

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**HAVA KİRLİLİĞİ VE KENTLEŞME İLE COVID-19 İLİŞKİSİNİN COĞRAFI
BİLGİ SİSTEMLERİ KULLANILARAK BELİRLENMESİ**

Ayşe SEKMEN

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ŞEHİR VE BÖLGE PLANLAMA
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

TEMMUZ 2025

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**HAVA KİRLİLİĞİ VE KENTLEŞME İLE COVID-19 İLİŞKİSİNİN COĞRAFI
BİLGİ SİSTEMLERİ KULLANILARAK BELİRLENMESİ**

Ayşe SEKMEN

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ŞEHİR VE BÖLGE PLANLAMA

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEMMUZ 2025

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAVA KİRLİLİĞİ VE KENTLEŞME İLE COVID-19 İLİŞKİSİNİN COĞRAFİ
BİLGİ SİSTEMLERİ KULLANILARAK BELİRLENMESİ**

**Ayşe SEKMEN
ŞEHİR VE BÖLGE PLANLAMA
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

TEMMUZ 2025

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAVA KİRLİLİĞİ VE KENTLEŞME İLE COVID-19 İLİŞKİSİNİN COĞRAFİ BİLGİ
SİSTEMLERİ KULLANILARAK BELİRLENMESİ**

Ayşe SEKMEN

ŞEHİR VE BÖLGE PLANLAMA

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 01/07/2025 tarihinde jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Dilek KOÇ SAN (Danışman)
Doç. Dr. Kıvanç ERTUĞAY
Doç. Dr. Sinan LEVEND

ÖZET

HAVA KİRLİLİĞİ VE KENTLEŞME İLE COVID-19 İLİŞKİSİNİN COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİ KULLANILARAK BELİRLENMESİ

Ayşe SEKMEN

Yüksek Lisans Tezi, Şehir ve Bölge Planlama Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Dilek KOÇ SAN

Temmuz 2025; 104 sayfa

Hava kirliliği, ekolojik dengeyi bozan ve insan sağlığına zarar veren en önemli çevre sorunlarından biridir. Kentleşmeyle birlikte artan nüfus, sanayi faaliyetleri, fosil yakıt kullanımı, motorlu taşıt kaynaklı egzoz emisyonları gibi unsurlar, atmosferde zararlı gazların birikmesine yol açmakta; bu durum hem hava kalitesini düşürmekte hem de solunum yolu hastalıklarının artmasına neden olmaktadır. Son yıllarda, özellikle COVID-19 gibi solunum yolu hastalıkları ile hava kirliliği arasındaki ilişkinin ortaya konması, hava kirliliğinin halk sağlığı üzerindeki etkilerine yönelik farkındalığın artmasına neden olmuştur. Bu nedenle, yaşanabilir bir çevre ve sağlıklı toplumlar için hava kalitesinin korunması büyük önem taşımaktadır. Bu tez çalışmasında, hava kirliliği ile COVID-19 pandemisi arasındaki ilişki, uzaktan algılama yoluyla elde edilen uydu verilerinin Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ortamında analiz edilmesiyle incelenmiştir.

Çalışmada hava kirliliği ve kentleşme ile COVID-19 vakaları arasındaki ilişkinin uzaktan algılama verileri ve CBS teknikleri kullanarak analiz edilmesi amaçlanmıştır. Türkiye genelinde ve beş büyükşehir (İstanbul, Ankara, İzmir, Bursa, Antalya) özelinde gerçekleştirilen analizlerde, 2019–2022 yılları arasında karbonmonoksit (CO), kükürtdioksit (SO₂), azot dioksit (NO₂) hava kirlleticilerine ilişkin veriler Sentinel-5P uydu verilerinden Google Earth Engine (GEE) platformu kullanılarak elde edilmiştir. Uydu verileri, Türkiye sınırları ve bulut maskesi uygulanarak aylık ortalamalar hâlinde işlenmiş ve daha sonra tematik haritalara dönüştürülmüştür. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığının hava kalitesi izleme istasyonlarından alınan CO, SO₂, NO₂ verileri ve uydu verileri karşılaştırılmıştır. COVID-19 vaka verileri, 2021 yılına ait haftalık bazlı verilerden aylık verilere dönüştürülerek grafiksel analizler yapılarak incelenmiş ve alınan veriler ile beş büyükşehir uydu verileri arasındaki ilişkiyi görmek için çoklu regresyon analizi yapılmıştır. Beş büyükşehir için istasyon verileriyle, aynı noktalara karşılık gelen uydu verileri karşılaştırılmış ve bu sayede iki veri kaynağı arasındaki tutarlılık analiz edilmiştir. Kent yerleşim alanları ve termik santral alanları mekânsal olarak haritalandırılmış ve uydu görüntüleriyle birlikte değerlendirilmiştir. Kentsel yerleşim alanları, Organize Sanayi Bölgesi (OSB) alanları, termik santraller, nüfus gibi sosyo-mekânsal değişkenlerle COVID-19 vakaları arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Elde edilen bulgular, hava kirliliğinin sadece çevresel bir sorun olmakla kalmayıp halk sağlığı açısından da önemli sonuçları olduğunu ortaya koymaktadır. Elde edilen sonuçlar, kent planlaması ve çevre yönetimi açısından yol gösterici niteliktedir. Analizler sonucunda, bazı kirleticilerle COVID-19 vaka sayıları arasında istatistiksel olarak anlamlı ilişkiler saptanmış; hava kalitesi ile vaka sayılarının ilişkili olduğu gözlemlenmiştir. Öte yandan, pandemi döneminde yapılan kısıtlamaların hava kalitesinde

iyileşme sağladığı ortaya koyulmuştur. Çalışma hava kirliliğinin halk sağlığı üzerindeki etkilerini bir kez daha ortaya koymakta ve kent planlamasında hava kalitesine daha fazla önem verilmesi gerektiğini göstermektedir.

ANAHTAR KELİMELEER: Coğrafi Bilgi Sistemleri, COVID-19, Hava Kirliliği, Regresyon Analizi, Sentinel-5P

JÜRİ: Prof. Dr. Dilek KOÇ SAN

Doç. Dr. Kıvanç ERTUĞAY

Doç. Dr. Sinan LEVEND



ABSTRACT

Determining the Relationship Between Air Pollution and Urbanization and COVID-19 Using Geographic Information Systems

Ayşe SEKMEN

MSc Thesis in Department of City and Regional Planning

Supervisor: Prof. Dr. Dilek KOÇ SAN

July 2025; 104 pages

Air pollution is one of the most important environmental problems that disrupts the ecological balance and harms human health. With urbanization, the increase in population, industrialization, fossil fuel use, traffic, agriculture and harmful gases formed by unplanned urbanization accumulate in the atmosphere, reducing air quality and causing an increase in respiratory diseases. In recent years, the relationship between air pollution and respiratory diseases such as COVID-19 has increased the importance of air pollution in terms of public health. Therefore, protecting air quality is of great importance for a livable environment and healthy societies. In this thesis, the relationship between air pollution and the COVID-19 pandemic was examined by analyzing satellite data obtained through remote sensing in the Geographic Information Systems (GIS) environment.

The aim of the study was to analyze the relationship between air pollution, urbanization and COVID-19 cases using remote sensing data and GIS techniques. In the analyses conducted throughout Türkiye and specifically for five metropolitan cities (Istanbul, Ankara, Izmir, Bursa, Antalya), data on carbon monoxide (CO), sulfur dioxide (SO₂), and nitrogen dioxide (NO₂) air pollutants between 2019 and 2022 were obtained from the Sentinel-5P satellite images using Google Earth Engine (GEE) platform. Satellite data were processed as monthly averages by applying the borders of Türkiye and cloud mask and then converted into thematic maps. The CO, SO₂, NO₂ data obtained from air quality monitoring stations of the Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change and satellite data were compared. COVID-19 case data were examined by converting weekly-based data from 2021 to monthly data and performing graphical analyzes, and multiple regression analysis was performed to see the relationship between the received data and the satellite data of five metropolitan cities. Station data for five metropolitan cities were compared with satellite data corresponding to the same points, and thus the consistency between the two data sources was analyzed. Urban settlement areas and thermal power plant data were spatially mapped and evaluated together with satellite images. The relationships between socio-spatial variables such as organized industrial zone (OSB) areas, thermal power plants, and population and COVID-19 cases were examined. These findings show that air pollution is not only an environmental problem but also important for public health. The obtained results are guiding in terms of urban planning and environmental management. As a result of the analysis, statistically significant relationships were determined between some pollutants and the number of COVID-19 cases; it was observed that the cases were related to poor air quality. On the other hand, it has been revealed that restrictions imposed during the pandemic have led

to improvements in air quality. The study once again reveals the effects of air pollution on public health and shows that more importance should be given to air quality in urban planning.

KEYWORDS: Air Pollution, COVID-19, Geographic Information Systems, Regression Analysis, Sentinel-5P

COMMITTEE: Prof. Dr. Dilek KOÇ SAN

Assoc. Prof. Dr. Kıvanç ERTUĞAY

Assoc. Prof. Dr. Sinan LEVEND



ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının hazırlanmasında bilgi birikimi, rehberliği ve her zaman desteğiyle bana yol gösteren değerli danışman hocam Prof. Dr. Dilek KOÇ SAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan, yaşamımda her zaman ışığım olan sevgili anneme rahmet ve özlemle; yanımda olan aileme ve arkadaşlarıma ise sonsuz teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
AKADEMİK BEYAN	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK TARAMASI	3
2.1. Hava Kirliliği ve COVID-19 Arasındaki İlişkiyi İstasyon Verileri Kullanarak İnceleyen Çalışmalar	4
2.2. Hava Kirliliği ve COVID-19 Arasındaki İlişkiyi Uydu Verileri Kullanarak İnceleyen Çalışmalar	6
2.3. Hava Kirliliği ve COVID-19 Arasındaki İlişkiyi Kentsel Dinamikler Açısından İnceleyen Çalışmalar.....	9
2.4. Hava Kirliliği ve COVID-19 Arasındaki İlişkiyle İlgili Türkiye’de Yapılan Çalışmalar	11
2.5. Hava Kirliletiçi Parametreler	13
2.5.1. Karbonmonoksit (CO).....	13
2.5.2. Kükürtdioksit (SO ₂).....	14
2.5.3. Azot dioksit (NO ₂)	14
3. MATERYAL VE METOT	16
3.1. Çalışma Alanı.....	16
3.2. Veri Setleri	19
3.2.1. Sentinel-5P Uydu Verileri	19
3.2.2. Hava Kalitesi Ölçüm İstasyonu Verileri	20
3.2.3. Nüfus verileri	24
3.2.4. Yerleşim alanları	26
3.2.5. Termik santraller	28

3.2.6. Organize sanayi (OSB) ve endüstri bölgeleri	28
3.3. Yöntem.....	32
3.3.1. Türkiye genelinde uydu verileri analizi.....	35
3.3.2. Türkiye COVID-19 vaka verileri.....	36
3.2.3. Türkiye geneli sosyo-mekansal analizler	37
3.2.4. Beş büyükşehir özelinde uydu verileri analizi.....	38
3.2.5. Beş büyükşehir özelinde hava kalitesi istasyon analizleri.....	38
3.2.6. Doğrusal regresyon analizi	39
3.2.7. Çoklu regresyon analizi.....	40
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	42
4.1. Uydu Görüntüleri	42
4.1.1. CO uydu görüntüleri	42
4.1.2. SO ₂ uydu görüntüleri.....	50
4.1.3. NO ₂ uydu görüntüleri	58
4.2. Uydu ve İstasyon Verileri Karşılaştırması	66
4.2.1. CO uydu ve istasyon verileri karşılaştırması	66
4.2.2. SO ₂ uydu ve istasyon verileri karşılaştırması	68
4.2.3. NO ₂ uydu ve istasyon karşılaştırması.....	70
4.3. COVID-19 Vakaları	73
4.4. Regresyon Analizleri	75
4.4.1. CO uydu-istasyon doğrusal regresyon analizi	75
4.4.2. NO ₂ uydu-istasyon doğrusal regresyon analizi.....	76
4.4.3. SO ₂ uydu-istasyon doğrusal regresyon analizi	77
4.4.4. Çoklu regresyon analizi.....	79
4.5. Sosyo-Mekansal Analizler	80
4.5.1. Türkiye yerleşim alanları ile CO, SO ₂ ve NO ₂ ilişkisi	80
4.5.2. Türkiye termik santraller ile CO, SO ₂ ve NO ₂ ilişkisi.....	82
4.5.3. Beş büyükşehir kent yerleşim alanları ile CO, SO ₂ ve NO ₂ ilişkisi	83
4.5.4. Beş büyükşehir OSB bölgeleri ile CO, SO ₂ ve NO ₂ ilişkisi	87
4.5.5. Sosyo-ekonomik gelişmişlik ile COVID-19 vakalarının mekansal dağılımı arasındaki ilişki.....	93
5. SONUÇLAR	96

6. KAYNAKLAR.....	98
ÖZGEÇMİŞ	



AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Hava Kirliliği ve Kentleşme ile COVID-19 İlişkisinin Coğrafi Bilgi Sistemleri Kullanılarak Belirlenmesi” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

01/07/2025

Ayşe SEKMEN



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

B0 (Beta sıfır)	Regresyon modelindeki sabit terimi
B1(Beta bir)	Birinci hava kirletici değişkenin regresyon katsayısı
B2 (Beta iki)	İkinci hava kirletici değişkenin regresyon katsayısı
B3 (Beta üç)	Üçüncü hava kirletici değişkenin regresyon katsayısı
ϵ (Epsilon)	Hata terimini temsil eder
R^2 (R kare)	Belirleme katsayısı

Kısaltmalar

AB	Avrupa Birliği
ADNKS	Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi
AİKİİ	Otomatik Hava Kalitesi İzleme İstasyonu
AOD	Aerosol Optik Derinliği (Aerosol Optical Depth)
CAFE	Avrupa Temiz Hava Politikası (Clean Air for Europe)
CBS	Coğrafi Bilgi Sistemleri
CO	Karbonmonoksit
CRP	C-Reaktif Protein
ÇŞİDB	T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı
DSÖ	Dünya Sağlık Örgütü
ESA	Avrupa Uzay Ajansı (European Space Agency)
GAM	Genelleştirilmiş Katkı Modeli (Generalized Additive Model)
GEE	Google Earth Engine
HKİ	Hava Kalitesi İndeksi
NASA	Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (National Aeronautics and Space Administration)
NDVI	Normalize Fark Bitki İndeksi (Normalized Difference Vegetation Index)
NO ₂	Azot Dioksit
O ₃	Ozon
OSB	Organize Sanayi Bölgesi
PM _{2.5}	2.5 mikrometreden küçük partikül madde
SO ₂	Kükürt Dioksit
TROPOMI	Troposferik İzleyici: Sentinel-5P uydusundaki hava kalitesi ölçüm cihazı
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu
UHKA	Ulusal Hava Kalitesi Ağı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. İnsan Faaliyetlerine Bağlı Başlıca Hava Kirliliği Kaynakları	13
Şekil 3.1. (a) Seçilen çalışma alanının dünya haritasındaki konumu, (b) Beş büyükşehir özelinde çalışılan İstanbul, Ankara, İzmir, Bursa, Antalya şehirleri ve Türkiye haritasındaki konumları.....	16
Şekil 3.2. Türkiye Nüfus Dağılımı ve Yoğunluk Haritası	24
Şekil 3.3. Türkiye Yerleşim Alanları.....	26
Şekil 3.4. Beş Büyükşehir ((a) İstanbul, (b) Ankara, (c) İzmir, (d) Bursa, (e) Antalya) Yerleşim Alanları.....	27
Şekil 3.5. Türkiye Termik Santraller Haritası	28
Şekil 3.6. Türkiye Organize Sanayi Bölgeleri	29
Şekil 3.7. Türkiye Endüstri Bölgeleri	29
Şekil 3.8. Beş Büyükşehir ((a)İstanbul, (b) Ankara, (c) İzmir, (d) Bursa, (e)Antalya) Sanayi ve Endüstri Alanları.....	30
Şekil 3.9. Tez Çalışmasının İş-Akış Şeması	34
Şekil 4.1. Türkiye 2019-2020 yılları Ocak-Şubat-Mart-Nisan ayları CO Aylık Ortalama Görüntüleri	44
Şekil 4.2. Türkiye 2019-2020 Mayıs, Haziran, Temmuz, Ağustos Ayları CO Aylık Ortalama Görüntüleri.....	45
Şekil 4.3. Türkiye 2019-2020 yılları Mayıs, Haziran, Temmuz, Ağustos ayları CO Aylık Ortalama Görüntüleri	46
Şekil 4.4 Türkiye 2021-2022 yılları Ocak-Şubat-Mart-Nisan ayları CO Aylık Ortalama Görüntüleri	47
Şekil 4.5. Türkiye 2021-2022 yılları Mayıs, Haziran, Temmuz, Ağustos ayları CO Ortalama Görüntüleri.....	48
Şekil 4.6. Türkiye 2021-2022 yılları Eylül, Ekim, Kasım, Aralık ayları CO Ortalama Görüntüleri	49
Şekil 4.7. Türkiye 2019-2020 yılları Ocak, Şubat, Mart, Nisan ayları SO ₂ Ortalama Görüntüleri	52
Şekil 4.8. Türkiye 2019-2020 yılları Mayıs, Haziran, Temmuz, Ağustos ayları SO ₂ Ortalama Görüntüleri.....	53

Şekil 4.9. Türkiye 2019-2020 yılları Eylül, Ekim, Kasım ayları SO ₂ Ortalama Görüntüleri	54
Şekil 4.10. Türkiye 2021-2022 yılları Ocak, Şubat, Mart, Nisan ayları SO ₂ Ortalama Görüntüleri	55
Şekil 4.11. Türkiye 2021-2022 yılları Mayıs, Haziran, Temmuz, Ağustos ayları SO ₂ Ortalama Görüntüleri.....	56
Şekil 4.12. Türkiye 2021-2022 yılları Eylül, Ekim, Kasım ayları SO ₂ Ortalama Görüntüleri	57
Şekil 4.13. Türkiye 2019-2020 yılları Ocak, Şubat, Mart, Nisan ayları NO ₂ Ortalama Görüntüleri	60
Şekil 4.14. Türkiye 2019-2020 yılları Mayıs, Haziran, Temmuz, Ağustos ayları NO ₂ Ortalama Görüntüleri.....	61
Şekil 4.15. Türkiye 2019-2020 yılları Eylül, Ekim, Kasım, Aralık ayları NO ₂ Ortalama Görüntüleri	62
Şekil 4.16. Türkiye 2021-2022 yılları Ocak, Şubat, Mart, Nisan ayları NO ₂ Ortalama Görüntüleri	63
Şekil 4.17. Türkiye 2021-2022 yılları Mayıs, Haziran, Temmuz, Ağustos ayları NO ₂ Ortalama Görüntüleri.....	64
Şekil 4.18. Türkiye 2021-2022 yılları Eylül, Ekim, Kasım, Aralık ayları NO ₂ Ortalama Görüntüleri	65
Şekil 4.19. Türkiye 2022 CO Uydu-İstasyon Analizi	75
Şekil 4.20. Türkiye 2022 NO ₂ Uydu-İstasyon Analizi	77
Şekil 4.21. Türkiye 2022 SO ₂ Uydu-İstasyon Analizi.....	78
Şekil 4.22. Türkiye CO 2022 Uydu Görüntüsü ve Kent Yerleşim Alanı	81
Şekil 4.23. Türkiye SO ₂ 2022 Uydu Görüntüsü ve Kent Yerleşim Alanı	81
Şekil 4.24. Türkiye NO ₂ 2022 Uydu Görüntüsü ve Kent Yerleşim Alanı.....	81
Şekil 4.25. Türkiye CO 2022 Uydu Görüntüsü ve Termik Santral Alanları	82
Şekil 4.26. Türkiye SO ₂ 2022 Uydu Görüntüsü ve Termik Santral Alanları.....	82
Şekil 4.27. Türkiye NO ₂ 2022 Uydu Görüntüsü ve Termik Santral Alanları	83
Şekil 4.28. Uydu Görüntüleri (a, b, c, d, e) ile Kent Yerleşim Alanları	84
Şekil 4.29. SO ₂ Uydu Görüntüleri (a, b, c, d, e) ile Kent Yerleşim Alanları	85

Şekil 4.30. NO ₂ Uydu Görüntüleri (a, b, c, d, e) ile Kent Yerleşim Alanlar	87
Şekil 4.31. CO Uydu Görüntüleri (a, b, c, d, e) ile OSB Bölgeleri	89
Şekil 4.32. SO ₂ Görüntüleri (a, b, c, d, e) ile OSB Bölgeleri.....	91
Şekil 4.33. NO ₂ Uydu Görüntüleri (a, b, c, d, e) ile OSB Bölgeleri.....	93
Şekil 4.34. Sosyo-Ekonomik Gelişmişlik İl Endeksi 2017.....	94
Şekil 4.35. COVID-19 Vaka Haritası 2021	95



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.2. Literatürde Uydu Verileri ile Yapılan Literatür Çalışmaları	7
Çizelge 2.3. COVID-19 Pandemisinin Çevre ve Halk Sağlığı Üzerindeki Etkilerini İnceleyen Çalışmalar.....	9
Çizelge 2.4. Türkiye’de Yapılan Çalışmalar.....	11
Çizelge 2.5. Hava Kirleticileri ve Sağlık Etkisi	15
Çizelge 3.1. Türkiye Geneline 2019–2022 Yılları Arasındaki Toplam Nüfus Değişimi	17
Çizelge 3.2. 2022 Verilerine Göre Türkiye’de En Fazla Nüfusa Sahip On Şehir.....	17
Çizelge 3.3. Veri Setleri Tablosu	18
Çizelge 3.4. TROPOMI Sensörünün Spektral Bantları, Kapsadığı Kirleticiler ve Çözünürlükler	19
Çizelge 3.5. Türkiye Hava Kalitesi İzleme Sistemi Verileri.....	20
Çizelge 3.6. EPA Standartlarına Göre Uyarlanan Ulusal Hava Kalitesi İndeksi	21
Çizelge 3.7. DSÖ 2005 ve 2021 Yılı Hava Kalitesi Yıllık Ortalamaları.....	22
Çizelge 3.8. Hava Kalitesi Sınır Değerleri.....	23
Çizelge 3.9. İstanbul 2019-2022 Yılları Nüfus Verileri.....	24
Çizelge 3.10. Ankara 2019-2022 Yılları Nüfus Verileri	25
Çizelge 3.11. İzmir 2019-2022 Yılları Nüfus Verileri	25
Çizelge 3.12. Bursa 2019-2022 Yılları Nüfus Verileri.....	25
Çizelge 3.13. Antalya 2019-2022 Yılları Nüfus Verileri.....	25
Çizelge 3.14. Sanayi Türlerinin Beş Büyükşehir Üzerindeki Etkisi	31
Çizelge 3.15. Türkiye’de COVID-19 Pandemisi Kapanma ve Kısıtlama Dönemleri....	36
Çizelge 4.1. Türkiye 2019-2020-2021-2022 Yılları CO Aylık Ortalamaları	43
Çizelge 4.2. Türkiye 2019-2020-2021-2022 Yılları SO ₂ Aylık Ortalamaları.....	51
Çizelge 4.3. Türkiye 2019-2020-2021-2022 Yılları NO ₂ Aylık Ortalamaları	59
Çizelge 4.4. Ümraniye, Başakşehir, Sıhhiye, Bornova, Kepez İstasyonlarının CO	

Uydu ve İstasyon Karşılaştırması	67
Çizelge 4.5. Ümraniye, Başakşehir, Sıhhiye, Bornova, Kepez İstasyonlarının SO ₂	
Uydu ve İstasyon Karşılaştırması	69
Çizelge 4.6. Ümraniye, Başakşehir, Sıhhiye, Bahçelievler, Bornova, Kepez	
İstasyonlarının NO ₂ Uydu ve İstasyon Karşılaştırması.....	71
Çizelge 4.7. Türkiye 2021 COVID Vakaları Yıllık Ortalaması.....	73
Çizelge 4.8. Beş Büyükşehir (a, b, c, d, e) 2021 Aylık COVID Vakaları	74
Çizelge 4.9. CO Uydu-İstasyon Regresyon İstatistikleri.....	76
Çizelge 4.10. NO ₂ Uydu-İstasyon Regresyon İstatistikleri.....	77
Çizelge 4.11. SO ₂ Uydu-İstasyon Regresyon İstatistikleri	78
Çizelge 4.12. Çoklu Regresyon İstatistikleri.....	79
Çizelge 4.13. Çoklu Regresyon Değişkenleri	79
Çizelge 4.14. Çoklu Regresyon Anlamlılık Tablosu.....	79

1. GİRİŞ

Hava kirliliği, 21. yüzyılda küresel ölçekte karşılaşılan en önemli çevresel tehditlerden biri haline gelmiştir. Kentleşmenin hız kazanmasıyla birlikte sanayi faaliyetleri artmakta, ulaşım ağları genişlemekte ve nüfusla birlikte enerji talebi de yükselmektedir. Bu durum, zararlı gazların atmosferdeki yoğunluğunu artırarak hava kalitesini olumsuz etkilemektedir (Gurjar vd. 2016). Dünya Sağlık Örgütüne (DSÖ) göre hava kirliliği dünya genelinde yaklaşık olarak bir yılda 7 milyon erken ölüme neden olmakta, bununla birlikte solunum yolu hastalıkları, kalp, damar yolu hastalıklarıyla da ilişkilendirilmektedir (WHO 2021). COVID-19 pandemisiyle hava kirliliğine karşı mücadele daha da önemli hale gelmiş, hava kalitesi ve solunum yolu hastalıkları arasındaki bağlantı bilimsel açıdan da tartışılmaya başlanmıştır (Coccia 2020; Bontempi 2020).

COVID-19 pandemisi, 2019 Aralık ayında Çin'in Wuhan kentinde ortaya çıkmıştır ve kısa bir sürede küresel sağlık sorununa neden olmuştur. DSÖ hastalığı 11 Mart 2020 tarihinde pandemi olarak ilan etmiştir (WHO 2020). Salgının hızla yayılmasıyla birlikte ülkelerde ekonomik, sosyal ve çevresel olumsuz etkiler ortaya çıkmıştır. Pandemi döneminde uygulanan sokağa çıkma kısıtlamaları, şehirlerarası ulaşım yasakları, eğitim ve iş hayatında değişimler yaşamı etkilemiştir. Kapanma sürecinde hava kirliliğinde görülen düşüşler insan faaliyetlerinin hava kirliliğinde ne kadar etkili olduğunu göstermiştir (Mahato vd. 2020). Pandeminin toplum sağlığı ve çevre kalitesi üzerindeki etkileri bilimsel çalışmalar açısından önemli bir araştırma alanı oluşturmuştur.

Bu tez çalışmasının temel amacı, Türkiye genelinde ve en kalabalık beş büyükşehir özelinde (İstanbul, Ankara, İzmir, Bursa, Antalya) hava kirliliği ve kentleşme ile COVID-19 vaka sayıları arasındaki ilişkiyi Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve Uzaktan Algılama tekniklerini kullanarak analiz etmektir. Bu kapsamda Sentinel-5P uydusundan elde edilen Karbonmonoksit (CO), Kükürtdioksit (SO₂) ve Azot dioksit (NO₂) gazlarına ilişkin veriler ile yer istasyonlarından elde edilen hava kalitesi ölçümleri karşılaştırılmış ve zamansal değişimleri değerlendirilmiştir. Bununla birlikte, hava kirlleticileri ile kentleşme ve termik santraller gibi sosyo-mekansal değişkenlerin COVID-19'un yayılımına olan etkisi analiz edilmiştir.

Bu çalışma 2019–2022 yılları arasındaki dört yıllık bir dönemi kapsamaktadır. Çalışmada hem Türkiye genelinde hem de kent ölçeğinde analizler gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada Türkiye genelindeki hava kirliliği, COVID-19 vaka verileri analiz edilmiş ve sosyo-mekansal ilişkileri incelenmiştir. İkinci aşamada beş büyükşehir özelinde seçilen hava kalitesi istasyon noktalarıyla analizler yapılmıştır, seçilen noktalardan alınan veriler ile uydu verileri karşılaştırılmış ve bu noktalarda doğrusal regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Beş büyükşehir 2021 yılı COVID-19 verileri ile uydu görüntülerinin il ortalamaları alınarak çoklu regresyon analizi yapılmıştır. Çalışmada ayrıca Organize Sanayi Bölgeleri (OSB), termik santraller, kentleşme yerleri gibi kirlletici kaynaklar ile Sentinel5-P'den alınan CO, SO₂, NO₂ değerlerinin uydu görüntüleri birlikte değerlendirilmiştir.

COVID-19 pandemisi sürecinde hava kalitesinde gözlemlenen değişimlerin, insan hareketliliğinin azalmasıyla birlikte kısa vadede olumlu etkiler doğurduğu bilinmektedir. Ancak bu süreç, hava kirliliğinin insan sağlığı üzerindeki etkilerinin ne denli önemli olduğunu da ortaya koymuştur. Bu tezde, Sentinel-5P uydu verileri ile yer istasyonu verileri karşılaştırılarak doğruluk değerlendirmesi yapılmış ve bu sayede hava kirliliği analizlerinde daha güvenilir ve kapsamlı sonuçlara ulaşılması hedeflenmiştir. Aynı zamanda çevresel verilerin mekansal analizinin yapılması, çevre planlaması ve halk sağlığı politikalarına veri temelli katkılar sunması açısından önem taşımaktadır.

Literatürde yapılan birçok çalışmada COVID-19 pandemisi sokağa çıkma yasakları, sanayi faaliyetlerinin azalması, ulaşım hizmetlerinin azalmasıyla hava kalitesinde meydana gelen değişimler incelenmiş ve genellikle “pandemi hava kalitesini nasıl etkiledi?” sorusuna cevap aranmıştır. Bu tez çalışmasında ise hava kalitesi ve kentleşme düzeyinin COVID-19 vaka sayıları üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Hava kalitesi bu çalışmada bir sonuç değil, COVID-19’un yayılımını etkileyen temel değişkenlerden biri olarak ele alınmıştır. Özellikle kapanma dönemlerinde hava kalitesindeki iyileşmenin farklı mekanlardaki vaka dağılımlarıyla nasıl ilişkilendiği araştırılmıştır. Bu yönüyle tez çalışması literatüre özgün bir katkı sunmaktadır.

Çalışmanın ilk bölümü olan giriş bölümünde, çalışmanın amacı, önemi ve kapsamı açıklanmıştır.

İkinci bölüm olan kaynak taraması bölümünde, hava kirliliği ve COVID-19 arasındaki uydu verileri ile yapılan çalışmalar, hava kirliliği ve COVID-19 arasındaki hava kalitesi istasyon verileri ile yapılan çalışmalar, COVID-19 hava kirliliği ve kentsel dinamikler üzerine yapılan çalışmalar, hava kirliliği ve COVID-19 Türkiye’de yapılan çalışmalar, hava kirlileti parametreler ele alınmış; bu konularla ilgili ulusal ve uluslararası seçilmiş örnek çalışmalar literatür taraması kapsamında detaylı olarak incelenmiştir.

Materyal ve yöntem bölümünde, çalışma kapsamında değerlendirilen Türkiye geneli ve beş büyükşehir için kullanılan uydu verileri, istasyon verileri, COVID-19 vaka verileri ve diğer yardımcı veri setleri tanıtılmış; bu verilerin hangi kaynaklardan elde edildiği ve hangi analiz tekniklerinin kullanıldığı detaylandırılmıştır ve regresyon analiz yöntemleri açıklanmıştır.

Bulgular ve tartışma bölümünde, elde edilen analiz sonuçları yorumlanmış; hava kirliliği değişimleri ile COVID-19 vaka yoğunluğu, sanayi bölgeleri, nüfus yoğunluğu gibi değişkenler arasındaki ilişkiler değerlendirilmiştir.

Sonuç bölümünde yapılan analizler genel olarak değerlendirilerek, elde edilen bulgular doğrultusunda çıkarımlar yapılmıştır.

2. KAYNAK TARAMASI

Hava kirliliği, insan sağlığına ve çevreye zarar verebilecek zararlı gazların veya partikül maddelerin atmosferde yoğun bir şekilde bulunması durumudur. Bu gazlar atmosferde farklı maddelerin tepkimeye girmesiyle oluşacağı gibi doğrudan kaynaklardan da salınabilir. Meteorolojik koşullar sıcaklık, rüzgâr ve nem gibi olaylar kirlenici gazların dağılımı, taşınımı ve dönüşümünde önemli faktörlerdendir (Marmara Belediyeler Birliği 2020).

Azot dioksit (NO_2), kükürtdioksit (SO_2), karbonmonoksit (CO), ozon (O_3) ve ince partikül maddeler (PM_{10} ve $\text{PM}_{2.5}$) gibi birçok kirleniciler, gözle görülmeyen veya kokusu olmayan maddeler olmalarına rağmen, özellikle solunum yolu hastalıkları ve kalp hastalarında problemler gibi ciddi sağlık sorunlarına sebep olabilmektedirler (WHO 2020).

Fosil yakıtların yakılması, ulaşım faaliyetleri, enerji üretimi, sanayi alanları, madencilik, inşaat faaliyetleri, yoğun tarımsal uygulamalar ve orman yangınları hava kirliliğine sebep olmaktadır (WHO 2020). Salgın döneminde kentte uygulanan kısıtlamalar sonucunda özellikle ulaşım ve sanayi faaliyetlerinde büyük oranda azalma olmuştur; bu durum hava kirlenici emisyonlarında geçici olsa da büyük oranda düşüş yaşanmasına sebep olmuştur (Shrestha vd. 2019).

Literatürde hava kirlenicilerinin enfeksiyon riskini artırdığı yönünde bilimsel çalışmalar bulunmaktadır. Harrod vd. (2003) tarafından yapılan çalışmada, dizel motor emisyonuna maruz kalanların solunum yolu enfeksiyon virüslerine karşı hassas oldukları gözlenmiştir. Bu çalışmadaki bulgular, Jaspers vd. (2005) tarafından yapılan diğer bir çalışmayı da doğrular niteliktedir. Çalışmada dizel egzoz partiküllerine maruz bırakılan hücrelerde influenza virüsü enfeksiyonlarının büyük oranda arttığı tespit edilmiştir. Lee vd. (2014) tarafından yapılan benzer başka bir çalışma çevresel partiküllere maruz kalmanın grip virüsüne yakalanmayı daha fazla artırdığını ortaya koymaktadır.

Bağışıklık sistemi zayıf olan bireyler, kalp, akciğer ve metabolik hastalıkları bulunan kişilerle birlikte COVID-19 açısından yüksek risk grubunda yer almaktadır (CDC 2020). Guan vd. (2020) Çin’de yaptığı çalışmada, COVID 19 hastalarından kronik solunum yolu hastalığına sahip olanlarda ciddi semptomlar ve ölüm riskinin %170 oranında arttığı, hipertansiyon ve diyabet hastalığı olanlarda bu oranın %60 olduğu, kanser hastalarında ise %250’ye ulaştığını belirtmişlerdir.

Hava kirliliği birçok hastalığın oluşmasına sebebiyet vermektedir; küresel ölçekte diyabet yükünün %18’i, akciğer kanserlerinin %14’ü, KOAH vakalarının %34’ü, iskemik kalp hastalıklarının %11’i ve inmelerin %7’sinin oluşmasına neden olmaktadır (Global Burden of Disease Collaborative Network 2017). Başka bir çalışmada Coogan vd. (2016), $\text{PM}_{2.5}$ ’a maruz kalanların hipertansiyon ile arasında olumlu ilişki olduğu ortaya koymuştur. SARS salgınının olduğu dönem için Çin’de yapılan başka bir çalışmada da hava kirliliğinin yüksek olduğu bölgelerde SARS virüsü kaynaklı ölümlerin daha fazla olduğu görülmüştür (Cui vd. 2003). Clay vd. (2018) tarafından 1918 İspanyol gribi ile ilişkili yapılan çalışmada bu ilişkiyi destekler niteliktedir ve bu çalışmada kömür kullanımının fazla olduğu Amerikan şehrinde diğer şehirlere oranla daha fazla ölüm vakası olduğu tespit edilmiştir.

Horne vd. (2018) ABD'de yürüttüğü kapsamlı bir çalışmada, hava kirlleticilerinin kısa süreli artışlarının çocuklar ve yetişkinler arasında akut solunum yolu enfeksiyonlarının görülme sıklığını artırdığı belirlenmiştir. Feng vd. (2016) tarafından Pekin'de yapılan çalışmada da hava kirliliği ile grip benzeri solunum yolu hastalıkları arasında pozitif yönde ilişki tespit edilmiştir.

Hava kirliliğinde çevresel ve toplumsal etkilere bakıldığında, sürdürülebilir kentleşme politikalarının geliştirilmesine, temiz enerji kaynaklarına geçişin hızlandırılmasına, hava kalitesinin iyileştirilmesine yönelik bütüncül stratejilerin uygulanması büyük önem taşımaktadır. Literatürde hava kirliliği ve COVID-19 ilişkisini inceleyen birçok çalışmada ağırlıklı olarak yer tabanlı hava kalitesi izleme istasyonlarından elde edilen veriler kullanılmıştır. Bu istasyon verileri, yerel düzeyde detaylı ölçümler sağlamasına rağmen mekânsal kapsam açısından sınırlılıklar taşımaktadır. Son yıllarda uzaktan algılama teknolojilerindeki gelişmeler sayesinde, özellikle Sentinel-5P gibi uydu verileri, hava kirliliğinin daha geniş alanlarda izlenmesine olanak tanımıştır. Uydu verilerinin sunduğu bu avantaj, hava kalitesinin mekânsal dağılımını daha kapsamlı bir şekilde analiz etme imkânı sunmaktadır. Bu tez çalışmasında analizlerde büyük ölçüde uydu verilerinden yararlanılmıştır ve bu veriler sosyo-mekânsal verilerle karşılaştırılmıştır. Bu yönüyle çalışma, literatüre uydu temelli mekânsal analiz yöntemiyle özgün bir katkı sunmaktadır. Dünyada ve Türkiye'de COVID-19 ile hava kirliliği arasındaki ilişkiyi ele alan çalışmalar, kullanılan veri türlerine göre sınıflandırılarak anlatılmıştır.

2.1. Hava Kirliliği ve COVID-19 Arasındaki İlişkiyi İstasyon Verileri Kullanarak İnceleyen Çalışmalar

COVID-19 pandemisi, küresel düzeyde yalnızca sağlık sistemlerini değil, aynı zamanda çevresel dinamikleri de önemli ölçüde etkilemiştir. Salgının yayılması ve etkileri, hava kalitesi üzerindeki değişimlerle birlikte çok boyutlu olarak incelenmiş; bu bağlamda farklı coğrafyalarda yürütülen araştırmalar, hava kirliliğinin COVID-19 hastalığının yayılma hızına ve şiddetine etkisini ortaya koymaya çalışmıştır. Hindistan, İtalya, Çin, ABD, Brezilya ve İspanya gibi ülkelerde yapılan çalışmalar, hava kirlleticilerine COVID-19 ile olan ilişkisini; kısıtlamaların neden olduğu geçici iyileşmeleri, sosyo ekonomik yapıların etkisini ve meteorolojik koşulların önemini kapsamlı biçimde ele almıştır. Yapılan bu çalışmalar, hava kirliliği ile solunum yolu hastalıkları arasındaki ilişkinin anlaşılması ve çevresel sürdürülebilirlik ile halk sağlığı politikalarının bütüncül şekilde değerlendirilmesi gerektiğini göstermesi bakımından büyük önem taşımaktadır. Hava kalitesi istasyonlarından alınan veriler ile yapılan literatür çalışmaları çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Hava Kalitesi İstasyonlarından Alınan Veriler ile Yapılan Literatür Çalışmaları

No	Yazarlar/Yıl	İncelenen Emisyonlar	Kullanılan Veri Türü
1	Sharma vd. (2020)	PM _{2.5} , PM ₁₀ , NO, NO ₂ CO, O ₃ , SO ₂	Yer istasyonu verileri
2	Mahato vd. (2020)	PM _{2.5} , PM ₁₀ , NO ₂ , CO O ₃	Yer istasyonu verileri
3	Zoran vd. (2020)	PM _{2.5} , PM ₁₀ , o ₃ , NO ₂	Yer istasyon verileri Yüzey hava sıcaklığı Bağıl nem Rüzgar hızı
4	Redon vd. (2022)	PM _{2.5}	Hava kalitesi istasyon verileri Meteorolojik veriler
5	Mathieu vd. (2021)	DPM (Dizel Partikül Maddesi)	Hava kalitesi istasyon verileri COVID-19 ölüm oranları
6	Costa vd. (2023)	PM _{2.5}	Düşük maliyetli sensör verileri COVID-19 vaka ve ölüm verileri
7	Si vd. (2024)	PM _{2.5} , NO ₂ , SO ₂ , CO	Hava kalitesi istasyon verileri Meteorolojik veriler

Hindistan genelinde uygulanan COVID-19 kaynaklı kısıtlamaların hava kalitesi üzerindeki etkisini Sharma vd. (2020) analiz etmiştir. 22 Şehirden elde edilen istasyon verileri kullanılarak yapılan çalışmada kısıtlamanın olduğu dönemde NO, NO₂, CO, SO₂ gazlarda ve PM_{2.5}, PM₁₀ partikül maddelerinde belirgin azalmalar gözlemlenmiştir. Bu azalmalar, özellikle ulaşım ve endüstriyel faaliyetlerin durdurulmasıyla ilişkilendirilmiştir.

Hindistan'da yapılan diğer bir çalışma Delhi üzerine odaklanan Mahato vd. (2020)'nin çalışmasıdır. Çalışma megakentte COVID-19 salgını sırasında uygulanan tam kapanma ile kısa bir kısıtlamanın ardından oluşan hava kalitesindeki iyileşme, hava kirliliğinin kontrol edilebilir olduğunu göstermiştir. Çalışmada kullanılan PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, NO₂, CO, O₃ parametreler hava kalitesi istasyon verileriyle karantina öncesi ve döneminde hava kalitesi incelenmiş ve hava kalitesinin iyileştiği görülmüştür.

İtalya'nın Milano kenti için yapılan bir çalışmada, PM_{2.5} ve PM₁₀ partiküllerinin COVID-19 vaka sayıları üzerindeki olası etkileri araştırılmıştır (Zoran vd. 2020). Bulgular, hava kirliliğinin hem solunum yolu enfeksiyonlarını artırabileceğini hem de virüsün yayılımını kolaylaştırabileceğini göstermektedir. Yapılan analizler, COVID-19 vakalarının artışı ile ortalama arazi yüzey sıcaklığı arasında pozitif bir ilişki olduğunu, bağıl nem ile ise ters yönlü bir ilişki bulunduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, günlük

ortalama partikül madde (PM) yoğunluklarının vaka artışı üzerinde güçlü bir etkisi olduğu belirlenmiştir.

İspanya’da gerçekleştirilen bir araştırma, sekiz farklı şehirde PM_{2.5} seviyeleri ile COVID-19’un yayılması arasında istatistiksel bir ilişki olup olmadığını incelemiştir. Bu çalışmada Redon vd. (2022), şehir düzeyinde yaptıkları analizlerde PM_{2.5} kirliliğinin hastalığın ilk yayılma dönemindeki etkisinin az olduğunu belirtmiş, ancak iklimsel faktörlerin daha belirgin bir rol oynayabileceğini öne sürmüşlerdir. Bu bulgu, hava kirliliği ile COVID-19 yayılması arasında her zaman doğrudan bir korelasyon olmadığını vurgulamaktadır.

ABD’de yapılan geniş kapsamlı mekânsal bir analizde, partikül maddeye uzun süreli maruziyetin COVID-19 ölümleriyle ilişkisi incelenmiştir. Mathieu vd. (2021), partikül maddesinin kronik sağlık sorunlarına neden olduğunu ve bu durumun bazı bölgelerde COVID-19’a bağlı ölüm oranlarını anlamlı düzeyde artırdığını göstermektedir. Özellikle hava kirliliği yoğunluğu yüksek olan yerlerde ölüm oranlarının daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

Bir başka çalışma ise COVID-19 ölüm oranları en yüksek olan ülkelerden Brezilya’nın Curitiba kentinde gerçekleştirilmiştir (Costa 2023). PM_{2.5} emisyonu için kentte sensörlerden alınan veriler kullanılmıştır. Costa vd. (2023), pandemi kısıtlamaları sırasında PM_{2.5} konsantrasyonlarında geçici düşüşler yaşandığını, ancak ekonomik faaliyetlerin yeniden başlamasıyla birlikte bu iyileşmenin sürdürülemediğini tespit etmiştir. COVID-19 ile kirlilik düzeyi yüksek olan kentte korelasyon değeri pozitif ilişkili olarak çıkmıştır. Kentte kirlilik trafik yoğunluğu fazla olan ve endüstriyel alanlarda fazla çıkmaktadır.

Çin’de yapılan bir çalışmada, Çin’in Yangtze Nehri üzerinde yapılan analizler ile hava kirliliği, meteorolojik koşullar ve sosyoekonomik aktiviteler arasındaki etkileşimler incelenmiştir (Si vd. 2024). Bu çalışmada yazarlar kısıtlamalara rağmen olumsuz hava koşullarının PM_{2.5} seviyelerini düşürmekte yetersiz kaldığını ve sanayi faaliyetlerinin durdurulmasının kısa vadeli olumlu etkiler yaratmakla birlikte, kalıcı bir iyileşme için yapısal dönüşümlere ihtiyaç duyulduğunu belirtmişlerdir. Bu durum, iklim koşullarının ve ekonomik yapıların çevresel kirleticiler üzerindeki etkisini bütünsel olarak değerlendirme gerekliliğini göstermektedir.

2.2. Hava Kirliliği ve COVID-19 Arasındaki İlişkiyi Uydu Verileri Kullanarak İnceleyen Çalışmalar

COVID-19 pandemisi sürecinde uygulanan sokağa çıkma yasakları ve ekonomik faaliyetlerdeki kısıtlamalar, çeşitli ülkelerde hava kalitesi üzerinde dikkat çekici değişimlere yol açmıştır. Hindistan (Bera vd. 2020; Biswas ve Ayantika 2021), İran (Mokarram vd. 2024), Çin (Zhang vd. 2023; Filonchik vd. 2020), Güney Afrika (Mokgoja vd. 2023), Brezilya (Costa vd. 2023) ve Türkiye’de yürütülen çalışmalar, uydu tabanlı gözlemlerle NO₂, SO₂, CO gibi kirleticilerin mekânsal ve zamansal değişimini analiz etmiştir. Bu çalışmalarda genellikle Sentinel-5P, TROPOMI OMI, AIRS, MERRA-2 gibi ileri uydu sistemleri ile arazi yüzey sıcaklığı, kentsel ısı adası etkisi ve

Normalize Fark Bitki-Örtüsü İndeksi (Normalized Difference Vegetation Index- NDVI) gibi çevresel değişkenler birlikte değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, özellikle kısıtlama dönemlerinde hava kalitesinde kısa vadeli iyileşmelerin yaşandığını ancak insan faaliyetlerinin yeniden artmasıyla bu iyileşmenin sürdürülebilir olmadığını göstermiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, pandemi sürecinde çevresel etkilerin takip edilmesinin ve ileride uygulanacak hava kirliliğiyle ilgili politikaların belirlenmesinin önemli olduğunu göstermektedir. Hava kirliliği ve COVID-19 arasındaki ilişkiyi uydu verileri kullanarak inceleyen çalışmalar çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Literatürde Uydu Verileri ile Yapılan Literatür Çalışmaları

No	Yazarlar/Yıl	İncelenen Emisyonlar	Kullanılan Veri Türü
1	Bera vd. (2020)	PM _{2.5} , PM ₁₀ , NO ₂ , SO ₂ CO, O ₃	Yer istasyonu verileri Landsat-7 Sentinel-5P
2	Mokarram vd. (2023)	PM _{2.5} , NO ₂ , CO, SO ₂	Uydu görüntüleri Uzaktan algılama verileri; Yüzey sıcaklığı NDVI, NDVB
3	Zhang vd. (2023)	NO ₂	Sentinel-5P uydu verileri Yer istasyonu verileri
4	Sari & Kuncoro (2021)	CO, NO ₂ , SO ₂	Sentinel-5P uydu Yer istasyonu verileri
5	Filonchik vd. (2020)	SO ₂ , NO ₂ , CO	Sentinel-5P uydu verileri
6	Mokgoja vd. (2023)	CO, SO ₂ , NO ₂	Sentinel-5P uydu verileri
7	Hassan vd. (2021)	NO ₂	Sentinel-5P uydu verileri Tropomi aleti
8	Biswas ve Ayantika (2021)	NO ₂ , AOD, SO ₂	Sentinel-5P uydu verileri

Hindistan'ın Kolkata kenti için yapılan çalışmada COVID-19 karantinası sürecinde uygulanan sokağa çıkma yasaklarının hava kalitesine olan etkisi, pandemi öncesi ve pandemi sürecindeki hava kalitesi değerlendirilerek incelenmiş ve uzun vadeli planlar önerilmiştir (Bera vd. 2020). Çalışmada PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂, SO₂ ve CO parametreleri kullanılmıştır. Çalışmada, Sentinel-5P’den veriler alınmış, ayrıca seçilen yer istasyon verileri kullanılmıştır. Landsat 8 ve Landsat 7 görüntülerinden arazi yüzey sıcaklığı haritaları oluşturulmuştur. Çalışmada NO₂ ve aerosol verileri ESA ve NASA’dan alınmıştır. Çalışmanın sonucunda CO, NO₂ kirleticilerinde önemli ölçüde azalma olduğu tespit edilmiştir (Bera vd. 2020).

Mokarram vd. (2024) İran'da yaptıkları çalışmada COVID-19 salgınının başlangıcından önce ve sonrasında hava kalitesindeki değişimleri incelemişlerdir. Bu çalışmada uydu görüntüleri ile mevsimsel analizler yapılmış, aynı zamanda yüzey sıcaklığı, NDVI, kentsel ısı adası verileri de kullanılarak hava kirliliği değerlendirilmiştir. Çalışmanın sonucunda araç trafiği ve endüstriyel faaliyetlerde azalma nedeniyle kirlilik seviyesinde azalma görülmüştür (Mokarram vd. 2024).

Zhang vd. (2023) tarafından Wuhan örneği üzerinden yürütülen çalışmada, pandemi sürecinde NO₂ ve CO₂ emisyonlarının uydu verileriyle günlük verilerin hesaplandığı görülmektedir. Bu çalışmada, karantina önlemlerinin emisyonları %60 oranında düşürdüğü belirlenmiş ve bu düşüşün insan kaynaklı etkileri ortaya konulmuştur. Benzer şekilde, Zhang vd. (2021), NO₂ seviyeleri ile hükümet politikalarının sıklığı arasındaki ilişkiyi küresel ölçekte değerlendirmiş ve sıkı önlemlerin olduğu bölgelerde kirletici gazlarda ciddi düşüşler olduğunu ortaya koymuştur.

Sari ve Kuncoro (2021), İran'da COVID-19 pandemisinin hava kalitesini nasıl etkilediğini, COVID öncesi ve sırasındaki değişimleri incelemişlerdir. Çalışmada Sentinel-5P uydusu aracılığıyla CO, NO₂ ve SO₂ seviyeleri izlenmiş, kirlilik seviyelerinin zamansal ve mekânsal dağılım analizi yapılmış ve yüksek nüfuslu bölgelerde kirlilik düzeyinin daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Bu kirleticilerin yoğunluğunun sanayi faaliyetlerinin azaldığı dönemlerde önemli ölçüde düştüğü saptanmıştır. Bu sonuç, farklı ülkelerde benzer sonuçların elde edildiğini desteklemektedir. Örneğin, Güney Asya ülkelerinde uydu görüntüleri kullanılarak yapılan bir diğer araştırmada (Hassan vd. 2021), COVID-19 kısıtlamaları sırasında NO₂ seviyelerinde genel bir azalma saptanmıştır.

Filonchik vd. (2020), Doğu Çin üzerinde gerçekleştirdikleri çalışmada SO₂, NO₂ ve CO kirleticilerinin yanı sıra aerosol optik derinliği (AOD) değerlerini de değerlendirmiştir. Bulgular, karantinaların uygulandığı dönemlerde hava kalitesinde genel olarak kısa süreli iyileşme olduğunu göstermiştir. Ancak daha sonra kömür termik santrallerin çalışmaları başlayınca hava kalitesinin eski haline dönmeye başladığı görülmüştür. Hindistan özelinde yapılan bir diğer çalışmada (Biswas ve Ayantika 2021) en kalabalık altı şehir incelenmiş, emisyon gazlarında ve aerosol seviyelerinde COVID-19 öncesi ve sırasında kayda değer düşüşler tespit edilmiş, özellikle SO₂ ve NO₂ değerlerinde pandemi öncesi dönemle kıyaslandığında önemli farklar olduğu belirlenmiştir. En yüksek değerler de termik santraller ve şehirlerden gelen otomobil emisyonlarından kaynaklanmıştır.

Mokgoja vd. (2023) tarafından Afrika kıtasında, Durban kentinde yapılan çalışmada, TROPOMI, AIRS, OMI ve MERRA-2 uydu verileri birlikte kullanılarak COVID-19'un hava kirleticileri üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, NO₂ ve CO seviyelerinde karantina sürecinde belirgin düşüşler olduğunu ortaya koymuştur. Fakat bu düşüşler kısa süreli olmaktadır. Pandemi kalktıktan sonra tekrar yükselme olabileceği öngörülmektedir. Bununla birlikte, bazı araştırmalar bu düşüşlerin kalıcı olmadığına ve insan hareketliliğinin yeniden artmasıyla birlikte kirletici seviyelerinin kısa sürede eski düzeyine yaklaştığına dikkat çekmektedir (Filonchik vd. 2020; Zhang vd. 2023). Bu bağlamda, pandeminin hava kalitesi üzerindeki etkilerinin geçici olduğu ve uzun vadeli çevresel kazanımlar için yapısal değişimlerin gerekliliği öne çıkmaktadır.

2.3. Hava Kirliliği ve COVID-19 Arasındaki İlişkiyi Kentsel Dinamikler Açısından İnceleyen Çalışmalar

COVID-19 pandemisi sadece sağlık sistemlerini değil aynı zamanda çevresel, iklimsel ve sosyo-ekonomik sistemleri de etkilemektedir. Pandeminin hava kalitesi, kentsel yayılımı, çevresel ve biyolojik etkileri gibi çok boyutlu sonuçları oluşmaktadır. Çin (Sharifi vd. 2020; Xie ve Zhu 2020), İtalya (Conticini vd. 2020) ve Brezilya'da (Barreto vd. 2021) gerçekleştirilen küresel ölçekli çalışmalar; COVID-19 pandemisi ile sosyo-ekonomik farklılıklar, ölüm oranları, sıcaklık ve çevresel faktörler arasındaki ilişkiyi incelemiş; bu değişkenlerin hastalığın yayılımı ve şiddeti üzerindeki etkilerini ortaya koymuştur. Bu kapsamda literatür, sürdürülebilir kentsel politikaların ve çevresel eşitliğin önemini vurgulamaktadır. Hava kirliliği ve COVID-19 pandemisi arasındaki ilişkiyi kentsel dinamikler açısından inceleyen çalışmalar çizelge 2.3'te verilmiştir.

Çizelge 2.3. COVID-19 Pandemisinin Çevre ve Halk Sağlığı Üzerindeki Etkilerini İnceleyen Çalışmalar

No	Yazarlar/Yıl	İncelenen Emisyonlar	Kullanılan Veri Türü
1	Sharifi ve Khavarian-Garmsir (2020)	Genel hava kalitesi ve kentsel çevresel etkiler	İkincil veriler; Sosyoekonomik Ulaşım ve kentsel tasarım Yönetim ve yönetişim
2	Conticini vd. (2020)	Genel hava kirliliği düzeyleri	Epidemiyolojik veriler; COVID-19 verileri Ölüm verileri
3	Zeng vd. (2020)	İnflamatuar belirteçler (CRP, IL-6, PCT, ESR)	Klinik veriler; Hasta vakaları İnflamatuar belirteçleri
4	Xie ve Zhu 2020	Ortam sıcaklığı COVID-19 vaka sayısı ilişkisi	Meteorolojik faktörler; Sıcaklık ölçümleri Vakalar
5	Barreto vd. (2021)	PM _{2.5} (dolaylı)	COVID-19 vaka verileri Sosyo-Ekonomik göstergeler

Sharifi ve Khavarian-Garmsir (2020) şehirlerdeki yüksek nüfus ve yoğunluğa bakıldığında COVID-19 pandemisi için incelenmesi gereken ilk yer olarak görülen Çin'in Wuhan kentinde pandemi başlangıcı ve dönemi süresini incelemişlerdir. Pandeminin hava kalitesine olumlu etkilerini vurgularken, bu süreçte elde edilen çevresel katkıların sürdürülebilir kent politikaları ile devam ettirilmesi gerektiğini savunmuştur.

Conticini vd. (2020) tarafından Kuzey İtalya için yapılan çalışmada hava kirliliğinin, özellikle PM_{2.5} ve NO₂ gibi kirleticilerin, COVID-19'un ölüm oranlarıyla ilişkisi incelenmiştir. Conticini vd. (2020), bu bölgede yüksek hava kirliliği seviyelerinin akut solunum yollarını zayıflattığını ve böylece enfeksiyonun daha ölümcül seyretmesine neden olabileceğini belirtmişlerdir. Çalışmada, hava kirliliğine uzun süreli maruziyetin COVID-19'un şiddetini artırabileceği sonucuna varılmıştır.

Zeng vd. (2020) tarafından gerçekleştirilen meta-analiz çalışmasında COVID-19 salgınının başka bir boyutu ele alınmıştır. COVID-19'un şiddeti ile inflamatuvar belirteçler (IL-6, CRP, PCT vb.) arasındaki ilişki incelenmiştir. Hava kirliliğinin bu belirteçleri artırıcı etkisi olduğu ve dolayısıyla COVID-19 pandemisinde virüsün artmasına neden olabileceği öne sürülmüştür. Bu çalışma, doğrudan hava kirliliği verileri kullanmasa da biyolojik etkiler üzerinden çevresel faktörlerin hastalık şiddeti ile ilişkisini desteklemektedir.

Xie ve Zhu (2020) tarafından yapılan çalışmada Çin'in 122 şehrinde ortam sıcaklığı ile COVID-19 vaka sayıları arasındaki ilişki analiz edilirken genelleştirilmiş katkı modeli uygulanmıştır. Uygulama sonucunda sıcaklık değeri 3 derecenin altında olduğunda grafiğin doğrusal olduğunu, 3 derecenin üstüne çıktığında grafiğin düzleştiğini göstermektedir. Bu çalışma sıcaklık arttığında COVID-19 azalır ifadesinin doğru olmadığını göstermekle birlikte sadece sıcaklık değil, çevresel koşulların da birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Barreto vd. (2021) tarafından Brezilya'nın Paulo şehrinde gerçekleştirilen çalışmada, hücresel otomata ve coğrafi bilgi sistemleri kullanılarak COVID-19'un mekânsal yayılımı analiz edilmiştir. Çalışma COVID-19'un sosyo-ekonomik alanda karmaşık kentsel ortamlarda nasıl yayıldığını analiz etmektedir. Çalışma sonuçları düşük gelirli bölgelerde daha yüksek vaka yoğunlukları olduğunu ve bu alanlarda aynı zamanda hava kirliliğinin daha fazla olduğunu göstermiştir. Çalışmanın sonucu, çevresel adalet ve eşitsizlik konularının pandemi bağlamında ne kadar önemli olduğunu göstermektedir.

Farklı ülkelerde yapılan bu çalışmalar, kent planlamasının yalnızca fiziksel altyapı değil, aynı zamanda sağlık ve çevre faktörlerini de gözetmesi gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır. Pandemi sürecinde elde edilen bu bulgular, gelecekte daha dirençli ve sağlıklı kentler inşa edebilmek için önemli yol gösterici olmaktadır.

2.4. Hava Kirliliği ve COVID-19 Arasındaki İlişkiyle İlgili Türkiye’de Yapılan Çalışmalar

COVID-19 pandemisi süresince uygulanan karantina ve kısıtlamalar hava kalitesinde önemli değişimlere yol açmıştır. Türkiye’de yapılan çeşitli çalışmalar, özellikle ulaşım ve sanayi faaliyetlerinin azalmasıyla birlikte NO₂, SO₂, CO, O₃ ve PM₁₀ gibi kirleticilerin yoğunluklarında dikkate değer düşüşler yaşandığını göstermektedir. Yer istasyonu verileri ile uydu tabanlı uzaktan algılama tekniklerinin birlikte kullanıldığı bu araştırmalar, insan kaynaklı emisyonların hava kirliliği üzerindeki etkisini ortaya koymakta ve pandemi sürecinde hava kalitesinde meydana gelen değişimleri değerlendirmektedir. Hava kirliliği ve COVID-19 arasındaki ilişkiyle ilgili Türkiye’de yapılan çalışmalar çizelge 2.4’te verilmiştir.

Çizelge 2.4. Türkiye’de Yapılan Çalışmalar

No	Yazarlar/Yıl	İncelenen Emisyon	Kullanılan Veri Türü
1	Sünsülü ve Kalkan (2022)	O ₂	Sentinel-5P uydu verileri Hava kalitesi istasyon verileri
2	Mete vd. (2022)	PM ₁₀ , SO ₂ , CO, NO NO ₂ , O ₃	Hava kalitesi istasyon verileri
3	Çalık vd. (2024)	PM ₁₀ , SO ₂ , CO NO, NO ₂ , O ₃	Hava kalitesi istasyon verileri
4	Ghasempour vd. (2021)	SO ₂ , NO ₂ , AOD	Sentinel-5P uydu verileri Hava kalitesi istasyon verileri
5	Matcı vd. (2022)	SO ₂ , NO ₂ , CO, O ₃ CH ₄	Sentinel-5P uydu verileri

Sünsülü ve Kalkan (2022) COVID-19 pandemisinin yaşandığı 2019, 2020 ve 2021 yılları arasında Sentinel-5P uydu verileri kullanarak Marmara bölgesinin NO₂ düzeyi analizini yapmışlardır. Çalışmada yer istasyonlarıyla alınan veriler ile uydu verileri karşılaştırılmış ve karşılaştırıldığında yüksek düzeyde korelasyon tespit edilmiştir. Bu bulgu, Sentinel-5P uydu görüntülerinin hava kirliliği izleme çalışmalarında güvenli ve etkin bir araç olduğunu göstermiştir. Ayrıca pandemi döneminde uygulanan kısıtlamaların, fosil yakıt kullanımını azalmasına bağlı olarak hava kalitesini olumlu yönde etkilediği sonucuna da varılmıştır.

Hava kirliliği öncelikle insan sağlığı üzerinde, ekosistemde, çevre ve iklim üzerinde olumsuz durumlara yol açan çevresel ve sosyal bir sorun olarak

değerlendirilmektedir. Mete vd. (2022) tarafından Adana için yapılan çalışmada, COVID-19 pandemisi sebebiyle getirilen kısıtlamalarda uygulanan önemlerin hava kirliliği üzerindeki etkileri analiz edilerek incelenmiştir. Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığından alınan istasyon verilerinden Akdeniz İstasyonundan elde edilen 1 Mart–1 Mayıs 2019 ve 2020 tarihleri arasındaki günlük hava kirliliği parametreleri karşılaştırılmıştır. Pandemi sürecinde alınan önlemler sonucu insan hareketliliğinin azalmasına bağlı olarak hava kirleticilerinde belirli zamanlarda düşüşler görülmüştür. Sonuçlar, hava kirliliğine neden olan emisyonların büyük ölçüde insan kaynaklı olduğunu bireysel ve kamusal hareketliliğin azaltılmasının hava kalitesini önemli ölçüde iyileştirdiğini ortaya koymaktadır.

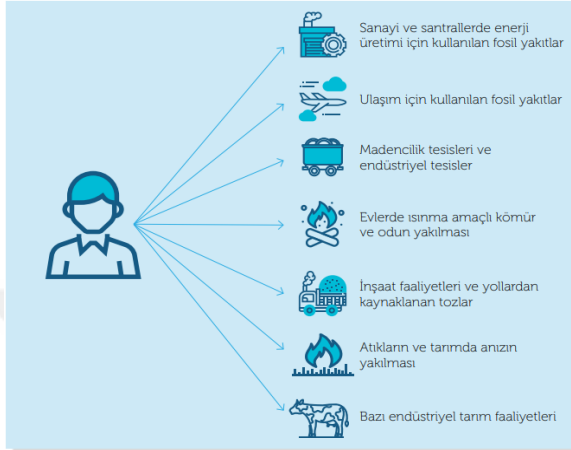
Çalık vd. (2024) tarafından gerçekleştirilen çalışmada Türkiye'nin karantina döneminde kapanmalar sonucunda hava kalitesi üzerindeki etkisinin ne düzeyde olduğu incelenmiştir. Çalışmada pandemi öncesinde Kasım 2019- Ocak 2020 tarihleri arası ve pandemi sırasında Kasım 2020- Ocak 2021 tarihleri arası karşılaştırmıştır. Çalışma sonucunda NO₂ parametresinde diğer parametrelerden farklı olarak Kasım-Aralık aylarında azalma, Ocak ayında artış görülmüştür. Diğer kirleticilerde pandemi döneminde belirli oranda azalma görülmüştür. İstasyonlardan alınan verilerde değerlerin bazen sınır değerleri aştığı görülmüştür.

Hava kirliliği, halk sağlığını ve kentlerin sürdürülebilirliğini etkileyen önemli sorunlardan biridir. Ghasempour (2021), Türkiye'de COVID-19 salgını öncesi ve kapanma döneminde hava kirliliğindeki değişimleri incelemiştir. Çalışma, 2019 Ocak ayından 2020 Eylül ayına kadar olan dönemi kapsamaktadır. Türkiye genelinde Google Earth Engine (GEE) platformu kullanılarak TROPOMI uydu sensörüne dayalı NO₂ ve SO₂ yoğunluğu ile MODIS sensörüyle elde edilen Aerosol Optik Derinliği (AOD) verilerinin mekânsal ve zamansal dağılımı analiz edilmiştir. Yapılan çalışmanın sonucunda kapanma döneminde 2019 yılına göre NO₂ ve AOD konsantrasyonlarında anlamlı bir azalma gözlemlenirken, SO₂ parametresinde önemli bir değişim olmamıştır ve bazı bölgelerde artış gözlemlenmiştir. Çalışmada meteorolojik değişkenler de incelenmiş bunların içinde; hava sıcaklığı ve basınç ile yüksek korelasyon bulunurken, yağış miktarı ve rüzgâr hızı ile zayıf ilişkiler belirlenmiştir. Genel olarak, özellikle COVID-19'un ilk dalgası sırasında uygulanan kapanma sürecinde, uydu verilerine dayalı analizlerin hava kalitesinin mekânsal ve zamansal değerlendirilmesinde güçlü ve anlamlı sonuçlar sunduğu ortaya konmuştur.

COVID-19 salgını süresince birçok ülkede hayata geçirilen tam kapanmalar, hava kalitesi ile insan faaliyetleri arasındaki ilişkiye dair yeni araştırma alanları ortaya çıkarmıştır. Bu kapsamda Matcı vd. (2022) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Türkiye genelinde farklı arazi örtüsü sınıflarında hava kalitesi ile sıcaklık parametreleri analiz edilmiş, bu iki değişken arasındaki ilişki incelenmiştir. Çalışmada 2019–2021 yılları arasındaki dönemi kapsayan MODIS ve Sentinel-5P TROPOMI uydularına ait uzaktan algılama verileri kullanılmış, veriler GEE platformunda işlenmiştir. Analizler sonucunda, özellikle kentsel alanlarda NO₂ yoğunluklarında anlamlı bir düşüş gözlemlenmiştir. Elde edilen bulgular, küresel ölçekte hava kirliliğini azaltmaya yönelik uzun vadeli stratejilerin geliştirilmesinde kullanılabilecek niteliktedir.

2.5. Hava Kirletici Parametreler

Çalışmada analizlerde yer verilen başlıca hava kirletici parametreler; SO₂, NO₂ ve CO'dur. Bu kirleticiler, hem insan sağlığı üzerinde ciddi etkiler yaratmaları hem de kentleşme ve sanayi yoğunluğu gibi faktörlerle doğrudan ilişkilendirilmeleri nedeniyle seçilmiştir. Kirleticilerin insan faaliyetlerine bağlı başlıca hava kirliliği kaynakları şekil 2.1' de verilmiştir.



Şekil 2.1. İnsan Faaliyetlerine Bağlı Başlıca Hava Kirliliği Kaynakları (Temiz Hava Hakkı Platformu 2020)

2.5.1. Karbonmonoksit (CO)

CO, genellikle karbon içeren yakıtların tam olarak yanmaması sonucu oluşan renksiz, kokusuz ve tatsız bir gazdır. Fark edilmesi zor olan bu gaz, oldukça toksik olup, özellikle motorlu taşıtların egzoz gazları, evsel ısıtma sistemleri, sigara dumanı ve bazı sanayi faaliyetleri gibi kaynaklardan atmosfere yayılmaktadır (EPA 2019). CO'nun insan sağlığı üzerindeki etkileri son derece ciddidir. Hemoglobinin oksijenden yaklaşık 250 kat daha güçlü bağ kurarak karboksihemoglobinin oluşturur ve bu durum vücudun dokularına oksijen taşınmasını engeller. Sonuç olarak, baş ağrısı, baş dönmesi, mide bulantısı gibi hafif semptomlardan başlayarak, bilinç kaybı ve ölümle sonuçlanabilecek ciddi zehirlenmelere neden olabilir (WHO 2021). CO genellikle kapalı ortamlarda daha büyük risk oluşturmakla birlikte, açık alanlarda da özellikle trafik yoğunluğunun fazla olduğu bölgelerde yüksek seviyelere ulaşabilmektedir. Türkiye'de yapılan bazı çalışmalarda, İstanbul ve Ankara gibi büyükşehirlerin kış aylarında CO konsantrasyonlarının DSÖ tarafından önerilen sınır değerleri aştığı rapor edilmiştir (Çapraz vd. 2021). CO ve diğer kirleticilerin ana kaynağı ve sağlık üzerindeki etkileri özet şeklinde çizelge 2.5'te verilmektedir.

2.5.2. Kükürtdioksit (SO₂)

SO₂, atmosferdeki başlıca kirleticilerden biridir ve özellikle sülfür içeriği yüksek linyit kömürü gibi fosil yakıtların yakılması sonucu oluşur. Termik santraller, metal eritme tesisleri, rafineriler ve bazı endüstriyel üretim süreçleri SO₂'nin temel kaynakları arasında yer almaktadır (TÜBİTAK-MAM 2020). SO₂'nin çevresel etkileri arasında asit yağmurlarının oluşumu önemli bir yer tutar. Bu durum, toprakların ve yüzey sularının kimyasal yapısının bozulmasına, bitki örtüsünün zarar görmesine ve tarımsal verimliliğin düşmesine yol açar. Ayrıca göllerdeki biyolojik yaşam üzerinde olumsuz etkiler yaratır ve tarihi yapıların kimyasal korozyona uğramasına neden olur (Seinfeld ve Pandis 2016). İnsan sağlığı açısından SO₂, özellikle solunum yolları üzerinde tahriş edici etkileriyle bilinmektedir. Kısa süreli maruziyet durumlarında boğaz yanması, gözlerde iritasyon, öksürük ve göğüs sıkışması gibi semptomlara neden olabilirken; uzun süreli ve yoğun maruziyetler bronşit, astım ataklarında artış ve akciğer fonksiyonlarında azalma gibi kronik sağlık sorunlarına yol açabilir (WHO 2021). SO₂'nin atmosferik yoğunluğu, kullanılan yakıtın türü, sanayi faaliyetlerinin düzeyi, trafik yoğunluğu ve meteorolojik koşullar gibi faktörlere bağlı olarak değişmekte ve COVID-19 salgını süresince bu değişkenliğin mekansal olarak nasıl etkilendiği analiz edilmektedir. SO₂ ve diğer kirleticilerin ana kaynağı ve sağlık üzerindeki etkileri özet şeklinde çizelge 2.5'te verilmektedir.

2.5.3. Azot dioksit (NO₂)

NO₂, yüksek sıcaklıkta gerçekleşen fosil yakıt yanmaları sonucu oluşan reaktif bir gazdır. Başlıca kaynakları arasında motorlu taşıt egzozları, termik santraller, sanayi tesisleri ve bazı tarımsal faaliyetler yer almaktadır (Seinfeld ve Pandis 2016). NO₂, atmosferde güneş ışığıyla tepkimeye girerek troposferik ozon (O₃) oluşumunu tetiklerken; aynı zamanda ince partikül maddelerin (PM_{2.5}) oluşumuna da katkı sağlamaktadır. Bu tür ikincil kirleticiler, atmosferde uzun mesafelere taşınabilmekte ve bölgesel hava kalitesi üzerinde olumsuz etkiler yaratmaktadır. NO₂ maruziyeti, kısa vadede solunum yollarında tahriş, öksürük, göğüs sıkışması ve nefes darlığı gibi semptomlara neden olabilir. Uzun vadede ise, akciğer fonksiyonlarında azalma, astım ve bronşit gibi kronik solunum yolu hastalıklarının artışına neden olabilmektedir (WHO 2021). Ayrıca bağışıklık sisteminin zayıflamasına, alerjik duyarlılığın artmasına ve özellikle çocuklarda solunum yolu enfeksiyonlarına karşı duyarlılığın yükselmesine yol açabilir. Trafik yoğun olduğu bölgelerde daha yüksek seviyelerde bulunan NO₂, özellikle kent merkezlerinde, sanayi bölgelerinde artabilmektedir. Bu nedenle, NO₂'nin mekansal dağılımı ile COVID-19 pandemisi süresince yaşanan değişimler incelenmektedir. NO₂ ve diğer kirleticilerin ana kaynağı ve sağlık üzerindeki etkileri özet şeklinde çizelge 2.5'te verilmektedir.

Çizelge 2.5. Hava Kirleticileri ve Sağlık Etkisi (Temiz Hava Hakkı Platformu 2021)

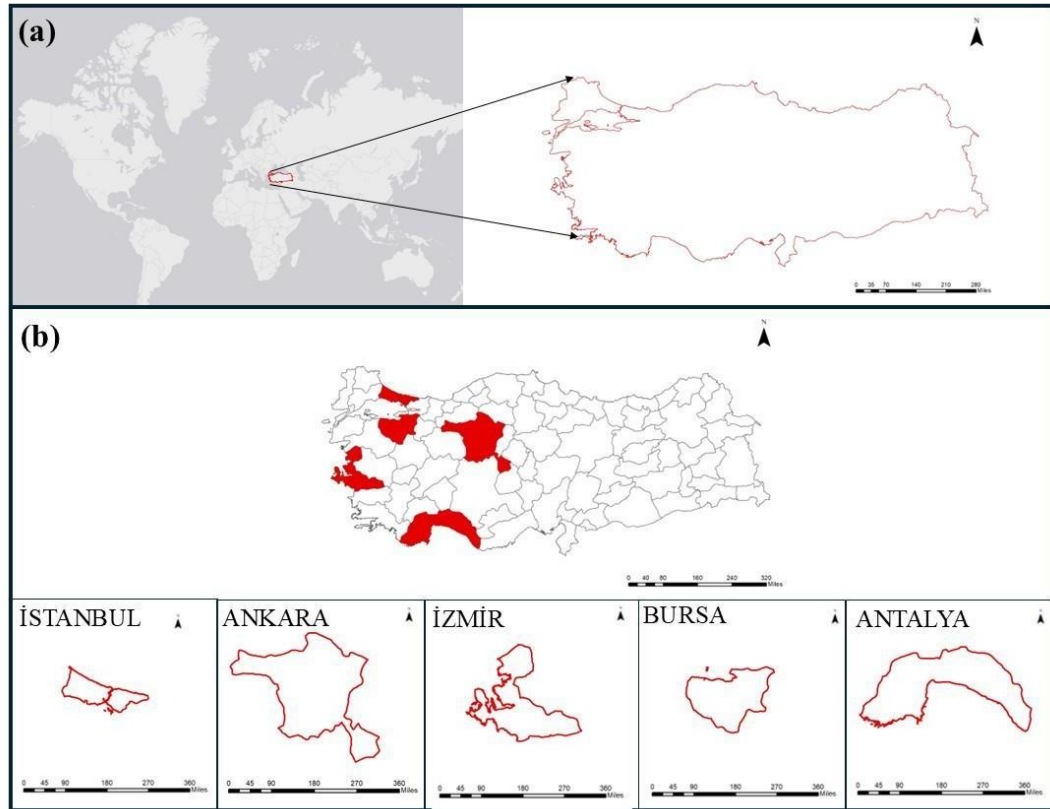
Kirletici	Ana Kaynağı	Sağlık Etkileri
Kükürtdioksit (SO ₂)	Fosil Yakıt Yanması, Taşıt Emisyonları	Solunum Yolu Hastalıkları, Asit Yağmurları
Azot dioksit (NO ₂)	Taşıt Emisyonları, Yüksek Sıcaklıkta Yakma Prosesleri	Göz ve Solunum Yolu Hastalıkları, Asit Yağmurları
Partikül Madde (PM10)	Sanayi, Taşıt Emisyonları, Fosil Yakıt Yanması, Tarım ve İkincil Kimyasal Reaksiyonlar	Kanser, Kalp Problemleri, Solunum Yolu Hastalıkları, Bebek Ölüm Oranlarında Artış
Ozon (O ₃)	Trafikten Kaynaklanan Azot Oksitler ve Uçucu Organik Bileşiklerin Güneş Işığıyla Değişimi	Solunum Sistemi Problemleri, Göz ve Burunda İritasyon, Astım, Vücut Direncinde Azalma
Karbonmonoksit (CO)	Eksik Yanma Ürünü, Taşıt Emisyonları	Kandaki Hemoglobini ile Birleşerek Oksijen Taşınma Kapasitesinde Azalma, Ölüm

3. MATERYAL VE METOT

Çalışma hava kirliliği ve kentleşme ile COVID-19 pandemisi arasındaki ilişkiyi Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) desteğiyle analiz etmeyi amaçlamaktadır. Bu kapsamda tez iki etaptan oluşmaktadır; İlk etapta, Türkiye'nin 81 ilini kapsayan bir analiz gerçekleştirilmiştir, bu aşamada uydu görüntülerinden elde edilen hava kirliliği verileri (SO_2 , NO_2 , CO) ile COVID-19 vaka sayıları, nüfus, kent yerleşim alanları ve endüstriyel faaliyetlerin coğrafi dağılımları incelenmiştir. İkinci etapta ise Türkiye'nin nüfus açısından en büyük beş ili olan İstanbul, Ankara, İzmir, Bursa ve Antalya ele alınmıştır. Bu iller nüfus sayılarının, sanayi ve/veya trafik kaynaklı hava kirliliğinin fazla olması nedeniyle çalışma açısından ön plana çıkmaktadır.

3.1. Çalışma Alanı

Çalışma alanı Türkiye genelinde 81 ili kapsayacak şekilde belirlenmiş, Türkiye'nin nüfus büyüklüğü açısından en büyük beş ilinde daha detaylı analizler gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.1.a'da Türkiye'nin konumu ve sınırları gösterilmiştir. Bu genel analiz, ülke genelindeki mekansal dağılımın belirlenmesi açısından önemlidir. Şekil 3.1.b'de Türkiye'nin nüfus açısından en büyük beş ili olan İstanbul, Ankara, İzmir, Bursa ve Antalya şehirleri gösterilmiştir.



Şekil 3.1. (a) Seçilen çalışma alanının dünya haritasındaki konumu, (b) Beş büyükşehir özelinde çalışılan İstanbul, Ankara, İzmir, Bursa, Antalya şehirleri ve Türkiye haritasındaki konumları

Türkiye genelindeki yıllık nüfus verileri, Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) tarafından yayımlanan Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi (ADNKS) verilerinden elde edilmiştir. 2019–2022 yıllarını kapsayan nüfus sayıları, çalışmada hava kirliliği ile nüfus sayısı arasındaki ilişkinin analizinde değişken olarak kullanılmıştır. Tezde incelenen 2019–2022 dönemine ait Türkiye geneli nüfus bilgileri Çizelge 3.1’de yer almaktadır. Kentleşme ve nüfus, hava kalitesini doğrudan etkileyebilmektedir.

Çizelge 3.1. Türkiye Genelinde 2019–2022 Yılları Arasındaki Toplam Nüfus Değişimi (TÜİK, ADNKS Verileri 2019–2022)

Yıllar	Nüfus
2019	83.154.997
2020	83.614.362
2021	84.680.273
2022	85.279.553

Türkiye’de ilk beş büyükşehirin nüfus sayıları ve kentleşme düzeyleri bakımından yüksek olan İstanbul, Ankara, İzmir, Bursa ve Antalya analizlerde örneklem olarak seçilmiştir. Bu şehirlerin 2022 yılına ait nüfus bilgileri, Türkiye İstatistik Kurumu’nun Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi verilerine dayalı olarak çizelge 3.2’de sunulmuştur. Şehirlerdeki insan hareketliliği ve yoğunluğu, hava kirliliğinin mekânsal dağılımını etkileyen önemli faktörlerdendir. Bu nedenle, nüfus büyüklüğü açısından ilk beşe giren ve kentleşme açısından ön planda olan bu şehirler analizler için seçilmiştir.

Çizelge 3.2. 2022 Verilerine Göre Türkiye’de En Fazla Nüfusa Sahip On Şehir (TÜİK, ADNKS Verileri 2022)

Sıra	İl	Nüfus
1	İstanbul	15.907.951
2	Ankara	5.782.285
3	İzmir	4.462.056
4	Bursa	3.194.720
5	Antalya	2.688.004
6	Konya	2.296.347
7	Adana	2.274.106
8	Şanlıurfa	2.170.110
9	Gaziantep	2.154.051
10	Kocaeli	2.079.072

Çalışmada hava kirliliği ve kentleşmenin COVID-19 salgınına etkisini incelemek için; Sentinel-5P uydu verileri, hava kalitesi ölçüm istasyon verileri, COVID-19 vaka verileri ve diğer mekânsal veriler (nüfus, yerleşim alanları, OSB, termik santraller) kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan veriler, yıl aralığı, çalışmada kullanım amaçları ve kaynaklar çizelge 3.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.3. Veri Setleri Tablosu

No	Veri Seti	Kullanım Amacı	Kaynak Kurum/Platform	Yıl Aralığı
1	Sentinel-5P Uydu Verileri	NO ₂ , SO ₂ , CO hava kirlleticilerin analizi	ESA – Google Earth Engine	2019/2022
2	Hava Kalitesi İstasyon Verileri	Uydu verileriyle karşılaştırma ve doğruluk kontrolü	Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı	2019/2022
3	COVID-19 Vaka Verileri	Hava kalitesi ile vaka yoğunluğu ilişkisinin incelenmesi	T.C. Sağlık Bakanlığı	2021
4	a Nüfus Verileri	Yoğunluk analizleri, şehirleşme etkisinin değerlendirilmesi	TÜİK (Türkiye İstatistik Kurumu)	2019/2022
	b OSB Alanları	Endüstriyel faaliyetlerin hava kalitesine etkisinin belirlenmesi	T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı	2025
	c Termik Santral Verileri	Emisyonların mekânsal dağılımının incelenmesi	Coğrafya Harita, Saygılı 2021	2021
	d Kent Yoğunluğu Verisi	Yapılaşma ve nüfus yoğunluğunun hava kalitesine etkisinin değerlendirilmesi	ESA – Google Earth Engine	2021

3.2. Veri Setleri

3.2.1. Sentinel-5P Uydu Verileri

Tezde kullanılan hava kalitesi verileri, Avrupa Uzay Ajansı (ESA) tarafından yürütülen Copernicus Sentinel-5 Precursor (Sentinel-5P) uydusu aracılığıyla elde edilmiştir. Sentinel-5P, atmosferin izlenmesi, gözlemlenmesi için tasarlanmış ilk Copernicus görevidir ve hava kirliliğini, ozon konsantrasyonunu, UV radyasyonunu inceleme imkânı sağlamaktadır. Sentine 5P uydusu, Avrupa Komisyonu, ESA, Hollanda Uzay Ofisi ve çeşitli bilimsel kurumların ortak çalışması sonucu geliştirilmiştir (ESA 2023).

Sentinel-5P uydusu Rusya'nın Plesetsk Uzay Üssü'nden 13 Ekim 2017 yılında fırlatılmış ve uydunun yörüngesi günde bir defa yerel saate göre 13.30'da yeryüzünden geçecek şekilde konumlandırılmıştır. Yörüngesinden geçen saat diliminde NASA'nın Suomi-NPP uydusu ile çalışarak TROPOMI verilerinin bulut maskesi ve yüzey yansıtılabilirliği özellikleriyle desteklenmesini mümkün kılmaktadır (ESA 2023)

Uydu, taşıdığı TROPOspheric Monitoring Instrument (TROPOMI) cihazı sayesinde atmosferik izleme yaparken atmosferdeki kirleticilerden NO₂, SO₂, CO, O₃, CH₄ gibi kirleticileri tespit edilebilmektedir. Bu cihazdan elde edilen veriler araştırmalarda bölgesel ve kentsel düzeyde analizler yapabilmeyi kolaylaştırmaktadır (ESA 2023). Sentinel-5P uydu görüntüsünün bant özellikleri çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. TROPOMI Sensörünün Spektral Bantları, Kapsadığı Kirleticiler ve Çözünürlükler (ESA 2023)

Kirletici	Spektral Bant Aralığı	Dalga Boyu (nm/μm)	Başlıca Hedeflenen Gaz(lar)	Mekansal Çözünürlük (km)
UV-1	Bant 1	270–300 nm	SO ₂ , Aerosoller (UV)	7 × 7 km ²
UV-2	Bant 2	300–332 nm	SO ₂ , Ozon Profili	7 × 7 km ²
UV-Vis	Bant 3	310–405 nm	NO ₂ , O ₃ (Toplam Sütun), HCHO	3.5 × 7 km ²
Görünür (VIS)	Bant 4	405–500 nm	NO ₂ , HCHO, Aerosoller	3.5 × 7 km ²
Yakın IR (NIR)	Bant 5	675–775 nm	Yüzey yansıtması, Bulut analizi	7 × 7 km ²
Kısa Dalga IR	Bant 6	1590–1675 nm (SWIR)	CO, CH ₄	7 × 7 km ²

3.2.2. Hava Kalitesi Ölçüm İstasyonu Verileri

Tezde kullanılan hava kalitesi istasyon verileri Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığının her ay yayınladığı haber bülteni raporundan aylık veriler alınarak tablo haline getirilmiştir. Hava bülten raporu (ÇŞİDB 2022), Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından yapılan hava kalitesi izleme istasyonundan verileri kullanarak aylık, mevsimlik, yıllık verileri alıp düzenleyerek her istasyon için kirlilik düzeyini değerlendiren ve özetleyen rapordur. Bu raporda genellikle PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂, SO₂, CO ve O₃ gibi kirleticilerin ölçüm sonuçları, sınır değerlerle karşılaştırmalı olarak yer almaktadır, çalışmada CO, SO₂ ve NO₂ kirleticileri kullanılmıştır ve değerler çizelge 3.5'te verilmektedir.

Çizelge 3.5. Türkiye Hava Kalitesi İzleme Sistemi Verileri (ÇŞİDB 2022)

Değişken	Birim	Zamansal Çözünürlük
NO ₂	µg/m ³	Saatlik
SO ₂	µg/m ³	Saatlik
CO	mg/m ³	Saatlik

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığına (ÇŞİDB) bağlı Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı kapsamında yer alan otomatik hava kalitesi izleme istasyonları (AKİİ), Türkiye genelinde çeşitli kirleticilere ilişkin verileri sürekli olarak ölçmektedir. Hava kalitesi izleme istasyonları, PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂, SO₂, CO ve O₃ gibi kirleticilerin saatlik ortalama değerlerini sensörler aracılığıyla kaydetmektedir. Her bir kirletici, farklı ölçüm teknikleri kullanılarak tespit edilmektedir: Partikül maddeler (PM) beta ışını absorpsiyonu veya gravimetrik yöntemle; NO₂ kemilüminesans yöntemiyle, SO₂ ultraviyole floresans yöntemiyle, CO kızılötesi absorpsiyon tekniğiyle ve O₃ ultraviyole fotometri yöntemiyle ölçülmektedir. (ÇŞİDB 2023b; US EPA 2018).

Ölçüm sonucunda toplanan veriler, telemetri sistemleri kullanarak bakanlık veri merkezine gönderilmektedir. Gönderilen veriler cihaz arızaları, bakım zamanları ve aykırı gelen değerleri çıkararak kontrol aşamasından geçirilip veri seti oluşturulur. Oluşturulan veri setleri gün, ay ve yıl bazında ortalamalara dönüştürerek analiz edilmektedir. Ölçülen her kirletici için Hava Kalitesi İndeksi (HKİ) değeri hesaplanarak gün içinde en yüksek değer o günün hava kalitesini temsil etmektedir (US EPA 2018). Yapılan işlemler sonucunda elde edilen veriler, bakanlık tarafından yayınlanan hava bülten raporlarında aylık ve yıllık olarak paylaşılmaktadır.

HKİ, PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂, SO₂, CO ve O₃ gibi kirleticilerin yoğunluklarını tek bir sayısal değerle ifade ederek, hava kalitesinin halk tarafından daha kolay anlaşılmasını sağlayan bir göstergedir. HKİ, hava kirliliği düzeyini ve bunun insan sağlığı üzerindeki olası etkilerini halka bilgi vermek amacıyla kullanılmaktadır. (US EPA 2018).

HKİ hesaplamalarında kirleticilerde indeks değeri hesaplanmakta ve en yüksek çıkan değer o günün hava kalitesini belirlemektedir (US EPA 2018). Türkiye’de HKİ hesaplanırken Avrupa Birliği ve ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA) standartları dikkate alınmaktadır (US EPA 2018). Her biri için belirlenen sınır değerler üzerinden indeks hesaplaması yapılır ve bu değerler 0 ile 500 arasında değişen puanlara dönüştürülür. Puanlar, aşağıdaki gibi beş ana kategoriye ayrılır kategoriler çizelge 3.6 da verilmiştir.

Çizelge 3.6. EPA Standartlarına Göre Uyarlanan Ulusal Hava Kalitesi İndeksi (Temiz Hava Hakkı Platformu 2021)

İndeks	HKİ	SO ₂ [µg/m ³]	NO ₂ [µg/m ³]	CO[µg/m ³]	O ₃ [uq/m3]	PM10[uq/m3]
		1 Sa. Ort.	1 Sa. Ort.	8 Sa. Ort.	8 Sa. Ort.	24 Sa. Ort.
İyi	0-50	0-100	0-100	0-5500	0-120	0-50
Orta	51-100	101-250	101-200	5501-10000	121-160	51-100
Hassas	101-150	251-500	201-500	10001-16000	161-180	101-260
Sağlıksız	151-200	501-850	501-1000	16001-24000	181-240	261-400
Kötü	201-300	851-1100	1001-2000	24001-32000	241-700	401-520
Tehlikeli	301-500	>1101	>2001	>32001	>701	>521

Hava kalitesinin korunması, insan sağlığına ve çevreye verebileceği olumsuz etkiyi azaltmak için Türkiye’de hava kalitesine yönelik yasal düzenlemeler yapılmaktadır. Bu kapsamda, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından yayımlanan *Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği* (ÇŞİDB 2008) temel mevzuatı oluşturmaktadır. Yönetmeliğin içeriğinde hava kirleticilerin (PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, NO₂, CO, O₃) sınır değerleri, hedef değerleri ve olması gereken değerler tanımlanmıştır. Ayrıca kurum, yalnızca yönetmeliklerde belirtilen sınır değerleri belirlemekle kalmamakta; aynı zamanda hava kalitesini izleyip değerlendirmekte ve bu doğrultuda hazırladığı raporlarla kamuoyunu bilgilendirmektedir (ÇŞİDB 2023b).

Türkiye’de hava kalitesi yönetimi Avrupa Birliği (AB) ile uyumlu hale getirilerek 2008/50/EC sayılı “Clean Air for Europe (CAFE)” Direktifi temel alınarak ulusal hava kalitesi standartları belirlenmiştir. Böylelikle ulusal hava kalitesi standartları belirlenerek veri toplama ve değerlendirme kriterleri AB ile uyumlu hale getirilmiştir (ÇŞİDB 2019).

Türkiye genelinde hava kalitesini kontrol ve takip etmek için oluşturulan Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı (UHKA) 300’den fazla hava kalitesi izleme istasyonuna sahiptir. Oluşturulan sistem sayesinde hava kirleticilerin günlük, saatlik, yıllık verileri

olarak kamuya açık olan web adresinden paylaşmaktadır (ÇŞİDB web sayfası). Uygulamada kirleticiler il bazında günlük yaşamda hava kalitesi seviyeleri görülebilecek şekilde renklendirilerek erişime sunulmaktadır (ÇŞİDB 2024).

Hava kirliliğinin insan sağlığı üzerindeki etkilerini dikkate alan DSÖ uluslararası düzeyde herkesin referans alabileceği hava kalitesi kılavuz değerleri oluşturmuştur. Bu değerler DSÖ'nün 2021 yılında yayımladığı Küresel Hava Kalitesi Kılavuzunda verilmiştir (WHO Air Quality Guidelines 2021). Çizelge 3.7'de 2005 ve 2021 yılları değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir (WHO 2021).

Çizelge 3.7. DSÖ 2005 ve 2021 Yılı Hava Kalitesi Yıllık Ortalamaları

Kirletici	DSÖ Kılavuzu (2021)	DSÖ Kılavuzu (2005)
PM _{2.5}	5 µg/m ³	10 µg/m ³
PM ₁₀	15 µg/m ³	20 µg/m ³
NO ₂	10 µg/m ³	40 µg/m ³
SO ₂	40 µg/m ³ (24 saatlik ort.)	Aynı
CO	4 mg/m ³ (24 saatlik ort.)	10 mg/m ³

DSÖ'nün hava kalitesi kılavuzu, özellikle aşağıdaki kirleticilere odaklanmaktadır:

- Partikül madde (PM_{2.5} ve PM₁₀)
- Ozon (O₃)
- Azot dioksit (NO₂)
- Sülfür dioksit (SO₂)
- Karbonmonoksit (CO)

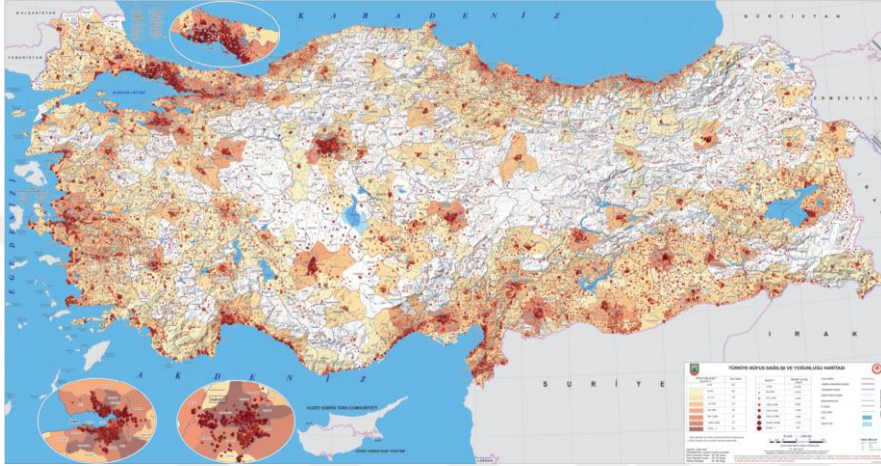
DSÖ'ye göre, hava kirliliği solunum yolu hastalıkları, kalp-damar yolu hastalıkları ve diğer sağlık sorunlarına doğrudan neden olabilmektedir. Bu nedenle kılavuzda belirtilen sınır değerler insan sağlığını korumak için kabul edilen en düşük seviye olarak kabul etmektedir hava kalitesi sınır değerleri çizelge 3.8'de verilmektedir (Temiz Hava Hakkı Platformu 2021).

Çizelge 3.8. Hava Kalitesi Sınır Değerleri (Temiz Hava Hakkı Platformu 2021)

İnsan Sağlığı ve Ekosistemin Korunması İçin Hava Kalitesi Sınır Değerleri				
Kirlетici Parametreler	Ölçüm Periyodu	Sınır Değerler		Uyum Takvimi
		Ülkemizde Uygulanan 2018	AB Üye Ülkelerde Uygulana	
Kükürtdioksit SO ₂ (µg/m ³)	Saatlik	380	350	01.01.2019
	Günlük	150	125	
	Uyarı Eşiği (3 ardışık saat)	500	500	
	Saatlik Aşım Sayısı	-	24/Yıl	
	Günlük Aşım Sayısı	-	3/Yıl	
	Yıllık	20	20	01.01.2014
Partikül Madde PM10 (µg/m ³)	Günlük	60	50	01.01.2019
	Yıllık	44	40	
	Günlük Aşım Sayısı	-	35/Yıl	
Azot dioksit NO ₂ (µg/m ³)	Saatlik	260	200	01.01.2024
	Yıllık	44	40	
	Uyarı Eşiği (3 ardışık saat)	400	400	
	Saatlik Aşım Sayısı	-	18/Yıl	
Azotoksit NOx(µg/m ³)	Yıllık	30	30	01.01.2024
Karbonmonoksit CO (µg/m ³)	8 saatlik ortalama	10	10	01.01.2017
Ozon O ₃ (µg/m ³)	8 saatlik ortalama	120	120	01.01.2022
	Bilgi Eşiği(saatlik)	-	180	
	Uyan Eşiği(saatlik)	-	240	
Benzen C ₆ H ₆ (µg/m ³)	Yıllık	8	5	01.01.2021
Kurşun Pb (µg/m ³)	Yıllık	0.6	0.5	01.01.2019
Arsenik As (µg/m ³)	Yıllık	-	6	01.01.2020
Kadmiyum Cd (µg/m ³)	Yıllık	-	5	02.01.2020
Nikel Ni (µg/m ³)	Yıllık	-	20	03.01.2020
Benzoapiren B(µg/m ³)	Yıllık	-	1	04.01.2020

3.2.3. Nüfus verileri

Türkiye 2022 nüfusu 85 milyon 279 bin 553 olarak belirlenmiştir (TÜİK 2023). Türkiye genelindeki nüfus dağılımı ve yoğunluğu mekansal olarak şekil 3.2’de verilmektedir. Nüfus yoğunluğu, hava kirliliği ve COVID-19 vakalarının dağılımı üzerinde etkili bir değişken olduğu için bu çalışma kapsamında demografik yapıyı incelemek amacıyla nüfus dağılımı verilerine yer verilmiştir.



Şekil 3.2. Türkiye Nüfus Dağılımı ve Yoğunluk Haritası (HGM 2023)

Çalışmada Türkiye özelinde beş büyükşehir incelenmektedir, ilgili illere ait nüfus verileri çizelge 3.9, 3.10, 3.11, 3.12, 3.13’te verilmektedir. Yıllar arasında her ilde artış olduğu gözlemlenmektedir. Çizelgeleri incelediğimizde 2021-2022 arasında İstanbul'un nüfusu, 67 bin 51 kişi artarak 15 milyon 907 bin 951 kişiye ulaşmıştır. Türkiye nüfusunun %18,65'inin ikamet ettiği İstanbul'u sırasıyla 5 milyon 782 bin 285 kişi ile Ankara, 4 milyon 462 bin 56 kişi ile İzmir, 3 milyon 194 bin 720 kişi ile Bursa ve 2 milyon 688 bin 4 kişi ile Antalya takip etmektedir (TÜİK 2022).

Çizelge 3.9. İstanbul 2019-2022 Yılları Nüfus Verileri (TÜİK 2019-2020-2021-2022)

Yıllar	Nüfus
2019	15.519.267
2020	15.462.452
2021	15.840.900
2022	15.907.951

Çizelge 3.10. Ankara 2019-2022 Yılları Nüfus Verileri (TÜİK 2019-2020-2021-2022)

Yıllar	Nüfus
2019	5.639.076
2020	5.663.322
2021	5.747.325
2022	5.782.285

Çizelge 3.11. İzmir 2019-2022 Yılları Nüfus Verileri (TÜİK 2019-2020-2021-2022)

Yıllar	Nüfus
2019	4.367.251
2020	4.394.694
2021	4.425.789
2022	4.462.056

Çizelge 3.12. Bursa 2019-2022 Yılları Nüfus Verileri (TÜİK 2019-2020-2021-2022)

Yıllar	Nüfus
2019	3.056.120
2020	3.101.833
2021	3.147.818
2022	3.194.720

Çizelge 3.13. Antalya 2019-2022 Yılları Nüfus Verileri (TÜİK 2019-2020-2021-2022)

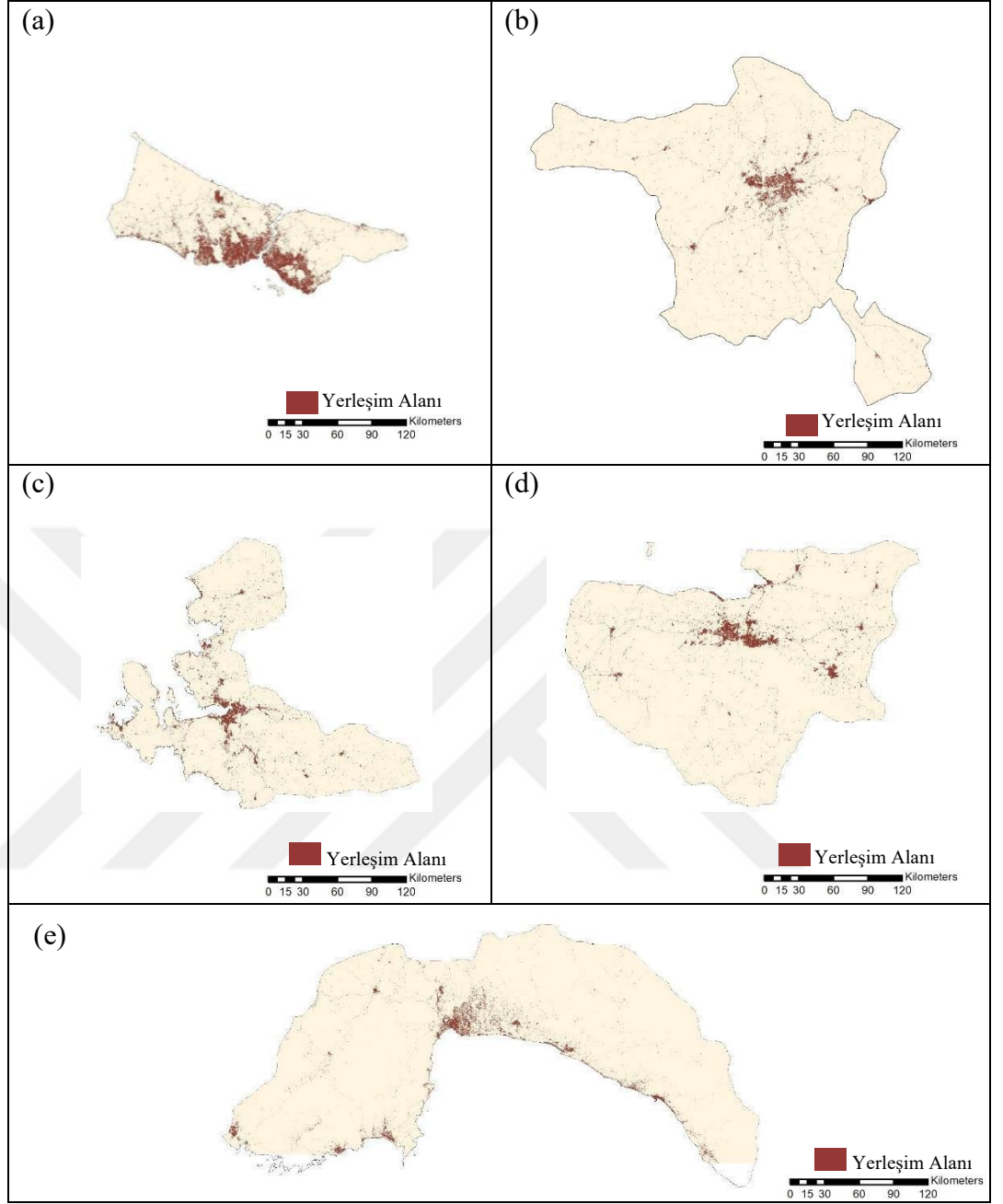
Yıllar	Nüfus
2019	2.511.700
2020	2.548.308
2021	2.619.832
2022	2.688.004

3.2.4. Yerleşim alanları

Çalışmada, yerleşim alanları; ilgili bölgedeki nüfusu, kentleşme düzeyini ve kentsel dinamikleri yansıtmaktadır. Yerleşim alanlarının yoğun olduğu bölgelerde hava kirliliği seviyelerinin artış gösterip göstermediğini ve bu durumun COVID-19 vaka oranlarıyla nasıl bir ilişki içinde olduğunu analiz edebilmek amacıyla kentsel yerleşim alanları detaylı şekilde incelenmiştir. Bu kapsamda, Şekil 3.3'te Türkiye genelindeki yerleşim alanı dağılımı, Şekil 3.4'te ise İstanbul, Ankara, İzmir, Bursa ve Antalya illerine ait yerleşim alanlar dağılımı verilmiştir.



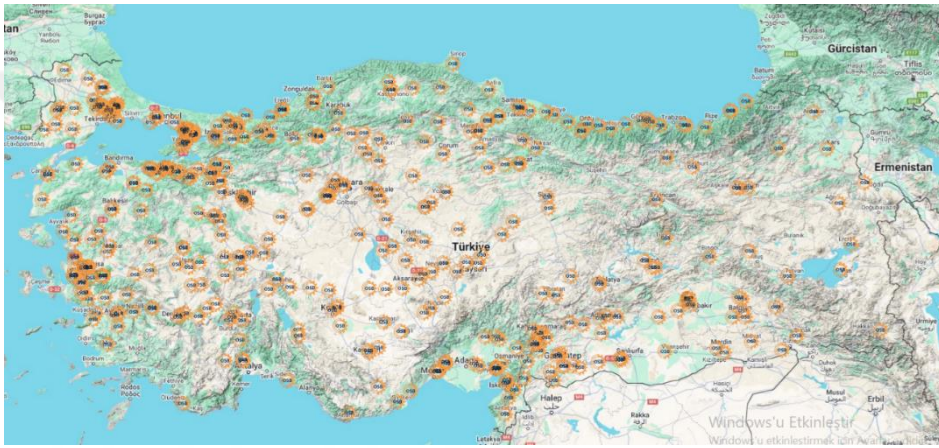
Şekil 3.3. Türkiye Yerleşim Alanları



Şekil 3.4. Beş Büyükşehir ((a) İstanbul, (b) Ankara, (c) İzmir, (d) Bursa, (e) Antalya) Yerleşim Alanları

Organize Sanayi Bölgeleri, farklı sanayi kollarının bir araya geldiği yoğun üretim alanlarıdır. Bu bölgelerden çıkan emisyonlar, rüzgâr hareketleriyle geniş alanlara yayılabilmekte ve kent yerleşimlerinin hava kalitesini olumsuz etkilemektedir (Yörük ve Yaman 2008).

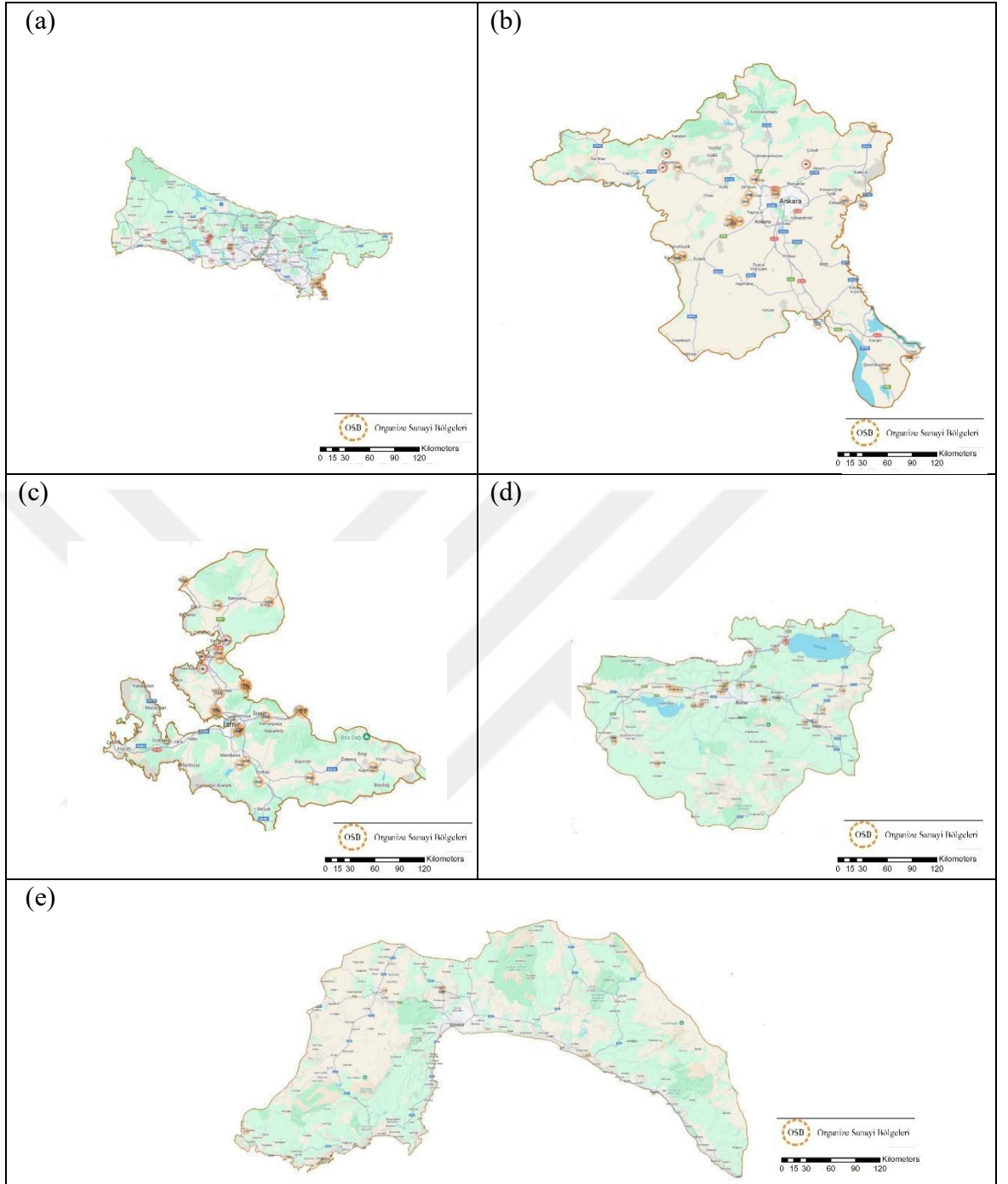
Bu çalışmada, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı tarafından yayımlanan Sanayi Bölgeleri Atlası verileri kullanılarak hazırlanmış olan sanayi alanlarının mekânsal dağılımıyla analiz yapılmıştır. Türkiye genelindeki OSB’ler Şekil 3.6’de, endüstri bölgeleri ise Şekil 3.7’de gösterilmektedir. Ayrıca, beş büyükşehir (İstanbul, Ankara, İzmir, Bursa ve Antalya) özelinde OSB ve endüstri alanları detaylı olarak Şekil 3.8’de sunulmuştur.



Şekil 3.6. Türkiye Organize Sanayi Bölgeleri (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı 2025)



Şekil 3.7. Türkiye Endüstri Bölgeleri (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı 2025)



Şekil 3.8. Beş Büyükşehir ((a)İstanbul, (b) Ankara, (c) İzmir, (d) Bursa, (e)Antalya) Sanayi ve Endüstri Alanları (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı 2025)

Çizelge 3.14. Sanayi Türlerinin Beş Büyükşehir Üzerindeki Etkisi

Şehir	Başlıca Sektörler	Emisyon Artışına Neden Olan Faktörler	Açıklama ve Kaynaklar
İstanbul	Otomotiv, metal işleme, çimento, konut ısıtması	SO ₂ : Sanayi NO ₂ : Trafik PM ₁₀ : Konut ısıtması CO: Trafik ve konut ısıtması	İstanbul'da SO ₂ emisyonu sanayi kaynaklı olup özellikle linyit, fuel oil kullanımında etkilidir. Trafikte ise NO ₂ , CO emisyonları etkili olmaktadır. Konut ısıtmasında da CO ve PM10 emisyonları etkilidir (Kaya ve Yavuz 2024).
Ankara	Termik santraller, otomotiv, inşaat, konut ısıtması	SO ₂ : Termik santraller NO ₂ : Trafik PM ₁₀ : İnşaat ve konut ısıtması CO: Trafik ve konut ısıtması	Ankara'da SO ₂ emisyonları özellikle Çayırhan termik santrali gibi linyit yakıtlı santrallerden oluşmaktadır. Trafik kaynaklı CO ve NO ₂ emisyonları etkili olmaktadır. Konut ısıtması ve inşaat faaliyetlerinde CO ve PM10 emisyonları etkilidir (Yıldız ve Özdemir 2021)
İzmir	Rafineri, petrokimya, demir-çelik, çimento	SO ₂ : Rafineri ve petrokimya NO ₂ : Trafik PM ₁₀ : Çimento fabrikaları CO: Trafik ve konut ısıtması 0	İzmir'de petrol rafineleri ve sanayi tesisleri SO ₂ emisyonları oluşturmaktadır. Trafik, NO ₂ ve CO emisyonlarında etkilidir. Çimento fabrikası pm10 emisyonunda etilidir (Gül ve Kocabaş 2020)
Bursa	Otomotiv, tekstil, kimya, plastik	SO ₂ : Sanayi ve konut ısıtması NO ₂ : Trafik ve sanayi PM ₁₀ : Konut ısıtması ve sanayi CO: Trafik ve konut ısıtması	Bursa'da artan hava kirliliğinin nedenleri SO ₂ emisyonları büyük ölçüde kömürle ısınmadan ve sanayi tesislerinden kaynaklanmakta, NO ₂ ve CO emisyonları ise özellikle şehir merkezindeki trafik yoğunluğuyla ilişkilendirilmektedir. PM ₁₀ seviyeleri ise hem ısınma hem de sanayi kaynaklı olarak yükselmektedir (Kılıç ve Yetimoğlu 2021)
Antalya	Turizm, inşaat, konut ısıtması	SO ₂ : Konut ısıtması NO ₂ : Trafik PM ₁₀ : İnşaat faaliyetleri CO: Trafik ve konut ısıtması	Antalya'da turizm ve inşaat sektörleri ön plandadır. Konut ısıtması SO ₂ emisyonlarına katkı sağlar. Trafik, NO ₂ ve CO emisyonlarının başlıca kaynağıdır. İnşaat faaliyetleri ise PM ₁₀ emisyonlarını artırmaktadır (ÇŞİDB 2023a)

3.3. Yöntem

Bu çalışma kapsamında, Türkiye genelinde ve beş büyükşehir özelinde (İstanbul, Ankara, İzmir, Bursa ve Antalya) 2019–2021 yılları arasındaki hava kirliliği ve COVID-19 vaka sayıları arasındaki ilişki incelenmiştir. Bu amaçla, Sentinel-5P uydusu ile Türkiye Hava Kalitesi İzleme İstasyonlarından elde edilen veriler ile analizler yapılarak NO₂, SO₂ ve CO kirleticilerinin zamansal değişimleri analiz edilmiştir. Ayrıca sosyo-mekânsal etkenlerin (organize sanayi bölgeleri, termik santraller, yerleşim alanları gibi) COVID-19 vaka sayıları üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

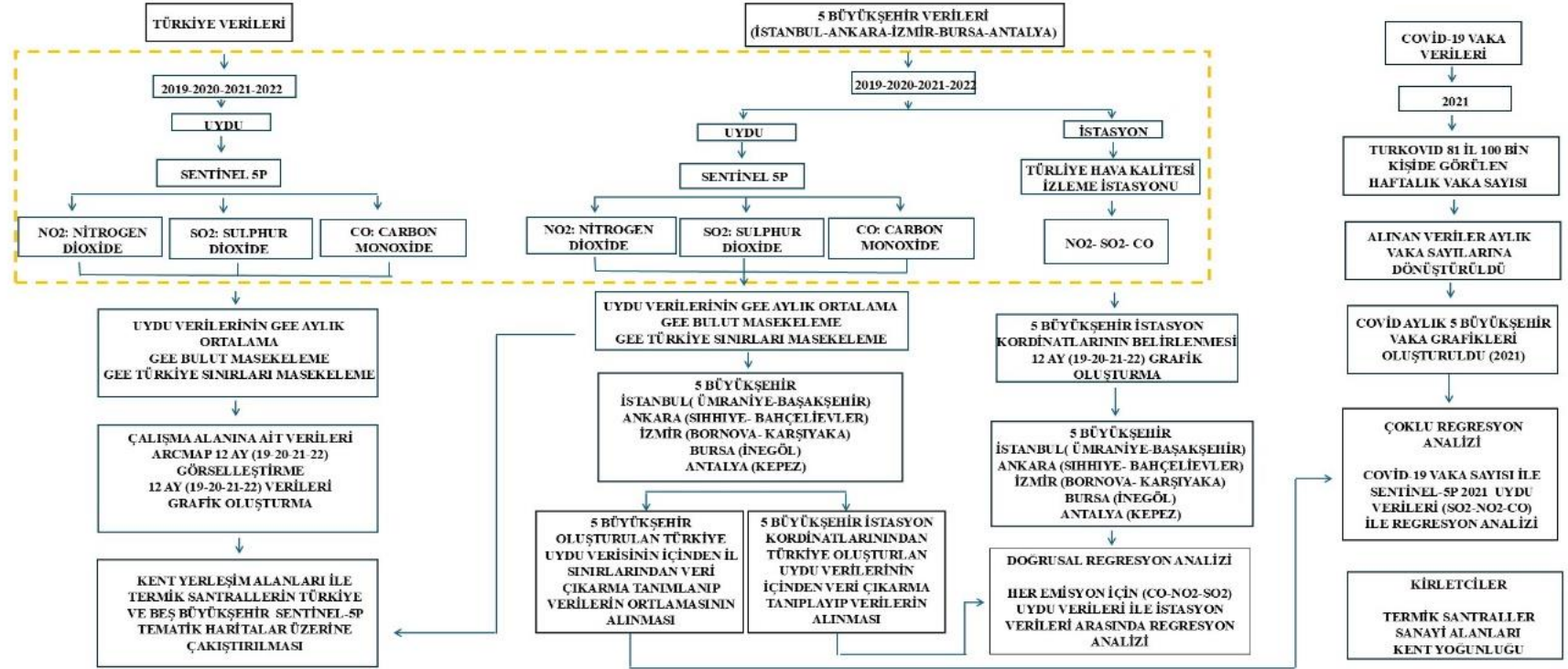
Çalışma iki ana aşamadan oluşmaktadır: (1) Türkiye genelinde hava kirliliği ile COVID-19 vaka sayıları arasındaki ilişki değerlendirilmektedir. Bu aşamada üç temel veri grubu kullanılmıştır: (i) Uydu verileri (Sentinel-5P), (ii) COVID-19 vaka verileri, (iii) Kirleticili kaynaklara ilişkin sosyo-mekânsal veriler (organize sanayi bölgeleri, termik santraller, yerleşim alanları). (2) Beş büyükşehir özelinde analizler İstanbul, Ankara, İzmir, Bursa ve Antalya illerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda dört veri grubu temel alınmıştır: (i) Uydu verileri (Sentinel-5P), (ii) Yer istasyonu verileri, (iii) COVID-19 vaka verileri (2021 yılı aylık veriler), (iv) Kirleticili kaynaklara yönelik sosyo-mekânsal veriler OSB, termik santraller, yerleşim alanları gibi kirleticili kaynaklar. Bu kapsamda iki yöntem uygulanmıştır: (i) doğrusal regresyon analizi, (ii) çoklu regresyon analizi.

Çalışmanın birinci aşaması, Türkiye genelini kapsayan analiz sürecidir. Bu kapsamda, 2019–2022 yılları arasına ait Sentinel-5P uydusundan elde edilen NO₂, SO₂ ve CO verileri Google Earth Engine platformu üzerinden işlenmiştir. Veriler aylık ortalamalara dönüştürülmeden önce bulut maskesi uygulanmış ve Türkiye sınırları içerisindeki alanlar maskeleyme yöntemiyle seçilmiştir. Türkiye şehir bazında elde edilen veriler ile tematik haritalar oluşturulmuştur. Aynı zamanda, bu sayısal veriler görselleştirilerek aylık bazda grafikler hazırlanmıştır. COVID-19 verileri 2021 yılındaki vaka verileri, T.C. Sağlık Bakanlığı tarafından yayımlanan Turkovid-19 platformundan (TURCOVID19 2021) elde edilmiştir. Haftalık bazda sağlanan vaka verileri, ay bazında gruplandırılmış ve Türkiye genelinde COVID-19 vaka değişimini gösteren grafikler oluşturulmuştur. Ayrıca, Türkiye genelinde hava kirliliği üzerinde etkili olabilecek bazı sosyo-mekânsal değişkenler de değerlendirmeye alınmıştır. Bu kapsamda; nüfus verileri, yerleşim alanları, OSB alanları, termik santral alanları gibi etkenler analiz edilmiş ve bu faktörlerin hava kirliliği ve COVID-19 ile ilişkisi değerlendirilmiştir.

Çalışmanın ikinci aşaması, Türkiye'nin nüfus büyüklüğüne göre ilk beş büyükşehri olan İstanbul, Ankara, İzmir, Bursa ve Antalya illerini kapsamaktadır. Bu aşamada hava kirliliği ve COVID-19 vakaları arasındaki ilişkinin daha ayrıntılı bir şekilde incelenmesi amaçlanmıştır. İlk olarak, 2019–2022 yılları arasında Sentinel-5P uydusundan elde edilen NO₂, SO₂ ve CO verileri, GEE platformu üzerinden aylık ortalamalar şeklinde işlenmiş; bulut maskesi uygulanarak yalnızca ilgili illerin sınırları dahilindeki veriler elde edilmiştir. Elde edilen raster veriler, görselleştirilmiş ve tematik haritalar oluşturulmuştur. Beş büyükşehirde yer alan hava kalitesi izleme istasyonlarından belirlenen istasyonlardan 2019–2022 yılları arasına ait NO₂, SO₂, CO verileri temin edilmiştir. Bu istasyon verileri de aylık bazda analiz edilerek grafiksel olarak değerlendirilmiştir. 2021 yılına ait COVID-19 vaka verileri haftalık formatta Turkovid-19 platformundan alınmış, daha sonra ay bazına dönüştürülerek grafikler oluşturulmuştur.

Bu veriler, hava kirliliği verileri ile karşılaştırılmıştır. Bu aşamanın en önemli adımı regresyon analizleridir. Bu doğrultuda, birinci analiz istasyon verileri ile uydu verileri arasında doğrusal regresyon analizi uygulanmasıdır. Böylece her bir il için uzaktan algılama verileri ile yer istasyonu verileri arasındaki ilişki incelenmiştir. Diğer analiz uydu verilerinden illerin ortalamaları hesaplanarak kirleticiler ile COVID-19 arasında çoklu regresyon analizidir, burada birden fazla bağımsız değişkenin bir bağımlı değişken üzerindeki ortak etkisi incelenmiştir. Ayrıca, COVID-19 vaka sayıları ile hava kirliliği göstergeleri ve sosyo-mekânsal değişkenler (nüfus yoğunluğu, OSB alanları, termik santraller) arasındaki ilişki incelenmektedir. Bu sayede hem hava kirliliği ile COVID-19 arasındaki ilişki hem de bu ilişkiyi etkileyebilecek diğer mekânsal ve çevresel faktörler bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmiştir. Yapılan işlemlerin iş-akış şeması şekil 3.9 da verilmektedir.





Şekil 3.9. Tez Çalışmasının İş-Akış Şeması

3.3.1. Türkiye genelinde uydu verileri analizi

Hava kirleticilerinin (NO_2 , SO_2 ve CO) mekânsal ve zamansal dağılımını analiz edebilmek amacıyla yapılan tez çalışmasında, COVID-19 öncesi ve dönemindeki uydu görüntüleri kullanılmıştır. Günlük TROPOMI ve MODIS verilerinden elde edilen bilgiler aylık ortalamalara dönüştürülerek hava kirleticilerinin haritaları oluşturulmuştur. Sentinel-5P uydusuna ait Copernicus platformu üzerinden, NO_2 için COPENICUS/S5P/OFFL/L3_ NO_2 ve SO_2 için COPENICUS/S5P/OFFL/L3_ SO_2 veri setleri kullanılarak ilgili gazların konsantrasyonları indirilmiştir. Bu veriler, Google Earth Engine platformu aracılığıyla işlenmiş; bulut maskesi uygulanarak aylık ortalamalar hâlinde analiz edilmiştir. GEE, büyük hacimli uydu verilerinin analiz edilmesine olanak tanıyan, bulut tabanlı ve ücretsiz bir sistem olması nedeniyle bu çalışmada tercih edilmiştir. Aynı zamanda, uydu verileri çeşitli görselleştirme araçları ile desteklenerek hava kirliliğinin zamansal değişimleri haritalanmıştır.

Tez çalışmasında Türkiye geneline ait hava kirliliği analizlerinde Sentinel-5P uydu verileri kullanılmıştır. NO_2 , SO_2 ve CO kirleticilerine ait veriler, Google Earth Engine (GEE) platformu üzerinden elde edilmiş ve aşağıda adım adım açıklanan iş akışıyla işlenmiştir:

- Sentinel-5P verilerinin indirilmesini kolaylaştıran, programın hazır kodları GEE Kod Editörü (Code Editor) ortamına yüklenmiş ve düzenlenmiştir. Bu kodlarda ilgili kirleticinin veri kümesi (örn. COPENICUS/S5P/OFFL/L3_ NO_2) tanımlanmıştır.
- Ocak 2019 – 31 Aralık 2022 tarih aralığı seçilerek, dört yıllık dönemdeki veriler filtrelenmiştir. Her yıl için ayrı ayrı aylık ortalama hesaplamaları yapılacak şekilde parametreler tanımlanmıştır.
- İlgili kirletici için uydu verilerinde yer alan troposferik kolon (tropospheric column) bant seçilmiş ve bulut maskesi uygulanarak veriler alınmıştır.
- Türkiye sınırlarını içeren bir sınır dosyası ile ülke sınırları maskelenmiş, analiz yalnızca bu alan üzerinde gerçekleştirilmiştir.
- Her kirletici için ilgili zaman aralığında aylık ortalama hesaplaması yapılmış ve bu görüntüler görselleştirme parametreleri (renk paleti, minimum-maksimum değer aralığı) ile haritalanmıştır. İndirilen veriler ile kirletici türlerine göre tematik haritalar oluşturulmuştur.
- Raster verilerden istatistiksel değerler alınarak, her ay için Türkiye geneline ait ortalama kirletici değerleri hesaplanarak aylık değişimi gösteren grafikler hazırlanmıştır.

3.3.2. Türkiye COVID-19 vaka verileri

COVID-19 pandemisi dünya genelinde ve Türkiye’de birçok tedbir ve kısıtlamalar uygulanmasına neden olmuştur. Türkiye’de görülen ilk COVID-19 vakası 11 Mart 2020 tarihinde. İlk vakanın ardından Sağlık Bakanlığı ve bilim kurulunun kararıyla birçok sosyal, ekonomik ve idari kısıtlamalar getirilmiştir. Getirilen kısıtlamalarda kısmi, tam kapanmalar, sokağa çıkma yasakları, şehirlerarası seyahat kısıtlaması, uzaktan eğitim ve uzaktan çalışma gibi sistemlere geçiş yapılmıştır (T.C. Sağlık Bakanlığı 2020)

Türkiye’de kapanma ve kısıtlamaların tarih aralıkları ve türleri Çizelge 3.16’da verilmiştir. Çizelgeye baktığımızda ilk vaka 2020 Mart ayında başlamıştır ve ardından vakaların artmasıyla kısıtlamalar ve kapanmalar uygulanmaya başlanmıştır. 2020 Yılında ilk vakadan sonra 30 Büyükşehir ve Zonguldak’ta ilk kısıtlama gelmiştir ve ardından kısıtlamalar 2020 yılında belirli aralıklarla devam etmiştir. 2021 yılında da devam eden COVID-19’un önüne geçebilmek için bu yılda da kapanmalar ve kısıtlamalar uygulanmıştır. 2022 yılında aşılama ile COVID vakalarının etkisi biraz kırıldığı için kısıtlamalar kalkmıştır sadece maske-mesafe önlemleri alınmış ve normal hayata geçiş artık başlamıştır. Karantina döneminde kapanmaların en çok 2020 ve 2021 yılları içinde Mart-Nisan-Mayıs-Haziran aylarında olduğu görülmektedir. Bu yüzden tez çalışmasında analizler yapılırken belirtilen aylarda (mart-nisan-mayıs-haziran) hava kirliliğinin nasıl etkilendiği incelenmektedir.

Çizelge 3.15. Türkiye’de COVID-19 Pandemisi Kapanma ve Kısıtlama Dönemleri (T.C. İçişleri Bakanlığı 2021)

Tarih Aralığı	Kapanma Türü / Süreç	Kısıtlamaların İçeriği
2020	Kapanma var	
11 Mart 2020	İlk Vaka	Türkiye’de ilk COVID-19 vakası tespit edildi.
11-12 Nisan 2020	İlk Hafta Sonu Kısıtlaması	30 büyükşehir ve Zonguldak’ta hafta sonu sokağa çıkma yasağı uygulandı. Marketler ve eczaneler açık kaldı.
23-26 Mayıs 2020	Ramazan Bayramı Kapanması	81 ilde 4 günlük tam kapanma uygulandı.
Mayıs-Haziran-Temmuz 2020	Kademeli normalleşme	Kademeli normal süreci geçme
2021	Kapanma var	
14-28 Nisan 2021	Kısmi kapanma	Normalleşme sürecinden sonra kapanma
29 Nisan- 17 Mayıs 2021	Tam Kapanma	Ülke genelinde kesintisiz sokağa çıkma yasağı uygulandı.

Çizelge 3.15. Devamı

17 Mayıs- 1 Haziran 2021	1. Etap Kademeli Normalleşme	Hafta içi belirli saatlerde, hafta sonu sokağa çıkma yasağı
Haziran 2021	Aşılama Hız Kazandı	Sinovac ve BioNTech aşıları hızla uygulanmaya başlandı. Günlük aşılanan kişi sayısı 1 milyon seviyelerine ulaşmıştır
1 Haziran- 9 Temmuz 2021	2. Etap Kademeli Normalleşme	Hafta içi günlerde belirli saatlerde sokağa çıkma yasağı
2022	Kapanma yok	Yerel önlemler alındı
Ocak 2022	Omicron Varyantı Dalgası	Omicron etkisiyle vaka sayıları rekor seviyelere ulaştı. Kısıtlamalar kaldırılıp, maske-mesafe tedbirleri sürmektedir.
1 Mart 2022	Maske-Mesafe Serbestleşmesi	Kapalı alanlarda maske zorunluluğu kaldırıldı. Türkiye, normalleşme sürecine tam anlamıyla geçmektedir.

3.2.3. Türkiye geneli sosyo-mekansal analizler

Çalışmada, yerleşim alanlarının mekânsal dağılımını analiz edebilmek amacıyla yerleşim alanlarının verilerini Sentinel-5P uydu görüntüleri ile karşılaştırılarak görsel analiz yapılmıştır. Hava kirleticilerinin (NO₂, SO₂, CO) yoğunluğunun yerleşim birimleriyle olan ilişkisi görselleştirilmiştir. Böylece, kentsel nüfusun yoğun olduğu bölgelerde hava kirliliği düzeylerinin daha belirgin olup olmadığı incelenmiştir. Sanayi alanlarının mekânsal dağılımı da hava kirliliği üzerindeki etkilerinin incelenmesi amacıyla analiz edilmiştir. Sanayi alanlarını temsil eden OSB verileri, T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'nın resmi kaynaklarından temin edilmiş ve CBS ortamına aktarılmıştır. Uydu görüntülerinden elde edilen NO₂, SO₂ ve CO yoğunluklarının görüntüleri ile OSB alanlarının yerleri arasındaki ilişkiyi görmek için üst üste getirilmiştir. OSB alanlarının bulunduğu bölgelerdeki hava kirletici yoğunluklarının değişimi görsel olarak değerlendirilmiş ve kent merkezleriyle karşılaştırmalı yorumlar yapılmıştır. Böylece sanayi bölgelerinin konumu ile hava kirliliği düzeyleri arasındaki potansiyel ilişkiler ortaya koyulmuştur. Termik santrallerin hava kirliliği üzerindeki etkilerini değerlendirebilmek amacıyla da Türkiye genelinde faaliyet gösteren termik santrallerin konum verileri CBS ortamına aktararak uydu tabanlı hava kirliliği verileri (CO, SO₂, NO₂) ile karşılaştırılmıştır. Böylece, termik santrallerin çevresel etkileri mekânsal olarak değerlendirilmiş ve hava kalitesi üzerindeki rolü görselleştirilmiştir.

3.2.4. Beş büyükşehir özelinde uydu verileri analizi

Beş büyükşehir (İstanbul, Ankara, İzmir, Bursa ve Antalya) özelinde hava kirliliği analizinde Sentinel-5P uydusundan elde edilen NO₂, SO₂ ve CO verileri kullanılmıştır. Uydu verileri ile hava kalitesi izleme istasyonlarından elde edilen yer istasyon verileri karşılaştırılarak doğrulama analizi yapılmıştır. Süreç adım adım aşağıdaki şekilde yürütülmüştür:

- NO₂, SO₂ ve CO verileri için sırasıyla COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_ NO₂, COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_ SO₂, COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_ CO veri kümeleri kullanılmıştır.
- 2019–2022 yılları arasındaki dört yıllık dönem için aylık ortalama kirletici yoğunluğu hesaplamaları yapılmıştır.
- Beş büyükşehirin sınırları (İstanbul, Ankara, İzmir, Bursa ve Antalya), GEE platformunda sınır verileriyle maskelenerek iller üzerinde analiz gerçekleştirilmiştir. Her il için ve her ay için ortalama raster görüntüler hesaplanmıştır.
- Her ilin hava kalitesi izleme istasyonlarına ait koordinatlar (enlem-boylam bilgileri) toplanmıştır. Bu koordinatlar daha sonra veri karşılaştırma analizinde kullanılmıştır.
- Uydu raster verilerindeki kirletici yoğunlukları, her bir istasyonun koordinatından sayısal olarak alınmıştır. Her bir şehir ve her bir istasyon için, aylık ortalama kirletici değerleri ile grafikler oluşturulmuştur. Bu grafiklerle, aynı konumun uydu verileri ile yer istasyon verileri karşılaştırılmıştır.

3.2.5. Beş büyükşehir özelinde hava kalitesi istasyon analizleri

Çalışmanın ikinci aşamasında, Türkiye'nin beş büyükşehirinde (İstanbul, Ankara, İzmir, Bursa ve Antalya) illeri özelinde hava kalitesi istasyon verileri incelenmiştir. Bu kapsamda izlenen adımlar aşağıda sıralanmıştır:

- Her il için mevcut hava kalitesi izleme istasyonları değerlendirilmiş ve verileri daha kapsamlı ve düzenli olan istasyonlar tercih edilmiştir. Bu doğrultuda seçilen istasyonlar şunlardır:

İstanbul: Başakşehir ve Ümraniye

Ankara: Sıhhiye ve Bahçelievler

İzmir: Bornova

Bursa: İnegöl

Antalya: Kepez

- Belirlenen istasyonlara ait NO₂, SO₂ ve CO verileri, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından yayınlanan Hava Kalitesi Bülten Raporları üzerinden temin edilmiştir. Bu raporlar genellikle aylık veya yıllık olarak PDF formatında yayınlanmakta olup, her kirletici için ölçüm değerleri içermektedir.
- Bülten raporlarından elde edilen veriler, ilgili istasyon ve kirleticiye göre her yıl için ayrı sayfalarda düzenlenmiştir. Eksik, sıfır veya hatalı veriler ayıklanarak veriler temizlenmiştir.
- 2019–2022 yılları arasında her bir istasyon ve kirletici için aylık ortalama değerler üzerinden grafikler hazırlanmıştır. Bu grafiklerde her ilin aylık kirlilik değişimleri izlenmiştir.

3.2.6. Doğrusal regresyon analizi

Türkiye Geneli Uydu ve İstasyon Verisi Karşılaştırması

Burada Sentinel-5P uydu verileriyle Türkiye Hava Kalitesi İzleme Sistemi istasyon verilerini aynı kirletici türleri için karşılaştırarak tek değişkenli regresyon analizi üretilmiştir.

- Değişkenler: NO₂, SO₂, CO
- Yıl: 2021
- Veri tipi: Aylık ortalama
- Amaç: Uydu verisi ile yer istasyonlarından elde edilen veriler arasındaki ilişkinin belirlenmesi

Analizde, 2021 yılında Türkiye genelinde Sentinel-5P uydu tabanlı hava kalitesi verileri ile Türkiye Hava Kalitesi İzleme Merkezi (HKİSİM) tarafından sağlanan yer tabanlı istasyon verileri karşılaştırılmıştır. NO₂, SO₂ ve CO parametreleri için aylık ortalama değerler karşılıklı olarak alınarak, her biri için ayrı tek değişkenli doğrusal regresyon analizi yapılmıştır.

Kullanılan model:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \epsilon \quad (3.1)$$

Burada:

- Y: HKİSİM istasyonlarından elde edilen hava kirletici konsantrasyonu
- X: Sentinel-5P uydusundan elde edilen aynı kirleticinin konsantrasyonu
- β_0 : Sabit terim
- β_1 : Hava kirletici regresyon katsayısı
- ϵ : Hata terimi

Amaç: Uydu verisinin yer istasyonu verisiyle istatistiksel olarak örtüşüp örtüşmediğini belirlemek

Bu analizle, uydu verilerinin yer tabanlı gözlemlerle ne ölçüde tutarlı olduğu ortaya konulmuştur. Böylece hem Sentinel-5P verisinin doğruluğu test edilmiş hem de CBS tabanlı analizlerin güvenilirliği desteklenmiştir.

3.2.7. Çoklu regresyon analizi

İl Bazlı Regresyon (5 Büyükşehir)

Regresyon Türü: Çoklu doğrusal regresyon analizi

- Bağımlı değişken: COVID-19 vaka sayısı
- Bağımsız değişken: Aynı anda modele dahil edilen üç hava kirletici (NO_2 , SO_2 , CO)
- İller: İstanbul, Ankara, İzmir, Bursa, Antalya
- Yıl: 2021
- Uydu verileri: Sentinel-5P (GEE üzerinden)
- COVID verileri: Sağlık Bakanlığı tarafından yayımlanan haftalık il bazlı verilerden türetilmiş aylık ortalamalar
- Amaç: Her üç hava kirleticisinin COVID-19 vaka sayıları üzerindeki eşzamanlı etkisini değerlendirmek

Analiz kapsamında, İstanbul, Ankara, İzmir, Bursa ve Antalya illeri için 2021 yılına ait aylık COVID-19 vaka sayıları ile NO_2 , SO_2 ve CO konsantrasyonları arasındaki ilişkiyi incelemek amacıyla çoklu doğrusal regresyon analizi gerçekleştirilmiştir. Her il için hava kalitesi verileri, Google Earth Engine (GEE) platformu aracılığıyla Sentinel-5P uydusundan elde edilmiş; COVID-19 vaka verileri ise T.C. Sağlık Bakanlığı tarafından yayımlanan il bazlı haftalık verilerden aylık ortalamalar hesaplanarak oluşturulmuştur.

Bu analizde kullanılan çoklu regresyon modeli aşağıdaki gibi formüle edilmiştir:

$$Y=\beta_0+\beta_1X_1+\beta_2X_2+\beta_3X_3+ \varepsilon \quad (3.2)$$

Burada:

- Y: Aylık COVID-19 vaka sayısı (bağımlı değişken)
- X₁: Aylık ortalama CO (Karbonmonoksit) konsantrasyonu
- X₂: Aylık ortalama NO₂ (Azot dioksit) konsantrasyonu
- X₃: Aylık ortalama SO₂ (Kükürtdioksit) konsantrasyonu
- β_0 : Sabit terim
- $\beta_1, \beta_2, \beta_3$: Her bir hava kirletici için regresyon katsayıları
- ε : Hata terimi

Bu model, birden fazla hava kirleticinin COVID-19 vaka sayıları üzerindeki eş zamanlı etkisini değerlendirebilmek amacıyla kullanılmıştır. Tek değişkenli regresyonun aksine, çoklu regresyon sayesinde kirleticilerin birbirleriyle olan potansiyel etkileşimleri incelenerek daha güvenilir sonuçlar elde edilmiştir

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Uydu Görüntüleri

4.1.1. CO uydu görüntüleri

Türkiye genelinde Sentinel-5P uydusundan elde edilen 2019–2022 yılları arasındaki CO aylık ortalama değerleri çizelge 4.1’de ve aylık ortalama görüntüleri şekil 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6’da verilmiştir. Çalışmada veriler 2019-2020-2021-2022 yıllarını kapsayarak COVID-19 öncesi, sırası ve sonrası olarak üç aşamada incelenmiştir.

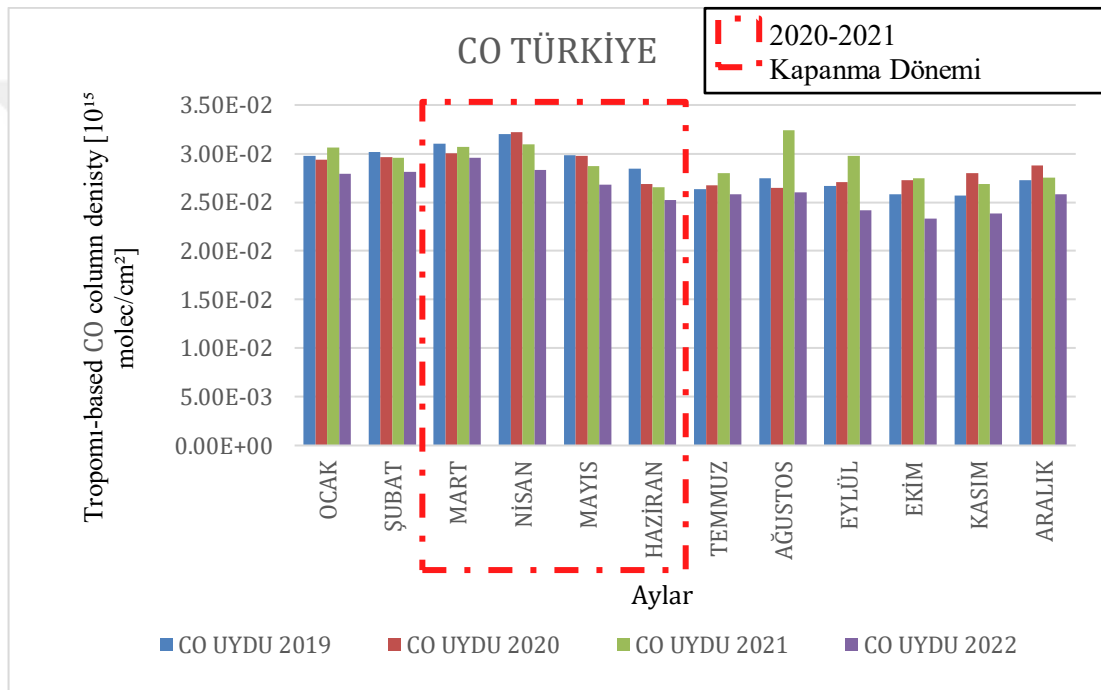
COVID-19 pandemi döneminde 2020-2021 yıllarında en çok kapanma dönemi olarak hava kirleticilerinin değişime uğrayacağı aylar Mart-Nisan-Mayıs ve Haziran olarak belirlenmiştir. Çünkü bu aylar kısıtlamaların en çok yapıldığı aylardır. Veriler incelendiğinde çizelge 4.1’de dört yıllık süreçte CO yoğunluklarında yıllar ve aylar arasında değişkenlik gösteren bir dalgalanma olduğu gözlemlenmektedir. 2019-2022 yıllarında Ocak ve Şubat aylarında tüm yıllarda CO düzeyleri yüksek seyrederken, yılın ortasına doğru özellikle Mayıs, Haziran, Temmuz aylarında CO değerlerinde genel olarak bir düşüş eğilimi gözlenmektedir. Ancak çizelge 4.1’de 2021 yılı Ağustos ayında, diğer yıllara kıyasla belirgin bir artış meydana gelmiş ve bu artışın, o yıl yaşanan büyük orman yangınlarıyla ilişkili olabileceği değerlendirilmektedir.

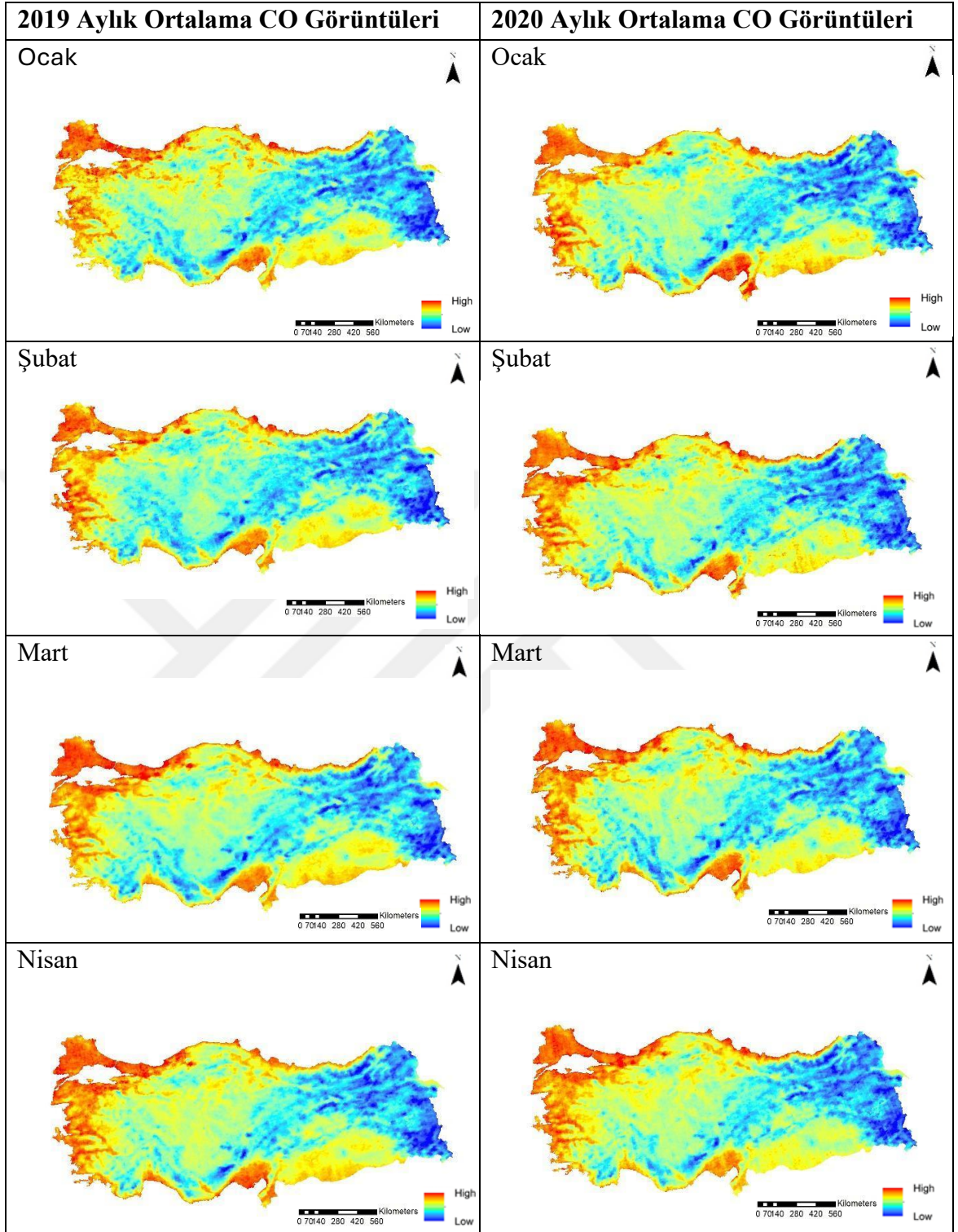
Çalışmada COVID-19 başlamasıyla 2019-2020 yılları arasında COVID-19 öncesi ve sırasında karşılaştırıldığında şekil 4.1’de verilen iki yılın değişimlerine baktığımızda Ocak-Şubat aylarında 2020 yılında belirgin düşüşler gözlenmektedir. Şekil 4.1 ve şekil 4.2’de Mart-Nisan-Mayıs-Haziran kapanma döneminde 2020 yılında CO seviyelerinde düşüş gözlenmektedir. Şekil 4.3’te 2020-2021 yıllarında Ekim-Kasım-Aralık aylarında ise kapanmanın azalmasıyla CO seviyelerinde artış olduğu gözlenmektedir. 2020-2021 COVID dönemi olarak kendi içinde değerlendirdiğimizde şekil 4.1 2020 yılı ve şekil 4.4 2021 yılında Ocak-Şubat aylarında 2021 CO seviyeleri yüksek çıkmaktadır. Şekil 4.1 ve şekil 4.4 Mart-Nisan-Mayıs-Haziran kapanma döneminde 2021 yılında 2020 yılına göre CO seviyelerinde çok az da olsa düşüşler gözlenmektedir. Bu durum, pandemi sürecinde uygulanan sokağa çıkma yasakları, ulaşım ve sanayi faaliyetlerindeki azalma ile ilişkilendirilebilir. Bu geçici kısıtlamalar, CO emisyonlarını da doğrudan etkilemiş ve hava kalitesinde kısa süreli iyileşmelere yol açmıştır. Kısıtlamaların gevşemesiyle birlikte diğer aylarda şekil 4.5 ve şekil 4.6 da 2021 yılında CO seviyelerinde artış gözlenmektedir. Bununla birlikte COVID-19 pandemi sonrası şekil 4.4, 4.5, 4.6’da 2022 yılına baktığımızda ise CO emisyon seviyesinin diğer yıllara göre çok daha düşük olduğu görülmektedir.

Karbonmonoksit (CO) değerlerinin şekil 4.1, şekil 4.2, şekil 4.3, şekil 4.4, şekil 4.5 ve şekil 4.6’da görüldüğü gibi deniz kenarlarında yüksek çıkmasının temel nedenlerinden biri, bu bölgelerde bulunan limanlar, gemi trafiği ve kıyıya yakın ulaşım yoğunluğudur. Özellikle büyük limanlara sahip şehirlerde, gemilerin çalışır durumda beklemesi ve dizel motor kullanımı sonucunda atmosfere yoğun miktarda CO salımı gerçekleşmektedir (Goldsworthy 2013). Bunun yanı sıra, kıyı şehirlerinde kara trafiği yoğunluğu ve turizm hareketliliği, yaz aylarında nüfus artışı ile CO emisyonlarını artırmaktadır. Ayrıca kıyı kentlerinde bulunan endüstriyel tesisler, rafineriler ve ısınma amaçlı yakıt kullanımı, CO konsantrasyonunu yükselten diğer önemli kaynaklardır

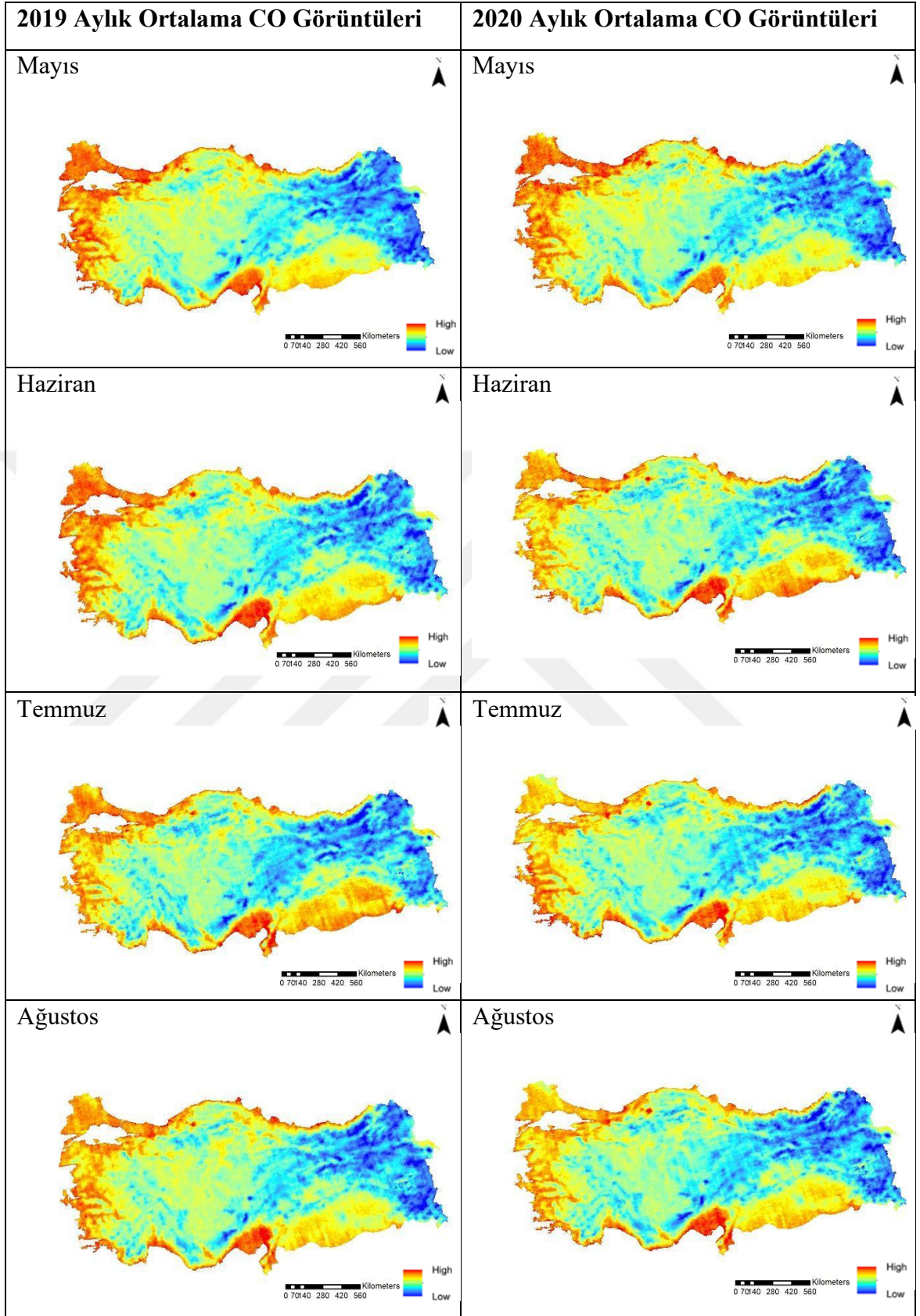
(Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı 2023). Meteorolojik açıdan değerlendirildiğinde ise deniz meltemlerinin kirleticileri karaya taşıması ve hava hareketlerinin zayıf olduğu dönemlerde kirleticilerin dağılmadan yere yakın seviyelerde birikmesi, CO'nun atmosferde yoğunlaşmasına neden olabilir. Bu durum, kıyı bölgelerinde CO kirliliğinin iç kesimlere kıyasla daha yüksek olmasını açıklamaktadır. COVID-19 öncesi, sırası ve sonrası olarak büyükşehirleri incelediğimizde İstanbul, Ankara, İzmir, Bursa, Antalya'da 2019-2020 aralığında CO değerleri düşmüştür, 2020-2021 aralığında illerde CO seviyelerinde bazı bölgelerde kısıtlamaların azalmasıyla CO seviyelerinde yükselme yaşanmıştır.

Çizelge 4.1. Türkiye 2019-2020-2021-2022 Yılları CO Aylık Ortalamaları

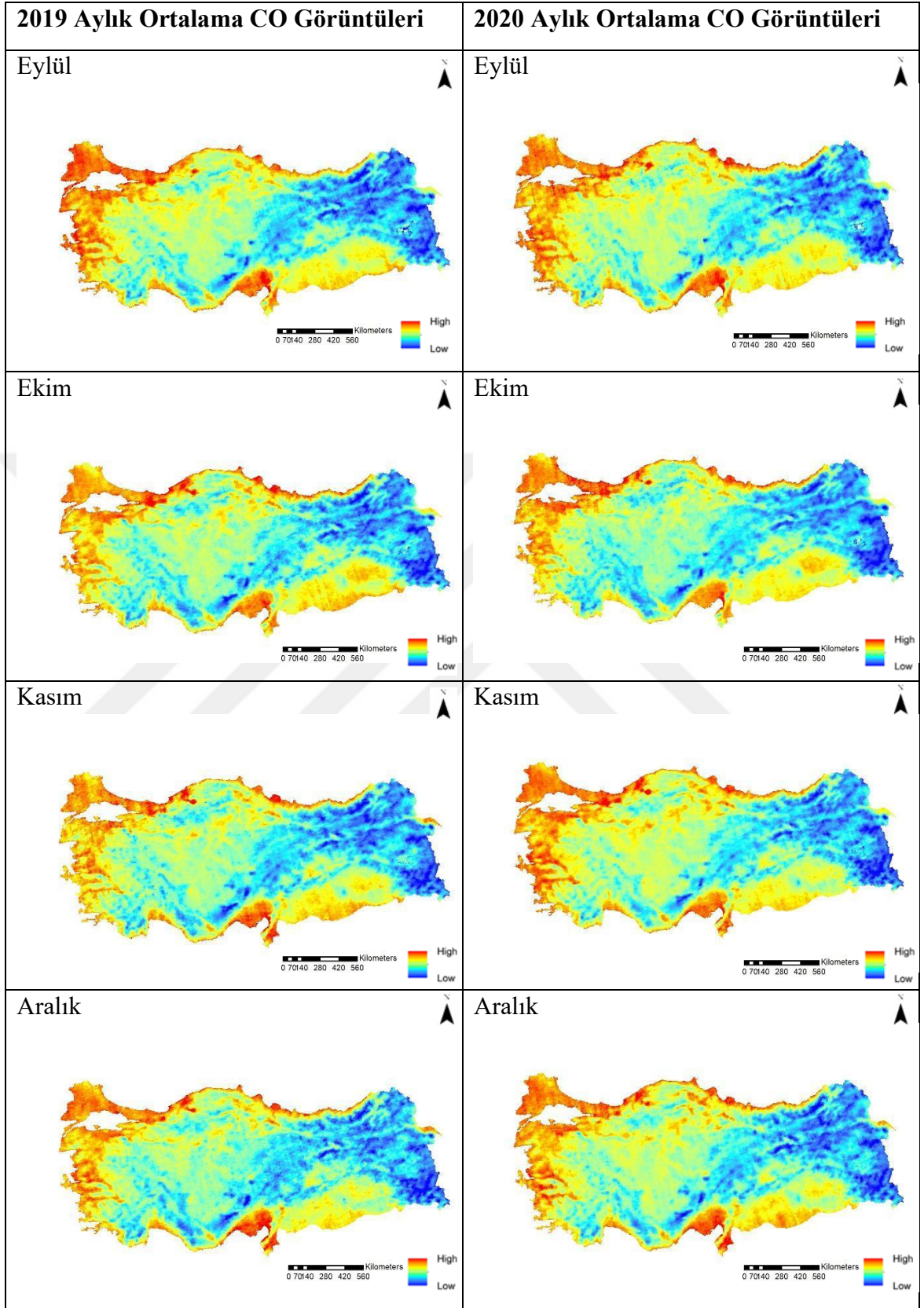




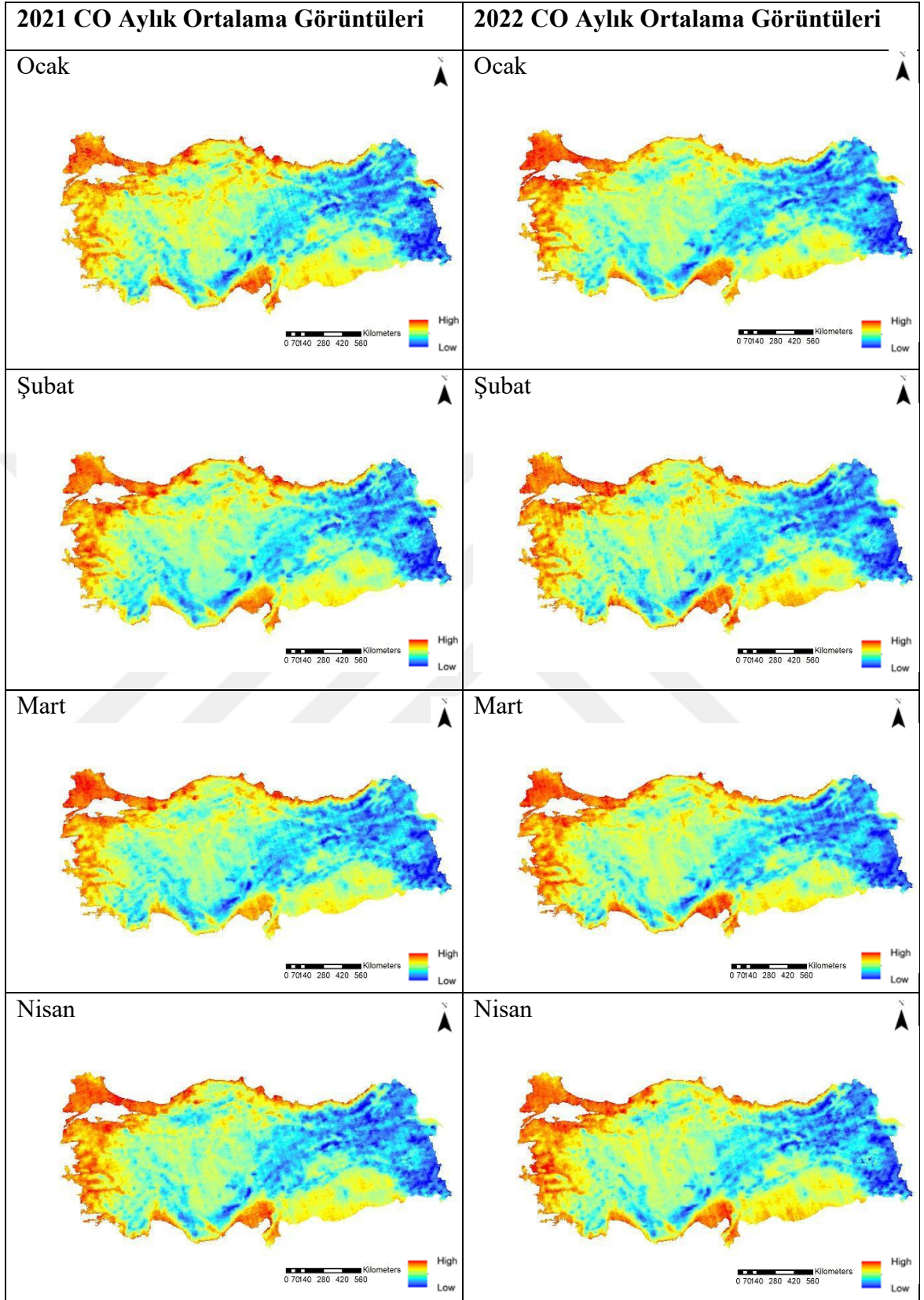
Şekil 4.1. Türkiye 2019-2020 yılları Ocak-Şubat-Mart-Nisan ayları CO Aylık Ortalama Görüntüleri



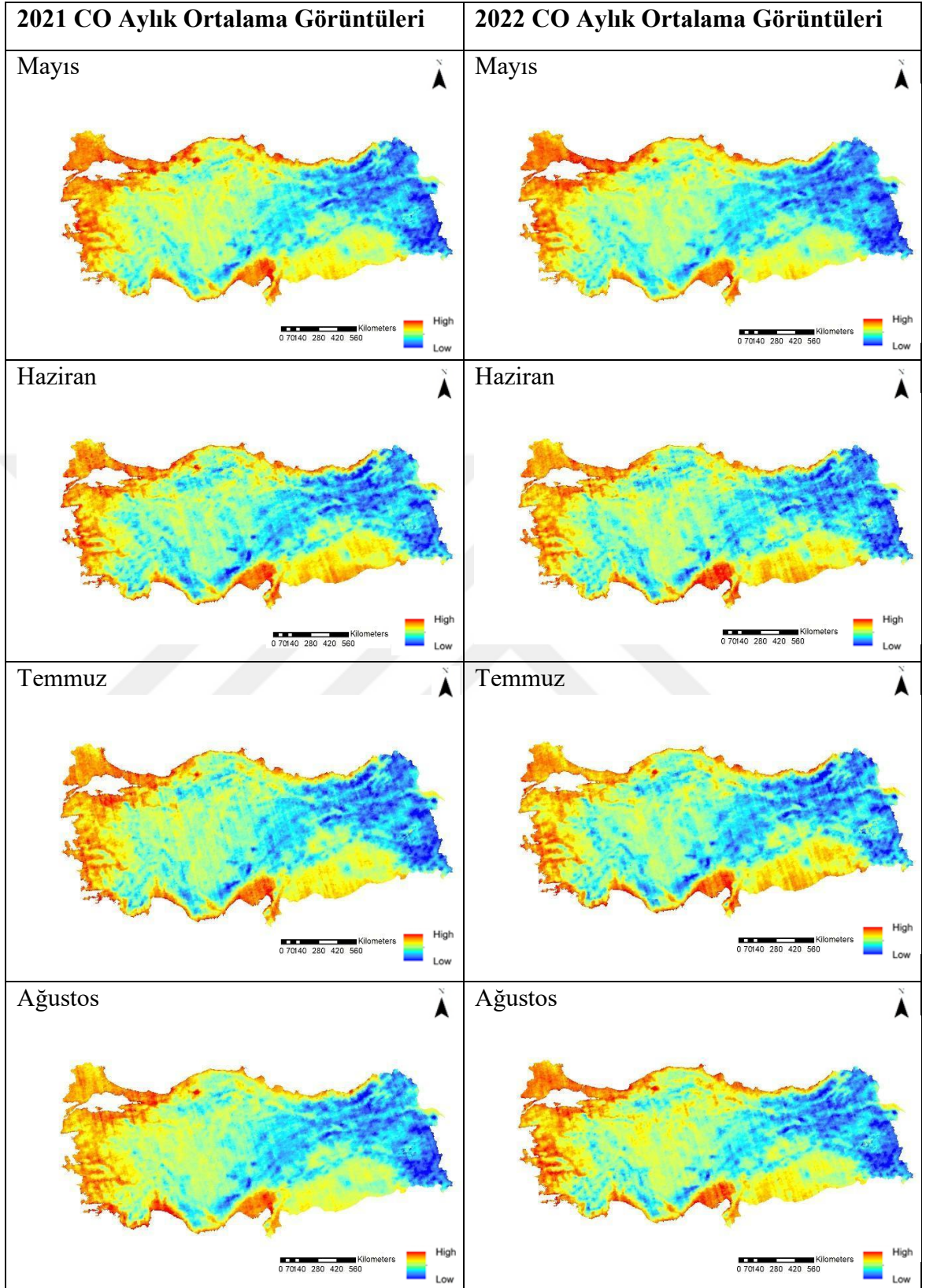
Şekil 4.2. Türkiye 2019-2020 Mayıs, Haziran, Temmuz, Ağustos Ayları CO Aylık Ortalama Görüntüleri



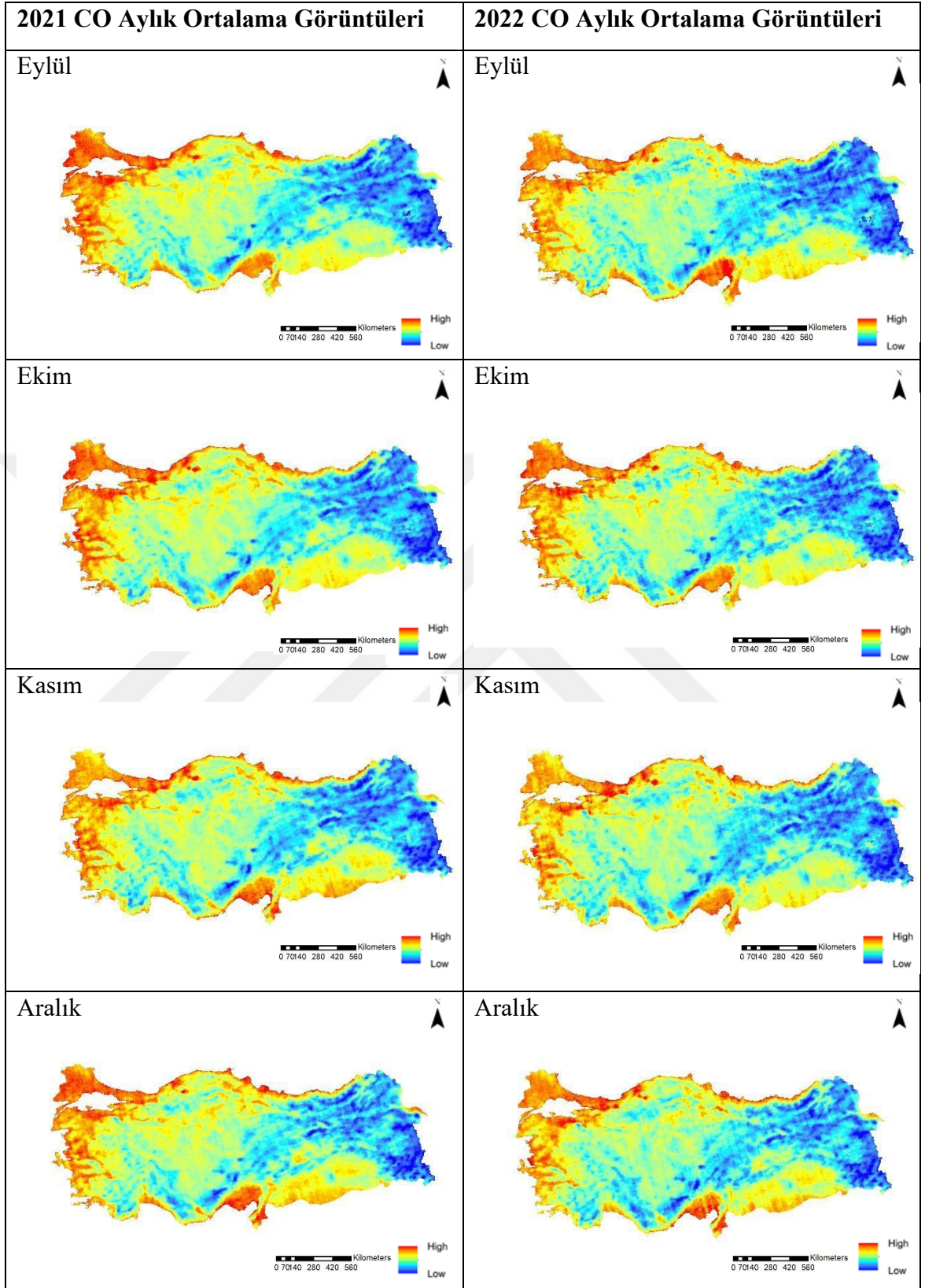
Şekil 4.3. Türkiye 2019-2020 yılları Mayıs, Haziran, Temmuz, Ağustos ayları CO Aylık Ortalama Görüntüleri



Şekil 4.4 Türkiye 2021-2022 yılları Ocak-Şubat-Mart-Nisan ayları CO Aylık Ortalama Görüntüleri



Şekil 4.5. Türkiye 2021-2022 yılları Mayıs, Haziran, Temmuz, Ağustos ayları CO Ortalama Görüntüleri



Şekil 4.6. Türkiye 2021-2022 yılları Eylül, Ekim, Kasım, Aralık ayları CO Ortalama Görüntüleri

4.1.2. SO₂ uydu görüntüleri

Türkiye genelinde Sentinel-5P uydusundan elde edilen 2019–2022 yılları arası SO₂ verilerine ait aylık ortalama değerler çizelge 4.2’de, aylık ortalama görüntüler ise 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11 ve 4.12’de sunulmuştur. Çalışmada veriler COVID-19 öncesi, sırası ve sonrası olarak üç aşamada incelenmektedir.

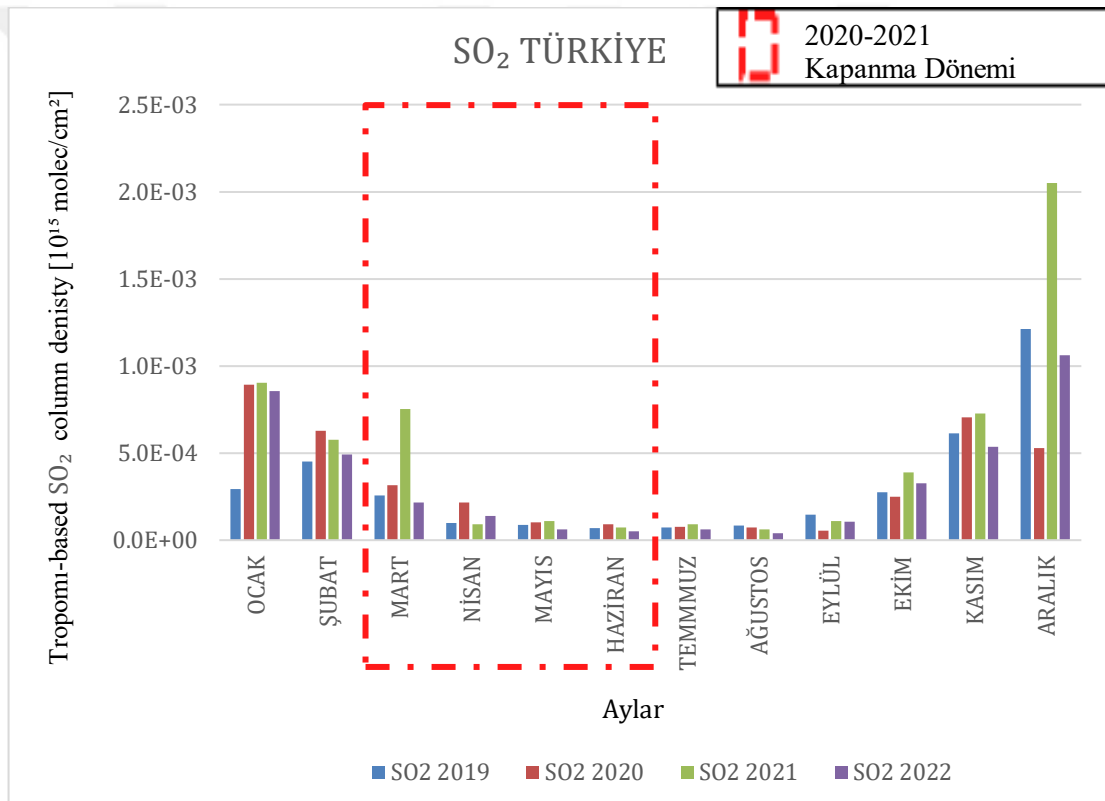
Genel olarak değerlendirildiğinde, dört yılda SO₂ yoğunluklarında yılın ilk ve son aylarında yükselip, yaz aylarında ise belirgin bir düşüş eğilimi gözlemlenmektedir. Ocak, şubat aylarında SO₂ seviyeleri tüm yıllarda diğer aylara kıyasla daha yüksek çıkmaktadır. Bu artış, kış aylarında ısınma amaçlı fosil yakıt kullanımının artması ve meteorolojik koşulların kirleticileri atmosferde tutması ile açıklanabilir.

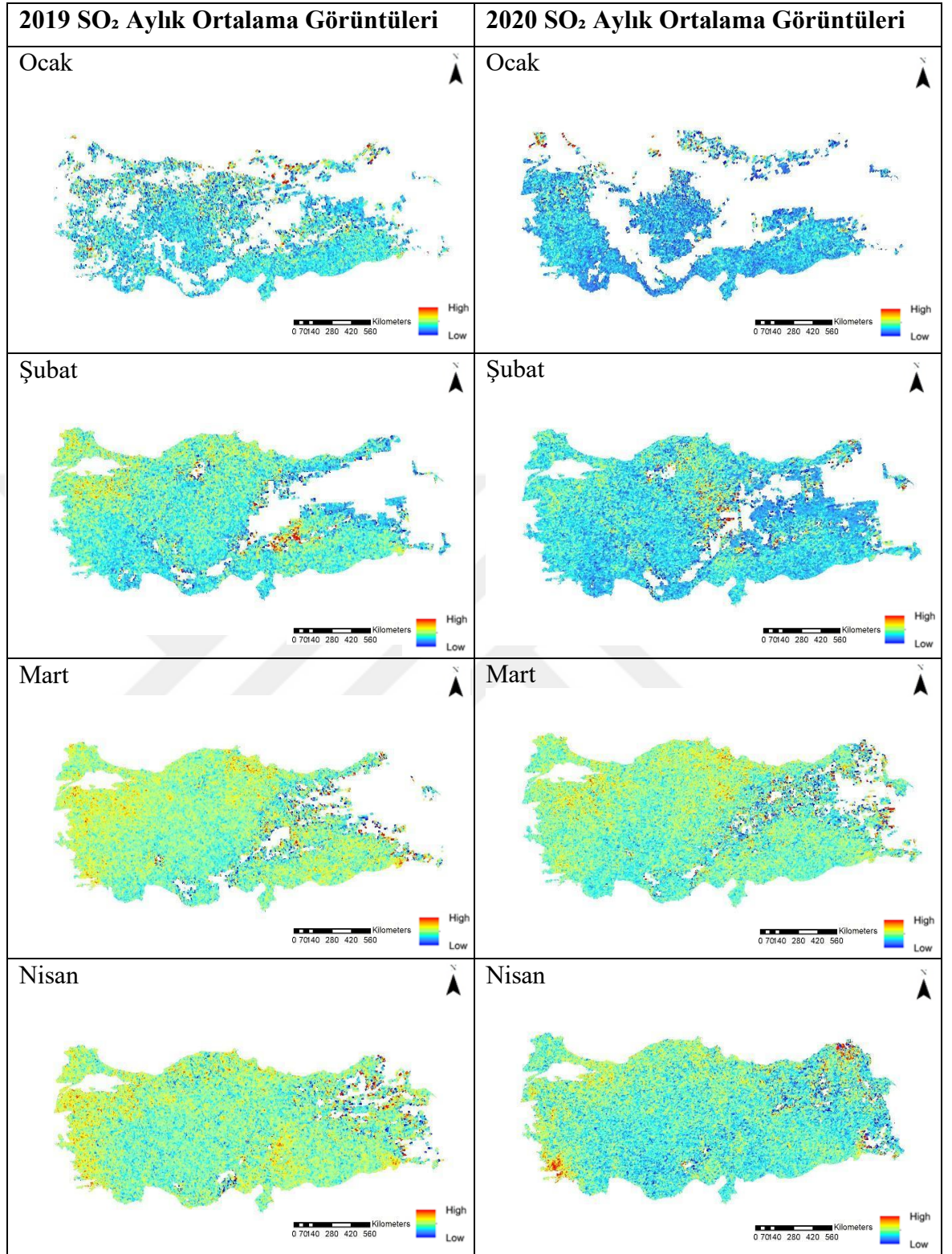
Çizelge 4.2 incelendiğinde 2019-2020 yılları COVID-19 öncesi ve dönemi karşılaştırıldığında COVID-19 başlamadan şekil 4.7’de 2020 yılı Ocak ve Şubat aylarında SO₂ seviyelerinde yükselme görülmektedir. Pandeminin başlamasıyla şekil 4.7 ve şekil 4.8’de Mart-Nisan-Mayıs-Haziran kapanma dönemlerinde genel olarak ilk aylara göre SO₂’de düşüş gözlenmektedir. Bu aralıkta 2020 yılında 2019’a kıyasla çok az yükselmiş ve daha sonra düşüş gözlenmiştir. Şekil 4.9’da görüldüğü gibi Eylül-Ekim-Kasım-Aralık aylarında diğer aylara göre SO₂ seviyelerinde yükselme olmuş fakat şekil 4.9 ve şekil 4.12’ye baktığımızda 2019-2022 yılları arasında bu aylarda diğer yıllara kıyasla genel olarak 2020 yılında düşüşler gözlenmektedir. Bu durum, pandemi nedeniyle uygulanan sokağa çıkma yasakları, sanayi faaliyetlerinin yavaşlaması ve ulaşımda azalma ile doğrudan ilişkilidir. Özellikle enerji ve sanayi kaynaklı emisyonların SO₂’nin başlıca kaynağı olması, bu düşüşü anlamlı kılmaktadır. Şekil 4.7 ve şekil 4.10’da 2020-2021 yıllarına baktığımızda Ocak-Şubat ayları SO₂ seviyeleri eşit görülmektedir. Şekil 4.10’da Mart ayında SO₂ seviyeleri 2021 yılında yüksek, şekil 4.11’de görüldüğü gibi Nisan-Mayıs-Haziran aylarında ise SO₂ seviyeleri düşük görülmektedir. Şekil 4.11’de Temmuz-Ağustos ayında SO₂ seviyeleri eşit daha sonra şekil 4.12’de görüldüğü gibi kalan diğer aylarda 2021 yılında SO₂ seviyeleri düşük gözlenmektedir. Şekil 4.10, 4.11, 4.12’de 2021- 2022 yıllarını kıyasladığımızda 2022 yılında SO₂ seviyeleri bütün aylarda diğer yıllara göre düşük çıkmaktadır.

Tez çalışmasında şekil 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11 ve 4.12 de görüldüğü gibi Sentinel-5P uydusundan elde edilen SO₂ verilerinde, bazı bölgelerde görüntü eksiklikleri gözlemlenmiştir. Bu durum, uydunun geçişi sırasında meydana gelen bulutluluk, atmosferik koşullar ve yüzey yansıma oranlarının yüksek olması nedeniyle verilerin güvenilir şekilde elde edilememesinden kaynaklanmaktadır (ESA 2023). Özellikle bulut maskesi uygulanırken, yoğun bulut örtüsü bulunan alanlarda veriler otomatik olarak elenmekte ve bu durum haritalarda boşluklar oluşmasına neden olmaktadır (ESA 2023). Şekil 4.7 ve 4.8 incelediğimizde 2019-2020 yılları Nisan, Mayıs aylarında Ege ve Marmara bölgelerinde SO₂ yoğunluğu artmaktadır. Şekil 4.8, 4.9 ve 4.10’a baktığımızda Haziran, Temmuz, Ağustos, Eylül ve Ekim aylarında özellikle Muğla ve Kahramanmaraş’ta bulunan termik santraller bölgesinde SO₂ yoğunluğunun arttığını görülmektedir. SO₂ konsantrasyonlarının bazı bölgelerde yaz aylarında artış göstermesi, bölgesel enerji üretimi ve sanayi faaliyetlerinin dönemsel yoğunluğuyla doğrudan ilişkilidir. Özellikle Elbistan, Muğla ve Yatağan gibi termik santrallerin yoğun olarak faaliyet gösterdiği bölgelerde, yaz aylarında elektrik tüketiminin artmasına bağlı olarak enerji üretim faaliyetlerinde artış görülmektedir. Bu artış, fosil yakıtların özellikle linyit

kömürünün daha fazla yakılmasıyla sonuçlanmakta ve atmosfere yayılan SO₂ miktarını yükseltmektedir (Temiz Hava Hakkı Platformu 2024). Ayrıca yaz aylarında SO₂ oluşumunda güneş ışınlarının etkisiyle atmosferdeki kimyasal reaksiyonlar hızlanmakta, bu da özellikle endüstriyel emisyonların bulunduğu bölgelerde SO₂'nin ikincil kirleticiler olarak daha yoğun gözlemlenmesine neden olabilmektedir. Kurak ve sıcak hava koşulları, SO₂'nin atmosferde daha uzun süre kalmasına sebep olurken, yağışın azlığı da havadaki kirleticilerin temizlenmesini geciktirmektedir (Karaca ve Camcı 2010). 2020 Yılı COVID-19 döneminde kısıtlamaların artması, sokağa çıkma yasakları ile bu tür faaliyetlerin de azalmasıyla SO₂ düzeyinde azalmalar görülmüştür. 2021-2022 yıllarına baktığımızda şekil 4.10, 4.11, 4.12 incelediğimizde yine yaz aylarında aynı bölgelerde artış görülmüştür.

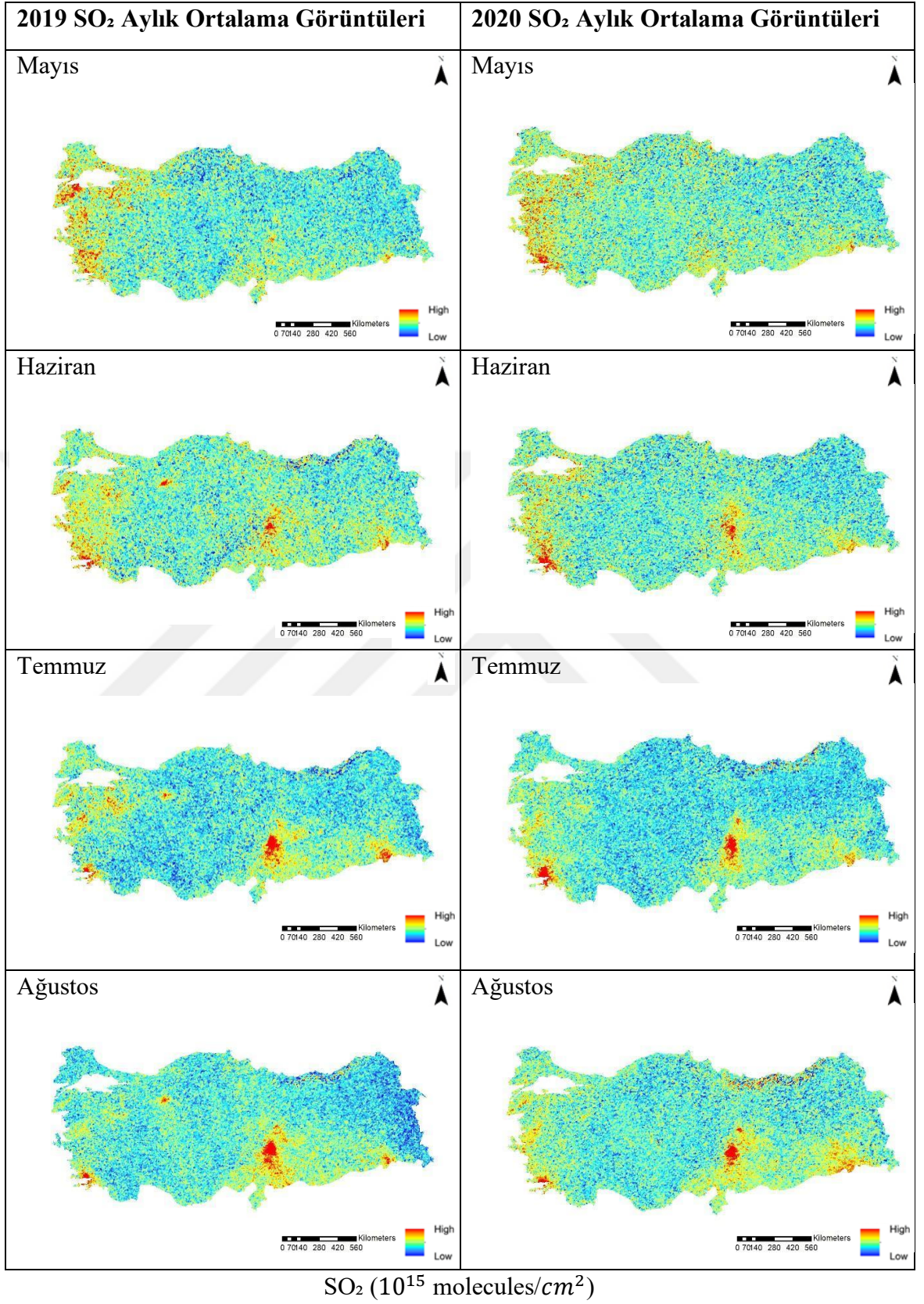
Çizelge 4.2. Türkiye 2019-2020-2021-2022 Yılları SO₂ Aylık Ortalamaları



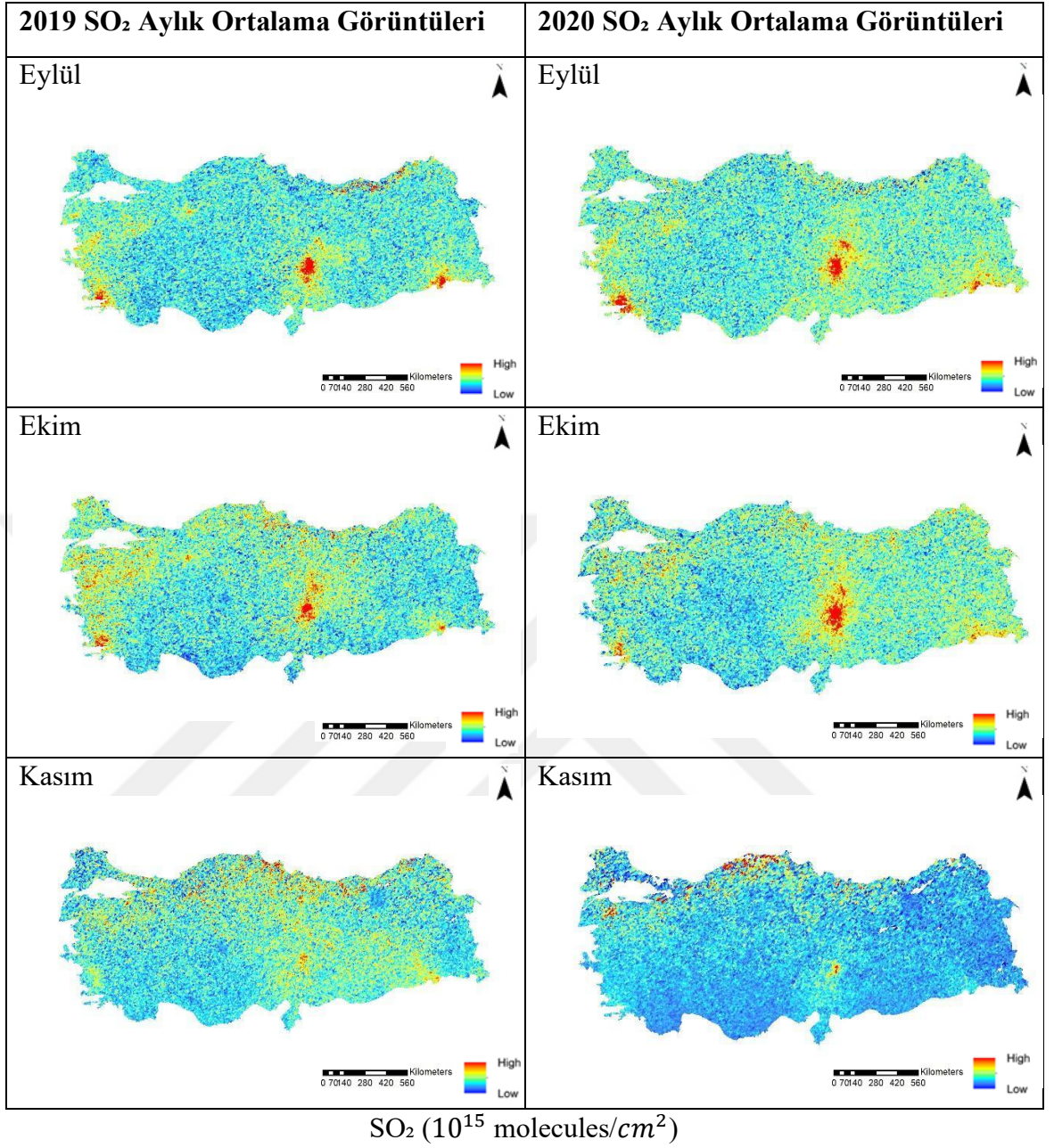


SO₂ (10^{15} molecules/cm²)

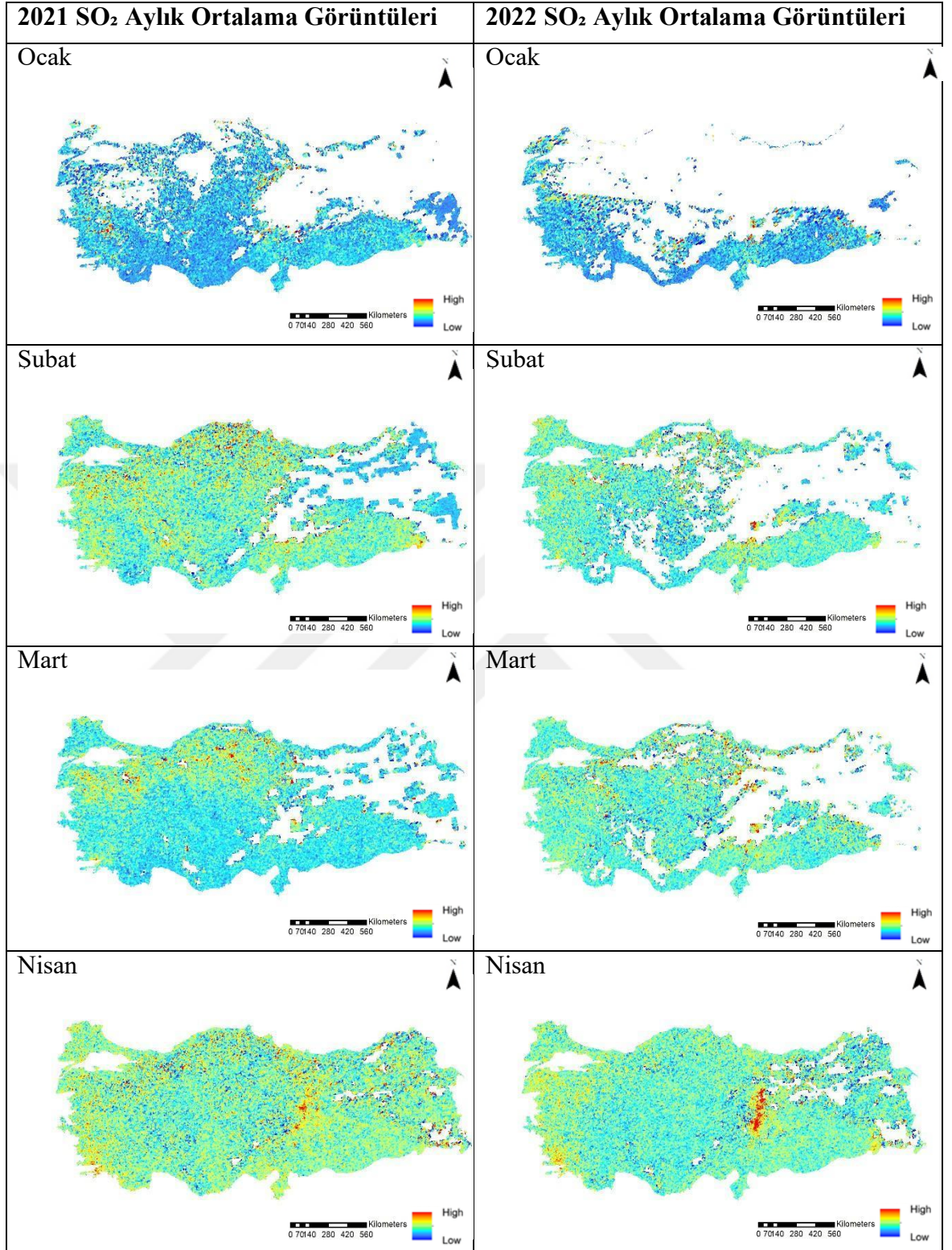
Şekil 4.7. Türkiye 2019-2020 yılları Ocak, Şubat, Mart, Nisan ayları SO₂ Ortalama Görüntüleri



Şekil 4.8. Türkiye 2019-2020 yılları Mayıs, Haziran, Temmuz, Ağustos ayları SO₂ Ortalama Görüntüleri

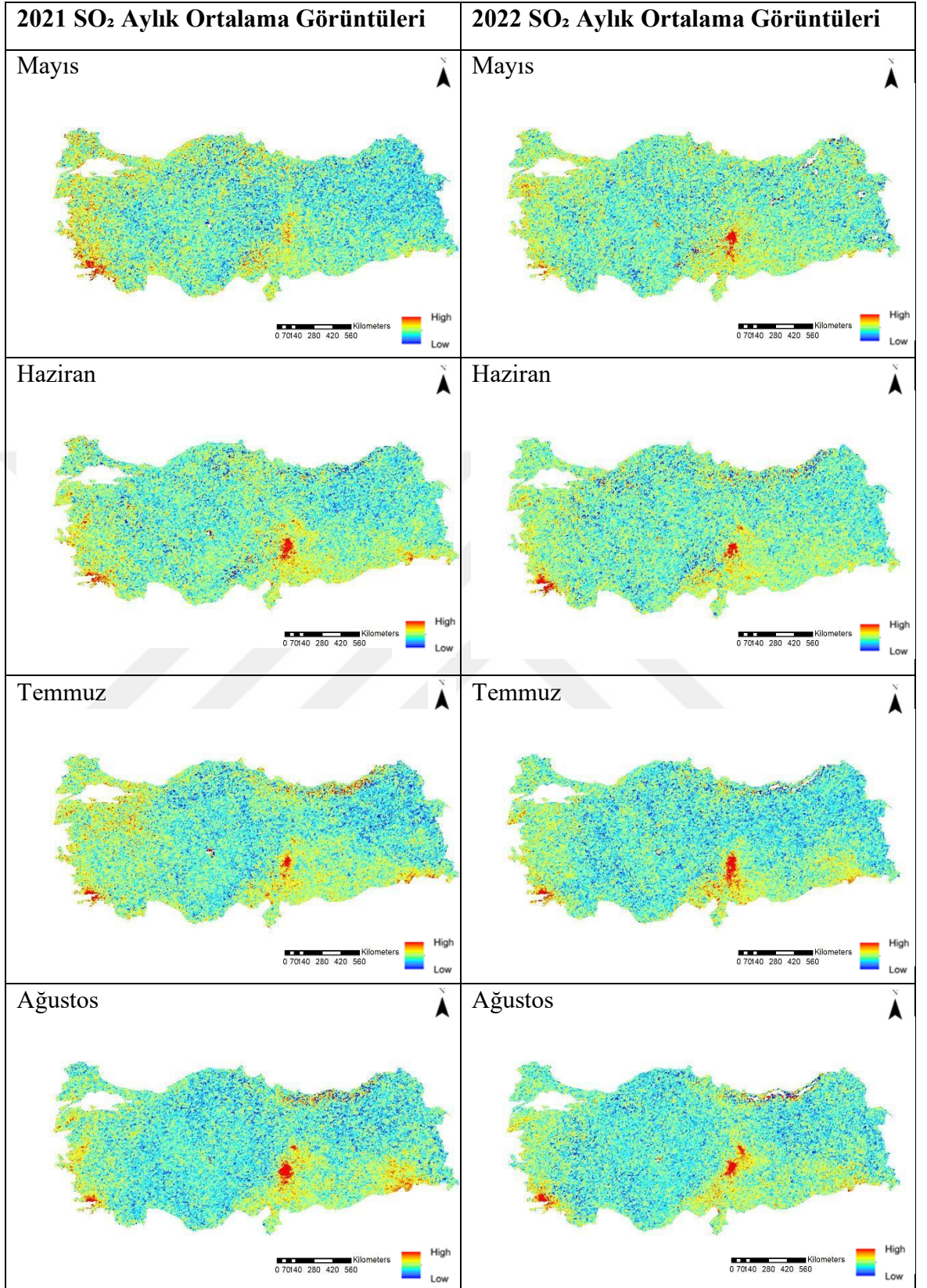


Şekil 4.9. Türkiye 2019-2020 yılları Eylül, Ekim, Kasım ayları SO₂ Ortalama Görüntüleri

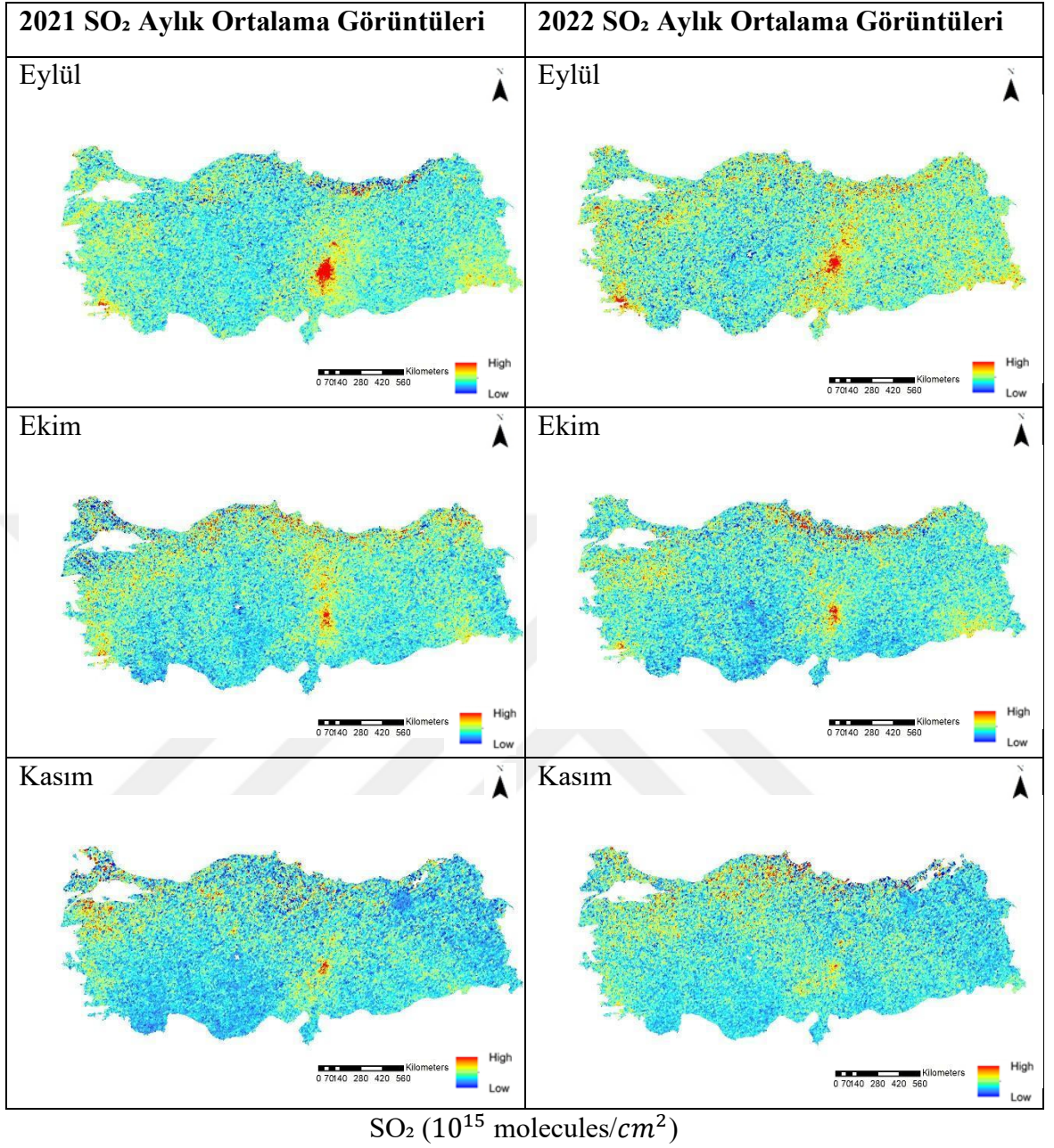


SO₂ (10¹⁵ molecules/cm²)

Şekil 4.10. Türkiye 2021-2022 yılları Ocak, Şubat, Mart, Nisan ayları SO₂ Ortalama Görüntüleri



Şekil 4.11. Türkiye 2021-2022 yılları Mayıs, Haziran, Temmuz, Ağustos ayları SO₂ Ortalama Görüntüleri (10^{15} molecules/cm²)



Şekil 4.12. Türkiye 2021-2022 yılları Eylül, Ekim, Kasım ayları SO₂ Ortalama Görüntüleri

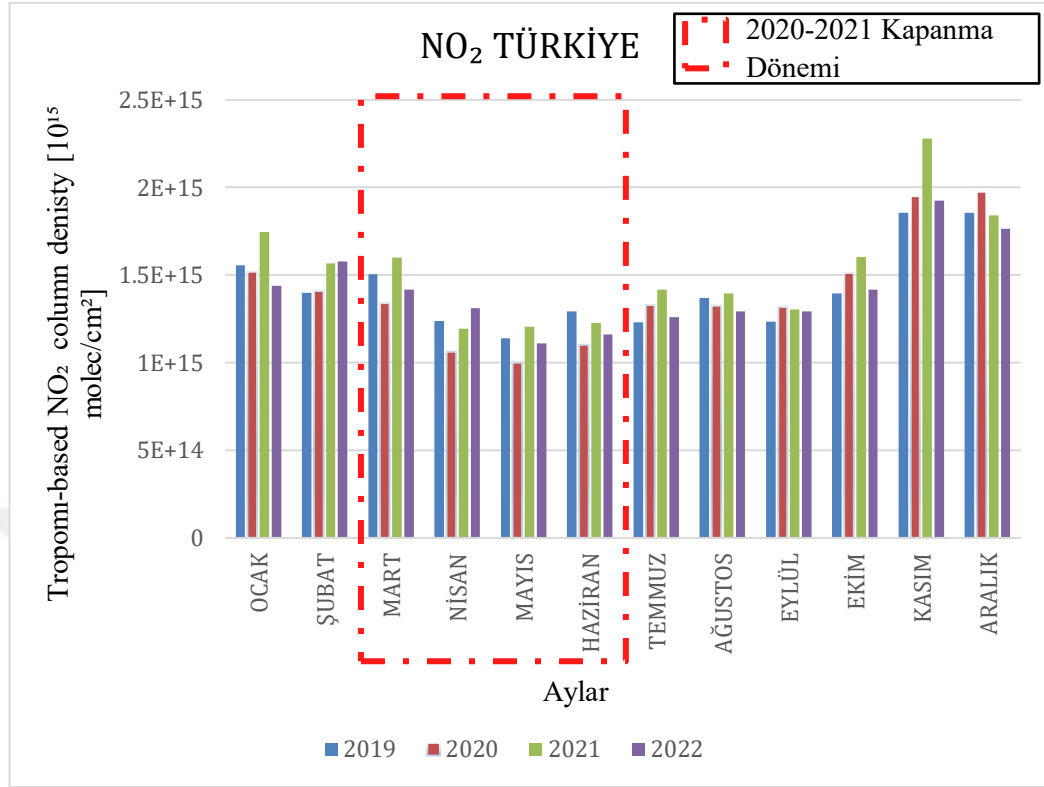
4.1.3. NO₂ uydu görüntüleri

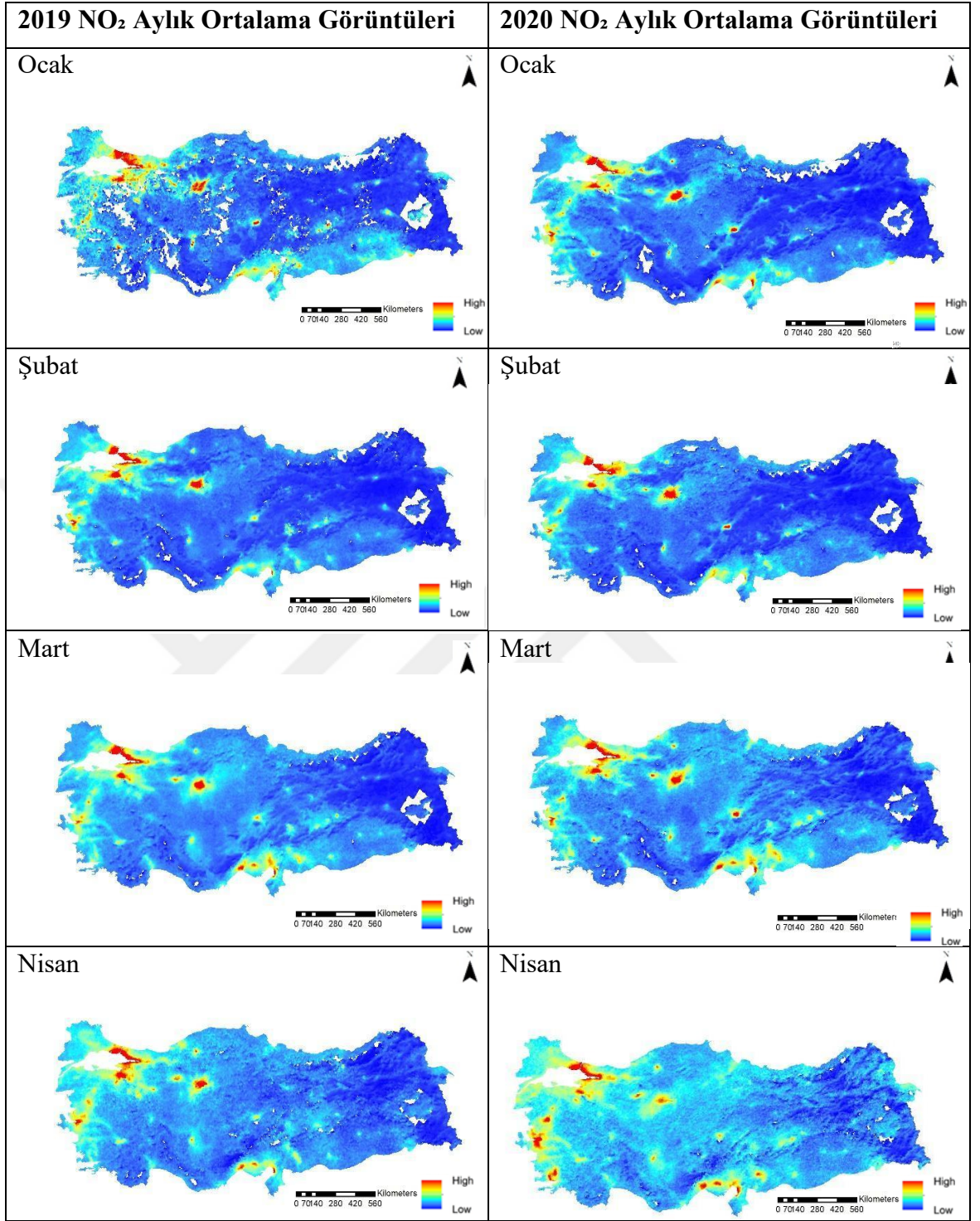
Türkiye geneline ait 2019–2022 yılları arasındaki Sentinel-5P uydu verileri kullanılarak elde edilen NO₂ konsantrasyonlarının aylık dağılımı çizelge 4.3'te, aylık ortalama görüntüleri ise şekil 4.13, 4.14, 4.15, 4.16, 4.17 ve 4.18'de gösterilmiştir. Çalışmada veriler COVID-19 öncesi, sırası ve sonrası olarak üç aşamada incelenmektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, NO₂ düzeylerinde çizelge 4.13'te görüldüğü gibi yılın ilk ve son dönemlerinde daha yüksek, yaz aylarında ise belirgin şekilde düşük seviyeler gözlemlenmektedir. Özellikle 2019-2022 yıllarında Ocak, Kasım ve Aralık aylarında NO₂ seviyelerinin yükseldiği, Haziran–Eylül aralığında ise düştüğü dikkat çekmektedir. Bu durum, kış aylarında ısınma ve trafik yoğunluğu gibi nedenlerle artan NO₂ emisyonlarına, yaz aylarında ise güneşlenme süresinin ve sıcaklıkların artmasına bağlı olarak fotokimyasal reaksiyonlarla NO₂'nin dağılmasına bağlanabilir.

Çizelge 4.3 incelendiğinde 2019-2020 yılları COVID-19 öncesi ve sırası olarak karşılaştırıldığında COVID-19 başlamadan Ocak- Şubat aylarında NO₂ değerleri eşit çıkmaktadır, pandemi başlamasıyla Mart, Nisan, Mayıs, Haziran 2020 yılında NO₂ seviyelerinde düşüş gözlenmiştir. Bu azalma, sanayi üretiminin yavaşlaması, ulaşım faaliyetlerinin büyük ölçüde durması ve evde kalma uygulamalarının yaygınlaşması ile ilişkilendirilebilir. 2020 yılında diğer aylarda 2019 yılına göre çok az NO₂ seviyelerinde yükselme görülmektedir pandemi kısıtlamalarının gevşetilmesi ve ekonomik faaliyetlerin yeniden hız kazanması ile açıklanabilir. 2021-2022 yılları arasında NO₂ seviyeleri 2021 yılında 2020 yılına göre daha yüksek çıkmıştır. 2021-2022 yıllarını karşılaştırdığımızda genel olarak 2022 yılında 2021 yılına göre NO₂ seviyelerinde düşüşler gözlenmiştir. 2022 yılı verileri ise göreceli olarak daha dengeli seyretmiş, ancak yine de 2020'deki kapanma dönemine kıyasla daha yüksek değerler göstermiştir.

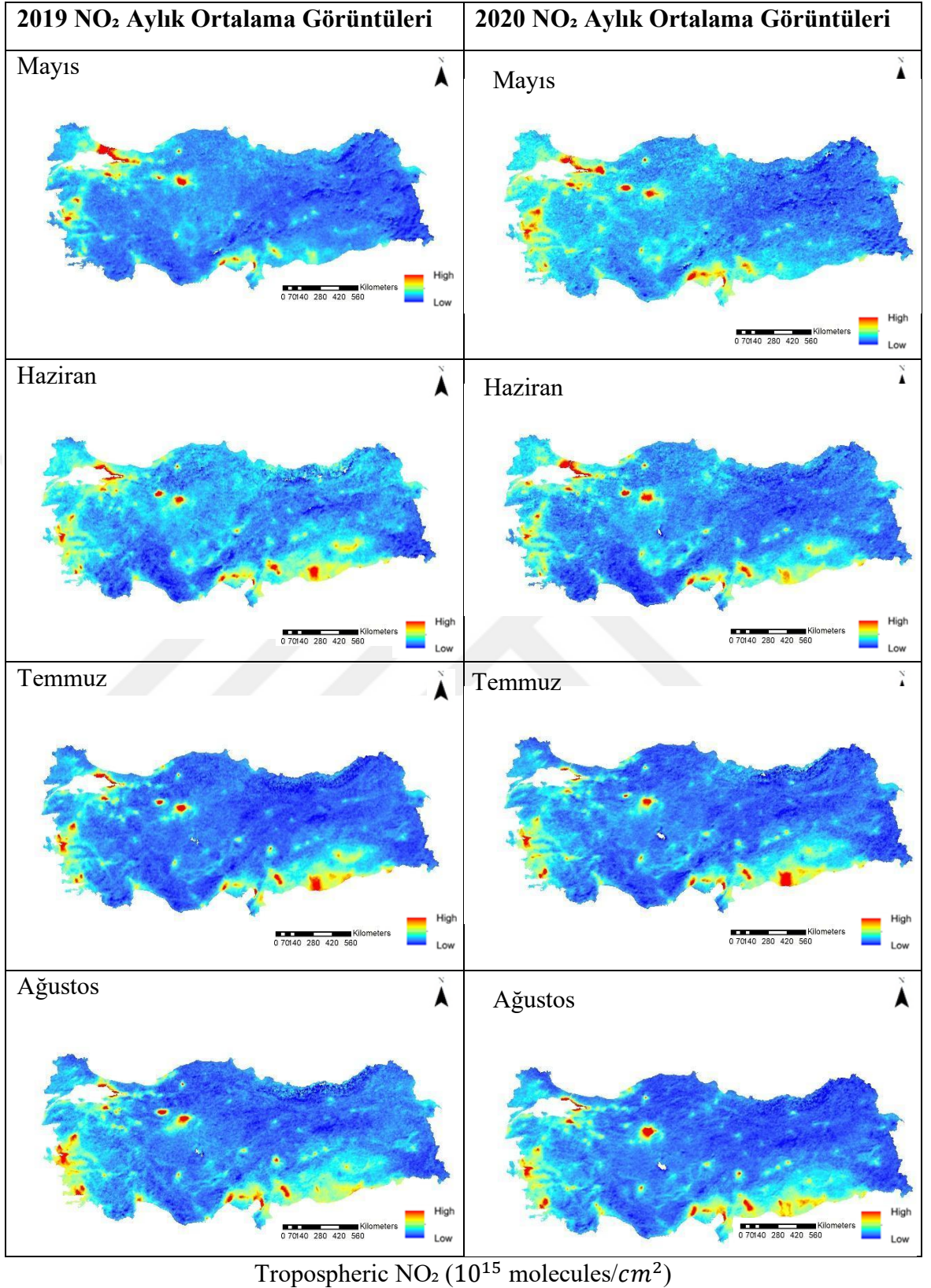
Sentinel-5P uydusundan elde edilen NO₂ verilerinin 2019–2022 yılları arasındaki aylık dağılımları incelendiğinde 2019-2020 yılları arasında şekil 4.13 ve şekil 4.16'da Ocak, Şubat, Mart ve Nisan aylarında İstanbul, Ankara, İzmir, Mersin ve Hatay çevrelerinde NO₂ seviyelerinin yüksek olduğu tespit edilmiştir, bu şehirler, yüksek nüfus yoğunluğu, yoğun trafik hacmi ve sanayi faaliyetleriyle öne çıkmakta olup, bu durum azot dioksit salınımının artmasına neden olmaktadır. 2019-2022 yılları yaz aylarında şekil 4.14 ve 4.17 incelediğimizde Haziran, Temmuz, Ağustos, Eylül aylarında İstanbul, Ankara, İzmir, Mersin, Hatay ve bu bölgelere ek olarak Şanlıurfa, Gaziantep, Mardin ve Diyarbakır çevresinde de NO₂ seviyelerinde artışlar gözlemlenmiştir. Bu durum, yaz aylarında bölgedeki sıcaklık artışı, artan ulaşım faaliyetleri ve enerji tüketiminin etkisiyle açıklanabilir. Genel olarak baktığımızda 2020 yılında COVID-19 pandemisi nedeniyle uygulanan karantina ve kısıtlama önlemleri sonucunda NO₂ seviyelerinde belirgin düşüşler meydana gelmiştir. Ancak kısıtlamaların kalkmasıyla birlikte NO₂ seviyelerinde artışlar yeniden başlamıştır. Şekil 4.16, şekil 4.17 ve şekil 4.18'de görüldüğü gibi 2022 yılında ise 2021'e kıyasla NO₂ seviyelerinde genel bir azalma eğilimi gözlemlenmiş; bu durum pandeminin etkilerinin azalması ve toplumsal hareketliliğin dengelenmesiyle açıklanabilir. Bu bulgular hem mevsimsel hem de sosyoekonomik değişkenlerin hava kirliliği üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.3. Türkiye 2019-2020-2021-2022 Yılları NO₂ Aylık Ortalamaları

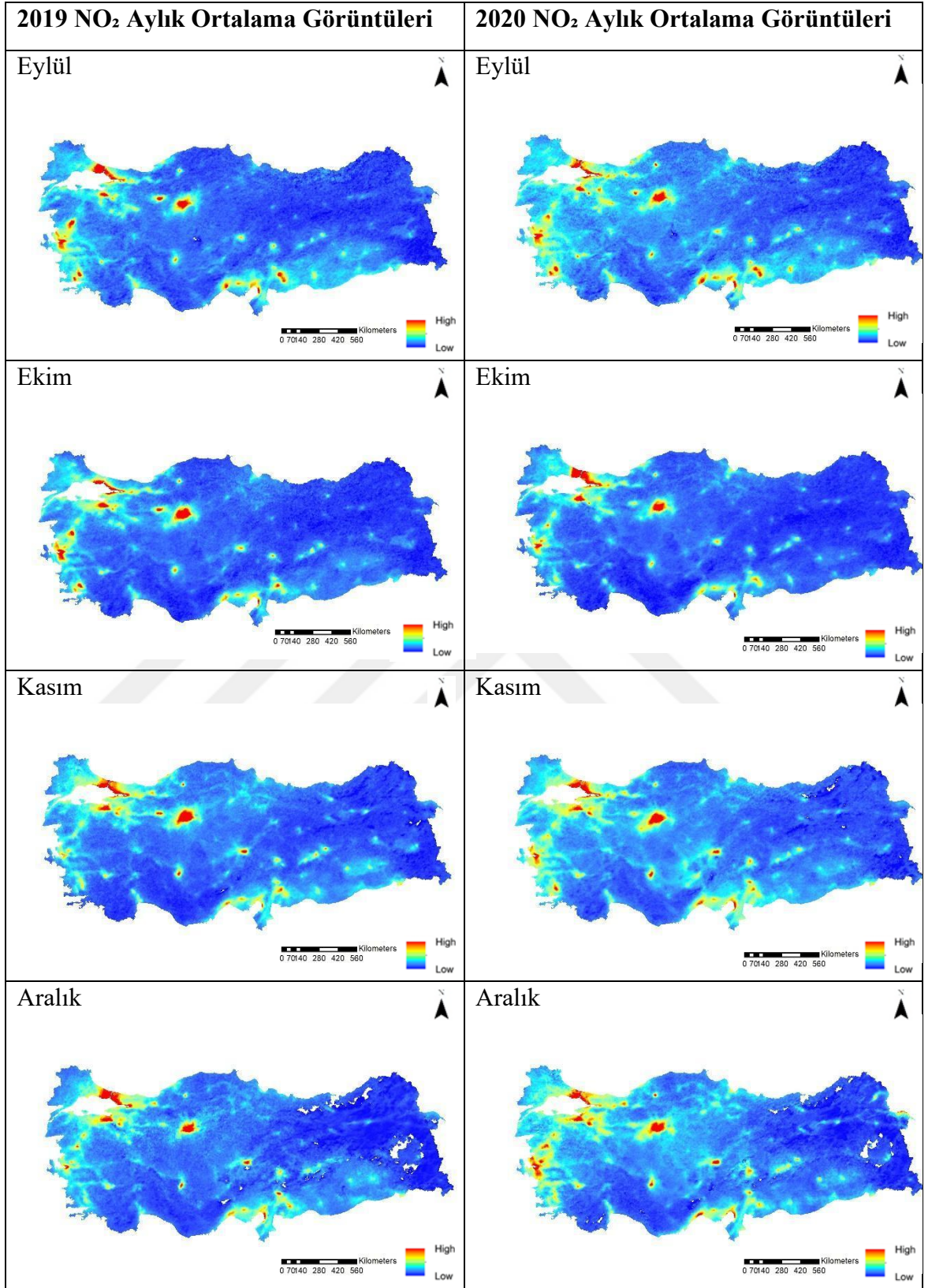


Tropospheric NO₂ (10^{15} molecules/cm²)

Şekil 4.13. Türkiye 2019-2020 yılları Ocak, Şubat, Mart, Nisan ayları NO₂ Ortalama Görüntüleri

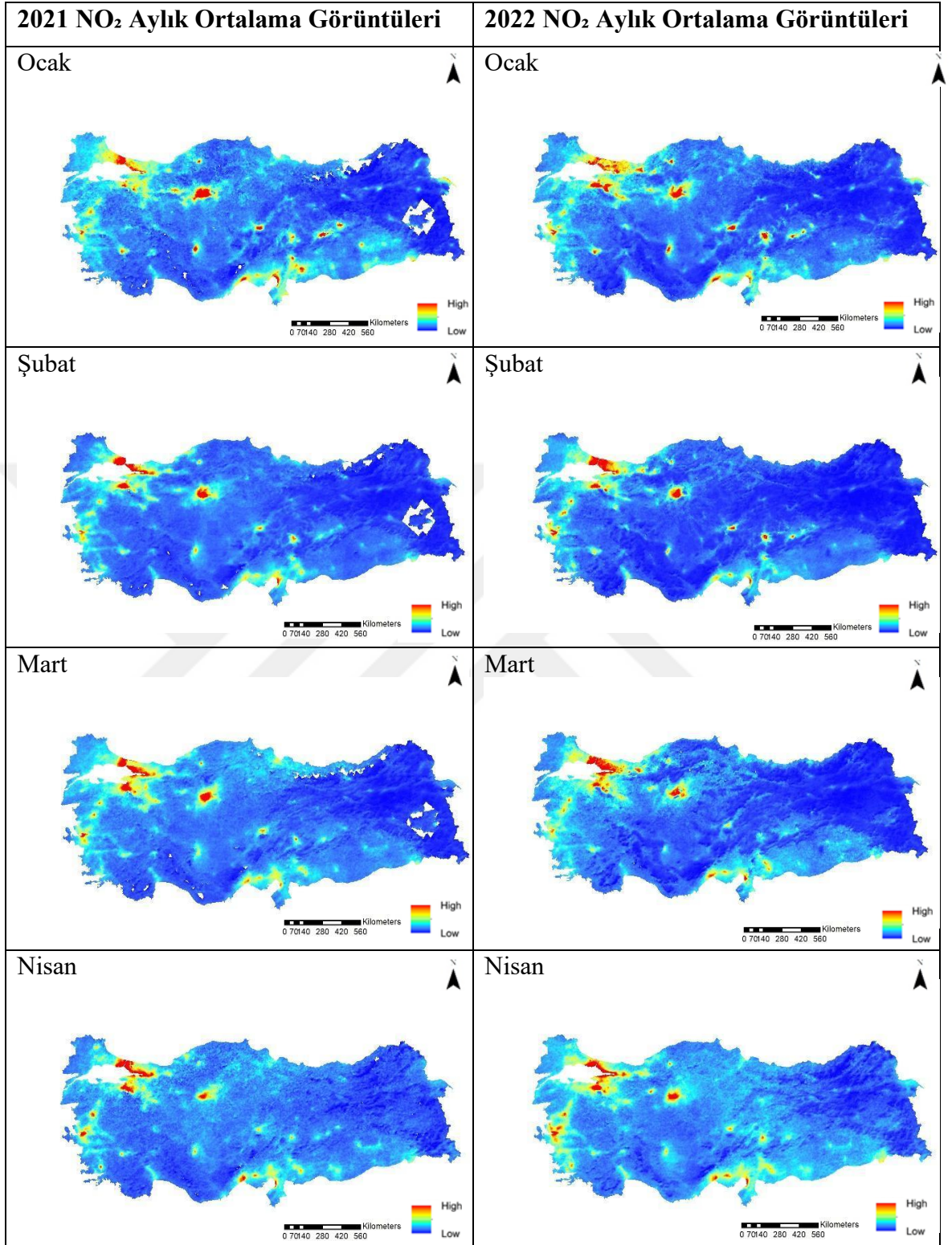


Şekil 4.14. Türkiye 2019-2020 yılları Mayıs, Haziran, Temmuz, Ağustos ayları NO₂ Ortalama Görüntüleri



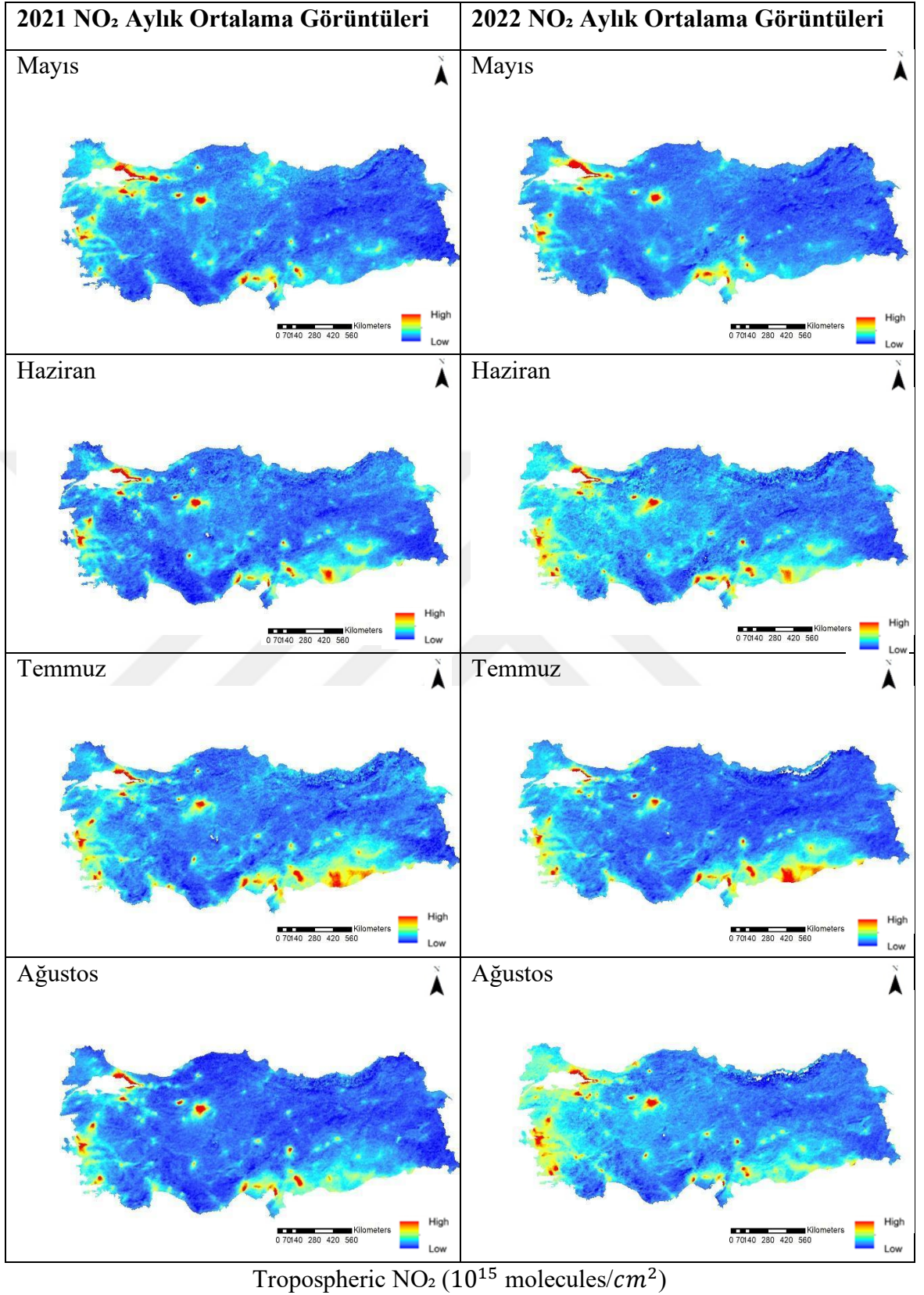
Tropospheric NO₂ (10^{15} molecules/cm²)

Şekil 4.15. Türkiye 2019-2020 yılları Eylül, Ekim, Kasım, Aralık ayları NO₂ Ortalama Görüntüleri

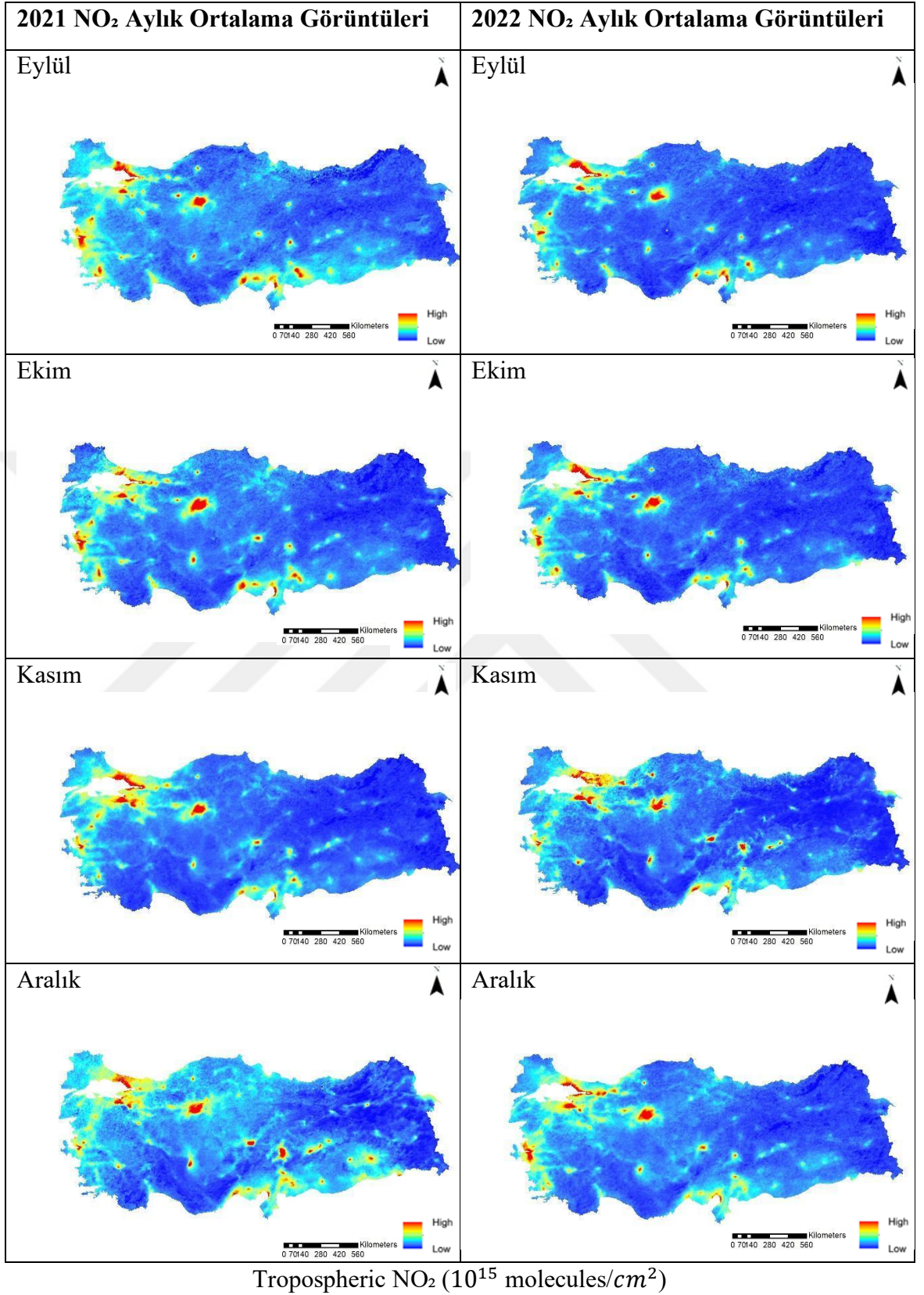


Tropospheric NO₂ (10^{15} molecules/cm²)

Şekil 4.16. Türkiye 2021-2022 yılları Ocak, Şubat, Mart, Nisan ayları NO₂ Ortalama Görüntüleri



Şekil 4.17. Türkiye 2021-2022 yılları Mayıs, Haziran, Temmuz, Ağustos ayları NO₂ Ortalama Görüntüleri



Şekil 4.18. Türkiye 2021-2022 yılları Eylül, Ekim, Kasım, Aralık ayları NO₂ Ortalama Görüntüleri

4.2. Uydu ve İstasyon Verileri Karşılaştırması

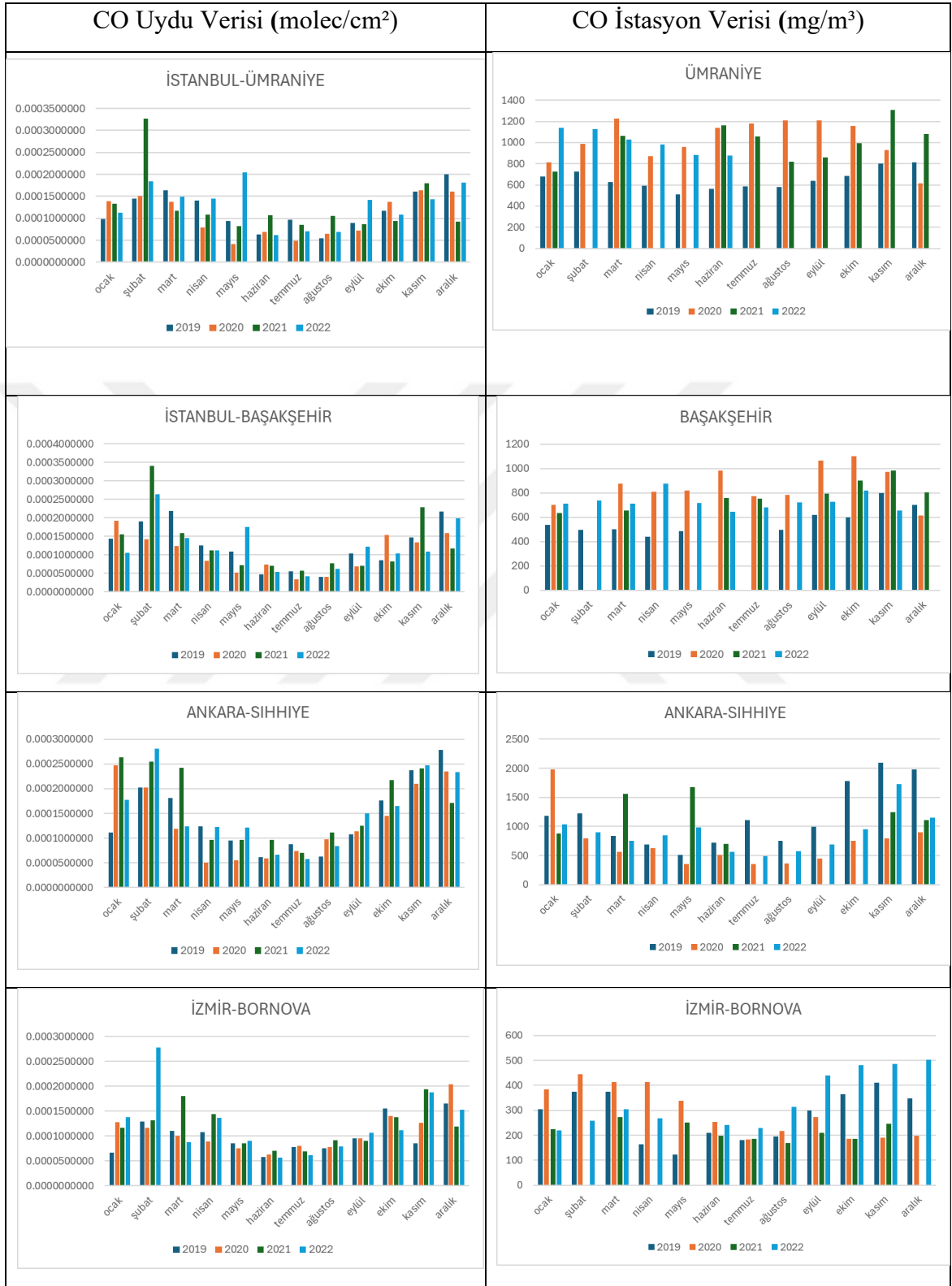
Türkiye'nin beş büyükşehri olan İstanbul, Ankara, İzmir, Bursa ve Antalya illeri özelinde, hava kalitesi istasyon verileri ile uydu verilerinden alınan istasyon koordinatlarına ait veriler karşılaştırmalı olarak grafiklerle sunulmuştur. Her ildeki hava kalitesi izleme istasyonları değerlendirilmiş ve veri bütünlüğü ile düzenliliği daha yüksek olan istasyonlar analiz için tercih edilmiştir. Bu doğrultuda seçilen istasyonlar şu şekildedir: İstanbul için Başakşehir ve Ümraniye, Ankara için Sıhhiye ve Bahçelievler, İzmir için Bornova, Bursa için İnegöl ve Antalya için Kepez.

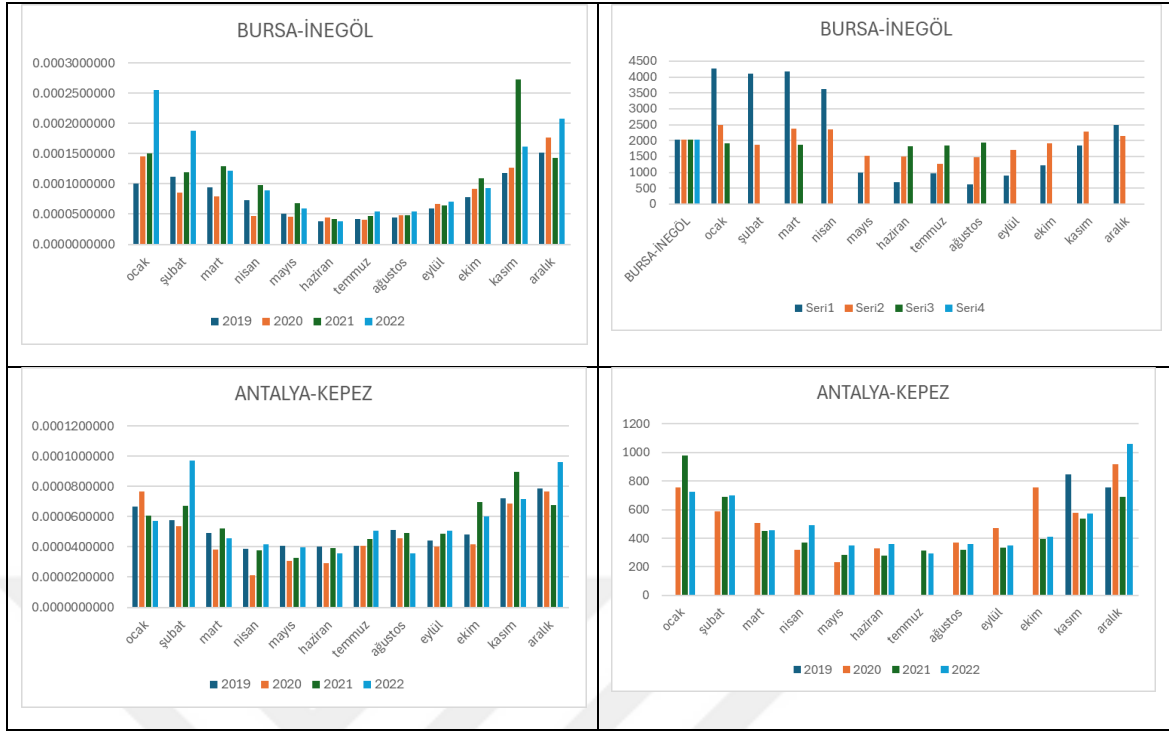
4.2.1. CO uydu ve istasyon verileri karşılaştırması

2019, 2020, 2021 ve 2022 yıllarına ait uydudan elde edilen aylık CO verileri ile yer istasyon verileri arasındaki ilişkiyi değerlendirebilmek amacıyla karşılaştırmalı analizler gerçekleştirilmiştir. Uydu verileri molec/cm^2 birimindeyken, istasyon verileri mg/m^3 birimindedir. Çizelge 4.4'te gösterilen Ümraniye, Başakşehir, Sıhhiye, Bornova, Kepez ve İnegöl hava kalitesi izleme istasyonları için yapılan CO uydu ve istasyon verilerinin karşılaştırılması incelendiğinde, Ümraniye ve Başakşehir istasyonlarında veri eksikliklerinin bulunduğu, ancak mevcut verilerle yapılan analizlerde anlamlı artış ve azalış eğilimlerinin gözlemlendiği belirlenmiştir. Sıhhiye, Bornova, İnegöl ve Kepez istasyonlarında ise veri eksikliklerine rağmen kalan verilerdeki eğilimlerin birbiriyle tutarlı olduğu görülmektedir.

İstasyonlar kendi aralarında karşılaştırıldığında, en yüksek CO seviyeleri sırasıyla Başakşehir, Ümraniye, Sıhhiye, Bornova, İnegöl ve Kepez istasyonlarında tespit edilmiştir. Mevsimsel olarak değerlendirildiğinde, kış aylarında CO seviyelerinde artış, yaz aylarına geçişle birlikte ise azalma eğilimi gözlemlenmiştir. Ayrıca, COVID-19 pandemisi sürecinde, özellikle kapanma dönemlerine denk gelen zaman dilimlerinde tüm istasyonlarda CO seviyelerinde düşüş yaşandığı görülmektedir.

Çizelge 4.4. Ümraniye, Başakşehir, Sıhhiye, Bornova, Kepez İstasyonlarının CO Uydu ve İstasyon Karşılaştırması





4.2.2. SO₂ uydu ve istasyon verileri karşılaştırması

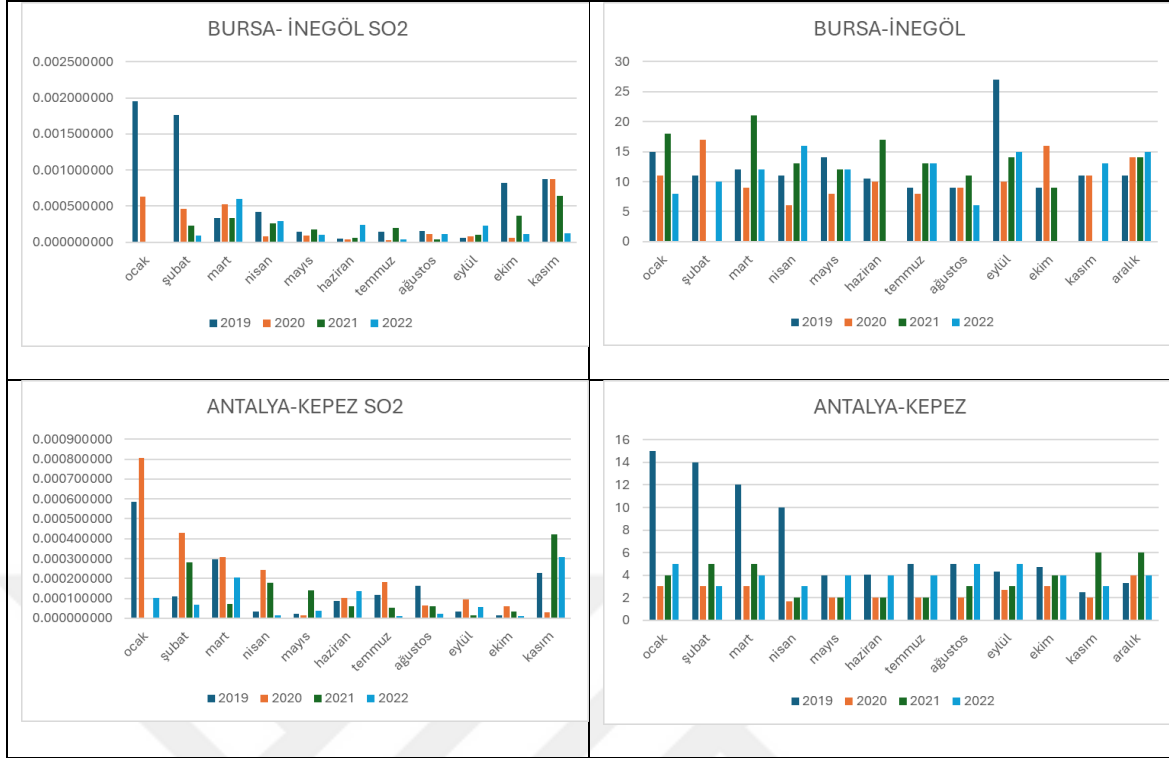
2019, 2020, 2021 ve 2022 yıllarına ait aylık SO₂ uydu ve istasyon verileri arasında anlamlılık ilişkisini değerlendirmek amacıyla karşılaştırmalı analizler gerçekleştirilmiştir. Uydu verileri molec/cm² cinsinde, istasyon verileri ise µg/m³ birimiyle ifade edilmektedir. Çizelge 4.5'te yer alan Ümraniye, Başakşehir, Sıhhiye, Bornova, İnegöl ve Kepez istasyonlarına ait veriler incelendiğinde, Ümraniye, Başakşehir, Sıhhiye, Bornova ve İnegöl istasyonlarında veri eksiklikleri tespit edilmiştir. Ancak mevcut veriler doğrultusunda yapılan grafiksel karşılaştırmalarda, bazı dönemlerde anlamlı artış ve azalış eğilimleri gözlemlenmiştir. Kepez istasyonu özelinde değerlendirildiğinde, veri eksikliği bulunmasına rağmen kalan veriler arasında tutarlı artış ve azalışlar dikkat çekmektedir.

İstasyon grafiklerinin genel yorumuna göre, en yüksek SO₂ seviyeleri sırasıyla Başakşehir, Ümraniye, Sıhhiye, İnegöl, Bornova ve Kepez istasyonlarında görülmektedir. SO₂ düzeylerinde mevsimsel olarak kış aylarında artış, yaz aylarına geçişte ise azalma eğilimleri gözlemlenmektedir; diğer aylarda ise dalgalı bir seyir söz konusudur. Genel olarak, COVID-19 pandemisi öncesi, pandemi süreci ve sonrası dönem karşılaştırıldığında, özellikle kapanma dönemlerinde tüm istasyonlarda SO₂ seviyelerinde azalmalar yaşandığı belirlenmiştir.

Çizelge 4.5. Ümraniye, Başakşehir, Sıhhiye, Bornova, Kepez İstasyonlarının SO₂ Uydu ve İstasyon Karşılaştırması



Çizelge 4.5. Devamı

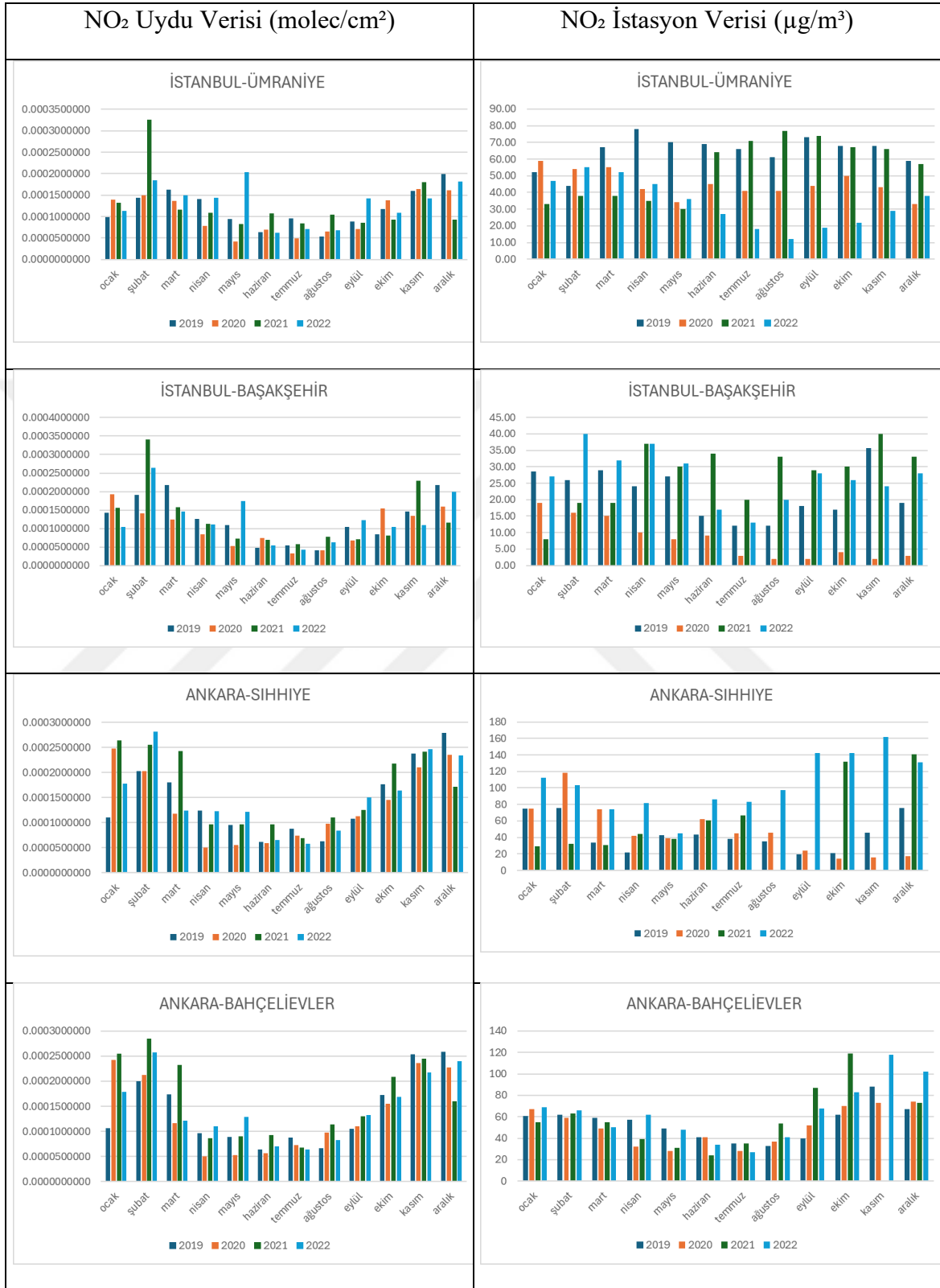


4.2.3. NO₂ uydu ve istasyon karşılaştırması

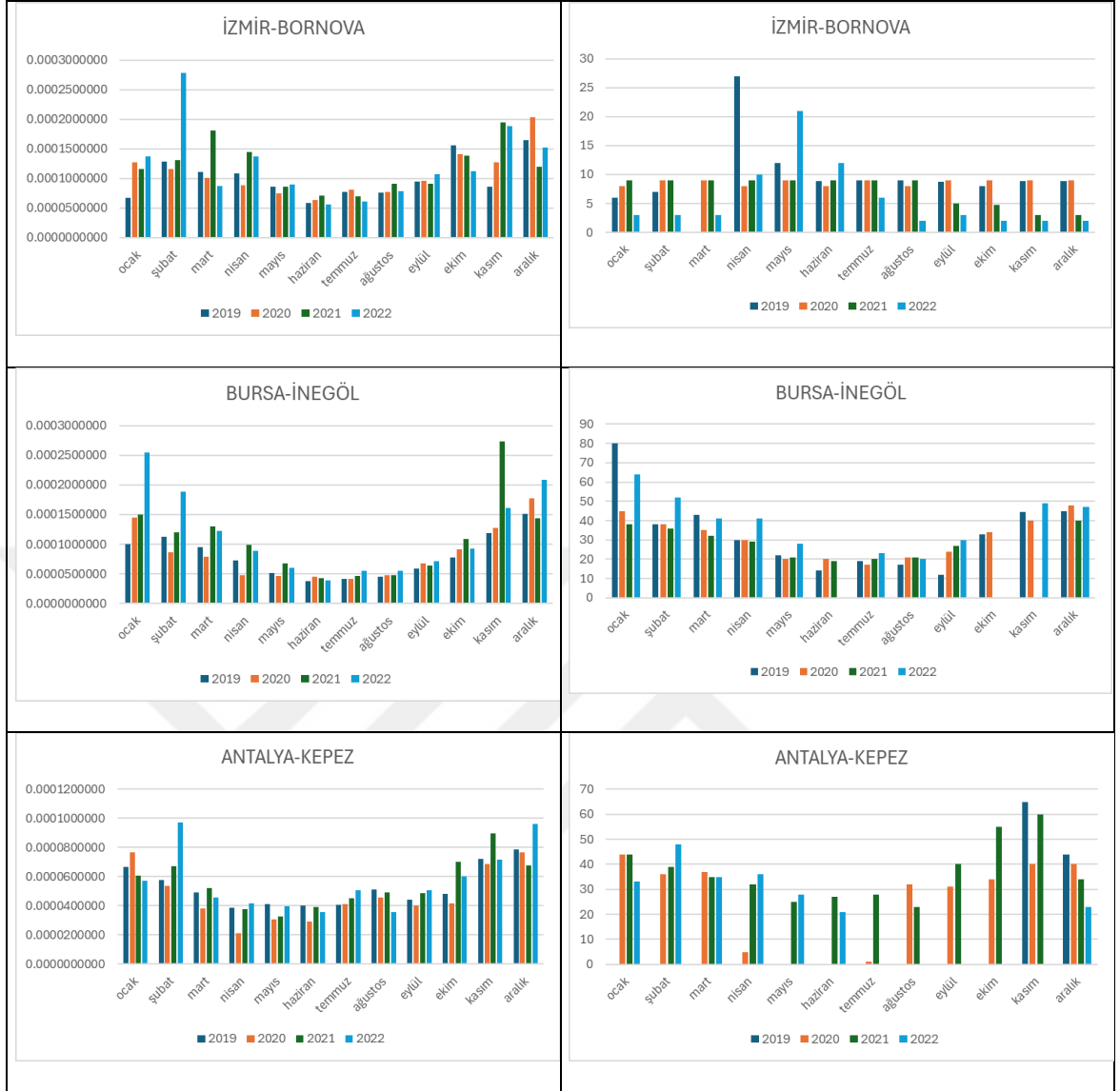
2019, 2020, 2021 ve 2022 yıllarına ait aylık NO₂ uydu ve yer istasyonu verileri arasında anlamlılık ilişkisini incelemek amacıyla karşılaştırmalı analizler yapılmıştır. Uydu verileri molec/cm² olarak ölçülürken, istasyon verileri µg/m³ birimindedir. Çizelge 4.6’da sunulan Ümraniye, Başakşehir, Sıhhiye, Bornova, İnegöl ve Kepez istasyonlarının verileri incelendiğinde; Ümraniye, Başakşehir ve Bornova istasyonlarında veri eksiklikleri tespit edilmiştir. Bu nedenle kalan veriler üzerinden yapılan grafik karşılaştırmalarında aynı dönemlerde artış veya azalma eğilimi gözlemlenmemiştir. Diğer yandan, Başakşehir, Sıhhiye, İnegöl ve Kepez istasyonlarında eksik veri bulunmasına rağmen mevcut veriler arasında artış ve azalışlar açısından tutarlı bir seyir gözlenmiştir.

İstasyon grafiklerine genel olarak bakıldığında, en yüksek NO₂ seviyelerinin sırasıyla Başakşehir, Ümraniye, Sıhhiye, Bornova, İnegöl ve Kepez istasyonlarında ölçüldüğü görülmektedir. NO₂ konsantrasyonları mevsimsel olarak kış aylarında artış, yaz aylarına geçişte ise azalma eğilimi göstermekte; diğer dönemlerde ise dalgalanmalar görülmektedir. COVID-19 pandemisi öncesi, pandemi süreci ve sonrasına ilişkin yapılan değerlendirmelerde ise, özellikle kapanma dönemlerinde tüm istasyonlarda NO₂ seviyelerinde belirgin azalmalar yaşandığı tespit edilmiştir.

Çizelge 4.6. Ümraniye, Başakşehir, Sıhhiye, Bahçelievler, Bornova, Kepez İstasyonlarının NO₂ Uydu ve İstasyon Karşılaştırması



Çizelge 4.6. Devamı



4.3. COVID-19 Vakaları

Türkiye COVID-19 Turkovid sitesinde alınan 2021 COVID vakalarına göre incelediğimizde Türkiye genelinde çizelge 4.7’de verildiği gibi pandemi koşullarının azalmasıyla nisan ayında artış gözlemlenmiş ve tekrar pandemi denetimi gelerek vakalar düşmüştür. Aşılanmanın etkisiyle kısıtlamalar kalkarken vakalarda artış olmuş fakat bu artış da sıçrama olmadan düzenli aralıklarla devam etmiştir.

Çizelge 4.7. Türkiye 2021 COVID Vakaları Yıllık Ortalaması

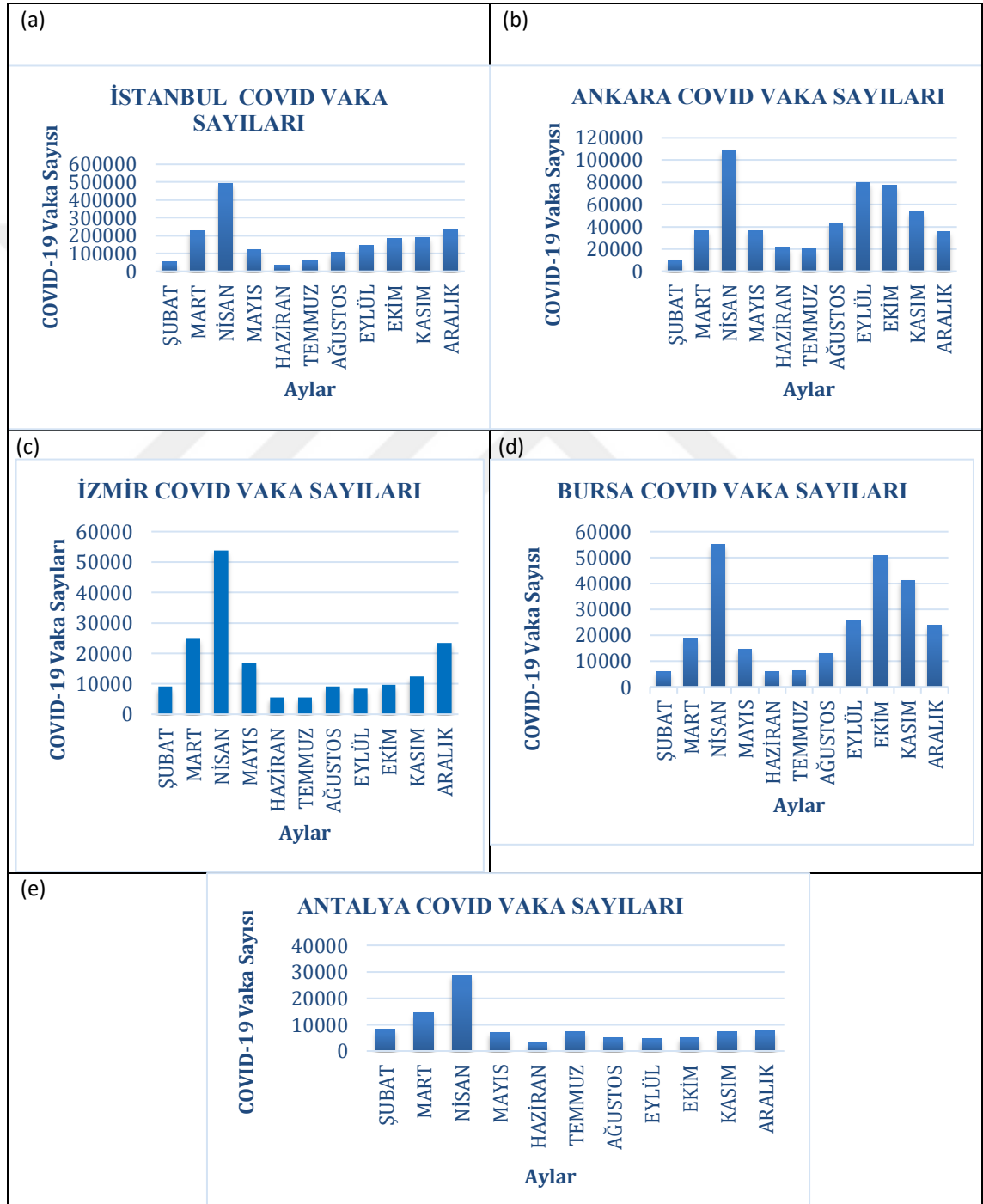


2021 yılına ait beş büyükşehir (İstanbul, Ankara, İzmir, Bursa ve Antalya) için aylık COVID-19 vaka sayıları çizelge 4.8’de sunulmuştur. Tüm yıl boyunca İstanbul, açık ara farkla en yüksek vaka sayısına sahip il olarak öne çıkmaktadır. Özellikle Nisan ayında İstanbul’daki vaka sayısı 500.000’i aşarak diğer illere kıyasla dikkat çekici bir artış göstermiştir. 2021 yılına ait verilerdeki yükseliş Mart ve Mayıs aylarında da sürmüştür, Eylül, Ekim ve Aralık aylarında yeniden belirgin bir şekilde artmıştır. Ankara, tüm aylar boyunca İstanbul’dan sonra en fazla vaka sayısına sahip ikinci il konumundadır. İzmir, özellikle Nisan ve Eylül aylarında vaka artışlarıyla öne çıkarken, Bursa benzer bir seyir izlemiş ancak Mart, Nisan ve Eylül aylarında görece daha belirgin artışlar gözlemlenmiştir. Antalya ise genel olarak daha düşük vaka sayılarıyla dikkat çekmiş; yalnızca Nisan ve Aralık aylarında sınırlı artışlar kaydedilmiştir. Beş büyükşehirde nisan ayında vaka sayılarında bir zirve yaşanmış, yaz aylarında düşüş gözlenmiş, sonbaharda ise vaka sayılarında tekrar artış meydana gelmiştir. Bu dalgalanma, insan hareketliliği, mevsimsel etkiler ve alınan sağlık önlemleri ile ilişkilendirilebilir.

COVID-19 vaka sayıları ile hava kirliliği düzeyleri karşılaştırıldığında, beş büyükşehir arasında belirgin bir örtüşme gözlemlenmiştir. Özellikle İstanbul, hem en yüksek hava kirliliği değerlerine hem de en yüksek vaka sayılarına sahip il olarak öne çıkmaktadır. Bu ilişki, kentsel yoğunluk, araç trafiği, sanayi faaliyetleri ve nüfus fazlalığı gibi faktörlerin etkisiyle açıklanabilir. Ankara ve İzmir de benzer şekilde hem kirlilik hem vaka sayısı açısından üst sıralarda yer alırken, Bursa sanayi kaynaklı hava kirliliği nedeniyle vakalarla paralellik göstermektedir. Antalya ise diğer büyükşehirlerle karşılaştırıldığında daha düşük kirlilik seviyelerine ve vaka sayılarına sahiptir. Bu durum, Antalya’daki sanayi yoğunluğunun görece düşük olması ve yerleşim dokusunun daha

dağınık olması gibi nedenlerle açıklanabilir. Sonuç olarak, hava kalitesi ile COVID-19 vaka sayıları arasında mekânsal bir paralellik olduğu; özellikle nüfusun yoğun, trafiğin sıkışık ve sanayileşmenin fazla olduğu bölgelerde her iki değerin de yüksek seyrettiği görülmektedir.

Çizelge 4.8. Beş Büyükşehir (a, b, c, d, e) 2021 Aylık COVID Vakaları



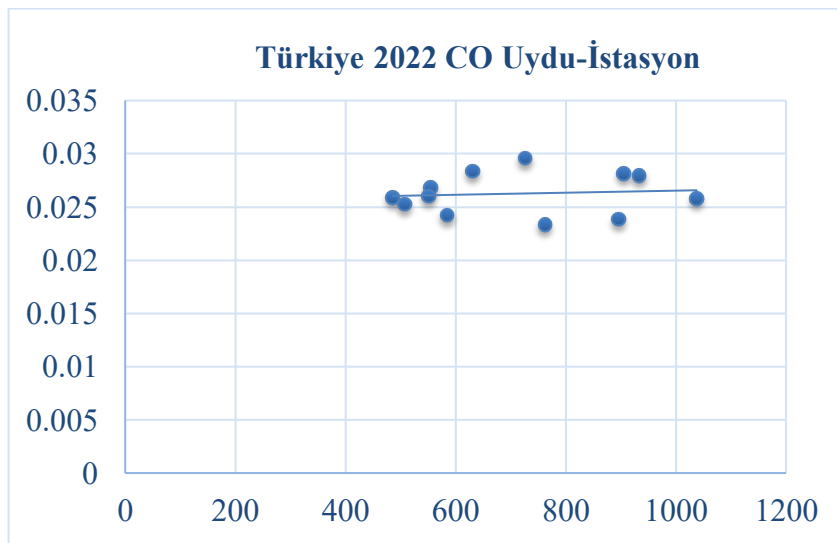
4.4. Regresyon Analizleri

4.4.1. CO uydu-istasyon doğrusal regresyon analizi

2022 yılına ait CO verileri için uydu ölçümleri ile hava kalitesi izleme istasyonları arasındaki ilişkiyi test eden regresyon analizine göre, bu iki veri türü arasında anlamlı bir ilişki bulunamamıştır. Çoklu R değeri 0.09 ile çok düşük bir korelasyon göstermiştir. R^2 değerinin 0.0088 olması, istasyon verilerindeki varyansın yalnızca %0,88'lik kısmının uydu verileri ile açıklanabileceğini ortaya koymuştur. Ayrıca ayarlanmış R^2 değerinin negatif olması, modele eklenen değişkenlerin veri setine uygun olmadığını göstermektedir. Bu sonuçlar, CO bileşeni için 2022 yılında uydu ve istasyon verileri arasında zayıf ya da tutarsız bir uyum olduğunu göstermektedir. Bu durum, CO gazının atmosferdeki yatay dağılımının düzensizliği, yerel kaynaklara olan duyarlılığı ve Sentinel-5P'nin CO ölçüm hassasiyetinin sınırlılığı gibi faktörlerle açıklanabilir.

Bu sonuçlara göre:

- CO uydu verileri ile istasyon verileri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki gözlemlenmemektedir.
- R^2 değeri %1'in altında olduğu için model, CO değerlerinin birbirini temsil etmede çok zayıf kaldığını göstermektedir.
- Ayarlanmış R^2 negatif çıktığı için, modele eklenen değişkenlerin faydadan çok zarar verdiği anlamına gelir. Bu, modelin aşırı basit ya da uyumsuz olduğunu düşündürür.
- Standart hata da oldukça yüksektir. Bu da tahminlerin tutarsız ve güvenilir olmadığını gösterir.



Şekil 4.19. Türkiye 2022 CO Uydu-İstasyon Analizi

Çizelge 4.9. CO Uydu-İstasyon Regresyon İstatistikleri

Regresyon İstatistikleri	
Çoklu R	0.093809908
R Kare	0.008800299
Ayarlı R Kare	-0.09031967
Standart Hata	198.0521211
Gözlem	12

4.4.2. NO₂ uydu-istasyon doğrusal regresyon analizi

2022 yılına ait NO₂ verileri için yapılan regresyon analizi, Sentinel-5P uydusundan elde edilen veriler ile hava kalitesi izleme istasyonlarından alınan veriler arasında orta düzeyde pozitif bir ilişki olduğunu göstermektedir. Çoklu R değeri 0,63 olarak bulunmuştur. R² değeri 0.397 olup, istasyon verilerindeki değişimin yaklaşık %40'ı uydu verileriyle açıklanabilmektedir. Ayarlanmış R² değeri 0.337 olarak belirlenmiş, bu da modelin genel geçerliliğinin yeterli düzeyde olduğunu göstermektedir. Modelin standart hata değeri 3.25 ile kabul edilebilir düzeydedir. Bu bulgular, NO₂ ölçümünde uydu verilerinin yer ölçümleriyle büyük oranda uyumlu olduğunu, ancak bazı bölgelerde sapmaların olabileceğini göstermektedir. Genel olarak uydu verileri, istasyon verilerinin destekleyicisi olarak değerlendirilebilecek düzeyde güvenilirirdir.

Bu çıktılarına göre:

- Uydu ve istasyon NO₂ verileri arasında orta düzeyde bir ilişki mevcuttur.
- R² değeri %40 civarında olup, istasyon verilerindeki değişkenliğin önemli bir kısmı uydu verileriyle açıklanabilmektedir.
- Ayarlanmış R² değeri 0.33 ile anlamlı olduğuna işaret etmektedir.
- Standart hata 3.25 gibi makul bir seviyededir, model güven verici düzeydedir.

Bu bulgular, NO₂ özelinde uydu verilerinin istasyon verileriyle kısmen örtüştüğünü ve bazı şehirlerde daha güçlü ilişkiler ortaya çıkabileceğini düşündürmektedir.



Şekil 4.20. Türkiye 2022 NO₂ Uydu-İstasyon Analizi

Çizelge 4.10. NO₂ Uydu-İstasyon Regresyon İstatistikleri

Regresyon İstatistikleri	
Çoklu R	0.630562
R Kare	0.397608
Ayarlı R Kare	0.337369
Standart Hata	3.246083
Gözlem	12

4.4.3. SO₂ uydu-istasyon doğrusal regresyon analizi

2022 yılına ait SO₂ verileri için uydu verileri ile hava kalitesi izleme istasyonları arasındaki ilişkiyi değerlendirmek üzere yapılan regresyon analizi, bu iki veri türü arasında güçlü bir pozitif ilişki olduğunu göstermiştir. Regresyon çıktısına göre, Çoklu R değeri 0.80 olup yüksek düzeyde bir korelasyona işaret etmektedir. R² değeri 0.65 ile oldukça yüksek olup, istasyon verilerindeki varyansın %65,3'lük kısmının uydu verileriyle açıklanabildiği ortaya konmuştur. Ayarlanmış R² değerinin 0.619 olması, modelin genellenebilirliğini desteklemektedir. Düşük standart hata değeri ise modelin güvenilirliğini artırmaktadır. Bu bulgular, Sentinel-5P uydusundan elde edilen SO₂ verilerinin yer tabanlı istasyon verileriyle uyumlu ve anlamlı ölçüde örtüştüğünü, dolayısıyla şehir ölçeğinde hava kalitesinin değerlendirilmesinde uydu verilerinin güvenilir bir kaynak olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Bu sonuçlara göre:

- SO₂ verileri için uydu ölçümleri ile istasyon verileri arasında güçlü ve anlamlı bir ilişki vardır.
- R² değeri %65'in üzerinde olup, istasyon verilerinin büyük bir kısmının uydu verileriyle açıklanabileceğini göstermektedir.
- Ayarlanmış R² değerinin yüksekliği, modelin genellenebilirliğinin de iyi olduğunu gösterir.
- Standart hata düşük olduğundan, modelin tahmin hataları kabul edilebilir düzeydedir.



Şekil 4.21. Türkiye 2022 SO₂ Uydu-İstasyon Analizi

Çizelge 4.11. SO₂ Uydu-İstasyon Regresyon İstatistikleri

Regresyon İstatistikleri	
Çoklu R	0.808541
R Kare	0.653739
Ayarlı R Kare	0.619113
Standart Hata	4.838147
Gözlem	12

4.4.4. Çoklu regresyon analizi

Bu çalışmada, COVID-19 vaka sayıları ile hava kirliliği parametreleri olan CO, NO₂ ve SO₂ arasında ilişki olup olmadığını belirlemek amacıyla çoklu doğrusal regresyon analizi uygulanmıştır. Burada bağımlı değişken olarak COVID-19 vaka sayıları, bağımsız değişkenler olarak ise CO, NO₂ ve SO₂ düzeyleri kullanılmıştır.

Çoklu regresyon analizi tercih edilmesinin temel nedeni, hava kirlleticilerinin birbirleriyle ilişkili olabilmesi ve COVID-19 vakalarını birlikte etkileyebilecek olmalarıdır. Örneğin, sanayi faaliyetleri ya da trafik yoğunluğu gibi ortak kaynaklar hem CO hem NO₂, hem de SO₂ salınımını artırabilir. Bu nedenle bu kirleticilerin vaka sayıları üzerindeki etkilerini ayrı ayrı değil, aynı model içinde birlikte değerlendirmek daha anlamlı sonuçlar ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.12. Çoklu Regresyon İstatistikleri

Regresyon İstatistikleri	
Çoklu R	0.540747913
R Kare	0.292408306
Ayarlı R Kare	0.246261022
Standart Hata	71284.85934
Gözlem	50

Çizelge 4.13. Çoklu Regresyon Değişkenleri

	Katsayılar	Standart Hata	t Stat	P-değeri	Düşük %95	Yüksek %95	Düşük 95.0%	Yüksek 95.0%
Kesişim	167842.1037	119851.8	-1.40041	0.168099	-409091	73407.12	-409091	73407.12
X Değişkeni 1	5523278.719	3943637	1.400555	0.168057	2414850	13461407	2414850	13461407
X Değişkeni 2	147805941.7	80443560	-1.83739	0.072617	-3.1E+08	14118547	-3.1E+08	14118547
X Değişkeni 3	1649820781	6.19E+08	2.664316	0.010602	4.03E+08	2.9E+09	4.03E+08	2.9E+09

Çizelge 4.14. Çoklu Regresyon Anlamlılık Tablosu

Değişken	Katsayı	P-değeri	Anlam
Sabit (Kesişim)	-167.842	0.168	Anlamlı değil
CO (X1)	+5.523.279	0.168	Anlamlı değil
SO ₂ (X2)	-147.805.941	0.073	Sınırdaki (zayıf anlamlılık)
NO ₂ (X3)	+1.649.820.781	0.010	Anlamlı (p < 0.05)

Modelden elde edilen sonuçlara göre:

- NO₂ düzeyleri ile COVID-19 vaka sayıları arasında pozitif ve istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki tespit edilmiştir ($p < 0.05$). Bu durum, NO₂ düzeyleri arttıkça vaka sayılarının da arttığını göstermektedir.
- SO₂ düzeylerinin COVID-19 vaka sayıları üzerindeki etkisi negatif yönde olup, istatistiksel olarak sınırda anlamlı bulunmuştur ($p \approx 0.07$). SO₂ ile vaka sayıları arasında negatif bir ilişki tespit edilmiştir; ancak bu durum, SO₂'nin yoğun olduğu sanayi bölgelerinin vakaların daha çok görüldüğü kent merkezlerinden farklı yerlerde bulunmasından kaynaklanıyor olabilir, ancak bu ilişki daha fazla veriyle desteklenmelidir.
- CO düzeyleri ise COVID-19 vaka sayıları üzerinde pozitif fakat istatistiksel olarak anlamlı olmayan bir etki göstermiştir ($p > 0.05$). Bu da CO'nun tek başına anlamlı bir etkisi olmadığını düşündürmektedir.

Bu bulgular, özellikle NO₂'nin COVID-19 vaka sayıları ile olan güçlü ilişkisini ortaya koymakta ve bu kirleticinin halk sağlığı açısından daha dikkatle izlenmesi gerektiğini göstermektedir. Hava kirliliğinin pandemi sürecine etkileri açısından, bu tür çok değişkenli analizler, çevresel faktörlerin salgın üzerindeki etkisini daha kapsamlı şekilde değerlendirmeye olanak tanımaktadır.

4.5. Sosyo-Mekansal Analizler

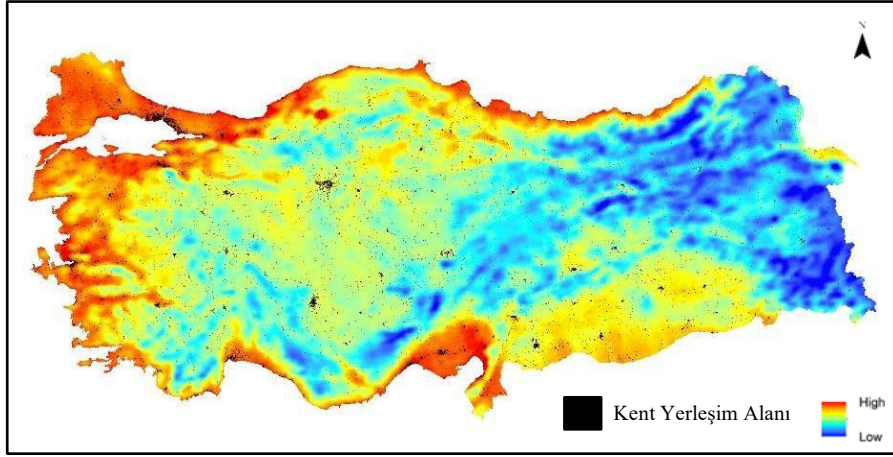
Sentinel-5P uydusundan elde edilen veriler doğrultusunda, CO, SO₂ ve NO₂ kirleticileri için yerleşim alanları ile uydu görüntüleri çakıştırılarak analiz yapılmıştır. Ayrıca aynı yöntem termik santral alanları ve endüstriyel alanlar ile de uygulanmıştır. Elde edilen bulgular aşağıda detaylı şekilde sunulmuştur.

4.5.1. Türkiye yerleşim alanları ile CO, SO₂ ve NO₂ ilişkisi

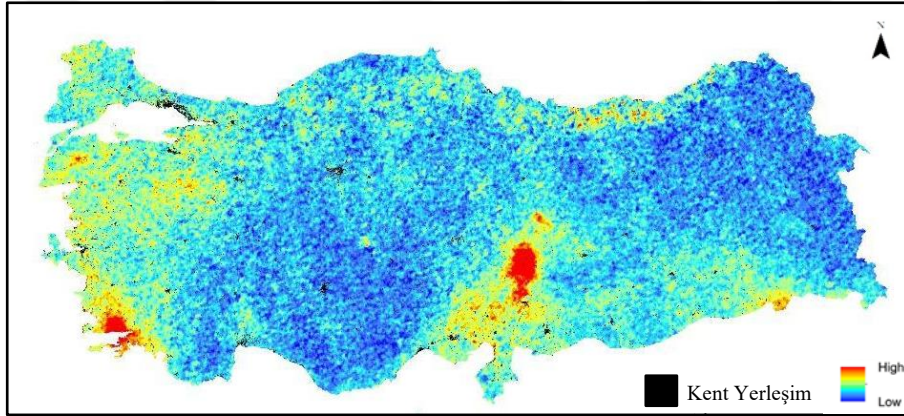
Şekil 4.22'de görüldüğü üzere, CO verileri kent yerleşim alanlarıyla çalıştırıldığında, yerleşim bölgelerinde CO seviyelerinin yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durum, kentleşmenin ve araç trafiğinin CO kirliliği üzerinde etkili olduğunu göstermektedir.

Şekil 4.23'te SO₂ değerleri yerleşim alanlarıyla üst üste getirildiğinde, SO₂'nin genellikle sanayi bölgeleriyle ilişkili olduğu ve kent merkezleri ile doğrudan örtüşmediği gözlemlenmiştir. Bu durum, SO₂'nin başlıca kaynaklarının sanayi ve enerji üretim tesisleri olduğunu göstermektedir.

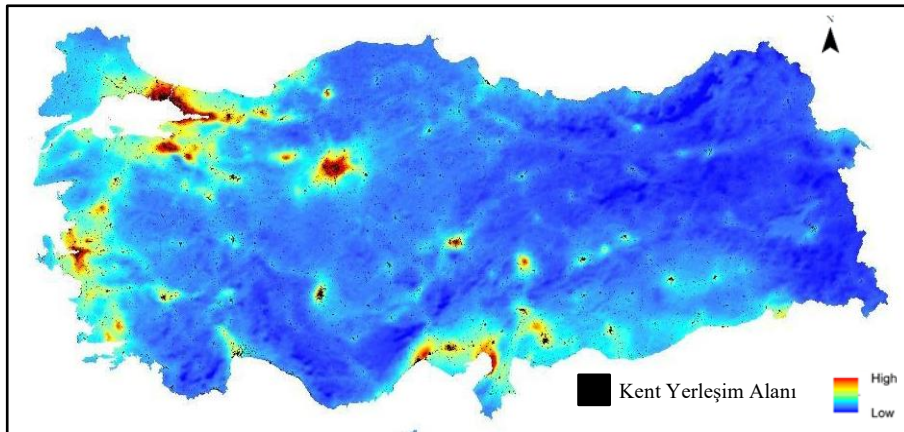
NO₂ verilerine ait Şekil 4.24 incelendiğinde, kent yerleşim alanlarının bulunduğu bölgelerde NO₂ seviyelerinin yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu da nüfus yoğunluğu ve taşıt trafiği gibi faktörlerin NO₂ kirliliğini artırdığına işaret etmektedir.



Şekil 4.22. Türkiye CO 2022 Uydu Görüntüsü ve Kent Yerleşim Alanı



Şekil 4.23. Türkiye SO₂ 2022 Uydu Görüntüsü ve Kent Yerleşim Alanı

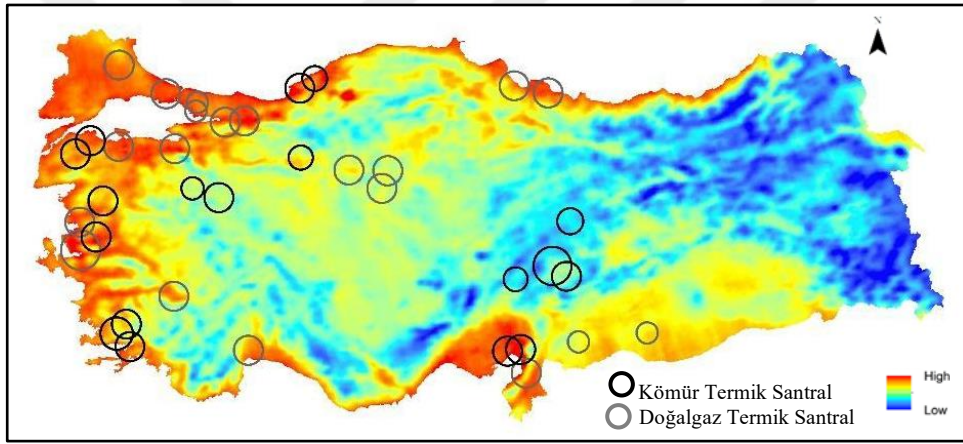


Şekil 4.24. Türkiye NO₂ 2022 Uydu Görüntüsü ve Kent Yerleşim Alanı

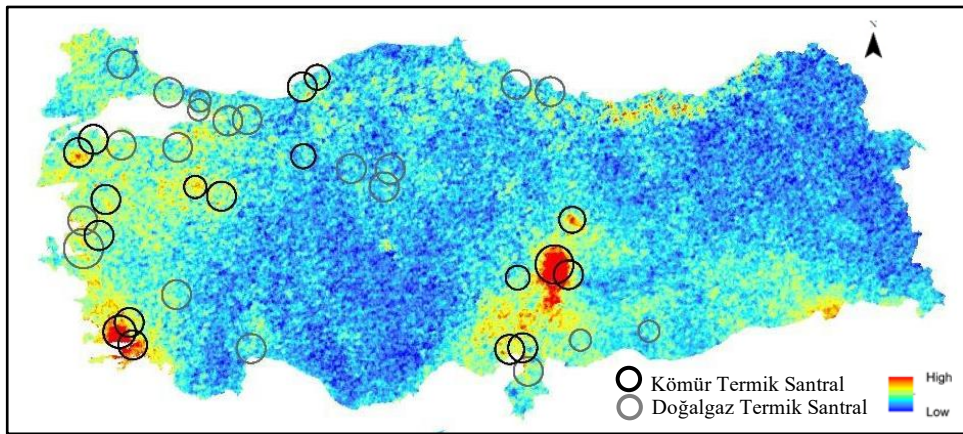
4.5.2. Türkiye termik santraller ile CO, SO₂ ve NO₂ ilişkisi

Sentinel-5P uydu verileri termik santral alanlarıyla karşılaştırılarak analiz edilmiştir. Bu kapsamda, santrallerin çevresindeki hava kirliliği durumu ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

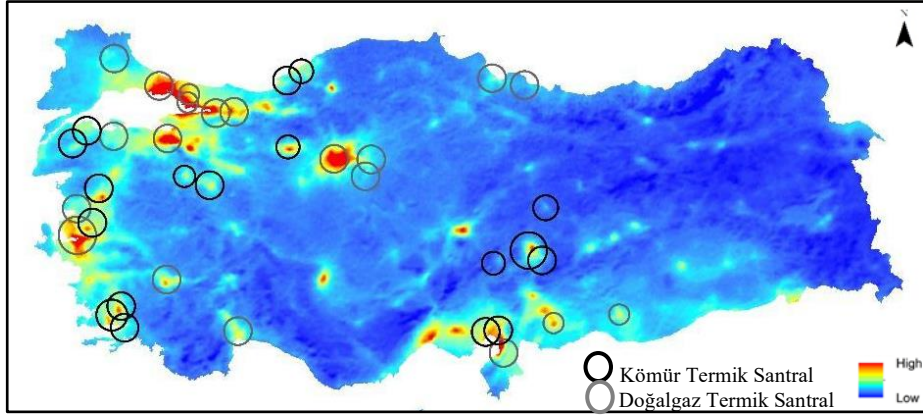
Şekil 4.25 incelendiğinde, termik santrallerin bulunduğu bölgelerde CO seviyelerinin görece yüksek olduğu görülmektedir. Ancak CO'nun çok çeşitli kaynakları olması nedeniyle, bu bulgunun tek başına santrallerle doğrudan bağlantılı olduğunu söylemek güçtür. SO₂ verilerine ait şekil 4.26'te özellikle Elbistan ve Afşin gibi termik santrallerin yoğun olduğu bölgelerde SO₂ seviyelerinin oldukça yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu da termik santrallerin SO₂ emisyonları açısından önemli bir kaynak olduğunu doğrulamaktadır. Şekil 4.27'te NO₂ değerleri incelendiğinde, termik santrallerin bulunduğu bölgelerde NO₂ seviyelerinin de yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durum, santrallerin NO₂ salımında da etkili olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.25. Türkiye CO 2022 Uydu Görüntüsü ve Termik Santral Alanları



Şekil 4.26. Türkiye SO₂ 2022 Uydu Görüntüsü ve Termik Santral Alanları



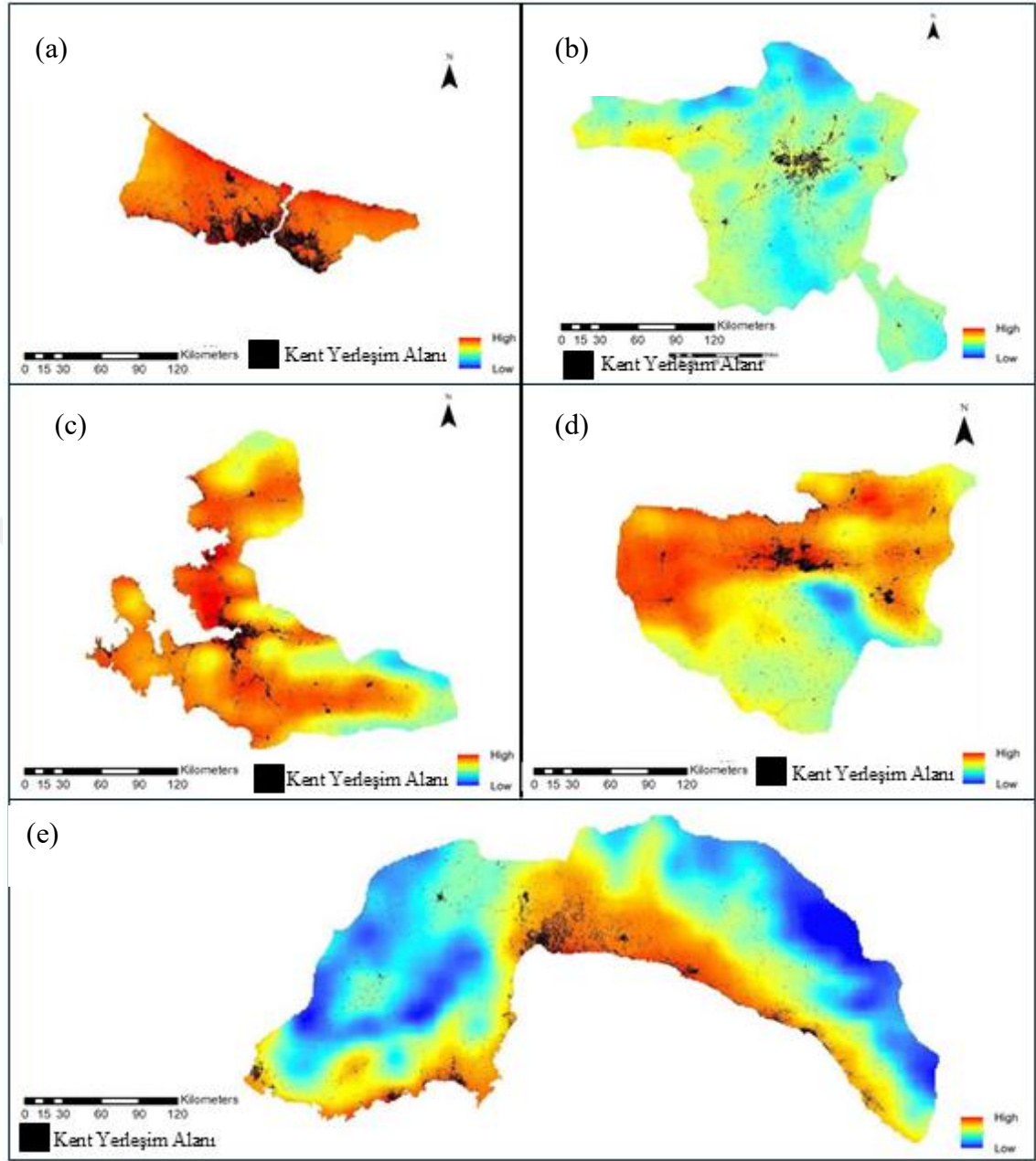
Şekil 4.27. Türkiye NO₂ 2022 Uydu Görüntüsü ve Termik Santral Alanları

4.5.3. Beş büyükşehir kent yerleşim alanları ile CO, SO₂ ve NO₂ ilişkisi

Uydu verileri üzerinden yapılan analizlerde, CO yoğunluğunun özellikle kent merkezlerinin yoğun olduğu bölgelerde yüksek olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.28).

Beş büyükşehir bazında yapılan değerlendirmede, CO yoğunluğu şu şekilde sıralanmıştır: İstanbul> İzmir> Bursa> Antalya> Ankara

Bu sıralama, trafik yoğunluğu, ısıtma sistemleri, sanayi faaliyetleri ve nüfus büyüklüğü ile ilişkilendirilmektedir. İstanbul, hem Türkiye'nin en büyük metropolü olması hem de ulaşım ve sanayi faaliyetlerinin yoğunluğu nedeniyle CO seviyelerinde en yüksek değeri göstermektedir. Özellikle kentsel yerleşim alanlarının yoğunlaştığı Avrupa Yakası'ndaki sanayi bölgeleri CO emisyonlarının başlıca kaynaklarıdır. İzmir ve Bursa da benzer şekilde yoğun kentsel yerleşime sahip olup, sanayi ve ulaşım etkisiyle CO seviyelerinin yüksek olduğu görülmüştür. Ankara'da CO seviyesi diğer illere kıyasla düşüktür. Bu durum, Ankara'nın daha düzenli kent yapısı, yaygın toplu taşıma kullanımı ve sanayi yoğunluğunun daha az olmasıyla açıklanabilir. Antalya ise turizm ağırlıklı ekonomik yapısı ve daha az sanayi faaliyetleri nedeniyle genel olarak daha düşük CO değerlerine sahiptir.



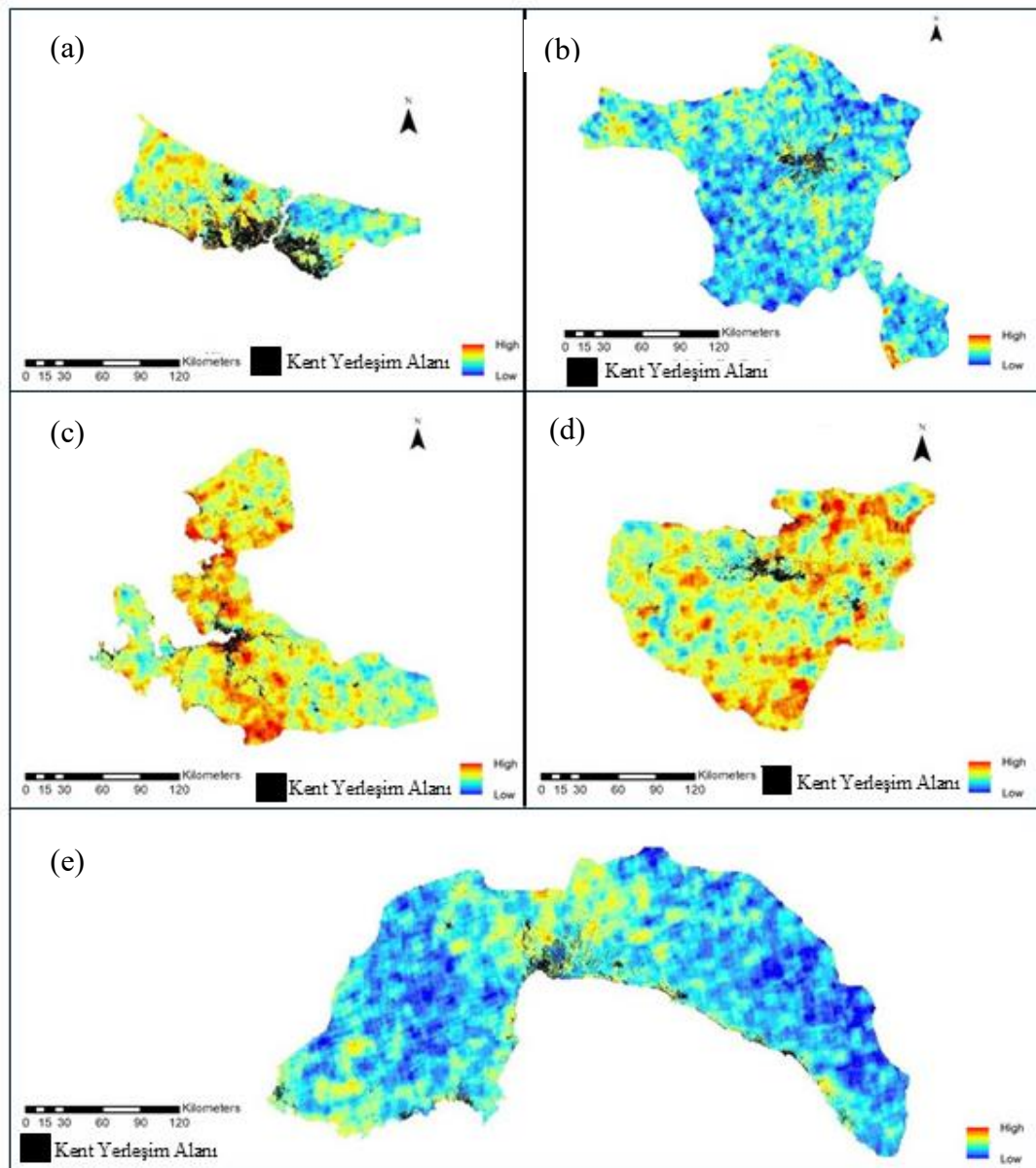
Şekil 4.28. Uydu Görüntüleri (a, b, c, d, e) ile Kent Yerleşim Alanları

SO₂ yoğunlukları ile kent yerleşim alanları arasında belirgin bir örtüşme olmadığı görülmüştür (Şekil 4.26). Uydu analizleri, SO₂ seviyelerinin daha çok termik santrallerin ve büyük ölçekli sanayi tesislerinin bulunduğu bölgelerde yoğunlaştığını göstermektedir.

Beş büyükşehir bazında yapılan değerlendirmede, SO₂ yoğunluğu şu şekilde sıralanmıştır: İzmir> Bursa> İstanbul> Antalya> Ankara

İstanbul'da SO₂ yoğunluğu Avrupa Yakası'nda, sanayi ve enerji üretim alanlarının bulunduğu bölgelerde belirgin şekilde yüksektir. Kent merkezinde ise göreceli olarak

daha düşük yoğunluk gözlemlenmiştir. Ankara'da SO₂ seviyeleri kent yerleşim alanlarıyla örtüşmemekte, daha çok merkezin dışında, sanayi ve enerji üretim alanlarının bulunduğu kuzey ve güney bölgelerde artış göstermektedir. İzmir'de SO₂ yoğunluğu kısmen kent merkezleriyle çakışmakta olup, özellikle sanayi alanlarının şehir merkezine yakın konumlanmış olması bu durumu açıklamaktadır. Bursa'da SO₂ seviyeleri, kent merkezinden çok organize sanayi bölgeleri ve termik santrallerin bulunduğu doğu ve güneydoğu çevresinde yüksek yoğunluk göstermektedir. Bu da yerleşim alanlarıyla doğrudan bir çakışma olmadığını göstermektedir. Antalya'da ise SO₂ seviyeleri genel olarak düşüktür. Ancak kent merkezinde gözlemlenen hafif yükselmeler, kentsel faaliyetlerin etkisiyle ilişkilendirilebilir. Sanayi tesislerinin sınırlı olması nedeniyle genel hava kalitesi açısından daha iyidir.



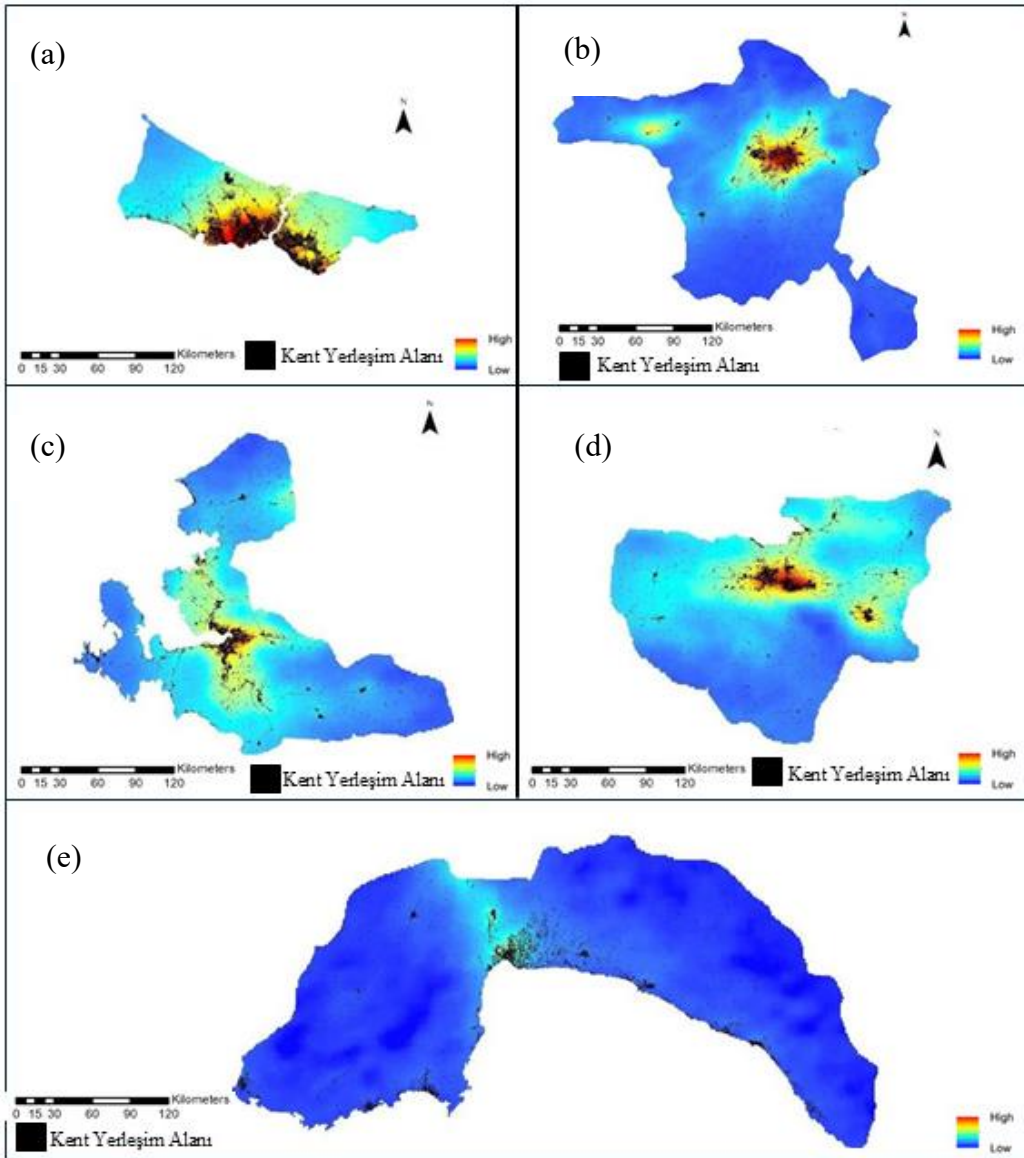
Şekil 4.29. SO₂ Uydu Görüntüleri (a, b, c, d, e) ile Kent Yerleşim Alanları

Azot dioksit (NO_2) yoğunlukları, diğerkirleticilere göre kent merkezleriyle en güçlü ilişkiyi göstermektedir. Özellikle trafik yoğunluğu, sanayi faaliyetleri ve enerji üretim kaynakları NO_2 emisyonlarının başlıca nedenleri arasında yer almaktadır (Şekil 4.30).

Beş büyükşehir bazında yapılan değerlendirmede, NO_2 yoğunluğu şu şekilde sıralanmıştır: İstanbul> Ankara> İzmir> Bursa> Antalya

Azot dioksit (NO_2), genel olarak motorlu taşıtlardan ve yoğun kentsel aktivitelerden kaynaklanan bir kirletici olup, yapılan mekânsal analizlerde kent merkezlerinde yoğunlaştığı, kentin çeperlerine doğru azaldığı gözlemlenmiştir.

NO_2 yoğunluğu açısından İstanbul'da kent merkezi belirgin şekilde yüksek değerlere sahiptir. Bu yoğunluk, özellikle Avrupa Yakası'nda dikkat çekmekte, çeperlere doğru ise NO_2 seviyelerinde belirgin bir azalma görülmektedir. Ankara'da da benzer şekilde kent merkezi NO_2 açısından yüksek yoğunluk göstermekte, merkezden uzaklaştıkça değerler düşmektedir. İzmir'de NO_2 seviyeleri kent merkezinde yoğun olup, merkeze yakın sanayi alanlarının da bu durum üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir. Kentin çeperlerinde ise NO_2 seviyeleri gözle görülür şekilde azalmaktadır. Bursa merkezdeki yoğun kentsel aktiviteler nedeniyle NO_2 seviyeleri yüksektir; kent merkezinden uzaklaştıkça kirlilik düzeyinde düşüş gözlemlenmektedir. Antalya ise genel olarak düşük NO_2 seviyeleri ile öne çıkmaktadır. Ancak merkezde sınırlı bir artış gözlenmiştir. Kent geneli hava kalitesi açısından diğerbüyükşehirlere göre iyidir.



Şekil 4.30. NO₂ Uydu Görüntüleri (a, b, c, d, e) ile Kent Yerleşim Alanlar

4.5.4. Beş büyükşehir OSB bölgeleri ile CO, SO₂ ve NO₂ ilişkisi

Bu çalışmada, OSB alanları ile CO, SO₂, NO₂ hava kirliliği düzeyleri arasındaki mekânsal ilişki, İstanbul, Ankara, İzmir, Bursa ve Antalya illerinde detaylı olarak şekil incelenmiştir. Uydu görüntüleri kullanılarak hazırlanan tematik haritalar ile OSB'lerin konumları karşılaştırılarak analizler yapılmıştır.

İstanbul ili, genel olarak şekil 4.31(a)'da görüldüğü gibi en yüksek CO seviyelerine sahip şehir olarak öne çıkmaktadır. Özellikle Avrupa Yakası'ndaki Başakşehir, İkitelli ve Tuzla gibi yoğun sanayi alanlarında OSB'lerin bulunduğu

bölgelerde CO seviyeleri de yüksek çıkmıştır. Bu durum, sanayi faaliyetlerinin trafik ve diğer kentsel etkenlerle birleşerek hava kirliliğini artırdığına işaret etmektedir.

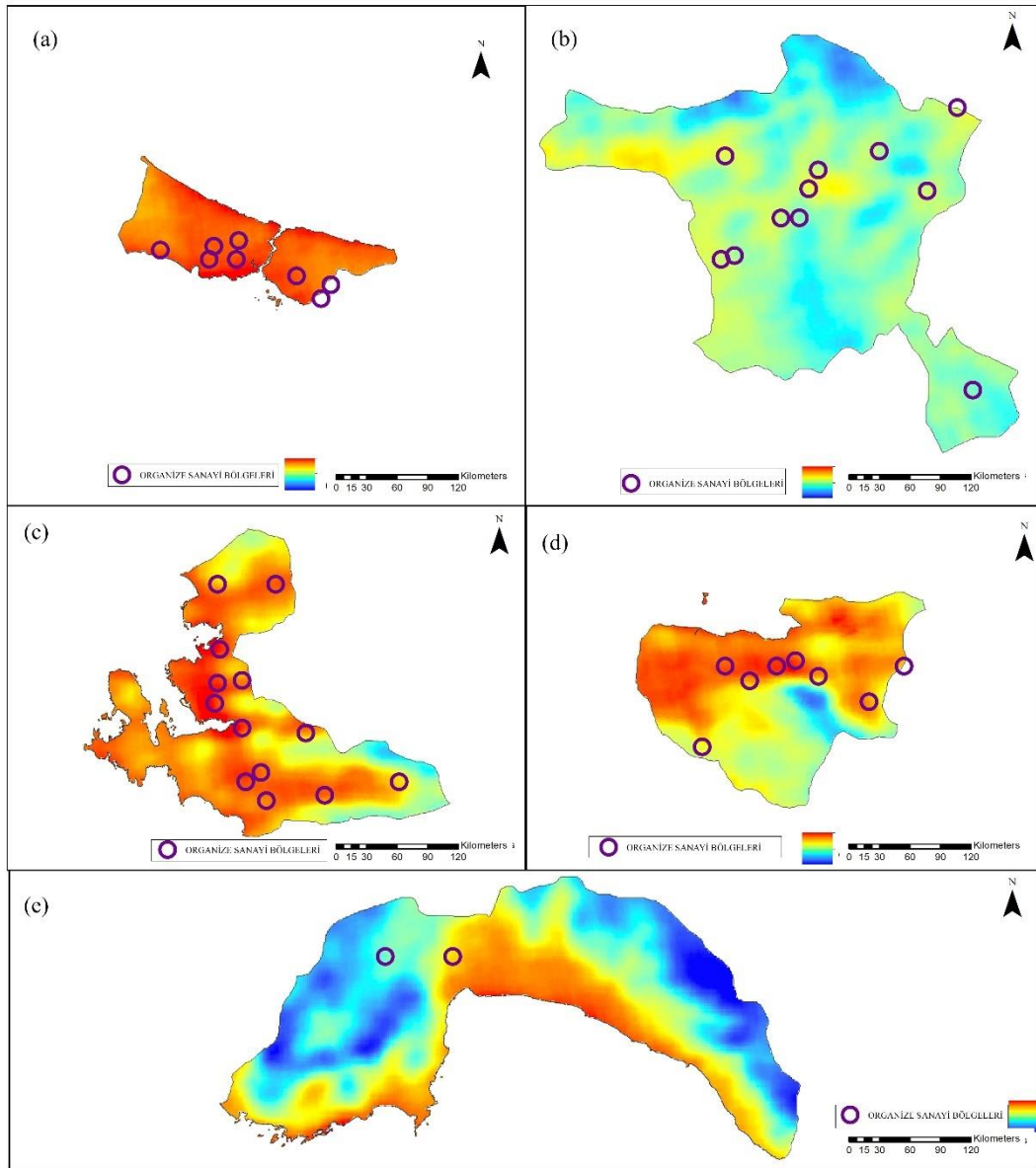
Ankara ilinde ise, Türkiye geneline kıyasla en düşük CO seviyeleri gözlemlenmiştir. Şekil 4.31.(b)'de görüldüğü gibi Sincan, Temelli ve ASO 1. OSB gibi sanayi bölgelerinde CO düzeyi kısmen yüksek olsa da genel olarak OSB alanları çevresinde CO yoğunluğunun düşük olduğu görülmüştür. Bu durum, Ankara'daki OSB'lerin şehir merkezine daha uzak konumlanmış olması ve düşük yoğunluklu sanayi faaliyetlerinin etkisiyle açıklanabilir.

İzmir, Türkiye genelinde CO düzeyi açısından ikinci sırada yer almaktadır. Şekil 4.31.(c)'de Kemalpaşa ve Aliğa gibi OSB alanlarının bulunduğu bölgelerde CO seviyelerinin yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, sanayi tesislerinin yoğunluğu ve ulaşım faaliyetleriyle ilişkilendirilebilir.

Bursa ili, CO seviyeleri bakımından üçüncü sırada yer almakta olup, OSB alanlarının bulunduğu bazı bölgelerde CO düzeyleri yüksek çıkmıştır. Şekil 4.31.(d)'de özellikle Nilüfer ve Gürsu gibi merkez ilçelerdeki OSB'lerde yüksek CO değerleri gözlemlenmiştir. Öte yandan, kentin kenar bölgelerinde yer alan bazı OSB'lerde CO seviyeleri düşük kalmıştır. Bu durum, OSB'lerin kent merkezine yakınlığı ve çevresel önlemlerle ilişkili olabilir.

Antalya ili genelinde CO düzeyleri, kıyı şeridinde ve şehir merkezinde nispeten yüksek olmakla birlikte, şekil 4.31(e)'de genel olarak düşük seviyededir. Antalya OSB'nin bulunduğu Döşemealtı bölgesinde ise CO seviyelerinin çok düşük olduğu görülmektedir. Bu durum, Antalya'nın sanayi yoğunluğunun görece az olmasına ve OSB'lerin konumlarının çevresel etkilerden uzak olmasına bağlanabilir.

Sonuç olarak, OSB'ler ile CO kirliliği arasındaki ilişki şekil 4.31'i incelediğimizde illere ve koşullara göre farklılık göstermektedir. Sanayi yoğunluğu, OSB'lerin kent merkezine yakınlığı, ulaşım altyapısı ve meteorolojik faktörler bu ilişkinin şekillenmesinde belirleyici olmaktadır.



Şekil 4.31. CO Uydu Görüntüleri (a, b, c, d, e) ile OSB Bölgeleri

SO₂ yoğunluğunun iller bazında şekil 4.32’de incelenmesi sonucunda, İstanbul’da özellikle Avrupa Yakası’nda SO₂ seviyelerinin yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu bölgede şekil 4.32(a)’da gösterilen İstanbul’da İkitelli ve Tuzla gibi Organize Sanayi Bölgeleri yer almakta olup, bu alanlarda SO₂ yoğunluğunun da belirgin şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum, sanayi faaliyetleri ile SO₂ emisyonları arasında doğru orantılı bir ilişki olduğunu ortaya koymaktadır.

Ankara’da genel olarak şekil 4.32(b)’de SO₂ yoğunluğu düşük düzeydedir. Ancak Sincan ve Temelli gibi bazı OSB alanlarının bulunduğu bölgelerde SO₂ değerlerinin kısmen yükseldiği görülmektedir. Bununla birlikte, bazı sanayi bölgelerinde SO₂

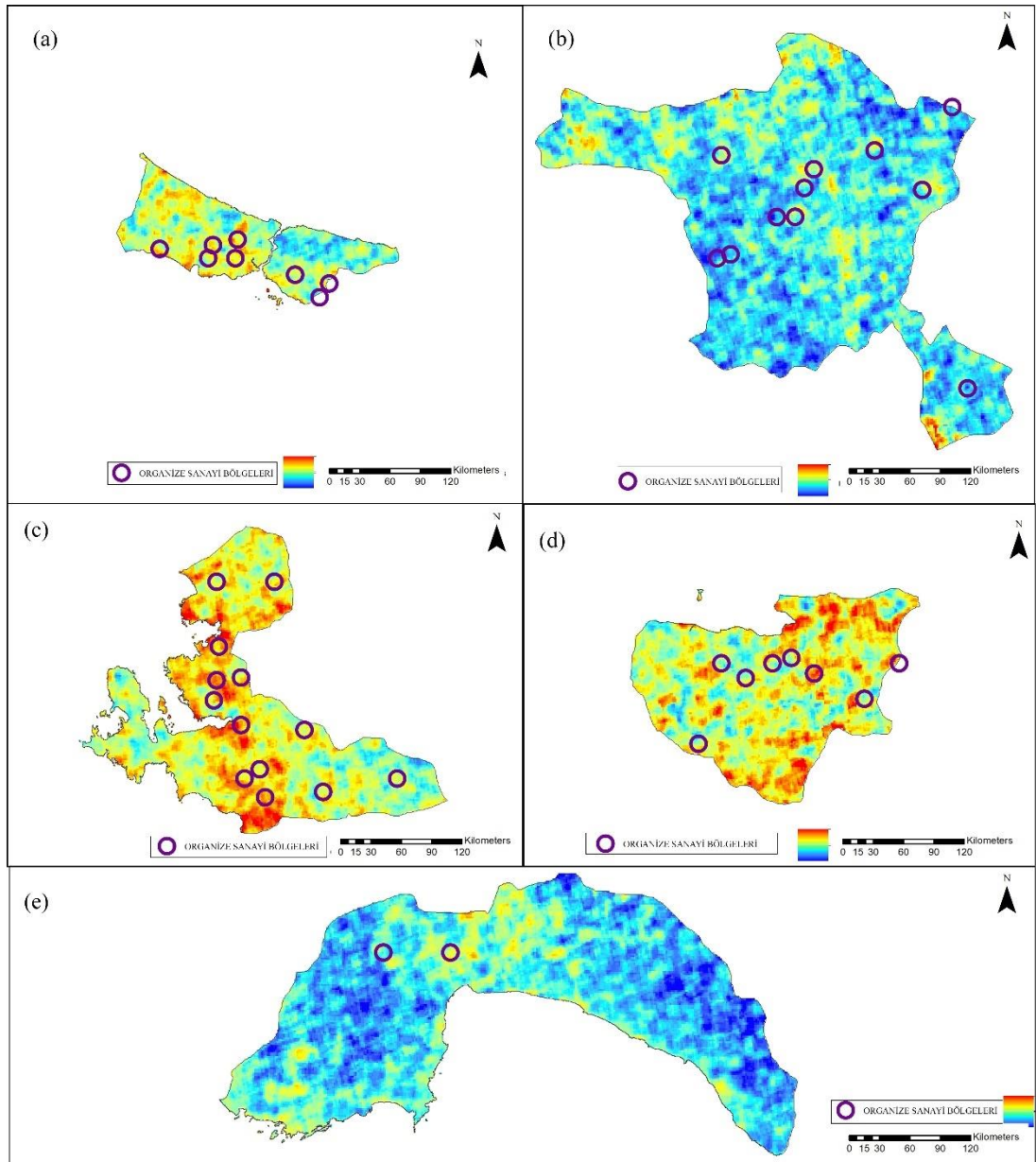
seviyelerinin düşük kalması, kaynak türleri ve emisyon miktarları arasındaki farklılıklarından olabilmektedir.

İzmir, şekil 4.32(c)'de genel olarak yüksek SO₂ seviyeleriyle dikkat çeken illerden biridir. Özellikle Kemalpaşa, Aliađa ve Torbalı OSB alanlarının bulunduğu bölgelerde SO₂ yoğunluğunun yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, sanayi faaliyetlerinin hava kalitesine olan etkisini açıkça göstermektedir.

Bursa, şekil 4.32(d)'de SO₂ yoğunluğu bakımından İzmir'in ardından en yüksek değere sahip ildir. Nilüfer, Kestel ve İnegöl gibi sanayi bölgelerinde yer alan OSB alanlarında SO₂ seviyeleri oldukça yüksektir. Bu bulgular, sanayi kümelenmelerinin hava kirliliği ile ilişkisini desteklemektedir.

Antalya'da ise şekil 4.32(e)'de genel olarak Ankara ile benzer şekilde SO₂ yoğunlukları düşük seviyelerde seyretmektedir. Organize Sanayi Bölgesi'nin bulunduğu Döşemealtı çevresinde kısmi bir artış gözlenirse de bu artış diğer büyükşehirlere kıyasla oldukça sınırlıdır.

Sonuç olarak, illerdeki SO₂ yoğunlukları şekil incelendiğinde Organize Sanayi Bölgeleriyle mekânsal olarak örtüştüğu, özellikle İzmir, Bursa ve İstanbul gibi sanayi faaliyetlerinin yoğunlaştığı bölgelerde bu ilişkinin daha belirgin olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.32. SO₂ Görüntüleri (a, b, c, d, e) ile OSB Bölgeleri

İstanbul, NO₂ yoğunluğu kent merkezinde oldukça yüksektir. Organize Sanayi Bölgeleri kent merkezine yakın konumlandığında NO₂ seviyeleri artış göstermektedir. Şekil 4.33(a)'da özellikle Avrupa Yakası'ndaki İkitelli OSB, Tuzla Deri OSB ve Anadolu Yakası'ndaki İMES, DES, OSTİM benzeri yoğun sanayi bölgeleri çevresinde hava kalitesi olumsuz etkilenmiştir. Kent merkezinden uzaklaştıkça kirlilik seviyesi düşmektedir.

Ankara, NO₂ değerleri kent merkezinde yüksek seviyededir. Şekil 4.33(b)'de görüldüğü gibi Sincan 1. OSB, Başkent OSB gibi sanayi bölgeleri kente yakın

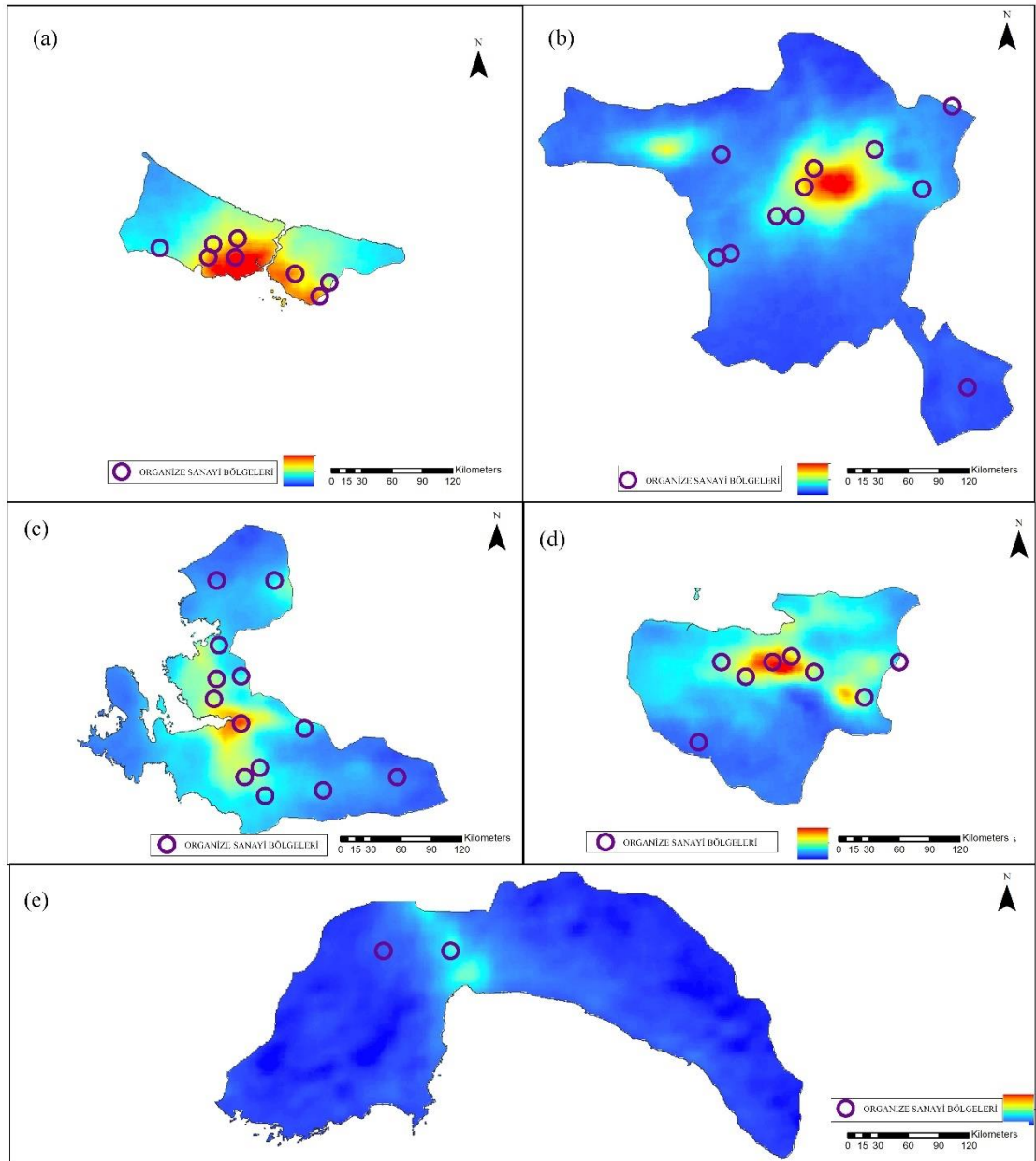
konumlandığı için çevresindeki NO₂ konsantrasyonunu artırmaktadır. Merkezden uzak bölgelerde ise hava kalitesi daha iyidir.

İzmir, kent merkezinde NO₂ yoğunluğu belirgindir. Şekil 4.33(c)'de İzmir Atatürk OSB ve Kemalpaşa OSB çevresinde sanayi faaliyetlerinden kaynaklı kirlilik artışı gözlenmiştir. Kırsal ve sahil kesimlerinde ise NO₂ değerleri daha düşüktür.

Bursa, merkezde NO₂ konsantrasyonu oldukça yüksektir. Şekil 4.33(d)'de Nilüfer OSB, Bursa OSB, Hasanağa OSB gibi sanayi bölgeleri kent merkezi ile iç içe geçmiş durumda olup bu alanlarda kirlilik belirgin şekilde artmıştır. Kentin doğu ve kuzey bölgelerinde daha düşük seviyeler ölçülmüştür.

Antalya, genel olarak NO₂ seviyeleri düşüktür. Şekil 4.33(e)'de görüldüğü gibi Antalya OSB (Döşemealtı) ve Serik bölgesindeki sanayi alanları çevresinde sınırlı bir yoğunluk artışı gözlenmiştir. Kent merkezinde ise kirlilik düzeyi diğer büyükşehirlere kıyasla oldukça düşüktür.

Sonuç olarak NO₂ yoğunluğu şekil incelendiğinde genellikle kent merkezlerinde yüksek, çeperlere doğru azalmaktadır; Organize Sanayi Bölgelerinin kent merkezine yakın konumlandığı alanlarda ise NO₂ seviyeleri daha yüksek seyretmektedir.



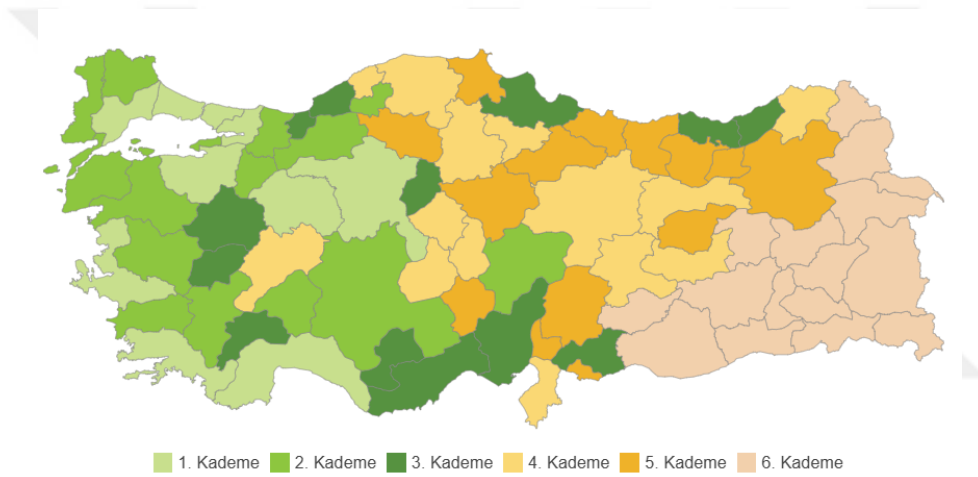
Şekil 4.33. NO₂ Uydu Görüntüleri (a, b, c, d, e) ile OSB Bölgeleri

4.5.5. Sosyo-ekonomik gelişmişlik ile COVID-19 vakalarının mekansal dağılımı arasındaki ilişki

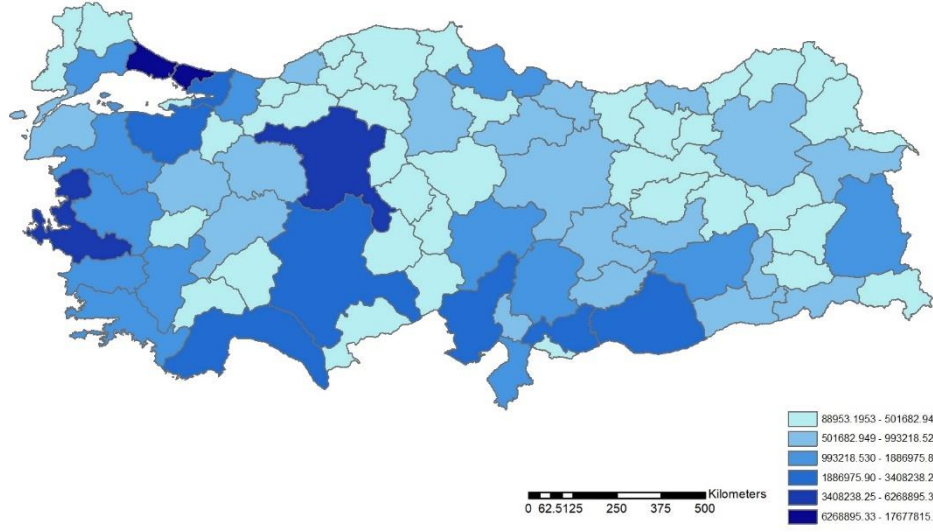
Sosyo-Ekonomik Gelişmişlik Endeksi (SEGE), demografi, istihdam, eğitim düzeyi, sağlık altyapısı, sanayi ve tarım faaliyetleri, finansal hizmetlere erişim, ulaştırma olanakları ve yaşam kalitesi gibi toplam 52 değişken dikkate alınarak hazırlanmıştır ve mekansal gösterimi şekil 4.34'te gösterilmektedir (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı 2019). Bu kapsamda gelişmiş iller, yüksek kentleşme oranı, kalabalık nüfus ve gelişmiş ulaşım altyapısı gibi COVID-19'un yayılmasını kolaylaştıran faktörleri bir arada

barındırmaktadır. Bu nedenle, sosyo-ekonomik gelişmişlik düzeyi, dolaylı olarak virüsün mekânsal yayılımında belirleyici bir unsur olarak değerlendirilebilir. Türkiye genelinde yapılan analizler, şekil 4.35'te gösterilen COVID-19 vakalarının özellikle sosyo-ekonomik gelişmişlik düzeyi yüksek olan illerde yoğunlaştığını göstermektedir.

SEGE-2017 verilerine göre Türkiye'nin en gelişmiş ilk beş ili olan İstanbul, Ankara, İzmir, Bursa ve Antalya bu tez kapsamında incelendiğinde; İstanbul ve Ankara gibi metropollerde hem nüfus yoğunluğunun hem de insan hareketliliğinin fazla olması, bu şehirlerde virüs yayılımını artıran başlıca etkenleri olduğuna varılmaktadır. Ayrıca gelişmiş sağlık altyapısı ve yüksek test kapasitesi, bu bölgelerdeki vaka tespit oranlarını etkileyen önemli faktörler arasında yer almaktadır. Gelişmişlik göstergeleri ile COVID-19 vaka dağılımlarının mekânsal olarak benzerlik göstermesi, SEGE bileşenleri ile pandeminin yayılımı arasında dolaylı bir ilişki olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 4.34. Sosyo-Ekonomik Gelişmişlik İl Endeksi 2017 (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı 2017)



şekil 4.35. COVID-19 Vaka Haritası 2021

5. SONUÇLAR

Tez çalışmasında, hava kirliliği ve kentleşmenin COVID-19 pandemisi üzerindeki etkilerini, Coğrafi Bilgi Sistemleri ve uzaktan algılama teknikleri kullanarak analiz edilmiştir. Türkiye 81 ilini kapsayan ve beş büyükşehir özelinde yapılan araştırmada, 2019-2020-2021-2022 yıllarında hava kalitesindeki değişimleri, kentleşmenin etkisini ve COVID-19 vaka sayıları arasındaki ilişkileri incelenmiştir. Çalışmada Sentinel-5P uydusundan CO, SO₂ ve NO₂ verilerini, hava kalitesi izleme istasyonundan alınan yer ölçümleri ile doğruluk analizini, COVID-19 vakaları ve kentsel dinamikler incelenmiştir. Bu bağlamda mekânsal dağılımlar, zaman serileri ve regresyon analizleri ile kapsamlı bir değerlendirme yapılmıştır.

Türkiye'de pandemi dönemi getirilen sokağa çıkma yasakları, ulaşım kısıtlamaları ve sanayi faaliyetlerinde azalmalar, ilk pandemi döneminde kapanmaların ardından 2020 yılının ilkbahar ve yaz aylarında hava kalitesinde olumlu etkiler olmuştur. NO₂ ve SO₂ kirleticilerin özellikle sanayi faaliyetleri gösteren büyükşehirlerde önemli oranda düşüşler yaşanmıştır. 2021 yılında kısıtlamaların kademeli olarak kaldırılmasıyla birlikte vakalarda artış ve hava kalitesinde de kötüleşme eğilimi göstermiştir. 2022 yılında ise aşılarmaya geçerek kısıtlamalarında kalkmasıyla normal hayata geçiş sağlandı ve 2021 yılına kıyasla genel olarak hava kalitesinde iyileşmeler olduğu özellikle CO, NO₂ ve SO₂ düzeylerinde düşüşler belirgin hale gelmiştir. Bu durum, pandemi sonrası dönemde alınan çevresel önlemlerin ve değişen sosyal alışkanlıkların örneğin uzaktan çalışma gibi durumların hava kalitesi üzerinde olumlu etkiler bırakmış olabileceğini göstermektedir.

İstatistiksel analizlerden çoklu regresyon analizi sonucunda, özellikle 2021 yılı boyunca NO₂ ve CO konsantrasyonları ile COVID-19 vaka sayıları arasında anlamlı korelasyonlar tespit edilmiştir. Hava kalitesinin kötüleştiği dönemlerde vaka sayılarında da artış eğilimi gözlemlenmiştir. Bu bulgu, hava kirliliğinin solunum yolu hastalıklarını ağırlaştırıcı etkisi nedeniyle COVID-19'un yayılım ve şiddeti üzerinde etkili olabileceğini desteklemektedir. Ayrıca yoğun kentleşmenin olduğu bölgelerde özellikle İstanbul, Ankara, İzmir, Bursa ve Antalya hem hava kirliliği hem de COVID-19 vakalarının daha yoğun olduğu gözlenmiştir. Bu durum, kentleşme ve nüfus yoğunluğunun da hastalığın yayılımı üzerinde etkili bir faktör olduğunu ortaya koymuştur.

Yerleşim alanları, termik santraller ve hava kirletici gazlar arasındaki ilişkiyi değerlendirmek amacıyla Türkiye geneli ve beş büyükşehir ölçeğinde gerçekleştirilen analizler sonucunda oluşturulan CO, SO₂ ve NO₂ tematik haritalar incelenmiştir. Bu haritalar doğrultusunda, özellikle NO₂ kirliliğinin yoğun olduğu bölgelerin kent yerleşim alanlarıyla büyük ölçüde örtüştüğü gözlemlenmiştir. Bu durum; nüfusun fazla olduğu, araç trafiğinin yoğunlaştığı ve yapılaşmanın arttığı alanlarda NO₂ seviyelerinin yükseldiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, NO₂'nin yüksek olduğu bu bölgelerde COVID-19 vakalarının da yüksek seyrettiği görülmüş; bu da hava kalitesinin halk sağlığı üzerindeki etkisini bir kez daha vurgulamaktadır. Öte yandan, Türkiye genelinde yapılan karşılaştırmalarda termik santrallerin yoğun olarak yer aldığı bölgelerde hava kirliliği düzeylerinin, özellikle SO₂ ve NO₂ oranlarının, diğer bölgelere kıyasla daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu durum, termik santrallerin hava kirliliği üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ortaya koymaktadır.

Elde edilen bu bulgular sonucunda hem kentleşmenin hem de enerji üretim tesislerinin hava kirliliği üzerinde doğrudan etkili olduğunu ortaya koymakta; böylece hava kalitesinin değerlendirilmesinde mekânsal analizlerin önemli olduğunu göstermesi bakımından çalışmaya anlamlı bir katkı sunmaktadır.

COVID-19 pandemi dönemi kısıtlamaları başlangıcından itibaren sanayi faaliyetlerinde ve ulaşımdaki azalmalar, hava kalitesi üzerinde kısa vadeli olumlu etkiler yaratmıştır. Ancak bu olumlu etkilerin sürdürülebilir olması için geçici değil, kalıcı politikalar gerektiği ortaya çıkmaktadır. Ayrıca pandemi süreci, hava kalitesinin izlenmesi ve yönetilmesinde uzaktan algılama ve CBS teknolojilerinin ne kadar etkili ve gerekli olduğunu bir kez daha anlaşılmıştır.

Türkiye genelinde ve beş büyükşehir özelinde yapılan analizler, sosyo-ekonomik gelişmişlik düzeyi yüksek olan kentlerde COVID-19 vakalarının daha yoğun görüldüğünü ortaya koymuş; bu durum, nüfus yoğunluğu, ulaşım olanakları ve insan hareketliliği gibi gelişmişlik göstergelerinin virüsün yayılımını etkileyen temel faktörler arasında yer aldığını göstermiştir.

Sonuç olarak bu tez çalışması, hava kirliliği ile COVID-19 arasındaki ilişkiyi ortaya koyarken aynı zamanda kentleşme, nüfus yoğunluğu ve sanayi gibi faktörlerin bu süreçte önemli olduğunu göstermiştir. Pandemi gibi olağanüstü durumların çevresel etkileri değerlendirilirken, bütüncül analizlerin önemi bir kez daha vurgulanmıştır. Türkiye özelinde elde edilen bulgular, hem mevcut hava kalitesi politikalarının değerlendirilmesi hem de gelecekteki olası krizlere hazırlık açısından önemli çıkarımlar sunmaktadır.

6. KAYNAKLAR

- Barreto, W. L. (2021). Spatial dynamics of COVID-19 in São Paulo: A cellular automata and GIS approach. *Sustainable Cities and Society*, 74, p. 103190.
- Bera, B., Bhattacharjee, S., Shit, P. K., Sengupta, N., & Saha, S. (2020, Temmuz 28). Significant impacts of COVID-19 lockdown on urban air pollution in Kolkata (India) and amelioration of environmental health. *Environment, Development and Sustainability*, pp. 6913-6940.
- Biswas, M., & Ayantika, D. (2021, January). Impact of COVID-19 Control Measures on Trace Gases (NO₂, HCHO and SO₂) and Aerosols over India during Pre-monsoon of 2020. *Aerosol and Air Quality Research*, 21, p. 200306.
- Bontempi, E. (2020, February). The europe second wave of COVID-19 infection and the Italy “strange” situation. *Environmental Research*, p. 193.
- Briz-Redon, A. B.-S.-A. (2022). A city-level analysis of PM_{2.5} pollution, climate and COVID-19 early spread in Spain. *Environmental Research*, 203, p. 111810.
- CDC. (2020). *Groups at higher risk for severe illness*. From Centers for Disease Control and Prevention: <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/need-extra-precautions/groups-at-higher-risk.html>
- Clay, K. L. (2018). *Pollution, infectious disease, and mortality: Evidence from the 1918 Spanish influenza pandemic*. NBER (National Bureau of Economic Research).
- Coccia, M. (2020). Factors determining the diffusion of COVID-19 and suggested strategy to prevent future accelerated viral infectivity similar to COVID. *The Science of the Total Environment*, 729, p. 138474.
- Conticini, E., Frediani, B., & Caro, D. (2020). Can atmospheric pollution be considered a co-factor in extremely high level of SARS-CoV-2 lethality in Northern Italy? *Environmental Pollution*, p. 114465.
- Coogan, P. F., White, L. F., Jerrett, M., Brook, R. D., Su, J. G., Seto, E., & Rosenberg, L. (2016). Air pollution and incidence of hypertension and diabetes mellitus in black women living in Los Angeles. *Circulation*, 133(2), pp. 169–176.
- Costa, G., Pauliquevis, T., Heise, E. F., Potgieter-Vermaak, S., & Godoi, A. F. (2023). Spatialized PM_{2.5} during COVID-19 pandemic in Brazil’s most populous southern city: Implications for post-pandemic era. *Environmental Science and Pollution Research*, pp. 14912–14925.
- Cui, Y., Zhang, Z. F., Froines, J., Zhao, J., & Wang, H. (2003). Air pollution and case fatality of SARS in the People's Republic of China: An ecologic study. *Environmental Health: A Global Access Science Source*, p. 15.
- Çalık, H. (2024). COVID-19 pandemi sürecinde Türkiye’de hava kalitesindeki değişimlerin incelenmesi. *Çevre Bilimleri ve Mühendisliği Dergisi*, pp. 45–58.
- Çapraz, Ö., Demir, G., & Kaya, G. (2021). Türkiye’de büyükşehirlerde karbonmonoksit yoğunluklarının zamansal dağılımı. *Çevre ve Şehircilik Dergisi*, pp. 42–55.

- ÇŞİDB (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı). (tarih yok). *Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı* . <https://sim.csb.gov.tr/Services/AirQuality> adresinden alındı [Son erişim tarihi: 25.12.2024]
- ÇŞİDB(Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı). (2008, haziran 6). *Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği*. Resmî Gazete: https://havakalitesi.ibb.gov.tr/Files/CMS_Content/YON-26898HavaKalitesi-converted.pdf [Son erişim tarihi: 10.01.2025]
- ÇŞİDB (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı). (2022). *Hava Kalitesi Haber Bültenleri*. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı: <https://ced.csb.gov.tr/hava-kalitesi-haber-bultenleri-i-82299> [Son erişim tarihi: 15.12.2024]
- ÇŞİDB (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı). (2019). *Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı Raporu*. <https://sim.csb.gov.tr/> [Son erişim tarihi: 12.01.2024]
- ÇŞİDB (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı). (2023a). *Antalya ili çevre durum raporu 2023*. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı.
- ÇŞİDB (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı). (2024). *Ulusal hava kalitesi izleme ağı – Aylık hava kalitesi bülteni: Mayıs 2024*. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı.
- ÇŞİDB (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı). (2023b). *Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı Teknik Bilgileri*. From <https://sim.csb.gov.tr/>: <https://sim.csb.gov.tr/>
- Environmental Protection Agency (EPA). (2019). *Carbon monoxide (CO) pollution*. From U.S. Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/co-pollution>
- European Space Agency (ESA). (2023). *TROPOMI Instrument Performance Overview*. From Sentinel Online: <https://sentinel.esa.int>
- Feng, C., Li, J., Sun, W., Zhang, Y., & Wang, Q. (2016). Impact of ambient fine particulate matter (PM_{2.5}) exposure on the risk of influenza-like illness. *Environmental Health*, 15(17).
- Filonchik, M., Hurynovich, V., Yan, H., Gusev, A., & Shpilevskaya, N. (2020). Impact assessment of COVID-19 on variations of SO₂, NO₂, CO and AOD over East China. *Aerosol and Air Quality Research*, pp. 1530–1540.
- Ghasempour, F., Sekertekin, A., & Kutoglu, S. H. (2021). Google Earth Engine based spatio-temporal analysis of air pollutants before and during the first wave COVID-19 outbreak over Turkey via remote sensing. *Journal of Cleaner Production*, p. 128599.
- Global Burden of Disease Collaborative Network. (2017). *GBD Results Tool*. From Institute for Health Metrics and Evaluation: <http://ghdx.healthdata.org/gbd-results-tool>
- Goldsworthy, L. (2013). Design measures for reducing ship emissions. *Journal of Marine Engineering, Technology*, pp. 45-59.
- Guan, M. J., Liang, M. H., Zhao, Y., & Liang, H. R. (2020). Comorbidity and its impact on 1,590 patients with COVID-19 in China: A nationwide analysis. *European Respiratory Journal*, p. 2000547.

- Gurjar, B., Ravindra, K., & Nagpure,, A. S. (2016). Air pollution trends over Indian megacities and their local-to-global implications. *Atmospheric Environment*, pp. 475–495.
- Gül, M., & Kocabaş, A. (2020). COVID-19 salgını sürecinde Bursa’da hava kalitesinin değerlendirilmesi. *Atmosfer Dergisi*, pp. 95–110.
- Harita Genel Müdürlüğü. (2023). *Türkiye nüfus dağılışı ve yoğunluğu haritası*. Retrieved nisan 6, 2025 from T.C. Milli Savunma Bakanlığı: <https://www.harita.gov.tr/urun/turkiye-nufus-dagilisi-ve-yogunlugu-haritasi-2023/673>
- Harrod, K. S., Jaramillo, R. J., Rosenberger, C. L., Wang, S. Z., & Berger, J. A. (2003). Increased susceptibility to RSV infection by exposure to diesel engine emissions. *American Journal of Respiratory Cell and Molecular Biology*, pp. 451–463.
- Hassan, F., Chaudhry, M. U., Yasir, M., Asghar, M. N., & Sarkodie, S. A. (2021). Monitoring the impact of COVID-19 lockdown on the production of nitrogen dioxide (NO₂) pollutants using satellite imagery: A case study of South Asia. *Sustainability*, p. 7184.
- Health and Environment Alliance (HEAL). (2015). *Turkey coal power plants health impacts toolkit*. Health and Environment Alliance (HEAL).
- Horne, B. D., Joy, E. A., Hofmann, M. G., Gesteland, P. H., & Cannon, J. B. (2018). Short-term elevation of fine particulate matter air pollution and acute lower respiratory infection. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, pp. 759–766.
- IQAir. (2023). *Antalya air quality index (AQI) and Turkey air pollution*. From IQAir: <https://www.iqair.com/turkey/antalya>
- Jaspers, I., Ciencewicki, J. M., Zhang, W., Brighton, L. E., & Carson, J. L. (2005). Diesel exhaust enhances influenza virus infections in respiratory epithelial cells. *Toxicological Sciences*, pp. 900–1002.
- Karaca, F., & Camcı, F. (2010). Contribution of meteorological parameters to SO₂ and PM concentrations in Istanbul, Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, pp. 543–554.
- Kaya, S., & Yavuz, E. (2024). COVID-19 salgınının Türkiye’de hava kalitesi üzerindeki etkisi: Büyükşehirler örneği. *Journal of Environmental Science and Engineering*, pp. 112–125.
- Kılıç, S., & Yetimoğlu, T. (2021). Bursa ili hava kalitesinin değerlendirilmesi ve mekânsal analizlerle hava kirliliği kaynaklarının belirlenmesi. *Uluslararası İnsan ve Sanat Araştırmaları Dergisi*, pp. 265-278.
- Lee, G. I., Saravia, J., You, D., Shrestha, B., & Jaligama, S. (2014). Exposure to combustion-generated environmentally persistent free radicals enhances severity of influenza virus infection. *Particle and Fibre Toxicology*, p. 57.
- Li, X. Y. (1996). Free radical activity and pro-inflammatory effects of particulate air pollution (PM₁₀). *Thorax*, pp. 1216–1222.

- Mahato, S., Pal, S., & Ghosh, K. G. (2020). Effect of lockdown amid COVID-19 pandemic on air quality of the megacity Delhi, India. *Science of The Total Environment*, p. 139086.
- Marmara Belediyeler Birliği. (2020). *Kentsel alanlarda hava kalitesi konuřuldu*. From Marmara Belediyeler Birliği: <http://marmara.gov.tr/kentsel-alanlarda-hava-kalitesi-konusuldu-23451>
- Matc1, D. (2022). COVID-19 pandemisinin arazi 1rt1s1 sınıfları 1zerindeki hava kirliliği etkisi: T1rkiye 1rneği. *T1rk Coğrafya Dergisi*, pp. 23–38.
- Mathieu, M. E., Gray, J., & Richmond-Bryant, J. (2021). Spatial associations of long-term exposure to diesel particulate matter with seasonal and annual mortality due to COVID-19 in the contiguous United States. *Environmental Research*, p. 111368.
- Mete, B., Demirhindi, H., Kanat, C., Dođan Mete, E., & Acar, O. (2021). The effect of measures taken during the COVID-19 pandemic on air pollution: An East Mediterranean example from Turkey. *Turkish Journal of Public Health*, pp. 225–234.
- Mokarram, M., Taripanah, F., & Pham, T. M. (2021). Assessing air pollution changes during the COVID-19 and its impact on the urban environment using remote sensing and neural networks. *Environmental Monitoring and Assessment*, pp. 1–15.
- Mokgoja, B., Mhangara, P., & Shikwambana, L. (2023). Assessing the impacts of COVID-19 on SO₂, NO₂, and CO trends in Durban using TROPOMI, AIRS, OMI, and MERRA-2 data. *Atmosphere*, p. 1304.
- Redon, J., P1rez, L., Garc1a, A., & L1pez, M. (2022). PM_{2.5} air pollution and the spread of COVID-19 in eight Spanish cities: A statistical evaluation. *Environmental Research*, p. 111984.
- Right to Clean Air Platform, Greenpeace. (2019). *Afşin-Elbistan Termik Santrallerinin Sağlık Etkisi*. Greenpeace.
- Sari, N. M., & Kuncoro, M. N. (2021). Monitoring of CO, NO₂ and SO₂ levels during the COVID-19 pandemic in Iran using remote sensing imagery. *Geography, Environment, Sustainability*, 14(4).
- Saygılı, R. (2023). *T1rkiye Termik Santraller Haritası*. From Coğrafya Harita: http://cografyaharita.com/turkiye_enerji_haritalari.html
- Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2016). *Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change*. John Wiley & Sons.
- Sharifi, A., & Khavarian-Garmsir, A. R. (2020). The COVID-19 pandemic: Impacts on cities and major lessons for urban planning, design, and management. *Science of The Total Environment*, p. 142391.
- Sharma, S., Zhang, M., Gao, J., & Zhang, H. (2020). Effect of restricted emissions during COVID-19 on air quality in India. *Science of The Total Environment*, p. 138878.
- Shrestha, P. M., Humphrey, J. L., Carlton, E. J., Adgate, J. L., & Barton, K. E. (2019). Impact of outdoor air pollution on indoor air quality in low-income homes during

- wildfire seasons. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, p. 3535.
- Si, J., Zhang, L., & Li, Y. (2024). Response of air pollution to meteorological conditions and socioeconomic activities associated to the COVID-19 outbreak in the Yangtze River Economic Belt.
- Sünsülü, M., & Kalkan, K. (2022). COVID-19 salgınının Marmara Bölgesi'nde hava kalitesi üzerindeki etkisinin Sentinel-5P uydu verileri ile incelenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, pp. 441–454.
- T.C. İçişleri Bakanlığı. (2021). 81 İl Valiliğine Kademeli Normalleşme Tedbirleri Genelgesi. <https://www.icisleri.gov.tr/81-il-valiligine-kademeli-normallesme-tedbirleri-genelgesi-gonderildi> [Son erişim tarihi: 03.12.2024]
- T.C. Sağlık Bakanlığı. (2020). *COVID-19 Bilgilendirme Platformu*. COVID-19 Bilgilendirme Platformu: <https://covid19.saglik.gov.tr/> [Son erişim tarihi: 12.03.2025]
- T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı. (2017). *SEGE çalışmaları*. 2017 il SEGE: <https://www.sanayi.gov.tr/merkez-birimi/b94224510b7b/sege> adresinden alındı [Son erişim tarihi: 28.06.2025]
- T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı. (2019). *İllerin ve bölgelerin sosyo-ekonomik gelişmişlik sıralaması araştırması (SEGE-2017)*. T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı: https://www.sanayi.gov.tr/assets/pdf/İllerin_ve_Bolgelerin_SEGE_2017.pdf [Son erişim tarihi: 28.06.2025]
- T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı. (2025). *Sanayi Bilgi Sistemi Atlası (MEYDİP)*. Sanayi Bölgeleri Atlası: <https://meydip.sanayi.gov.tr/#/sb-atlas> [Son erişim tarihi: 05.04.2025]
- Temiz Hava Hakkı Platformu. (2020). *Hava kirliliği ve sağlığa etkileri*. Kara Rapor. From <https://www.temizhavahakki.org/wp-content/uploads/2020/09/Kara-Rapor-2020-Son27082020.pdf>
- Temiz Hava Hakkı Platformu. (2021). *Hava Kalitesi Sınır Değerleri*. Retrieved 03 02, 2025 from Temiz Hava Hakkı Platformu: <https://www.temizhavahakki.com>
- Temiz Hava Hakkı Platformu. (2024). *Türkiye’de Hava Kirliliği ve Kömürlü Santrallerin Etkisi*. Kara Rapor. From <https://www.temizhavahakki.org>
- TURCOVID19. (2021). *Türkiye il düzeyi haftalık vaka sayıları*. Retrieved ocak 5, 2025 from TURCOVID19: <https://turcovid19.com/acikveri/>
- TÜBİTAK-MAM. (2020). *Hava Kalitesi İzleme Raporu*. Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu, Marmara Araştırma Merkezi.
- Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). (2019-2022). *Ankara ili 2019–2022 yıllarına ait nüfus verileri (ADNKS)*. From Türkiye İstatistik Kurumu: <https://data.tuik.gov.tr> [Son erişim tarihi: 15.02.2025]
- Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). (2019-2022). *Antalya ili 2019–2022 yıllarına ait nüfus verileri (ADNKS)*. From Türkiye İstatistik Kurumu: <https://data.tuik.gov.tr> [Son erişim tarihi: 15.02.2025]

- Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). (2019-2022). *Bursa ili 2019–2022 yıllarına ait nüfus verileri (ADNKS)*. From Türkiye İstatistik Kurumu: <https://data.tuik.gov.tr> [Son erişim tarihi: 15.02.2025]
- Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). (2019-2022). *İstanbul ili 2019–2022 yıllarına ait nüfus verileri (ADNKS)*. From Türkiye İstatistik Kurumu: <https://data.tuik.gov.tr> [Son erişim tarihi: 15.02.2025]
- Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). (2019-2022). *İzmir ili 2019–2022 yıllarına ait nüfus verileri (ADNKS)*. From Türkiye İstatistik Kurumu: <https://data.tuik.gov.tr> [Son erişim tarihi: 15.02.2025]
- Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). (2019-2022). *Türkiye genelinde 2019–2022 yıllarına ait nüfus verileri (ADNKS)*. From Türkiye İstatistik Kurumu: <https://data.tuik.gov.tr> [Son erişim tarihi: 15.02.2025]
- Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). (2022). *2022 yılı ADNKS sonuçlarına göre Türkiye’de en fazla nüfusa sahip on şehir*. From Türkiye İstatistik Kurumu: <https://data.tuik.gov.tr> [Son erişim tarihi: 15.02.2025].
- US EPA. (2018). *Technical assistance document for the reporting of daily air quality – the Air Quality Index (AQI)*. U.S. Environmental Protection Agency.
- van Doremalen, N., Bushmaker, T., Morris, D. H., Holbrook, M. G., & Gamble, A. (2020). Aerosol and surface stability of SARS-CoV-2 as compared with SARS-CoV-1. *New England Journal of Medicine*, pp. 1564–1567.
- World Health Organization (WHO). (2021). *Nitrogen dioxide (NO₂): Air quality guidelines*. From World Health Organization: <https://www.who.int>
- World Health Organization (WHO). (2021). *Sulfur dioxide (SO₂): Air quality guidelines*. From World Health Organization: <https://www.who.int>
- World Health Organization. (2005). *Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide: Global update 2005. Summary of risk assessment*. Retrieved Mart 15, 2025 from https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/69477/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_eng.pdf
- World Health Organization. (2018). *9 out of 10 people worldwide breathe polluted air, but more countries are taking action*. From World Health Organization: <https://www.who.int/news/item/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action>
- World Health Organization. (2020). *Household air pollution and health*. From World Health Organization: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health>
- World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. World Health Organization.
- Xie, J., & Zhu, Y. (2020). Association between ambient temperature and COVID-19 infection in 122 cities from China. *Science of The Total Environment*, 724, p. 138201.

- Xie, J., & Zhu, Y. (2020). Association between ambient temperature and COVID-19 infection in 122 cities from China. *Science of The Total Environment*, p. 138201.
- Yıldız, M., & Özdemir, H. (2021). Ankara kentinde hava kirliliğine neden olan kaynakların zamansal değişimi. *Çevre ve Şehircilik Dergisi*, 13(3), pp. 240–253.
- Yörük, T., & Yaman, K. (2008). Organize Sanayi Bölgeleri ve Çevre Sorunları. *SDÜ Orman Fakültesi Dergisi*, pp. 154-164.
- Zeng, F., Huang, Y., Guo, Y., Yin, M., & Chen, X. (2020). Association of inflammatory markers with the severity of COVID-19: A meta-analysis. *International Journal of Infectious Diseases*, pp. 467–474.
- Zhang, Q., Boersma, K. F., Zhao, B., Eskes, H., & Chen, C. (2023). Quantifying daily NO_x and CO₂ emissions from Wuhan using satellite observations from TROPOMI and OCO-2. *Atmospheric Chemistry and Physics*, pp. 551–563.
- Zoran, M. A., Savastru, R. S., Savastru, D. M., & Tautan, M. N. (2020). Assessing the relationship between surface levels of PM2.5 and PM10 particulate matter impact on COVID-19 in Milan, Italy. *Science of The Total Environment*, p. 139825.

ÖZGEÇMİŞ

Ayşe SEKMEN

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans 2022-2025	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Şehir ve Bölge Planlama Anabilim Dalı, Antalya
Lisans 2017-2021	Akdeniz Üniversitesi Mimarlık Fakültesi, Şehir ve Bölge Planlama Bölümü, Antalya