin analizinde Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA), AQUA ve TERRA uyduları tarafından kaydedilen MODIS uydu görüntüleri kullanılmıştır (Url-9). MODIS uydusu, yaklaşık iki günde bir, 36 spektral bantta dünyanın her noktasını görmekte olup, 2330 km görüş alanına sahiptir. Ayrıca MODIS uydusu her gün bulut kapsamını ölçmektedir (Url-10).

3.3.4 BSC-DREAM8b model

Analiz döneminde mekansal ve zamansal değişimi göstermek için BSC-DREAM8b modeli ve yüzey seviyesindeki toz konsantrasyonunun değerleri kullanılmıştır. Bu görüntüler BSC'den (Url-11) alınmıştır. DREAM modeli, toz kütle sürekliliği için Euler tipi kısmi diferansiyel doğrusal olmayan denklemin çözülmesi ve görselleştirilmesi sürecini katkı sağlamaktadır (Basart ve diğ, 2012).

3.3.5 HYSPLIT analizi

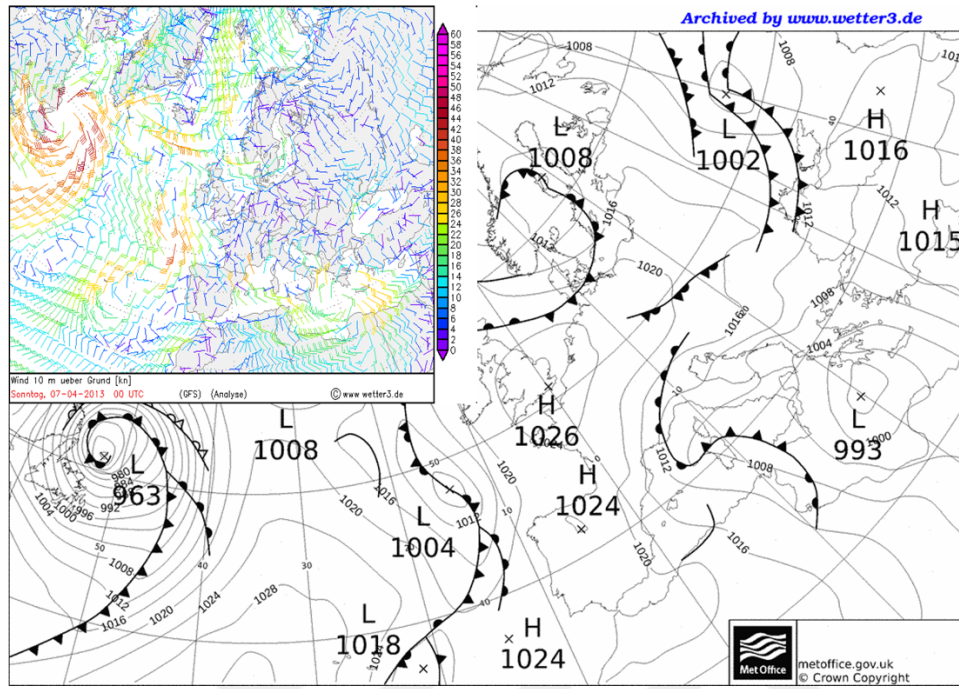
NOAA ve Avustralya Meteoroloji Ofisi HYSPLIT modelini geliştirmiştir. Bu model, atmosferde taşınan ve yayılan maddenin yerel ve küresel ölçekte dağılımını ve yörüngesini simüle edmektedir. HYSPLIT taşıma, dağılım, kimyasal dönüşüm ve biriktirme simülasyonlarının hesaplanmasına yönelik eksiksiz bir sistemdir. HYSPLIT, atmosfer bilimi uygulamalarında taşınım ve dağılım gibi konuları analiz etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Hava kütlelerinin kökenini belirlemek ve kaynak-alıcı ilişkilerini kurmak için yapılan bir geri yörünge analizidir. HYSPLIT ayrıca kirleticilerin ve tehlikeli maddelerin atmosferik taşınmasını, dağılmasını ve

birikmesini açıklamak için çeşitli simülasyonlarda kullanılmıştır. Örneğin, orman yangını dumanının, rüzgarla savrulan tozun, kirleticilerin, alerjenlerin ve volkanik külün salınımının izlenmesini ve tahmin edilmesini içermektedir (Url-12).

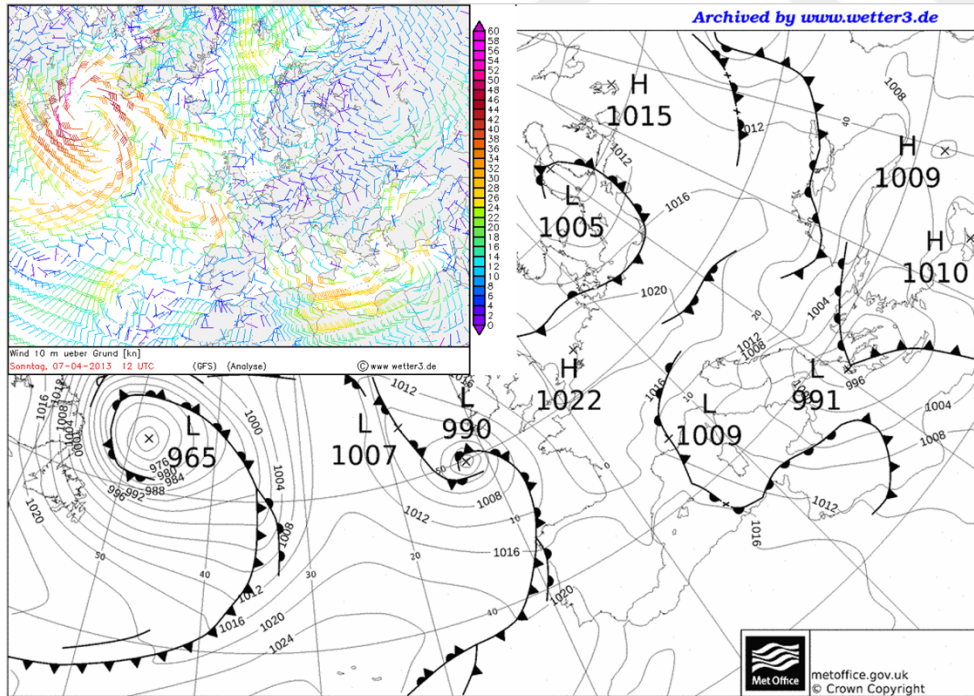
3.4 Tartışma ve Sonuçlar

05-07 Nisan 2013 tarihlerinde Libya Havalimanı'nda Metar ve Speci gözlemleri yorumlanmıştır. Toz Benina Havalimanı'nda görüş mesafesini etkileyerek 50 m'ye kadar düşürmüştür. Aynı şekilde Mısır'daki havalimanlarında da tozun etkisiyle görüş mesafesi 500 metreye kadar düşmüştür. Bu tozun siklonla birlikte Türkiye'ye gelmesinden birkaç gün sonra Metar ve Speci raporları incelendiğinde, Türkiye'deki tüm havalimanlarında toz ve pus gözlenmiştir. Kuzey Afrika'yı etkisi altına alan toz fırtınasının asıl nedeni kısaca siklonun oluşması olarak tanımlanabilir. Alçak basınç sistemi ve düşey yatay sıcaklık değişimleri vasıtasıyla Sahra Çölü'ndeki toz tanecikleri yer seviyesinden atmosfere doğru yükselmiş ve güneybatıdan esen rüzgarlar toz taneciklerinin Türkiye'nin üzerine taşımıştır. Gelişmekte olan siklonun hareketini ve siklonu görüntülemek için 10 m seviyesinde ki rüzgar hızı ve yönlerini, yüzey basınç haritalarını 12 saatlik aralıklarla alınarak analiz edilmiştir. 07 Nisan 2013 00:00 UTC'deki yer basıncı haritasına bakıldığında Türkiye üzerinde 1015 hPa'lık bir yüksek basınç merkezi görülebilmektedir. Türkiye'nin batısında da bir sıcak cephe, bir de soğuk cephe bulunmaktadır (Şekil 3.2). Rüzgar haritasında Türkiye'nin güneyinde rüzgarlar güney ve batı yönlerden esmektedir. Rüzgarlar Yunanistan üzerinden güneybatıdan, Türkiye'ye yaklaşırken güneydoğudan, Libya'ya doğru ise güneyden esmektedir (Şekil 3.2 ve 3.3). 12 saat sonra Türkiye'nin güneybatısına soğuk hava dalgasının girdiği görülmektedir ve Türkiye üzerindeki basınç 12 saat öncesine göre 10 hPa düşüşle 1005 hPa olarak görülmüştür (Şekil 3.3). NASA'nın AQUA ve TERRA uyduları tarafından kaydedilen MODIS uydu görüntüleriyle 05-08 Nisan 2013 tarihleri arasında toz taneciklerinin hareketi incelenmiştir. 5 Nisan 2013 tarihinde Libya üzerinde toz fırtınası tespit edilmiş ve 6 Nisan 2013 tarihli toz MSG uydu fotoğraflarında Batı Akdeniz üzerinde toz konsantrasyonu tespit edilmiştir. 05 Nisan 2013 tarihinde TERRA ve AQUA uyduları tarafından yapılan gözlemler neticesinde Kuzey Libya'daki toz fırtınası net bir şekilde görülmüştür. 06 Nisan 2013 tarihinde TERRA uydusu incelendiğinde siklon içerisindeki tozun hareketinin Türkiye'nin batısından doğuya doğru ilerlediği görülmüştür (Şekil 3.4). Ayrıca, 7 ve 8 nisan

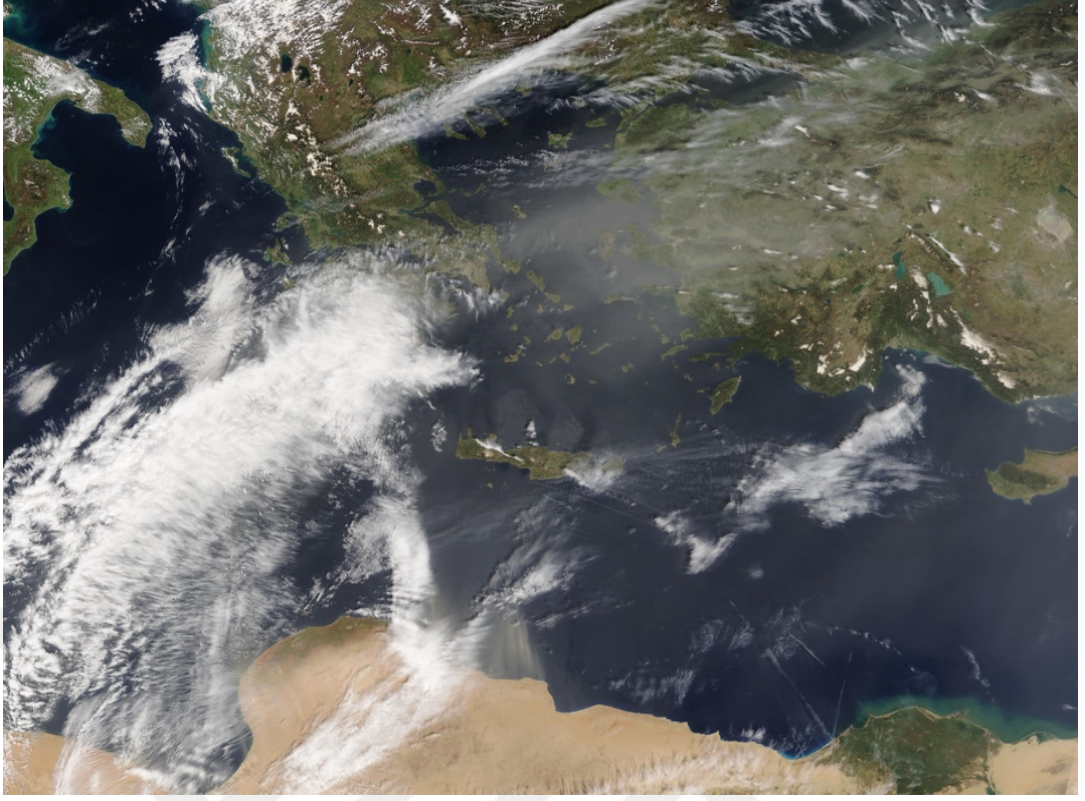
tarikhlerinde de tozun Türkiye'ye doğru hareketi ve varlığı açıkça görülmektedir (Şekil 3.5 ve 3.6)



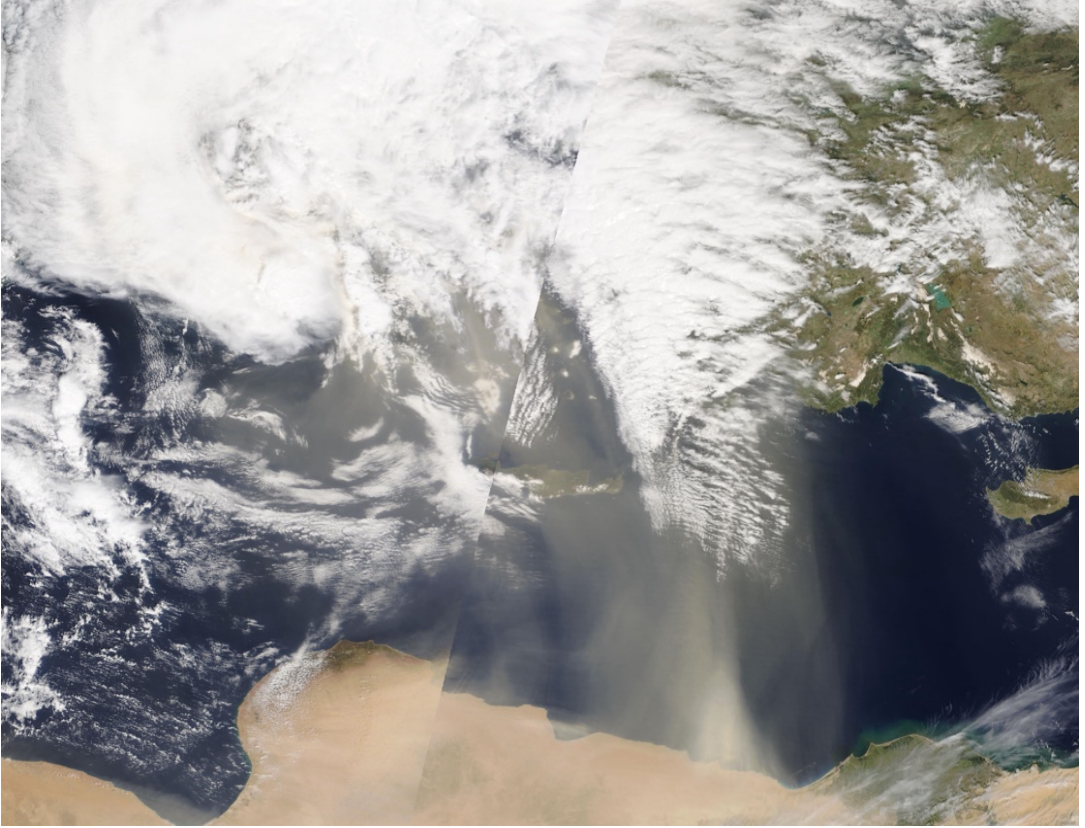
Şekil 3.2: 7 Nisan 00:00 UTC 2013 yüzey basınç haritası ve 10 m'deki rüzgar yönü



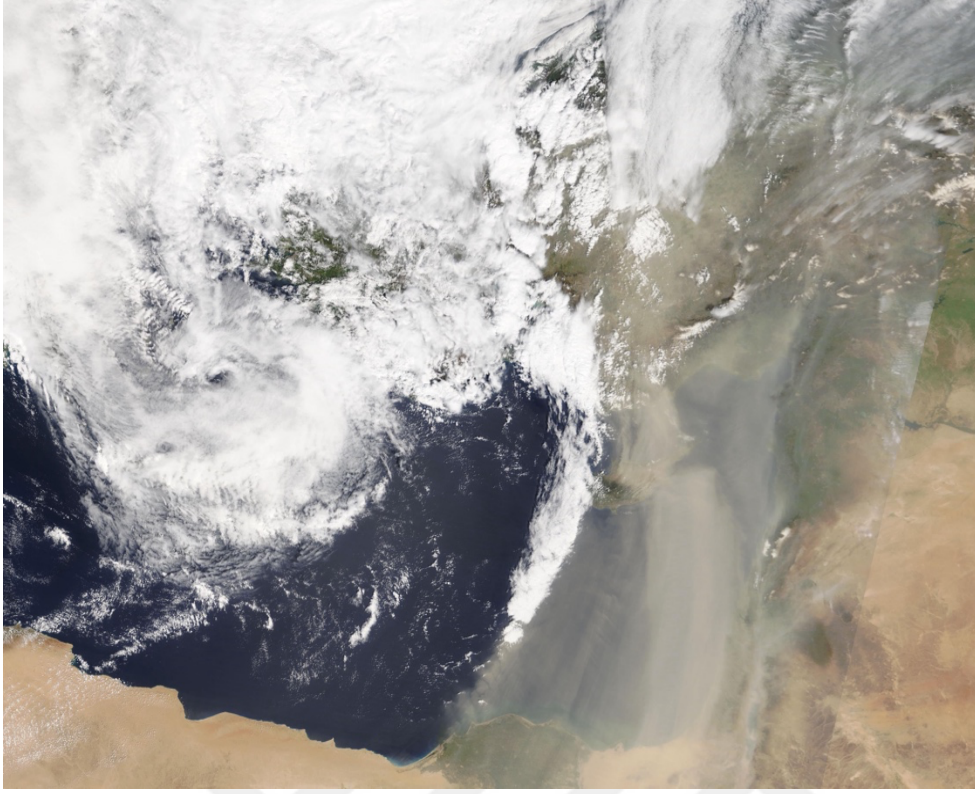
Şekil 3.3: 7 Nisan 12:00 UTC 2013 yüzey basınç haritası ve 10 m'deki rüzgar yönü



Şekil 3.4: 6 Nisan 2013 TERRA uydu görüntüsü



Şekil 3.5: 7 Nisan 2013 TERRA uydu görüntüsü

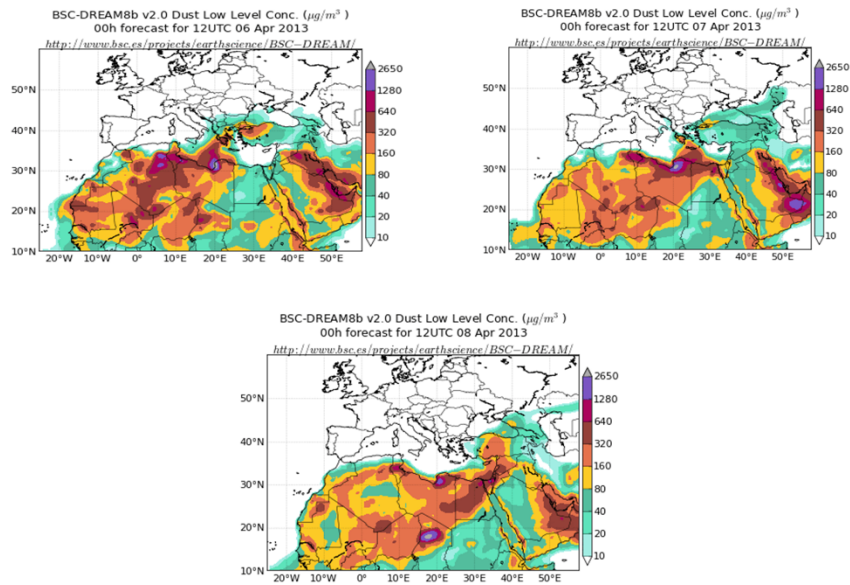


Şekil 3.6: 8 Nisan 2013 TERRA uydu görüntüsü

MSG toz RGB görüntüleri sayesinde IR8.7, IR10.8 ve IR12.0 kanalları ile belirtilen tarih aralığında SEVIRI kanalı aracılığıyla toz taşınımının olup olmadığı görülebilmektedir (Url-8). Yaklaşık 6 saat arayla çekilen MSG Dust görüntülerinde, 7 Nisan 2013 09:00 UTC'de kırmızı alanlarda toz olduğu görülmektedir. 8 Nisan 2013 sabahı ve gecesi yaklaşık 29.57 E 33.61 K enlem ve boylamında yer alan MSG uydusu üzerinde duman şeklinde bir toz bulutunun olduğu görülmektedir. Yapılan bir çalışmada, yüzey basınç haritalarında incelendiği üzere, Kuzey Afrika'da Bermuda yüksekliği olarak da adlandırılan Azor yüksekliği üzerinde oluşan yüksek basınç nedeniyle toz taşınımı doğuya doğru ilerlemiştir. Toz tanecikleri Türkiye üzerinde yüksek basınç etkisiyle yere doğru çökerek PM_{10} konsantrasyon değerlerini arttırdığı tespit edilmiştir. Uydu görüntülerinin incelenmesinde azor yüksek basıncının tozu yere doğru çökelttiği görülmüştür (Özdemir ve diğ, 2018). Kısaca MSG Dust kanalında uydu görüntülerinden görülebileceği üzere 7 ve 8 Nisan 2013 tarihlerinde Türkiye'yi etkileyen toz fırtınası belirlenmiştir. Toz taneciklerinin hareketi MSG toz kanalından takip edilebilmektedir. Bu çalışmada incelenen tarih aralığında MSG uydusunun yörüngesi tam olarak Türkiye'nin ortasından geçmektedir. Böylece uydu görüntüleri aracılığıyla MSG ve toz RGB görüntüleri de diğer analizlerde olduğu gibi toz fırtınasının Türkiye üzerine taşındığını göstermiştir. Ancak MSG uydusu toz

fırtınasının olduğu zamanlarda yörüngesinin taranmadığı alanlara denk geldiğinde analizler yapılamayacaktır.

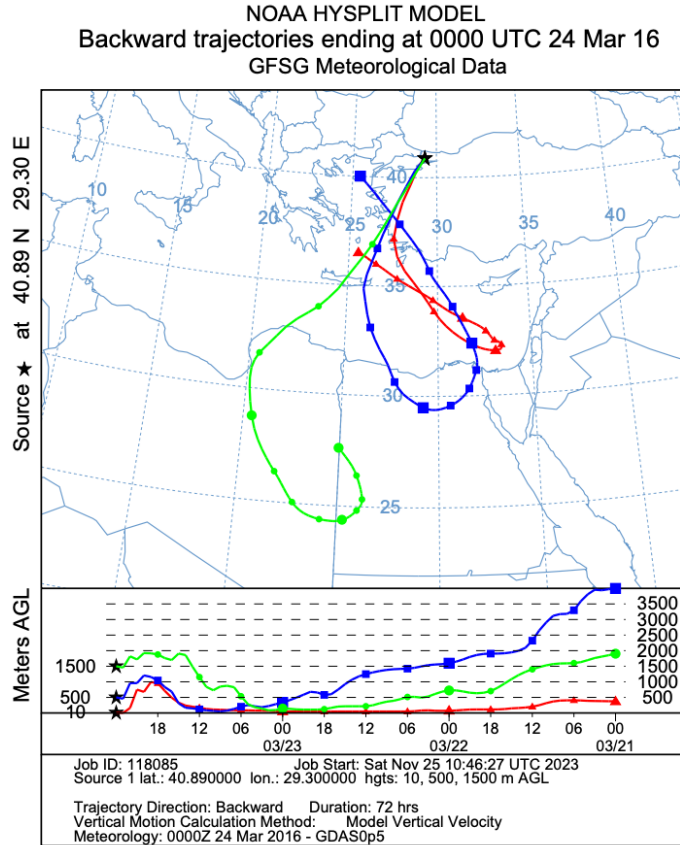
Toz konsantrasyonu 05 ve 08 Nisan 2013 tarihleri arasında BSC-DREAM8b modeli kullanılarak gösterilmiştir. Bu tahminler her gün 12:00 UTC için yapılmıştır. Örneğin 6 Nisan 2013 12:00 UTC'deki tahmin 6 Nisan 2013 00:00 UTC'de yapılmıştır. 08 Nisan 2013 tarihinde özellikle Türkiye'nin iç kesimlerinde toz konsantrasyonlarının yükselerek $320 \mu\text{g}/\text{m}^3$ olduğu görülmüştür. Bu bölgedeki toz konsantrasyonunun $80-320 \mu\text{g}/\text{m}^3$ arasında olduğu görülmektedir (Şekil 3.7). BSC-DREAM8b modeli vasıtasıyla toz fırtınası nedeniyle Türkiye'de toz konsantrasyonlarını arttırdığı tespit edilmiştir.



Şekil 3.7: 6, 7, 8 Nisan 00:00 UTC 2013 BSC-DREAM8b tahmini

HYSPLIT geri yörünge analizi yüksek toz konsantrasyonun olduğu 3 bölgedeki üç havalimanı için yapılmıştır. Bu havalimanları sırasıyla İncirlik, Kapadokya ve Kayseri'dir. Hava parselinin 72 saat önce tam olarak nereye geldiği görülebilmektedir. İncirlik havalimanı için 8 Nisan 2013 tarihinde 1500 m yükseklikteki havanın Kuzey Afrika üzerinden geldiği görülmüştür (Şekil 3.8). Böylece toz parçacıkları yüzeye doğru çöktüğü ve kirliliği arttırdığı tespit edilmiştir. Kapadokya havalimanı'nın geri yörünge analizi de 1500 m'deki havanın Türkiye'nin güneyinden, yani Libya üzerinden geldiğini göstermiştir. 8 Nisan 2013 tarihinden 72 saat önce 1500 m yükseklikte bulunan hava parseli yaklaşık 3000 m yükseklikteyken, 8 Nisan 2013 tarihinde toz 1500 m'nin altına inmiştir. Son olarak, Kayseri havalimanı için yapılan geri yörünge

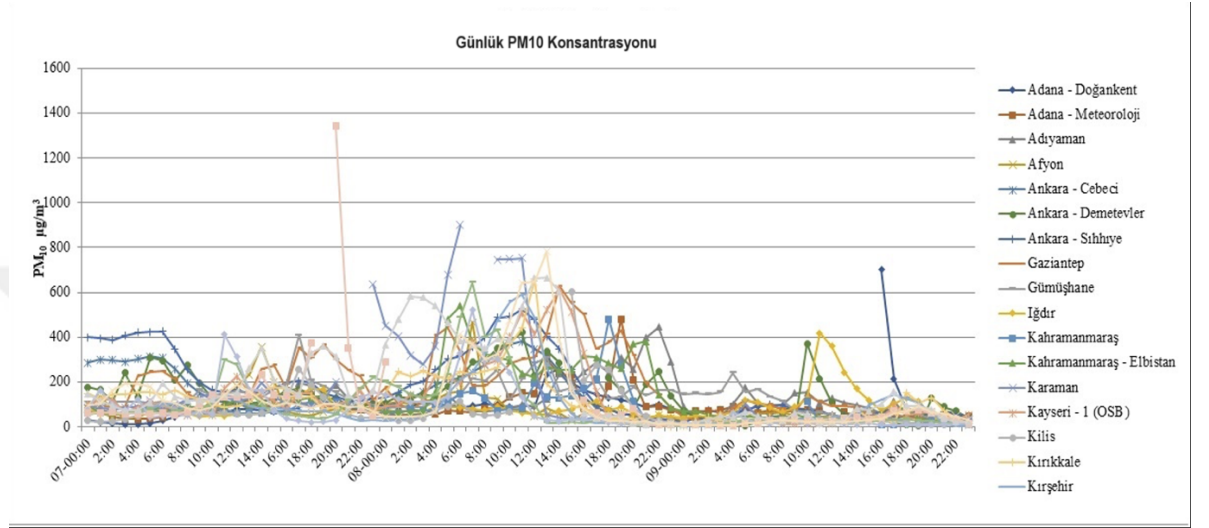
analizinde hava parselinin de Türkiye'nin güneyinden geldiği görülmektedir. 72 saat önce 1500 m seviyesinde olan hava parselinin 08 Nisan 2013 tarihinde yaklaşık 1000 m'ye kadar çöktüğü görülmektedir. Geri yörünge analizine göre, hava parselinin Akdeniz üzerinden Türkiye'nin güneyi, Libya'nın kuzeyi ve Mısır'dan 72 saat önce geldiği görülmüştür.



Şekil 3.8: 8 Nisan 13:00 UTC 2013 HYSPLIT İncirlik geri yörünge analizi

PM₁₀ değerleri saatlik ortalama olarak alınmış olup 7-10 Nisan 2013 dönemini kapsamaktadır. 20 HKKİ'den alınan kirleticilerin saatlik grafikleri ortalama PM₁₀ konsantrasyonlarına göre çizilmiştir (Şekil 3.9). Bu 20 istasyon havalimanlarına yakın HKİİ'lerdir. 08-09 Nisan 2013 tarihleri arasında tüm PM₁₀ değerlerinin yüksek olduğu açıkça görülmektedir. 8 Nisan 2013 gecesi ve sabahında bazı istasyonlarda pik değerlerin olduğu görülmektedir. Nevşehir için PM₁₀ konsantrasyonu 07 Nisan 2013 gecesi 1343 µg/m³ ile zirveye ulaştığı görülmüştür. Nevşehir'e en yakın hava kalitesi izleme istasyonu Karaman'da olup, 08 Nisan 2013 saat 06:00 UTC'de en yüksek

değerine ($900 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ulaştığı görülmektedir (Şekil 3.9). PM_{10} konsantrasyonu her havalimanındaki lokasyonuna göre farklı değerlere sahiptir. En yüksek konsantrasyona sahip dört istasyon için maksimum PM_{10} konsantrasyonları sırasıyla Nevşehir 1343, Karaman 900, Yozgat 782 ve Gaziantep 629 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 'tür. Kısaca PM_{10} konsantrasyonları 8 ve 9 Nisan 2013 tarihlerinde toz fırtınasının etkisiyle artış göstererek pik değerlere ulaşmıştır.



Şekil 3.9: 7, 8, 9 Nisan 2013 Türkiye havalimanlarında Günlük PM_{10} konsantrasyonu

Bu bölümde 7-8 Nisan 2013 tarihlerinde Kuzey Afrika'da meydana gelen toz fırtınasının uzun mesafeli olarak taşınımıyla Türkiye'deki havalimanlarında hakim rümete etkisi ve havalimanlarına en yakın HKİİ'lerde ölçülen PM_{10} konsantrasyonlarına olan etkisi araştırılmıştır. Türkiye üzerindeki toz fırtınasının, Afrika'daki toz fırtınasından yaklaşık iki gün sonra meydana geldiği ve PM_{10} konsantrasyonlarının Türkiye genelinde arttırdığı tespit edilmiştir. Aynı şekilde toz taşınımının hareketi de uydu görüntüleri, sinoptik analizler ve modeller ile incelenmiştir. Sonuçların sinoptik haritalarla eş zamanlı olarak değerlendirilmesiyle analizler daha detaylı bir şekilde yapılmıştır. HKİİ'lerden alınan epizodik değerler saatlik ortalama olarak Adana $701 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Gaziantep $629 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Karaman $900 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ve Yozgat $782 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Nevşehir $1343 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 'tür. Bu en yüksek değerler, muhtemelen Kuzey Afrika'ya yakınlığından dolayı, Türkiye'nin güney kesimlerinde görülmektedir. Toz fırtınasının Türkiye üzerinden hareketindeki en kritik faktörlerden biri Orta Akdeniz'de 995 hPa değerinde bir siklonun oluşmasıdır. Siklonun Türkiye'ye doğru ilerlediği, konverjans alanları ile Kuzey Afrika'daki toz tanecikleri yer seviyesinden

atmosfere doğru hareket edip daha sonra güneybatılı rüzgarlarla uzun mesafeli olarak taşınarak Türkiye üzerine gelmiştir. Daha sonra toz tanecikleri yüksek basıncın etkisiyle Türkiye'de yer seviyesine kadar çökmüştür. 10 m seviyesindeki rüzgarın 40 knot civarında olması nedeniyle sistemin hızlı hareket ettiği ve iki gün içinde Türkiye'ye ulaştığı sonucuna varılabilir. Ayrıca, uydu görüntülerinde toz fırtınasının hareketi ve toz RGB kanalındaki toz taşınımı Türkiye üzerinden net bir şekilde görülmektedir. Uydu görüntülerinin analizinde uydunun toz taşınımı olan bölgeden geçmesi oldukça önemlidir. Toz RGB kanalı, uydu yörüngesinin kapsamadığı alanlardaki diğer toz fırtınası çalışmalarında aynı şekilde çalışmayabilir. HYSPLIT 72 saatlik geri yörünge analizi ile hava parselinin Kuzey Afrika'dan gelip Türkiye'ye üzerinde alçaldığı görülmüştür. Akdeniz'den gelen nemli havanın da tozun çökmesine katkıda bulunduğu düşünülebilir.

4. MARMARA BÖLGESİ'NDEKİ TOZ FIRTINALARININ İNCELENMESİ⁴

4.1 Giriş

Dünyanın farklı bölgelerinde meydana gelen toz fırtınaları, yer seviyesinde ve üst atmosferin emme ve saçılma kapasitesini etkileyerek çevreyi büyük ölçüde etkilemektedir. Özellikle yarı kurak ve kurak bölgelerde, toz fırtınaları meydana geldiğinden yoğun yüzey ısınması ve dik atmosferik basınç gradyanları meydana gelmektedir (UNEP, WMO ve UNCCD 2016). Kuzey yarımkürede Sahra Çölü en önemli ve kalıcı toz kaynağı olarak tanımlanmaktadır (Prospero ve diğ, 2002). Küresel toz üretiminin neredeyse %70'i Sahra Çölü'nden gelmektedir. Ayrıca toz olayları Kuzey Amerika, Güney Amerika, Avrupa, Ortadoğu ve Türkiye'ye, Akdeniz'e, Kızıldeniz'e ve Atlantik Okyanusu'na kadar uzun mesafelere taşınabilmektedir (Goudie ve Middleton, 1992). Bu nedenle toz taşıma mekanizmasının anlaşılması ve önemli etkilerinin azaltılması oldukça önemlidir (Baltacı, 2021). Kuzey Afrika'dan daha yüksek enlemlere toz taşınması, esas olarak Akdeniz bölgesi ve çevresindeki

⁴Bu bölümde yapılan çalışma aşağıda belirtilen SCI dergide yayımlanmıştır. Ayrıca, bu bölümde yapılan çalışmanın biri uluslararası ve diğeri de ulusal bir konferansta bildiri olarak sunulmuştur.

Birinci, E., Denizoglu, M., Ozdemir, H., Özdemir, E.T. & Deniz, A. Ambient air quality assessment at the airports based on a meteorological perspective. *Environ Monit Assess* 195, 708 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11288-5>

Birinci, E., Özdemir, E. T. & Deniz, A. (2022). An investigation of the effects of dust transport and dust storms on PM₁₀ and PM_{2.5} at airports in the Marmara region of Türkiye. 10th International Symposium on Atmospheric Sciences. 18-21 October İstanbul.

Birinci, E., Ozdemir, H., & Özdemir, E. T. (2023). Uzun Mesafeli Toz Taşınımının Havalimanlarına Olan Etkilerinin İncelenmesi: 29 Kasım 2021 Olayı. V. METEOROLOJİK UZAKTAN ALGILAMA SEMPOZYUMU. 13-17 Kasım Alanya, Antalya.

rüzgar ve siklonik aktivite nedeniyle meydana gelmektedir (Alpert ve Ganor, 2001; Moulin ve diğ, 1998).

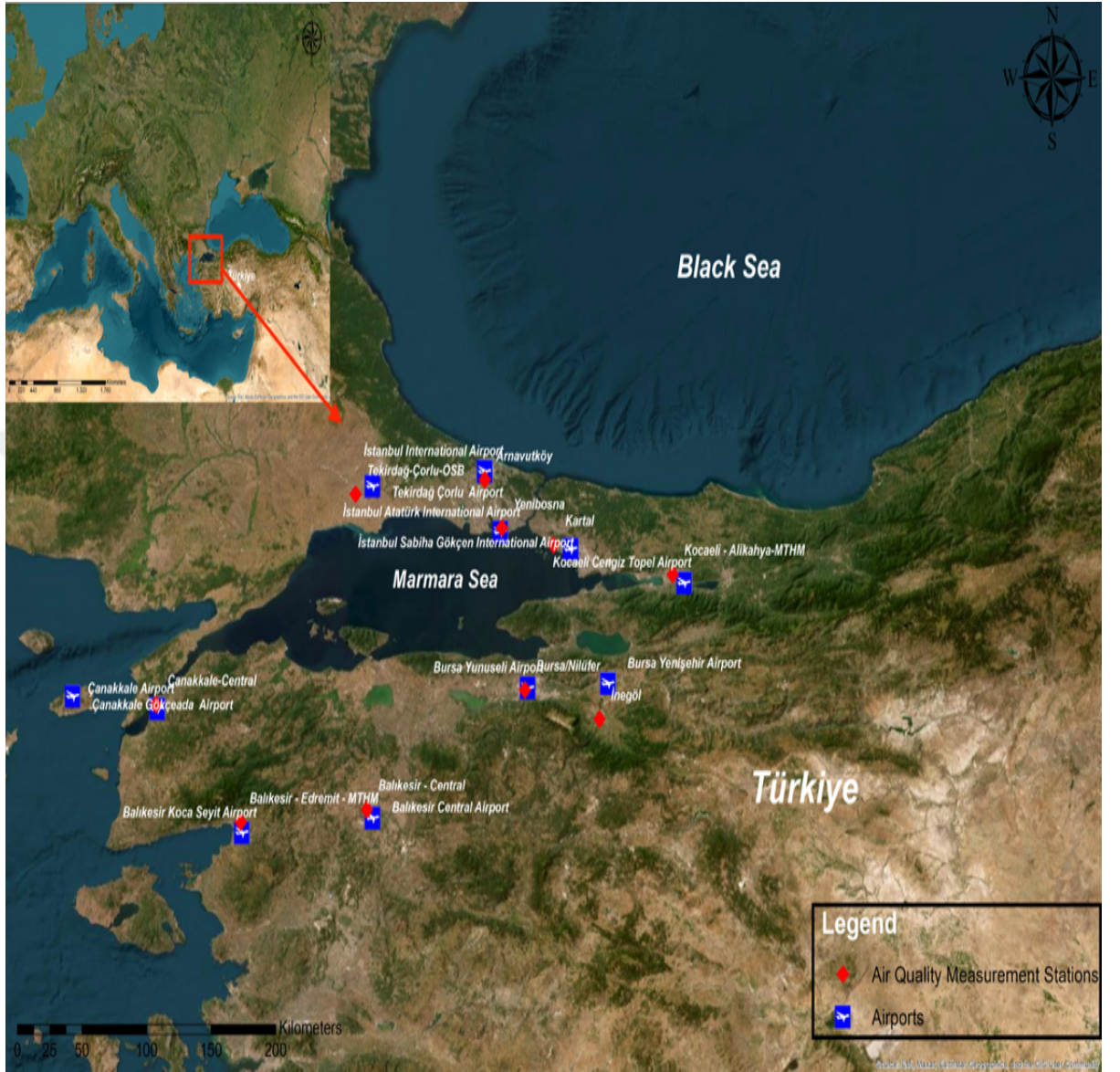
PM'nin hava kalitesi, iklim ve görünürlük üzerindeki olumsuz etkilerle ilişkilendirilmesi nedeniyle son yıllarda atmosferik PM çalışmalarına büyük önem verilmiştir. Kentleşmiş bölgelerde PM konsantrasyonundaki değişimi anlamak için antropojenik kaynaklar dikkate alınmalıdır. İstanbul'daki oyun alanlarındaki PM kirliliğine ilişkin bir vaka çalışmasında, şehrin hem yerel antropojenik kaynaklardan hem de Sahra Çölü'nden doğal kaynakların taşınmasından etkilendiği ve bunun sonucunda PM₁₀ ve PM_{2.5} konsantrasyonlarının yüksek olduğu tespit edilmiştir (Özdemir ve diğ, 2012).

Bu bölümde uzun mesafeli toz taşınımının havalimanlarında kodlanıp kodlanmadığına ve eğer toz olayı kodlandıysa havalimanlarına en yakın HKİİ tarafından ölçülen PM₁₀ ve PM_{2.5} değerleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Türkiye'nin Kuzeybatısındaki 11 havalimanında toz taşınımı olayları kodlanmıştır (Bu bölge Marmara Bölgesi olarak adlandırılmaktadır). Metar ve Speci verileri 2012-2021 yılları arasında kullanılmıştır.

4.2 Çalışma Alanı ve Veri

Çalışma alanı Türkiye'nin Kuzeybatısını kapsamakta olup 11 havalimanından oluşmaktadır. Aşağıdaki Şekil 4.1, 11 havalimanının konumu ve en yakın HKİİ ile birlikte çalışma alanını göstermektedir. Kirletici verileri Çevre Şehircilik ve iklim Değişikliği Bakanlığından alınmıştır (Url-13). Meteorolojik Veriler için Metar ve Speci verileri kullanılmıştır. Bu veriler yarım saatlik ve/veya saatlik verilerdir. Aynı şekilde kirletici verileri de saatlik olarak alınmıştır. Metar ve Speci verileri kirletici verileri gibi saatlik verilere dönüştürülmüştür. Ayrıca, Metar ve Speci verileri UTC zamanında olduğundan kirletici verileri de yerel saat olarak değil UTC zamanına dönüştürülerek kullanılmıştır. Havalimanları ve ölçülen PM yapısı ile en yakın HKİİ hakkında daha ayrıntılı bilgi Çizelge 4.1'de verilmektedir. Çalışma'da PM_{2.5} ölçümlerinin az

olmasının nedeni çalışılan istasyonlarda PM_{2.5} ölçümlerinin daha geç başlamasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.1: Türkiye'nin Marmara Bölgesi'ndeki havalimanları ve HKİİ'lerin konumu

Çizelge 4.1: Havalimanları ile HKİİ arasındaki mesafe ve ölçülen PM.

İl	Havalimanı	HKİİ	Havalimanı ile HKİİ arasındaki mesafe (km)	Ölçülen PM yapısı
İstanbul	İstanbul Uluslararası Havalimanı	Yenibosna	2,5	PM ₁₀
İstanbul	Sabiha Gökçen Uluslararası Havalimanı	Kartal	8	PM ₁₀ ve PM _{2.5}
İstanbul	Atatürk Uluslararası Havalimanı	Arnavutköy	9	PM ₁₀
Bursa	Yenişehir Havalimanı	İnegöl	20	PM ₁₀
Çanakkale	Çanakkale Havalimanı	Çanakkale-Merkez	3	PM ₁₀ ve PM _{2.5}
Tekirdağ	Çorlu Havalimanı	Tekirdağ-Çorlu-OSB	7	PM ₁₀ ve PM _{2.5}
Kocaeli	Cengiz Topel Havalimanı	Kocaeli - Alikahya-MTHM	10	PM ₁₀
Balıkesir	Kocaseyit Havalimanı	Balıkesir - Edremit - MTHM	4	PM ₁₀
Çanakkale	Gökçeada Havalimanı	Çanakkale-Merkez	45	PM ₁₀ ve PM _{2.5}
Balıkesir	Merkez Havalimanı	Balıkesir - Merkez	4	PM ₁₀ ve PM _{2.5}
Bursa	Yunuseli Havalimanı	Bursa/Nilüfer	5,5	PM ₁₀

4.3 Materyal ve Metot

4.3.1 Metar ve Speci analizleri

Meteorolojik değişkenler ve hadiseler uluslararası havalimanlarında her yarım saatte bir, yurt içi havalimanlarında ise saatlik olarak kodlanmaktadır. Bu kodlar, her havalimanı için belirlenen çalışma süresi içerisinde Iowa Eyalet Üniversitesi'nden indirilmiştir (Url-3). PM verilerini analiz etmek için havalimanlarına en yakın istasyonda bulunan HKİİ'den saatlik PM ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) değerleri alınmıştır (Url-13). Her havalimanı için Metar ve Speci gözlemleri incelenerek havalimanında 2012-2021 yılları arasında kodlanan toz olayları incelenmiştir. Raporlar arasında toz fırtınaları için önemli olan Metar ve Speci kodları belirlenmiştir. Havacılık meteorolojisinde hakim rüyet, ufkun veya havaalanı dairesinin en az yarısında gözlemlenen ve elde

edilen en yüksek görüş mesafesidir. Ayrıca bu değer insan gözlemi ve aletli sistemler ile değerlendirilebilmektedir. Aletler mevcutsa, mevcut hakim rüyete ilişkin en iyi tahminin elde edilmesi için kullanılırlar (Annex (3) ICAO, 2018). Çalışma alanındaki 11 havalimanında hakim görüş mesafesi Otomatik Meteoroloji Gözlem İstasyonu (OMGİ) ile ölçülmektedir. Hava olayları, bulutluluk ve diğer olaylar DU, SA, HZ, SS, DS, DRDU, DRSA, BLDU ve BLSA (Kod tablosu 4678) havacılık amacıyla gözlemlenmektedir (WMO, 2019). Havalimanlarında son on yılda gözlemlenen Metar ve Specı kodları kullanılmış olup, seçilen bazı havalimanlarında toz olaylarının sıklığı Çizelge 4.2'de verilmektedir.

Çizelge 4.2: 2012-2021 yılları arasında toz ve kum fırtınalarının sıklığı.

Havalimanları	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Havalimanlarında gözlenen toplam toz olayları
İstanbul Atatürk Uluslararası Havalimanı	1	3	1	2	2	0	0	0	1	0	10
İstanbul Sabiha Gökçen Uluslararası Havalimanı	1	0	0	2	5	5	1	3	2	2	21
İstanbul Uluslararası Havalimanı	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	2
Bursa Yenişehir Havalimanı	9	0	1	3	5	0	1	3	1	4	27
Kocaeli Cengiz Topel Havalimanı	0	0	4	13	7	6	4	6	2	6	48
Balıkesir Koca Seyit Havalimanı	0	2	1	1	2	1	2	3	0	0	12
Bursa Yunuseli Havalimanı	3	6	1	3	5	0	1	3	0	0	22
Her yıl gözlenen toplam toz olayı	14	11	8	24	26	12	9	18	6	14	142

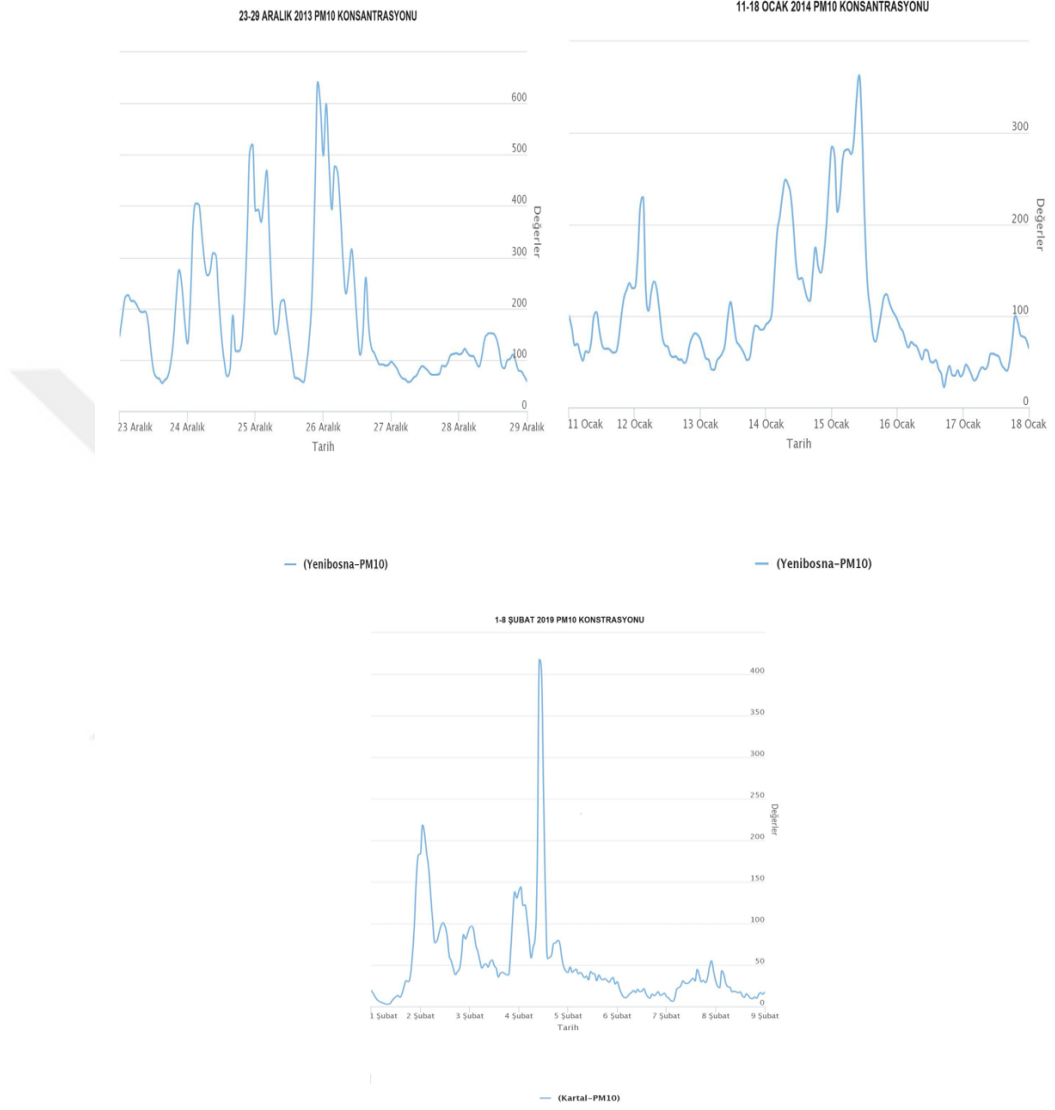
4.3.2 HYSPLIT analizi

HYSPLIT modeli atmosfer bilimlerinde sıklıkla kullanılan bir uygulamadır ve hava parselinin yörüngesini gösterebilmektedir. Ayrıca yörünge analizi ile birlikte hava kütlelerinin kaynakları arasında bilgi sağlamaktadır. HYSPLIT ayrıca kirleticilerin atmosferik taşınması ve yayılması için çeşitli simülasyonlarda da kullanılmıştır. (Url-12).

4.4 Tartışma ve Sonuçlar

Epizod günlerinde meydana gelen saatlik PM konsantrasyonu artışları incelenmiştir. PM değerleri, olaydan 3 gün önce ve sonra her HKİİ'de incelenmiştir. 2012-2021 yılları arasındaki toz sıklığı incelendiğinde (Çizelge 4.2), havalimanlarında toz taşınımı olayları ağırlıklı olarak 2015 yılında gözlenmiştir. Bu dönemdeki ortalama ve toplam toz sıklığı sırasıyla 16 ve 163'tür. Ayrıca 2012-2021 döneminde 11 havalimanı istasyonunda DRSA ve DRDU olayları kodlanmadı. Türkiye'de çöl ve/veya kurak alan bulunmadığından bu olaylar görülmemiştir. Çöl ve/veya kurak bölgelerde DRSA ve DRDU olayları görülebilmektedir. Her yıl için toz taşınımından en çok etkilenen havalimanı belirlenerek, toz taşınımı için havalimanına en yakın HKİİ'den elde edilen veriler incelenmiştir. İstanbul Yenibosna, 2012, 2013 ve 2014 yıllarında 10 yılda üç kez en yüksek PM₁₀ değerine sahiptir. Bursa Merkez HKİİ, 2015 ve 2016 yıllarında iki kez en yüksek değerin ölçüldüğü istasyon olmuştur. Ayrıca diğer yıllar arasında ölçülen en yüksek değere 2015 yılı sahiptir. 2017 ve 2018 yıllarında Kocaeli Alikahya istasyonu toz taşınımından etkilenmiştir. 2021 yılında Balıkesir Merkez istasyonu en yüksek değere sahip olup, ölçülen PM₁₀ değerleri tüm istasyonların yıllık ve mevsimlik ortalamalarının oldukça üzerindedir. Şekil 4.2'de bazı hava kalitesi istasyonları gösterilmiştir. Görüldüğü üzere PM₁₀ konsantrasyonu toz fırtınasının gerçekleştiği zamanlar pik değerlere ulaşarak epizod değerler meydana getirmiştir. Çizelge 4.3'de göre Bursa Yenişehir havalimanında rüzgar hızı BLSA ile 44 kn'ye kadar ulaştığı görülmüştür. Havalimanında rüzgarın etkisiyle toz taneciklerinin çöktüğü görülmüştür. Bu nedenle, PM'nin uzun mesafeli toz taşınmasından kaynaklandığı, bu da toz olayları sırasında havalimanlarında kodlanan gözlemleri doğrulamaktadır. Aynı şekilde İstanbul Sabiha Gökçen Uluslararası havalimanında DU ve Balıkesir Merkez havalimanında HZ hadisesi kodlanmıştır. Balıkesir Merkez

havalimanında görüş mesafesi 4100 m'ye kadar düştüğü İstanbul Sabiha Gökçen Uluslararası havalimanında ise görüş mesafesinin 4000 m'ye kadar düştüğü görülmüştür.



Şekil 4.2 Toz gerçekleştiği zaman PM₁₀ konsantrasyon değerleri (Url-2)

Çizelge 4.3: İstanbul Sabiha Gökçen Uluslararası Havalimanı, Balıkesir Merkez Havalimanı ve Bursa Yenişehir Havalimanındaki toz olayları ve rüzgar ölçümleri.

Havalimanı Bilgileri	Tarih ve Zaman (UTC)	Rüzgar Yönü (Derece)	Ortalama Rüzgar hızı ve Hamlesi (Knots)	Hali Hazır Hava
Bursa Yenişehir Havalimanı (LTBR) 233 m AMSL	1.02.2015 12:20	180	20G30KT	BLSA
	1.02.2015 12:20	190	17G33KT	BLSA
	1.02.2015 12:20	200	17G27KT	BLSA
	1.02.2015 12:20	200	18G30KT	BLSA
	1.02.2015 12:20	190	18G32KT	BLSA
	1.02.2015 12:20	190	27G44KT	BLSA
İstanbul Sabiha Gökçen Uluslararası Havalimanı (LTFJ) 95 m AMSL	24.03.2016 07:50	250	16KT	DU
	24.03.2016 08:20	240	13KT	DU
	24.03.2016 08:50	240	16KT	DU
Balıkesir Merkez Havalimanı (LTBF) 103 m AMSL	21.01.2021 08:50	0	0	HZ

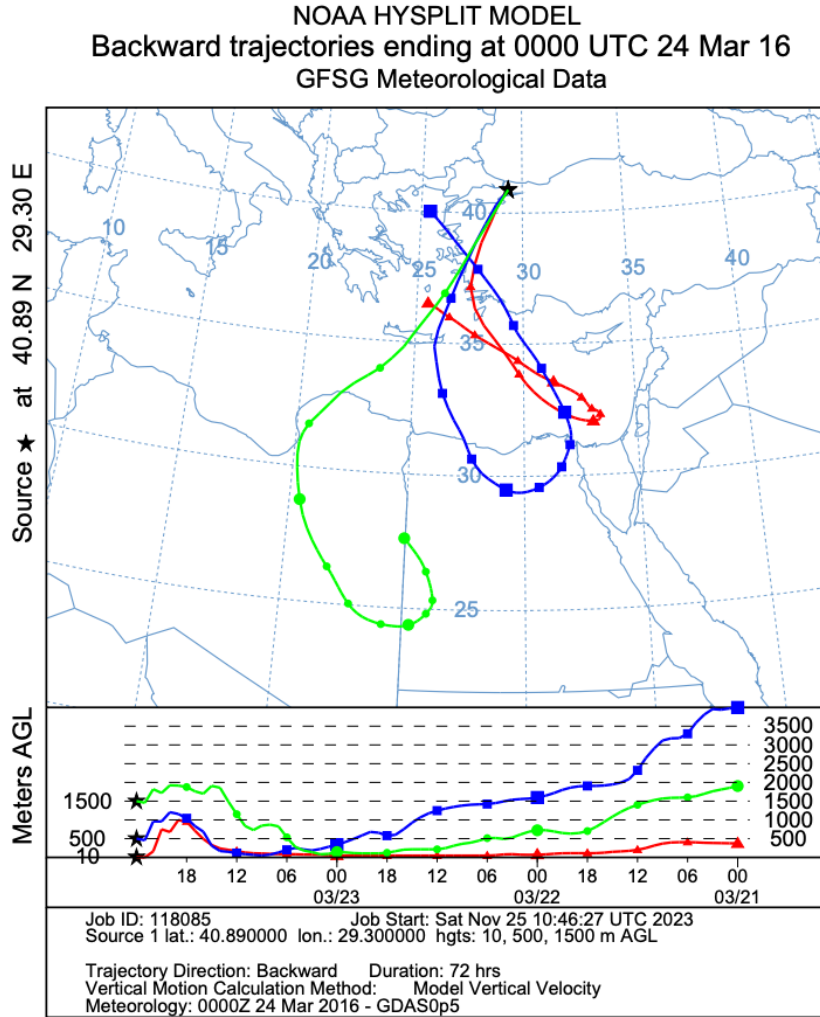
En yüksek konsantrasyona ulaşan iki HKİİ için HYSPLIT ile geriye doğru yörünge analizi yapılmıştır. İstanbul Sabiha Gökçen Uluslararası Havalimanı için yapılan 72 saatlik geriye doğru yörünge analizi (Şekil 4.3), 1500 m'deki hava parselinin Sahra Çölü üzerinden Kuzey Afrika'dan geldiğini göstermiştir. Aynı şekilde 10 m'deki hava parseli de Akdeniz bölgesinden geldiği görülmüştür. Ayrıca 1 şubat 2015 00:00 UTC'de Bursa Yenişehir Havalimanı için yapılan geri yörünge analizinde de taşınımın Sahra üzerinden geldiği görülmektedir (Şekil 4.4). Cezayir'de potansiyel Sahra tozu

taşınımı olayları, yerdeki toz konsantrasyonları hakkında bilgi sağlayan BSC-DREAM8b model çıktı haritaları kullanılarak tespit edilmiştir (Lokorai ve diğ, 2021). Bu bölümde, 2012-2021 yılları arasında Türkiye'nin Marmara bölgesindeki havalimanlarında meydana gelen toz olayları incelenerek, tozun uzun mesafeli taşınmasının kökeni araştırılmıştır. 2012-2021 yılları arasında toplam 163 adet toz hadisesi meydana gelmiştir. Bunları %17'si Kuzey Afrika'dan %12'si Akdeniz bölgesinden geldiği görülmüştür. Toplam 163 adet toz olayı için ayrı ayrı HYSPLIT geri yörünge analizleri çalıştırılmış ve toz kaynak bölgeleri Doğu Avrupa ve Ukrayna bölgesinin de olduğu tespit edilmiştir. Uzun mesafeli toz taşınımı çalışmalarında özellikle MODIS ve/veya DUST RGB görüntülerinden toz taşınımının gerçekleştiği görülse de toz olaylarından kaynaklanan görüş mesafesi azalmasının tüm havalimanlarında görülmediği anlaşılmıştır. Çünkü havalimanı gözlemlerini analiz ettiğimizde bu toz konsantrasyonunun yere ulaşmadığını ve/veya havalimanında yapılan Metar rasatında hakim rüyetin ve/veya havalimanında yapılan Speci gözlemlerinin 5000 m'ye eşit ve/veya altında bir değere ulaşmadığı için havalimanlarında toz hadisesi kodlanmamaktadır. Ayrıca, bazı toz olay günlerinde bir havalimanında kodlanan toz olayı diğer havalimanında kodlanmamıştır. Bunun nedeni lokal konverjans alanlarının varlığı o bölgeye tozun çökmesini sağlamış olabilir.

Ayrıca, 700 hPa seviyesindeki rüzgar haritaları da toz taşınımını belirleme de kullanılmaktadır. Toz taşınımı, doğuya doğru hareket eden siklonların önündeki rüzgarlar tarafından oluşturulmuştur ve en güçlü meridyen rüzgar akışları, doğrudan güneyden güneye doğru olan yönü gösteren İyon denizi'nin batı kısmında ve Türkiye'de yer almıştır. Yere yakın seviyedeki güneydoğulu rüzgarlar ve 700 hPa'daki güney rüzgarları, uzun menzilli toz taşınımının Türkiye'nin batısına doğru olduğunu göstermiştir. Havalimanlarına en yakın HKİİ'lerde PM ölçümleri (PM₁₀ ve PM_{2.5}) epizot günleri için elde edilip analiz edilmiştir.

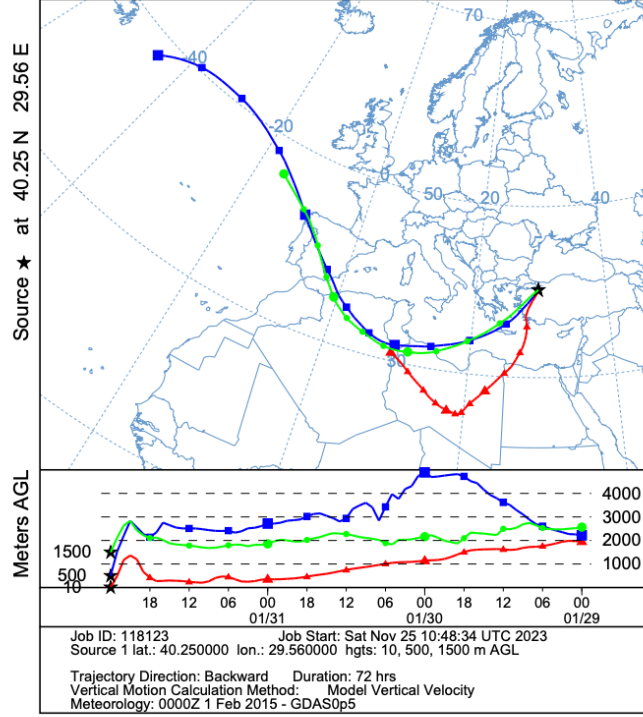
HYSPLIT geri yörünge analizi olay günlerinde uzun mesafeli toz taşınımını göstermiştir. Sonuç olarak, havalimanlarında gözlemlenen toz olayları ile havalimanına en yakın HKİİ'lerden alınan PM₁₀ ve PM_{2.5} değerleri incelenmiştir, toz konsantrasyonlarının 1 saat içindeki pik değerleri uzun mesafeli toz taşınımının gerçekleştiğini göstermiştir. Uzun mesafeli toz taşınımını belirlemek için, olay meydana geldiğinde rüzgar hamlesi çok yüksek bir seviyeye ulaşmaktadır. Dolayısıyla

yukarı seviyedeki toz tanecikleri yüksek basıncın etkisiyle hamleli rüzgarla birlikte yer seviyesine çökecektir.



Şekil 4.3: 24.03.2016 İstanbul Sabiha Gökçen Uluslararası Havalimanı için geriye doğru yörünge analizi

NOAA HYSPLIT MODEL
Backward trajectories ending at 0000 UTC 01 Feb 15
GFSG Meteorological Data



Şekil 4.4: 01.02.2015 Bursa Yenişehir Havalimanı için geriye doğru yörünge analizi



5. ATMOSFERİN DİNAMİK YAPISININ HAVA KİRLİLİĞİNE OLAN ETKİLERİ⁵

5.1 Giriş

Bu çalışmada 30 Aralık 2022 tarihi itibarıyla Türkiye'nin batısından içeriye doğru giren blokaj olayı 5 Ocak 2023 tarihine kadar devam etmiştir. Bu tarihler arasında İstanbul'da HKİİ'lerden PM₁₀, PM_{2.5} ve O₃ değerleri alınmıştır. Bu bölümde hava kirliliğinin kökenini araştırmak amacıyla beş farklı yaklaşım uygulanmıştır. Bu tarih aralığının seçilmesinin nedeni, 500 hPa jeopotansiyel yükseklik haritasında 30 Aralık 2022 ile 5 Ocak 2023 arasındaki omega blokajının etkisini göstermesidir. Özellikle 500 hPa'da omega blokajının etkisi ile oluşan sırt yapısı ve havanın stabil kalmasına neden olduğu için sadece bu 7 gün boyunca inceleme yapılmıştır. Ayrıca omega blokajının etkisi sinoptik ve meteorolojik değişkenler analiz edilerek belirlenmiştir. İstanbul üzerindeki toplam ozonun yüksekliği, sınır tabakasının yüksekliği ve yüzey basıncı değerleri The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) (Url-14) tarafından ERA5 0,5 derece verileri kullanılarak alınmış ve görselleştirilmiştir. Ayrıca İstanbul Teknik Üniversitesi Meteoroloji Mühendisliği Bölümü'nde bulunan Ceilometer cihazı ile bulut taban yüksekliği ölçümleri yapılmıştır. Sonuç olarak, atmosferik engellemenin kirleticiler üzerindeki etkisi istasyonlardan alınan veriler, model verileri ve Ceilometer verileri kullanılarak analiz edilmiştir. Bunların yanı sıra çalışma çektiğimiz fotoğraflar ile kirliliğin etkileri görülmüştür. Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak gözlem verileri, model verileri, istatistiksel veriler ve atmosferik engelleme anında çekilen fotoğraflarla kapsamlı bir

⁵ Bu bölüm ile ilgili yapılan çalışma aşağıdaki SCI dergide hakem değerlendirme aşamasındadır. İlk gönderim tarihi 15 Şubat 2023.

Birinci, E., Özdemir, E.T & Deniz, A. Effects Of Atmospheric Blocking On Air Quality Through Ceilometer and Observations in the Megacity İstanbul. International Journal of Environmental Science and Technology

Çalışma yürütülmüştür. Her ne kadar atmosferik engellemenin hava kirliliği üzerindeki etkileri bilinmese de bu çalışmada, blokajın kirliliği arttırması nedeniyle insan sağlığını tehdit ettiğini göstermiştir.

5.2 Çalışma Alanı ve Veri

İstanbul, nüfus açısından Türkiye'nin en kalabalık şehridir. Ayrıca İstanbul Boğazı şehri Avrupa ve Asya yakası olmak üzere iki bölgeye ayırmaktadır. Kentin kuzeyinde Karadeniz, güneyinde ise küçük bir kapalı deniz yani Marmara Denizi bulunmaktadır. Dolayısıyla bu iki deniz iklimi önemli ölçüde etkilemektedir. İstanbul'da üç havalimanı bulunmaktadır ve İstanbul Boğazı dikkate alındığında hem hava hem de deniz taşımacılığında ki ulaşım faaliyetleri nedeniyle kirletici konsantrasyonları artmaktadır. İstanbul'da bulunan ve İstanbul Büyükşehir Belediyesi'ne bağlı HKİİ'ler bulunmaktadır. Veri kullanılabilirliğine bağlı olarak 17 HKİİ istasyonu seçilmiştir. Ayrıca, Ceilometer cihazı, İstanbul Teknik Üniversitesi (İT) Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi'nde 41.1K 29.01D koordinatlarında bulunmaktadır. şekil 5.1'de İstanbul'un konumu, incelenen HKİİ istasyonları ve Ceilometer cihazının konumu gösterilmektedir.



şekil 5.1: Ceilometer ve HKİİ'lerin İstanbul'daki konumu

Eş zamanlı olarak, HKİİ'lerden PM_{10} , $PM_{2.5}$ ve O_3 'n saatlik ortalama konsantrasyonları alınmıştır. Her üç değişkende de veri birimi $\mu g/m^3$ 'tür. Çalışmamızda veri kullanılabilirlik yüzdesine göre %80'in altında kalan veriler dahil edilmemiştir. Engellemeden 3 gün önce ve sonra hava kirliliği konsantrasyonlarındaki

değişim incelenmiştir. Yani veriler 27 Aralık 2022 ile 08 Ocak 2023 arasındaki tarihleri içermektedir. Bu veriler sırasıyla sıcaklık, rüzgar şiddeti, basınç ve bağıl nem değerleridir. Meteorolojik değişkenlerin blokajın etkisiyle değişimini incelemek için 27 Aralık 2022 ile 7 Ocak 2023 tarihleri arasındaki veriler analiz edilmiştir (Url-7).

5.3 Materyal ve Metot

5.3.1 Yukarı seviye ve yer kartı haritaları

Engelleme olayını belirleyebilmek için yukarı seviye hava haritaları kullanılmıştır. Omega blokajı, Omega şeklinde (Ω) bir akış modeliyle sonuçlanan bir aşağı akış siklonu tarafından belirtilir. Aynı zamanda devasa bir antisiklon ile de karakterize edilmiştir (Ser-Giacomi ve diğ, 2015). Efe ve Lupo (2022), hem kuzey hem de güney yarım küre için atmosferik engelleme eğilimlerini araştırmışlardır. Engellemeyi belirlemenin bir yolu 500 hPa'lık jeopotansiyel yükseklik haritalarına bakmaktır (Scherrer ve diğ, 2006). Ayrıca, 500 hPa haritasına bakıldığında orta ve yüksek enlemlerde kuvvetli bir sırt, yüksek enlemlerde ise jeopotansiyel yüksekliği 500 hPa olan bir sırt olarak görülmektedir (Barriopedro ve diğ, 2006). Bu nedenle bu bölüm, metodolojinin ve her aşamada elde edilen sonuçların tam tanımlarını sunacak şekilde yapılandırılmıştır. Bu bölümde 500 hPa seviyesindeki haritalar kullanılmış olup, haritalar 29 Aralık 2022 ile 05 Ocak 2023 tarihleri arasında alınmıştır.

5.3.2 Atmosferik Sondaj ve ERA5 Verileri

Atmosferik engelleme sonrasında hava kirliliği arasındaki ilişkiyi sürekli bir ölçekte değerlendirmek için enverziyon seviyeleri kullanılmıştır. Wyoming Üniversitesi'nden atmosferik sondajlardan elde edilen veriler, atmosferik engelleme mevcut olduğunda enverziyon seviyelerini kontrol etmek için kullanılmıştır (Url-15). Veriler Meteoroloji İstanbul 1. Bölge Müdürlüğü'ne bağlı 17064 istasyon numaralı Kartal İstasyonu'ndan elde edilmiştir. Enverziyon seviyelerinin kaç metre olduğuna bakılarak kirleticiler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Atmosferik sondaj günde iki kez yapılmaktadır. Bu nedenle ölçümler 00:00 UTC ve 12:00 UTC olmak üzere iki kez yapılmıştır. Böylece, 30 Aralık 2022 ile 4 Ocak 2023 tarihleri arasında 12 adet veri alınmıştır.

ECMWF üzerinden saatlik ERA5 verileri alınarak kullanılmıştır. Bu veriler sırasıyla yüzey basıncı (hPa), toplam ozon yüksekliği ve sınır tabakasının yüksekliğidir.

Reanaliz verileri için verilerin çözünürlüğü 0,25 derecedir. Bu 3 değişken için veriler 40 ile 42 Kuzey enlemi ve 27 ile 29,7 Doğu boylam arasını kapsayacak şekilde .nc formatında indirilmiştir (Url-14). İndirilen verilerdeki yüzey basıncı birimi Pascal'dır. Ancak sinoptik haritalarda genellikle hPa kullanıldığından tüm veriler 100'e bölünerek hPa biriminde analiz edilmiştir. Toplam ozon miktarı, dünya yüzeyinden atmosferin tepesine kadar uzanan bir hava sütunudur ve birimi kg/m^2 'dir. Bu bölümde total ozon kullanılmasının nedeni, kirlilik nedeniyle yüzeye yakın ozon miktarının fazla olmasıdır. Ayrıca sınır tabakası yüksekliği m cinsinden alınarak enverziyon seviyeleriyle karşılaştırılmıştır.

5.3.3 Ceilometer

Bulut taban yükseklikleri Ceilometer cihazı ile uzaktan algılama yöntemiyle ölçülmüştür. Eş zamanlı olarak atmosferik engelleme döneminde bulut taban seviyesi ölçümleri yapılmıştır. BIRAL firmasının CBME80B cloud Ceilometer cihazı lazer teknolojisi ve An Acronym For Light Detection And Ranging (LIDAR) teknolojisi kullanılarak çalışmaktadır. Ceilometer cihazı dikey yönde güçlü bir lazer sinyali gönderip ve ardından ışınlar bulut, yağış gibi herhangi bir engele çarpıp ve sinyal cihaza geri dönerek geçen süreyi hesaplamaktadır. Böylece, bulut tabanı yüksekliği, sinyalin gidiş-dönüş süresine bağlı olarak cihaz tarafından ölçülür. Cihazın temel özelliği 0 ve 7500 m'ye kadar üç bulut seviyesini aynı anda ölçebilmesidir. Çözünürlüğü 10 m'dir. Ceilometer cihazı çok geniş bir sıcaklık aralığında (-40 ve 55 °C) çalışabilmektedir. Verileri elde ederken ölçüm doğruluğu açısından oldukça yüksek bir doğruluğa ($\pm\%1$) sahiptir. Ancak bu doğruluk, özellikle zor durumlarda, hava şartlarına bağlı olarak %10'a kadar çıkabiliyor. Güneş ışınlarına karşı koruyucu sisteme sahiptir. Cihazdan veri alınmadan önce cihazdan ışın gönderilen kısımları kullanım kılavuzuna göre uzaktan bir bezle silinmiştir. Cihazın doğruluğunu belirlemek için Lawrence (2005) Eşitlik (5.1)'de belirtilen yoğunlaşma seviyesi denklemine göre sonuçlar karşılaştırılmış ve sonuçlar doğrulandıktan sonra elde edilen veriler kullanılmıştır.

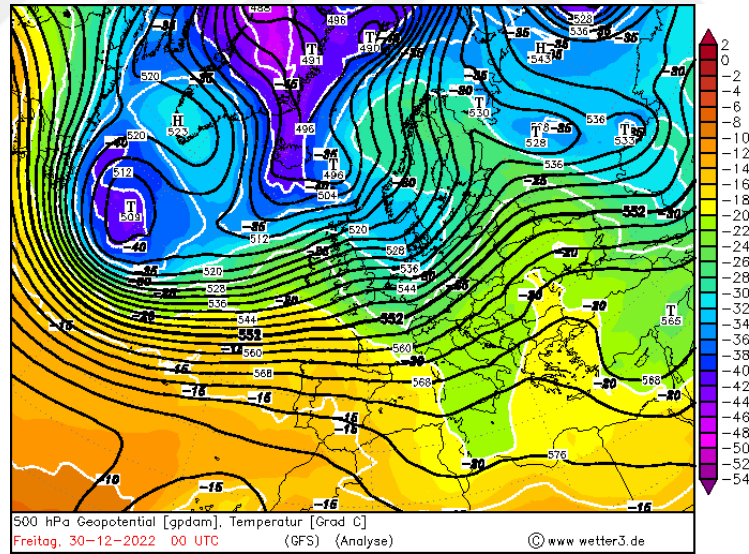
$$Z_{LCL} = z + (125 \text{ mK}^{-1})(T - T_d) \quad (5.1)$$

burada z, T ve T_d sırasıyla başlangıç yüksekliği, sıcaklığı ve çiy noktası sıcaklığıdır. Ölçüm sonuçları ve denklem sonuçlarıyla ölçümlerin doğru yapıldığı belirlenmiştir.

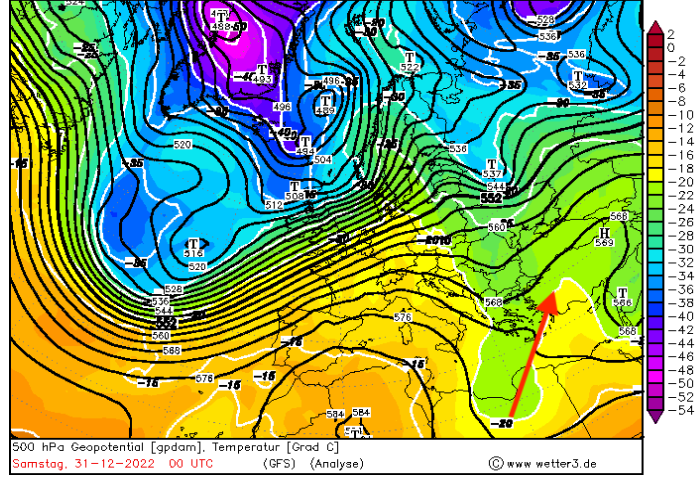
Böylece veriler saklanmaya başlanmıştır. Cihazın veri depolaması her 30 saniyede bir olmaktadır.

5.4 Tartışma ve Sonuçlar

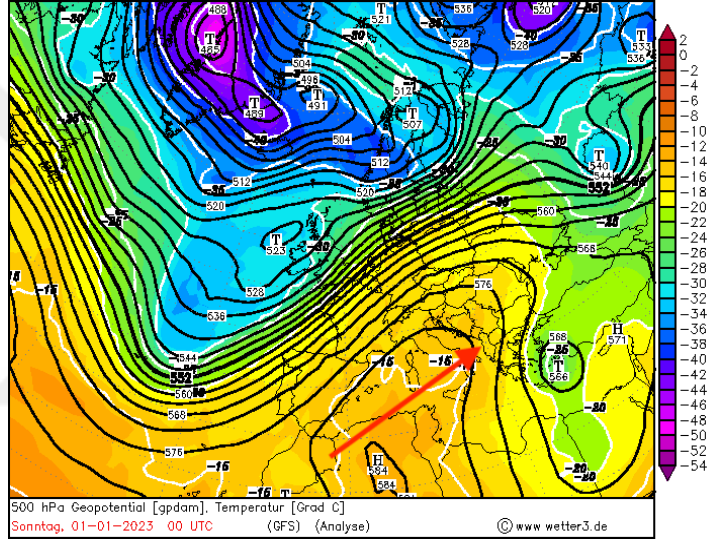
Omega blokajının etkisini görmek için 500 hPa seviyesindeki jeopotansiyel yükseklik haritaları incelenmiştir. Haritalar incelendiğinde söz konusu Ω engellemenin tarih aralığı 30 Aralık 2022 ile 5 Ocak 2023 arasındadır. Şekil 5.2 ve Şekil 5.4 arasında, 30 Aralık 2022 ile 2 Ocak 2023 arasındaki jeopotansiyel haritaları göstermektedir (Url-7). Grafiğe bakıldığında Türkiye üzerindeki sırtın etkisi 30 Aralık 2022'de görülmüştür ve jeopotansiyel yükseklik 540 ile 552 gpdam arasında değişmektedir. Ω harfinin kırmızı okla gösterildiği şekilde görülmüştür. Şekil 5.4'de Omega engelleme etkisinin İstanbul üzerinde olduğu görülmektedir. Engelleme etkisi 4 Ocak'a kadar devam etmiş (Şekil 5.6 ve 5.7) ve daha sonra 5 Ocak 2023'te etkisini kaybetmiştir (Şekil 5.7). Türkiye'de engellemenin hava kirliliğine etkisi daha önce incelenmemiş ancak dünyanın diğer bölgelerinde bu çalışmalara yer verilmiştir.



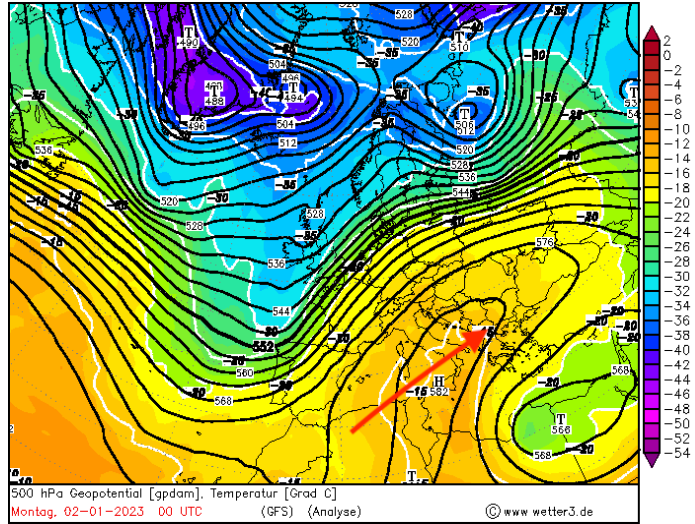
Şekil 5.2: 30.12.2022 500 hPa jeopotansiyel yüksekliği



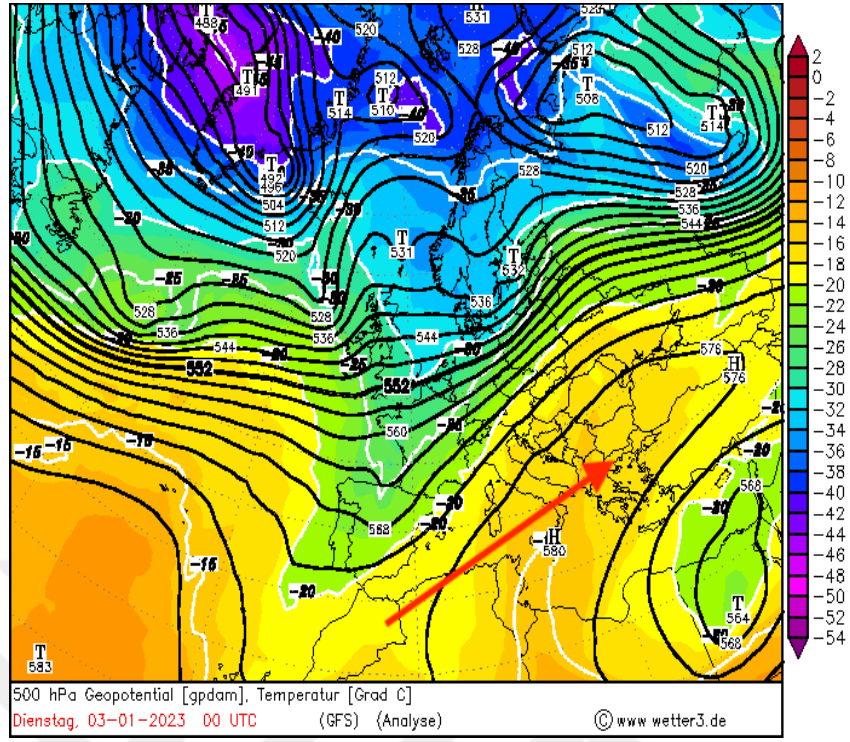
Şekil 5.3: 31.12.2022 500 hPa jeopotansiyel yüksekliği



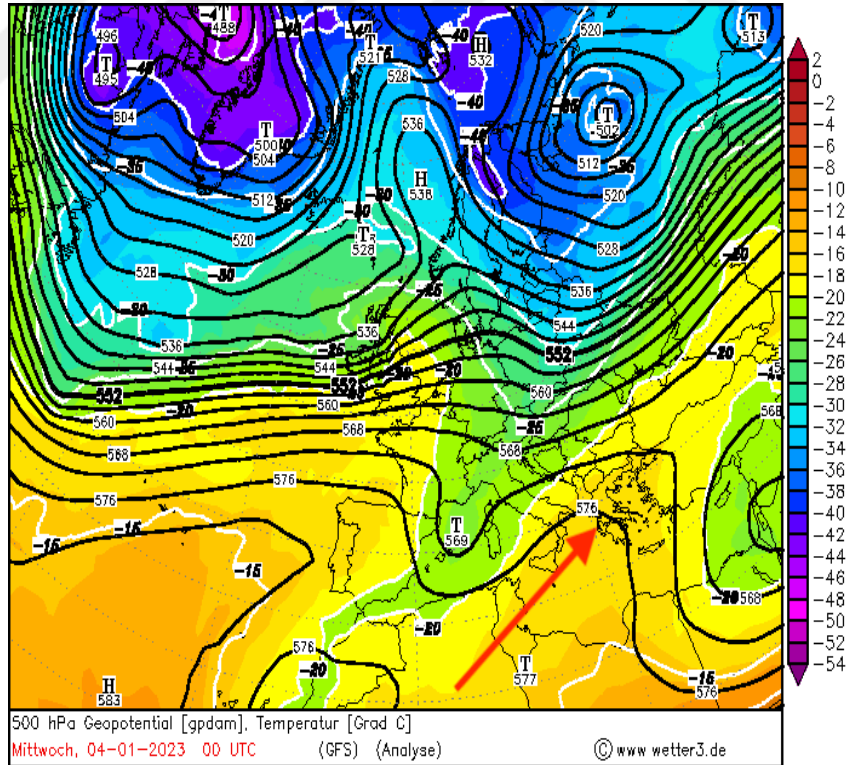
Şekil 5.4: 01.01.2023 500 hPa jeopotansiyel yüksekliği



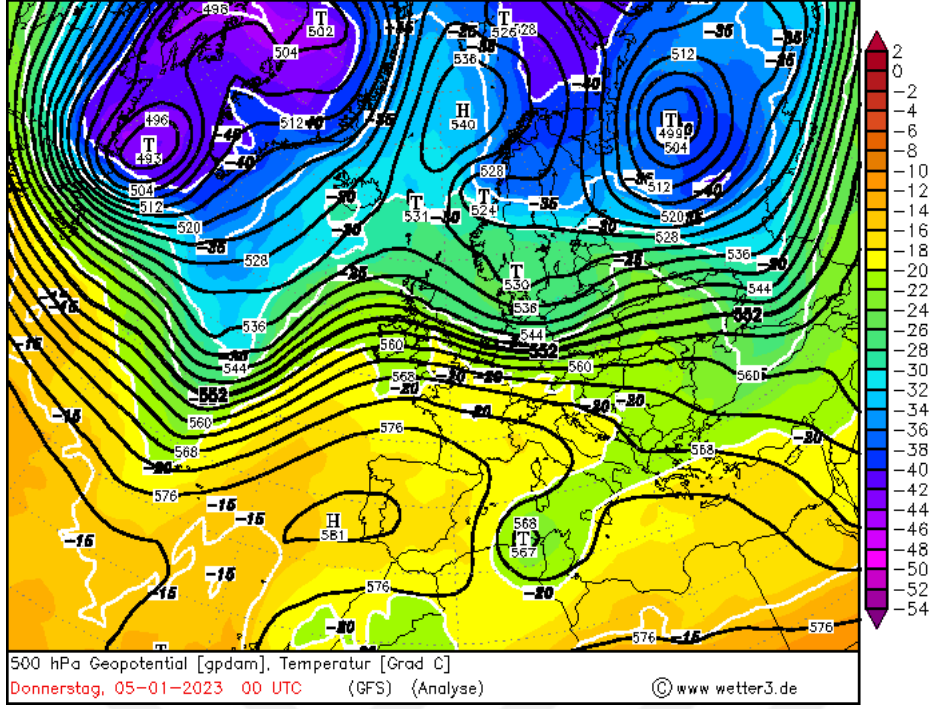
Şekil 5.5: 02.01.2023 500 hPa jeopotansiyel yüksekliği



Şekil 5.6: 03.01.2023 500 hPa jeopotansiyel yüksekliği



Şekil 5.7: 04.01.2023 500 hPa jeopotansiyel yüksekliği

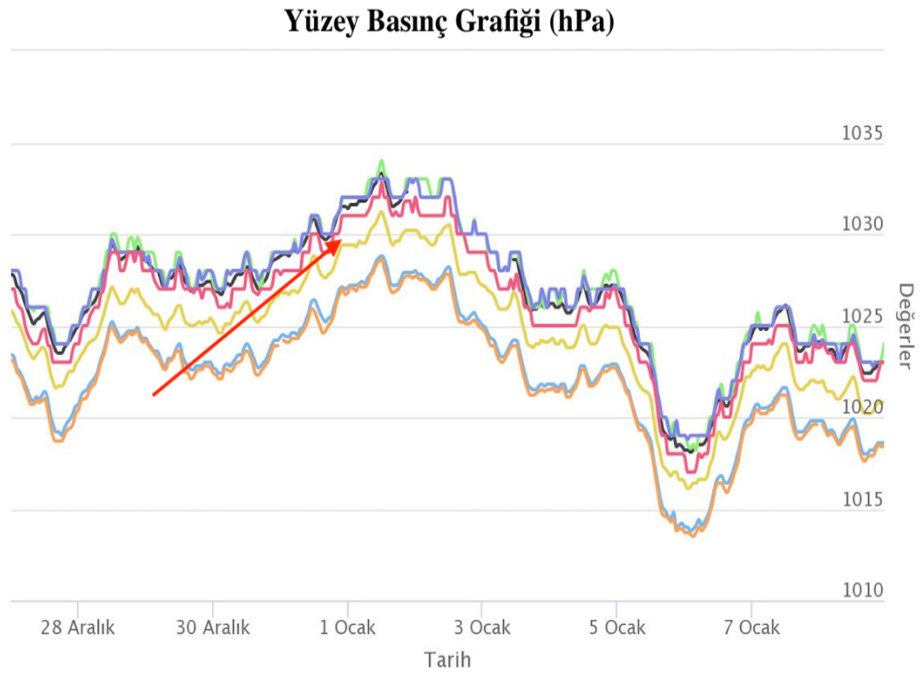


Şekil 5.8: 05.01.2023 500 hPa jeopotansiyel yüksekliği

Engellemenin etkisi azalınca kirleticilerin emisyon değerlerinin düştüğü belirlenmiştir. Çalışma sırasında 1 Ocak 2023 tarihinde saat 17:57'de İstanbul Boğazında çekilmiştir. Şekil 5.9'da İstanbul Boğazı puslu görünmektedir. Burada da görüldüğü gibi kirleticilerin yüzeye yakın bir yerde asılı kaldığı bulut benzeri bir örtü oluşturduğu gözlenmiştir. Sonuç olarak çektiğimiz fotoğraflar ile HKİİ istasyonlarından alınan veriler karşılaştırıldığında İstanbul'da Omega blokajının etkisinin konsantrasyon değerlerini oldukça artırdığı belirlenmiştir. 28 Aralık 2022 tarihinde 1020 hPa civarında olan basınç değeri, omega blokajın etkisini göstermeye başlamasıyla birlikte artmaya başlamıştır. Bağcılar, Çatladıkapı, Esenler, Esenyurt, Kartal, Maslak ve Tuzla'da bazı meteorolojik değişkenlerin değişimine bakılmıştır. Neredeyse tüm istasyonlarda basınç 1030 hPa seviyesine ulaşmıştır. Bu nedenle atmosferin stabilitesi nedeniyle PM yer seviyesine yakın bir yerde asılı olarak kalmıştır (Şekil 5.10). Ayrıca, 1 Ocak günü rüzgar şiddetleri neredeyse 1 m/sn'ye kadar düştüğü gözlenmiştir (Şekil 5.11). Sinoptik ölçekli hava sistemlerinin yapısı incelendiğinde, Türkiye'nin batısında, Doğu Yunanistan'da 1034 hPa'lık bir basınç merkezi olduğu görülmüştür. Daha sonra 01 Ocak 2023 06:00 UTC haritasında sistem tamamen Türkiye üzerinden geçerek 1040 hPa basınç merkezi oluşturmuştur (Şekil 5.12 ve 5.13).

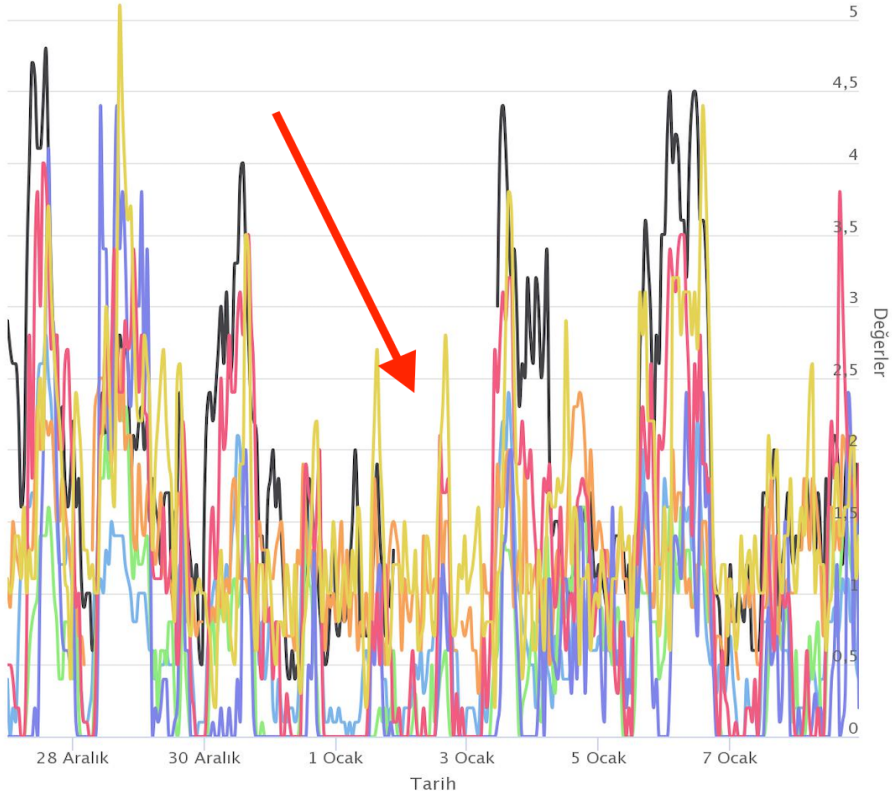


Şekil 5.9: 1 Ocak 2023 17:57 İstanbul Boğazı

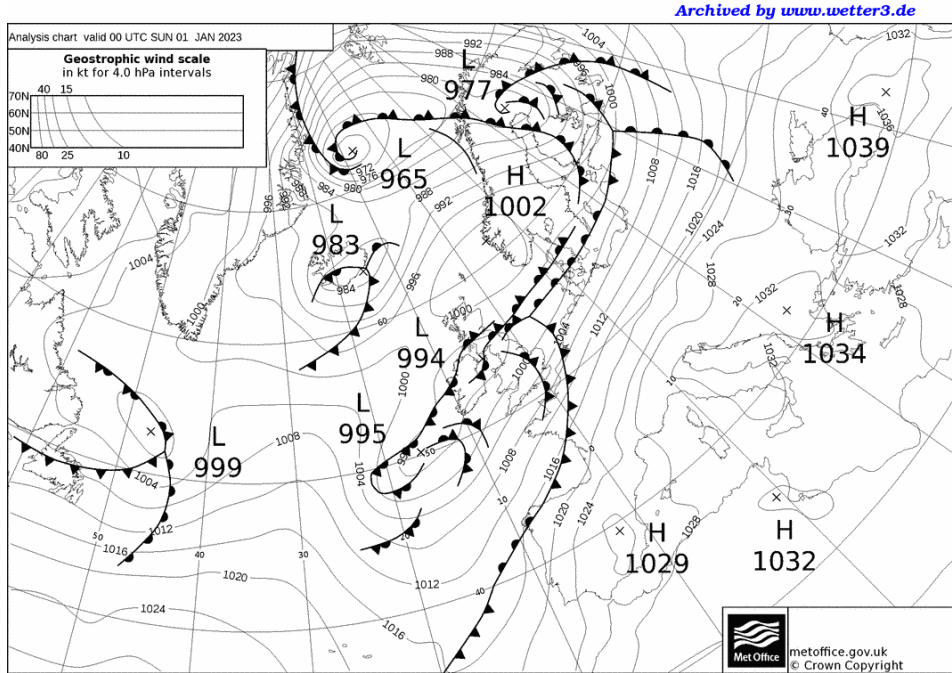


Şekil 5.10: 27 Aralık 2022 ile 07 Ocak 2023 arasındaki saatlik basınç değişimi (Url-2)

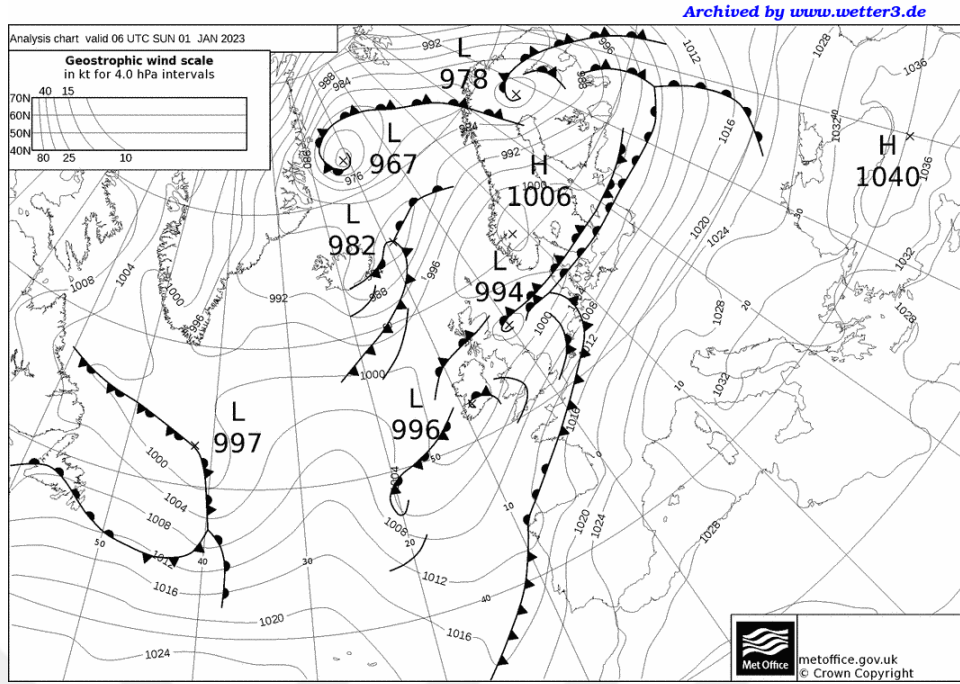
Rüzgar Hızı Grafiği (m/sn)



Şekil 5.11: 27 Aralık 2022 ile 07 Ocak 2023 arasındaki saatlik rüzgar şiddeti değişimi (Url-2)



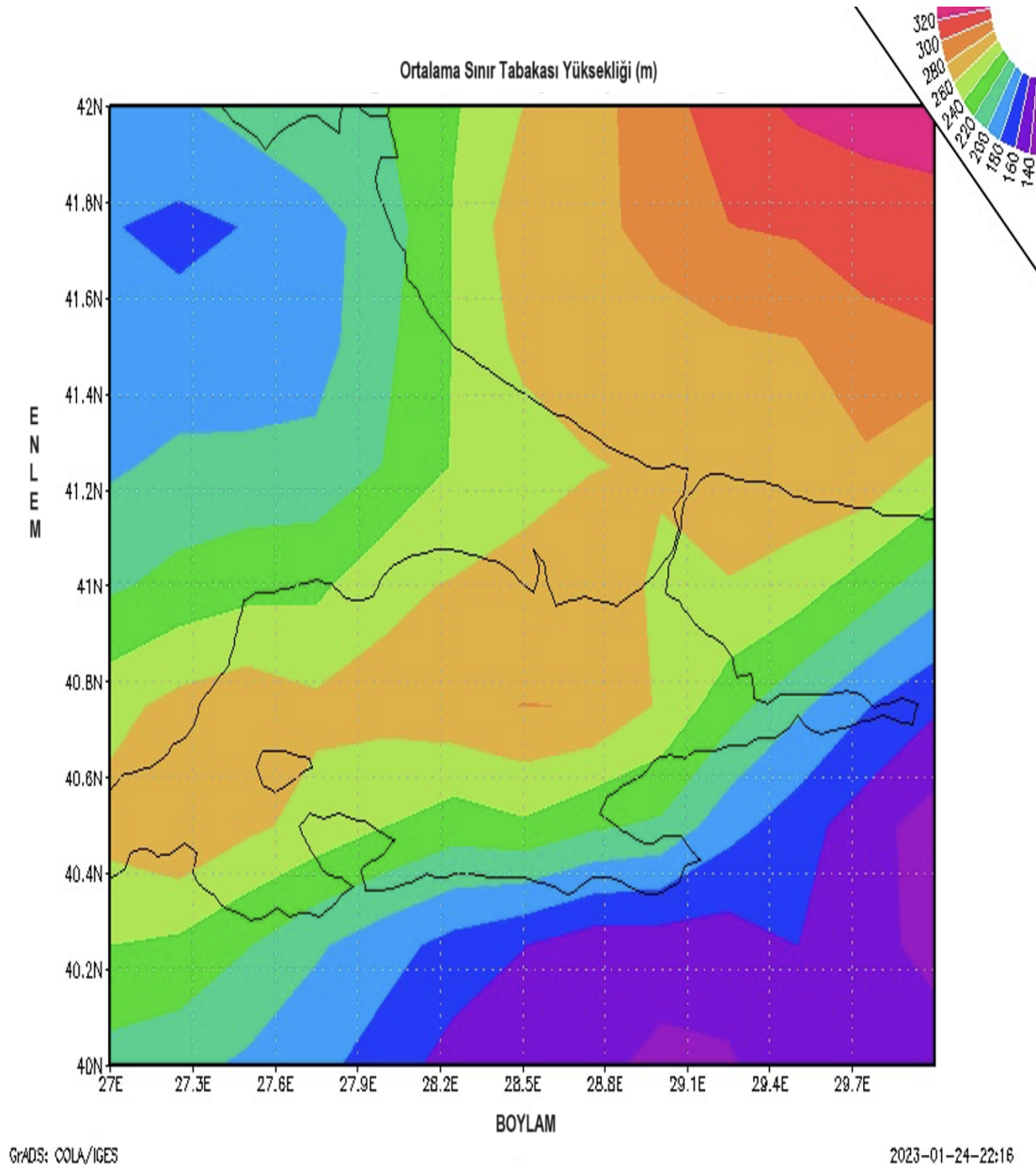
Şekil 5.12: 01 Ocak 00:00 UTC için yüzey basıncı grafiği



Şekil 5.13: 1 Ocak 06:00 UTC için yüzey basıncı grafikleri

Ceilometer cihazından alınan bulut taban yüksekliği verileri 29 Aralık 2022 ile 05 Ocak 2023 tarihleri arasında alınmıştır. Veriler 30 saniyede bir veri olacak şekilde depolanmıştır. Hava kirliliğine ilişkin en düşük seviyede yani birinci seviyede ölçülen bulut taban yüksekliği verileri incelenmiştir. Veriler, cihazın üreticisi tarafından sağlanan bulut sunum yazılımından alınmıştır. 29 Aralık 2022 tarihinde Ceilometer cihazından sadece saat 21.00 ile 00.00 saatleri arasında taban yükseklikleri belirlenmiş ve en düşük değerin 300 m olduğu tespit edilmiştir. 30 Aralık günü saat 17.55 sıralarında 1750 m olan bulut taban yüksekliğinin gece saatlerine doğru 328 m olduğu tespit edilmiştir. 31 Aralık 2022 ile 01 Ocak 2023 tarihleri arasında cihazdan herhangi bir veri kaydedilmemiştir. Çünkü bu günlerde atmosferik engelleme nedeniyle İstanbul'da oluşan sırt, yüzey basıncının da oldukça yüksek olması nedeniyle bulut oluşumu gözlenmemiştir. Her durumda, Ceilometer'ın diğer cihazlara veya yöntemlere göre başlıca analitik avantajı, Ceilometer'ın uzaktan algılama ve (An Acronym For Light Detection And Ranging) LIDAR özelliğinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca yapılan bir çalışmada yüksek basıncın etkisinden dolayı 7 gün boyunca bulut taban yükseklik verileri elde edilememiştir (Yavuz ve ark., 2022). İstanbul'un güneybatısında yüzey basıncının 1020 hPa seviyesinde olduğu gözlenmiştir. Yüksek basınç nedeniyle yükselmeyen hava, yere çökerek kirlletici konsantrasyonlarını artırmıştır. İkinci olarak sınır tabakasının İstanbul üzerindeki yüksekliği incelenmiştir.

Yüzey basınç haritasına ve sınır tabakası yükseklik haritasına bakıldığında renk skalası değişimlerinin birbirine benzer olduğu görülmektedir. Sınır tabakasının İstanbul üzerindeki yüksekliğinin 220 ile 280 m arasında değiştiği görülmüştür (Şekil 5.14). Yerel hava kirliliği aynı zamanda atmosferik sınır tabakası süreçlerinden de etkilenir (Zoran ve diğ, 2020). Dolayısıyla konverjans alanları olmadığından kirleticilerin yeterince yükselememesi nedeniyle bölgedeki hava kirliliği konsantrasyon değerlerinin arttığı gözlenmiştir. Atmosferik sınır tabaka ile PM_{10} ve $PM_{2.5}$ arasında negatif bir korelasyon olduğu bulunmuştur. Sonuç olarak, Planetary Boundary Layer (PBL) düşük konsantrasyon seviyelerini göstermektedir (Yun ve Yoo, 2019).



Şekil 5.14: Ortalama sınır tabakası yüksekliği

Blokaj olayında yüksek basıncın etkisiyle düşük seviyelerde oluşabilecek enverziyon seviyeleri incelenmiştir. Çizelge 5.1, 30 Aralık 2022 ile 04 Ocak 2023 (Url-15) arasında UTC'ye göre her 12 saatte bir meydana gelen enverziyon seviyelerini göstermektedir. Enverziyon bölgeleri havanın kararlı olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla hava yükselmek yerine çökme hareketi nedeniyle kirlilik yaratacaktır. 03 Ocak 00:00 UTC hariç engelleme azaldığı 03 Ocak 2023 tarihinden bu yana enverziyon seviyelerinin kademeli olarak düştüğü gözlenmiştir. Sonuç olarak engelleme nedeniyle atmosferdeki enverziyon seviyesinin azaldığı gözlemlenmiştir. Bu da hava kirliliğinin artmasına neden olmuştur. Benzer şekilde Kanada Ontario'da yapılan bir çalışmada enverziyon meydana geldiğinde PM_{2.5} ve NO₂'de önemli artışlar bulunmuş ancak ikisi arasında bir korelasyon hesaplanmamıştır (Wallace ve Kanaroglou, 2009). Ayrıca, sınır tabakası yüksekliği ve enverziyon seviyesi sonuçlarının karşılaştırılması, atmosferik engelleme hava kirliliğine katkıları hakkında fikir vermektedir. Çizelge 5.2'de de görüleceği üzere PM_{2.5} konsantrasyon değerleri yüksek değerlere ulaşmıştır.

Çizelge 5.1: 30 Aralık 2022 ile 4 Ocak 2023 arasındaki enverziyon seviyeleri.

Tarih ve Saat	Enverziyon Seviyesi (m)
30.12.2022 00 UTC	449
30.12.2022 12 UTC	19
31.12.2022 00 UTC	19
31.12.2022 12 UTC	-
1.01.2023 00 UTC	19
1.01.2023 12 UTC	208
2.01.2023 00 UTC	19
2.01.2023 12 UTC	640
3.01.2023 00 UTC	19
3.01.2023 12 UTC	378
4.01.2023 00 UTC	505
4.01.2023 12 UTC	-

Çizelge 5.2: 27.02.2022 ile 07.01.2023 tarihleri arasında PM_{2.5} maksimum, minimum, ortalama, standart sapma ve veri yüzde değerleri

Veri Tipi	PM _{2.5} (µg/m ³)						
İstasyon	Aksaray	Bağcılar	Esenler	Kadıköy	Kartal	Maslak	Tuzla
Maksimum	179,6	254,2	192,1	240,9	131,5	112,7	123
Minimum	2,3	2,1	7,1	4,9	2,2	1,1	3
Ortalama	47,21	50,34	50,23	51,93	50,33	34,48	42,65
Standart sapma	29,41	41,48	32,86	41,65	29,45	20,15	21,36
Veri Yüzdesi	99,70%	98,60%	99,70%	99,70%	97,60%	99,70%	99,30%

Bu bölümde, 30 Aralık 2022 ile 05 Ocak 2023 tarihleri arasında atmosferik engellenmenin PM₁₀, PM_{2.5} ve O₃ üzerindeki etkilerini araştırmıştır. İstanbul'daki HKİİ'lerde ve fakültemizdeki Ceilometer cihazından alınan verilerle analizler yapılmıştır. Analiz sonucunda bulut taban yüksekliğinin 02 Ocak 2023 tarihinde 93 m'ye düştüğü tespit edilmiştir. Böylece atmosferik engelleme ile PM₁₀ ve PM_{2.5} konsantrasyonlarında ciddi oranda artış olduğu gözlemlenmiştir ve pik değerlere ulaşılmıştır. Ancak engellenmenin O₃ konsantrasyonlarına herhangi bir etkisinin olduğu söylenemez. Yüksek basıncın neden olduğu açık hava nedeniyle güneşlenmenin de etkisiyle toplam ozon kalınlığının belirtilen dönemde yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca çektiğimiz fotoğraflarla 7 gün boyunca konsantrasyon değerlerinin yüksek olması görüş mesafesini de kısıtlayarak yaşamı olumsuz etkilemiştir. Ceilometer cihazından elde edilen verilerle 2 gün boyunca yüksek basınç nedeniyle havada bulut ölçümü yapılamamıştır. Hava kalitesi endeksine göre İstanbul'da hava kalitesinin kötü olduğu ve bu durumun insan sağlığını tehdit edebileceği belirlenmiştir. Sınır tabakasının büyük ölçüde düştüğü görülmüştür. Yani sınır tabakası yüksekliği 220 ile 280 m arasında değişmektedir.

6. ATMOSFERİN KAOTİK YAPISININ PARTİKÜL MADDEYE ETKİSİ⁶

6.1 Giriş

PM₁₀ ve PM_{2.5} gibi hava kirleticilerini tahmin ederken bu kirleticilerin hem dinamiklerini hem de kimyasını incelemek çok önemlidir. Mexico City'de yapılan bir çalışmada O₃, CO, SO₂ gibi kirleticilerin hem dinamiklerini hem de kimyasını anlamak için nonlinear dinamik analiz yapmışlardır (Raga ve Le Moyne, 1996). Ancak, zaman serilerinde kaos doğrulanmış olsa da zaman serilerindeki geçişleri anlamlandırmak için daha fazla dinamik değişkenlerin incelenmesi gerekli olduğu düşünülmektedir (Yu ve diğ, 2011). Ayrıca Mexico City'deki kentsel hava kirliliğinin kaotik davranışı yineleme grafiği kullanılarak incelenmiştir (Aceves-Fernandez, 2014). Lorenz dinamik sistemine göre doğrusal olmama atmosferik sistemlerin doğasında vardır (Lorenz, 1963). Özellikle 1980'li yılların sonlarına doğru Takens teoremi kullanılarak doğrusal olmayan yöntemlerin kullanıldığı zaman serisi analizleri yapılmaya başlanmıştır (Takens, 1981). Takens, zaman serisinin zaman gecikmesi, mutual information, gömme boyutu ve Lyapunov denklemi gibi parametrelerin doğrusal olmayan yöntemlerle hesaplanabileceğini göstermiştir (Fraser ve Swinney, 1986; Grassberger ve Procaccia, 1983). Bir zaman serisinin kaotik yapısını belirlemek için kullanılan değişkenler arasında maksimum Lyapunov üssü en yaygın kullanılan değişkenlerden biridir (Holzfuss ve Parlitz, 1991). PM_{2.5} tahmini için faz uzayı diyagramları kullanılmıştır (Yang ve diğ, 2023). Hava kirliliğinin evrimsel özelliklerinin ölçümleri kaos teorisine dayalı olarak incelenmiştir (Xu ve Xu, 2022). Ancak PM₁₀'un dinamik analizinden literatürde yalnızca ara sıra bahsedilmektedir. Sonuç olarak PM₁₀'un zaman içindeki evriminin dinamiklerini anlamamıza yardımcı olabilir.

⁶ Bu bölümde yapılan çalışma SCI dergiye gönderilmiştir. Birinci, E., Özdemir, E.T., Deniz, A & Plocoste, T. Investigation of PM₁₀ chaotic features in Turkey using recurrence analysis

Bu çalışmada 2011-2021 yılları arasında Yenibosna HKİİ'den günlük ortalama olarak ölçülen PM_{10} $\mu g/m^3$ değerleri alınmıştır. PM_{10} değerlerinin kaotik davranışı maksimum Lyapunov üssü, Average Mutal Information (AMI), Auto Korelasyon Fonksiyonu (ACF), Zaman gecikmesi ve recurrence analizi yapılarak incelenmiştir. Literatür taramasında hava kirliliği ile ilgili çalışmalarda çoğunlukla istatistiksel yöntemler (Silini ve diğ, 2006) ve deterministik modeller (Saarioski ve diğ, 2007) kullanılmış olup, PM_{10} değerlerinin kaotik davranışına ilişkin çalışmalar oldukça azdır. Türkiye'de yapılan çalışmalarda çoğunlukla atmosferik sirkülasyonların ve meteorolojik değişkenlerin PM_{10} konsantrasyonuna etkisi araştırılmıştır. Ancak, bu çalışmalar PM_{10} zaman serisinin kaotik yapılarına bakmamıştır (Baltacı ve diğ, 2019; Özdemir ve diğ, 2018). Ancak, son yıllarda atmosferdeki bazı değişkenlerin özelliklerini incelemek için faz uzayı yeniden yapılandırması kullanılmıştır. İstanbul'da ise hava kirliliği değişkenlerine ilişkin kaos özellikleri literatürde incelenmemiştir. Bu çalışmada kaotik dinamik özelliklerini analiz etmek için PM_{10} konsantrasyonu kullanılmıştır.

6.2 Çalışma Alanı ve Veri

İstanbul, Türkiye'nin en kalabalık şehridir ve en büyük ekonomik kaynaklarına ev sahipliği yapmaktadır. İstanbul Atatürk Uluslararası havalimanı Yenibosna HKİİ'ye yaklaşık 2 km uzaklıktadır. Yenibosna HKİİ istasyonu ($40^{\circ}59'56''N$ - $28^{\circ}49'36''E$; rakım: 28 m), Marmara Denizi'nden yaklaşık 5 km uzaklıktadır. Yenibosna HKİİ, İstanbul'un güneyinde, Marmara Denizi ve Atatürk Uluslararası Havalimanı yakınında yer almaktadır. Yenibosna HKİİ ve Atatürk Uluslararası Havalimanının konumu Şekil 6.1'de verilmiştir. Bu çalışma, İstanbul Yenibosna HKİİ'den ölçülen saatlik ve günlük PM_{10} $\mu g/m^3$ değerlerinden oluşmaktadır. Veriler İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB) hava kalitesi izleme istasyonundan (Url-1) elde edilmiştir. PM_{10} 'un sürekli ölçümü için Environment SA MP101M cihazı kullanılmakta ve Avrupa standartlarına göre çalışmaktadır. Alınan verilerin bir kısmı eksik verilerden oluşmaktadır. Hesaplamalar ve görselleştirmeler yapılmadan önce eksik veriler doldurulmuştur. Denklem (6.1)'de eksik verilerin doldurulması yöntemi verilmektedir.

$$Ortalama = \frac{Toplam\ PM_{10}}{N} \quad (6.1)$$



Şekil 6.1: İstanbul ve Yenibosna HKİİ'nin konumu

Denkleme göre, N veri miktarıdır. Eksik veriler, toplam PM_{10} değerlerinin veri miktarına bölünmesiyle elde edilen ortalama değerle doldurulmuştur. Tüm hesaplamalar ve grafik çizimler R programının 'nonlinearTseries' paketi kullanılarak elde edilmiştir (Garcia ve Sawitzki, 2015).

6.3 Materyal ve Metot

6.3.1 Recurrence analizi

Recurrence analizi, deterministik sistemlerde, özellikle de bir dereceye kadar doğrusal olmayan sistemler için çok önemli bir bileşendir. Recurrence analizini ilk kez Eckman ve arkadaşları (1987) bir zaman serisi olarak tanımlamışlardır. Recurrence diyagramlarında tekrarlama modellerini gözlemlemek ve sistem dinamiğindeki doğrusal olmamayı tespit etmek için grafiksel bir araç olarak hizmet etmiştir. M boyutlu faz uzaylarında yinelemeler, i ve j zamanlarında farklı eşiklere sahip iki boyutlu bir grafikte temsil edilir (Mocenni ve diğ., 2011). Eckmann ve ark. (1987) ayrıca m boyutlu uzayda Denklem (6.2) dinamik bir sistemin $\vec{x}_i \in R^m (i = 1, \dots, N)$ gelişimini temsil etmek için matematiksel yörünge modellerinin nasıl kullanılabileceğini gösterdi:

$$R_{ij} = \theta(\epsilon_i - \vec{x}_i - \vec{x}_j), i, j = 1, \dots, N \quad (6.2)$$

Bu durumda, recurrence analizi sıfırları ve birleri içeren iki boyutlu bir yineleme matrisidir (R_{ij}). Aynı zamanda bir fonksiyon olarak da tanımlanmaktadır. N , ölçülen durumların sayısını temsil etmektedir. ϵ_i önceden tanımlanmış eşik mesafesidir, $\vec{x}_i$ and $\vec{x}_j$ sırasıyla faz uzayındaki sistemlerin i ve j zamanlarındaki noktalarını temsil eder. Zaman içinde, yani olay devam ettiği sürece, eşit ve eşit olmayan bir şekilde dağılmış ayırık tekrar noktalarının bir koleksiyonu, stokastik bir süreci ortaya çıkarmaktadır (Marwan ve diğ, 2002). Çalışmamızda günlük PM_{10} konsantrasyon değerlerini gözlemlenebilir tek değişken olarak ele alabilir ve zaman serilerinden faz uzayı yörüngelerini yeniden oluşturabiliriz.

6.3.2 Gecikme zamanı ve gömme boyutu

Uygun bir faz uzayı yeniden yapılandırmasını belirlerken gecikme süresi (τ) ve gömme boyutu (m) tanımlanmalıdır. τ ve m 'nin karmaşık bir şekilde bağlantılı olduğu hipotezi uygulanarak, optimize edilmiş sonuçlar için tutarlı bir Theiler pencere uzunluğunun kullanılması tavsiye edilir (Martinerie ve diğ, 1992; Kugiumtzis, 1996). Takens teoremine göre τ , sonsuz uzunluktaki bir API serisi üzerinden gürültüsüz olarak rastgele seçilebilir. Ancak τ seçimi yeniden yapılandırma süreci için önemlidir. Bunun nedeni, gerçek zamanlı dizilerin uzunluğunun sınırlı olması gerektiği ve genellikle gürültü kirliliğinin olmasıdır (Takens, 1981). Bazı çalışmalar, pratik problemlerde τ kullanımı için en uygun değerleri belirlemek amacıyla ACF yöntemini kullanmıştır (Kin ve diğ, 1999). Fraser ve Swinney'nin (1986) çalışmasında, daha ileri analizler için yerleştirme boyutuna uygun değerlerin belirlenmesi amacıyla karşılıklı bilgi tekniği önerilmiş; m değerinin ne çok küçük ne de çok büyük olmasını sağlamak önemlidir. Eğer m değeri çok küçükse dinamik hava kirliliği sistemi çekicilerini alamayacaktır. Bu nedenle hava kirliliği sisteminin dinamik özellikleri tam olarak analiz edilememektedir. Öte yandan çok büyük olması çalışma için kullanılacak veri uzunluğunu azaltır. Faz uzaylarında faz noktalarının oluşumu çok nadir olarak meydana gelecektir.

6.3.3 Maksimum Lyapunov eşitliği

Tüm kaotik sistemlerde sıkı yörüngelerin üstel olarak farklılaştığı iyi bilinmektedir. Bu farklılığı belirlemek için Lyapunov üssü kullanılır. Sapma oranını ortalama üssü olarak ifade eder. Lyapunov üssü tipik olarak λ ile temsil edilir. Gömme boyutlu uzayda iki vektör arasındaki mesafeyi temsil etmek için $\delta(0)$ kullanılarak, iki yörünge

arasındaki mesafe λ ve $\delta(0)$ kullanılarak hesaplanabilir. Denklem (6.3)'de, t zamanı ile birlikte (Eckmann, 1986):

$$\delta(n) \sim \delta(0) \cdot \exp(\lambda \cdot t) \quad (6.3)$$

Faz uzayında asimetric yörüngeler yaratan tuhaf çekiciler kaotik sistemleri karakterize eder. Kaos başlangıç koşullarına bağlıdır. Bunun nedeni, komşu noktaların üstel sapmasının çekicilerinin ayırt edici bir özelliği olmasıdır. λ bu olayın niceliksel ifadesidir. Kelebek etkisi olarak bilinen kaotik sistemlerin başlangıç koşullarına duyarlılığı, kaotik sistemlerin en belirgin özelliğidir (Wolf ve diğerleri 1985). Başlangıç koşullarına duyarlılık ne kadar büyük olursa, sistem o kadar doğru bir şekilde kaotik olarak sınıflandırılabilir. Bir sistem veya zaman serisindeki kaotik davranışı belirlemeye yönelik en pratik yaklaşımlardan biri Lyapunov üssüdür. Bitişik yörüngelerin farklılığı Lyapunov üssüyle ölçülmektedir. Maksimum Lyapunov üssünü belirlemek için Lyapunov üssü $S(t)$, bir dizi referans noktasının sapmasının ortalaması alınarak hesaplanmalıdır. λ (6.4) ve (6.5) Denklemdeki gibi tanımlanabilir. tek boyutlu dinamik sistemde $x_{n+1} = f(x_n)$

$$\lambda = \lim_{n \rightarrow \infty} \ln \left(\prod_{i=1}^{n-1} \left| \frac{df(x)}{dx} \right|_{x=x_i} \right) \quad (6.4)$$

Yani;

$$\lambda = \lim_{n \rightarrow \infty} \ln \left(\prod_{i=1}^{n-1} \left| \frac{df(x)}{dx} \right|_{x=x_i} \right) \quad (6.5)$$

λ 'yı hesaplamanın iki yolu vardır: Wolf'un yöntemi ve Jacobian'ın yöntemidir. Wolf'un yöntemi gürültüsüz zaman serileri için uygundur ve teğet uzayda küçük vektörler ve doğrusal olmayan yöntem için uygundur. Ancak Jacobian yöntemi gürültülü ve doğrusal olarak uzatılmış zaman serileri için uygundur.

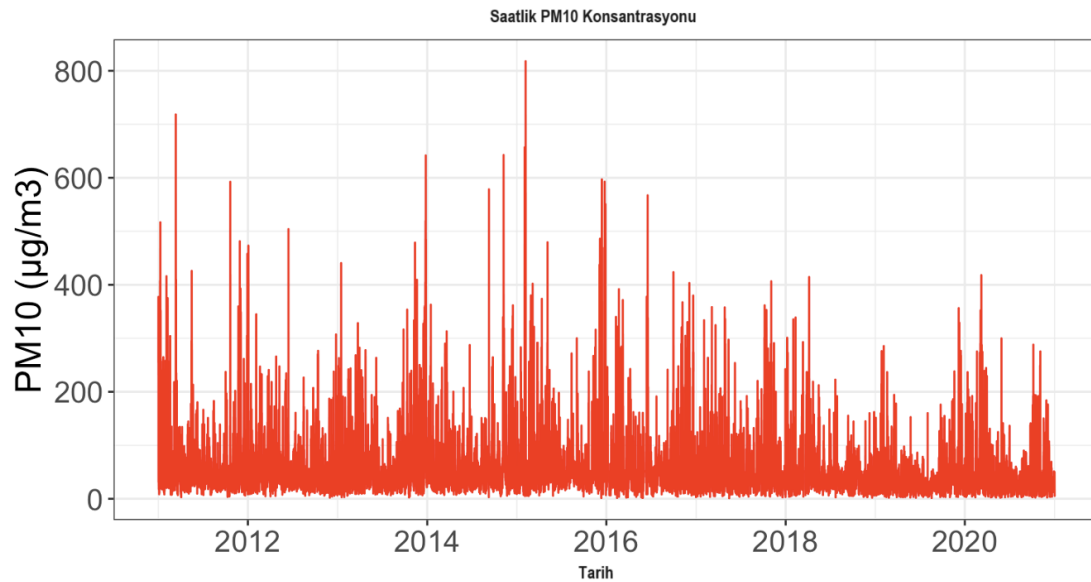
6.3.4 Korelasyon Boyutu

Korelasyon boyutu, fraktal boyutu belirlemek için yaygın olarak kullanılan bir tekniktir ve faz uzayına gömülü geometrik nesnelere uygulanabilir. Korelasyon boyutunun önemli bir faydası, bir zaman serisinin dinamik bir süreçten üretilip üretilmediği konusunda fikir verme yeteneğidir. Ayrıca bu ölçüm, atmosferik

sistemlerde mevcut olabilecek dinamik değişkenlerin sayısını ölçmek için de kullanılabilir.

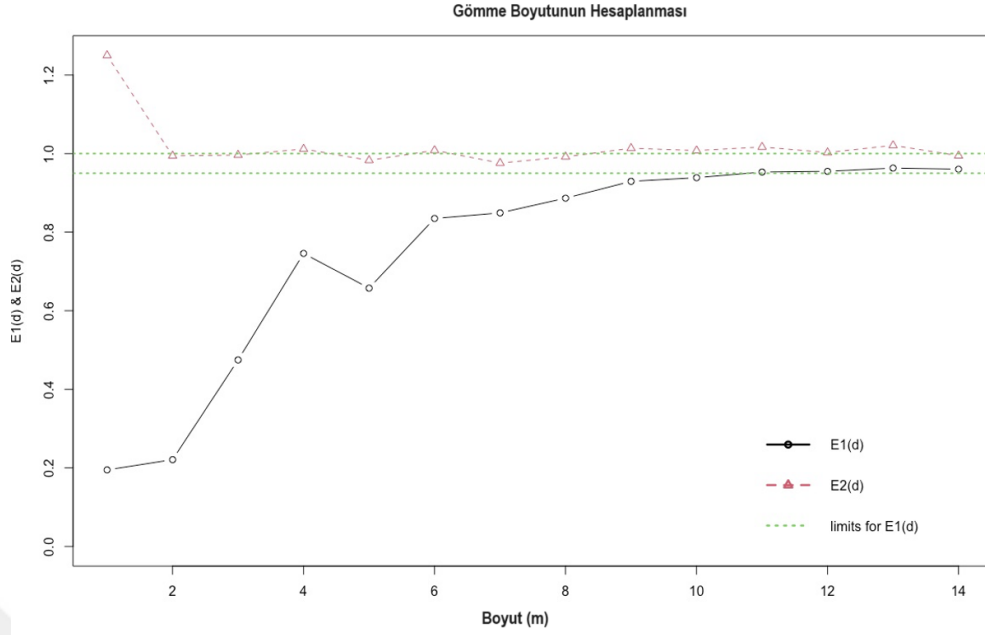
6.4 Tartışma ve Sonuçlar

Yenibosna HKİİ'den günlük PM₁₀ konsantrasyonu Şekil 6.2'de gösterilmektedir. Ayrıca kış aylarında yani aralık, ocak ve şubat aylarında PM₁₀ konsantrasyonu oldukça yüksektir (Şekil 6.2). Günlük PM₁₀ konsantrasyonlarına bakıldığında bazı günlerde pik değerlere ulaşıldığı Şekil 6.2'de görülmektedir. Çünkü çöl tozu taşınımı özellikle Sahra çölü üzerinden İstanbul'a ulaşmaktadır (Özdemir, 2019). 1 Şubat 2015 tarihinde PM₁₀ konsantrasyonları Türkiye'nin batısında, özellikle İstanbul'da, Kuzey Afrika (Sahra Çölü) üzerinden toz taşınması nedeniyle önemli ölçüde artmış ve 300 µg/m³'e ulaştığı tespit edilmiştir (Çapraz ve Deniz, 2021).



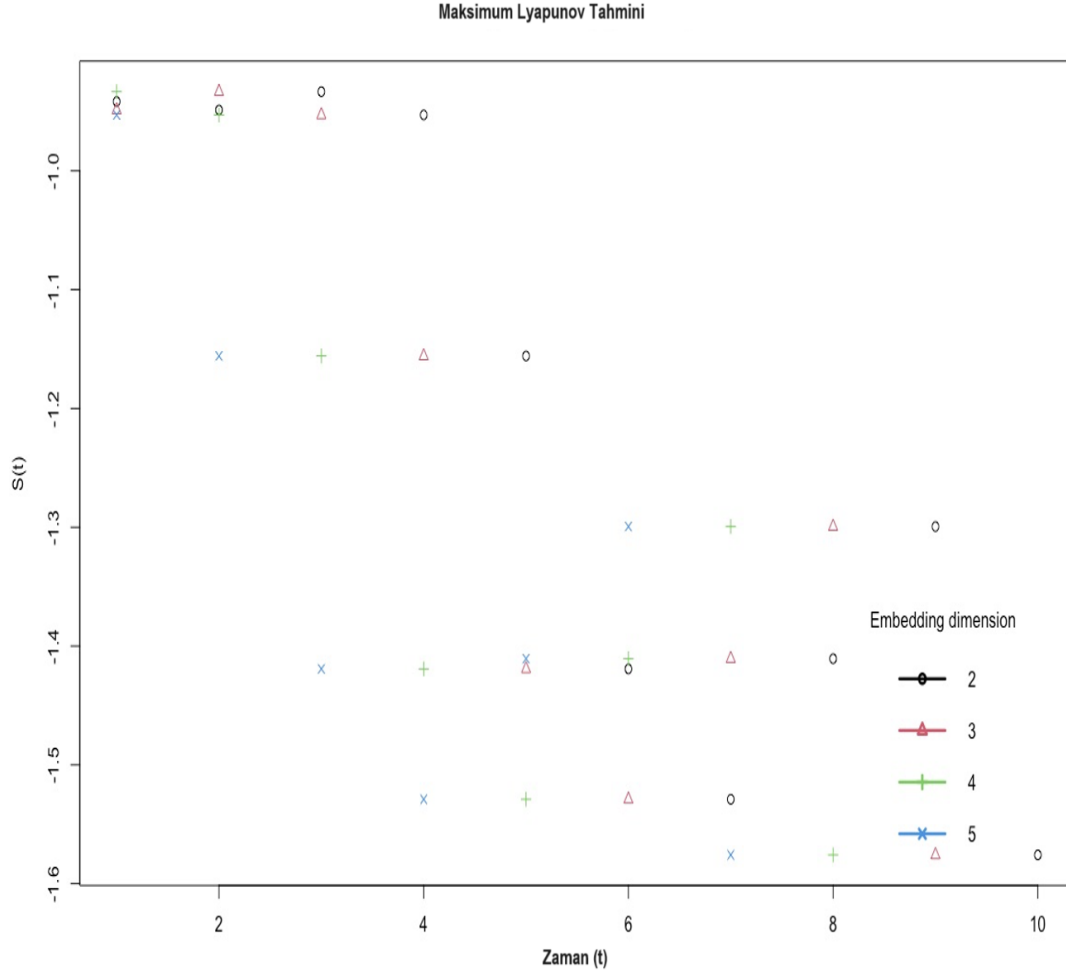
Şekil 6.2: Günlük PM₁₀ (µg/m³) konsantrasyonu

Gecikme süresi ve gömme boyutu, AMI yöntemi ve ACF yöntemleri kullanılarak kolayca bulunabilir. Şekil 6.3 gömme boyut grafiklerini göstermektedir. Şekil 6.3'te gömme büyüklüğü 11 olarak bulunmuştur. Ayrıca gecikme süresi değeri de 2 olarak bulunmuştur. Bu çalışmada olduğu gibi Çin'de hazırlanan hava kalitesi indeksinin kaotik özelliklerinde hava kalitesi indeksi gömme boyutunun 11 olduğu tespit edilmiştir (Yu ve diğ, 2011).



Şekil 6.3: PM₁₀'un gömme boyutunun hesaplanması

Lyapunov değeri günlük ortalama PM₁₀ konsantrasyon değerlerine göre 3,4,5 ve 6 numaralı denklemler kullanılarak hesaplanmıştır. Şekil 6.4, $\tau = 2$ ve $m = 11$ koşulları altında Lyapunov değerinin tahminini göstermektedir. Çizelge 6.1, m değeri 2 ile 5 arasında değiştiğinde 11 zaman adımı için maksimum Lyapunov değerlerini göstermektedir (-0,94 ile -3,36). Çizelge 6.1'deki Lyapunov üs değerleri PM₁₀ değerlerinin oldukça kaotik bir karakter sergilediğini göstermektedir. Sistemin ıraksamasına yakın yörüngeler Lyapunov üssüyle ifade edilir. Bitişik yörüngelerin farklılığı Lyapunov üssü, orijinal bilginin unutulduğunu veya muhafaza edildiğini gösterir, dolayısıyla öngörülebilir zamanları hesaplamak için kullanılabilir. Lyapunov üssü, kaotik bir zaman serisindeki bir sistemin maksimum öngörülebilir zaman ölçeğine ilişkin bir fikir sağlamaktadır.

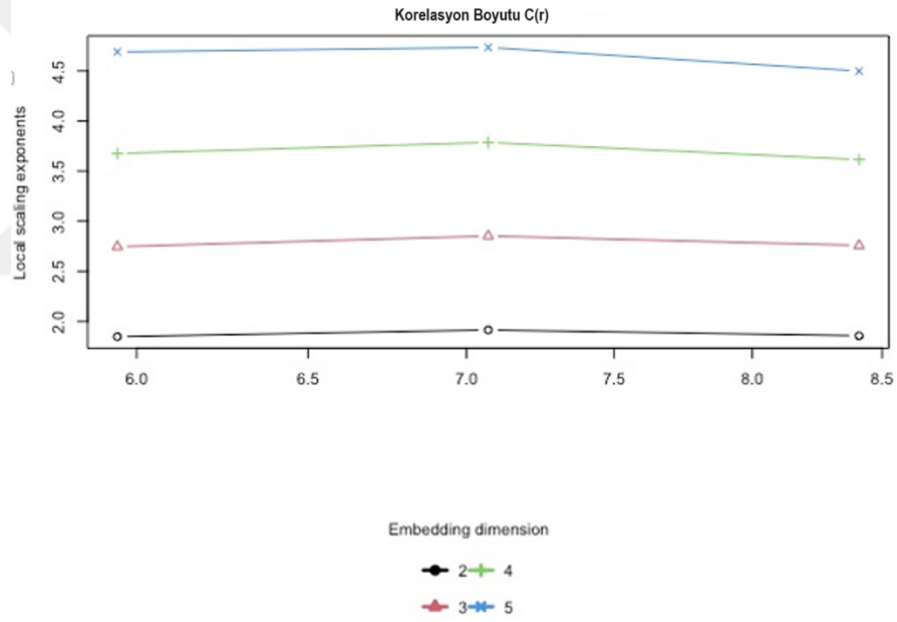


Şekil 6.4: Maksimum Lyapunov üssü değerleri

Fraktal büyüklük tahmini şu şekilde tanımlanabilir. Rastgele seçilen iki noktada, belirli bir mesafeyle ayrılma olasılığının artan mesafeyle nasıl değiştiği incelenir. Şekil 6.5 korelasyon boyutunu ve genel grafiği göstermektedir. Korelasyon toplamları ne kadar düşük olursa, kaotik davranışı da o kadar az olmaktadır. Genel olarak, baskın değişkenleri belirlemek için korelasyon boyutu kullanılır. Korelasyon değerinden sonraki en büyük tam sayı, söz konusu sistemin dinamiklerini etkileyen baskın değişkenlerin sayısını gösterir (Lee ve Li, 2008). Gömme boyutu ve yarıçap arttıkça korelasyon boyutunun da arttığı açıktır. Sonuç olarak zaman serileri arasındaki ilişkiler farklılaşmaktadır. Yüksek korelasyon boyutundan dolayı bu zaman serileri yüksek boyutlu kaotik davranış sergiler. Bu araştırma, sistem dinamiğini en çok etkileyen değişkenlerin, en büyüğü 6 olmak üzere en yüksek korelasyon değerine sahip değişkenler olduğunu tespit etmiştir. Dolayısıyla PM_{10} dinamiğini modellemek için gereken minimum değişken sayısı 6 olacaktır (Şekil 6.5).

Çizelge 6.1: Gömme boyutuna göre maksimum Lyapunov değerleri.

Gömme Boyutu için Zaman adımı	0	1	2	3	4	5
	Maksimum Lyapunov değeri					
2	0,92	2,66	3,43	4,32	4,06	4,03
3	0,89	2,98	3,18	3,23	3,21	3,2
4	0,88	2,64	2,87	3,02	3,03	3,13
5	0,85	2,19	2,5	2,52	2,52	2,57



Şekil 6.5 PM₁₀ için korelasyon boyutu ve toplamı



7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez 5 ana başlıktan oluşmakta ve hava kirliliğine neden olan kaynakları araştırmaktadır. PM_{10} ile meteorolojik değişkenler (rüzgar şiddeti ve yönü, sıcaklık ve bağıl nem) arasındaki ilişkiyi araştırmıştır. NO_x , NO , NO_2 , PM_{10} , $PM_{2.5}$, O_3 ve SO_2 kirleticilerinin birbirleri arasındaki ilişki ve bu kirleticilerin 12 adet meteorolojik değişken arasındaki ilişki belirlenmiştir. İstanbul'da PM_{10} konsantrasyonunun saatlik, haftalık, aylık ve mevsimsel değişimleri tespit edilmiştir. Özetlemek gerekirse, PM_{10} 'un rüzgar şiddeti ve sıcaklık ile negatif, rüzgar yönü ve bağıl nem ile pozitif ilişkisi olduğu bulunmuştur. Bağıl nem ve sıcaklık için korelasyon değerleri sırasıyla 0,01 ve -0,15 olarak bulunmuştur. Pearson korelasyonu, Spearman korelasyonu ve Kendall tau korelasyonu her 3 değişken için de yaklaşık olarak aynı korelasyon sonuçlarını vermiştir. Rüzgar şiddeti ile PM_{10} arasındaki en güçlü korelasyon PCC'de bulunmuştur. Korelasyon katsayılarının benzer sonuçlar verdiği ve ilişkilerin doğruluğunu gösterdiği görülmektedir. ACF fonksiyonuna göre PM_{10} ile rüzgar şiddeti arasında bir ilişki gösterirken, CCF fonksiyonu ise negatif bir ilişki göstermiştir. Korelasyon sonuçları istatistiksel olarak anlamlı bulunamamıştır. Atatürk Uluslararası Havalimanı için rüzgar yönü değiştiğinde yani rüzgar daha kuzeybatıya veya batıya döndüğünde PM_{10} konsantrasyonu değerleri arttığı belirlenmiştir. Aylık bazda PM_{10} konsantrasyonu Aralık ve Mart ayları arasında yüksek değerlerde olduğu tespit edilmiştir. PM_{10} değerlerinin en düşük olduğu aylar Temmuz ve Ağustos ayları arasında olduğu görülmüştür. Ayrıca, çalışmada 7-8 Nisan 2013 tarihlerinde Kuzey Afrika'dan gelen tozun Türkiye üzerindeki etkisi araştırılmaktadır. Türkiye üzerindeki toz fırtınasının, Afrika'daki toz fırtınasından yaklaşık iki gün sonra meydana geldiği ve PM_{10} konsantrasyonlarının Türkiye genelinde arttığı belirlenmiştir. Belirli HKİİ'lerden alınan epizodik değerler saatlik ortalama olarak Adana 701 $\mu g/m^3$, Gaziantep 629 $\mu g/m^3$, Karaman 900 $\mu g/m^3$ ve Yozgat 782 $\mu g/m^3$, Nevşehir 1343 $\mu g/m^3$ 'tür. Bu en yüksek değerler, muhtemelen Kuzey Afrika'ya yakınlığından dolayı, Türkiye'nin güney kesimlerinde görülmüştür.

Türkiye genelinde çoğu istasyonda savrulan toz ve geniş alana yayılmış toz olaylarının görülmesi hava trafiğini olumsuz şekilde etkilemiştir. Toz fırtınasının Türkiye üzerinden hareketindeki en kritik faktörlerden biri Orta Akdeniz'de 995 hPa değerinde bir siklonun bulunmasıdır. Siklonun Türkiye'ye doğru ilerlediği, konverjans nedeniyle Kuzey Afrika'daki tozu yukarı seviyelere taşıyıp daha sonra uzun mesafeli olarak taşınarak Türkiye'nin üzerine güneyli rüzgarlarla geldiği görülmüştür. Daha sonra yüksek basıncın etkisiyle toz tanecikleri Türkiye'nin üzerine çöktüğü belirlenmiştir. Toz uydu görüntülerinde toz fırtınasının hareketi ve toz RGB kanalındaki toz taşınımı Türkiye üzerinden net bir şekilde görülmektedir. Aslında bu çalışma için uydu yörüngesinin o dönemde Türkiye'nin üzerinden geçmesi toz fırtınasını belirlemede katkı sağlamıştır. Ancak toz RGB kanalı, uydu yörüngesinin kapsamadığı alanlardaki diğer toz fırtınası çalışmalarında aynı şekilde çalışmayabilir. 7-8 Nisan 2013 toz olayları sırasında yapılan HYSPLIT geri yörünge analizi hava parselinin Kuzey Afrika'dan gelip Türkiye'ye geldiğinde çöktüğü görülmüştür. Akdeniz'den gelen nemli havanın da tozun ıslak olarak çökmesine katkı sağladığı görülmüştür. Kuzey Afrika üzerinden gelen toz fırtınası yaklaşık 1500 m seviyesinde olurken, çoğu havalimanında yere doğru (yaklaşık 10 m seviyesine kadar) çöktüğü gözlenmiştir. Yani Kuzey Afrika üzerindeki siklonun etkisiyle yükselen hava, Türkiye üzerinde oluşan yüksek basınç sistemi sonucu yere çökmüştür.

2012-2021 yılları arasında Türkiye'nin kuzeybatı bölgesindeki havalimanlarında meydana gelen toz olayları incelenmiş ve Marmara bölgesinde 163 tane toz hadisesi meydana gelmiştir, tozun uzun mesafeli taşınmasının kökeni araştırılmıştır. Havalimanlarına en yakın HKİİ'lerde PM ölçümleri (PM_{10} ve $PM_{2.5}$) epizot günleri analiz edilmiştir. HYSPLIT yörünge analizi ve BSCDREAM modeli çıktıları, olay günlerinde uzun mesafeli toz taşınımını göstermiştir. Havalimanlarında gözlemlenen toz olayları ile havalimanına en yakın HKİİ'lerden alınan PM_{10} ve $PM_{2.5}$ değerleri incelenmiş ve toz konsantrasyonlarının 1 saat içindeki pik değerleri uzun mesafeli toz taşınımının göstergesidir. Uzun mesafeli toz taşınımında, toz parçacıkları yere çöktüğünde rüzgar hamlesi çok yüksek bir seviyeye ulaşmaktadır. Dolayısıyla üst seviyedeki tozlar yer seviyesine çökecektir. Özellikle uzun mesafeli toz taşınımında, MODIS ve/veya DUST RGB görüntülerinden Marmara Bölgesi üzerindeki toz konsantrasyon yoğunluğu görülse de, toz olaylarından kaynaklanan hakim rüyet tüm havalimanlarında kodlanmadığı görülmektedir. Bunun nedeni ise havalimanı

gözlemlerini analiz ettiğimizde bu toz konsantrasyonunun yere ulaşmadığını ve/veya Metar'da Hakim rüyet ve/veya havalimanında yapılan Speci gözlemlerinde tozun yere ulaşmadığı için kodlanmadığı söylenebilir.

Atmosferin dinamik yapısına bakıldığında, 30 Aralık 2022 ile 05 Ocak 2023 tarihleri arasında atmosferik engellemenin PM_{10} , $PM_{2.5}$ ve O_3 üzerindeki etkileri araştırılmıştır. İstanbul'daki hava kalitesi istasyonlarından ve İTÜ Meteoroloji Mühendisliği Bölümünde kullanılan Ceilometer cihazından alınan verilerle analizler yapılmıştır. Analiz sonucunda bulut taban yüksekliğinin 02 Ocak 2023 tarihinde 93 m'ye düştüğü tespit edilmiştir. Böylece atmosferik engelleme sebebiyle PM_{10} ve $PM_{2.5}$ konsantrasyonlarında ciddi oranda artış olduğu gözlemlenmiş ve pik değerlere ulaşmıştır. Yüksek basıncın neden olduğu bulutsuzluk nedeniyle güneşlenmenin de etkisiyle toplam ozonun belirtilen dönemde yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca 7 gün boyunca çektiğimiz fotoğraflarda konsantrasyon değerlerinin yüksek olması görüş mesafesini de kısıtlayarak insan hayatını da olumsuz etkilemiştir. Ceilometer cihazından elde edilen verilerle 2 gün boyunca yüksek basınç nedeniyle havada bulut ölçümü yapılamamıştır. Hava kalitesi endeksine göre İstanbul'da hava kalitesinin kötü olduğu ve bu durumun insan sağlığını tehdit edebileceği belirlenmiştir. Atmosferik Sınır tabakası yüksekliği 220 ile 280 m arasında değişmektedir. Yer seviyesinde ölçülen meteorolojik değişkenlerin yanı sıra sinoptik analizlerde İstanbul'u şiddetli bir yüksek basıncın etkilediği belirlenmiştir. Yer seviyesi kartına göre basınç 1030-1040 hPa arasında belirlenmiş olup ölçüm istasyonlarında basınç seviyesi 1030 hPa'ya kadar çıkmıştır. Sonuç olarak 1 Ocak'ta Ceilometer cihazında bulut seviyelerinde herhangi bir bulut ölçümü yapılamamıştır.

Son olarak, bu konuyu açıklığa kavuşturmak ve bunları ve diğer potansiyel olarak sorumlu bileşenleri ve kaynakları daha iyi tanımlamak için bu konuda daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır. Son olarak, PM_{10} değişim süreçlerinin dinamiklerinin doğrusal olmama, durağan olmama ve kaos ile karakterize edildiği bulunmuştur. Bu tür kaotik özellikler hakkında doğru bilgi, PM_{10} dalgalanmalarının daha iyi anlaşılması için gereklidir, böylece PM_{10} konsantrasyonlarının tahminini kolaylaştıracaktır. Bu çalışmada PM_{10} değerlerinin yüksek boyutlu kaotik davranış sergilediği bulunmuştur. PM_{10} zaman serisinde kaotik özelliklerin varlığı, korelasyon büyüklüğünün 6 olması ve yineleme grafiğindeki modellerin yapısından anlaşılmaktadır. Bu yüzden, PM_{10} konsantrasyonunu tahmin etmek için minimum meteorolojik değişken sayısının 6

olduğu bulunmuştur. Tekrarlama analizleri, çekicinin faz-uzay projeksiyonundaki çapraz beyaz çizgilerde kaotik davranışı ortaya çıkarmıştır. Kaotik özelliklerin varlığı Lyapunov üssünün pozitif değerinin olduğundan anlaşılabilmektedir. PM_{10} çap değeri arttıkça korelasyon büyüklüğünün arttığı gözlenmiştir. Yani PM_{10} verisinin boyutu arttıkça PM_{10} konsantrasyonunun öngörülebilirliği zorlaşmaktadır. Ayrıca PM_{10} değerleri için gecikme süresi ve gömme boyutu hesaplanmıştır. Bu, PM_{10} zaman serisindeki kaotik özelliklerin sezgisel ve kısa bir şekilde araştırılmasına olanak tanır. Gelecek çalışmalarda kirleticilerin faz uzayı davranışlarının bilinmesi hava kirliliğinin tahmini açısından oldukça önemli olacaktır.



KAYNAKLAR

- Aceves-Fernandez, M.A., Pedraza-Ortega, J.C., Sotomayor-Olmedo, A. et al.** Analysis of Key Features of Non-Linear Behaviour Using Recurrence Quantification. Case Study: Urban Airborne Pollution at Mexico City. *Environ Model Assess* 19, 139–152 (2014). <https://doi.org/10.1007/s10666-013-9381-3>
- Alpert, P., & Ganor. E.** (2001). Comparison to surface observations over the Middle East for the extreme dust storm. March 14-17. 1998. *Journal of Geophysical Research*. 106(D16). 18275-18286.
- Annex (3) ICAO** (International Civil Aviation Organization). (2018). To the Convention on International Civil Aviation. Meteorological Service for International Air Navigation. International Civil Aviation Organization. Twentieth Edition. July 2018. Chapter 1. pp. 1-5.
- Ashoor, A. S., & Naji, A. A. K. K.** (2021). Integrated network of pearson correlation coefficients, Kendall Tau, Spearman Rho and its impact on disease, health indicators and mortality ratings in Babil Province. In *Proceedings of First International Conference on Mathematical Modeling and Computational Science: ICMACS 2020* (pp. 83-96). Springer Singapore.
- Baltaci, H., Akkoyunlu, B. O., Arslan, H., Yetemen, O., & Ozdemir, E. T.** (2019). The influence of meteorological conditions and atmospheric circulation types on PM10 levels in western Turkey. *Environmental monitoring and assessment*, 191(7), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7609-7>
- Baltaci, H., Ezber, Y.** Characterization of atmospheric mechanisms that cause the transport of Arabian dust particles to the southeastern region of Turkey. *Environ Sci Pollut Res* 29, 22771–22784 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17526-y>
- Baltaci. H.** (2021). Meteorological characteristics of dust storm events in Turkey. *Aeolian Research*. 50. 100673. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2021.100673>
- Baltaci. H. & Ezber. Y.** (2022). Characterization of atmospheric mechanisms that cause the transport of Arabian dust particles to the southeastern region of Turkey. *Environ Sci Pollut Res* 29. 22771–22784. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17526-y>
- Barriopedro, D., Garcí'a-Herrera, R., Lupo, A. R., & Herná'ndez, E.** (2006). A climatology of Northern Hemisphere blocking. *Journal of Climate*, 19(6), 1042–1063. <https://doi.org/10.1175/JCLI3678.1>.
- Basart, S., Pérez, C., Nickovic, S., Cuevas, E., & Baldasano, J.** (2012). Development and evaluation of the BSC-DREAM8b dust regional model over Northern Africa, the Mediterranean and the Middle East. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 64(1), 18539. <https://doi.org/10.3402/tellusb.v64i0.18539>
- Birinci, E., Deniz, A., & Özdemir, E. T.** (2023a). The relationship between PM10 and meteorological variables in the mega city Istanbul. *Environmental*

- Monitoring and Assessment, 195, 304. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10866-3>
- Birinci, E., Denizoglu, M., Özdemir, H. et al.** Ambient air quality assessment at the airports based on a meteorological perspective. *Environ Monit Assess* 195, 1542 (2023c). <https://doi.org/10.1007/s10661-023-12135-3>
- Birinci, E., Özdemir, E. T. & Deniz, A.** (2022). An investigation of the effects of dust transport and dust storms on PM10 and PM2.5 at airports in the Marmara region of Türkiye. 10th International Symposium on Atmospheric Sciences. 18-21 October İstanbul.
- Birinci, E., Özdemir, E. T., & Deniz, A.** (2023b). An investigation of the effects of sand and dust storms in the North East Sahara Desert on Turkish airports and PM10 values: 7 and 8 April, 2013 events. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195, 708. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11288-5>
- Birinci, E., Ozdemir, H., & Özdemir, E. T.** (2023). Uzun Mesafeli Toz Taşınımının Havalimanlarına Olan Etkilerinin İncelenmesi: 29 Kasım 2021 Olayı. V. METEOROLOJİK UZAKTAN ALGILAMA SEMPOZYUMU. 13-17 Kasım Alanya, Antalya.
- Carrera, M. L., Higgins, R. W., & Kousky, V. E.** (2004). Downstream weather impacts associated with atmospheric blocking over the northeast Pacific. *Journal of Climate*, 17(24), 4823-4839. <https://doi.org/10.1175/JCLI-3237.1>
- Carslaw, D. C., & Ropkins, K.** (2012). Openair—an R package for air quality data analysis. *Environmental Modelling & Software*, 27, 52-61. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.09.008>.
- Cheewinsiriwat, P., Duangyiwa, C., Sukitpaneevit, M., & Stettler, M. E.** (2022). Influence of Land Use and Meteorological Factors on PM_{2.5} and PM₁₀ Concentrations in Bangkok, Thailand. *Sustainability*, 14(9), 5367. <https://doi.org/10.3390/su14095367>.
- Chen-Chen, H., Perez-Hoyos, S., & Sánchez-Lavega, A.** (2021). Dust particle size, shape and optical depth during the 2018/MY34 martian global dust storm retrieved by MSL Curiosity rover Navigation Cameras. *Icarus*, 354, 114021. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2020.114021>
- Cho, J. H., Kim, H. S., & Yoon, M. B.** (2022). The influence of atmospheric blocking on regional PM10 aerosol transport to South Korea during February–March of 2019. *Atmospheric Environment*, 277, 119056. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119056>.
- Çapraz, Ö., Deniz, A.** Particulate matter (PM10 and PM2.5) concentrations during a Saharan dust episode in İstanbul. *Air Qual Atmos Health* 14, 109–116 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11869-020-00917-4>
- De Villiers, M. P., & Van Heerden, J.** (2007). Dust storms and dust at Abu Dhabi international airport.
- De Villiers, M., & Van Heerden, J.** (2007). Fog at Abu Dhabi international airport.
- Dempsey, F.** (2018). A Survey of Regional-Scale Blocking Patterns and Effects on Air Quality in Ontario, Canada. *Atmosphere*, 9(6), 226. <https://doi.org/10.3390/atmos9060226>
- Deng, J., Deng, Y., & Cheong, K. H.** (2021). Combining conflicting evidence based on Pearson correlation coefficient and weighted graph. *International Journal of Intelligent Systems*, 36(12), 7443-7460. <https://doi.org/10.1002/int.22593>

- Deniz, A., Özdemir, E.T., Sezen, İ. et al.** Investigations of storms in the region of Marmara in Turkey. *Theor Appl Climatol* 112, 61–71 (2013). <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0715-x>
- Ebrahimi Khusfi, Z., Roustaei, F., Ebrahimi Khusfi, M., & Naghavi, S.** (2020). Investigation of the relationship between dust storm index, climatic parameters, and normalized difference vegetation index using the ridge regression method in arid regions of Central Iran. *Arid land research and management*, 34(3), 239–263. <https://doi.org/10.1080/15324982.2019.1694087>
- Eckmann, J.P., Kamphorst, S.O., Ruelle, D.,** (1987). Recurrence plots of dynamical systems. *EPL (Europhysics Letters)* 4 (9), 973.
- Efe, B.;Lupo, A.R.** (2022) Global Trends in the Occurrence and Characteristics of Blocking Anticyclones using Şen Innovative Trend Analysis.*Theor. Appl.Climatol.*2022, 150, 763–776. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04195-1>
- Elsayed, Y., Kanan, S., & Farhat, A.** (2021). Meteorological patterns, technical validation, and chemical comparison of atmospheric dust depositions and bulk sand in the Arabian Gulf region. *Environmental Pollution*, 269, 116190. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116190>
- Etaga Harrison, O., & Ifeanyichukwu, O.** (2021). Methods Of Estimating Correlation Coefficients In The Presence Of Influential Outlier (S). *METHODS*, 4(3), 157–185. <https://doi.org/10.52589/AJMSS-LLNZXUOZ>.
- Fallahizadeh, S., Kermani, M., Esrafil, A., Asadgol, Z., & Gholami, M.** (2021). The effects of meteorological parameters on PM₁₀: Health impacts assessment using AirQ+ model and prediction by an artificial neural network (ANN). *Urban Climate*, 38, 100905. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100905>.
- Fraser AM, Swinney HL** (1986) Independent coordinates for strange attractors from mutual information. *Phys Rev A* 33:1134–1140
- Garcia, C. A., & Sawitzki, G.** (2015). Package ‘nonlinearTseries’. Vienna: R package version 0.2, 3.
- Ginoux, P., Prospero, J. M., Gill, T. E., Hsu, N. C., & Zhao, M.** (2012). Global-scale attribution of anthropogenic and natural dust sources and their emission rates based on MODIS Deep Blue aerosol products. *Reviews of Geophysics*. 50(3). <https://doi.org/10.1029/2012RG000388>
- Goudie, A.S., & Middleton, N.J.** (1992). The changing frequency of dust storms through time. *Clim. Change* 20 (3). 197–225. <https://doi.org/10.1007/BF00139839>.
- Grassberger, P., & Procaccia, I.** (1983). Characterization of strange attractors. *Physical review letters*, 50(5), 346.
- Hamidi, M., Kavianpour, M.R. & Shao, Y.** Synoptic analysis of dust storms in the Middle East. *Asia-Pacific J Atmos Sci* 49, 279–286 (2013). <https://doi.org/10.1007/s13143-013-0027-9>
- Harker, B. M., Gee, K. L., Neilsen, T. B., Wall, A. T., McInerny, S. A., & James, M. M.** (2013). On autocorrelation analysis of jet noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 133(6), EL458–EL464. <http://dx.doi.org/10.1121/1.4802913>.

- Hauke, J., & Kossowski, T.** (2011). Comparison of values of Pearson's and Spearman's correlation coefficients on the same sets of data. *Quaestiones geographicae*, 30(2), 87. <https://doi.org/10.2478/v10117-011-0021-1>.
- He, Bao-Jie, Lan Ding, and Deo Prasad.** "Enhancing urban ventilation performance through the development of precinct ventilation zones: A case study based on the Greater Sydney, Australia." *Sustainable Cities and Society* 47 (2019): 101472. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101472>
- Holfuss, J., & Parlitz, U.** (1991). Lyapunov exponents from time series. In *Lyapunov exponents* (pp. 263-270). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Jeong, H., Park, M., Hwang, W., Kim, E., & Han, M.** (2013). The effect of calm conditions and wind intervals in low wind speed on atmospheric dispersion factors. *Annals of Nuclear Energy*, 55, 230-237. <http://dx.doi.org/10.1016/j.anucene.2012.12.018>.
- Jiang, N., Dirks, K. N., & Luo, K.** (2014). Effects of local, synoptic and large-scale climate conditions on daily nitrogen dioxide concentrations in Auckland, New Zealand. *International Journal of Climatology*, 34(6), 1883-1897. <https://doi.org/10.1002/joc.3808>
- Kelley, M. C., & Ardon-Dryer, K.** (2021). Analyzing two decades of dust events on the Southern Great Plains region of West Texas. *Atmospheric Pollution Research*, 12(6), 101091. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.101091>
- Kelly, F.J., Fussell, J.C.** Air pollution and public health: emerging hazards and improved understanding of risk. *Environ Geochem Health* 37, 631–649 (2015). <https://doi.org/10.1007/s10653-015-9720-1>
- Kin HS, Eykholt R, Salas JD** (1999). Nonlinear dynamics, delay time, and embedding window. *Phys D* 127:48–60
- Kocha, C., Lafore, J. P., Tulet, P., & Seity, Y.** (2012). High-resolution simulation of a major West African dust-storm: comparison with observations and investigation of dust impact. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 138(663), 455-470. <https://doi.org/10.1002/qj.927>
- Korkmaz, M.** (2021). A study over the general formula of regression sum of squares in multiple linear regression. *Numerical Methods for Partial Differential Equations*, 37(1), 406-
- Kugiumtzis, D.** (1996). State space reconstruction parameters in the analysis of chaotic time series—the role of the time window length. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 95(1), 13-28.
- Lawrence, M. G.** (2005). The relationship between relative humidity and the dewpoint temperature in moist air: A simple conversion and applications. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86(2), 225–233. <https://doi.org/10.1175/BAMS-86-2-225>
- Lee, C. K., & Lin, S. C.** (2008). Chaos in air pollutant concentration (APC) time series. *Aerosol and Air Quality Research*, 8(4), 381-391.
- Li, Y., Chen, Q., Zhao, H., Wang, L., & Tao, R.** (2015). Variations in PM₁₀, PM_{2.5} and PM_{1.0} in an urban area of the Sichuan Basin and their relation to meteorological factors. *Atmosphere*, 6(1), 150–163. <https://doi.org/10.3390/atmos6010150>
- Li, Z., Gao, X., & Lu, D.** (2021). Correlation analysis and statistical assessment of early hydration characteristics and compressive strength for multi-composite cement paste. *Construction and Building Materials*, 310, 125260. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125260>.

- Liang, L., Han, Z., Li, J., & Liang, M.** (2022). Investigation of the influence of mineral dust on airborne particulate matter during the COVID-19 epidemic in spring 2020 over China. *Atmospheric pollution research*, 101424. <https://doi.org/10.3390/atmos6010150>
- Liu, W., Xu, Z., & Yang, T.** (2018). Health effects of air pollution in China. *International journal of environmental research and public health*, 15(7), 1471. <https://doi.org/10.3390/ijerph15071471>
- Lokorai, K., Ali-Khodja, H., Khardi, S., Bencharif-Madani, F., Naidja, L., & Bouziane, M.** (2021). Influence of mineral dust on the concentration and composition of PM₁₀ in the city of Constantine. *Aeolian Research*. 50. 100677. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2021.100677>
- Lorenz, E. N.** (1963). Deterministic nonperiodic flow. *Journal of atmospheric sciences*, 20(2), 130-141.
- Markozannes, G., Pantavou, K., Rizos, E. C., Sindosi, O. A., Tagkas, C., Seyfried, M., ... & Ntzani, E.** (2022). Outdoor air quality and human health: An overview of reviews of observational studies. *Environmental Pollution*, 119309. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119309>
- Martinerie, J. M., Albano, A. M., Mees, A. I., & Rapp, P. E.** (1992). Mutual information, strange attractors, and the optimal estimation of dimension. *Physical Review A*, 45(10), 7058.
- Marwan, N., Thiel, M., & Nowaczyk, N. R.** (2002). Cross recurrence plot based synchronization of time series. *Nonlinear Processes in*
- Mckendry, I. G.** (1994). Synoptic circulation and summertime ground-level ozone concentrations at Vancouver, British Columbia. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 33(5), 627-641. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1994\)033%3C0627:SCASGL%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1994)033%3C0627:SCASGL%3E2.0.CO;2)
- Mishra SR, Pradhan RP, Prusty BAK, Sahu SK** (2016) Meteorology drives ambient air quality in a valley: a case of Sukinda chromite mine, one among the ten most polluted areas in the world. *Environ Monit Assess* 188:1–15
- Mocenni, C., Facchini, A., Vicino, A.,** 2011. Comparison of recurrence quantification methods for the analysis of temporal and spatial chaos. *Math. Comput. Model.* 53 (7–8), 1535–1545
- Moulin, C., Lambert, C. E., Dayan, U., Masson, V., Ramonet, M., Bousquet, P., et al.** (1998). Satellite climatology of African dust transport in the Mediterranean atmosphere. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 103(D11), 13137–13144.
- Mueller, W., Vardoulakis, S., Steinle, S., Loh, M., Johnston, H. J., Precha, N., ... & Cherrie, J. W.** (2021). A health impact assessment of long-term exposure to particulate air pollution in Thailand. *Environmental Research Letters*, 16(5), 055018. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abe3ba>
- Nogarotto, D. C., & Pozza, S. A.** (2020). A review of multivariate analysis: is there a relationship between airborne particulate matter and meteorological variables?. *Environmental monitoring and assessment*, 192(9), 1-14. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08538-1>.
- Novotny, J., Dejmál, K., Repal, V., Gera, M., & Sladek, D.** (2021). Assessment of TAF, METAR, and SPECI Reports Based on ICAO ANNEX 3 Regulation. *Atmosphere*, 12(2), 138. <https://doi.org/10.3390/atmos12020138>.

- Ozdemir, H., Mertoglu, B., Demir, G., Deniz, A., & Toros, H.** (2012). Case study of PM pollution in playgrounds in İstanbul. *Theoretical and Applied Climatology*, 108(3), 553-562. <https://doi.org/10.1007/s00704-011-0543-4>
- Özdemir, E. T.** (2019). Investigations of a southerly non-convective high wind event in Turkey and effects on PM₁₀ values: a case study on April 18, 2012. *Pure and Applied Geophysics*, 176(10), 4599-4622. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02240-1>
- Özdemir, E. T., Çapraz, Ö., & Deniz, A.** (2020). Mega Şehir İstanbul İçin Ekstrem Basınç Değerlerinde Partikül Madde (PM₁₀) Değişiminin Araştırılması. *Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences*, 5(4), 484-490. <https://doi.org/10.35229/jaes.759153>.
- Özdemir, E.T., Korkmaz, F.M., & Yavuz, V.** Synoptic analysis of dust storm over Arabian Peninsula: a case study on February 28, 2009. *Nat Hazards* 92. 805–827 (2018). <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3226-y>
- Plocoste, T., Calif, R., Euphrasie-Clotilde, L., & Brute, F. N.** (2020). Investigation of local correlations between particulate matter (PM₁₀) and air temperature in the Caribbean basin using Ensemble Empirical Mode Decomposition. *Atmospheric Pollution Research*, 11(10), 1692-1704. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.06.031>.
- Plocoste, T., Dorville, J. F., Monjoly, S., Jacoby-Koaly, S., & André, M.** (2018). Assessment of nitrogen oxides and ground-level ozone behavior in a dense air quality station network: Case study in the Lesser Antilles Arc. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 68(12), 1278-1300. <https://doi.org/10.1080/10962247.2018.1471428>.
- Prospero, J. M., Ginoux, P., Torres, O., Nicholson, S. E., & Gill, T. E.** (2002). Environmental Characterization of Global Sources of Atmospheric Soil Dust Identified with the Nimbus 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (toms) Absorbing Aerosol Product. *Reviews of Geophysics*, 40(1), 2-1-2-31. <https://doi.org/10.1029/2000RG000095>.
- Raga GB, Le Moyne L** (1996) On the nature of air pollution dynamics in Mexico City—I, nonlinear analysis. *Atmos Environ* 30:3987–3993
- Saarikoski S, Sillanpää M, Sofiev M, Timonen H, Saarnio K, Teinila K, Karppinen A, Kukkonen J, Hillamo R** (2007) Chemical composition of aerosols during a major biomass burning episode over northern Europe in spring 2006: experimental and modeling assessments. *Atmos Environ* 41:3577–3589. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.12.053>
- Scherrer, S. C. and Appenzeller, C.:** Swiss Alpine snow pack variability: major patterns and links to local climate and large-scale flow, *Clim. Res.*, 32, 187–199, <https://doi.org/10.3354/cr032187>, 2006.
- Scott, S. R., Dunion, J. P., Olson, M. L., & Gay, D. A.** (2022). Lead Isotopes in North American Precipitation Record the Presence of Saharan Dust. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 103(2), E281-E292. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-20-0212.1>
- Selvi, S. T., Nikkath, S. N., Mahalakshmi, N., & Mohamed, M. G.** (2022). Analysis of particulate component PM₁₀ over residential and commercial area in urban city of Chennai. *Materials Today: Proceedings*, 55, 425-429. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.478>
- Senghor, H., Roberts, A. J., Dieng, A. L., Wane, D., Dione, C., Fall, M. ... & Marsham, J.** (2021). Transport and Deposition of Saharan Dust Observed

- from Satellite Images and Ground Measurements. *Journal of Atmospheric Science Research*. 4(2). <https://doi.org/10.30564/jasr.v4i2.3165>
- Ser-Giacomi, E., Vasile, R., Recuerda, I., HernándezGarcía, E., and López, C.:** Dominant transport pathways in an atmospheric blocking event, *Chaos*, 25, 087413, <https://doi.org/10.1063/1.4928704>, 2015.
- Shahgedanova, M., Burt, T. P., & Davies, T. D.** (1998). Synoptic climatology of air pollution in Moscow. *Theoretical and Applied Climatology*, 61, 85-102. <https://doi.org/10.1007/s007040050054>
- Shakerkhatibi, M., Dianat, I., Asghari Jafarabadi, M., Azak, R., & Kousha, A.** (2015). Air pollution and hospital admissions for cardiorespiratory diseases in Iran: artificial neural network versus conditional logistic regression. *International journal of environmental science and technology*, 12(11), 3433-3442. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-94925-8>.
- She, L., Xue, Y., Yang, X., Guang, J., Li, Y., Che, Y., ... & Xie, Y.** (2018). Dust detection and intensity estimation using Himawari-8/AHI observation. *Remote Sensing*, 10(4), 490. <https://doi.org/10.3390/rs10040490>
- Sirdas, S. A., Özdemir. E. T., Sezen. İ., Efe. B., & Kumar. V.** (2017). Devastating extreme Mediterranean cyclone's impacts in Turkey. *Natural Hazards*. 87(1). 255-286. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-2762-1>
- Slini, T., Kaprara, A., Karatzas, K., & Moussiopoulos, N.** (2006). PM10 forecasting for Thessaloniki, Greece. *Environmental Modelling & Software*, 21(4), 559-565.
- Steinfeld, Jeffrey I.** "Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change." *Environment: Science and Policy for Sustainable Development* 40.7 (1998): 26-26.
- Takens, F.** (1981). Detecting strange attractors in turbulence. In *Dynamical systems and turbulence*, Warwick 1980 (pp. 366-381). Springer, Berlin, Heidelberg.
- UNEP, WMO, UNCCD** (2016) Global assessment of sand and dust storms. United Nations Environment Programme. Nairobi. https://wesr.unep.org/redesign/media/docs/assessments/global_assessment_of_sand_and_dust_storms.pdf
- Wallace, J., & Kanaroglou, P.** (2009). The effect of temperature inversions on ground-level nitrogen dioxide (NO₂) and fine particulate matter (PM_{2.5}) using temperature profiles from the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS). *Science of the Total Environment*, 407(18), 5085-5095. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.05.050>
- Weston, M. J., Temimi. M., Nelli. N. R., Fonseca. R. M., Thota. M. S., & Valappil. V. K.** (2020). On the analysis of the low-level double temperature inversion over the United Arab Emirates: A case study during April 2019. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 18(2). 346-350. DOI: 10.1109/LGRS.2020.2972597
- WMO** (World Meteorological Organization) (2019). Aerodrome Reports and Forecasts: A Users' Handbook to the Codes. WMO-No.782.
- Wolf A, Swift JB, Swinny HL et al** (1985) Determining Lyapunov exponents from a time series. *Phys D* 16:285–317
- Xu, Q., Xu, K.** Risk assessment and prevention of air pollution to protect citizen health based on statistical data: a case study of Zhengzhou, China. *Stoch Environ Res Risk Assess* 36, 2519–2534 (2022). <https://doi.org/10.1007/s00477-021-02127-5>

- Yamaji, K., Li, J., Uno, I., Kanaya, Y., Irie, H., Takigawa, M., ... & Akimoto, H.** (2010). Impact of open crop residual burning on air quality over Central Eastern China during the Mount Tai Experiment 2006 (MTX2006). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(15), 7353-7368. <https://doi.org/10.5194/acp-10-7353-2010>, 2010.
- Yang, W., Du, J., Jia, B. et al.** PM2.5 concentration prediction in Lanzhou, China, using hyperchaotic cuckoo search—extreme learning machine. *Stoch Environ Res Risk Assess* 37, 261–273 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00477-022-02293-0>
- Yang, W., Du, J., Jia, B. et al.** PM2.5 concentration prediction in Lanzhou, China, using hyperchaotic cuckoo search—extreme learning machine. *Stoch Environ Res Risk Assess* 37, 261–273 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00477-022-02293-0>
- Yavuz, V., Özen, C., Çapraz, Ö., Özdemir, E. T., Deniz, A., Akbayır, İ., & Temur, H.** (2022). Analysing of atmospheric conditions and their effects on air quality in Istanbul using SODAR and CEILOMETER. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(11), 16213-16232. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16958-w>.
- Yu, B., Huang, C., Liu, Z., Wang, H., & Wang, L.** (2011). A chaotic analysis on air pollution index change over past 10 years in Lanzhou, northwest China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 25(5), 643-653.
- Yun, S. G., & Yoo, C.** (2019). The effects of spring and winter blocking on PM10 concentration in Korea. *Atmosphere*, 10(7), 410. <https://doi.org/10.3390/atmos10070410>
- Zarei, A. R., Mahmoudi, M. R., & Shabani, A.** (2021). Investigating of the climatic parameters effectiveness rate on barley water requirement using the random forest algorithm, Bayesian multiple linear regression and cross-correlation function. *Paddy and Water Environment*, 19(1), 137-148. <https://doi.org/10.1007/s10333-020-00825-4>.
- Zhou, H., Deng, Z., Xia, Y., & Fu, M.** (2016). A new sampling method in particle filter based on Pearson correlation coefficient. *Neurocomputing*, 216, 208-215. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2016.07.036>.
- Zoran, M. A., Savastru, R. S., Savastru, D. M., & Tautan, M. N.** (2020). Assessing the relationship between surface levels of PM2. 5 and PM10 particulate matter impact on COVID-19 in Milan, Italy. *Science of the total environment*, 738, 139825. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139825>
- Url-1** <<https://www.tuik.gov.tr/>>, erişim tarihi 10.03.2022.
- Url-2** <<https://havakalitesi.ibb.gov.tr/>>, erişim tarihi 15.01.2022.
- Url-3** <<https://mesonet.agron.iastate.edu/request/download.phtml>>, erişim tarihi 10.02.2022.
- Url-4** <<https://airindex.eea.europa.eu/Map/AQI/Viewer/>>, erişim tarihi 15.04.2022.
- Url-5** <<https://www.mgm.gov.tr/>>, erişim tarihi 16. 02.2023.
- Url-6** <<https://w1.weather.gov/glossary/index.php?letter=s>>, erişim tarihi 13.03.2022.
- Url-7** <<http://www1.wetter3.de/>>, erişim tarihi 15.03.2022.
- Url-8** <<https://navigator.eumetsat.int/product/EO:EUM:DAT:MSG:DUST>>, erişim tarihi 16.03.2022.
- Url-9** <<https://earthobservatory.nasa.gov/images/77675/dust-off-the-libya-coast>>, erişim tarihi 16.03.2022.
- Url-10** <<https://terra.nasa.gov/about/terra-instruments/%20modis>>, erişim tarihi 17.03.2022.
- Url-11** <<http://ess.bsc.es/bsc-dust-daily-forecast>>, erişim tarihi 30.03.2022.

Url-12 < <https://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>. > , erişim tarihi 30.03.2022.
Url-13 <<http://sim.csb.gov.tr/SERVICES/airquality>. >, erişim tarihi 30.07.2022.
Url-14 <<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>. >, erişim tarihi 15.01.2023.
Url-15 <https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>. >, erişim tarihi 15.01.2023.





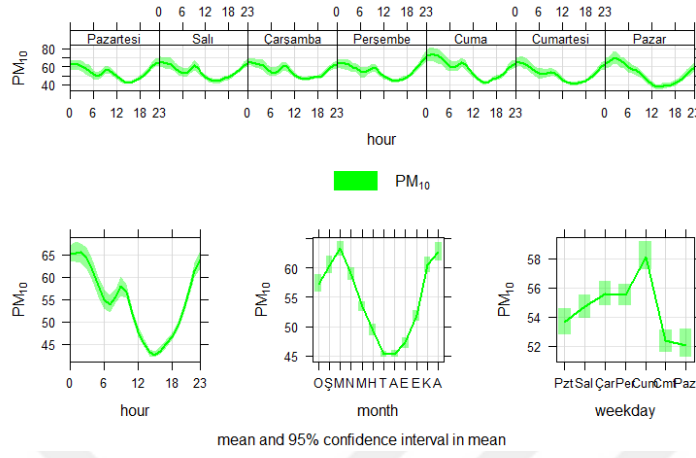
EKLER

EK A: PM₁₀ konsantrasyonunun saatlik, haftalık ve aylık değişimleri ve 2011-2018 yılları arasındaki özet grafiği

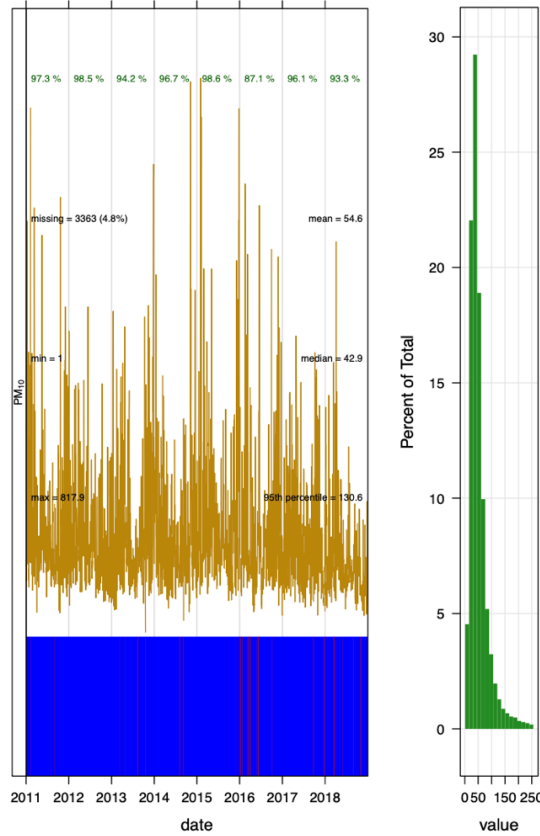
EK B: 2011- 2018 yılları arasındaki Rüzgar şiddeti ve yön değerlerinin K-means cluster dağılımı ve 5 Nisan 2013 00:45 UTC Calipso görüntüsü



EK A: PM₁₀ konsantrasyonunun saatlik, haftalık ve aylık değişimleri ve 2011-2018 yılları arasındaki özet grafiği

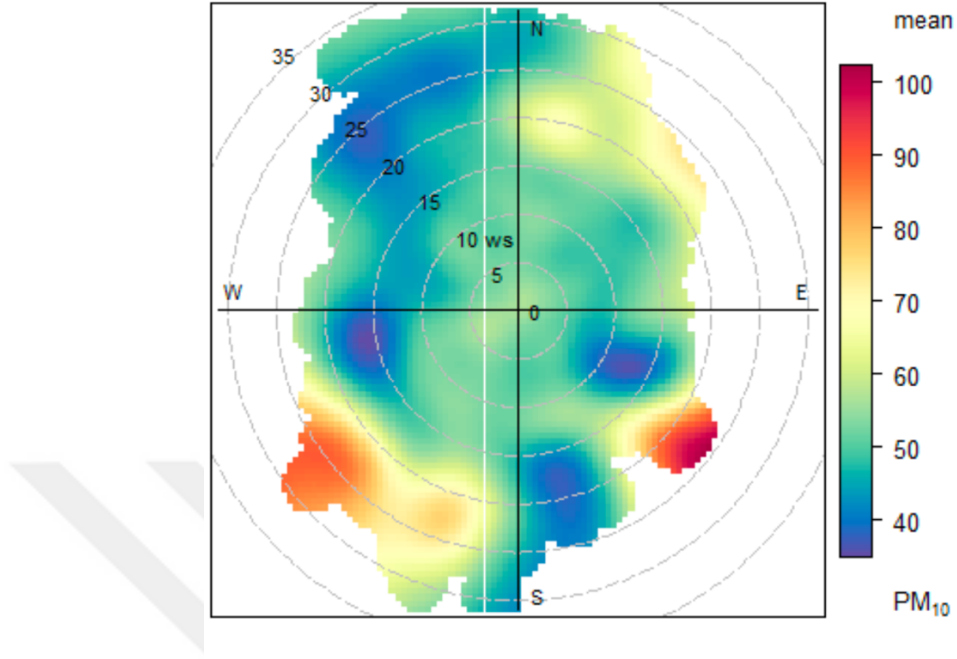


Şekil A.1: PM₁₀ konsantrasyonunun saatlik, haftalık ve aylık değişimleri

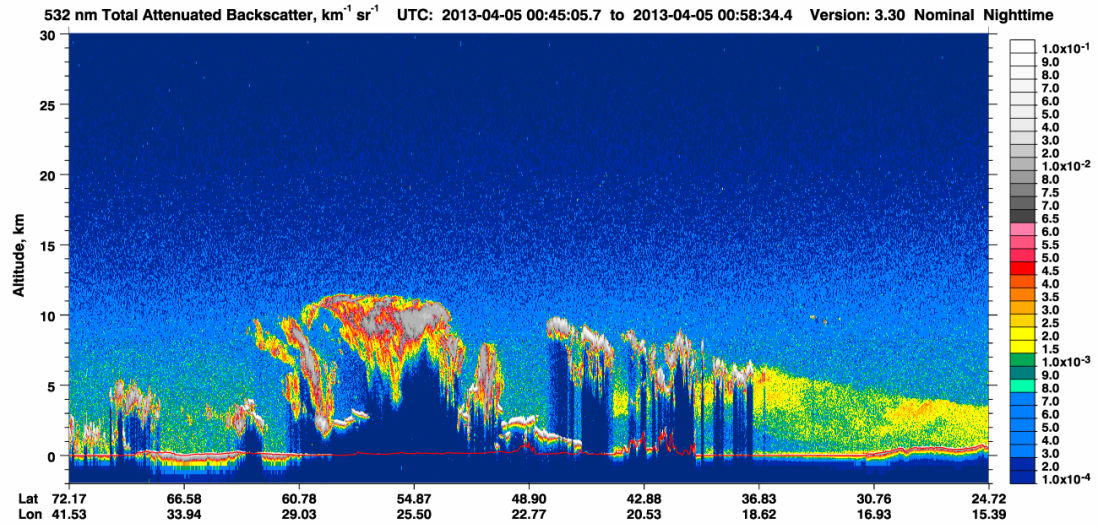


Şekil A.2: PM₁₀ konsantrasyonunun 2011-2018 yılları arasındaki özet grafiği

EK B: 2011- 2018 yılları arasındaki Rüzgar şiddeti ve yön değerlerinin K-means cluster dağılımı ve 5 Nisan 2013 00:45 UTC Calipso görüntüsü



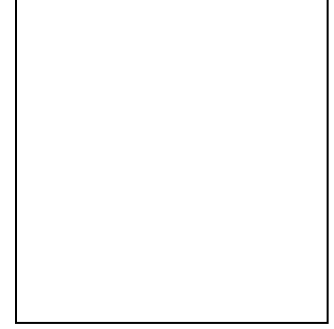
Şekil B.1: 2011- 2018 yılları arasındaki rüzgar şiddeti ve yön değerlerinin K-means cluster dağılımı



Şekil B.2: 5 Nisan 2013 00:45 UTC Calipso görüntüsü



ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Enes BİRİNCİ

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2021, İstanbul Teknik Üniversitesi, Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Meteoroloji Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2022 yılından itibaren İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi Meteoroloji Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.
- 01.08.2018 – 01.11.2022 tarihleri arasında İTÜ Kariyer ve Staj Merkezinde çalıştı.

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

YAYINLAR (SCOPUS, SCI ve SCIE MAKALELERİ):

- **Birinci, E., Deniz, A. & Özdemir, E.T.** The relationship between PM10 and meteorological variables in the mega city Istanbul. Environ Monit Assess 195, 304 (2023a). <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10866-3>
- **Birinci, E., Özdemir, E.T. & Deniz, A.** An investigation of the effects of sand and dust storms in the North East Sahara Desert on Turkish airports and PM10 values: 7 and 8 April, 2013 events. Environ Monit Assess 195, 708 (2023b). <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11288-5>
- **Birinci, E., Denizoğlu, M., Özdemir, H. et al.** Ambient air quality assessment at the airports based on a meteorological perspective. Environ Monit Assess 195, 1542 (2023c). <https://doi.org/10.1007/s10661-023-12135-3>

GÖNDERİLEN YAYINLAR (SCOPUS & SCI & SCI-E MAKALELERİ):

- Özdemir, E.T, **Birinci, E.** & Deniz, A. Effects Of Atmospheric Blocking On Air Quality Through Ceilometer and Observations in the Megacity İstanbul. International Journal of Environmental Science and Technology
- **Birinci, E.**, Çeker, A.O., Plocoste, T., Calif, R., Ozdemir, H. & Özdemir, E.T. Determination of Relationships Between Air Pollutants and Meteorological Variables in Megacity İstanbul
- **Birinci, E.**, Özdemir, E.T., Deniz, A & Plocoste, T. Investigation of PM₁₀ chaotic features in Türkiye using recurrence analysis

KONFERANS BİLDİRİLERİ & POSTER (ULUSAL ve ULUSLARARASI)

- **Birinci, E.**, Özdemir, E. T., Deniz, A. (2022). An investigation of the effects of dust transport and dust storms on PM₁₀ and PM_{2.5} at airports in the Marmara region of Türkiye, 10th International Symposium On Atmospheric Sciences - ATMOS'22, Maslak, İstanbul, Türkiye
- **Birinci, E.**, Özdemir, H., Özdemir, E. T. (2023). Uzun Mesafeli Toz Taşınımının Havalimanlarına Olan Etkilerinin İncelenmesi: 29 Kasım 2021 Olayı, Uzalmet 2023, Uluslararası Katılımlı V. Meteorolojik Uzaktan Algılama Sempozyumu, 14-17 Kasım 2023, Alanya, Antalya, p. 261-275.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR, PROJELER VE PATENTLER :

- **Birinci, E.**, Çağlıyan, A. & Kadioğlu, M. (2022). An investigation of thunderstorm over İstanbul: 27 July 2017 event. 10th International Symposium on Atmospheric Sciences. 18-21 October İstanbul.
- İTÜ Bap Projesi - Türkiyede hava kirliliği konsantrasyon değerlerinin meteorolojik değişkenler ile arasındaki ilişkilerin belirlenmesi ve kirletici konsantrasyonlarının doğası (Tez Öğrenci Projesi)
- İTÜ Bap Projesi - Mega Şehir İstanbul'da Meydana Gelen Fırtınaların Sinoptik Paternlerinin Klimatolojik Araştırılması ve Tahmin Edilmesi (Araştırmacı)
- Tübitak Projesi - İklim değişikliği ve iklimde meydana gelen ekstrem durumların bitkilerin fenolojik evreleri, ürün miktarı, biyokütle ve karbon tutma kapasiteleri üzerine olan etkilerinin incelenmesi (Bursiyer)