T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

TÜRKİYE GENELİNDE PM10 KONSANTRASYONLARININ EOF/REOF ANALİZİ İLE MEVSİMSEL DEĞİŞİMİNİN İNCELENMESİ

Mir BAHA UD DIN

DANIŞMAN
Prof. Dr. Burcu ONAT

II. DANIŞMAN
Doç. Dr. Hakkı BALTACI

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Mühendisliği, Doktora Programı

Temmuz, 2024

TEZ KABUL VE ONAYI

Mir BAHA UD DIN tarafından, **Prof. Dr. Burcu ONAT** danışmanlığında hazırlanan **" TÜRKİYE GENELİNDE PM10 KONSANTRASYONLARININ EOF/REOF ANALİZİ İLE MEVSİMSEL DEĞİŞİMİNİN İNCELENMESİ"** başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından **12/07/2024** tarihinde yapılan sınav sonucunda **oy birliği** ile başarılı bulunarak **Doktora Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

		İmza	Sonuç
DANIŞMAN	Prof. Dr. Burcu ONAT İstanbul Üniversitesi- Cerrahpaşa Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. Hüseyin Kurtuluş ÖZCAN İstanbul Üniversitesi- Cerrahpaşa Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. Bülent Oktay AKKOYUNLU Marmara Üniversitesi Fizik Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Doç. Dr. Naim SEZGİN İstanbul Üniversitesi- Cerrahpaşa Çevre MühendisliğiAnabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Doç. Dr. Burçak KAYNAK TEZEL İstanbul Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret

Aileme ithaf ediyorum…

BÜTÇE DESTEKLERİ

TÜRKİYE GENELİNDE PM10 KONSANTRASYONLARININ EOF/REOF ANALİZİ İLE MEVSİMSEL DEĞİŞİMİNİN İNCELENMESİ
Bu tez çalışması için herhangi bir kurumdan bütçe desteği alınmamıştır.

TEŞEKKÜR

Öncelikle doktora boyunca uzmanlığı, anlayışı ve rehberliği çok değerli olan danışmanım Prof. Dr. Burcu ONAT'a en derin şükranlarımı sunmak isterim. Değerli hocamın anlayışlı geri bildirimleri ve sarsılmaz desteği bu tezin tamamlanmasına önemli ölçüde katkıda bulunmuştur.

Ayrıca eş danışmanım Doç.Dr. Hakkı BALTACI'ya tez çalışmamın her aşamasında sürekli teşviki ve motivasyonu ve desteği için derinden minnettarım ve kendisinin işime olan coşkusu ve inancı sürekli bir ilham kaynağı olmuştur.

Ayrıca tez komite üyelerim olan değerli hacalarım Prof. Bülent Oktay AKKOYUNLU ve Prof. Hüseyin Kurtuluş ÖZCAN'a da içten teşekkürlerimi sunarım. Onların sürekli desteği, yapıcı eleştirisi ve değerli geri bildirimleri, araştırmamı geliştirmemde ve bu çalışmayı hayata geçirmemde çok önemli olmuştur.

Son olarak, beni her zaman ve her koşulda destekleyen sevgili aileme teşekkür eder, şükranlarımı sunarım.

Temmuz 2024 Mir BAHA UD DIN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ KABUL VE ONAYI ..... **ii**
BÜTÇE DESTEKLERİ ..... **iv**
TEŞEKKÜR ..... **v**
İÇİNDEKİLER ..... **vi**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **viii**
TABLO LİSTESİ ..... **xi**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **xii**
ÖZET ..... **xiii**
ABSTRACT ..... **xv**
1. GİRİŞ **1**
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE **5**
2.1. PM_{10} 5
2.1.1. PM_{10}'un Kaynakları 6
2.1.2. PM_{10}'un Zararlı Etkileri 6
2.1.3. PM_{10} için Sınır Değerler 8
2.1.4. PM_{10} Ve Meteorolojik Koşullar 9
2.2. LİTERATÜR İNCELEMESİ 9
2.2.1. Yurt Dışında Yapılan Çalışmalar 10
2.2.2. Türkiye'de Yapılan Çalışmalar 12
3. YÖNTEM **16**
3.1. PM_{10} VERİLERİ 16
3.2. NCEP/NCAR REANALİZ VERİLERİ VE SİNOPTİK HARİTALARI 18
3.3. EOF/REOF ANALİZİ 19
3.4. CBS UYGULAMA 24
3.5. CBS TABANLI IDW ENTERPOLASYONU 25
4. BULGULAR **28**
4.1. PM_{10} KONSANTRASYONLARI 28
4.2 REOF ANALİZİNİN SONUÇLARI 36

4.2.1 REOF1'e Göre Kirliliği Açısından Önemli Bölgeler 36
4.2.2 REOF2'e Göre Kirliliği Açısından Önemli Bölgeler 42
4.2.3 REOF3 ve REOF4 Sonuçları 48
4.3 YÜKSEK/DÜŞÜK PM_{10} KONSANTRASYONLARI VE KOMPOZİT HARITALARI 57
5. TARTIŞMA **60**
5.1 PM_{10} KONSANTRASYONLARININ ZAMANSAL VE MEKANSAL DAĞILIMI 60
5.2. REOF ANALİZİ SONUÇLARINA GÖRE PM_{10}'UN ZAMANSAL VE MEKANSAL DAĞILIMI 62
5.3 KOMPOZİT HARİTALARI VE YÜKSEK PM_{10} KONSANTRASYONLARI 67
6. SONUÇ VE ÖNERİLER **72**
KAYNAKLAR **74**
İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI **86**
KURUM İZNİ YAZILARI **87**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: PM_{10} ve $PM_{2.5}$ boyutlarının karşılaştırması (EPA, 2024). 6

Şekil 2.2: Aerosollerin iklim üzerindeki doğrudan ve dolaylı olarak ışınımsal etkileri (Gammoudi et al.,2024) 8

Şekil 3.1: (a) Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (Ulusal Hava Kalitesi Gözlem Ağı), (b) istasyon verileri indirme sayfası, (c) istasyonlara göre PM_{10} verileri i ndirme sayfası, (d) indirilmiş ham PM_{10} saatlik verileri (excel formatında). 18

Şekil 3.2: Türkiye'deki 80 hava kalitesi istasyonunun dağılımı. (istasyon numaralarının açıklamasıTablo 4.1'de verilmiştir) 18

Şekil 3.3: PM_{10} verilerine REOF analizi uyguladıktan sonra elde edilen mevsimsel REOF modları. 23

Şekil 3.4: PM_{10} verilerine REOF analizi uyguladıktan sonra elde edilen mevsimsel PC modları. 24

Şekil 3.5: Kullandığımız ArcGIS10.5 uygulamasından bir ekran görüntüsü. 25

Şekil 4.1: 2010–2020 dönemi için Türkiye'deki aylık ortalama PM_{10}'un Box-plot grafikleri (seçilen 80 hava kalitesi istasyonu için). Kutu içindeki x medyan değeri ve düz çizgi ortalama değeri gösteriyor. 33

Şekil 4.2: 2010–2020 dönemi için PM_{10} konsantrasyon değerlerinin Türkiye genelinde mevsimlere göre aylık aritmetik ortalama değerleri : a)Kış b)Bahar c)Yaz d)Sonbahar 34

Şekil 4.3: 2010–2020 dönemi için Türkiye'deki PM_{10} konsantrasyonlarının mevsimsel değişimleri 35

Şekil 4.4: 2010-2020 dönemi için Türkiye'deki kış PM_{10} konsantrasyonlarının (a) REOF1 ve ilgili (b) PC zaman serileri (Şekillerin üzerindeki sayılar varyansın yüzdesini göstermektedir). 38

Şekil 4.5: 2010–2020 dönemi için Türkiye genelinde bahar PM_{10} konsantrasyonlarının (a) REOF1 ve ilgili (b) PC zaman serileri. (Şekillerin üzerindeki sayılar varyansın yüzdesini göstermektedir.) 39

Şekil 4.6: 2010-2020 dönemi için Türkiye'deki yaz PM_{10} konsantrasyonlarının (a) REOF1 ve ilgili (b) PC zaman serileri. Şekillerin üzerindeki sayılar varyansın yüzdesini göstermektedir. 40

Şekil 4.7: 2010–2020 dönemi için Türkiye genelinde sonbahar PM_{10} konsantrasyonlarının (a) REOF1 ve ilgili (b) PC zaman serileri. (Şekillerin üzerindeki sayılar varyansın yüzdesini göstermektedir.)..... 41

Şekil 4.8: 2010-2020 dönemi için Türkiye'deki kış PM_{10} konsantrasyonlarının (a) REOF2 ve ilgili (b) PC zaman serileri. (Şekillerin üzerindeki sayılar varyansın yüzdesini göstermektedir)..... 43

Şekil 4.9: 2010–2020 dönemi için Türkiye'deki bahar PM_{10} konsantrasyonlarının (a) REOF2 ve ilgili (b) PC zaman serileri. (Şekillerin üzerindeki sayılar varyansın yüzdesini göstermektedir)..... 44

Şekil 4.10: 2010-2020 dönemi için Türkiye'deki yaz PM_{10} konsantrasyonlarının (a) REOF2 ve ilgili (b) PC zaman serileri. (Şekillerin üzerindeki sayılar varyansın yüzdesini göstermektedir)..... 45

Şekil 4.11: 2010-2020 dönemi için Türkiye genelinde sonbahar PM_{10} konsantrasyonlarının (a) REOF2 ve ilgili (b) PC zaman serileri. (Şekillerin üzerindeki sayılar varyansın yüzdesini göstermektedir)..... 46

Şekil 4.12: Türkiye'de 2010–2020 dönemi için yüksek REOF2 değerlerine sahip istasyonların mevsimsel ortalama PM_{10} konsantrasyon değerleri. 47

Şekil 4.13: 2010-2020 dönemi için Türkiye genelinde kış PM_{10} konsantrasyonlarının (a) REOF3 ve ilgili (b) PC zaman serileri. (Şekillerin üzerindeki sayılar varyansın yüzdesini göstermektedir)..... 49

Şekil 4.14: 2010-2020 dönemi için Türkiye'deki bahar PM_{10} konsantrasyonlarının (a) REOF3 ve ilgili (b) PC zaman serileri. (Şekillerin üzerindeki sayılar varyansın yüzdesini göstermektedir)..... 50

Şekil 4.15: 2010-2020 dönemi için Türkiye'deki yaz PM_{10} konsantrasyonlarının (a) REOF3 ve ilgili (b) PC zaman serileri. (Şekillerin üzerindeki sayılar varyansın yüzdesini göstermektedir)..... 51

Şekil 4.16: 2010-2020 dönemi için Türkiye genelinde sonbahar PM_{10} konsantrasyonlarının (a) REOF3 ve ilgili (b) PC zaman serileri. (Şekillerin üzerindeki sayılar varyansın yüzdesini göstermektedir)..... 52

Şekil 4.17: 2010-2020 dönemi için Türkiye'deki kış PM_{10} konsantrasyonlarının (a) REOF4 ve ilgili (b) PC zaman serileri. (Şekillerin üzerindeki sayılar varyansın yüzdesini göstermektedir)..... 53

Şekil 4.18: 2010-2020 dönemi için Türkiye'deki bahar PM_{10} konsantrasyonlarının (a) REOF4 ve ilgili (b) PC zaman serileri. (Şekillerin üzerindeki sayılar varyansın yüzdesini göstermektedir)..... 54

Şekil 4.19: 2010-2020 dönemi için Türkiye'deki yaz PM_{10} konsantrasyonlarının (a) REOF4 ve ilgili (b) PC zaman serileri. (Şekillerin üzerindeki sayılar varyansın yüzdesini göstermektedir)..... 55

Şekil 4.20: 2010–2020 dönemi için Türkiye genelinde sonbahar PM_{10} konsantrasyonlarının (a) REOF4 ve ilgili (b) PC zaman serileri. (Şekillerin üzerindeki sayılar varyansın yüzdesini göstermektedir). 56

Şekil 4.21: Seçilen bölgelerin (kahverengi dikdörtgenler) yüksek (sol panel) ve düşük (sağ panel) PM_{10} değerlerine sahip istasyonlar (Şekil 4.12) sırasındaki aylık ortalama 1000 hPa rüzgar alanlarının (vektörler, ms^{-1}) kompozit haritaları (Kış, ilkbahar, yaz ve sonbahar). Bileşik analizin oluşturulmasında yüksek ve düşük PC2 yılları da dikkate alınmıştır. 58

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1 Türkiye, EPA, DSÖ, ve AB PM_{10} sınır değerleri.....9

Tablo 4.1: Seçilen 80 hava kalitesi izleme istasyonunun koordinatları (yani boylam, enlem) ve çalışma dönemi (2010–2020) için yıllık ortalama PM_{10} konsantrasyonları. (İstasyon konumları Şekil 3.2'de verilmiştir).....28

Tablo 4.2: İlk dört baskın REOF modun varyansının yüzdesi. 36

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Kısaltmalar	Açıklama
DAB	Doğu Anadolu bölgesi
GAB	Güneydoğu Anadolu Bölgesi
DSÖ	Dünya Sağlık Örgütü
AB	Avrupa Birliği
KB	Karadeniz Bölgesi
PM	Partikül Madde
NCEP/NCAR	Ulusal Çevresel Tahmin Merkezleri (NCEP) ve Ulusal Atmosfer Araştırmaları Merkezi
CCN	Bulut Yoğuşma Çekirdeği

ÖZET

DOKTORA TEZİ

TÜRKİYE GENELİNDE PM10 KONSANTRASYONLARIN EOF/REOF ANALİZİ İLE MEVSİMSEL DEĞİŞİMİNİN İNCELENMESİ

Mir BAHA UD DIN

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Mühendisliği, Doktora Programı

Danışman : Prof. Dr. Burcu ONAT

II. Danışman : Doç. Dr. Hakkı BALTACI

Hava kirliliği en temel çevre sorunlarından biridir ve PM_{10} gibi hava kirleticileri, iklim sistemini etkilemenin yanı sıra insan sağlığına, çevreye ve ekosisteme ciddi bir tehdit oluşturan önemli bir atmosferik kirletici olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmada PM_{10}'un kaynaklarını ve dolaşım davranışını ortaya koymak amacıyla Türkiye genelinde 80 hava kalitesi istasyonunda 2010-2020 döneminde günlük ortalama PM_{10} verilerine döndürülmüş ampirik ortogonal fonksiyon (REOF) analizi uygulanmış ve PM_{10} konsantrasyonlarının EOF/REOF analizi ile Türkiye'deki mevsimsel değişimi incelenmiştir. On yıllık dönemde günlük PM_{10} verilerinin uygulanan REOF analiz sonuçları ilk REOF modu (REOF1) toplam değişkenliğinin kış, ilkbahar, yaz ve sonbaharda sırasıyla %44,9, %43,2, %39,5 ve %31,6 olmak üzere dört mevsimde de yerel emisyon kaynaklarının PM_{10} değişimleri üzerinde etkili olduğunu ve kirlilik bakımından önemli istasyonların birbirine uzak farklı coğrafi bölgelerde bulunduğunu göstermiştir (kış mevsiminde REOF1 için önemli istasyonlar Adana Meteoroloji, Çanakkale , Erzincan, Giresun, Kastamonu ve Sinop). Benzer durum ilkbahar, yaz ve sonbahar mevsimlerinde de görülmüştür. İkinci REOF modunun (REOF2) sonuçları kış, ilkbahar, yaz ve sonbahar mevsimlerinde sırasıyla %17,9, %14,0, %14,0 ve %16,3 olarak bulunmuş ve PM_{10}'da

büyük ölçekli atmosferik sirkülasyonların etkisi olduğunu göstermiştir. REOF2 analizi ve sinoptik kompozit haritalardan elde edilen sonuçlara göre PM_{10}'un kış aylarında Arap Yarımadası ve Kuzey Afrika'dan Türkiye'nin Doğu Anadolu (DAB) ve Güneydoğu Anadolu (GAB) bölgelerine taşınmasında sırasıyla güney rüzgarlarının kuvvetinin ve düşük seviyelerde güneybatı rüzgarlarının varlığının önemli olduğu görülmüştür. İlkbahar aylarında ülkenin iç karasal kısmındaki kum parçacıkları, büyük ölçekli güney rüzgarlarının etkisiyle kuzey bölgelere taşınmakta, bu da Türkiye'nin Karadeniz Bölgesi'nde sınır değerin üzerinde PM_{10} konsantrasyonlarına neden olmaktadır. Yaz aylarında, kuvvetli doğu rüzgarları ile Türkiye'nin doğu bölgesine giren sıcak kuru hava ile birlikte toz parçacıkları Hazar Denizi'nden gelmekte ve yüksek PM_{10} değerlerine neden olmaktadır. Bulgularımız, Türkiye'de hava kalitesindeki mevsimsel değişimlerin büyük ölçekli atmosferik sirkülasyonlardan ikincil olarak etkilendiğini ve birincil katkının ise yerel emisyon kaynaklarındaki değişimlerden kaynaklandığını göstermiştir.

Temmuz 2024 , 107. sayfa.

Anahtar kelimeler: EOF, NCEP/NCAR yeniden analizi, PM_{10}, Sinoptik kompozitler, Türkiye

ABSTRACT

Ph.D. THESIS

INVESTIGATION OF THE SEASONAL VARIATIONS OF PM10 CONCENTRATIONS WITH EOF/REOF ANALYSIS ACROSS TÜRKİYE

Mir BAHA UD DIN

İstanbul University-Cerrahpaşa

Institute of Graduate Studies

Department of Environmental Engineering

Environmental Engineering Programme

Supervisor : Prof. Dr. Burcu ONAT

Co-Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Hakkı BALTACI

Air pollution is one of the main environmental issues and air pollutants like PM_{10} is widely identified as an important atmospheric pollutant posing a serious threat to human health, environment, the ecosystem as well as influences the climate system. To unearth the mechanism involved in its sources and circulation behavior in environment, this study focuses on seasonal variability of PM_{10} over Türkiye by applying rotated empirical orthogonal functions (REOF) analysis to the daily PM_{10} observations for 80 stations for the period 2010-2020, that are homogenously distributed over Türkiye. As a result of the implementation of REOF to the daily PM_{10} data for 80 air quality stations throughout the study period 2010‑2020, the first REOF mode (REOF1 44.9% in winter, 43.2% in spring, 39.5% in summer and 31.6% in fall) for all the four seasons indicated the role of local emission sources on the variations of PM_{10}, which show high PM_{10} values in different geographical regions located in distant proximities from each other (e.g for winter REOF1 the identified significant stations are Adana Meteoroloji, Canakkale, Erzincan, Giresun, Kastamonu, and Sinop. Same is with spring, summer and fall

seasons). The results of the second mode (REOF2, 17.9% in winter, 14.0% in spring, 14.0% in summer and 16.3% in fall) indicate the role of large-scale atmospheric circulations on the values of PM_{10}. From the REOF2 analysis and extracted synoptic composite maps, it was observed that the strength of southerly winds and the presence of southwesterly winds at low levels are very important in transporting dust pollutants from the Arabian Peninsula and Northern Africa, respectively, to the eastern (EAR) and southeastern (SEAR) regions of Türkiye during winter. In spring, sand particles in the interior terrestrial part of the country are carried to the northern regions by the effect of large-scale southerly winds, which cause above-normal PM_{10} concentrations in the Black Sea region of Türkiye. In summer, dust particles together with warm dry air intrusion to the eastern region of Türkiye by strong easterly winds are sourced by Caspian Sea and result in high PM_{10} values. Our findings emphasize that the long-term variations in air quality over Türkiye are affected secondary by the variations in the large-scale atmospheric circulations with primary contributions from the changes in local emission sources.

July 2024, 107. pages.

Keywords: EOF, NCEP/NCAR reanalysis, PM_{10} , Synoptic composites, Türkiye

1. GİRİŞ

Dünya Sağlık Örgütü (DSO) hava kirliliğini “iç ve dış ortamın ve atmosferin doğal niteliklerini değiştirme eğiliminde olan kimyasal, fiziksel veya biyolojik nitelikteki etkenler tarafından kirlenmesi ” olarak tanımlamaktadır (WHO,2024). Dünya Sağlık Örgütü'ne göre, yıllık bazda yaklaşık 7 milyon erken ölüm, dış ve iç ortam hava kirliliğinin birleşik etkileriyle ilişkilidir (WHO, 2024). Hava kirliliğinin kaynakları iki geniş kategoriye ayrılabilir: doğal ve insan kaynaklı. Hava kirleticilerin doğal kaynakları arasında rüzgarla savrulan toz, yanardağlardan çıkan kül ve gazlar, yıldırım, , bitki örtüsü ve ormanlardan gelen esterler ve terpenler gibi kimyasallar, orman yangınlarından kaynaklanan duman, gazlar ve uçucu küller, polenler, ve doğal radyoaktivitenin yanı sıra doğal ayrışmalardan kaynaklanan diğer aeroalerjenler, gazlar ve kokular sayılabilir (Theodore, 2008). Antropojenik hava kirliliği kaynakları arasında trafik, endüstriyel faaliyetler, inşaat, tarımsal faaliyetler ve diğer insan faaliyetleri yer almaktadır. Kriter hava kirleticileri olarak da bilinen altı ana hava kirleticilerin arasında partikül madde (PM_{10}, $PM_{2.5}$), kükürt dioksit (SO_2), azot dioksit (NO_2), karbon monoksit (CO), kurşun (Pb) ve yer seviyesinde bulunan ozon (O_3) yer almaktadır (Suh ve diğerleri, 2000, Theodore, 2008). Bu çalışmada, odak noktamız, aerodinamik çapı 10 mikrometre veya daha küçük olan partikül madde (PM_{10}) ve bunun Türkiye'deki mevsimsel konsantrasyonları üzerindeki büyük ölçekli atmosferik sirkülasyonların etkisini araştırmaktır. Partikül madde (PM), havada bulunan PM_{10} ve $PM_{2.5}$ dahil olmak üzere solunabilen katı parçacıkların ve sıvı damlacıkların bir kombinasyonudur (Shukla ve diğerleri, 2020). Aerodinamik çapı 10 μm veya daha küçük partikül madde (PM_{10}), çevrenin yanı sıra insan sağlığı üzerinde de ciddi olumsuz etkiler yaratan önemli bir atmosferik kirletici olarak kabul edilmektedir (Chen ve diğerleri, 2013; Dockery ve Pope, 1994; Grantz ve diğerleri, 2003; Harrison ve Yin, 2000; Hong ve diğerleri, 2002; Hyslop, 2009; Tahery ve diğerleri, 2021). PM_{10}'a uzun süreli maruz kalmak, dünya çapında yılda yaklaşık bir milyon erken ölümden sorumlu olan solunum hastalıkları, kardiyovasküler hastalıklar, pulmoner ve sistemik inflamasyon ve akciğer kanseri gibi hastalıklarda artışa sebep olmaktadır (Atkinson ve diğerleri, 2001; Bodor ve diğerleri, 2021; Cohen ve diğerleri, 2005; Niu ve diğerleri, 2021). PM_{10}, insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerinin yanı sıra bulut yoğuşma çekirdeği (CCN) görevi görerek iklim sistemlerini de

etkilenmektedir (Galvão ve diğerleri, 2018; Twohy ve diğerleri, 2009, Foltz ve McPhaden, 2008).

Hava kalitesini izlemek ve temiz hava eylem planları hazırlamak için hava kirletici konsantrasyonlarının sürekli olarak ölçülmesi ve değerlendirilmesi gerekmektedir. PM_{10}'un insan ve çevre sağlığına zararlı etkilerinin önlenmesi için aşılmaması gereken limit değerler belirlenmiştir. Türkiye, 2019 yılından bu yana PM_{10} için Avrupa Birliği (AB) ile aynı limit değerleri uygulamaktadır (yıllık ortalama 40 $\mu g/m^3$ ve günlük ortalama 50 $\mu g/m^3$ (Zeydan, 2021). DSÖ'nün PM_{10} için önerdiği limit değerler yıllık ortalama için 15 $\mu g/m^3$ ve günlük ortalama için 45 $\mu g/m^3$ ür. (WHO, 2021).

Meteorolojik koşullar PM_{10}'un dispersiyonu, dolaşımı ve taşınmasında önemli bir rol oynamaktadır. PM_{10} kirliliğinin yüksek olduğu bölgeler genellikle düşük rüzgar hızı, yüksek nem ve düşük yağış gibi olumsuz meteorolojik koşullara sahiptirler (Xu vd., 2018). PM_{10} kirliliğini etkileyen meteorolojik değişkenlerden bazıları sıcaklık, çiğlenme noktası, deniz seviyesi basıncı, bulutluluk oranı, rüzgar hızı ve rüzgar yönüdür. PM_{10} kaynağına, dağılımına, yerel ve uzun mesafeli taşınımına ve ayrıca insan sağlığı ve ekosistem üzerindeki etkilerine odaklanılarak farklı teknikler ve yöntemlerle yıllardır dünya çapında kapsamlı bir şekilde araştırılmaktadır. Ancak büyük ölçekli atmosferik sirkülasyonların mevsimsel PM_{10} konsantrasyon seviyeleri üzerindeki rolünü Ampirik Ortogonal Fonksiyon (EOF) analizi kullanarak gösteren çalışmalar oldukça sınırlıdır. EOF analizi, bir veri kümesini, veri kümesi içindeki dalgalanmaları mümkün olduğu kadar yetkin bir şekilde açıklığa kavuşturan bir dizi serbest yapıya bölmek için son derece değerli bir metod olarak bilinmektedir. Veri setindeki varyansı anlamlı bir şekilde açıklaması nedeniyle EOF analizi uzun süredir farklı alanlarda kullanılmaktadır (Lorenz, 1956; Monahan vd., 2009). Literatürdeki bu tekniği PM_{10} konsantrasyonlarına uygulayan bazı çalışmalar bulunmaktadır. Örneğin, Juneng ve diğerleri (2011), Malezya'nın Klang Vadisi'ndeki yaz muson kurak mevsimleri sırasında PM_{10} konsantrasyonundaki değişimlerle ilişkili faktörleri (yerel ve sinoptik hava koşulları) incelemek için EOF tekniğini kullanmışlardır. Achakulwisut ve diğerleri (2017), bu yöntemi kullanarak 2002–2015 (Mart-Mayıs) döneminde Batı Amerika Birleşik Devletleri'ndeki toz kirliliğinin yıllar arası değişimni etkileyen önemli meteorolojik kontrol faktörlerinin rolünü araştırmıştır. Kim ve diğerleri (2019), Güney Kore'deki PM_{10} konsantrasyonları ile Arktik Deniz buz konsantrasyonu arasındaki potansiyel bağlantıyı araştırmak için ve Park ve diğerleri (2019), sinoptik modellere ilişkin PM_{10} mekansal değişkenliklerini incelemek için Kore'de 2011-2015

baharındaki günlük PM_{10} konsantrasyon verilerine EOF analizini uygulamışlardır. Xu ve diğerleri (2019), Pekin-Tianjin-Hebei (BTH) bölgesindeki 13 şehirde PM kirliliğinin uzay-zamansal dağılımının yanı sıra kaynakları ve kimyasal özelliklerini EOF analizi ile incelemişlerdir. Lee ve Kim (2018) gibi diğer araştırmacılar, Seul, Kore'de ilkbaharda 10 yıllık günlük PM_{10} konsantrasyonları için ve Kim ve Kim (2020) ayrıca Güney Kore'deki haftalık PM_{10} değişimiyle ilişkili fiziksel ve kimyasal süreçleri araştırmak için döngüsel EOF (CSEOF) analizini uygulamışlardır. Lee ve diğerleri (2020) Doğu Asya'da sinoptik sirkülasyonların PM_{10} konsantrasyonları üzerindeki etkisini incelemek için ve Cho ve diğerleri, (2021) Güney Kore'de Doğu Asya atmosferik değişkenliğinin PM_{10}'un mekansal-zamansal değişkenliği üzerindeki etkilerini EOF uygulayarak araştırmışlardır. Xing ve Sun (2022), Ma ve diğerleri (2023) ve Liu ve diğerleri (2022) ilgili çalışmalarında da PM_{10} için EOF analizini kullanmışlardır.

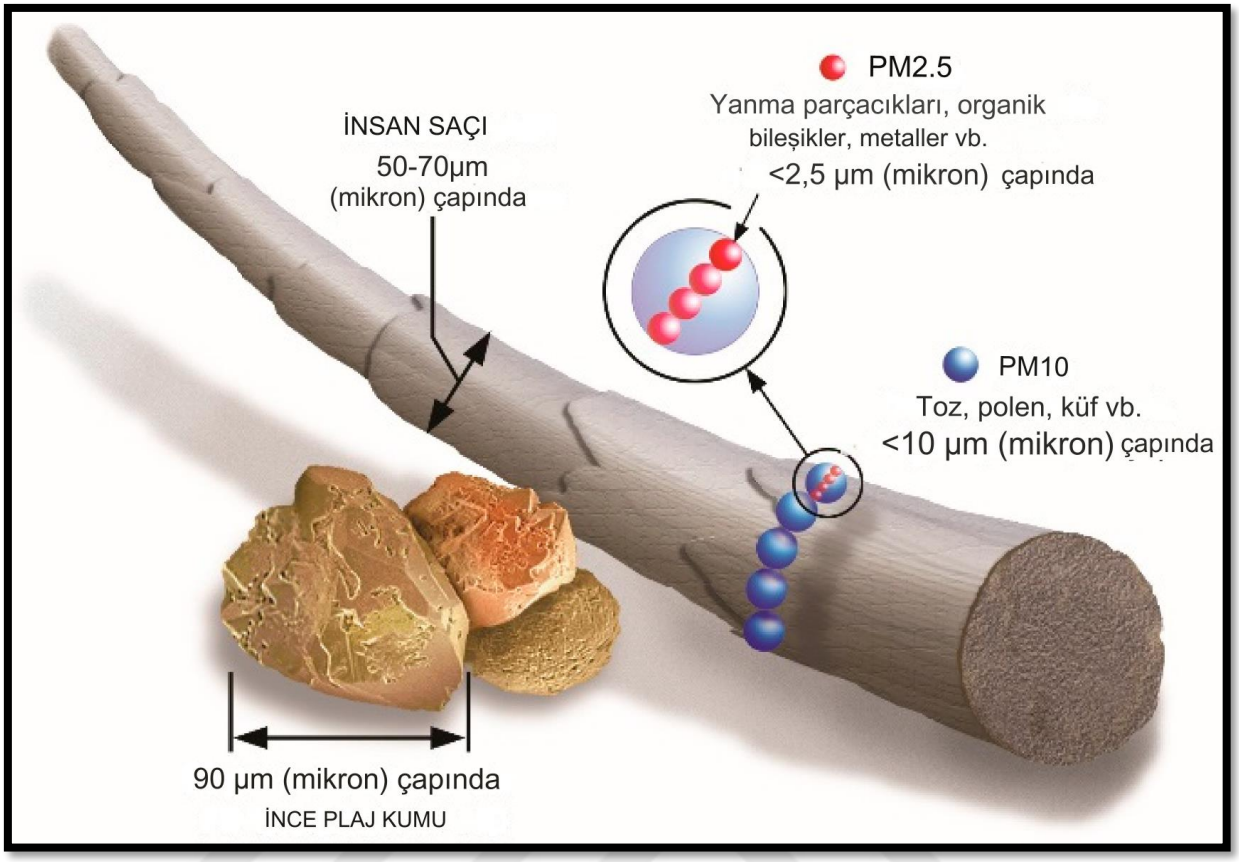
Türkiye'de PM_{10} ile ilgili çalışmaların çoğu kentsel, banliyö ve kırsal atmosferlerdeki konsantrasyonların, kimyasal karakterizasyonun ve kaynakların belirlenmesine odaklanmıştır (Karaca vd., 2009; Yatkin ve Bayram, 2008). Daha önce yapılan bazı çalışmalar PM_{10} konsantrasyonunun, toz parçacıklarının yerel ve uzun mesafeli taşınması dahil olmak üzere farklı emisyon kaynaklarından etkilendiğini öne sürmektedir (Baltaci, 2017; Baltaci ve diğerleri, 2020; Kabataş ve diğerleri, 2018; Lee ve diğerleri, 2020). Ayrıca Sahra tozunun PM_{10} konsantrasyonlarına katkısı farklı modeller kullanılarak araştırılmıştır (Kabatas vd., 2014, Hakkı Baltaci, 2017, Kabatas vd., 2018, Çapraz ve Deniz, 2021), ve bunların ayrıntıları literatür taraması bölümünde verilmiştir. Diğer çalışmalar PM_{10}'u incelemek için gama-Poisson süreci (Özel ve Cakmakyapan, 2015), Bulanık C-Oto Regresif Model (FCARM) (Güler ve İşçi, 2016), uzay-zamansal kriging (Raja vd., 2018).), makine öğrenme algoritmaları (Bozdağ vd., 2020) ve zaman serisi modelleri (Şahin vd., 2020) gibi birkaç farklı yaklaşımı kullanmışlardır. Bazıları PM_{10}'un insan sağlığı üzerindeki etkilerini de araştırmışlardır (Baltaci ve diğerleri, 2020; Mutlu, 2020). Ancak literatürde, büyük ölçekli atmosferik sirkülasyonların PM_{10} konsantrasyonlarının mevsimsel değişimleri üzerindeki rolü ve bunların EOF analizi kullanılarak yerel ve sinoptik ölçeklerdeki meteorolojik parametrelerle istatistiksel ilişkileri üzerine Türkiye'de yapılmış çalışmalara rastlanmamıştır. Büyük ölçekli sirkülasyonların açıklanmasında EOF analizinin büyük önemi nedeniyle, bu çalışmada, Türkiye için PM_{10} konsantrasyon seviyelerinin mevsimsel değişimlerini araştırılmış ve bu kapsamda 2010-2020 dönemi için Türkiye'ye homojen bir şekilde dağılmış 80 istasyonda izlenen (Şekil 3.2) günlük ortalama PM_{10}'a EOF analizi uygulanmıştır.

Bu çalışma, "Büyük ölçekli atmosferik sirkülasyonların Türkiye'deki PM_{10} konsantrasyonlarının mevsimsel değişimleri üzerindeki rolünü" araştırmak üzere tasarlanmış ve kapsamlı bir analiz sağlayacak şekilde yapılandırılmıştır. Birinci bölüm, araştırma probleminin, öneminin ve çalışmanın amaçlarının ana hatlarıyla belirtildiği, zemin hazırlayan Giriş bölümünü içermektedir. Kavramsal Çerçeve olan ikinci bölümde, PM_{10}'un teorik temellerini ve hava kirliliği ile ilgili ve özellikle PM_{10} ile ilgili araştırmaya yön veren temel kavramlar detaylandırılmıştır. Bunu, şeffaflık ve tekrarlanabilirliğin sağlanması amacıyla araştırma tasarımının, veri toplama tekniklerinin ve kullanılan analitik prosedürlerin detaylandırıldığı Yöntem bölümü olan üçüncü bölüm takip etmektedir. Sonuçlar bölümünde, verilerden elde edilen bulgular sunulmuştur. Tartışma bölümünde sonuçlar mevcut literatürle karşılaştırılarak yorumlanmış ve çalışmanın sınırları ve daha ileri araştırmalar için potansiyel alanlar vurgulanmıştır. Son olarak, Sonuç ve Öneriler bölümünde, PM_{10}'un Türkiye'deki mevsimsel değişimlerinde büyük ölçekli atmosferik sirkülasyonların rolü hakkında elde edilen bilgiler yorumlanarak öneriler sunulmuş ve çalışmanın katkıları özetlenmiştir.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

2.1. PM_{10}

Partikül madde (PM), havada bulunan katı parçacıkların yanı sıra sıvı damlacıkların da karışımı olarak bilinmektedir ve diğer bir deyişle PM_{10} ve $PM_{2,5}$ (sırasıyla aerodinamik çapları 10 mikrometre veya daha az ve 2,5 mikrometre veya daha az olan solunabilir parçacıklar, Şekil 2.1) dahil havada asılı kalan tüm parçacıkların net toplamıdır (Shukla ve diğerleri, 2020). PM_{10}görünürlük, tarım ve ekosistemlerin yanı sıra insan sağlığı üzerinde de ciddi olumsuz etkiler yaratan önemli bir atmosferik kirletici olarak tanımlanmıştır (Chen ve diğerleri, 2013; Dockery & Pope, 1994; Harrison ve Yin, 2000; Grantz ve diğerleri, 2003; Hong ve diğerleri, 2002; Tahery ve diğerleri, 2021). Epidemiyolojik çalışmalar PM_{10} ile solunum hastalıkları, kardiyovasküler hastalıklar, pulmoner ve sistemik inflamasyon, akciğer kanseri ve hatta ölüm gibi olumsuz sağlık etkileri arasında açık bir bağlantı olduğunu göstermektedir (Atkinson ve diğerleri, 2001; Bodor ve diğerleri, 2021; Pope III ve diğerleri, 2004). PM_{10}'a maruz kalmak, dünya çapında her yıl yaklaşık bir milyon erken ölümden sorumlu olan bu hastalıklarda artışa yol açmaktadır (Cohen ve diğerleri, 2005; Niu ve diğerleri, 2021). PM_{10}, insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerinin yanı sıra iklim sistemini de etkilemektedir (Galvão ve diğerleri, 2018; Twohy ve diğerleri, 2009, Foltz ve McPhaden, 2008).



Şekil 2.1: PM_{10} ve $PM_{2.5}$ boyutlarının karşılaştırması (EPA, 2024).

2.1.1. PM_{10}'un Kaynakları

PM_{10}'un doğal ve antropojenik kaynaklar olarak sınıflandırılan iki ana kaynağı bulunmaktadır. Doğal kaynaklar arasında volkanik patlamalar, orman yangınları, deniz tuzu ve Sahra ve Gobi çölleri gibi çöllerden dünyanın diğer bölgelerine toz taşınması yer almaktadır. Antropojenik kaynaklar arasında endüstriyel faaliyetler, ulaşım, ısıtma, inşaat ve tarımsal faaliyetler vb. yer almaktadır.

2.1.2. PM_{10}'un Zararlı Etkileri

2.1.2.1 *Sağlık üzerindeki etkileri*

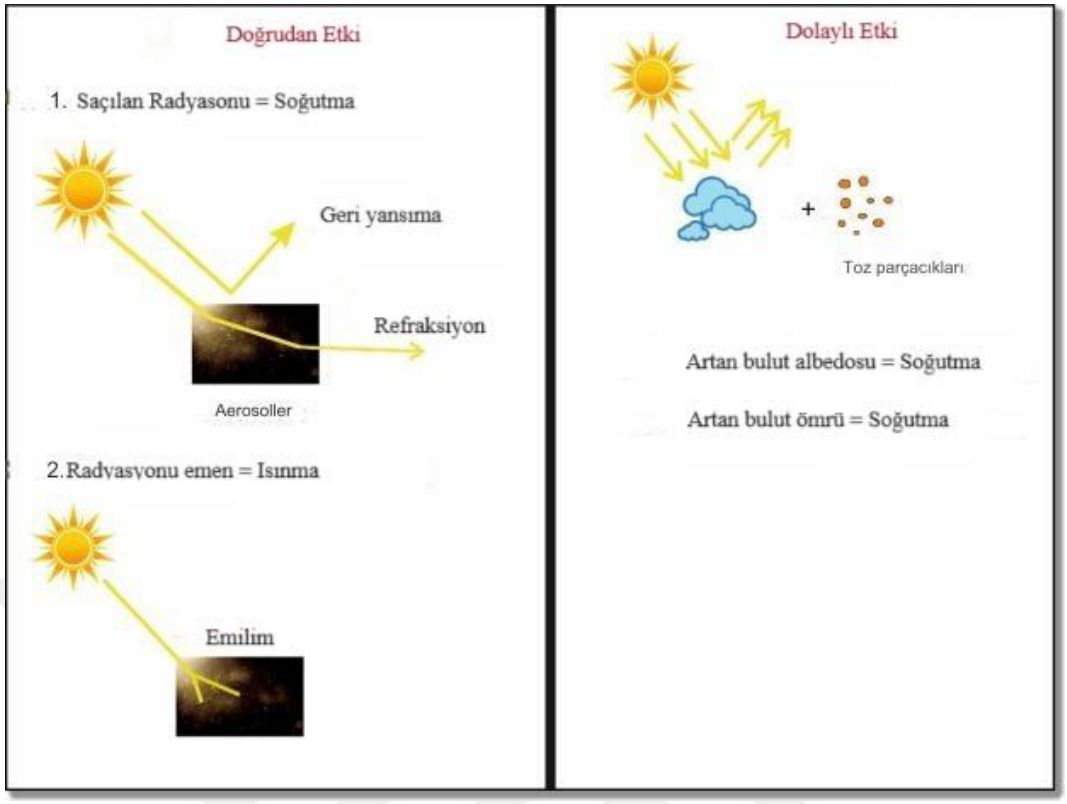
PM_{10}, insan sağlığı üzerinde ciddi olumsuz etkileri olduğu bilinen önemli bir atmosferik kirletici olarak değerlendirilmektedir. Çeşitli çalışmalar PM_{10} ile solunum hastalıkları, kardiyovasküler hastalıklar, pulmoner ve sistemik inflamasyon, akciğer kanseri ve hatta ölüme kadar giden olumsuz insan sağlığı etkileri arasında bariz bir bağlantı olduğunu bulmuşlardır (Atkinson ve diğerleri, 2001; Pope III ve diğerleri, 2004; Bodor ve diğerleri, 2021). Chen ve Hoek (2020) tarafından PM'e uzun süreli maruz kalmaktan kaynaklı ölümlere ilişkin sistematik

bir inceleme ve meta-analiz yapılmıştır. Hem $PM_{2,5}$ hem de PM_{10}'un kardiyovasküler hastalıklar, solunum hastalıkları ve akciğer kanserinden kaynaklı artan mortalite ile ilişkisi ortaya konmuştur. Doğal nedenli ölüm oranlarının $PM_{2,5}$'teki 10 μg/m^3 artış başına %1,08 (%95CI:1,06, 1,09) ve PM_{10}'da 10 μg/m^3 artış başına %1,04 (%95CI:1,03, 1,06) oranında yükseldiğini tespit edilmiştir (Chen ve Hoek, 2020; WHO, 2021). Ayrıca, DSÖ Uluslararası Kanser Araştırma Ajansı, PM'i insanlar üzerindeki olumsuz sağlık etkilerine dayanarak Grup 1 kanserojen olarak sınıflandırmıştır.

PM_{10}'un sağlık üzerindeki etkilerine ilişkin çalışmaların çoğu gelişmiş batı ülkelerinde yürütülmekte olup, gelişmekte olan ülkelerdeki çalışmalar sınırlıdır (Chen ve Hoek, 2020). Türkiye'de PM_{10}'un insan sağlığı üzerindeki etkilerini araştıran bazı çalışmalar bulunmaktadır. Örneğin Baltacı ve arkadaşları (2022), Çanakkale, Türkiye'de yüksek PM_{10} kaynak bölgelerini ve bunların solunum yolu hastalıkları üzerindeki etkilerini incelemiş ve PM_{10} konsantrasyonlarının artmasıyla birlikte solunum yolu hastalıklarında belirgin bir artış olduğu sonucuna varmışlardır. Diğer benzer çalışmalar (örn. Saygın ve diğerleri, 2017, Çapraz ve diğerleri, 2017, Mercan ve diğerleri, 2020 ve Arslan ve diğerleri, 2022) PM_{10} ile solunum yolu hastalıklarındaki artış arasında güçlü bir korelasyon olduğu sonucuna varmışlardır.

2.1.2.2 *İklim üzerindeki etkiler*

PM_{10}, insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerinin yanı sıra, kısa dalga güneş ışınımını dağıtıp veya absorbe ederek doğrudan etki, veya bulut yoğunlaşma çekirdeği (CCN) gibi davranarak dolaylı etkiler nedeniyle iklim sistemini de etkilemektedir (Galvão vd., 2018; Twohy vd., 2009). Twohy ve ark. (2009), Sahra toz parçacıklarının doğu Atlantik bulutlarındaki damlacıkların çekirdeklenmesi üzerindeki etkilerini incelemiş ve Sahra toz parçacıklarının doğu Kuzey Atlantik'te genellikle CCN gibi davrandığını ortaya koymuşlardır. Bazı çalışmalar PM_{10} miktarındaki değişimin aynı zamanda yüzey ışınımlı ısı akışını ve deniz yüzeyi sıcaklıklarını (SST) da etkilediğini öne sürmektedir (Foltz ve McPhaden, 2008). Karmaşık yapıları ve kökenleri nedeniyle aerosollerin iklim üzerindeki etkileri, gelecekteki iklim tahminlerinde en büyük belirsizlik kaynağı olarak kabul edilmektedir (Myhre ve diğerleri, 2013).



Şekil 2.2: Aerosollerin iklim üzerindeki doğrudan ve dolaylı olarak ışınımsal etkileri (Gammoudi et al.,2024)

2.1.2.3 *Çevre üzerindeki etkiler*

PM_{10}, tıpkı insan sağlığı ve iklim üzerindeki etkileri gibi, sis oluşumu yoluyla görünürlüğü etkileyerek ve rüzgârla uzun mesafeler kat edip sucul ve karasal ortamlara çökeldiğinde çevresel zararlara yol açarak doğal çevremizi olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca, göllerin ve akarsuların asitlenmesine katkıda bulunur, kıyı suları ve nehir havzalarındaki besin dengelerini değiştirir, toprak besinlerini tüketir ve hassas ormanlara ve tarımsal ürünlere zarar vererek genel ekosistem çeşitliliğini ve mikro besin maddelerini taşıyarak kara ve okyanus biyojeokimyasal döngülerini etkilemektedir (De Leeuw ve diğerleri, 2014; Richon ve diğerleri, 2018; Gammoudi ve diğerleri, 2024, EPA, 2024). Ayrıca asit yağmuru yoluyla taş heykeller ve anıtlar gibi kültürel açıdan önemli malzemelere zarar verebilmektedir.

2.1.3. PM_{10} için Sınır Değerler

Hava kalitesinin belirlenmesi, güncel tutulması, şehirler ve ülkeler için temiz hava eylem planları hazırlanabilmesi için hava kirletici konsantrasyonlarının sürekli olarak ölçülüp değerlendirilmesi gerekmektedir. Türkiye 2019 yılı öncesinde günlük ve yıllık ortalama PM_{10}

konsantrasyonları için ulusal limitlerini kullanmaktaydı ancak Avrupa Birliği (AB) hava kalitesi standartlarına uyum sağlamak amacıyla 2019'da Türkiye aynı limit değerleri benimseye başlamıştır (yıllık 40 µg/m³ ve günlük 50 µg/m³) (Zeydan, 2021). DSÖ tarafından önerilen yıllık ve günlük ortalama PM_{10} sınır değeri sırasıyla 15 µg/m³ ve 45 µg/m³ tür (DSÖ, 2021). Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı (EPA, ABD) tarafından verilen 24 saatlik PM_{10} sınır değeri ise 150 µg/m³'tür ve yıllık ortalama sınır değeri bulunmamaktadır (Tablo 2.1).

Tablo 2.1 Türkiye, EPA, DSÖ, ve AB PM_{10} sınır değerleri.

Kurum	**24 Saatlik PM_{10} Sınırı (µg/m³)**	**Yıllık PM_{10} Sınırı (µg/m³)**
Türkiye	50	40
EPA (ABD)	150	-
DSÖ	45	15
AB	50	40

2.1.4. PM_{10} Ve Meteorolojik Koşullar

PM_{10}'un dispersiyonu, dolaşımı ve taşınmasında meteorolojik koşullar çok önemli bir rol oynamaktadır. PM_{10} kirliliğinin yüksek olduğu bölgeler genellikle düşük rüzgar hızı, yüksek nem ve düşük yağış gibi olumsuz meteorolojik koşullara sahiptir (Xu vd., 2018). PM_{10} kirliliğini etkileyen meteorolojik değişkenlerden bazıları sıcaklık, çiğlenme noktası, deniz seviyesi basıncı, bulutluluk, rüzgar hızı, rüzgar yönü vb.'dir. Meteorolojik koşullar aynı zamanda PM_{10} kirliliğini diğer alanlara dağıtıp taşıyarak ve sonunda çökelmesini sağlayarak hava kalitesinin iyileşmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Li ve diğerleri. (2019), hava kirliliğini etkileyen temel meteorolojik faktörleri incelemiş ve $PM_{2.5}$, PM_{10} ve SO_2 konsantrasyonlarının yağış, atmosfer sıcaklığı ve rüzgar hızından büyük ölçüde etkilendiğini tespit etmişlerdir.

2.2. LİTERATÜR İNCELEMESİ

Literatür taraması iki bölümde verilmiştir; Birinci bölümde PM_{10} ile ilgili özellikle EOF tekniğini kullanan yurtdışında yapılan çalışmaları incelenmiştir, ikinci bölümde ise Türkiye'de yapılan çalışmalara yer verilmiştir.

2.2.1. Yurt Dışında Yapılan Çalışmalar

Literatürde PM_{10}'un kaynaklar, dispersiyonu, yerel ve uzun mesafeli taşınımın yanı sıra insan sağlığı ve ekosistem üzerindeki etkilerine odaklanan farklı teknikler ve yöntemler kullanılarak onlarca yıldır dünya çapında kapsamlı bir şekilde araştırıldığı görülmektedir. Ancak, Ampirik Ortogonal Fonksiyon (EOF) analizini kullanarak büyük ölçekli atmosferik sirkülasyonların mevsimsel PM_{10} konsantrasyon seviyeleri üzerindeki rolünü gösteren ayrıntılı çalışmalara rastlanmamaktadır. Ancak, birkaç çalışma PM_{10} verilerine EOF analizini dahil etmişlerdir. Veri setindeki varyansı anlamlı bir şekilde açıklaması nedeniyle EOF analizi uzun süredir farklı alanlarda kullanılmaktadır (Lorenz, 1956; Monahan vd., 2009). EOF analizi, uzay-zamansal verileri, veri kümesindeki varyansı mümkün olduğunca verimli bir şekilde açıklayan uzaysal değişkenlik modellerine ve bu modellerin zamansal projeksiyonlarına dönüştürerek basitleştirmek için kullanılmaktadır (Dawson, 2016; Lee ve diğerleri, 2020; Zhai ve diğerleri, 2015). Juneng ve diğerleri (2011), Malezya'nın Klang Vadisi üzerinde yaz muson kurak mevsimleri sırasında PM_{10} konsantrasyonundaki değişikliklerle ilişkili faktörleri (yerel ve sinoptik hava koşulları) incelemek için EOF tekniğini uygulamış ve üç önemli sinoptik hava durumu tespit etmiştir (ekvator bölgesi üzerinde yaz musonu güneybatı rüzgarının güçlenmesi, tayfun faaliyetleriyle ilişkili siklonik akışlar ve batı kuzey Pasifik, Güney Çin Denizi'nin merkezi ve Bengal Körfezi üzerinde siklonların oluşması). Wang ve diğerleri (2015), Çin'deki kirlilik durumunun analizi için döndürülmüş EOF'yi (REOF) $PM_{2,5}$ verilerine uygulamışlar ve REOF analizinin sonuçlarına dayanarak, Orta Doğu Çin'deki on bölgeyi $PM_{2,5}$ kirliliğini önlemek açısından temel bölümler olarak belirlenmişlerdir.

Achakulwisut ve diğerleri (2017), bu yöntemi kullanarak 2002–2015 (Mart-Mayıs) döneminde Batı Amerika Birleşik Devletleri'ndeki toz kirliliğinin yıllar arası değişimlerini etkileyen temel meteorolojik kontrol faktörlerinin rolünü araştırmışlar, ve bu faktörlerin, El Niño-Güney Salınımı (ENSO) ve Pasifik On Yıllık Salınımı (PDO) dahil olmak üzere sinoptik atmosferik dolaşım modellerinden oldukça etkilenen yağış, sıcaklık ve toprak nemi olduğunu belirlemişler. Kim ve diğerleri (2019), 18 yıl boyunca (2001'den 2018'e) PM_{10} verileri, NCEP R2 verileri ve NOAA SIC verilerini kullanarak, Güney Kore'deki PM_{10} konsantrasyonları ile Arktik Denizi buz konsantrasyonu arasındaki potansiyel bağlantıyı yıllar arası zaman ölçeklerinde incelemişlerdir. EOF'un ilk modunun PM_{10} için geniş ölçekli bir mod olduğunu ve toplam değişkenliğin yaklaşık %27,4'ünü temsil ettiğini ve baskın olarak dikey atmosferik stabilite etkisinden ziyade yatay rüzgârların etkisinden etkilendiğini bulmuşlar. Park ve diğerleri (2019), sinoptik modellere göre PM_{10} mekansal değişkenliklerini incelemek için Kore'de 2011-2015

bahar aylarındaki günlük PM_{10} konsantrasyon verilerini kullanmıştır. EOF analizinin PM_{10}'daki bölge çapındaki değişkenliği tespit etmelerine olanak sağladığını ve geri yörünge analizinin, kirlilik seviyelerini kontrol etmede ulaşım yollarının rolünü belirlediğini öne sürmüşlerdir. Xu ve diğerleri (2019), Pekin-Tianjin-Hebei (BTH) bölgesinin 13 şehrinde PM kirliliğinin uzay-zamansal dağılımının yanı sıra kaynakları ve kimyasal özelliklerini incelemiş ve EOF analizine dayanarak BTH bölgesini dört bölgeye ayırmışlar ve BTH bölgesindeki PM kirliliğinin kaynaklarını kömür yanması, ikincil inorganik aerosoller, araç, toprak/yol tozu ve endüstriyel emisyonlar olarak bulmuşlardır.

Lee ve Kim (2018), Seul, Kore'de ilkbaharda 10 yıllık günlük PM_{10} konsantrasyonları için Döngüsel EOF (CSEOF) analizi uygulamış ve yüksek PM_{10} seviyelerine katkıda bulunan üç ana kaynak bölgesi (kuzey Taklamakan Çölü, Gobi Çölü ve Doğu Çin endüstriyel alanı) belirlemişler ve PM_{10} değişkenliğinin kaynak ve taşınım özelliklerinin CSEOF analizi ve ardından geri yörünge analizi ile daha iyi anlaşılabileceğini öne sürmüşlerdir. Kim ve Kim (2020) tarafından Güney Kore'deki haftalık PM_{10} değişimiyle ilişkili fiziksel ve kimyasal süreçleri araştırmak için CSEOF analizi uygulanmış ve 9 yıllık dönemde saatlik PM_{10} ölçümleri, diğer gaz kirleticiler (NO_2, SO_2, CO ve O_3) ve trafik sayım verisini kullanarak, PM_{10} seviyelerindeki günlük değişimlerin insan faaliyetleriyle önemli bir korelasyona sahip olduğunu ve PM_{10} konsantrasyonlarında güçlü bir sabah-akşam asimetrisinin bulunduğunu göstermiştir. PM_{10}-EOF ilişkisini temel alan çalışma, Lee ve diğerleri tarafından yürütülen (2020) Doğu Asya'da sinoptik dolaşımların PM_{10} konsantrasyonları üzerindeki etkisini inceledikleri çalışmadır. Bu çalışmada hava kalitesindeki uzun vadeli değişikliklerin, öncelikle sinoptik ölçekli atmosferik desenlerdeki değişikliklerin yanı sıra emisyonlardaki değişikliklerden etkilendiğini öne sürülmüştür.

Cho ve diğerleri (2021), Güney Kore'de Doğu Asya atmosferik değişkenliğinin PM_{10}'un mekansal-zamansal değişkenliği üzerindeki etkilerini araştırmış ve bu amaçla, 1999-2018 dönemi için Kore Çevre Bakanlığı'nın ülke çapındaki izleme ağından elde edilen PM_{10} kütle konsantrasyonlarını kullanarak mekansal yapıyı analiz etmek için 850 hpa rüzgar hızına EOF analizi uygulamışlardır. Bu çalışmanın sonuçları Moğolistan ve Çin'deki rüzgar hızındaki azalmanın bahar mevsiminde Güney Kore'deki düşüşle ve yaz aylarında PM_{10}'daki bir sonraki en yüksek azalma oranıyla tutarlı olduğunu göstermiş vebunun kuzeybatı Pasifik Okyanusu üzerindeki daha sıcak hava kütlesinden kaynaklandığı sonucuna varmışlardır. Ayrıca, 2014-2018 döneminde PM_{10} için Güney Kore'de, Çin'deki emisyonları sınırlayan politikaların ve

ayrıca rüzgar hızındaki trendlerin bir sonucu olarak bir azalma eğilimi da bulmuşlardır. Xing ve Sun (2022), altı yıllık dönemde $PM_{2,5}$ ve PM_{10}'un mekansal-zamansal dağılımını EOF uygulayarak analiz etmiş ve ayrıca meteorolojik koşulların bu kirleticiler üzerindeki rolünü araştırmıştır. Sonuçlara göre, hem $PM_{2,5}$ hem de PM_{10}'un mekansal-zamansal dağılımda benzer eğilimler gösterdiğini ve her ikisinin de konsantrasyonda azalma eğiliminde olduğunu göstermektedir. Ayrıca her iki kirleticinin de hem rüzgar hızı hem de yağış ile orta güçlü negatif korelasyona sahip olduğu sonucuna varmışlardır.

Ma ve diğerleri (2023), Doğu Çin'de 1980-2018 kışında $PM_{2,5}$ konsantrasyonlarının mekansal-zamansal değişimlerini analiz ederek hava kalitesi üzerindeki dış zorlayıcı faktörlerin iklim modülasyonunu ve bunların mevsimsel $PM_{2,5}$ tahminleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Uzun-kısa süreli hafıza (LSTM) algoritmasını kullanarak $PM_{2,5}$ konsantrasyonunu tahmin etmek için deniz sıcaklığı, deniz buzulu, kar örtüsü ve stratosferik faktörler dahil olmak üzere dokuz temel dış zorlayıcı faktör belirlemişlerdir. Dış zorlayıcı faktörler arasında Arktik deniz buzulunu (ASI), doğu Çin'deki kış $PM_{2,5}$ konsantrasyonuna en çok katkıda bulunan faktör olarak tanımlamışlardır.

Liu ve diğerleri (2022), 2017-2020 yılları için Çin'deki $PM_{2,5}$ konsantrasyonlarının kaynaklarını ve mekansal-zamansal değişikliklerini incelemiştir. $PM_{2,5}$ konsantrasyonlarının zaman serisini EOF ile ayrıştırmışlar ve yüksek $PM_{2,5}$ konsantrasyon seviyelerinin çoğunlukla kışın ve yaz aylarında ise konsantrasyonun en düşük seviyelerde olduğunu , özellikle de Ağustos ayında meydana geldiğini bulmuşlardır. Ayrıca $PM_{2,5}$ konsantrasyonlarının bölgeler arası antropojenik emisyon kaynaklarından etkilendiğini de bulmuşlar.

2.2.2. Türkiye'de Yapılan Çalışmalar

Türkiye'de PM_{10} konsantrasyonu, toz parçacıklarının yerel ve uzun mesafeli taşınması da dahil olmak üzere farklı emisyon kaynaklarından etkilenmektedir (Baltacı, 2017; Baltaci ve diğerleri, 2020; Kabataş ve diğerleri, 2018; Lee ve diğerleri, 2020). PM_{10} ile ilgili çalışmaların çoğu kentsel, banliyö ve kırsal atmosferlerdeki konsantrasyon, kimyasal karakterizasyon ve kaynakların belirlenmesine odaklanmıştır (Karaca vd., 2009; Yatkin ve Bayram, 2008). Sahra tozunun PM_{10} konsantrasyonlarına katkısı, Gerçek Zamanlı Hava Kalitesi Modelleme Sistemi (RAQMS) (Kabataş ve diğerleri, 2014), METAR (Meteorolojik Terminal Havacılık Rutin Hava Durumu Raporu) gözlemleri gibi farklı modeller kullanılarak araştırılmaktadır. Ulusal Çevresel Tahmin Merkezleri (NCEP)/Ulusal Atmosfer Araştırmaları Merkezi (NCAR) (Hakki Baltacı, 2017), Kimya (WRF-Chem) ve HTAP (Hava Kirliliğinin Yarıküresel Taşınması) ile Hava

Durumu Araştırma ve Tahmin modeli (Kabataş ve ark. , 2018) ve HYSPLIT yörünge modeli (Çapraz ve Deniz, 2021) bunlardan birkaçıdır. Diğer çalışmalar PM_{10}'u incelemek için gama-Poisson süreci (Özel ve Cakmakyapan, 2015), Bulanık C-Oto Regresif Model (FCARM) (Güler ve İşçi, 2016), uzay-zamansal kriging (Raja vd., 2018), makine öğrenmesi algoritmaları (Bozdağ vd., 2020), zaman serisi modelleri (Şahin vd., 2020) gibi farklı yaklaşımları kullanmıştır. Bazıları PM_{10}'un insan sağlığı üzerindeki etkilerini de araştırmışlardır (Baltaci ve diğerleri, 2020; Mutlu, 2020). Aslı ve ark. (2020) yakın zamanda Ankara Türkiye'deki 7 istasyondan elde edilen 24 saatlik PM_{10} konsantrasyonlarını makine öğrenme algoritmaları (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator, Support Vector Machines, Random Forest, k Nearest Neighbor, eXtreme Gradient Boosting algorithms, and Artificial Neural Networks) ile analiz ederek 2009-2017 dönemi için PM_{10} konsantrasyonunun mekansal tahminini araştırmışlardır. Atilla (2020), endüstriyel emisyonların hava kalitesi üzerindeki etkilerini ortaya çıkarmak amacıyla Balıkesir, Türkiye'deki bir sanayi tesisinden salınan PM_{10}'un atmosferik dağılımını özellikle yakındaki hastane ve şehir merkezi üzerindeki hava kalitesi üzerindeki etkilerini dikkate alarak araştırmıştır. Hatice (2020) tarafından yakın zamanda yapılan bir diğer çalışma, otoregresif entegre hareketli ortalama (ARIMA), hata, trend ve mevsimsel (ETS) ve tekil spektrum analizi (SSA) dahil olmak üzere zaman serisi modellerini kullanarak Türkiye'deki en kirli şehirler için PM_{10} konsantrasyonlarının tahmin edilmesine odaklanmıştır. Sahra tozunun Türkiye'deki PM_{10} konsantrasyonlarına katkısı Kabataş ve ark. (2013) tarafından Gerçek Zamanlı Hava Kalitesi Modelleme Sistemini (RAQMS) kullanarak incelenmiştir. RAQMS modelini Nisan 2008'de Türkiye genelindeki 118 hava kalitesi istasyonuyla (81 şehir) karşılaştırmışlar ve atmosferin 550 nm'de sütunlu aerosol yükünü görmek için MODIS aerosol ürününü (Terra için MOD04 ve Aqua için MYD04) kullanmışlardır.

Capraz ve Deniz (2021), Şubat 2015'te Sahra'daki toz olayı sırasında PM konsantrasyonlarına (PM_{10} ve $PM_{2,5}$) odaklanarak toz taşınımının İstanbul'un hava kalitesi üzerindeki etkisini HYSPLIT yörünge modeli ve diğer uydu ürünlerinin yanı sıra yer gözlemlerinden elde edilen hava kalitesi izleme verilerini de kullanarak incelemişlerdir. Sonuçlar PM_{10} konsantrasyonlarında bir artışa işaret ettiğini ancak $PM_{2,5}$ konsantrasyonlarında sadece hafif bir artış dışında önemli bir değişikliğe sebep olmadığı görülmüştür. Baltacı ve diğerleri (2020a), İstanbul, Türkiye'de yüksek PM_{10} konsantrasyonlarına neden olan atmosferik süreçlerin kökenini ve arka planını araştıran bir çalışma yayınlamışlardır. Yine Baltacı ve diğerleri

(2020b), Çanakkale, Türkiye'de yüksek PM_{10} konsantrasyonlarının kaynak bölgelerini ve bunların solunum yolu hastalıkları üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Şahin ve diğerleri (2020), hava sıcaklığı, havanın nemi, hava basıncı ve rüzgar hızı gibi farklı çevresel faktörlerin PM_{10} değerleri üzerindeki etkilerini sinir ağları (FFNN) kullanarak incelemişlerdir Yatkin ve Bayram (2008), Pozitif matris faktörizasyonu (PMF) ve kimyasal kütle dengesi modellemesini (CMB) uygulayarak İzmir, Türkiye'deki PM kaynaklarını ve konsantrasyonlarını araştırmıştır (daha eski çalışmalar daha çok PM ve kaynaklarının kimyasal özelliklerine odaklanmaktadır). Özel ve Çakmakyapan (2015) tarafından yayınlanan bir makalede, Türkiye'nin İç Anadolu Bölgesi'ndeki PM_{10} konsantrasyonlarının tahminine yönelik yeni bir yaklaşım, gama-Poisson süreci kullanılarak geliştirilmiştir. Karaca ve diğerleri (2009), 2008 yılı için saatlik PM_{10} konsantrasyonlarını kullanarak İstanbul, Türkiye'deki PM_{10} konsantrasyonuna uzun vadeli kaynak katkılarını değerlendirmiştir. Çalışmada geriye doğru yörüngeler ve potansiyel kaynak katkıları için HYSPLIT (Hibrit Tek Parçacık Lagrangian Entegre Yörünge) modelini ve Potansiyel Kaynak Katkı Fonksiyonunu (PSCF) uygulamışlardır. Güler ve İşçi (2016), bir tahmin modeli bulmak amacıyla Fuzzy C-Auto Regressive Model (FCARM) kullanarak haftalık PM_{10} konsantrasyonlarının bölgesel davranışını incelemiştir. Baltacı (2017), Sahra toz olaylarının Türkiye üzerindeki etkisini ve bu olayı tetikleyen atmosferik koşulları ayrıntılı olarak incelemiştir. Bu amaçla 97 hava kalitesi istasyonundan alınan PM_{10} verileri, 64 havalimanındaki METAR (Meteoroloji Terminali Havacılık Rutin Hava Durumu Raporu) gözlemleri, atmosferik sondajlar ve uydu ürünleri kullanılmıştır. Atmosferik dolaşımın yüzeyini ve üst seviyelerini belirlemek için Ulusal Çevresel Tahmin Merkezleri (NCEP)/Ulusal Atmosfer Araştırmaları Merkezi'nden (NCAR) alınan Yeniden Analiz verileri, aşırı toz olaylarına uygulanmıştır. Benzer bir çalışmada Karaca ve diğerleri (2005), İstanbul'un arka plandaki bir banliyö bölgesinde ince, kaba ve solunabilir partikül konsantrasyonlarının istatistiksel karakterizasyonunu ve ilişkilerini incelemiştir. Benzer şekilde Raja ve diğerleri (2018), uzay-zamansal kriging yardımıyla evsel ısınma ve ulaşım nedeniyle PM_{10} konsantrasyonlarının mevsimsel değişimlerine odaklanarak, Ankara'nın kentsel metropol bölgesindeki PM_{10}'un mekansal ve zamansal değişimlerini karakterize etmişlerdir. Kabataş ve diğerleri (2018), bölgesel Hava Durumu Araştırma ve Tahmin modelini (online-coupled regional Weather Research and Forecasting model with chemistry-WRF-Chem) ve HTAP (Hava Kirliliğinin Yarı Kürede Taşınması) kullanarak, Nisan 2008'de Sahra'da toz taşınımının mekansal ve zamansal dağılımını ve bunun Türkiye üzerindeki PM_{10} konsantrasyonları üzerindeki etkisini araştırmışlardır.

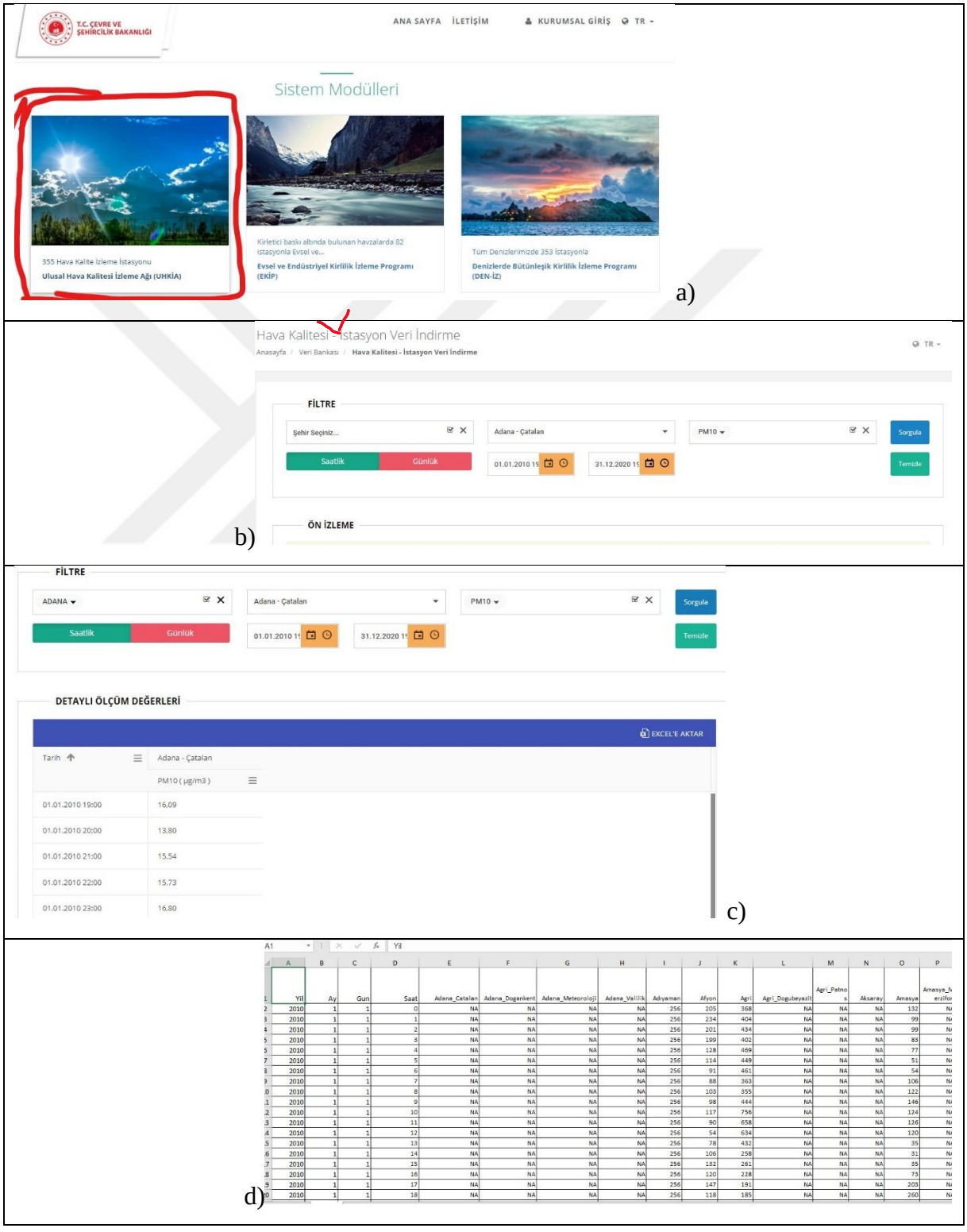
Fakat, şimdiye kadar literatürde, PM_{10} konsantrasyonlarının mevsimsel değişimleri üzerinde büyük ölçekli atmosferik sirkülasyonların rolü ve bunların EOF/REOF analizi kullanılarak hem yerel hem de sinoptik ölçekte meteorolojik parametrelerle istatistiksel ilişkileri üzerine Türkiye'de yapılmış çalışmalara rastlanmamıştır. EOF analizi, bir veri kümesini, veri kümesi içindeki dalgalanmaları mümkün olduğu kadar yetkin bir şekilde açıklığa kavuşturan bir dizi serbest yapıya bölmek için son derece değerli bir araçtır. EOF analizinin büyük ölçekli dolaşımları açıklamadaki önemi nedeniyle, bu çalışma Türkiye'deki PM_{10} konsantrasyon seviyelerinin mevsimsel değişimlerini araştırmayı amaçlamaktadır. Bu amaçla Türkiye geneline homojen dağılan 80 istasyonun 2010-2020 dönemine ait günlük PM_{10} gözlemlerine EOF/REOF analizi uygulanmıştır.

3. YÖNTEM

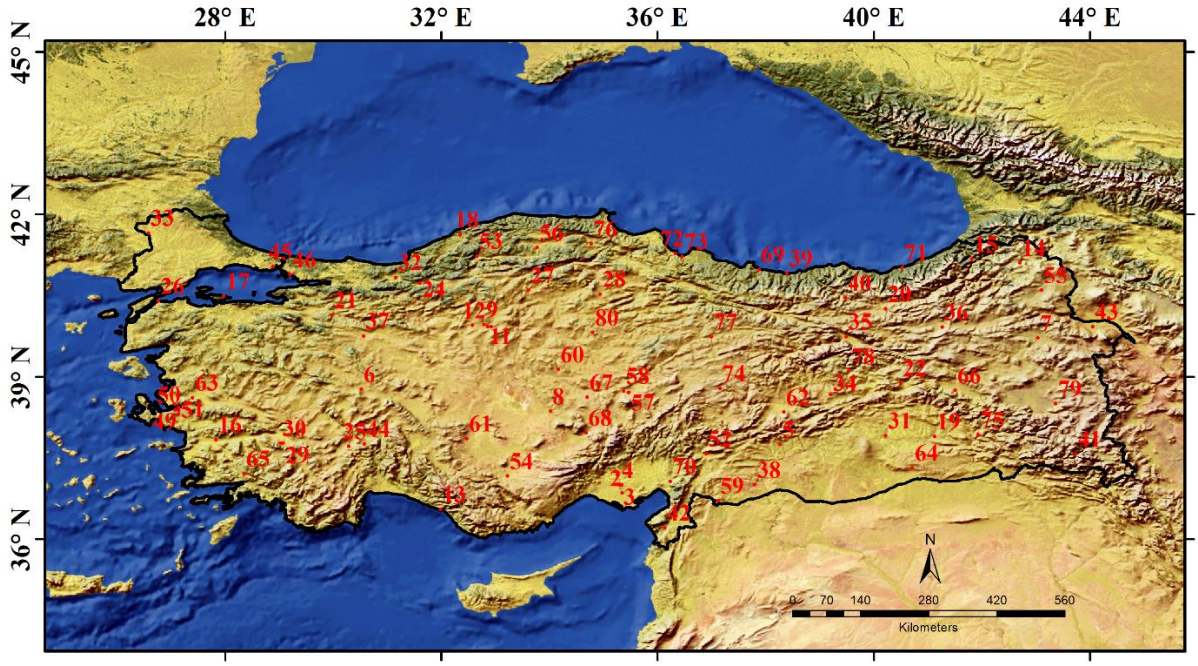
3.1. PM_{10} VERİLERİ

Büyük ölçekli sirkülasyonların lokal (in-situ) PM_{10} konsantrasyonları üzerindeki etkilerini araştırmak için 80 hava kalitesi izleme istasyonuna ait PM_{10} konsantrasyonlarının günlük ortalama değerleri kullanılmıştır. Türkiye genelinde hem kentsel hem de kırsal alanları kapsayan 200'den fazla hava kalitesi izleme istasyonu bulunmaktadır. İstasyonlar (sabit veya mobil) yüksek nüfus yoğunluğuna, sanayi bölgelerine, yoğun trafiğe sahip alanlara ve farklı çevresel özelliklere sahip bölgelere stratejik olarak yerleştirilmiştir. Türkiye'de PM_{10} örnekleme için yaygın olarak Beta Attenuation Monitoring (BAM) yöntemi kullanılmaktadır. BAM yöntemi, beta parçacıklarının parçacık yüklü bir filtre bandından geçerken zayıflamasını kullanır. Zayıflama miktarı parçacıkların kütlesiyle orantılıdır ve gerçek zamanlı PM_{10} ölçümüne olanak tanır. BAM, sürekli izleme sağlama yeteneği nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. İstasyonlarda kirleticilerin ölçümü sürekli olarak yapılır ve düzenli aralıklarla (örneğin saatlik) PM_{10} konsantrasyon verisini kaydeder. Toplanan veriler istasyonun veri toplama sistemine kaydedilir. Veriler gerçek zamanlı veya düzenli aralıklarla merkezi bir veritabanına iletilir. Bu genellikle GSM, uydu veya kablolu iletişim ağları aracılığıyla yapılır. Veri validasyonu ve cihazların kalibrasyonu istasyonu işleten Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı veya Belediyeler tarafından yapılmaktadır. Doğrulanmış veriler, Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı'nın web sitesi aracılığıyla herkese açıktır. Bu çalışmada, Türkiye genelinde mevcut 200 hava kalitesi istasyonunun PM_{10} konsantrasyon verileri, toplam 11 yıllık 2010–2020 çalışma dönemi için Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı ((Ulusal Hava Kalitesi Gözlem Ağı: https://sim.csb.gov.tr/STN/STN_Report/StationDataDownload) tarafından sağlanan açık erişimli web sitesinden indirilmiştir (Şekil 3.1). Web sitesinden "İstasyon Veri İndirme" bölümünü seçerek veriler için çalışma dönemi seçilmiştir. Uygun yıl veya tarih aralığını (2010'dan 2020'ye) seçtikten sonra, açılır menüden aradığımız kirletici olarak "PM10" ardından, hava kalitesi istasyonları seçilmiştir. Türkiye genelindeki verileri aradığımız için, tüm mevcut istasyonları seçilerek veriler Excel formatında indirilmiştir . Verilerin kalite kontrolü yapılmış ve analiz için sadece 80 hava kalitesi istasyonu verisi kullanılabilmiştir. Geri kalan hava kalitesi istasyonlarına ait veriler çalışma dönemi boyunca

eksik olduğundan analiz için uygun görülmemiş, yıllık veri kullanılabilirliğinin %50'sinden azına sahip istasyonları analizden hariç tutulmuştur. Çalışma için seçilen 80 hava kalitesi istasyonu Türkiye geneline homojen bir şekilde dağılma göstermektedir (Şekil 3.2).



Şekil 3.1: (a) Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (Ulusal Hava Kalitesi Gözlem Ağı), (b) istasyon verileri indirme sayfası, (c) istasyonlara göre PM_{10} verileri i ndirme sayfası, (d) indirilmiş ham PM_{10} saatlik verileri (excel formatında).



Şekil 3.2: Türkiye'deki 80 hava kalitesi istasyonunun dağılımı. (istasyon numaralarının açıklamasıTablo 4.1'de verilmiştir) .

3.2. NCEP/NCAR REANALİZ VERİLERİ VE SİNOPTİK HARİTALARI

Çalışma dönemi için sinoptik kompozitler oluşturmak amacıyla, NCEP/NCAR Yeniden Analiz verilerinden (Kalnay ve ark. 1996) 1000 hPa seviyesindeki aylık ortalama rüzgar alanları elde edilmiştir. NCEP/NCAR Yeniden Analiz Projesi, Ulusal Çevre Tahmini Merkezleri (NCEP) ile Ulusal Atmosfer Araştırmaları Merkezi (NCAR) arasındaki bir iş birliğidir. Bu proje, tarihsel hava gözlemlerini tutarlı bir atmosfer modeliyle birleştirerek sıcaklık, rüzgar ve basınç gibi atmosferik değişkenlerin uzun vadeli bir kaydını sağlamaktadır. Yeniden analiz verileri, atmosferik olayların uzun süreler boyunca incelenmesine olanak tanıdığından hem araştırma hem de eğitim amaçları için önemli bir veritabanı kılmaktadır.

NCEP/NCAR'dan veriler genellikle NetCDF'den (Ağ Ortak Veri Formu) sağlanır. ve, sıcaklık, rüzgar hızı ve basınç gibi çok boyutlu bilimsel verileri depolamak için çok yönlü ve etkili bir formattır. 1000 hPa'da rüzgârın sinoptik bir haritasını oluşturmak için, ilk önce NCEP/NCAR

Yeniden Analiz projesi'nden ilgili verilere erişmek gerekmektedir ve bu verilere NOAA'nın Fizik Bilimleri Laboratuvarı (PSL) web sitesinden (https://psl.noaa.gov/data/gridded/reanalysis/) veya UCAR iklim veri kılavuzu'ndan erişilebilir. Bu platformlar NCEP/NCAR yeniden analiz verilerine kolay erişim sağlamaktadır. Bu tez çalışmsında rüzgarın *u* bileşenini (bölgesel rüzgar) ve *v* bileşenini (meridyenel rüzgar) indirilmiştir ve bu bileşenler sırasıyla doğu-batı ve kuzey-güney yönlerinde esen rüzgarı temsil etmektedir. NCEP/NCAR yeniden analiz verileriyle çalışmak için, NetCDF dosyalarını okuyabilen ve işleyebilen ve verileri bir haritada görselleştirebilen yazılım araçlarına ihtiyacınız vardır ve bu amaçla yaygın olarak kullanılan araçlar arasında Python, GrADS (Grid Analysis and Display System), NCL (NCAR Command Language) ve Panoply vb. bulunmaktadır. Veriler ve araçlar hazır olduğunda, bir sonraki adım verileri işleyerek 1000 hPa seviyesindeki rüzgar bilgilerini çıkarmaktır. Bu amaçla, veriler ilgili araca yüklenir ve rüzgar bileşenleri çıkarılır. Veriler işlendikten sonra, ilgili araç (Python'da Cartopy veya diğer ilgili programlar) kullanılarak 1000 hPa seviyesindeki rüzgar modellerini görselleştiren bir sinoptik harita oluşturulur. Sinoptik haritalar oluşturulduktan sonra, siklonlar, antisiklonlar ve cepheler gibi temel özellikler belirlenerek yorumlanır ve analiz edilir. 1000 hPa'daki rüzgar akışı gibi rüzgar desenleri analiz edilir ve bu da hava kütlelerinin hareketi, fırtına sistemleri ve potansiyel yağış alanları gibi yüzey hava koşullarına ilişkin içgörüler sağlayabilir.

NCEP/NCAR yeniden analiz verilerini kullanarak 1000 hPa'daki rüzgar için sinoptik haritalar oluşturmaya yönelik bu ayrıntılı yaklaşım, yalnızca atmosfer dinamiklerini görselleştirmeye ve anlamaya yardımcı olmakla kalmaz, aynı zamanda bu bilgileri profesyonel ve erişilebilir bir şekilde sunmaya da yardımcı olmaktadır.

3.3. EOF/REOF ANALİZİ

Ampirik Ortogonal Fonksiyon (EOF) analizi, bir veri seti içindeki ortak değişkenliği bulmak ve bu iç bağımlılığı yakalayan yeni bileşik değişkenler oluşturmak için tasarlanmıştır; bu, birkaç bileşik ilişkisiz değişkenin, açıklanan verilerdeki değişkenliğin (varyans) çoğunu tanımlamasına olanak tanır. Bu genellikle büyük uzay-zaman verilerine (örneğin, çok sayıda mekansal konumda toplanan zaman serileri) uygulanır, ancak bireysel zaman serileri ve hatta ardışık olmayan veriler üzerinde de kullanılabilir (Martinson, 2018). EOF analizi, bir veri kümesini, veri kümesindeki varyansı mümkün olduğunca verimli bir şekilde açıklayan matematiksel olarak bağımsız yapılar kümesine ayrıştırmak için kullanışlıdır. EOF analizi,

verilerden ortogonal uzay-zamansal varyasyon modellerini çıkarır ve birkaç baskın mod genellikle toplam varyansın büyük bir bölümünü oluşturur ve fiziksel olaylarla ilişkilendirilebilir (Lee ve diğerleri, 2020; Zhai ve diğerleri, 2015).

EOF'lerin ana konsepti, X_{mn} değişkeninin m istasyondan oluşması ve n gözlemin uzay özvektörleri ve karşılık gelen zaman katsayılarının doğrusal bir kombinasyonu olarak ifade edilmesidir. Aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$X_{mn} = V_{mm} Z_{mn} \tag{3,1}$$

burada V_{mm} matrisi uzay özvektörlerini temsil eder ve Z_{mn} zaman katsayılarını temsil eder. Genel olarak ilk birkaç mod, toplam varyansın büyük bir kısmını oluşturur ve fiziksel olaylarla ilişkilendirilebilir. Modların yapısı, mekansal ve zamansal tutarlılığı keşfetmek için kullanılabilir (Zhai ve diğerleri, 2015).

Döndürülmüş Ampirik Ortogonal Fonksiyon (REOF) analizi, yalnızca orjinal özvektörlerin kullanılmasının aksine, özvektörlerin ana değişkenlik kaynaklarıyla hizalanacak şekilde dönmesini dahil ederek verilerdeki modellerin daha kapsamlı bir temsilini sağlayan geleneksel EOF analizinin bir uzantısıdır. REOF analizi formülü şu şekilde hesaplanır:

$$C = X \times X^T \div (n^{-1}) \tag{3,2}$$

burada C kovaryans matrisidir, X veri matrisidir ve n gözlem sayısıdır. Daha sonra kovaryans matrisinin özvektörleri ve özdeğerleri,

$$C \times e = \lambda \times e \tag{3,3}$$

olarak yazılabilir. Burada e özvektördür, λ özdeğerdir ve özvektörler ve özdeğerler, özvektörler birbirine dik olacak şekilde bulunur ve özdeğerler her bir özvektör tarafından açıklanan değişkenlik miktarını temsil eder. Son olarak, özvektörler, şu şekilde hesaplanan bir döndürme matrisi kullanılarak verilerdeki ana değişkenlik kaynaklarıyla hizalanacak şekilde döndürülür:

$$R = U \times V^T \tag{3,4}$$

burada U, orijinal özvektörlerin bir matrisidir, V, bir döndürülmüş özvektörler matristir ve R, döndürme matrisidir. Döndürülmüş özvektörler daha sonra verileri, verilerdeki ana değişkenlik kaynaklarını yakalayan bir dizi ortogonal modele ayrıştırmak için kullanılır (Wang ve diğerleri, 2015).

Bu çalışmada dolaşımdan çevreye yaklaşımı için 2011-2020 çalışma dönemi boyunca her mevsim için 80 hava kalitesi istasyonunun günlük PM_{10} gözlemlerine *R* programı kullanılarak EOF/REOF analizi uygulanmıştır.

REOF analizi, klimatoloji, meteoroloji ve çevre bilimlerinde mekansal ve zamansal veri desenlerini belirlemek için kullanılan istatistiksel bir tekniktir. 11 yıl boyunca günlük PM_{10} değerleri gibi bir veri kümesine uygulandığında, REOF analizi baskın değişkenlik modlarını ve bunların mekansal dağılımlarını belirlemeye yardımcı olur. REOF analizi bağlamında, yüklemeler, esasen farklı konumların birlikte nasıl değiştiğini tanımlayan desenler olan REOF'ler her mekansal konum (örneğin, PM_{10} için izleme istasyonları) için katsayıları veya ağırlıkları temsil eder. Bu yüklemeler pozitif veya negatif olabilir ve EOF analizinin matematiksel prosedürüyle belirlenir ve desenleri daha yorumlanabilir hale getirmek için bir döndürme (örneğin Varimax döndürme) gerçekleştirilir. Pozitif yüklemeler, pozitif yüklemelere sahip konumların doğrudan REOF moduyla değiştiğini gösterir. REOF modu güçlü olduğunda veya yüksek genliğe sahip olduğunda, pozitif yüklemelere sahip yerlerdeki PM_{10} konsantrasyonları ortalamadan daha yüksektir. Bu yerler REOF modu tarafından temsil edilen desenle pozitif olarak ilişkilidir. Öte yandan, negatif yüklemeler, negatif yüklemelere sahip yerlerin REOF moduyla ters orantılı olarak değiştiğini gösterir. REOF modu güçlü olduğunda, negatif yüklemelere sahip yerlerdeki PM_{10} konsantrasyonları ortalamadan daha düşüktür. Bu yerler REOF modu tarafından temsil edilen desenle negatif olarak ilişkilidir.

REOF analizinde yüklemelerin belirlenmesi birkaç adımı içerir. REOF'un kendisi PM_{10}'un ortalama konsantrasyonlarını doğrudan belirlemez; bunun yerine, veri kümesinin ortalama durumu etrafındaki değişkenlik desenlerini belirlemeye yardımcı olur. Sürecin nasıl işlediği aşağıda verilmiştir

- Veri Hazırlama: REOF analizini uygulamadan önce, 11 yıl boyunca günlük ölçümlerden oluşan PM_{10} veri kümesi, tipik olarak ortalama bir durumdan kaynaklanan anomalilere veya sapmalara odaklanmak üzere işlenir. Bu ortalama durum genellikle her bir konum için ilgi duyulan zaman periyodu boyunca hesaplanır (örneğin, aylık veya yıllık ortalamalar) ve anomalileri elde etmek için gerçek değerlerden çıkarılır. Bu adım, mutlak konsantrasyon seviyelerinden ziyade değişkenlik modellerini belirlemek için çok önemlidir.

- REOF Analizi: REOF analizi daha sonra bu anomalileri (ortalamadan sapmalar) mekansal ve zamansal bileşenlere ayırır ve veri setindeki değişkenliğin önemli bir bölümünü açıklayan modelleri (modları) belirler.
    - Mekansal desenler (yüklemeler): Mekansal bileşen, her bir konum için yüklemelerden oluşur ve her bir konumun belirli bir değişkenlik deseniyle ne kadar güçlü bir şekilde ilişkili olduğunu gösterir. Yukarıda belirtildiği gibi, bu yüklemeler pozitif veya negatif olabilir ve bu da belirli bir konumdaki PM_{10} konsantrasyon anomalilerinin, o mod aktif olduğunda uzun vadeli ortalamanın üstünde mi yoksa altında mı olma eğiliminde olduğunu gösterir (Şekil 3.3).
    - Zamansal desenler (genlikler): Zamansal bileşen, her bir modun zaman içindeki puanlarından veya genliklerinden oluşur ve her bir modun belirli bir zamandaki gücünü veya aktivite seviyesini gösterir. Bir modun genliği yüksek olduğunda (pozitif veya negatif olmasına bakılmaksızın), bu, o mod tarafından temsil edilen desenin güçlü bir şekilde ifade edildiği anlamına gelir (Şekil 3.4).

Sonuçları yorumlarken, "REOF modu güçlü olduğunda veya yüksek bir genliğe sahip olduğunda, pozitif yüklemelere sahip yerlerdeki PM_{10} konsantrasyonları ortalamadan daha yüksektir" demek, belirli bir REOF modunun zamansal puanının yüksek olduğu dönemlerde, o mod için pozitif mekansal yüklemelere sahip yerlerde uzun vadeli ortalamalarından daha yüksek PM_{10} konsantrasyon anomalileri sergilediği anlamına gelir. Tersine, negatif yüklemelere sahip yerlerde aynı dönemde uzun vadeli ortalamalarından daha düşük anomaliler olacaktır. Özetle, REOF analizi bağlamında atıfta bulunulan PM_{10} "ortalama konsantrasyonları", anomalilerin hesaplandığı uzun vadeli ortalama konsantrasyonlardır. REOF, mutlak ortalama konsantrasyonları belirlemek yerine, bu anomalilerin (hem ortalamadan pozitif hem de negatif sapmalar) mekansal ve zamansal olarak nasıl dağıldığını ve ilişkilendirildiğini belirler (Hannachi, 2004) .

	A	B	C	D	E
1	Kış				
2	İstasyonlar	EOF1	EOF2	EOF3	EOF4
3	Adana_Catal	-0.1285538	0.81604499	0.50549478	-0.0428946
4	Adana_Doga	-0.3968118	0.06896342	0.1919753	0.0425924
5	Adana_Mete	0.67711604	0.09764334	-0.0199704	0.07102518
6	Adana_Valilil	-0.4323383	0.55822505	0.49180873	0.30732437
7	Adiyaman	-0.639504	0.60867134	0.11140772	0.41656112
8	Afyon	-0.7095795	0.04662791	0.4718208	0.44434072
9	Agri	0.20460819	0.75260714	0.31867412	-0.0922882
10	Aksaray	-0.7216149	0.45376674	0.30285126	0.20485141
11	Ankara_Dem	-0.6036433	0.13394436	0.2976763	-0.0232386
12	Ankara_Kaya	-0.3024721	0.12747042	0.83628261	0.0038078
13	Ankara_Sihhi	-0.8552454	0.14946353	0.18557482	-0.1230066
14	Ankara_Sinca	-0.1305557	0.29224004	0.32127055	-0.0519231
15	Antalya	-0.3835785	0.68183263	0.38762646	0.26845564
16	Ardahan	-0.8384176	0.40341094	-0.1360687	-0.0855362
17	Artvin	-0.4295319	0.42543997	0.46411473	0.04202863
18	Aydin	-0.8789491	0.00103305	0.17749789	0.28703091
19	Balikesir	-0.5941657	0.39231675	0.09721568	0.55216859
20	Bartin	-0.8478248	0.18925985	-0.1495586	0.15435554

	A	B	C	D	E
1	Bahar				
2	İstasyonlar	EOF1	EOF2	EOF3	EOF4
3	Adana_Catal	-0.5626798	-0.4650356	-0.4342816	0.38785504
4	Adana_Doga	-0.1472844	0.17331247	-0.8650577	0.12485656
5	Adana_Mete	-0.2553952	0.44416754	-0.5070546	-0.3366778
6	Adana_Valilil	-0.7399729	-0.3844113	-0.2182513	0.30328885
7	Adiyaman	-0.5971751	-0.5057257	-0.103137	0.53844031
8	Afyon	-0.4644983	-0.393576	-0.5598069	0.49802207
9	Agri	-0.034575	-0.2375545	-0.4997479	-0.0641305
10	Aksaray	-0.424406	-0.753791	-0.0884847	0.30697037
11	Ankara_Dem	-0.0102192	0.55561529	-0.3227173	0.12747615
12	Ankara_Kaya	-0.1829481	-0.2560523	-0.6898193	-0.4059508
13	Ankara_Sihhi	-0.1713367	0.14177209	-0.8130961	0.07355489
14	Ankara_Sinca	-0.2404737	0.51603748	-0.3483393	0.14869172
15	Antalya	-0.7952198	-0.0856621	-0.3683618	-0.0152891
16	Ardahan	-0.3837606	-0.3147514	0.12260173	0.82784366
17	Artvin	-0.2289141	0.15891784	-0.3982832	0.784353
18	Aydin	-0.1504402	-0.7017621	-0.0887126	0.57694261
19	Balikesir	-0.8586486	-0.2789757	-0.1393737	0.35204119
20	Bartin	-0.2378805	-0.236133	-0.3854501	0.69863035

	A	B	C	D	E
1	Yaz				
2	İstasyonlar	EOF1	EOF2	EOF3	EOF4
3	Adana_Catal	-0.7046409	-0.4809696	0.12245599	0.39372991
4	Adana_Doga	0.06196034	0.05446104	-0.1114618	0.75421869
5	Adana_Mete	-0.310714	0.03447282	-0.2179429	0.80073606
6	Adana_Valilil	-0.8237476	-0.0042414	0.38548528	0.19096126
7	Adiyaman	-0.4150177	0.07790095	0.42486898	-0.3564729
8	Afyon	-0.6414912	-0.2888648	0.55089633	0.035864
9	Agri	-0.1936744	0.11151068	-0.1989107	0.30995244
10	Aksaray	-0.6704936	-0.439382	0.18573309	0.41463603
11	Ankara_Dem	-0.3819063	-0.0493332	0.85546663	0.26215733
12	Ankara_Kaya	-0.0363563	-0.0949853	0.32538046	0.66245091
13	Ankara_Sihhi	-0.537656	-0.180555	0.4596447	0.54230979
14	Ankara_Sinca	-0.2330535	0.08087662	0.6553635	0.15288096
15	Antalya	-0.7148639	-0.2477686	0.27665155	-0.0433521
16	Ardahan	-0.7071272	0.41200033	0.49957291	-0.0230073
17	Artvin	-0.6816206	0.25489574	0.34232608	0.2661251
18	Aydin	-0.5702046	-0.5219278	0.5740063	0.03147605
19	Balikesir	-0.8174803	-0.0466451	0.13406568	0.28506117
20	Bartin	-0.5657986	-0.1239112	0.6441745	-0.0392138

	A	B	C	D	E
1	Sonbahar				
2	İstasyonlar	EOF1	EOF2	EOF3	EOF4
3	Adana_Catalan	-0.1296918	-0.118438	-0.0426682	-0.8569946
4	Adana_Dogankent	-0.3237034	-0.2283019	-0.1447599	-0.456836
5	Adana_Meteorolo	-0.1267427	-0.2053337	0.50054537	-0.5765101
6	Adana_Valilik	-0.0789215	0.01652199	-0.2105436	-0.8195899
7	Adiyaman	-0.0732905	0.74650457	-0.5502532	-0.006355
8	Afyon	-0.8962615	-0.0751086	-0.1932028	-0.1122408
9	Agri	0.44706772	0.80507592	0.29141137	0.1590029
10	Aksaray	-0.758692	0.28720351	-0.1330566	-0.2911041
11	Ankara_Demetevle	-0.462912	0.07121137	-0.575089	0.00808499
12	Ankara_Kayas	-0.7987354	-0.0603174	-0.0453113	0.03983643
13	Ankara_Sihhiye	-0.7240632	-0.0372825	-0.3708234	0.25532608
14	Ankara_Sincan	0.17051683	0.4074067	0.35727548	0.23700423
15	Antalya	-0.7587756	0.47932092	0.01760389	0.1376349
16	Ardahan	-0.3710507	0.61609706	-0.5795273	-0.0609103
17	Artvin	-0.1583088	0.18167303	-0.0168461	-0.8332933
18	Aydin	-0.6654232	-0.0224521	-0.5880158	0.07029546
19	Balikesir	-0.2371549	0.64280161	0.2878374	-0.0620208
20	Bartin	-0.2875192	0.24503749	-0.6553007	-0.0990988

Şekil 3.3: PM_{10} verilerine REOF analizi uyguladıktan sonra elde edilen mevsimsel REOF modları.

	A	B	C	D	E
1	Kış				
2	Yıllar	EOF1	EOF2	EOF3	EOF4
3	2010	-0.0048235	2.87937377	0.05646407	0.28035101
4	2011	-1.4833154	-0.1943042	-0.3269059	1.74370174
5	2012	-1.0272581	-0.6728212	-0.9044112	0.56520268
6	2013	-1.3496462	-0.0951443	-0.3233444	-1.1701489
7	2014	-0.7377874	-0.0305423	0.68598463	-1.561413
8	2015	0.06987759	-0.2699067	1.94536244	-0.4393493
9	2016	0.51474333	-0.9024206	0.82715226	0.18678414
10	2017	1.04411268	-0.0591029	0.96960762	1.2746877
11	2018	0.88307044	-0.5486432	-0.6212976	0.35822947
12	2019	1.20767528	0.02223412	-1.0178359	-0.5609585
13	2020	0.88335142	-0.1287225	-1.290776	-0.677087

	A	B	C	D	E
1	Bahar				
2	Yıllar	EOF1	EOF2	EOF3	EOF4
3	2010	-2.5314475	-0.1835986	0.84856082	-0.0149721
4	2011	-0.6608026	-0.5618218	0.01826361	0.89554049
5	2012	-0.0780148	-0.7736809	0.2186525	1.23740898
6	2013	0.44066346	0.25350716	-1.5810177	1.71177129
7	2014	1.11802094	-0.9701763	0.081053	0.04814252
8	2015	0.61803704	-1.3344626	0.21089014	-0.8566594
9	2016	0.410157	-0.5490406	-0.0053652	-0.9340793
10	2017	-0.1266417	-0.1046699	-0.5658846	-1.5558625
11	2018	-0.5112437	1.43522601	-1.7478785	-0.7568605
12	2019	0.61380934	1.34426135	1.01263239	-0.1204174
13	2020	0.70746253	1.44445619	1.51009365	0.34598793

	A	B	C	D	E
1	Yaz				
2	Yıllar	EOF1	EOF2	EOF3	EOF4
3	2010	-2.6906367	0.35685431	-0.7524581	-0.1724046
4	2011	-0.7159449	0.28342577	0.89549087	0.35424023
5	2012	-0.1458218	-0.0838013	2.04393143	0.28250917
6	2013	0.24149341	0.66317178	1.13839699	0.30204132
7	2014	0.49080934	-1.3302136	0.40458239	-0.3453257
8	2015	0.61272493	-1.198021	-0.2025849	0.05896384
9	2016	-0.2023056	-1.7411089	-0.8248536	-0.7859154
10	2017	0.41273381	0.16482342	-0.8449648	2.079959
11	2018	0.65463105	0.5748255	-1.1062388	0.82631832
12	2019	0.746201	1.35944826	-0.5387945	-0.7789806
13	2020	0.59611551	0.95059569	-0.212507	-1.8214056

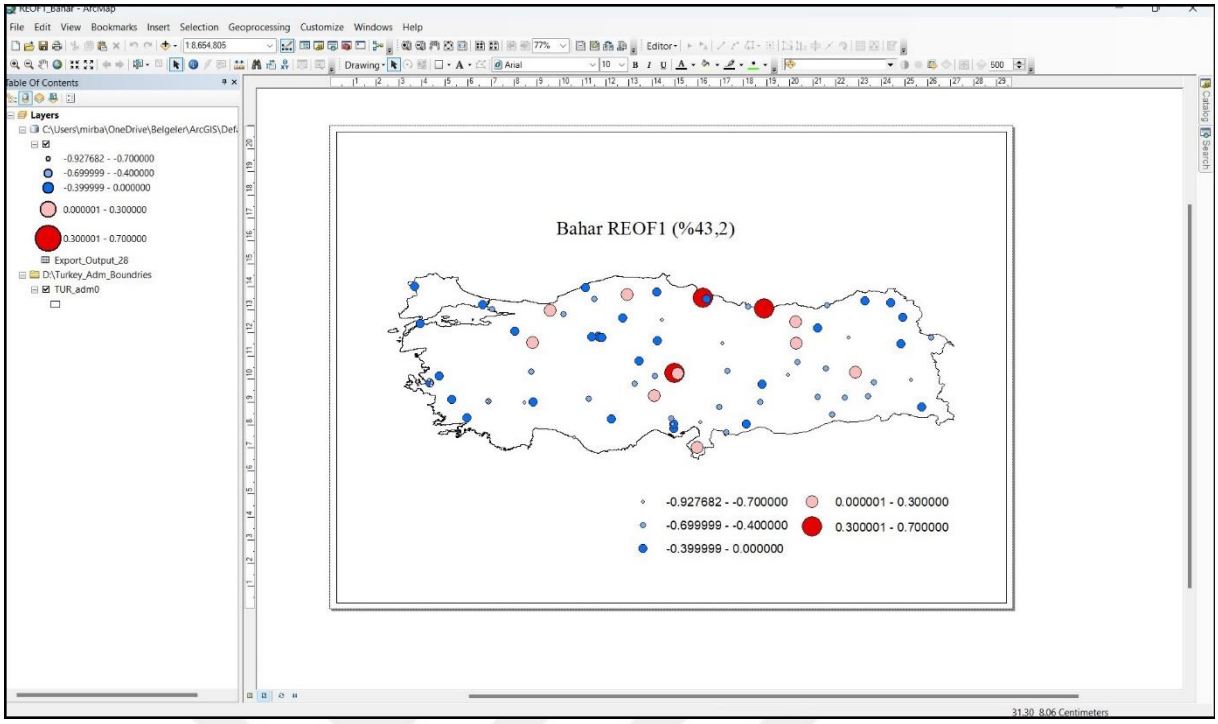
	A	B	C	D	E
1	Sonbahar				
2	Yıllar	EOF1	EOF2	EOF3	EOF4
3	2010	-1.0780744	2.30431069	-0.0176757	-0.8626253
4	2011	-0.9910767	0.02246774	-0.7793303	1.30554974
5	2012	-0.3374551	0.20826988	-1.2561609	0.5458566
6	2013	-0.0304523	-0.4606375	-1.3969845	-0.1438662
7	2014	0.50953335	-1.2912135	-0.7151709	-0.1785977
8	2015	-0.0215342	-0.7198602	0.04864158	-2.5175032
9	2016	-1.1979318	-1.1585202	0.93253733	0.50155667
10	2017	-0.7106889	0.06880244	1.55747795	0.19942047
11	2018	0.67361221	-0.2078246	1.28516591	0.59045087
12	2019	1.49818663	0.39695718	0.58527636	0.09764704
13	2020	1.68588119	0.83724807	-0.2437767	0.46211095

Şekil 3.4: PM_{10} verilerine REOF analizi uyguladıktan sonra elde edilen mevsimsel PC modları.

3.4. CBS UYGULAMA

Coğrafi bilgi sistemi (CBS), kullanıcıların coğrafi ve mekansal verilerin geliştirilmesine, saklanmasına, yönetmesine, analiz etmesine ve görselleştirmesine olanak tanıyan, dünya yüzeyindeki coğrafi etki olaylarını ve olaylarını inceleyen bilgisayar tabanlı bir bilgi sistemidir. Coğrafi olarak referanslı her türlü bilgiyi yakalamak, yönetmek, analiz etmek ve görüntülemek için donanım, yazılım ve verileri birleştirir ve kullanıcıların verilerdeki mekansal ilişkileri, kalıpları ve eğilimleri incelemesine olanak tanır (Maguire, 1991, Zhou, 2021).

Bu çalışma için haritaların oluşturulması ve PM_{10} verilerinin Ters Mesafe Ağırlıklı (IDW) enterpolasyonu için ArcGIS10.5'i kullanılmıştır (Şekil 3.5)



Şekil 3.5: Kullandığımız ArcGIS10.5 uygulamasından bir ekran görüntüsü.

3.5. CBS TABANLI IDW ENTERPOLASYONU

REOF'lerin mekansal dağılım haritasını çizmek için Ters Uzaklık Ağırlıklı (IDW) enterpolasyon yöntemi kullanılmıştır. IDW, çevrede ölçülen değerlere ve ortaya çıkan yüzeyin düzgünlüğünü belirleyen belirli matematiksel formüllere dayanarak konumlara değerler atayan deterministik bir enterpolasyon yöntemidir (ESRI, 2016). IDW, birbirine yakın olan şeylerin uzaktakilere göre daha fazla benzerlik taşıdığı Tobler'in Birinci Coğrafya Yasasına dayanarak çalışır (Tobler, 1970, Abdullah, 2020). IDW tekniği, daha yakın ölçülen ve ölçülmeyen noktalara, uzakta ölçülen noktalardan daha yüksek bir ağırlığın verildiği yakındaki ağırlıklı konumlardan alınan değerleri kullanarak örneklenmemiş konumlar için ortalama bir değer hesaplar (Li ve diğerleri, 2014). Dolaysıyla, IDW, PM verilerinin enterpolasyonu için yaygın olarak kullanılmaktadır (Li ve diğerleri, 2014, Shukla ve diğerleri, 2020, Sharma ve Kumar, 2023) ve Li ve Heap (2011), yaklaşık 53 farklı çalışmayı ve 72 farklı yöntemi ve alt yöntemler incelenmiş ve IDW'nin Çevre bilimleri alanında en çok kullanılan enterpolasyon yöntemlerinden biri olduğu sonucuna varılmıştır. IDW enterpolasyonunun kullanılmasının nedeni, mevcut çalışma döneminde büyük ölçekli atmosferik sirkülasyonların PM_{10} değerlerinin konsantrasyonları üzerindeki etkilerini kolayca belirlemektir. IDW, en yakın istasyonların eksik değerlerini tespit ettiğinden veya bu durumda noktaları birleştirdiğinden,

komşu istasyonların PM_{10} konsantrasyonundaki artış/azalışın tespit edilmesi oldukça faydalıdır. Sonuçlar bölümünde verilen tüm mevsimlere ait REOF1 ve REOF2 sonuçlarından görülebileceği gibi (Şekil 4.4-4.11), yerel ve büyük ölçekli atmosferik etkilerin bağlantısı mekansal olarak kolaylıkla belirlenebilmektedir. IDW'nin genel formülü şu şekilde ifade edilebilir:

$$z'(x_0) = \frac{\sum_{i=1}^{N} \omega_i(x_0) z(x_i)}{\sum_{i=1}^{N} \omega_i(x_0)} \quad (3.5)$$

Burada $z'(x_0)$, bilinmeyen x_0 noktasındaki tahmini değerdir, $z(x_i)$, örnek nokta x_i'teki bilinen değerlerdir ve $\omega_i(x_0)$, bilinmeyen x_0 noktasına olan uzaklığına bağlı olarak bilinen her noktaya bir ağırlık atayan ağırlık fonksiyonudur (Li ve diğ., 2014).

4. BULGULAR

4.1. PM_{10} KONSANTRASYONLARI

Tablo 4.1, 2010-2020 çalışma dönemi için seçilen 80 hava kalitesi izleme istasyonu için yıllık ortalama PM_{10} konsantrasyonlarını göstermektedir. Bu hava kalitesi izleme istasyonlarındaki PM_{10} konsantrasyonlarının analizi, farklı bölgelerdeki hava kalitesinde önemli değişkenlik olduğunu ortaya koymaktadır. En yüksek PM_{10} konsantrasyonları olan istasyonlar arasında Iğdır'daki istasyon 110,1 µg/m³ ile en yüksek yıllık ortalama PM_{10} konsantrasyonunu sahipken, bunu 100,54 µg/m³ ile Muş ve 80,73 µg/m³ ile Afyon takip etmektedir. Bu yüksek seviyeler, potansiyel olarak endüstriyel faaliyetler, trafik ve ısınma gibi insan kaynaklı emisyonları veya toz fırtınaları gibi doğal kaynaklar nedeniyle oluşan kötü hava kalitesini göstermektedir. Bu yüksek konsantrasyonlar, DSÖ tarafından önerilen limit değerlerin oldukça üzerindedir, ve özellikle savunmasız nüfuslar için ciddi sağlık riskleri oluşturmaktadır. Orta ila yüksek konsantrasyonları gösteren istasyonlar arasında Batman (85,55 µg/m³), Siirt (84,47 µg/m³) ve Kayseri (Hürriyet) (82,15 µg/m³) gibi şehirler vardır. Orta seviyedeki konsantrasyonlar için Antalya (51,44 µg/m³), Van (55,04 µg/m³) ve İzmir'deki (Alsancak) (38,84 µg/m³) istasyonlar da dahil olmak üzere birkaç istasyon orta düzeyde PM_{10} konsantrasyonları kaydetmiştir. Bu seviyeler nispeten daha güvenli bir aralıkta olsa da, yine de DSÖ limit değerlerin üzerindedir ve uzun süreli maruziyetinde sağlık sorunlarına katkıda bulunabilir. En düşük ortalama PM_{10} seviyeleri Artvin'de (25,88 µg/m³), Çanakkale'de (28,14 µg/m³) ve Adana'da (Çatalan) (29,35 µg/m³) gözlemlendi. Şeçilen 80 istasyon için genel ortalama PM_{10} konsantrasyonunun 57 µg/m^3 olduğu görülmüştür ve bu, AB ve DSÖ günlük eşik sınırlarının (50 µg/m^3 ve 40 µg/m³) oldukça üzerindedir.

Tablo 4.1: Seçilen 80 hava kalitesi izleme istasyonunun koordinatları (yani boylam, enlem) ve çalışma dönemi (2010–2020) için yıllık ortalama PM_{10} konsantrasyonları. (İstasyon konumları Şekil 3.2'de verilmiştir)

İstasyon No.	İstasyon Adı	Enl. (°E)	Boy. (°N)	PM_{10} (µg/m^3)
1	Adana (Çatalan)	35,26	37,18	29,35

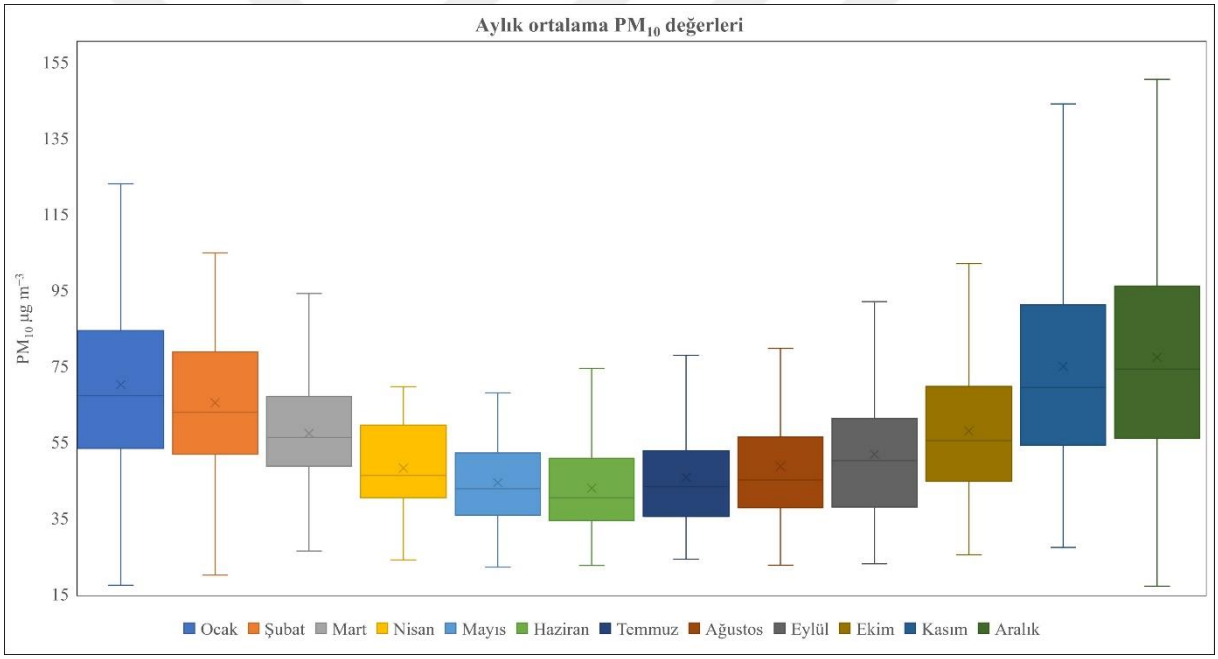
2	Adana (Doğankent)	35.34	36,85	32,49
3	Adana (Meteoroloji)	35,34	37,00	69,71
4	Adana (Valilik)	35,31	37,00	67,16
5	Adıyaman	38,27	37,75	63,55
6	Afyon	30,52	38,77	80,73
7	Ağrı	43,04	39,72	53,64
8	Aksaray	34,02	38,36	59,31
9	Ankara (Demetevler)	32,79	39,96	62,27
10	Ankara (Kayaş)	32,92	39,92	71,65
11	Ankara (Sıhhiye)	32,85	39,92	74,61
12	Ankara (Sincan)	32,58	39,95	57,50
13	Antalya	31,98	36,55	51,44
14	Ardahan	42,70	41,10	44,52
15	Artvin	41,81	41,17	25,88
16	Aydin	27,83	37,84	60,62
17	Balıkesir	27,97	40,48	51,02
18	Bartın	32,35	41,62	57,35
19	Batman	41,12	37,90	85,55
20	Bayburt	40,22	40,25	48,23
21	Bilecik	29,97	40,14	45,11

22	Bingöl	40,50	38,88	35,68
23	Bitlis	42,11	38,40	49,48
24	Bolu	31,60	40,72	60,35
25	Burdur	30,29	37,72	63,62
26	Çanakkale	26,77	40,40	28,14
27	Çankırı	33,61	40,59	47,54
28	Çorum	34,94	40,53	61,89
29	Denizli (Bayramyeri)	29,08	37,78	82,06
30	Denizli (Merkezefendi)	29,03	37,77	61,47
31	Diyarbakır	40,22	37,91	60,37
32	Düzce	31,16	40,83	82,29
33	Edirne	26,58	41,65	58,21
34	Elazığ	39,21	38,67	51,09
35	Erzincan	39,49	39,74	63,64
36	Erzurum	41,27	39,91	46,28
37	Eskişehir	30,56	39,75	31,73
38	Gaziantep	37,80	37,00	68,30
39	Giresun	38,39	40,91	38,19
40	Gümüşhane	39,48	40,45	54,94
41	Hakkari	43,73	37,57	70,66

42	Hatay (Antakya)	36,13	36,21	57,70
43	Iğdır	44,05	39,92	110,1
44	Isparta	30,57	37,76	68,70
45	İstanbul (Esenler)	28,88	41,03	50,14
46	İstanbul (Kartal)	29,20	40,89	55,85
47	İzmir (Alsancak)	27,14	38,43	38,84
48	İzmir (Çiğli)	27,06	38,49	39,50
49	İzmir (Gaziemir)	27,14	38,31	41,45
50	İzmir (Güzelyalı)	27,08	38,39	43,48
51	İzmir (Şirinyer)	27,14	38,38	47,81
52	Kahramanmaraş	36,89	37,58	63,32
53	Karabük	32,66	41,22	51,54
54	Karaman	33,22	37,17	72,62
55	Kars (İstasyon mah.)	43,10	40,60	50,63
56	Kastamonu	33,77	41,38	41,15
57	Kayseri (Hürriyet)	35,47	38,71	82,15
58	Kayseri (OSB)	35,37	38,74	69,43
59	Kilis	37,12	36,71	52,37
60	Kırşehir	34,16	39,13	39,10
61	Konya (Meram)	32,47	37,86	58,00

62	Malatya	38,34	38,35	59,82
63	Manisa	27,40	38,61	78,47
64	Mardin	40,72	37,32	60,51
65	Muğla (Musluhittin)	28,35	37,21	72,46
66	Muş	41,51	38,75	100,54
67	Nevşehir	34,70	38,62	47,46
68	Niğde	34,68	37,96	69,57
69	Ordu (Stadyum)	37,87	40,98	49,89
70	Osmaniye	36,24	37,07	77,13
71	Rize	40,53	41,02	32,02
72	Samsun (İlkadım Hastane)	36,33	41,27	51,77
73	Samsun (Tekkeköy)	36,45	41,22	53,97
74	Şanlıurfa	37,16	38,79	59,69
75	Siirt	41,93	37,93	84,47
76	Sinop	34,77	41,46	39,73
77	Sivas (Meteoroloji)	37,00	39,74	47,45
78	Tunceli	39,54	39,10	32,80
79	Van	43,37	38,50	55,04
80	Yozgat	34,80	39,81	46,16

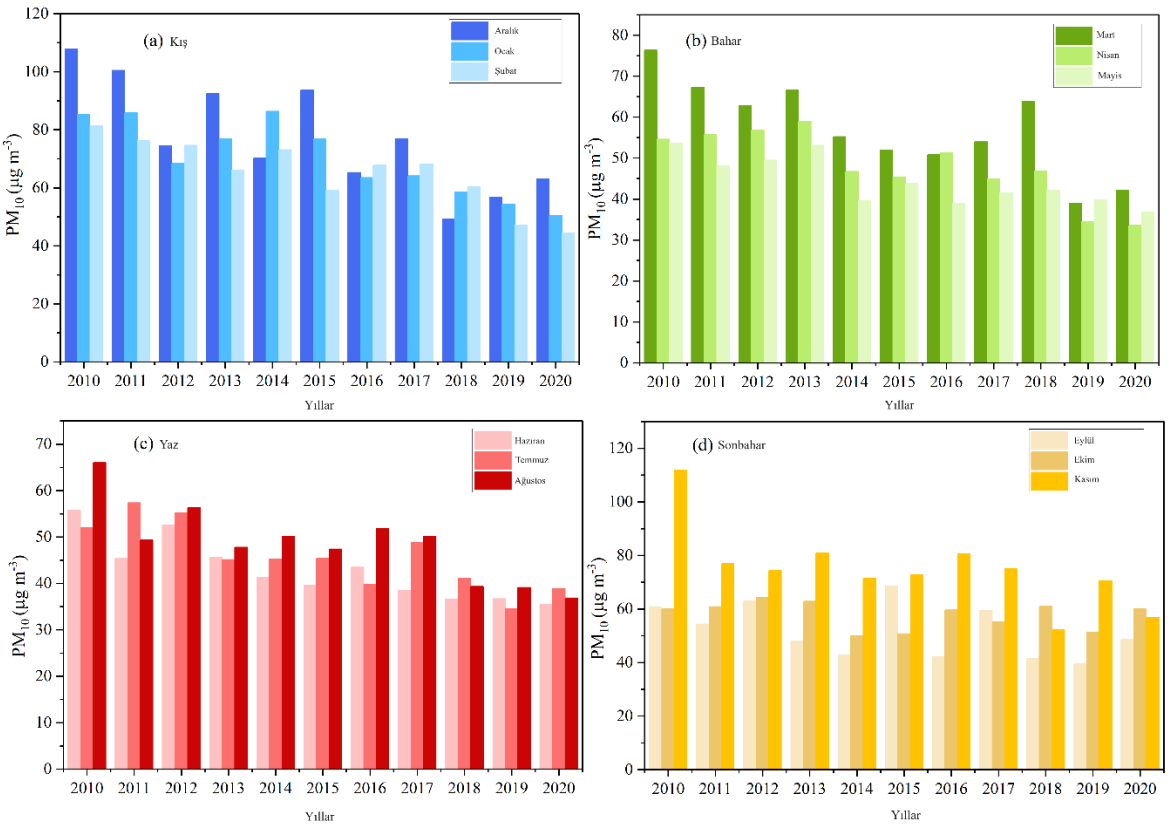
Şekil 4.1'de 80 hava kalitesi istasyonunda kaydedilen PM_{10}'un aylara göre ortalama değişimleri verilmiştir (80 hava kalitesi istasyonunun PM_{10} verileri,), en yüksek aylık ortalamaların sonbaharda Kasım ayında, kışın Aralık, Ocak ve Şubat aylarında olduğu görülmektedir. Genel olarak sonuçlara bakıldığında kış Ayları (Aralık - Şubat) özellikle Aralık ve Ocak ayında, en yüksek medyan PM_{10} ortalamaları Aralık ayında 80 µg/m³ ve Ocak ayında 75 µg/m³ 'dir. Ocak ayında görülen maksimum konsantrasyon 115 µg/m³'tür. Şubat ayında PM_{10} medyan değeri yaklaşık 70 µg/m³'tür. Bahar aylarında özellikle Mart ve Nisan aylarında PM_{10} seviyelerinde düşüş olduğu ve medyan değerler sırasıyla yaklaşık 60 µg/m³ ve 55 µg/m³ olduğu görülmektedir, Mayıs ve Haziran'da en düşük medyan PM_{10} konsantrasyonları sırasıyla 40 µg/m³ ve 50 µg/m³'tür. Yaz aylarında düşük PM_{10} konsantrasyonları eğiliminin sürdüğü, Ekim ayında ise PM_{10} konsantrasyonunda artış olduğu ve 70 µg/m³'e ulaştığı görülmektedir.



Şekil 4.1: 2010–2020 dönemi için Türkiye'deki aylık ortalama PM_{10}'un Box-plot grafikleri (seçilen 80 hava kalitesi istasyonu için). Kutu içindeki x medyan değeri ve düz çizgi ortalama değeri gösteriyor.

Şekil 4.2'de PM_{10} konsantrasyonlarının aylara göre aritmetik ortalama değişimleri verilmiştir. Şekil 4.2a'da, Aralık ayında PM_{10}'un en yüksek ortalama değerlerine ulaştığı, ancak 2018 yılında Ocak ve Şubat aylarında Aralık ayına göre ortalama PM_{10} konsatrasyonunun daha yüksek değerlere ulaştığı görülmektedir Zamansal trende bakıldığında, Aralık ayı için en yüksek PM_{10} değerleri 2010, 2011 ve 2015 yıllarında, yaklaşık 100 µg/m^3 'dür. İlkbaharda,

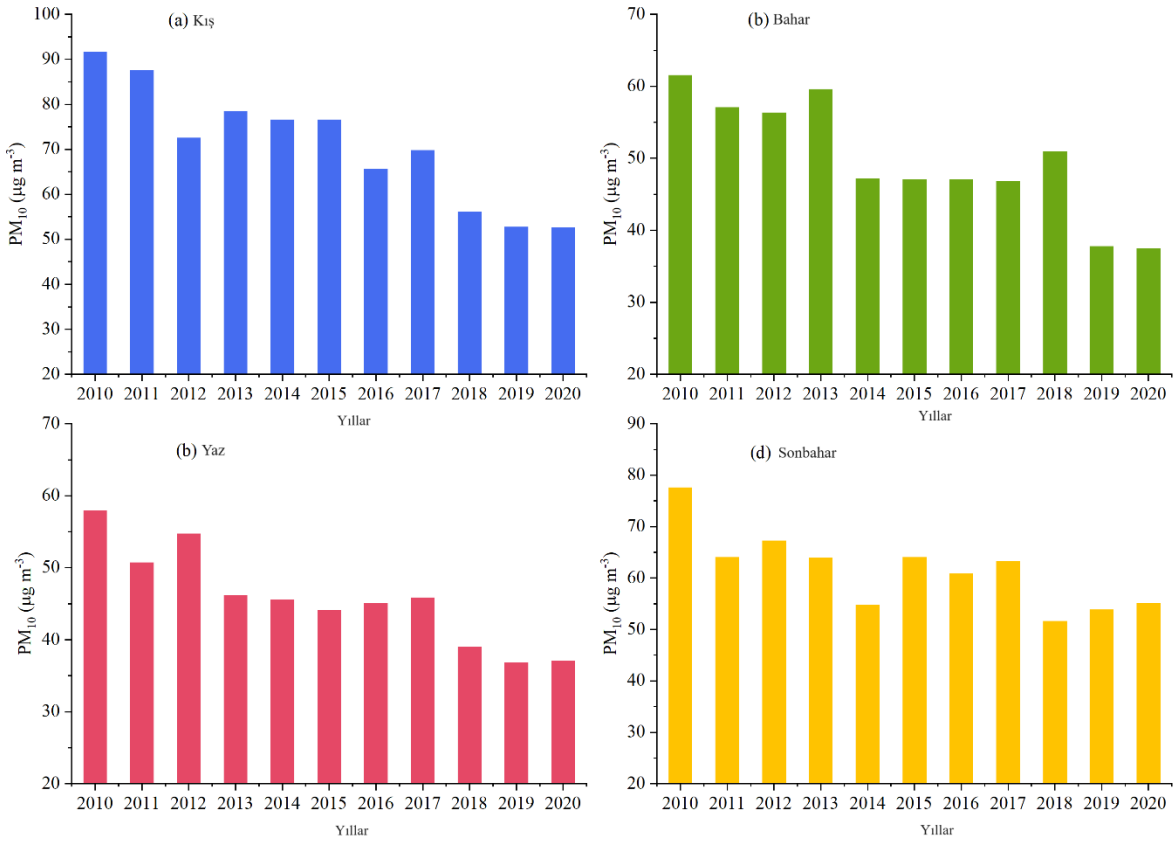
Mart ayı 11 yıl boyunca en yüksek ortalama PM_{10} konsantrasyonuna sahiptir ve bunu sırasıyla Nisan ve Mayıs ayları takip etmektedir (Şekil 4.2b). Yıllık dağılıma göre en yüksek aylık ortalama PM_{10} 2010, 2013 ve 2018 yıllarının Mart aylarında görülmektedir. Yaz aylarında, Ağustos ayındaki ortalama PM_{10}, 2018 ve 2020 istisnaları dışında, genel olarak yıllar boyunca en yüksek konsantrasyonlara sahiptir; burada Temmuz ayı, Ağustos ayına göre daha yüksek ortalama konsantrasyona sahiptir (Şekil 4.2c). Sonbaharda en yüksek ortalama PM_{10} Kasım ayındadır. Kasım , kış aylarından sonra en yüksek PM_{10} seviyelerini gördüğümüz ay olarak öne çıkmaktadır (Şekil 4.2d).



Şekil 4.2: 2010–2020 dönemi için PM_{10} konsantrasyon değerlerinin Türkiye genelinde mevsimlere göre aylık aritmetik ortalama değerleri : a)Kış b)Bahar c)Yaz d)Sonbahar

Şekil 4.3a-d, 11 yıllık çalışma dönemi boyunca PM_{10} konsantrasyonunun mevsimsel değişimini göstermektedir. Genel olarak kış, ilkbahar ve yaz mevsimlerinde PM_{10} konsantrasyonu son 11 yılda azalma eğilimi göstermiş olup PM_{10} konsantrasyonunun önceki yıllara göre arttığı durumlar da vardır. Sonbaharda da genel olarak benzer bir düşüş eğilimi olduğu ancak PM_{10} konsantrasyonunda çalışma döneminde önceki yıllara göre çok az ani artış/azalış görülmüştür.

PM_{10} konsantrasyonunda gözle görülür bir azalma eğilimi gösteren diğer mevsimlerden farklı olarak 2018 yılından itibaren artış eğiliminde olduğu görülmüştür.



Şekil 4.3: 2010–2020 dönemi için Türkiye'deki PM_{10} konsantrasyonlarının mevsimsel değişimleri

4.2 REOF ANALİZİNİN SONUÇLARI

Bu çalışmada odak noktamız 2010-2020 dönemi için Türkiye genelinde mevsimsel PM_{10} konsantrasyonlarının mekansal ve zamansal değişimlerini incelemek olduğundan, PM_{10} konsantrasyonlarındaki mevsimsel değişkenlik REOF tekniğini kullanarak analiz edilmiştir. Şekil 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11 ve 4.12, çalışma dönemi boyunca mevsimsel ortalama PM_{10} konsantrasyonlarına ($\mu g/m^3$) uygulanan REOF analizinin mevsimsel mekansal modellerini ve ilgili temel bileşenlerini göstermektedir. PM_{10}'un ilk REOF modu kışın %44,9, ilkbaharda %43,2, yazın %39,5 ve sonbahar mevsiminde %31,6'ya karşılık gelmekte ve bu da her mevsim için farklı sinyallere işaret etmektedir. PM_{10}'un ikinci REOF modu kışın %17,9, ilkbaharda %14,0, yaz aylarında %14,0 ve sonbahar mevsiminde %16,3'e karşılık gelmekte olup bu da her mevsim için birinci moddan farklı sinyallere işaret etmektedir. Üçüncü ve dördüncü REOF modu sırasıyla kış için %10,9 ve %7,9, ilkbahar için %12,1 ve %8,1, yaz için %11,4 ve %7,7 ve sonbahar mevsimi için %10,2 ve %9,3 olarak görülmüştür, Kış sezonu için ilk iki baskın REOF modunun toplamı sırasıyla %62,4, ilkbahar için %57,2, yaz için %53,5 ve sonbahar için %47,9 olarak ortaya çıkmıştır. İlk iki REOF modunun toplamının yüzdesi oldukça yüksektir ve bu nedenle geri kalan REOF modlarının sadece sonuç kısmı verilmiştir. REOF analizinin varyans yüzdesi sonuçları aşağıda Tablo 4.2'de verilmektedir.

Tablo 4.2: İlk dört baskın REOF modun varyansının yüzdesi.

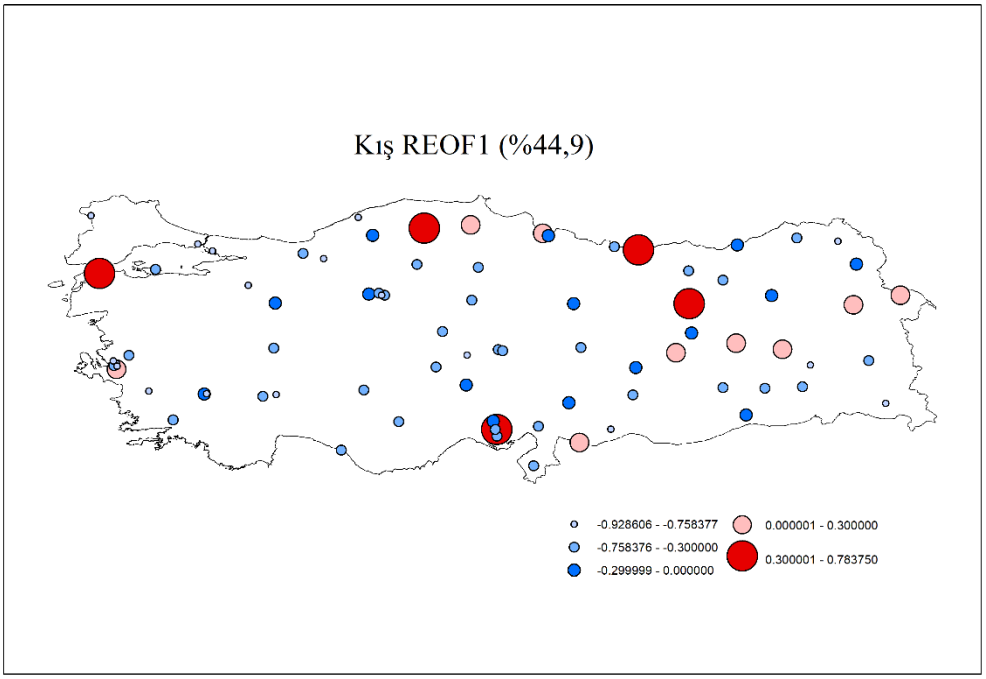
REOF modu	Kış (%)	İlkbahar (%)	Yaz (%)	Sonbahar (%)
REOF1	44,9	43,2	39,5	31,6
REOF2	17,9	14,0	14,0	16,3
REOF3	10,9	12,1	11,4	10,2
REOF4	7,9	8,1	7,7	9,3

4.2.1 REOF1'e Göre Kirliliği Açısından Önemli Bölgeler

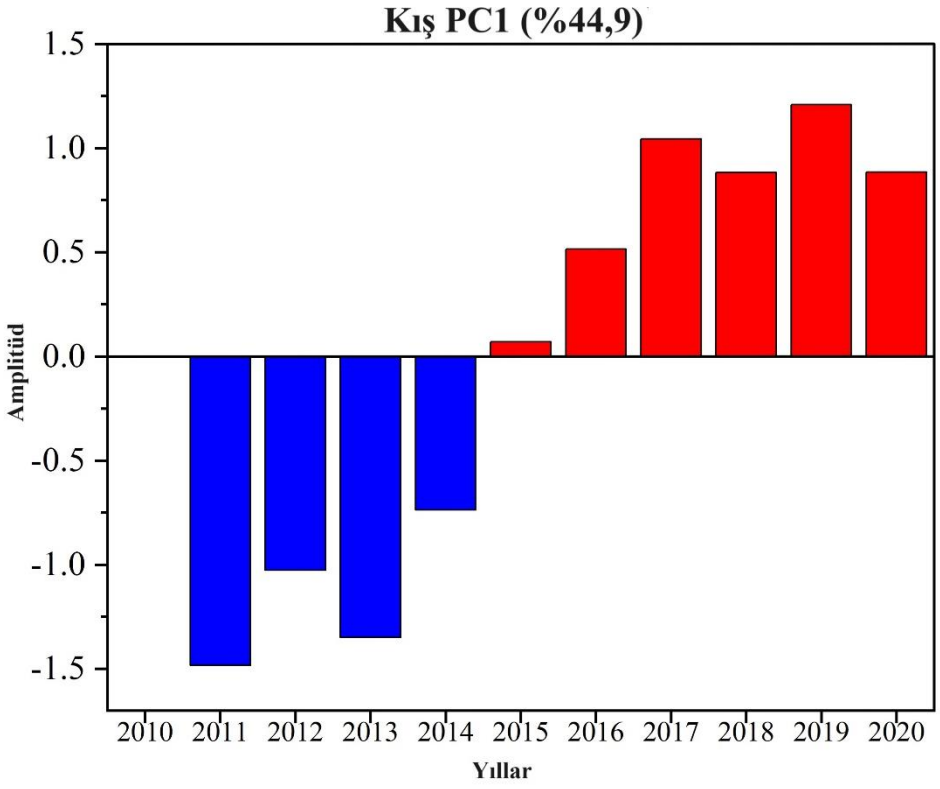
Kış REOF1'i mekansal ölçekte düzensiz bir sinyal eğilimi göstermektedir ve PM_{10} kirliliğinin yerel kaynaklardan kaynaklandığını işaret etmektedir (Şekil 4.4a). Şekil 4.4a, 4.5a, 4.6a ve 4.7a'dan da görülebileceği gibi PM_{10} konsantrasyon artışlarında benzer eğilimlere sahip istasyonların birbirinden uzak konumlarda olduğu ve yakınlığı olmayan farklı coğrafi bölgelerde yer aldığı görülmektedir. Bu da büyük ölçekli atmosferik sirkülasyonların bu

bölgelerde PM_{10} değişimleri üzerindeki etkilerinin oldukça sınırlı olduğunu veya hiç olmadığını göstermektedir. Daha spesifik olarak söyleyecek olursak, REOF1'de kış için belirtilen önemli bölgeler, Şekil 4.4a'da gösterildiği gibi, Adana Meteoroloji, Çanakkale, Erzincan, Giresun, Kastamonu ve Sinop olarak belirlenmiştir. Bu bölgelerde PM_{10} konsantrasyonundaki artışın 2015 yılından bu yana önemli ölçüde arttığı görülmektedir (Şekil 4.4b). Bahar aylarında PM_{10} konsantrasyon artışının yüksek olduğu önemli bölgeler ise Giresun, Kayseri OSB ve Samsun İlkadım Hastane'dir (Şekil 4.5a). Yaz aylarında Çanakkale, Erzincan, Giresun, Iğdır ve Samsun İlkadım Hastane istasyonu, PM_{10} değerlerinin yüksek olduğu önemli bölgeler olarak ortaya çıkmıştır (Şekil 4.6a). Sonbahar mevsiminde Ağrı, Bingöl, Çanakkale, Eskişehir, Giresun, Iğdır, Kahramanmaraş, Kayseri OSB, Muş ve Rize'de yüksek PM_{10} konsantrasyonları görülmektedir (Şekil 4.7av b). Genel olarak REOF1 modu her mevsimde bağlantısız ve tamamen farklı bölgelerde bulunan istasyonları temsil ettiği görülmektedir.

Her dört mevsim için birinci modun karşılık gelen temel bileşenleri (PC) şu şekildedir: Kış PC1 toplam varyansın %44,9'unu temsil eder ve 2010'da bir düşüşe, 2012'de bir miktar artışa ve 2013'te tekrar düşüşe işaret etmektedir, ancak 2014'ten beri bir artış ve 2019'da zirveye çıkıp 2020'de tekrar düşüş göstermektedir. Benzer şekilde PC1 baharı da birinci modun toplam varyansının %43,2'sini açıklamaktadır ve 2011'den 2014'e kadar artış göstermekte, 2018'e kadar tekrar düşüş ve 2019'da tekrar yükselmektedir. Yaz dönemi PC1 toplam varyansın %39,5'ini oluşturmakta olup, 2016 yılı hariç (aniden düşüş göstermiş) genel olarak trendde bir artış söz konusu olup o tarihten bu yana yükseliş trendine girmiştir. Son olarak, sonbahar PC1 toplam varyansın %31,6'sını temsil eder ve 2011'den 2014'e artış ardından 2015 ve 2016'da düşüş ve sonunda 2017'den artış eğilimini takip etmektedir (2020'de ise zirve yapmıştır).

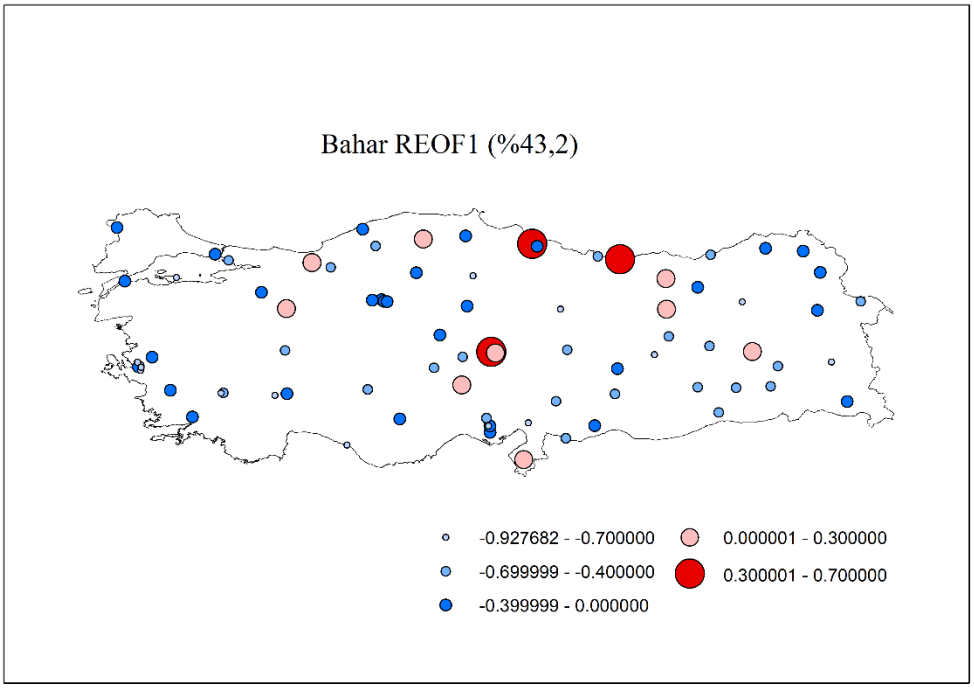


a)

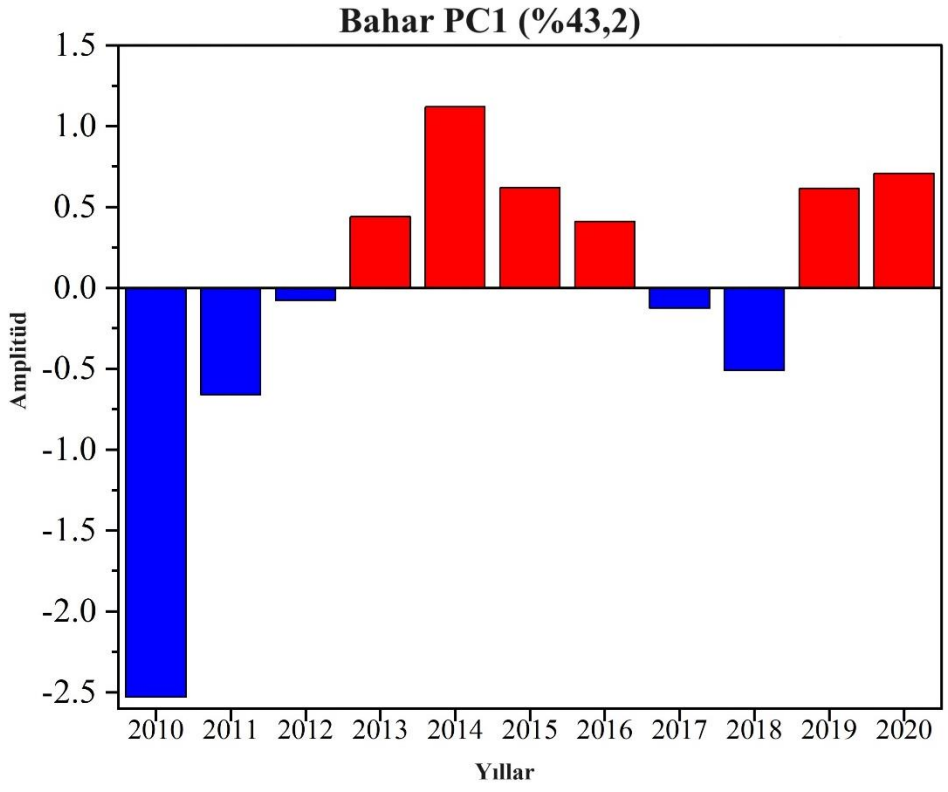


b)

Şekil 4.4: 2010-2020 dönemi için Türkiye'deki kış PM_{10} konsantrasyonlarının (a) REOF1 ve ilgili (b) PC zaman serileri (Şekillerin üzerindeki sayılar varyansın yüzdesini göstermektedir).

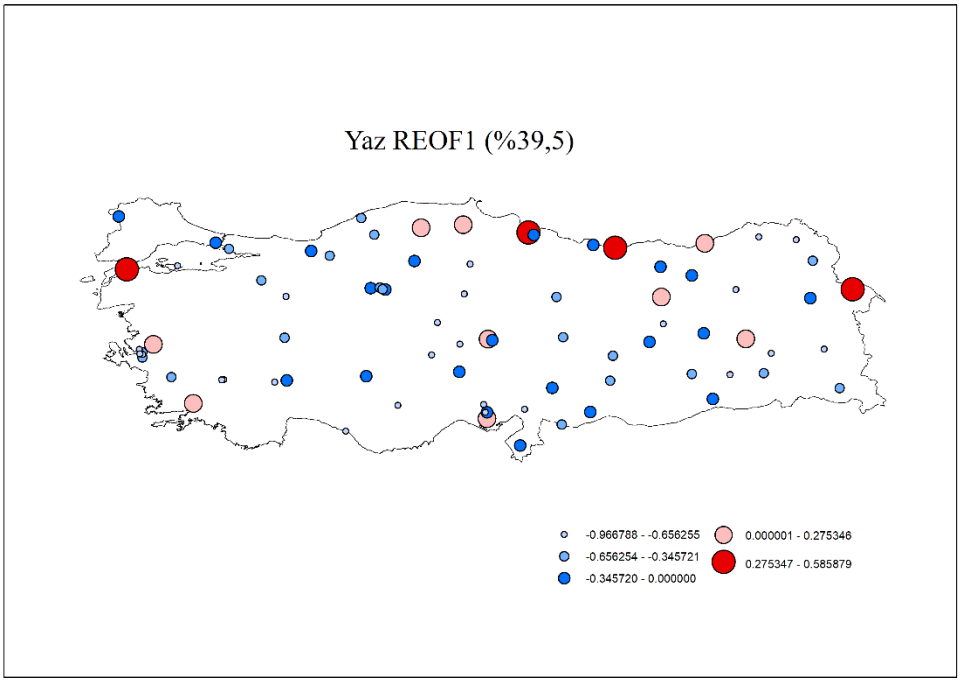


a)

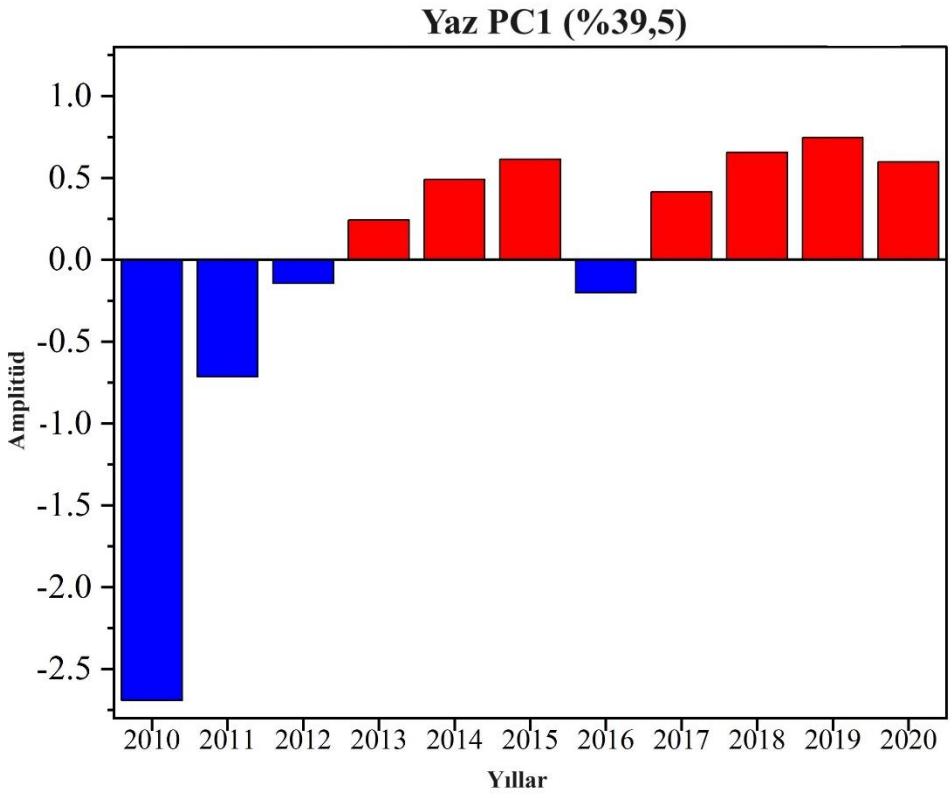


b)

Şekil 4.5: 2010–2020 dönemi için Türkiye genelinde bahar PM_{10} konsantrasyonlarının (a) REOF1 ve ilgili (b) PC zaman serileri. (Şekillerin üzerindeki sayılar varyansın yüzdesini göstermektedir.)

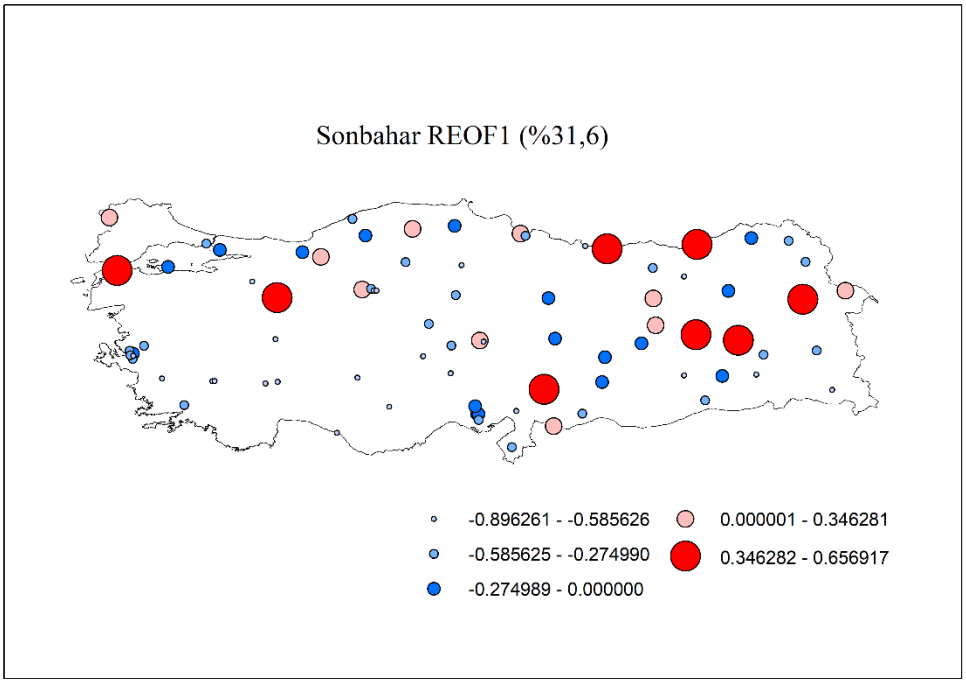


a)

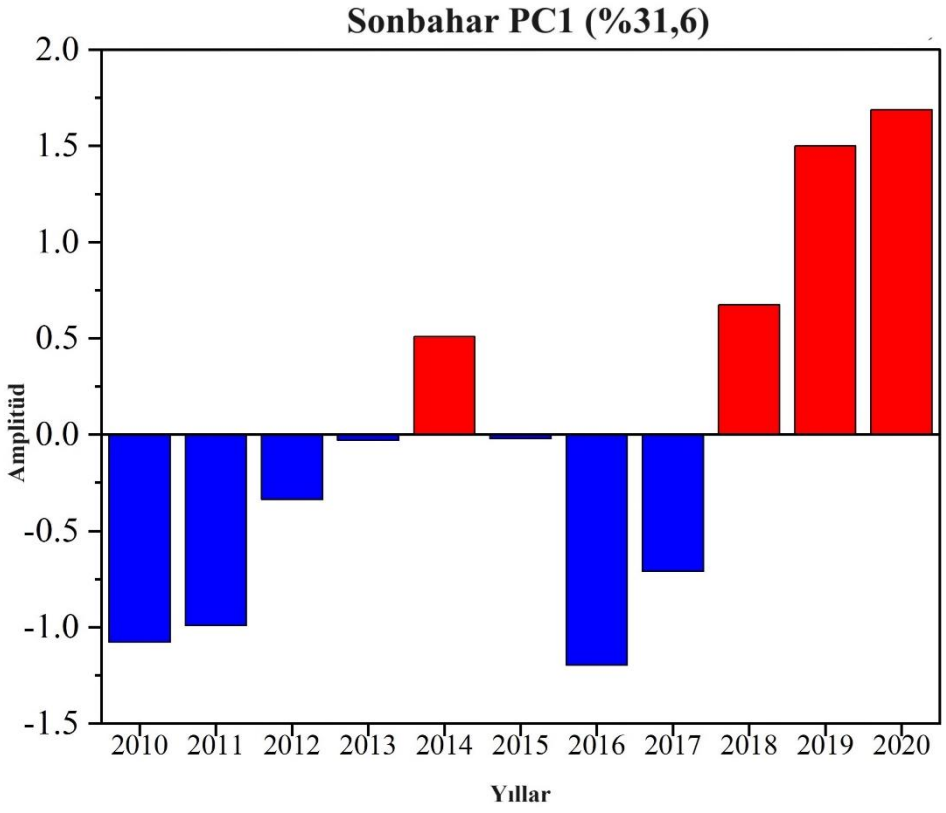


b)

Şekil 4.6: 2010-2020 dönemi için Türkiye'deki yaz PM_{10} konsantrasyonlarının (a) REOF1 ve ilgili (b) PC zaman serileri. Şekillerin üzerindeki sayılar varyansın yüzdesini göstermektedir.



a)



b)

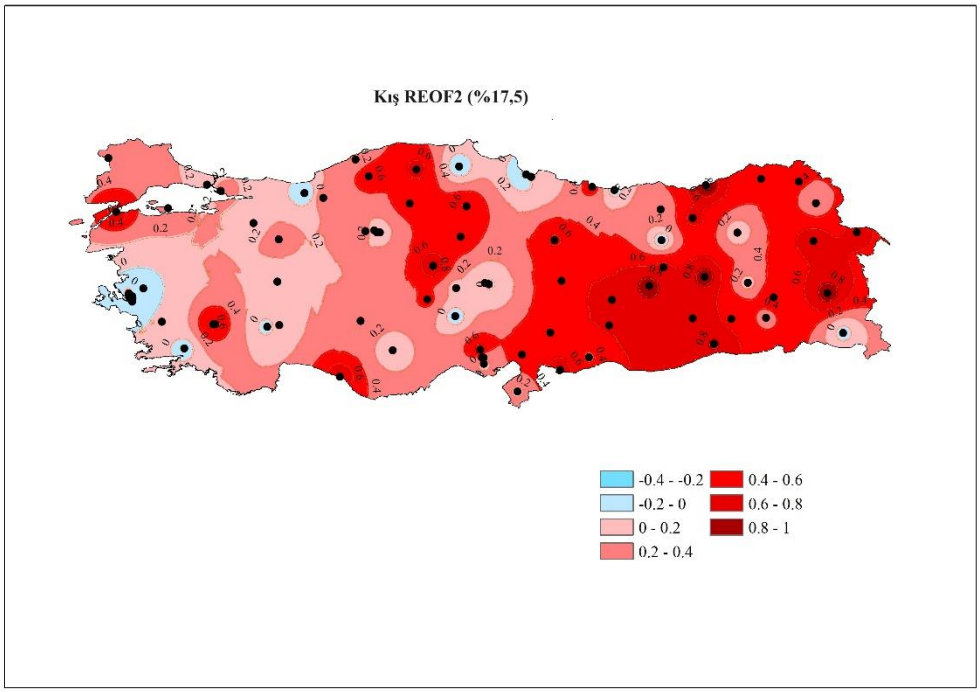
Şekil 4.7: 2010–2020 dönemi için Türkiye genelinde sonbahar PM_{10} konsantrasyonlarının (a) REOF1 ve ilgili (b) PC zaman serileri. (Şekillerin üzerindeki sayılar varyansın yüzdesini göstermektedir.)

4.2.2 REOF2'e Göre Kirliliği Açısından Önemli Bölgeler

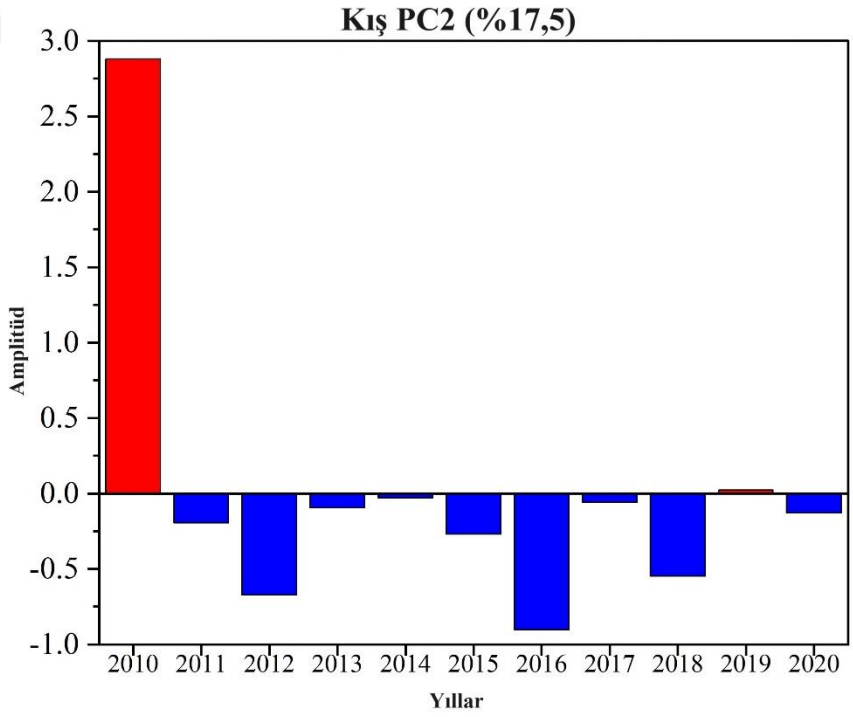
REOF1'in aksine REOF2 modları, önemli bölgelerin birbirine yakın konumlandığını ve dolayısıyla bu bölgelerdeki PM_{10} konsantrasyonu üzerinde büyük ölçekli atmosferik sirkülasyonların etkisi olduğuna işaret etmektedir. Kış REOF2'sinden PM_{10} değerleri yüksek olan önemli istasyonların şu şekilde olduğu görülmektedir: Adana Katalan, Adana Valilik, Adıyaman, Ağrı, Ardahan, Artvin, Batman, Bayburt, Bingöl, Bitlis, Diyarbakır, Elazığ, Gaziantep ve Iğdır, ve bunların çoğunluğu Türkiye'nin güneydoğu bölgesinde bulunmaktadır. Zamansal davranışa bakıldığında PM_{10} değerleri açısından 2010 yılının en kötü hava kalitesine sahip yıl olduğu görülmektedir (Şekil 4.8b). İlkbahar aylarında yüksek PM_{10} konsantrasyonları için önemli istasyonlar Ankara Demetevler, Ankara Sıhhiye, Bingöl, Elazığ, Erzincan, Giresun, Kastamonu ve Sivas Meteoroloji olup (Şekil 4.9a), yaz sezonuyla ilgili olarak da Türkiye'nin doğu ve güneydoğu bölgeleri PM_{10} artışlarına neden olan büyük ölçekli atmosferik koşullardan daha fazla etkilendiğini görülmektedir (Şekil 4.10a). PC2'den 2014 ile 2016 yılları arasındaki (Şekil 4.10b'de 2017 ve 2020) düşük (yüksek) PM_{10} değerleri görülebilmektedir. Sonbahar mevsiminde, kışa benzer şekilde, aynı bölgelerin, özellikle doğu/güneydoğu Türkiye için, büyük ölçekli atmosferik mekanizmalardan daha fazla etkilendiği görülmektedir (Şekil 8c). Çalışma döneminin dört mevsimi için ikinci REOF modunun karşılık gelen PC zaman serileri şu şekildedir: Kış PC2 zaman serisi toplam varyansın %17,5'ini temsil eder ve 2011'den bu yana hareketli bir eğilim göstermekte olup 2019'da zirve yapmıştır ancak 2020'de tekrar düşüşe geçmiştir. İlkbahar PC2, toplam varyansın %14,0'ını oluşturmaktadır ve bu, 2013 istisnası dışında 2010'dan 2015'e düşüş eğilimine işaret etmektedir. Öte yandan zaman serisi 2016'dan 2020'ye kadar trendde bir artış olduğu göstermiştir. Benzer şekilde, yaz PC2 zaman serisi toplam varyansın %14,0'ını açıklamaktadır; bu, arttığı 2013 yılı dışında 2010'dan 2016'ya düşüşe işaret etmektedir; ancak 2017'den bu yana trendde bir artış olduğu ve 2020'de tekrar küçük bir düşüş olduğu görülmüştür.

Son olarak, sonbahar PC2 toplam varyansın %16,3'ünü temsil etmekte ve 2011'de düşüş, 2012'de hafif bir artış ve 2016'ya kadar tekrar düşüş göstermektedir. Ancak 2016 yılından sonra artış göstermiş, ve 2018 yılında ise yine hafif bir düşüş yaşanmıştır. Çalışma süresi boyunca PM_{10} konsantrasyonlarının değişiminde yer alan mekanizmaların ayrıntılarını daha iyi anlamak amacıyla REOF2 önemli istasyonlarının günlük ortalama PM_{10} konsantrasyonları Şekil 4.12'de verilmiştir. REOF2 modu tarafından belirlenen önemli bölgelerdeki PM_{10}

konsantrasyonlarındaki değişimler, her dört mevsimin PC zaman serisiyle de uyumlu olduğu anlaşılmıştır.

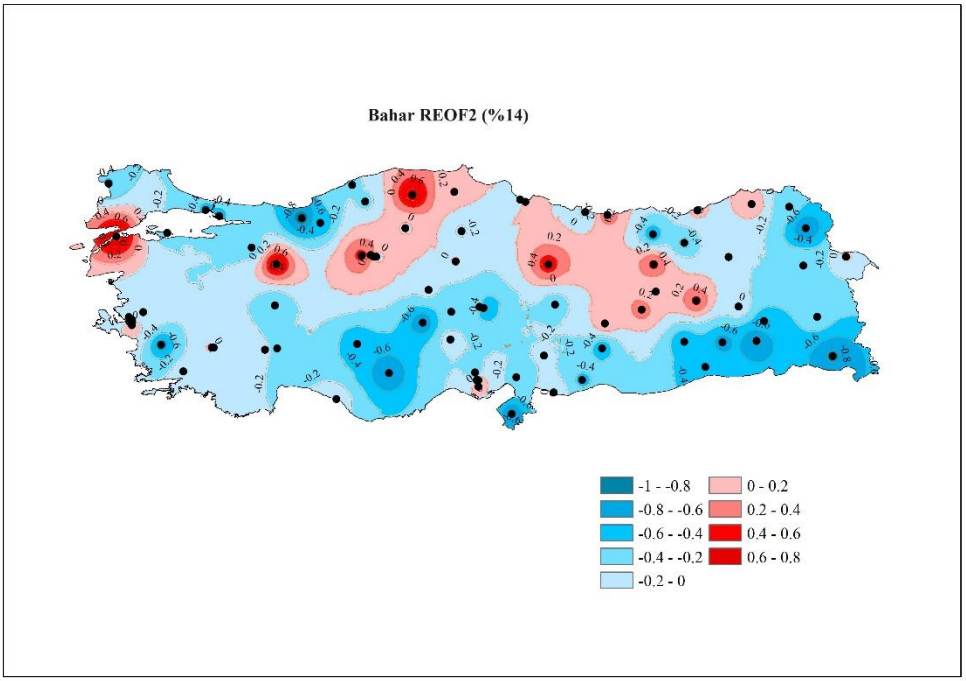


a)

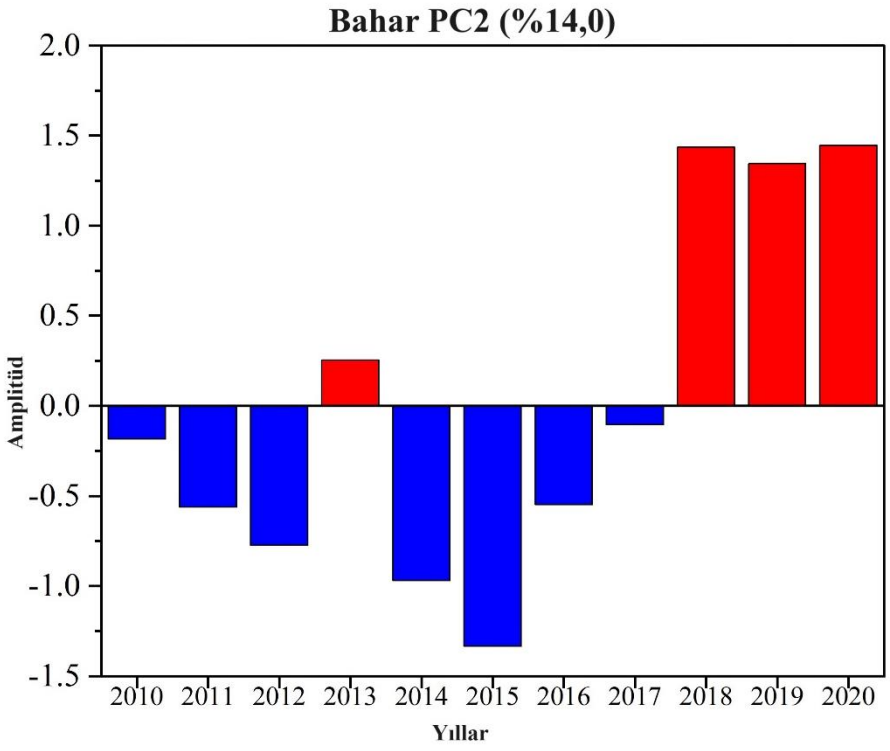


b)

Şekil 4.8: 2010-2020 dönemi için Türkiye'deki kış PM_{10} konsantrasyonlarının (a) REOF2 ve ilgili (b) PC zaman serileri. (Şekillerin üzerindeki sayılar varyansın yüzdesini göstermektedir).

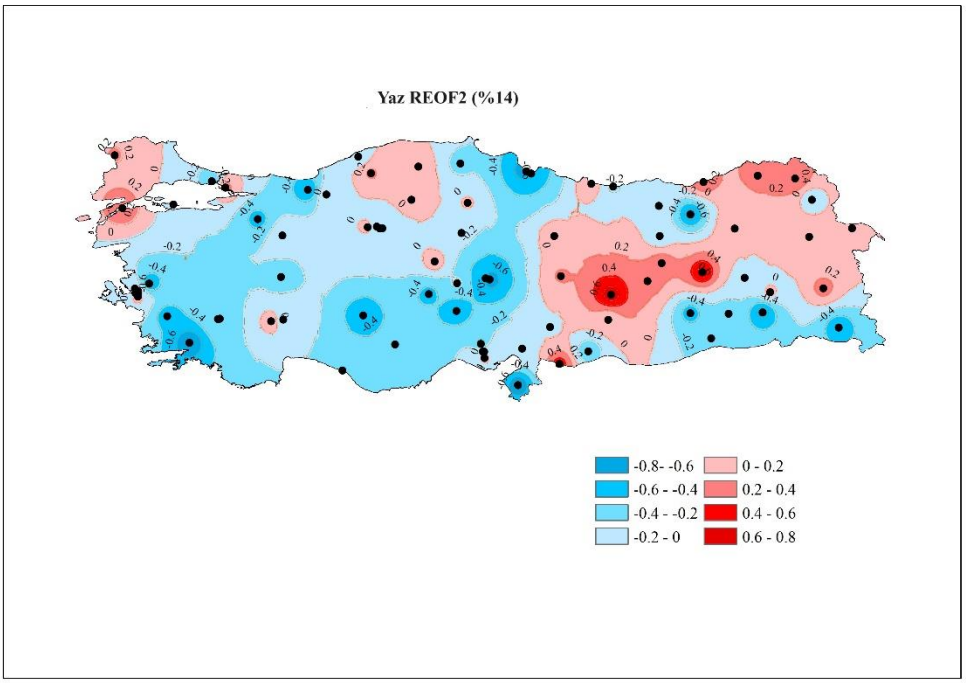


a)

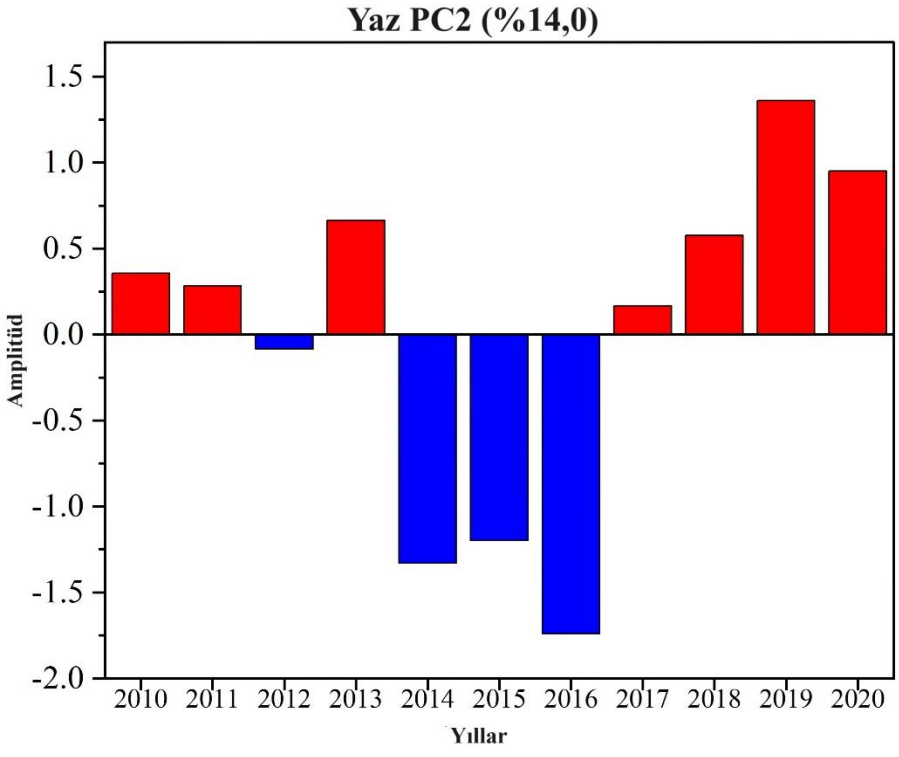


b)

Şekil 4.9: 2010–2020 dönemi için Türkiye'deki bahar PM_{10} konsantrasyonlarının (a) REOF2 ve ilgili (b) PC zaman serileri. (Şekillerin üzerindeki sayılar varyansın yüzdesini göstermektedir).

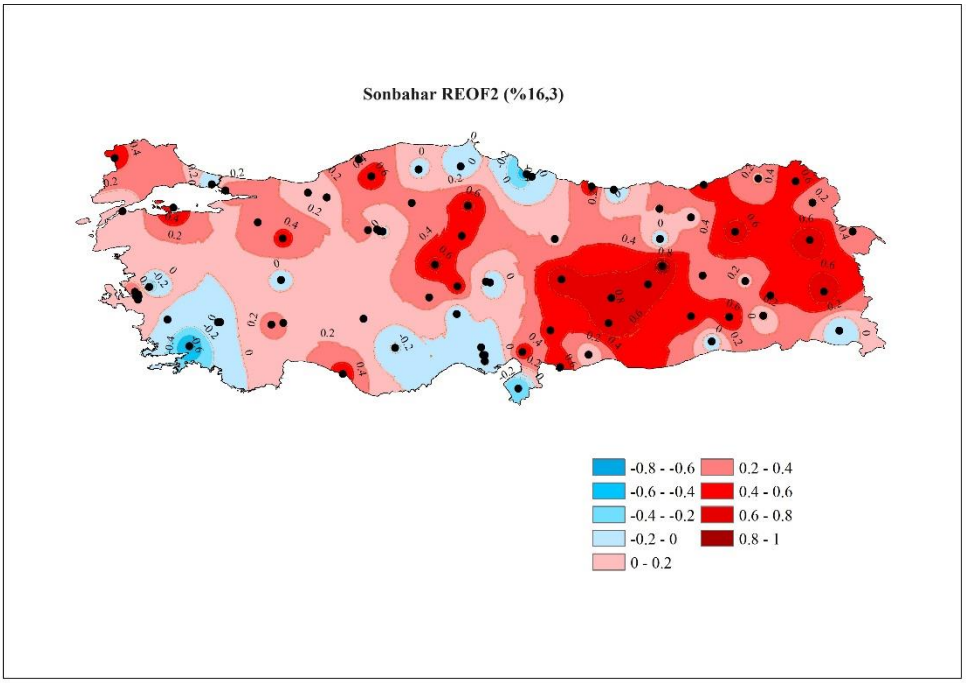


a)

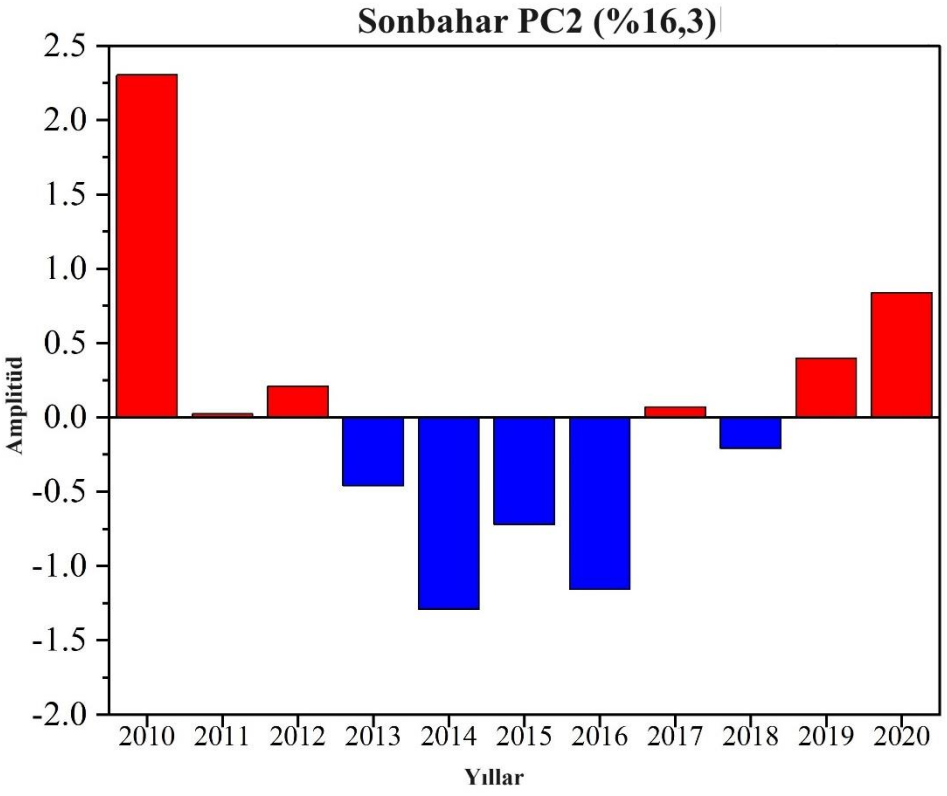


b)

Şekil 4.10: 2010-2020 dönemi için Türkiye'deki yaz PM_{10} konsantrasyonlarının (a) REOF2 ve ilgili (b) PC zaman serileri. (Şekillerin üzerindeki sayılar varyansın yüzdesini göstermektedir).

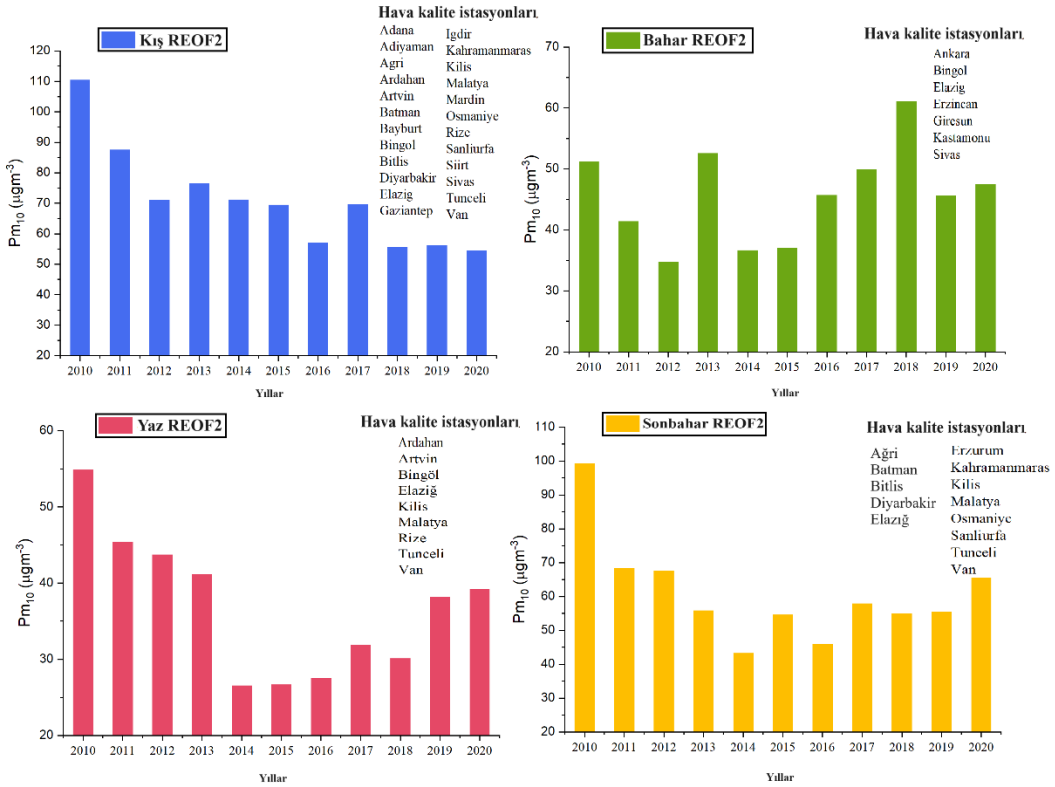


a)



b)

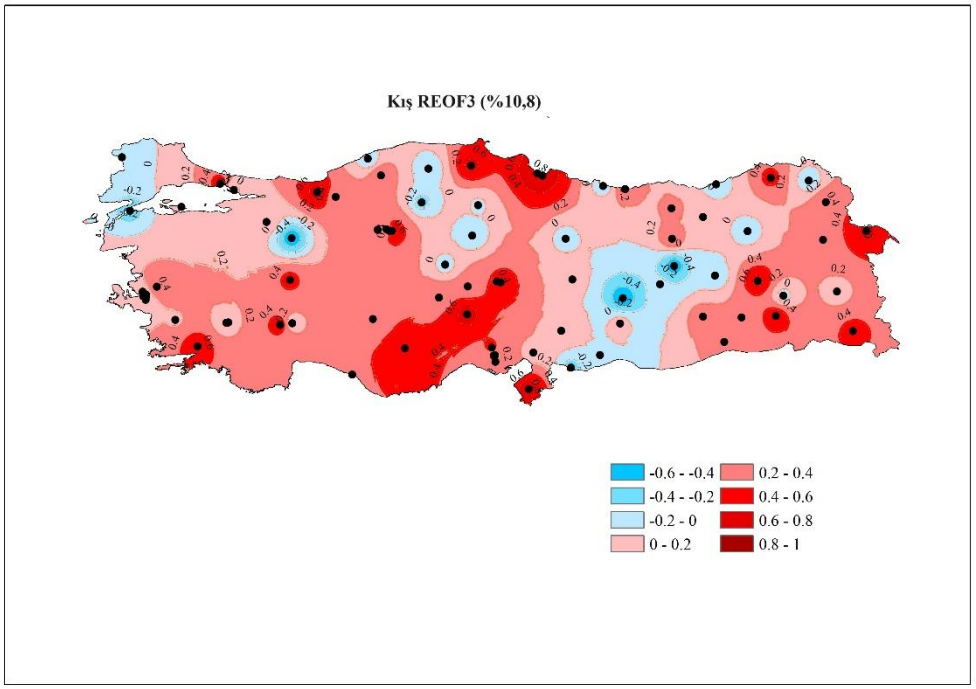
Şekil 4.11: 2010-2020 dönemi için Türkiye genelinde sonbahar PM_{10} konsantrasyonlarının (a) REOF2 ve ilgili (b) PC zaman serileri. (Şekillerin üzerindeki sayılar varyansın yüzdesini göstermektedir).



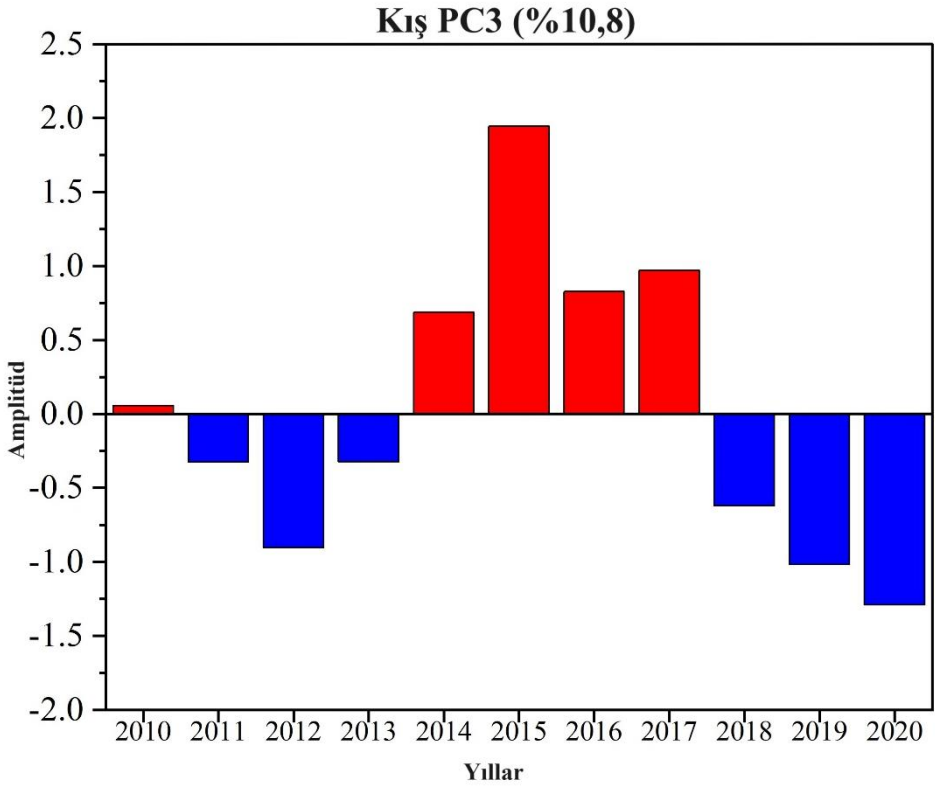
Şekil 4.12: Türkiye'de 2010–2020 dönemi için yüksek REOF2 değerlerine sahip istasyonların mevsimsel ortalama PM_{10} konsantrasyon değerleri.

4.2.3 REOF3 ve REOF4 Sonuçları

Kış REOF3, REOF2'e benzer bir şekilde geniş bir alanı kapsamaktadır ve büyük ölçekli atmosferik sirkülasyonların etkisine işaret etmektedir. Bu modun gösterdiği bölgeler, Türkiye'nin doğu ve güneydoğu bölgeleri, orta ve orta güney bölgeleri ile Türkiye'nin kuzey ve güneybatı bölgelerdir. REOF3 baharı, REOF1'inkine benzer eğilimler göstererek, yerel kirletici kaynaklarından etkilenen izole bölgeleri gösterir ve yaz REOF3'ü aynı zamanda Türkiye'nin kuzeybatısından güneydoğu bölgelerine kadar bütün bir bölgeyi kapsadığından kirletici kaynakların daha geniş ölçekli bir etkisine işaret etmektedir. Benzer şekilde sonbahar REOF3 de büyük ölçekli kirletici kaynakların etkisini göstermektedir, ancak etkilenen bölgeler REOF2'dekilerden farklıdır. Kış REOF4 de aynı zamanda sinoptik ölçekli atmosferik sirkülasyonların etkilerini göstermektedir. Benzer bir eğilim REOF4 ilkbaharında, REOF4 yazında ve REOF4 sonbaharında görülmektedir. Üçüncü ve dördüncü REOF modundaki PC'ler sırasıyla kış için %10,9 ve %7,9, ilkbahar için %12,1 ve %8,1, yaz için %11,4 ve %7,7 ve sonbahar sezonu için %10,2 ve %9,3'tür. Hem REOF3 hem de REOF4 için modun varyans yüzdesi daha küçük olduğundan, NCEP/NCAR'dan alınan veriler aracılığıyla elde edilen sinoptik haritaların yardımıyla büyük ölçekli atmosferik sirkülasyonların etkisi ve etkilerinin incelenmesi için REOF2 seçilmiştir. REOF3 ve REOF4 için zaman serisi grafikleri ve mekansal haritalar Şekil 4.13 ila 4.20'de verilmektedir.

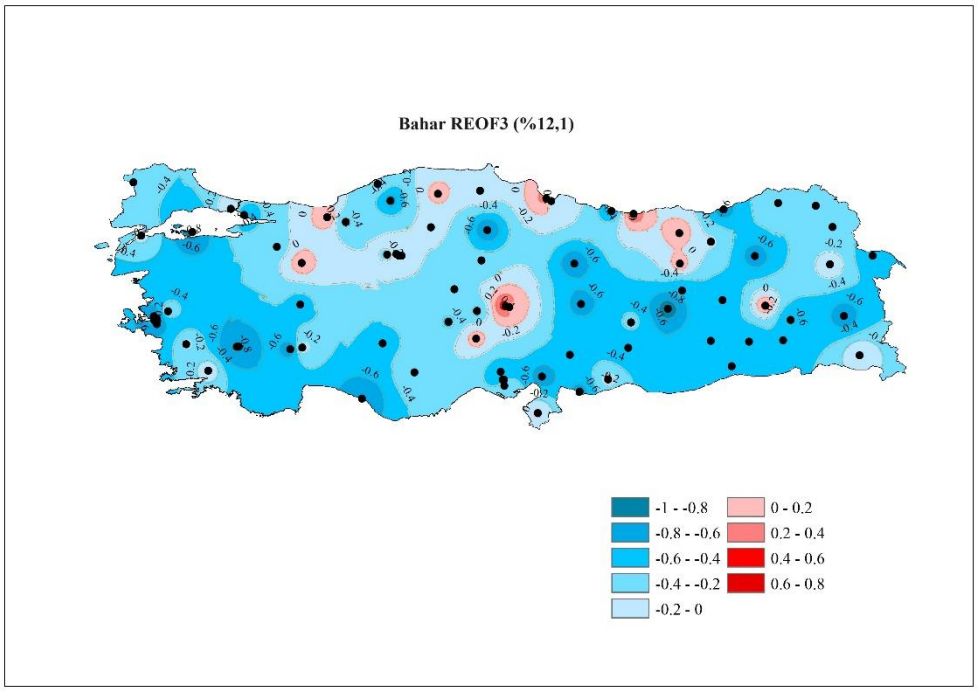


a)

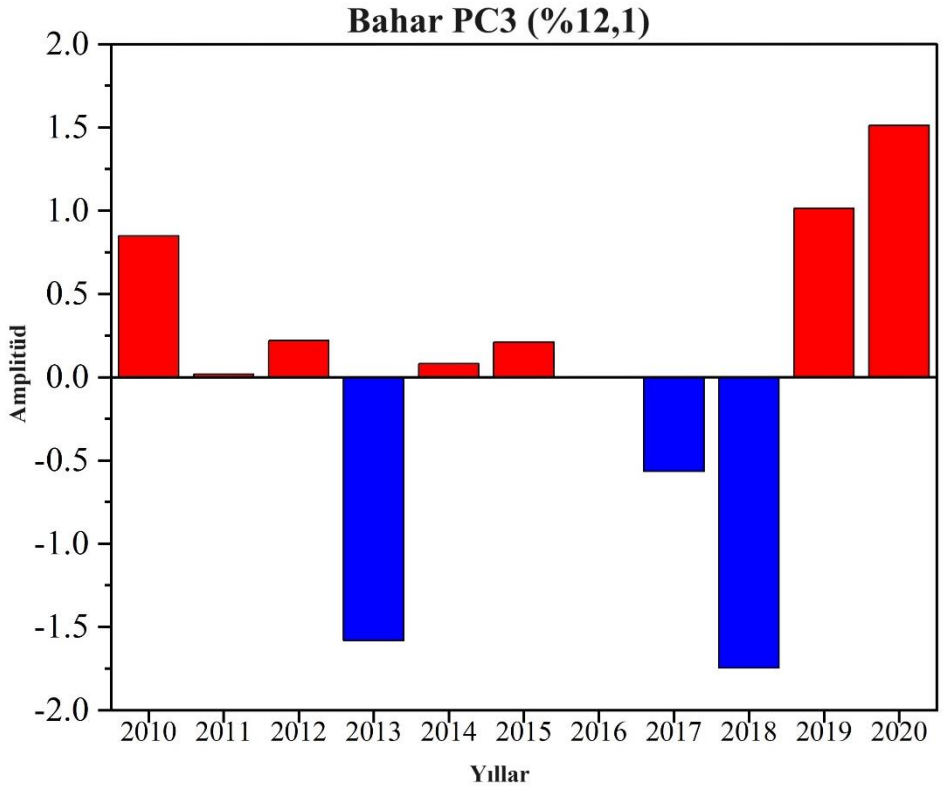


b)

Şekil 4.13: 2010-2020 dönemi için Türkiye genelinde kış PM_{10} konsantrasyonlarının (a) REOF3 ve ilgili (b) PC zaman serileri. (Şekillerin üzerindeki sayılar varyansın yüzdesini göstermektedir).

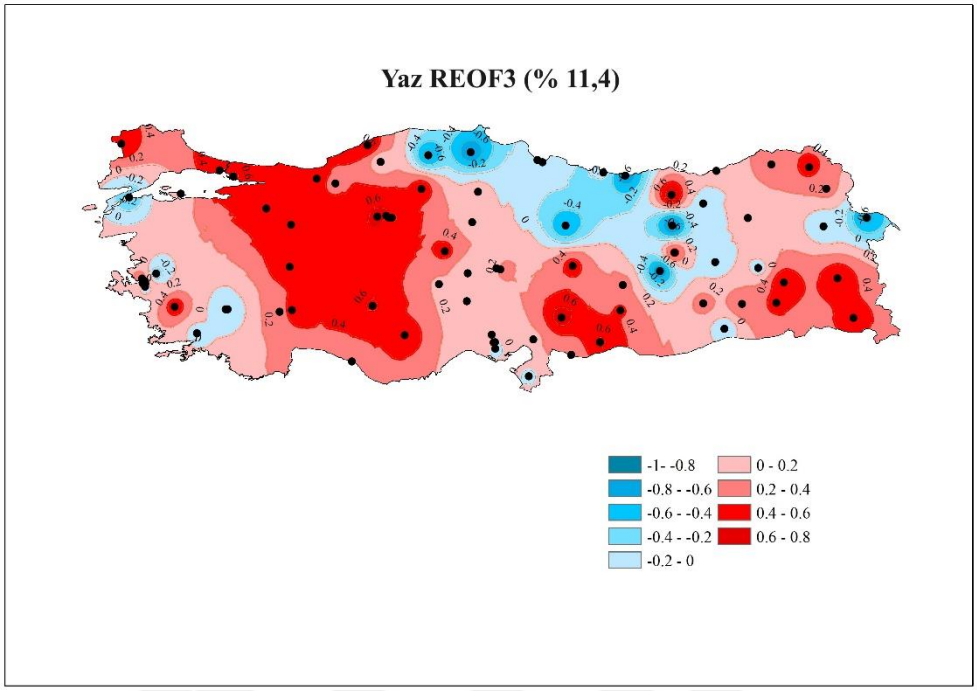


a)

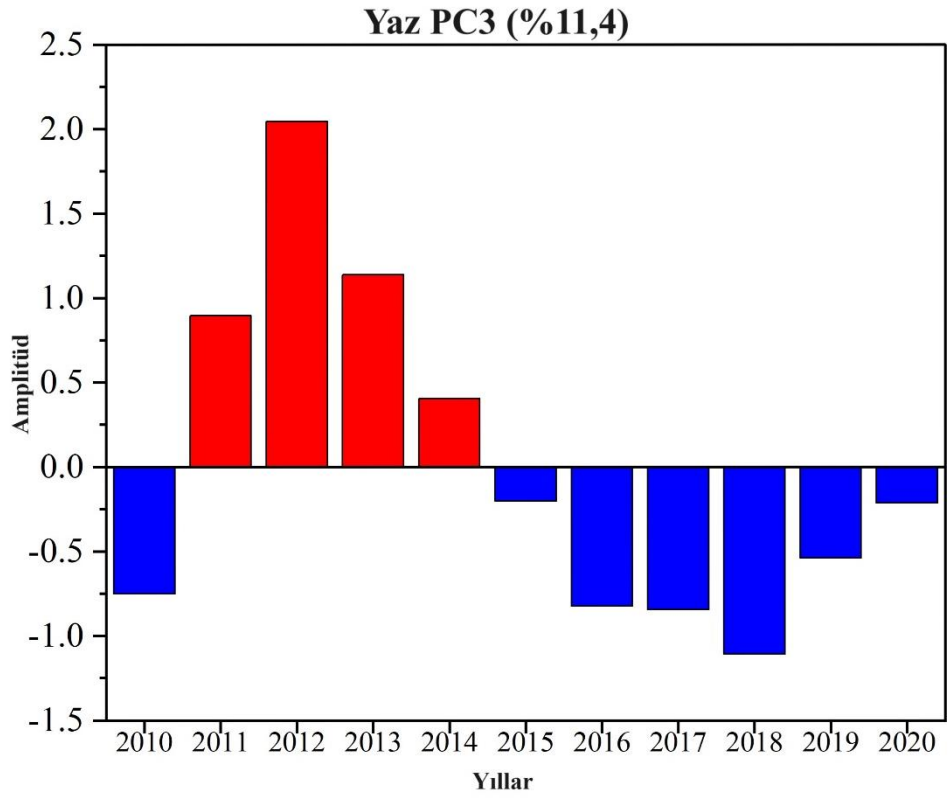


b)

Şekil 4.14: 2010-2020 dönemi için Türkiye'deki bahar PM_{10} konsantrasyonlarının (a) REOF3 ve ilgili (b) PC zaman serileri. (Şekillerin üzerindeki sayılar varyansın yüzdesini göstermektedir).

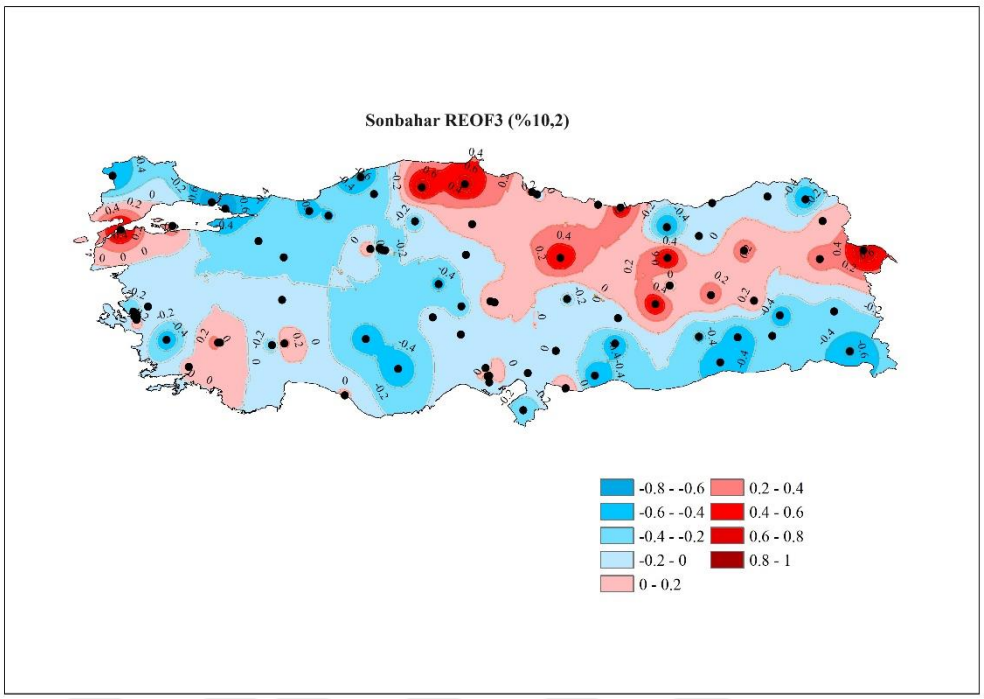


a)

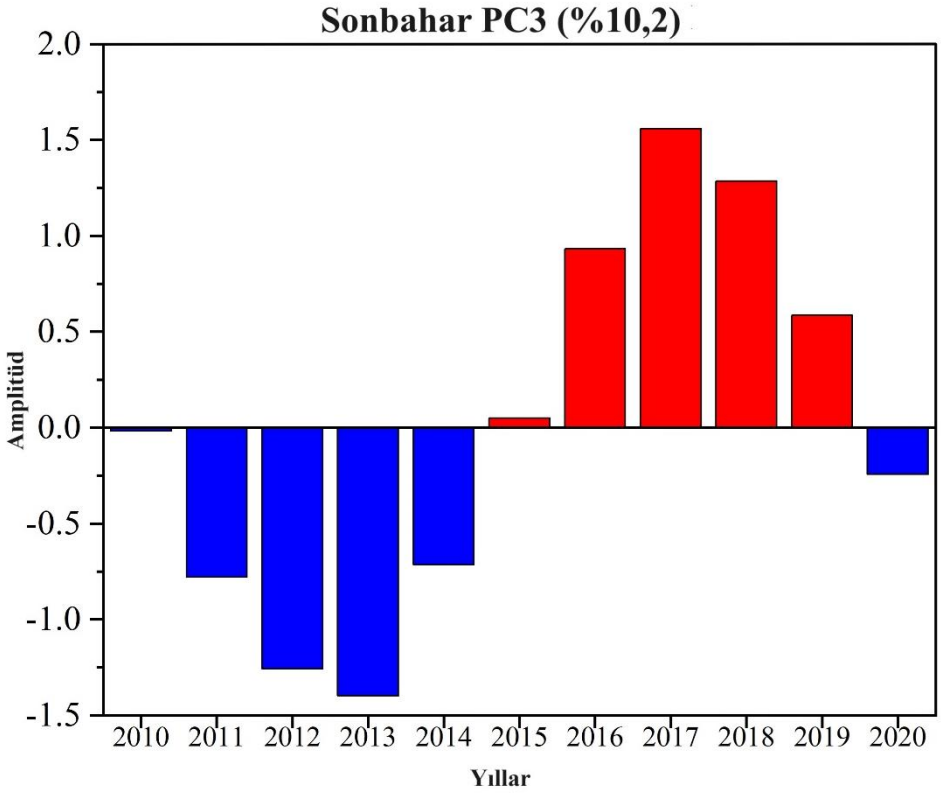


b)

Şekil 4.15: 2010-2020 dönemi için Türkiye'deki yaz PM_{10} konsantrasyonlarının (a) REOF3 ve ilgili (b) PC zaman serileri. (Şekillerin üzerindeki sayılar varyansın yüzdesini göstermektedir).

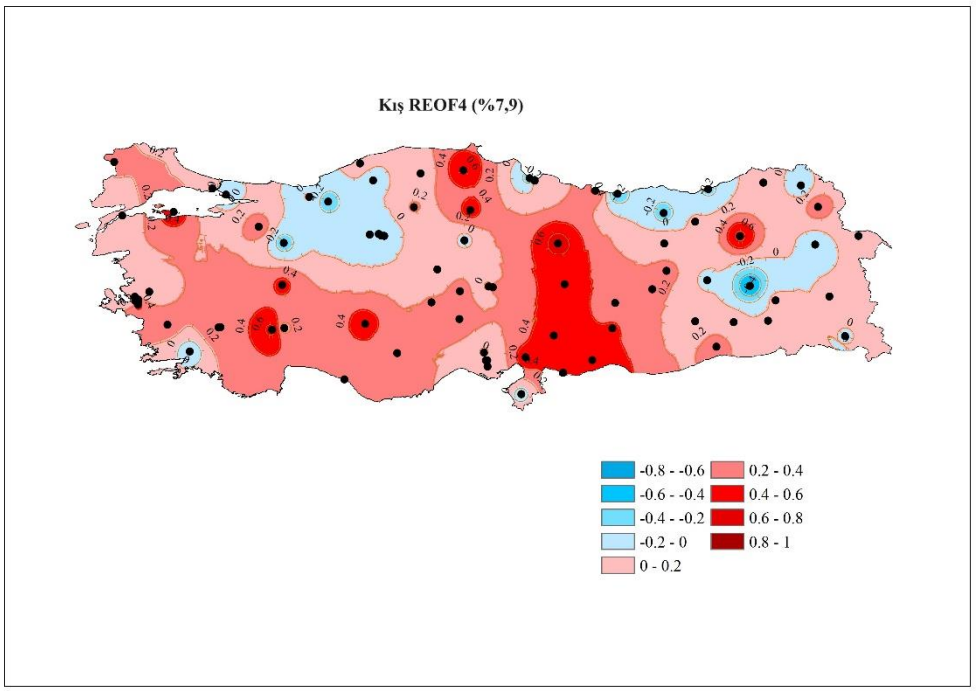


a)

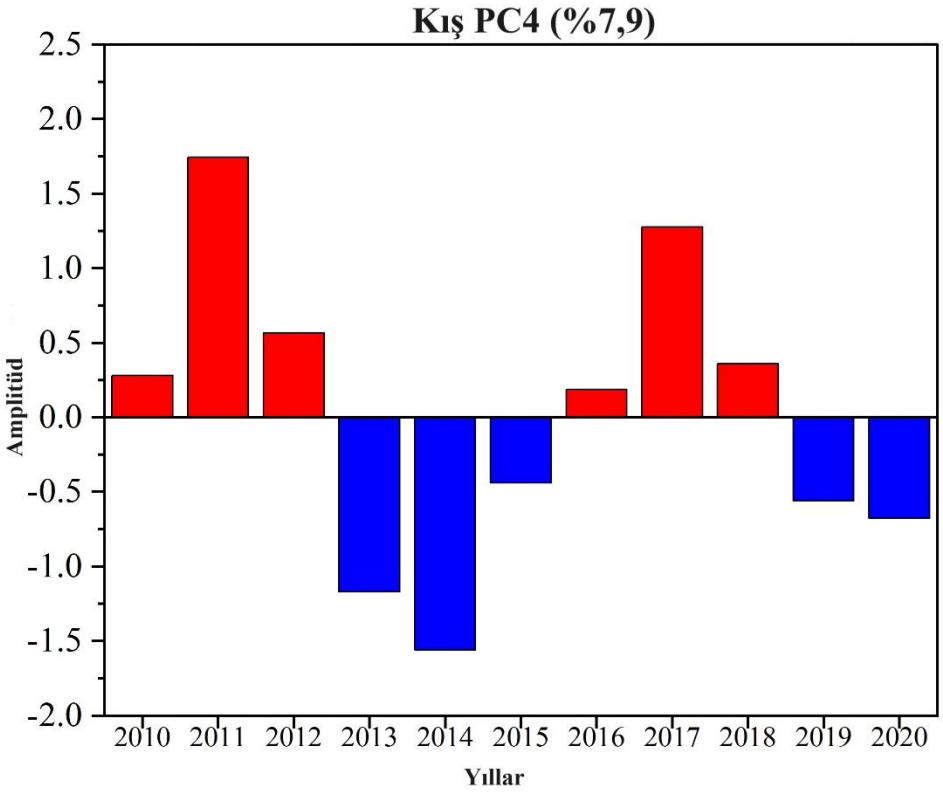


b)

Şekil 4.16: 2010-2020 dönemi için Türkiye genelinde sonbahar PM_{10} konsantrasyonlarının (a) REOF3 ve ilgili (b) PC zaman serileri. (Şekillerin üzerindeki sayılar varyansın yüzdesini göstermektedir).

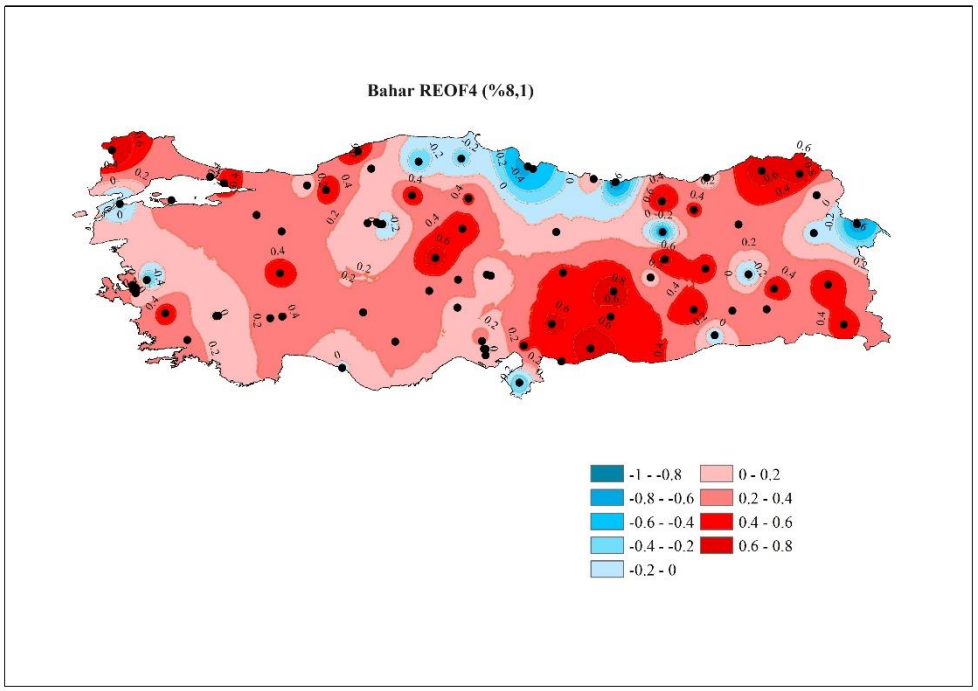


a)

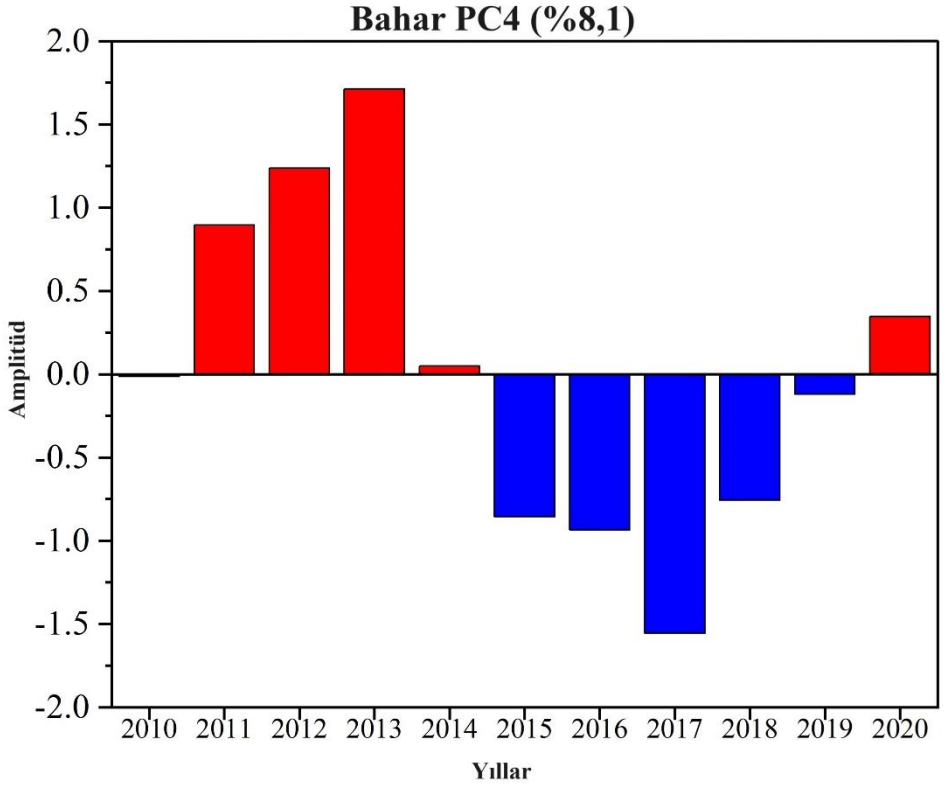


b)

Şekil 4.17: 2010-2020 dönemi için Türkiye'deki kış PM_{10} konsantrasyonlarının (a) REOF4 ve ilgili (b) PC zaman serileri. (Şekillerin üzerindeki sayılar varyansın yüzdesini göstermektedir).

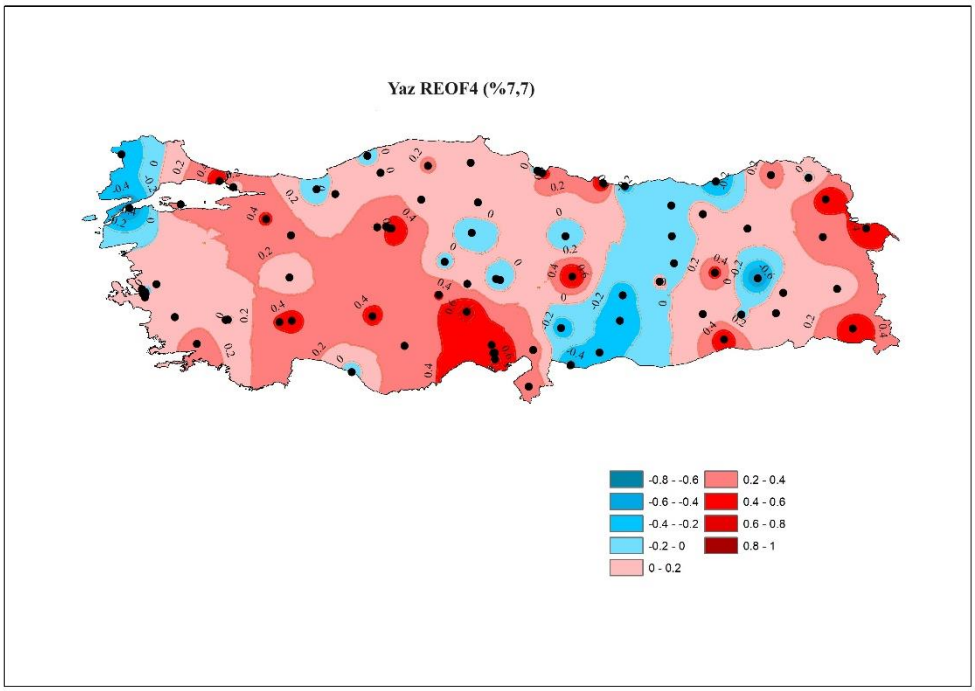


a)

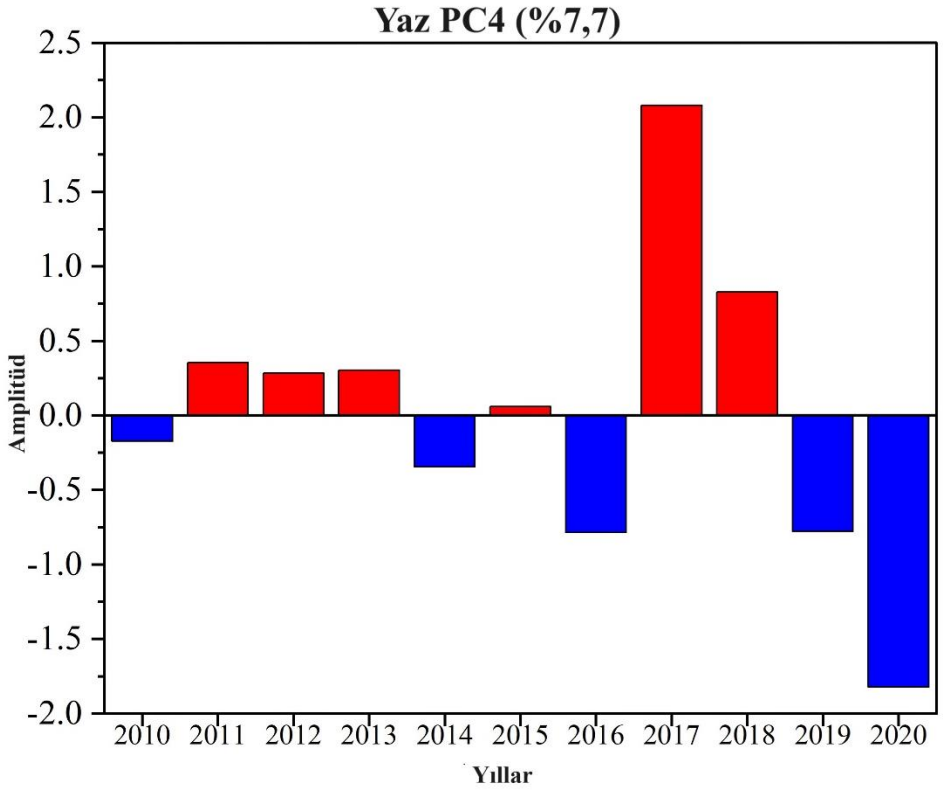


b)

Şekil 4.18: 2010-2020 dönemi için Türkiye'deki bahar PM_{10} konsantrasyonlarının (a) REOF4 ve ilgili (b) PC zaman serileri. (Şekillerin üzerindeki sayılar varyansın yüzdesini göstermektedir).

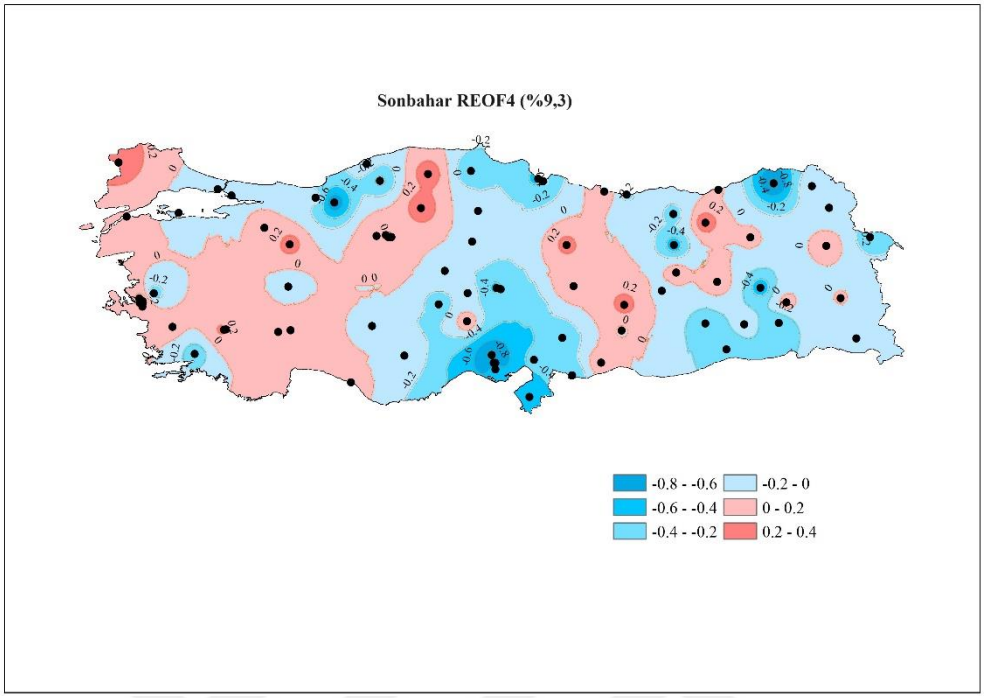


a)

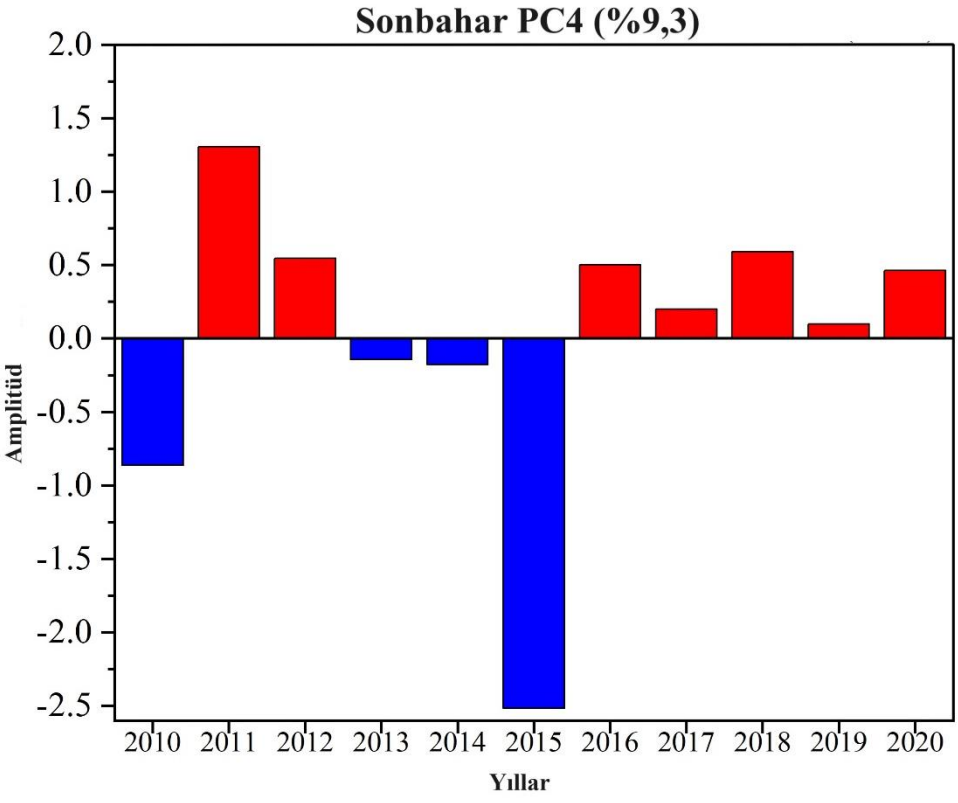


b)

Şekil 4.19: 2010-2020 dönemi için Türkiye'deki yaz PM_{10} konsantrasyonlarının (a) REOF4 ve ilgili (b) PC zaman serileri. (Şekillerin üzerindeki sayılar varyansın yüzdesini göstermektedir).



a)

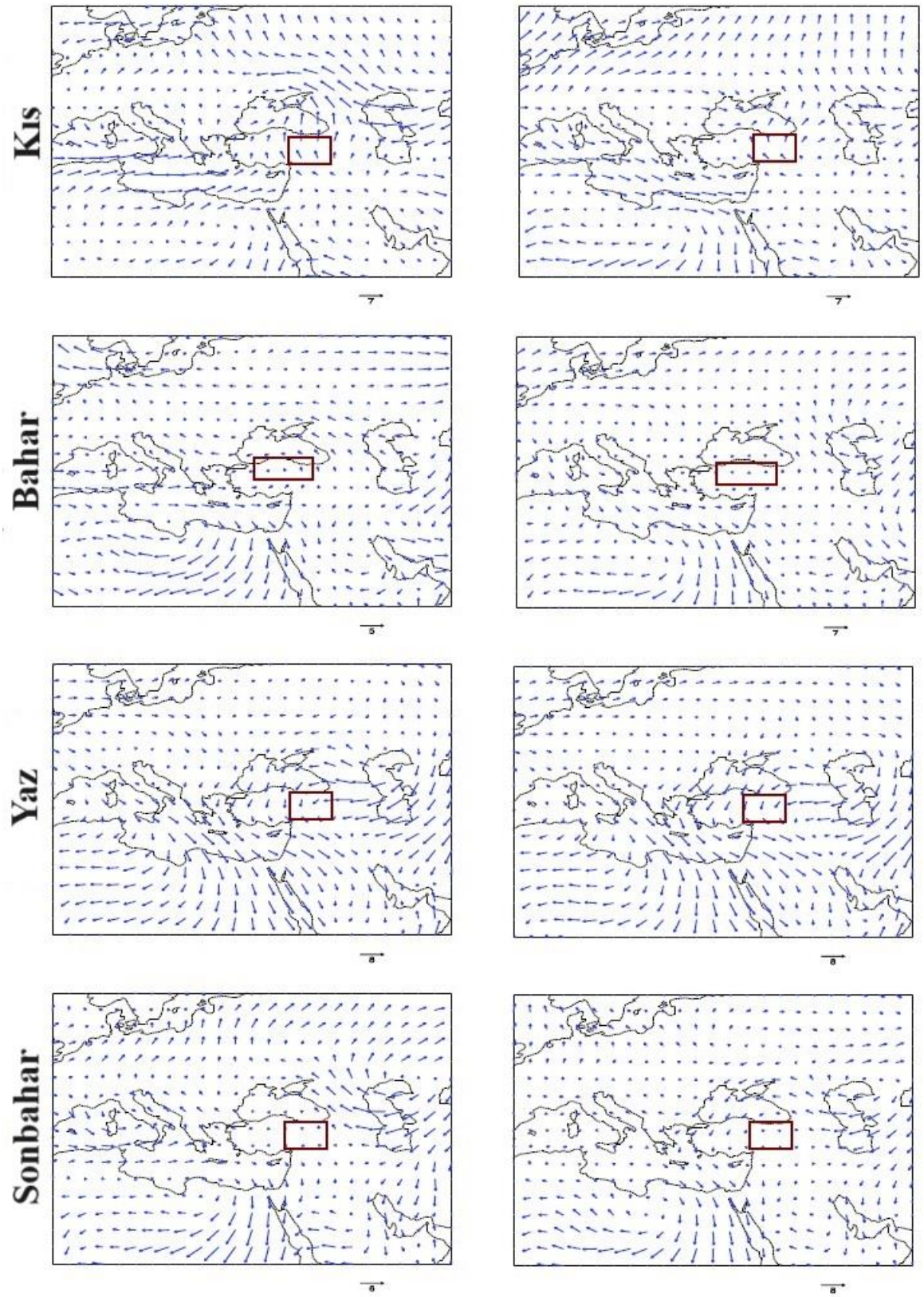


b)

Şekil 4.20: 2010–2020 dönemi için Türkiye genelinde sonbahar PM_{10} konsantrasyonlarının (a) REOF4 ve ilgili (b) PC zaman serileri. (Şekillerin üzerindeki sayılar varyansın yüzdesini göstermektedir).

4.3 YÜKSEK/DÜŞÜK PM_{10} KONSANTRASYONLARI VE KOMPOZİT HARITALARI

Çalışmanın bu bölümünde her mevsim için seçilen bölgelerde yüksek/düşük PM_{10} değerlerine neden olan atmosferik nedenleri incelenmiştir. Bu amaçla, Şekil 4.8a ve 4.11a'da gösterilen REOF2 sonuçlarından geniş bir alandaki PM_{10} değişikliklerini dikkate alarak seçilen bölgelere odaklanmıştır (Şekil 4.21'deki kahverengi dikdörtgen). Genel olarak düşük seviyeli rüzgar alanlarının hem yerel toprak hem de büyük ölçekli toz taşınımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu bilinmektedir. Bu nedenle, büyük ölçekli atmosferik sistemlerin seçilen bölgeler için yüksek ve düşük PM_{10} değerlerine sahip olma üzerindeki rolünü araştırmak için esas olarak NCEP/NCAR yeniden analizinden uyarlanan 1000 hPa rüzgar alanlarını kullanılmıştır. Sonuçlara göre, kış aylarında Arap çölünden gelen toz parçacıklarının Türkiye'nin doğu (DAB) ve güneydoğu (GAB) bölgelerine taşınmasından 7 ms^{-1}'e ulaşan kuvvetli güney rüzgarların sorumlu olduğunu görülmüştür (Şekil 4.21). Ayrıca güneybatıdan esen rüzgarlar da Sahra kaynaklı toz parçacıklarının Kuzey Afrika'dan GAB'a taşınmasını sağlamaktadır. Bunun sonucunda DAB ve GAP'da bulunan istasyonlarda normalin üzerinde PM_{10} değerleri kaydedilmiştir (istasyon adları Şekil 4.12'de gösterilmektedir). Öte yandan sakin hava koşulları ve Karadeniz üzerinden taşınan nemli hava, Türkiye'nin Orta ve Doğu Karadeniz kesimlerinde PM_{10} değerlerinin düşük olmasına neden olmaktadır. İlkbahar aylarında İç Anadolu bölgesinden esen güneybatı rüzgarları kum parçacıklarını Türkiye'nin kuzey bölgesine taşımakta, bu da PM_{10} değerlerinin normalin üzerinde kaydedilmesine neden olmaktadır (Şekil 4.9a ve 4.21). Yaz aylarında, Hazar Denizi'nden gelen güçlü doğu rüzgarları ve buna bağlı olarak Türkiye'nin doğusundaki alçak kesim yüzeyi (Şekil 4.21), DAB/GAB'da yüksek PM_{10} konsantrasyonlarının bulunmasından sorumludur (Şekil 4.10a). Benzer atmosferik desenler çoğunlukla 2018, 2019 ve 2020 yıllarında gözlenmektedir (Şekil 4.10b). Sonbaharda, düşük seviyeli atmosferik rüzgar mekanizmaları yerine, Basra Körfezi üzerindeki yüzey alçak basıncı ve 700 hPa seviyesindeki kuvvetli güney rüzgarları, toz parçacıklarının taşınmasını sağlamaktadır.



Şekil 4.21: Seçilen bölgelerin (kahverengi dikdörtgenler) yüksek (sol panel) ve düşük (sağ panel) PM_{10} değerlerine sahip istasyonlar (Şekil 4.12) sırasındaki aylık ortalama 1000 hPa

rüzgar alanlarının (vektörler, ms^{-1}) kompozit haritaları (Kış, ilkbahar, yaz ve sonbahar). Bileşik analizin oluşturulmasında yüksek ve düşük PC2 yılları da dikkate alınmıştır.

5. TARTIŞMA

Hava kirliliği en temel çevre sorunlarından biridir ve PM_{10} gibi hava kirleticileri, iklim sistemini etkilemenin yanı sıra insan sağlığına, çevreye ve ekosisteme ciddi bir tehdit oluşturan önemli bir atmosferik kirletici olarak tanımlanmaktadır. Bu amaçla, bu çalışma PM_{10}'un kaynaklarında yer alan mekanizmayı ve çevredeki dolaşım davranışını ortaya çıkarmak için, Türkiye genelinde homojen dağılmış 80 hava kalitesi istasyonunda 2010-2020 döneminde elde edilen günlük PM_{10} verilerine döndürülmüş ampirik ortogonal fonksiyon (REOF) analizi uygulayarak büyük ölçekli atmosferik sirkülasyonların Türkiye genelindeki PM_{10} konsantrasyonlarının mevsimsel değişimleri üzerindeki rolünü araştırmaya odaklanmıştır. Dolayısıyla, elde edilen sonuçlara göre mevcut literatür bağlamında yorumlanarak, çalışmanın çıktıları, sınırlamaları ve daha ileri araştırmalar için potansiyel alanları vurgulamakla birlikte bu bölümde tartışılmıştır.

5.1 PM_{10} KONSANTRASYONLARININ ZAMANSAL VE MEKANSAL DAĞILIMI

Yukarıdaki sonuçlar bölümünde, çalışma dönemi için seçilen 80 hava kalitesi izleme istasyonu için hesaplanan yıllık ortalama PM_{10} konsantrasyonların (Tablo 4.1), minimum ortalama PM_{10} konsantrasyonuna (25,8 $\mu g/m^3$) sahip olan Karadeniz Bölgesi'nde yer alan Artvin istasyonu olmuştur (Türkiye'nin Kuzeyi), ve en yüksek ortalama PM_{10} konsantrasyonu (110,1 $\mu g/m^3$) Iğdır ilinde kaydedilmiştir. Karadeniz Bölgesi'ndeki PM_{10} konsantrasyonunun düşük olması, bitki örtüsünün yoğun olması, yağışlı gün sayısının fazla olması, kuzey rüzgârlarıyla temiz havanın Karadeniz üzerinden taşınması gibi bazı coğrafi/meteorolojik faktörlerin yanı sıra yerleşim özellikleri gibi bazı faktörlere bağlanabilir. Örneğin, yarı sanayileşmiş ve kırsal alanların varlığı, ülkenin diğer bölgeleriyle karşılaştırıldığında Türkiye'nin kuzey kesimlerinde nispeten düşük PM_{10} değerlerinin ortaya çıkmasında kilit rol oynayan faktörler arasında yer almaktadır. Iğdır şehri (Türkiye'nin Doğusu, Şekil 3.2'de 43 numara) topoğrafik yapısından dolayı derin bir vadinin ortasında kurulmuştur (Şahin ve ark., 2020). Dolayısıyla burada, topoğrafik özellikler (örneğin derin vadiyi yüksek zirvelerle çevrelemek) ile iklim koşulları (örneğin kalın inversiyon tabakası, sakin hava koşulları ve kuru atmosferik katman) yüksek PM_{10} gözlemlerine neden olan en önemli özelliklerdendir. Zeydan (2021) tarafından yapılan bir araştırmada Iğdır, 2019 yılı için PM_{10} konsantrasyonunun en yüksek olduğu şehirlerden biri olduğu ortaya konmuştur. Bu çalışmada seçilen 80 hava kalitesi istasyonunda genel ortalama

PM_{10} konsantrasyonunun 57 μg/m^3 olduğu gözlemlenmiştir; bu da, AB ve DSÖ günlük eşik sınırlarının (50 μg/m^3 ve 45 μg/m^3) oldukça üzerindedir (DSÖ, 2021). PM_{10}'un aylık bazda nasıl davrandığını görmek için, PM_{10}'un Türkiye'deki aylık ortalama değişimlerini analiz ettiğimizde (80 hava kalitesi istasyonunun PM_{10} verilerinin ortalaması, Şekil 4.1) en yüksek aylık ortalamalar kış mevsiminde ve Kasım ayında görülmüştür. Bu aylarda, evsel ısınma ve kış aylarında artan kuraklık olayları gibi faktörler (Baltacı ve diğ. 2023) PM_{10} değerlerinin yüksek görülmesine neden olmaktadır. PM_{10} seviyelerinde ilkbahar aylarında (Mart, Nisan, Mayıs) belirgin bir düşüş meydana gelmekte ve bu, ısınmadan daha sıcak havaya geçişe, iyileştirilmiş atmosferik dağılıma ve potansiyel olarak ısınmayla ilgili daha az insan faaliyetine bağlanabilir. Yaz ayları (Haziran, Temmuz, Ağustos) en düşük PM_{10} konsantrasyonlarını sergilemektedir ve bunun nedeni daha iyi dağılım koşulları, artan bitki örtüsü (partikül maddeyi tutabilir) ve azalan antropojenik emisyonlar olabilir. PM_{10} seviyeleri sonbaharda (Eylül, Ekim, Kasım) sıcaklıklar düştükçe ve ısıtma faaliyetleri devam ettikçe tekrar yükselmeye başlamaktadır ve bu da emisyonlarda artışa yol açmaktadır. Bu faktörlere ek olarak sonbaharda atmosferin orta seviyesindeki kuvvetli güney rüzgarları Arap yarımadasından toz parçacıklarını Türkiye'nin güneydoğu bölgesine taşınması da PM_{10} değerlerinin zirve yapmasına neden olmaktadır (Baltacı 2021).

Şekil 4.2a, genel olarak Aralık ayında gözlemlenen en yüksek değerlerle kış ortalama PM_{10} konsantrasyonunu göstermektedir; ancak bu, Ocak ve Şubat aylarında daha yüksek PM_{10} konsantrasyonlarının kaydedildiği birkaç istisnaya da işaret etmektedir. Bunun zamansal davranışa bakıldığında, en yüksek PM_{10} değerleri 2010, 2011 ve 2015 yıllarında, yaklaşık 100 μg/m^3 ile Aralık ayında kaydedilmiştir. İlkbaharda Mart ayı, 11 yıl boyunca en yüksek ortalama PM_{10} konsantrasyonuna sahip ve bunu sırasıyla Nisan ve Mayıs ayları takip etmektedir (Şekil 4.2b). PM_{10} değerleri bu sezonda da ortalama AB ve DSÖ (50 μg/m^3 ve 45 μg/m^3) eşik değerlerinin üzerinde gözlenmektedir.

Yıllık dağılıma göre en yüksek aylık ortalama PM_{10} kayıtları Mart (2010, 2013 ve 2018) aylarında görülmektedir. Baltacı'nın (2021) belirttiği gibi, toz olaylarının en yüksek frekansları 2018 yılında görülmektedir ve Sharav siklonları, önemli miktarda Sahra tozu partikülünün soğuk cephe boyunca taşınmasından sorumlu olduğu bilinmektedir (Kabataş ve ark. 2018). Dolaysıyla, Atlas Dağları'nın güneyinde, soğuk Atlantik havası ile sıcak Sahra havası arasındaki termal kontrast nedeniyle oluşan Sharav siklonlarının, bahar aylarında Sahra kökenli toz parçacıklarını orta ve doğu Akdeniz'e aktarılmaktadır. Yaz aylarında ise, Ağustos ayındaki

aylık ortalama PM_{10}, Temmuz ayının Ağustos ayından daha yüksek bir ortalama konsantrasyona sahip olduğu 2018 ve 2020 istisnaları dışında, genel olarak çalışmada dahil edilen yıllar boyunca en yüksek konsantrasyonlara sahiptir (Şekil 4.2c). Türkiye'de en yüksek (en düşük) sıcaklık (yağış) kayıtlarının Ağustos ayında gözlendiğini ve sıcaklık (yağış) ile PM_{10} arasındaki pozitif (negatif) korelasyonun bu mevsimde PM_{10} değerlerini nispeten yüksek görmemizin nedenlerinden biri olduğunu bilinmektedir.

Şekil 4.2d, Kasım ayının en yüksek PM_{10} konsantrasyonuna sahip olduğu ay olarak gözlemlendiği sonbahar sezonu için ortalama PM_{10} konsantrasyonunu göstermektedir. Bu ay, kış aylarından sonra en yüksek PM_{10} rekorlarını gördüğümüz ay olarak öne çıkmaktadır. Bu duruma neden olan bazı nedenleri incelediğimizde, evsel ısınmanın artmasıyla birlikte sıcaklığın düşmesi, çöl tozlarının Arap Yarımadası'ndan Türkiye'nin güneyine taşınması (Baltacı ve Ezber 2022); uygun sinoptik koşulların varlığı (özellikle Kasım ayında Marmara Bölgesi'nde daha yaygın olan antisiklonik koşullar, Baltacı ve ark. 2015) Türkiye'de yüksek PM_{10} oluşumuna neden olan önemli faktörler olarak görülebilir.

Şekil 4.3a-d, 11 yıllık çalışma dönemi boyunca PM_{10} konsantrasyonunun mevsimsel değişimini göstermektedir. Buna baktığımızda, genel olarak kış, ilkbahar ve yaz mevsimlerinde PM_{10} konsantrasyonu son 11 yılda azalma eğilimi göstermiş olup PM_{10} konsantrasyonunun önceki yıllara göre arttığı birkaç vaka da kaydedilmiştir. Sonbahar sezonu da genel olarak benzer bir düşüş eğilimi göstermekte; ancak PM_{10} konsantrasyonunda çalışma döneminde önceki yıllara göre çok az ani artış/azalış gözlenmekte ve PM_{10} konsantrasyonunda gözle görülür bir azalma eğilimi gösteren diğer sezonların aksine 2018 yılından itibaren artış eğilimi göstermektedir. Mevsimsel değişimdeki azalma eğilimi, aynı zamanda Türkiye'de hava kirliliğine ilişkin düzenlemelerde yapılan reformların da göstergesidir.

5.2. REOF ANALİZİ SONUÇLARINA GÖRE PM_{10}'UN ZAMANSAL VE MEKANSAL DAĞILIMI

Bu çalışmanın odak noktası 2010-2020 dönemi için Türkiye genelinde mevsimsel PM_{10} konsantrasyonlarının mekansal-zamansal değişimlerini incelemek olduğundan, PM_{10} konsantrasyonlarındaki mevsimsel değişkenliği REOF tekniğini kullanarak analiz edilmiştir. Şekil 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11 ve 4.12, çalışma dönemi boyunca mevsimsel ortalama PM_{10} konsantrasyonlarına ($\mu g\ m^{-3}$) uygulanan REOF analizinin mevsimsel mekansal modellerini ve ilgili temel bileşenlerini göstermektedir. Kış REOF1'i mekansal ölçekte düzensiz

bir sinyal eğilimi göstermektedir ve PM_{10} kirliliğinin yerel kaynaklardan kaynaklandığını işaret etmektedir (Şekil 4.4a). Şekil 4.4a, 4.5a, 4.6a ve 4.7a'dan da görülebileceği üzere PM_{10} konsantrasyon artışlarında benzer eğilimlere sahip istasyonların birbirinden uzak konumlarda olduğu ve aralarında yakınlık bulunmayan farklı coğrafi bölgelerde yer aldığı görülmektedir. Bunlar, bu mod için büyük ölçekli atmosferik dolaşımın PM_{10} değişimleri üzerindeki etkilerinin oldukça sınırlı olduğunu veya hiç olmadığını göstermektedir. İstasyonların konumları (örneğin sanayileşmiş bir bölgede olması, trafik emisyonunun olduğu yerlere yakın olması ve Iğdır gibi yerel atmosfer koşulları), bu yerleşim yerlerinde yüksek/düşük PM_{10} konsantrasyon değerlerinin gözlemlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Örneğin Arslan ve arkadaşlarının (2022) belirttiği gibi termik santrallerin varlığı, endüstriyel faaliyetler, göç ve deniz trafiği yoğunluğu gibi faktörler Çanakkale ilçesinde (Türkiye'nin batısındaki kırmızı alan, Şekil 4.4a) kirletici konsantrasyonunda önemli bir artışa neden olmaktadır. Say (2006), Türkiye'deki on üç kömür yakıtlı elektrik santralinin yakınında ölçülen SO_2 konsantrasyonlarının 2006'daki sınır değerlerine yakın olduğunu ve bazı durumlarda bu değerleri aştığını bildirmiştir. Bu elektrikli santraller öncelikle linyit kömürü kullanmaktadır ve Çanakkale, Muğla, Kütahya, Balıkesir, Kahramanmaraş ve Manisa illeri SO_2 aşımları not edilmiştir. Kara and Kaynak Tezel (2017) benzer şekilde SO_2 değerlerinin Çanakkale Çan istasyonunda en yüksek değere sahip olduğu bildirmiştir. Akyuz ve Kaynak (2019), Çanakkale ilindeki hava kalitesinin mevcut ve potansiyel gelecekteki etkilerine dair eleştirel bir değerlendirme sunmuştur. Çalışma, bölgede önerilen yeni kömürle çalışan elektrik santrallerinin inşası konusunda endişeler ortaya koymaktadır. Kaydedilen ilerlemeye rağmen, bu gelişmeler hava kalitesindeki kazanımları tersine çevirebilir ve potansiyel olarak bazı bölgelerde hava kirleticileri sınır değerlerinin aşılmasına yol açabilir.

Daha spesifik olarak, REOF1'de kış için belirtilen önemli bölgeler, Şekil 4.4a'da gösterildiği gibi, Adana Meteoroloji, Çanakkale, Erzincan, Giresun, Kastamonu ve Sinop'tur. Aynı eğilimi diğer sezonlarda da görmek mümkündür. Bu bölgelerdeki PM_{10} artışının 2015 yılından bu yana önemli ölçüde arttığı görülmektedir (Şekil 4.4b). Giresun ili için kışın yüksek kirletici konsantrasyonlarına neden olan temel faktörlerin; düşük kaliteli yakıt kullanımı, kıyı ile dağlık kısım arasında sıkışan yerleşim yerleri, düzensiz kentleşme nedeniyle rüzgar koridorlarının tıkanması ve trafik yoğunluğu olduğu bildirilmektedir (https://www.milliyet.com.tr/yerel-haberler/giresun/giresun-un-hava-kirliligi-raporu10561340). Bahar aylarında PM_{10} konsantrasyon artışının yüksek olduğu önemli bölgeler Giresun, Kayseri OSB ve Samsun

İlkadım Hastane'dir (Şekil 4.5a). Özellikle, Kayseri sanayi bölgesinde (Türkiye'nin orta kısmı) son yıllarda ihracattaki artış (2018'de ekonomik krizle birlikte düşüş, Şekil 4.5b) sanayileşmenin kirlilik üzerindeki etkisini göstermektedir. Yaz aylarında Çanakkale, Erzincan, Giresun, Iğdır ve Samsun İlkadım Hastane PM_{10} değerlerinin yüksek olduğu önemli yerlerdir (Şekil 4.6a). Konum, sanayileşme ve trafik yoğunluğu gibi benzer nedenler PM_{10} değerlerini etkileyen temel faktörler olarak gösterilmekte olup, artan sanayi faaliyetleri ve hızlı kentleşme nedeniyle PM_{10} özellikle 2016 yılından sonra artış eğilimindedir (Şekil 4.6b). Ağrı, Bingöl, Çanakkale, Eskişehir, Giresun, Iğdır, Kahramanmaraş, Kayseri OSB, Muş ve Rize yerleşimlerinde özellikle 2018 sonrasında sonbaharda topografik, iklimsel ve antropojenik faktörler PM_{10} değerlerinin yüksek olmasına neden olmaktadır (Şekil 4.7a, b). REOF1 modu tüm mevsimlerde, bağlantısız ve tamamen farklı bölgelerdeki istasyonları temsil eder ve temsil ettiği önemli bölgelerin büyük olasılıkla PM_{10} değerleri üzerindeki yerel etkilerin baskınlığından etkilendiği sonucuna varılmaktadır. Bu, PM_{10} kirliliğinin yerel merkezleri olarak bu bölgelerin araştırılması gerektiğinin göstergesidir. Sonuç olarak bu bölgelerde yüksek PM_{10} kirliliğine neden olan faktörler, bunun konsantrasyonunu etkileyen yerel faktörleri de dikkate alınarak detaylı olarak araştırılmalıdır. Her dört mevsim için birinci modun karşılık gelen PC'leri şu şekildedir: Kış PC1 toplam varyansın %44,9'unu temsil eder ve 2010'da bir düşüş, 2012'de hafif bir artış gösterir ve 2013'te yine tekrar düşer, ancak 2014'ten bu yana (2019'da ise zirveye ulaşan) bir artış 2020'de yeniden düşüşe geçmiştir. Benzer şekilde PC1 baharı da birinci modun toplam varyansının %43,2'sini açıklamaktadır ve 2011'den 2014'e artış göstererek 2018'e kadar tekrar azalmakta, 2019'da ise tekrar yükselmektedir. Yaz dönemi PC1 toplam varyansın %39,5'ini oluşturmakta olup, 2016 yılı dışında (aniden düşüş göstermiş) genel olarak trendde yükseliş göstermektedir. Son olarak, sonbahar PC1 toplam varyansın %31,6'sını temsil eder ve 2011'den 2014'e kadar artar ve ardından 2015 ve 2016 yıllarında düşer ve sonunda 2020'de zirveye çıkar ve 2017'deki artış eğilimini takip eder.

Sonuçlara baktığımızda, REOF1'in aksine REOF2 modları, PM_{10} kirliliği açısından önemli bölgelerin birbirine yakın konumlandığını ve dolayısıyla bu bölgelerdeki PM_{10} konsantrasyonu üzerinde büyük ölçekli atmosferik sirkülasyonların etkisini göstermektedir. Örneğin, kış REOF2, aynı PM_{10} kirliliği kaynağından etkilenen bütün bir bölgeyi göstermekte ve bu bölgeler üzerindeki büyük ölçekli atmosferik dolaşımın etkisine tanıklık etmektedir (Şekil 4.8a). Kış REOF2'sinden PM_{10} değerleri yüksek olan önemli istasyonların şu şekilde olduğu görülmektedir: Adana Katalan, Adana Valilik, Adıyaman, Ağrı, Ardahan, Artvin, Batman,

Bayburt, Bingöl, Bitlis, Diyarbakır, Elazığ, Gaziantep ve Iğdır. Bu da bölgesel açıdan bakıldığında bu istasyonların çoğu Türkiye'nin güneydoğu bölgesinde bulunmaktadır. Dolayısıyla, yarı kurak iklim özellikleri olarak bilinen bu bölge, alçak basınç sistemlerini tıkayan büyük ölçekli atmosferik sistemlerin etkisiyle düşük yağış miktarlarına neden olmaktadır.

Zamansal davranışa bakıldığında, PM_{10} değerleri açısından 2010 yılı en kötü hava kalitesine sahip yıl olarak gösterilmekte (Şekil 4.8b) ve bu nedenle bir sonraki bölümde kompozit analize odaklanılarak bunun arka plandaki atmosferik nedenler araştırılmıştır. İlkbahar aylarında yüksek PM_{10} konsantrasyonları için önemli istasyonlar Ankara Demetevler, Ankara Sıhhiye, Bingöl, Elazığ, Erzincan, Giresun, Kastamonu ve Sivas Meteoroloji'dir. Şekil 4.9a'da gösterildiği gibi, Türkiye'nin İç Anadolu bölgesi, kirletici konsantrasyonlarında dalgalanmaya neden olan büyük ölçekli atmosferik sirkülasyonlardan daha fazla etkilenmektedir. Özellikle PM_{10} artışları 2018'den sonra daha yaygın hale gelmekte ve dolayısıyla buna etki eden atmosferik sirkülasyonların rolü bir sonraki bölümde incelenmiştir (Şekil 4.9b). Sahra tozu parçacıklarının Türkiye'ye taşınmasının bahar aylarında daha belirgin olduğunu ve PM_{10} değerlerinde ani bir artışa yol açtığını ve bu artışa neden olan sinoptik sistemlerin daha önceki çalışmalarda iyi araştırıldığını biliyoruz (örn., Kabataş ve ark. 2014; Baltacı. 2017, 2021; Baltacı ve diğerleri 2019). Dursun (2020) yaptığı bir çalışmada birçok Avrupa ülkesini önemli ölçüde etkileyen 2020 Mayıs ortasındaki toz fırtınası sırasında Türkiye'ye taşınan Sahra tozunun etkisini incelemiştir. Türkiye'nin tüm şehirlerindeki izleme ağlarından gelen partikül madde kirliliği ölçümlerini analiz ederek, toz olayından önce, sırasında ve sonrasında PM seviyelerini değerlendirmiştir. Bulgular, Sahra tozu Türkiye'ye ulaştığında, özellikle Karaman ilinde PM konsantrasyonlarının belirgin şekilde arttığını ortaya koymuştur. PM seviyelerindeki bu artış doğrudan taşınan tozla bağlantılı olup, ölçümler, toz bölgeyi terk ettikten sonra PM değerlerinin normale döndüğünü göstermiştir. Çalışma ayrıca, Sahra tozunun iklim koşullarına bağlı olarak etkilenen bölgelerde uzun süreler kalabileceğini, yağmur ve nemin toz akışını yavaşlattığını ve çökme oranlarını artırdığını, bazen yağmura eşlik eden çamur benzeri yağışlara neden olduğunu vurgulamıştır. Kabataş ve arkadaşları (2018) Nisan 2008'de Türkiye'de günlük PM_{10} konsantrasyonlarının yüksek seviyelere ($>50\ \mu g/m^3$) ulaşmasına katkıda bulunan Sahra tozu salgınını bildirmiş ve araştırmışlardır. Ancak bahar aylarında Sahra tozunun Türkiye'ye taşınma sıklığı oldukça sınırlı olduğundan (genellikle 90 günde 2-5 olay)

Sahra tozunun etkisi 11 yıllık verilerde çok net görülememektedir (uzun vadeli verilerin gölgesinde kalmıştır).

Yaz sezonuyla ilgili olarak, Türkiye'nin doğu ve güneydoğu bölgeleri PM_{10} artışlarına neden olan büyük ölçekli atmosferik koşullardan daha fazla etkilenmektedir (Şekil 4.10a). Önceki çalışmalara göre, yazın Asyadan gelen alçak basınclı (Asian low) rüzgârların Türkiye'nin doğu kısmına nüfuz etmesi, geniş alanlarda yüksek sıcaklık kayıtlarına neden olmakta ve daha kötü hava kalitesi koşullarıyla sonuçlanmaktadır. Ayrıca yüzey alçaklığı özelliğinden dolayı atmosferin orta seviyesinde kalın bir inversiyon tabakası oluşturan antisiklonik koşulların varlığı kirleticilerin dağılmasını engellemektedir. PC2'e baktığımızda, 2014 ile 2016 yılları arasındaki (Şekil 4.10b'de 2017 ve 2020) düşük (yüksek) PM_{10} değerleri görülebilmektedir. Düşük/yüksek PM_{10} değerlerine neden olan yüzeyin alçak ve yüksek yerleri PC2 sonuçları dikkate alınarak araştırılmıştır. Sonbahar mevsiminde, kışa benzer şekilde, aynı bölgelerin, özellikle doğu/güneydoğu Türkiye için, büyük ölçekli atmosferik mekanizmalardan daha fazla etkilendiğini bulunmuştur (Şekil 4.11a). Aynı zamanda tarımsal artıkların yakılması, özellikle kırsal ve tarımsal bölgelerde önemli bir hava kirliliği kaynağıdır. Çiftçiler hasattan sonra kalan ürün artıklarını yaktıklarında, özellikle PM_{10} olmak üzere büyük miktarda partikül madde atmosfere salınır. Tarımsal artıkların yakılması, özellikle hasat sonrası mevsimde PM_{10} seviyelerinde keskin bir artışa yol açabilmektedir. Oluşan duman, yüksek PM_{10} konsantrasyonlarına katkıda bulunan havada asılı kalabilen ince parçacıklar içerir. Artıkların yakılmasının PM_{10} seviyeleri üzerindeki etkisi genellikle mevsimsel değişiklikler gösterir ve partikül kirliliğindeki artışlar, birçok ürünün hasat edildiği yaz sonu ve sonbahar başı gibi yoğun tarımsal faaliyet dönemlerinde meydana gelir. Örneğin, Eke ve Kaynak (2021), Adana ve Osmaniye illerindeki yıllık yangınların sırasıyla %34'ünün ve %58'inin Ağustos 2018'de olduğunu ve bunların tarımsal artıkların yakılmasıyla ilişkili olduğuna inanıldığını belirtmiştir. Artıkların yakılmasından kaynaklanan yüksek PM_{10} seviyeleri, özellikle astım ve bronşit gibi solunum yolu rahatsızlıkları için ciddi sağlık sorunlarına yol açabilir. İnce parçacıklar akciğerlerin derinliklerine nüfuz ederek sağlık sorunlarına neden olabilir veya bunları daha da kötüleştirebilir. Tarımsal atıkların yakılmasının ani etkisi genellikle yerel olsa da ince parçacıklar rüzgarla uzun mesafelere taşınabilir ve kentsel alanlar da dahil olmak üzere çevredeki bölgelerdeki hava kalitesini etkileyebilir. REOF2 bölgelerinde, bölgedeki hava kalitesini kötüleştiren büyük ölçekli toz taşınmasına ek olarak, yüksek PM_{10} seviyelerinin de bu tarımsal kalıntı yakma işleminden etkilenmesi (Eke ve Kaynak, 2021, Akyuz ve diğerleri,

2021, Akyuz ve diğerleri, 2024) mümkündür. Kış mevsimin dışında komşu ülkelerde (Suriye, Irak ve Levant Havzası) kuraklık koşullarının hâkim olması, yoğun Arap çölünden gelen toz parçacıklarının uygun orta dereceli rüzgar hızı ve yönleriyle bu bölgelere taşınmasını sağlamaktadır (Baltacı ve Ezber 2022). İklim değişikliğinin yanı sıra önümüzdeki yıllarda bu çöl alanlarında kuraklık koşulları artacak ve solunum yolu hastalıklarında artış, görüş mesafesinin azalması, bitki örtüsü kaybı gibi kötü hava kalitesi koşulları açısından Türkiye'nin doğusu için hayati bir risk oluşturacaktır. Bu koşullarla uyumlu olarak, Türkiye'nin bu bölümünde kuraklık olaylarında artış (Şekil 4.11b) ve önceki çalışmalarda hava kirliliği üzerinde önemli bir etki bulunmuştur (Baltaci ve ark. 2023). Daha spesifik olarak, çalışma döneminin dört mevsimi için ikinci REOF modunun karşılık gelen PC zaman serisi şu şekildedir: Kış PC2 zaman serisi toplam varyansın %17,5'ini temsil eder ve 2011'den bu yana hareketli bir eğilim göstermekte ve 2019'da zirve yaparak, 2020 yılında tekrar ufak bir düşüşe geçmiştir. İlkbahar PC2, toplam varyansın %14,0'ını oluşturmaktadır ve bu, 2013 istisnası dışında 2010'dan 2015'e bir düşüş eğilimine işaret etmektedir. Öte yandan zaman serisi 2016'dan 2020'ye artan bir trend olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde, yaz PC2 zaman serisi toplam varyansın %14'u açıklamaktadır; bu, artış gösterdiği 2013 haricinde 2010'dan 2016'ya düşüşe işaret etmektedir; ancak 2017'den bu yana trendde bir artış olup, 2019'da zirveye ulaşıp 2020'de küçük bir düşüş göstermiştir. Son olarak, PC2 düşüşü toplam varyansın %16,3'ünü temsil etmekte ve 2011'de düşüş, 2012'de hafif bir artış ve 2016'ya kadar tekrar düşüş göstermektedir. Ancak 2016 yılından sonra tekrar artış göstermiş ve 2018 yılında ise yine hafif bir düşüş yaşanmıştır.

Çalışma süresi boyunca PM_{10} konsantrasyonlarının değişiminde yer alan olgunun ayrıntılarını daha fazla araştırmak için, REOF2 önemli istasyonlarının günlük ortalama PM_{10} konsantrasyonları Şekil 4.12'de verilmiştir. REOF2 modu tarafından tanımlanan önemli bölgelerdeki PM_{10} konsantrasyonlarındaki değişimler, dört mevsime ait PC zaman serisiyle uyumludur, dolayısıyla bize büyük ölçekli atmosferik sirkülasyonların PM_{10} konsantrasyonu üzerindeki etkisine dair açık bir gösterge sağlamaktadır. Bu nedenle, çalışma dönemi boyunca bu varyasyonlardan sorumlu olan sinoptik olayların araştırılması ihtiyacını ortaya koymaktadır.

5.3 KOMPOZİT HARİTALARI VE YÜKSEK PM_{10} KONSANTRASYONLARI

REOF2 modu tarafından tanımlanan PM_{10} açısından önemli bölgelerdeki değişimler ve her mevsime ait PC zaman serisiyle uyumlu olduğundan dolayı bize büyük ölçekli atmosferik

sirkülasyonların PM_{10} konsantrasyonu üzerindeki etkisine dair açık bir gösterge sağlamaktadır. Dolaysıyla, her mevsim için seçilen bölgelerde yüksek/düşük PM_{10} değerlerine neden olan atmosferik nedenleri çalışmanın bu bölümünde incelenmiştir. Bu amaçla, Şekil 4.8a ve 4.11a'da gösterilen REOF2 sonuçlarından geniş bir alandaki PM_{10} değişikliklerini dikkate alarak seçilen bölgelere odaklanmıştır (Şekil 4.21'deki kahverengi dikdörtgen). Düşük seviyeli rüzgar alanlarının hem yerel toprak hem de büyük ölçekli toz taşınımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu bilinmektedir. Ayrıca sıcaklık iletimi ve çökelme mekanizmaları yüzey açısından da oldukça önemlidir. Bu nedenle, büyük ölçekli atmosferik sistemlerin seçilen bölgeler için yüksek ve düşük PM_{10} değerlerine sahip olma üzerindeki rolünü araştırmak için esas olarak NCEP/NCAR yeniden analizinden uyarlanan 1000 hPa rüzgar alanlarını kullanılmıştır. Elde edilen haritalara baktığımızda, kış aylarında Arap çölünden gelen toz parçacıklarının Türkiye'nin doğu (DAB) ve güneydoğu (GAP) bölgelerine taşınmasından $7ms^{-1}$'e ulaşan kuvvetli güney rüzgarları sorumlu olduğu görülmektedir (Şekil 4.21). $7ms^{-1}$'e ulaşan rüzgar hızı PM_{10}'u daha uzun mesafelere etkili bir şekilde taşıyabilmektedir ve bu, endüstriyel faaliyetler veya tarımsal yakma gibi bir alanda üretilen kirleticilerin komşu bölgelere taşınabileceği ve geniş bir alandaki hava kalitesini etkileyebileceği anlamına gelmektedir. Ayrıca güneybatıdan esen rüzgarlar da Sahra kökenli toz parçacıklarının Kuzey Afrika'dan GAB'a taşınmasını sağlamaktadır. Sonuç olarak DAB ve GAB'da bulunan istasyonlarda normalin üzerinde PM_{10} değerleri kaydedilmektedir (istasyon adları Şekil 4.12'de gösterilmektedir). Güneybatı rüzgarlarının batı akımlarına dönmesiyle birlikte güney rüzgar hızlarının önemli ölçüde azalması durumunda çevre ülkelerden toz taşınması dururken, DAB ve GAB istasyonlarında normalin altında PM_{10} kayıtları görülmektedir. Çevre ülkelerdeki toz parçacıkları ve GAB içindeki yoğun kum parçacıkları, rüzgar yönündeki rüzgarların girmesini engelleyecek herhangi bir bariyer (tepeler, dağlar vb.) bulunmadığından, düşük seviyeli rüzgarlar tarafından Türkiye'nin doğu karasal bölgelerinin iç kısımlara kolaylıkla taşınmaktadır. İlkbahar aylarında İç Anadolu bölgesinden esen güneybatı rüzgarları kum parçacıklarını Türkiye'nin kuzey bölgesine taşımakta, bu da PM_{10} değerlerinin normalin üzerinde kaydedilmesine neden olmaktadır (Şekil 4.9a ve Şekil 4.21). Öte yandan sakin hava koşulları ve Karadeniz üzerinden taşınan nemli hava, Türkiye'nin Orta ve Doğu Karadeniz kesimlerinde PM_{10} değerlerinin düşük olmasına neden olmaktadır. Yaz aylarında, Hazar Denizi'nden gelen güçlü doğu rüzgarları ve buna bağlı olarak Türkiye'nin doğusundaki yüzey alçak basınçlı (cut-off surface low) rüzgarlar (Şekil 4.21), DAB/GAB'da yüksek PM_{10} konsantrasyonlarının bulunmasından sorumlu olduğu sonucuna varılmaktadır (Şekil 4.10a). Benzer atmosferik paternler çoğunlukla 2018, 2019 ve

2020 yıllarında gözlenmektedir (Şekil 4.10b). Doğu rüzgârı karakteristikleri kuzey rüzgarlarına dönerse PM_{10} kirliliği açısından daha iyi hava kalitesi koşulları kaydedilmektedir. Sonbahar ’da, Baltacı ve Ezber'in (2022) tarafından belirtildiği gibi, düşük seviyeli atmosferik rüzgar mekanizmaları yerine, Basra Körfezi üzerindeki yüzey alçak basıncı ve 700 hPa seviyesindeki kuvvetli güney rüzgarları, toz parçacıklarının yüzeyden orta atmosfer seviyelerine taşınmasını sağlamaktadır. Dolayısıyla yukarıda bahsedilen rüzgar tiplerin Türkiye’nin farklı bölgelerdeki PM_{10} konsantrasyonlara nasıl etki gösterdiğini bir kez daha ortaya konmuştur.

Daha önce yapılan birçok çalışma da uzun menzilli toz taşınımının rolü ve Türkiye'deki hava kalitesi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Örneğin, Baltacı (2016) Sahra tozu taşınımının Türkiye üzerindeki etkisini, özellikle Mart 2016'daki önemli bir toz olayı sırasında incelenmiştir. Sahra tozunun ilkbaharda sıklıkla batı Türkiye'ye ulaştığını ve 23-24 Mart 2016'da önemli bir toz olayının meydana geldiğini bildirmiştir. Toz, Levant havzası üzerindeki bir Sharav siklonu ve yüksek basınç sistemiyle ilişkili güçlü güneybatı rüzgarları tarafından Türkiye'ye taşındığı görülmüştür. Bu toz olayı sırasında, hava kalitesi istasyonlarının %45'i PM_{10} seviyelerinin uzun vadeli ortalamaları aştığını ve %54'ünün günlük AB ve DSÖ (50 $\mu g/m^3$ ve 45 $\mu g/m^3$) sınır değerlerini aştığını kaydedilmiştir. Dursun (2020) 2020 Mayıs ortasındaki toz fırtınası sırasında Türkiye'ye taşınan Sahra tozunun etkisini incelemiştir ve Sahra tozu Türkiye'ye ulaştığında, özellikle Karaman ilinde PM konsantrasyonlarının belirgin şekilde arttığını ortaya koymuştur. Uzunpınar ve arkadaşları (2023) tarafından yapılan araştırmada, belirli hava yörünge kümeleriyle taşınan Sahra tozunun Türkiye'deki PM_{10} ve $PM_{2,5}$ konsantrasyonlarını önemli ölçüde etkilediği ve hava akış desenlerinin, farklı parçacık boyutu fraksiyonlarının genel PM konsantrasyonlarına katkısının ve toz olaylarının hava kalitesi üzerindeki etkisinin gösterildiği ortaya konmuştur. Birinci ve diğ., (2023), 7 Nisan - 10 Nisan 2013 tarihleri arasında Orta Akdeniz'de 995 hPa siklonun neden olduğu Sahra toz fırtınasının Türkiye'deki hava kalitesi ve meteorolojik görüş mesafesi üzerindeki etkisini incelemiştir. Siklon, tozu Kuzey Afrika'dan Türkiye'ye taşımış ve birçok havaalanında görüşü önemli ölçüde etkilemiştir. Kaydedilen en düşük görüş mesafesi Kapadokya Havaalanı'nda 3800m olmuştur. PM_{10} konsantrasyonları Türkiye'nin güneyinde yükselmiş, saatlik ortalamalar Nevşehir'de 1343 $\mu g/m^3$ ve Karaman'da 900 $\mu g/m^3$'e ulaşmıştır. Çalışmada toz taşınımını izlemek ve analiz etmek için çeşitli modeller ve uydu verileri kullanılmış ve toz fırtınasının yükselen PM_{10} seviyelerine katkıda bulunduğu doğrulanmıştır. Araştırma, kuvvetli rüzgarların neden olduğu ve yüksek basınç gibi atmosferik koşulların kolaylaştırdığı iki gün içinde Türkiye'ye ulaşan toz fırtınasının hızlı hareketini

vurgulamıştır. Çalışmada, siklonun tozun kaldırılmasında ve taşınmasında önemli bir rol oynadığı, tozun daha sonra Türkiye'ye çöktüğü, Kuzey Afrika'ya yakınlığı nedeniyle öncelikle güney bölgelerini etkilediği sonucuna varılmıştır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Türkiye'deki PM_{10} konsantrasyonlarının mevsimsel değişkenliği üzerinde büyük ölçekli atmosferik hareketlerin rolü araştırılmıştır. Bu kapsamda, 2010-2020 dönemi uzun vadeli PM_{10} değerlerinin uzay-zamansal değişimleri üzerinde sinoptik ölçekli atmosferik dolaşımın rolünü araştırmak için EOF analizi, coğrafi analiz ve mekansal istatistikler dahil olmak üzere çoklu analiz teknikleri uygulanmıştır. REOF analizi ve ilgili zaman serileri tarafından tanımlanan PM_{10} konsantrasyonundaki değişiklikleri doğrulamak amacıyla, REOF2 çıktılarından düşük/yüksek PM_{10}'a sahip seçilen bölgeler için kompozit analiz gerçekleştirilmiştir. En yüksek aylık ortalama PM_{10} konsantrasyonları, evsel ısınma ve kışın artan kuraklık koşulları gibi faktörler nedeniyle kış ayları ve Kasım aylarında gözlenmiştir. (Baltacı ve ark. 2023). Dört mevsimin tamamına ilişkin REOF1 sonuçları, istasyonlardaki yüksek PM_{10} konsantrasyonlarının birbirinden uzakta yer aldığını ve yerel emisyon kaynaklarının büyük ölçekli atmosferik sirkülasyon etkilerinden daha baskın olduğunu göstermektedir. Bunun tersine, REOF2 modları önemli bölgelerin birbirine yakın konumlandığını göstermiştir ve bu da büyük ölçekli atmosferik dolaşımların bu bölgelerde, özellikle DAB ve GAB bölgelerinde PM_{10} konsantrasyonu üzerindeki etkisini göstermektedir. Tüm DAB/GAB bölgesinin PM_{10} kirliliğinin aynı kaynağından etkilendiği kış mevsiminde görülebileceği gibi, bu bölgeler üzerindeki büyük ölçekli atmosferik sirkülasyonların etkisine dair bir göstergedir ve bu toplam varyansın %17,5'ini temsil etmektedir. Arap Yarımadası'ndan (özellikle Suriye ve Irak'tan) ve Kuzey Afrika'dan toz aerosollerinin Türkiye'nin DAB/GAB bölgesine taşınmasında güney rüzgarlarının kuvveti ve güneybatı rüzgarlarının düşük seviyelerde bulunması büyük önem taşımaktadır. İlkbahar aylarında Orta Anadolu'nun yarı kurak bölgesindeki toz aerosolleri güneyden esen rüzgarlarla Türkiye'nin kuzeyine taşınmakta, bu durum Orta ve Doğu Karadeniz üzerindeki yerleşimlerde sınır değerin üzerinde PM_{10} konsantrasyonlarına neden olmaktadır.Yaz aylarında, kış mevsimine benzer şekilde, Türkiye'nin DAB/GAB'ı PM_{10} artışlarına neden olan büyük ölçekli atmosferik koşullardan daha fazla etkilenmektedir. Ancak sinoptik ölçekli atmosferik mekanizmanın kış koşullarıyla karşılaştırıldığında açıkça farklı olduğu görülmektedir. Atmosferin düşük seviyelerinde Hazar Denizi'nden kaynaklanan kuvvetli doğu rüzgarları, karasal toz parçacıklarını (özellikle Urmiye Gölü'nden) Türkiye'nin doğu bölgelerine (DAB/GAB) aktarmaktadır. Ek olarak, Asyatik'in

GAB üzerindeki alçak kesim yüzeyi, yüzeydeki kum parçacıklarını yukarı doğru kaldırır ve kısa sürede güçlü toz girdaplarına neden olmaktadır. Sonbahar sırasında, atmosferin orta seviyesindeki güçlü güney rüzgarları Arap çölünden toz parçacıklarını GAB 'a aktarmaktadır.

Bulgularımız, Türkiye'de hava kalitesindeki mevsimsel değişimlerin büyük ölçekli atmosferik sirkülasyonlardan ikincil olarak etkilendiğini ve birincil katkının ise yerel emisyon kaynaklarındaki değişimlerden kaynaklandığını vurgulamaktadır. Bu çalışmanın sonuçlarına dayanarak, PM_{10} açısından genel hava kalitesi durumu hakkında daha karmaşık verilere dayalı bir çalışmanın daha iyi bir fikir vermesi önerilmektedir; çünkü bu çalışmada eksik veriler nedeniyle 200'den fazla istasyondan yalnızca 80'i seçilebilmiştir.

Dolayısıyla gelecekteki çalışmalarda daha fazla PM_{10} verisinin kullanılması, Türkiye'deki PM_{10} konsantrasyonunu etkileyen gerçek olguyu ortaya çıkarmak açısından son derece önemli olacaktır. Ayrıca gelecekte Türkiye'deki mevcut 200'den fazla hava kalitesi istasyonundaki verilerin tamamı elde edilebilirse gelecekte daha detaylı bir bölgeselleştirme çalışması yapmak mümkün olacaktır.

KAYNAKLAR

Abdullah, M., 2020. Evaluating particulate matter 2.5 in the yangtze river delta. Master's Thesis, Missouri State University, Springfield, MO, USA

Achakulwisut, P., Shen, L. and Mickley, L.J., 2017. What controls springtime fine dust variability in the western United States? Investigating the 2002–2015 increase in fine dust in the US Southwest. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *122*(22), pp.12-449.

Akyuz, E. and Kaynak, B., 2019. Use of dispersion model and satellite SO2 retrievals for environmental impact assessment of coal-fired power plants. *Science of the Total Environment*, *689*, pp.808-819.

Akyuz, E., Cingiroglu, F., Kaynak, B. and Unal, A., 2024. A bottom-up agricultural emissions inventory and its analysis via CMAQ and IASI-NH3. *Science of The Total Environment*, p.175355.

Akyuz, E., Cingiroglu, F., Unal, A. and Kaynak, B., 2021, October. An Updated Agriculture Emissions Inventory and Contribution Estimation Using WRF-CMAQ Model for Turkey. In *International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and its Application* (pp. 295-302). Cham: Springer International Publishing.

Arslan, H., Baltaci, H., Sahin, U.A. and Onat, B., 2022. The relationship between air pollutants and respiratory diseases for the western Turkey. *Atmospheric Pollution Research*, *13*(2), p.101322.

Atkinson, R.W., Ross Anderson, H., Sunyer, J., Ayres, J.O.N., Baccini, M., Vonk, J.M., Boumghar, A., Forastiere, F., Forsberg, B., Touloumi, G. and Schwartz, J., 2001. Acute effects of

particulate air pollution on respiratory admissions: results from APHEA 2 project. *American journal of respiratory and critical care medicine*, *164*(10), pp.1860-1866.

Baltaci, H., Alemdar, C.S.O. and Akkoyunlu, B.O., 2020. Background atmospheric conditions of high PM_{10} concentrations in Istanbul, Turkey. *Atmospheric Pollution Research*, *11*(9), pp.1524-1534.

Baltaci, H., Akkoyunlu, B.O., Arslan, H., Yetemen, O. and Ozdemir, E.T., 2019. The influence of meteorological conditions and atmospheric circulation types on PM 10 levels in western Turkey. *Environmental monitoring and assessment*, *191*, pp.1-12.

Baltaci, H., Arslan, H. and Akkoyunlu, B.O., 2022. High PM 10 source regions and their influence on respiratory diseases in Canakkale, Turkey. *International Journal of Environmental Science and Technology*, pp.1-10.

Baltaci, H. and Ezber, Y., 2022. Characterization of atmospheric mechanisms that cause the transport of Arabian dust particles to the southeastern region of Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, pp.1-14.

Baltacı, H., Göktürk, O.M., Kındap, T., Ünal, A. and Karaca, M., 2015. Atmospheric circulation types in Marmara Region (NW Turkey) and their influence on precipitation. *International Journal of Climatology*, *35*(8), pp.1810-1820.

Baltaci, H., 2017. Spatial and temporal variation of the extreme Saharan dust event over Turkey in March 2016. *Atmosphere*, *8*(2), p.41.

Baltaci, H., 2021. Meteorological characteristics of dust storm events in Turkey. *Aeolian Research*, *50*, p.100673.

Baltaci, H., Tumay, G. and Labban, A.H., 2023. Impact of drought conditions on air pollution over Turkey. *International Journal of Climatology*, *43*(8), pp.3647-3663.

Birinci, E., Özdemir, E.T. and Deniz, A., 2023. 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*(6), p.708.

Bodor, K., Micheu, M.M., Keresztesi, A., Birsan, M.V., Nita, I.A., Bodor, Z., Petres, S., Korodi, A. and Szep, R., 2021. Effects of PM_{10} and weather on respiratory and cardiovascular diseases in the Ciuc Basin (Romanian Carpathians). *Atmosphere*, *12*(2), p.289.

Bozdağ, A., Dokuz, Y. and Gökçek, Ö.B., 2020. Spatial prediction of PM_{10} concentration using machine learning algorithms in Ankara, Turkey. *Environmental pollution*, *263*, p.114635.

Çapraz, Ö., Deniz, A. and Doğan, N., 2017. Effects of air pollution on respiratory hospital admissions in İstanbul, Turkey, 2013 to 2015. *Chemosphere*, *181*, pp.544-550.

Çapraz, Ö. and Deniz, A., 2021. Particulate matter (PM 10 and PM 2.5) concentrations during a Saharan dust episode in Istanbul. *Air Quality, Atmosphere & Health*, *14*, pp.109-116.

Chen, J. and Hoek, G., 2020. Long-term exposure to PM and all-cause and cause-specific mortality: a systematic review and meta-analysis. *Environment international*, *143*, p.105974.

Chen, C., Su, M., Liu, G. and Yang, Z., 2013. Evaluation of economic loss from energy-related environmental pollution: a case study of Beijing. *Frontiers of Earth Science*, *7*, pp.320-330.

Cho, J.H., Kim, H.S. and Chung, Y.S., 2021. Spatio-temporal changes of PM_{10} trends in South Korea caused by East Asian atmospheric variability. *Air Quality, Atmosphere & Health*, *14*, pp.1001-1016.

Cohen, A.J., Ross Anderson, H., Ostro, B., Pandey, K.D., Krzyzanowski, M., Künzli, N., Gutschmidt, K., Pope, A., Romieu, I., Samet, J.M. and Smith, K., 2005. The global burden of disease due to outdoor air pollution. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, *68*(13-14), pp.1301-1307.

Dayan, U., Ziv, B., Shoob, T. and Enzel, Y., 2008. Suspended dust over southeastern Mediterranean and its relation to atmospheric circulations. *International Journal of Climatology*, *28*(7), pp.915-924.

Dockery, D.W. and Pope 3rd, C.A., 1994. Acute respiratory effects of particulate air pollution. *Annual Review of Public Health*, *15*, pp.107-132.

Dursun, S., 2020. The effect of particulate matter pollution of saharan dust over Europe in May-2020: a case study of Karaman City Center, Turkey. *Pakistan Journal of Analytical & Environmental Chemistry*, *21*(2), pp.202-208.

Eke, M. and Kaynak, B., 2021, December. Observation of the Agricultural Residue Burning Using Multi-Pollutant Satellite Retrievals. In *AGU Fall Meeting Abstracts* (Vol. 2021, pp. A35J-1775).

ESRI., 2016. An overview of the interpolation toolset. Retrieved from https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/an-overview-ofthe-interpolation-tools.htm

Foltz, G.R. and McPhaden, M.J., 2008. Trends in Saharan dust and tropical Atlantic climate during 1980–2006. *Geophysical Research Letters*, *35*(20).

Galvão, E.S., Santos, J.M., Lima, A.T., Reis Jr, N.C., Orlando, M.T.D.A. and Stuetz, R.M., 2018. Trends in analytical techniques applied to particulate matter characterization: a critical review of fundaments and applications. *Chemosphere*, *199*, pp.546-568.

Gammoudi, N., Kovács, J., Gresina, F. and Varga, G., 2024. Combined use of HYSPLIT model and MODIS aerosols optical depth to study the spatiotemporal circulation patterns of Saharan dust events over Central Europe. *Aeolian Research*, *67*, p.100899.

Grantz, D.A., Garner, J.H.B. and Johnson, D.W., 2003. Ecological effects of particulate matter. *Environment international*, *29*(2-3), pp.213-239.

Güler, N. and İşçi, Ö.G., 2016. The regional prediction model of PM_{10} concentrations for Turkey. *Atmospheric Research*, *180*, pp.64-77.

Hannachi, A., 2004. A primer for EOF analysis of climate data. *Department of Meteorology, University of Reading*, *1*(29), pp.3-3.

Harrison, R.M. and Yin, J., 2000. Particulate matter in the atmosphere: which particle properties are important for its effects on health?. *Science of the total environment*, *249*(1-3), pp.85-101.

Hong, Y.C., Lee, J.T., Kim, H., Ha, E.H., Schwartz, J. and Christiani, D.C., 2002. Effects of air pollutants on acute stroke mortality. *Environmental health perspectives*, *110*(2), pp.187-191.

Hyslop, N.P., 2009. Impaired visibility: the air pollution people see. *Atmospheric Environment*, *43*(1), pp.182-195.

Juneng, L., Latif, M.T. and Tangang, F., 2011. Factors influencing the variations of PM_{10} aerosol dust in Klang Valley, Malaysia during the summer. *Atmospheric Environment*, *45*(26), pp.4370-4378.

Kabatas, B., Unal, A., Pierce, R.B., Kindap, T. and Pozzoli, L., 2014. The contribution of Saharan dust in PM_{10} concentration levels in Anatolian Peninsula of Turkey. *Science of the Total Environment*, *488*, pp.413-421.

Kabatas, B., Pierce, R.B., Unal, A., Rogal, M.J. and Lenzen, A., 2018. April 2008 Saharan dust event: Its contribution to PM_{10} concentrations over the Anatolian Peninsula and relation with synoptic conditions. *Science of the Total Environment*, *633*, pp.317-328.

Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J. and Zhu, Y., 2018. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. In *Renewable energy* (pp. Vol1_146-Vol1_194). Routledge.

Kara, M.B. and Kaynak Tezel, B., 2017. Türkiye'deki SO2 Yer Ölçümlerinin Değerlendirilmesi ve SO2 Kirliliğinin Zamansal ve Mekansal Değişiminin İncelenmesi. *VII. Ulusal Hava Kirliliği ve Kontrolü Sempozyumu, Bildiriler Kitabı*, pp.495-508.

Karaca, F., Anil, I. and Alagha, O., 2009. Long-range potential source contributions of episodic aerosol events to PM_{10} profile of a megacity. *Atmospheric Environment*, *43*(36), pp.5713-5722.

Khomsi, K., Najmi, H., Chelhaoui, Y. and Souhaili, Z., 2022. The contribution of large-scale atmospheric patterns to pollution with PM_{10}: the new Saharan Oscillation Index. *Authorea Preprints*.

Kim, J.H., Kim, M.K., Ho, C.H., Park, R.J., Kim, M.J., Lim, J., Kim, S.J. and Song, C.K., 2019. Possible link between arctic sea ice and January PM_{10} concentrations in South Korea. *Atmosphere*, *10*(10), p.619.

Kim, S.U. and Kim, K.Y., 2020. Physical and chemical mechanisms of the daily-to-seasonal variation of PM_{10} in Korea. *Science of the Total Environment*, *712*, p.136429.

Lee, G., Ho, C.H., Chang, L.S., Kim, J., Kim, M.K. and Kim, S.J., 2020. Dominance of large-scale atmospheric circulations in long-term variations of winter PM_{10} concentrations over East Asia. *Atmospheric Research*, *238*, p.104871.

Li, J. and Heap, A.D., 2011. A review of comparative studies of spatial interpolation methods in environmental sciences: Performance and impact factors. *Ecological Informatics*, *6*(3-4), pp.228-241.

Li, L., Gong, J. and Zhou, J., 2014. Spatial interpolation of fine particulate matter concentrations using the shortest wind-field path distance. *PloS one*, *9*(5), p.e96111.

Li, L., Losser, T., Yorke, C. and Piltner, R., 2014. Fast inverse distance weighting-based spatiotemporal interpolation: a web-based application of interpolating daily fine particulate matter PM2. 5 in the contiguous US using parallel programming and kd tree. *International journal of environmental research and public health*, *11*(9), pp.9101-9141.

Li, R., Wang, Z., Cui, L., Fu, H., Zhang, L., Kong, L., Chen, W. and Chen, J., 2019. Air pollution characteristics in China during 2015–2016: Spatiotemporal variations and key meteorological factors. *Science of the total environment*, *648*, pp.902-915. ,

Liu, X., Zhao, C., Shen, X. and Jin, T., 2022. Spatiotemporal variations and sources of PM2. 5 in the Central Plains Urban Agglomeration, China. *Air Quality, Atmosphere & Health*, *15*(9), pp.1507-1521.

Lorenz, E.N., 1956. *Empirical orthogonal functions and statistical weather prediction* (Vol. 1, p. 52). Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, Department of Meteorology.

Ma, J., Qu, Y., Yu, Z. and Wan, S., 2023. Climate modulation of external forcing factors on air quality change in Eastern China: Implications for PM2. 5 seasonal prediction. *Science of The Total Environment*, *905*, p.166989.

Maguire, D.J., 1991. An overview and definition of GIS. *Geographical information systems: Principles and applications*, *1*(1), pp.9-20.

Martinson, D.G., 2018. *Quantitative methods of data analysis for the physical sciences and engineering*. Cambridge University Press.

Mercan, Y., Babaoglu, U.T. and Erturk, A., 2020. Short-term effect of particular matter and sulfur dioxide exposure on asthma and/or chronic obstructive pulmonary disease hospital admissions in Center of Anatolia. *Environmental Monitoring and Assessment*, *192*(10), p.646.

Monahan, A.H., Fyfe, J.C., Ambaum, M.H., Stephenson, D.B. and North, G.R., 2009. Empirical orthogonal functions: The medium is the message. *Journal of Climate*, *22*(24), pp.6501-6514.

Mutlu, A., 2020. Air quality impact of particulate matter (PM 10) releases from an industrial source. *Environmental Monitoring and Assessment*, *192*, pp.1-17.

Myhre, G.D.M.F., Shindell, D., Bréon, F.M., Collins, W., Fuglestvedt, J., Huang, J., Koch, D., Lamarque, J.F., Lee, D., Mendoza, B. and Nakajima, T., 2013. Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

Niu, Z., Liu, F., Yu, H., Wu, S. and Xiang, H., 2021. Association between exposure to ambient air pollution and hospital admission, incidence, and mortality of stroke: an updated systematic review and meta-analysis of more than 23 million participants. *Environmental health and preventive medicine*, *26*, pp.1-14.

Ozel, G. and Cakmakyapan, S., 2015. A new approach to the prediction of PM_{10} concentrations in Central Anatolia Region, Turkey. *Atmospheric Pollution Research*, *6*(5), pp.735-741.

Park, H.J., Wie, J. and Moon, B.K., 2019. Dominant synoptic patterns controlling PM 10 spatial variabilities over the Korean Peninsula. *Journal of the Korean earth science society*, *40*(5), pp.476-486.

Pope III, C.A., Burnett, R.T., Thurston, G.D., Thun, M.J., Calle, E.E., Krewski, D. and Godleski, J.J., 2004. Cardiovascular mortality and long-term exposure to particulate air pollution: epidemiological evidence of general pathophysiological pathways of disease. *Circulation*, *109*(1), pp.71-77.

Raja, N.B., Aydin, O., Türkoğlu, N. and Çiçek, İ., 2018. Characterising the seasonal variations and spatial distribution of ambient PM 10 in Urban Ankara, Turkey. *Environmental Processes*, *5*, pp.349-362.

Say, N.P., 2006. Lignite-fired thermal power plants and SO2 pollution in Turkey. *Energy policy*, *34*(17), pp.2690-2701.

Saygın, M., Gonca, T., Öztürk, Ö., Has, M., Çalışkan, S., Has, Z.G. and Akkaya, A., 2017. To investigate the effects of air pollution (PM_{10} and SO2) on the respiratory diseases asthma and chronic obstructive pulmonary disease. *Turkish thoracic journal*, *18*(2), p.33.

Sharma, R. and Kumar, A., 2023. Analysis of seasonal and spatial distribution of particulate matters and gaseous pollutants around an open cast coal mining area of Odisha, India. *Environmental Science and Pollution Research*, *30*(14), pp.39842-39856.

Shukla, K., Kumar, P., Mann, G.S. and Khare, M., 2020. Mapping spatial distribution of particulate matter using Kriging and Inverse Distance Weighting at supersites of megacity Delhi. *Sustainable cities and society*, *54*, p.101997.

Suh, H.H., Bahadori, T., Vallarino, J. and Spengler, J.D., 2000. Criteria air pollutants and toxic air pollutants. *Environmental health perspectives*, *108*(suppl 4), pp.625-633.

Şahin, F., Işik, G., Şahin, G. and Kara, M.K., 2020. Estimation of PM_{10} levels using feed forward neural networks in Igdir, Turkey. *Urban Climate*, *34*, p.100721.

Tahery, N., Geravandi, S., Goudarzi, G., Shahriyari, H.A., Jalali, S. and Mohammadi, M.J., 2021. Estimation of PM_{10} pollutant and its effect on total mortality (TM), hospitalizations due to cardiovascular diseases (HACD), and respiratory disease (HARD) outcome. *Environmental Science and Pollution Research*, *28*(17), pp.22123-22130.

Theodore, L., 2008. *Air pollution control equipment calculations*. John Wiley & Sons.

Tobler, W.R., 1970. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. *Economic geography*, *46*(sup1), pp.234-240.

Twohy, C.H., Kreidenweis, S.M., Eidhammer, T., Browell, E.V., Heymsfield, A.J., Bansemer, A.R., Anderson, B.E., Chen, G., Ismail, S., DeMott, P.J. and Van Den Heever, S.C., 2009. Saharan dust particles nucleate droplets in eastern Atlantic clouds. *Geophysical Research Letters*, *36*(1).

Uzunpinar, E.S., Imamoglu, I., Rahmani, A. and Tuncel, G., 2023. Modification of Saharan dust size distribution during its transport over the Anatolian Plateau. *Science of The Total Environment*, *892*, p.164646.

Wang, S., Li, G., Gong, Z., Du, L., Zhou, Q., Meng, X., Xie, S. and Zhou, L., 2015. Spatial distribution, seasonal variation and regionalization of PM 2.5 concentrations in China. *Science China Chemistry*, *58*, pp.1435-1443.

WHO (World Health Organization), 2024. Air Pollution. https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_2, (Date of access: 5 March 2024).

World Health Organization, 2021. *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2. 5 and PM_{10}), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. World Health Organization.

Xing, Q. and Sun, M., 2022. Characteristics of PM2. 5 and PM_{10} Spatio-Temporal Distribution and Influencing Meteorological Conditions in Beijing. *Atmosphere*, *13*(7), p.1120.

Xu, Y., Xue, W., Lei, Y., Zhao, Y., Cheng, S., Ren, Z. and Huang, Q., 2018. Impact of meteorological conditions on PM2. 5 pollution in China during winter. *Atmosphere*, *9*(11), p.429.

Xu, H., Xiao, Z., Chen, K., Tang, M., Zheng, N., Li, P., Yang, N., Yang, W. and Deng, X., 2019. Spatial and temporal distribution, chemical characteristics, and sources of ambient particulate matter in the Beijing-Tianjin-Hebei region. *Science of the total environment*, *658*, pp.280-293.

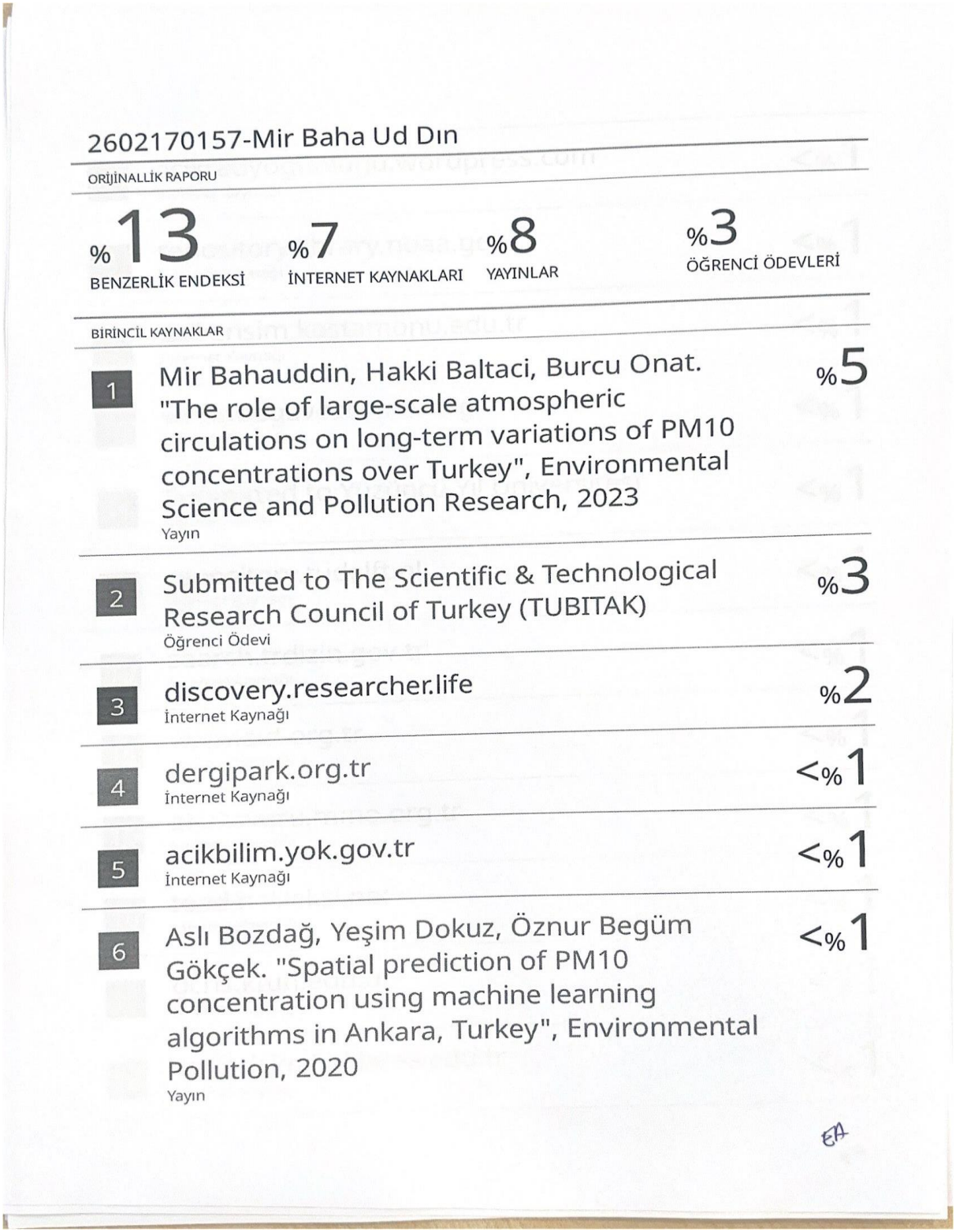
Yatkin, S. and Bayram, A., 2008. Source apportionment of PM_{10} and PM2. 5 using positive matrix factorization and chemical mass balance in Izmir, Turkey. *Science of the total environment*, *390*(1), pp.109-123.

Zhai, T., Zhao, Q., Gao, W., Shi, R., Xiang, W., Huang, H.L.A. and Zhang, C., 2015. Analysis of spatio-temporal variability of aerosol optical depth with empirical orthogonal functions in the Changjiang River Delta, China. *Frontiers of earth science*, *9*, pp.1-12.

Zeydan, Ö., 2021. Assessment of particulate matter (PM_{10}) pollution in Turkey in 2019. *Journal of the Institute of Science and Technology*, *11*(1), pp.106-118.

Zhou, W., 2021. GIS for earth sciences. Publications & Presentations-Geology and Geological Engineering.

İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI



2602170157-Mir Baha Ud Dın

ORİJİNALLİK RAPORU

%13	%7	%8	%3
BENZERLİK ENDEKSİ	İNTERNET KAYNAKLARI	YAYINLAR	ÖĞRENCİ ÖDEVLERİ

BİRİNCİL KAYNAKLAR

1	Mir Bahauddin, Hakki Baltaci, Burcu Onat. "The role of large-scale atmospheric circulations on long-term variations of PM10 concentrations over Turkey", Environmental Science and Pollution Research, 2023 Yayın	%5
2	Submitted to The Scientific & Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) Öğrenci Ödevi	%3
3	discovery.researcher.life İnternet Kaynağı	%2
4	dergipark.org.tr İnternet Kaynağı	<%1
5	acikbilim.yok.gov.tr İnternet Kaynağı	<%1
6	Aslı Bozdağ, Yeşim Dokuz, Öznur Begüm Gökçek. "Spatial prediction of PM10 concentration using machine learning algorithms in Ankara, Turkey", Environmental Pollution, 2020 Yayın	<%1

EA

KURUM İZNİ YAZILARI

Uyarı: Canlı ve cansız deneklerle yapılan tüm çalışmalar için kurum izin belgelerinin eklenmesi zorunludur. Gizlilik ve mahremiyet içeren durumlarda kurum adı kapatılmalıdır.

☐ **Kurum izni gerekmektedir.**

☒ **Kurum izni gerekmemektedir.**

Mir BAHA UD DIN
(İmza)