

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**MARMARA BÖLGESİ VE İSTANBUL ÖZELİNDE
KENTSEL DOKU – HAVA KİRLİLİĞİ VE YEREL İKLİM İLİŞKİLERİNİN
İNCELENMESİ**

Derya ARABACI

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

UZAKTAN ALGILAMA VE COĞRAFI BİLGİ SİSTEMLERİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

OCAK 2025

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**MARMARA BÖLGESİ VE İSTANBUL ÖZELİNDE
KENTSEL DOKU – HAVA KİRLİLİĞİ VE YEREL İKLİM İLİŞKİLERİNİN
İNCELENMESİ**

Derya ARABACI

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
UZAKTAN ALGILAMA VE COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİ
ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ**

OCAK 2025

ANTALYA

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

**MARMARA BÖLGESİ VE İSTANBUL ÖZELİNDE
KENTSEL DOKU – HAVA KİRLİLİĞİ VE YEREL İKLİM İLİŞKİLERİNİN
İNCELENMESİ**

**Derya ARABACI
UZAKTAN ALGILAMA VE COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİ
ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ**

OCAK 2025

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MARMARA BÖLGESİ VE İSTANBUL ÖZELİNDE
KENTSEL DOKU – HAVA KİRLİLİĞİ VE YEREL İKLİM İLİŞKİLERİNİN
İNCELENMESİ

Derya ARABACI

UZAKTAN ALGILAMA VE COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİ
ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

Bu tez 16/01/2025 tarihinde jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Çağdaş KUŞÇU ŞİMŞEK (Danışman)

Prof. Dr. Alper ÜNAL

Prof. Dr. Ali KILÇIK

Doç. Dr. Senem KOZAMAN AYGÜN

Doç. Dr. Nusret DEMİR

ÖZET

MARMARA BÖLGESİ VE İSTANBUL ÖZELİNDE KENTSEL DOKU - HAVA KİRLİLİĞİ VE YEREL İKLİM İLİŞKİLERİNİN İNCELENMESİ

Derya ARABACI

Doktora Tezi, Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Çağdaş KUŞÇU ŞİMŞEK

Ocak 2025; 137 sayfa

Hızla artan dünya nüfusunun yarısından fazlasının şehirlerde yaşaması, kentsel alanların hızla genişlemesine yol açmaktadır. Kentsel genişleme, yalnızca çevresel baskıları artırmakla kalmamakta, aynı zamanda iklim değişikliğinin etkilerinin yoğunlaştığı alanları oluşturmaktadır. Bu durum, aşırı hava olaylarının etkilerini daha belirgin hale getirmektedir. Şiddetli yağışlar, sıcak hava dalgaları ve fırtınalar, özellikle büyük şehirlerde önemli riskler oluşturmakta ve kentlerin artan nüfus ile çevresel tehditlere uyum sağlayacak şekilde planlanmasını zorunlu kılmaktadır. Kentsel alanların tasarımında insan termal konforunun gözetilmesi, hava kalitesinin artırılması ve ani sıcaklık değişimlerine karşı dirençli kentler oluşturulması önem taşımaktadır. Özellikle yoğun nüfus, ulaşım ağları ve sanayi faaliyetleri gibi faktörler, kentsel iklim dinamiklerini doğrudan etkileyerek ısı adası etkisi ve hava kirliliği gibi sorunlara yol açmaktadır. Bu sorunlar, sürdürülebilir ve adil bir şehir planlamasını zorlaştırırken, düşük hava kalitesi ve termal stres gibi etkiler kent sakinlerinin yaşamını olumsuz etkilemektedir. Bu bağlamda, hava kirliliği ve kentsel iklim değişikliklerine yönelik planlama çalışmaları, daha yaşanabilir şehirler için öneme sahiptir.

Bu tez çalışması, arazi kullanımı ve hava kirliliği arasındaki ilişkinin mevsimsel etkiler dahil üst ölçekte araştırılmasıyla başlayarak, daha alt ölçekte yerel iklim, kent dokusu ve hava kirleticiler arasındaki ilişkilerin incelenmesine yönelik sistematik bir analiz sunmaktadır. İlk aşamada, Marmara Bölgesi'ndeki İstanbul-Gebze, Kocaeli-Yalova, Bursa ve Çanakkale illerinde arazi kullanım türlerinin hava kirleticiler üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. CORINE arazi kullanımı verilerinden yapay yüzeyler, tarım alanları ve orman alanlarının; Sentinel 5P/TROPOMI uydu verileriyle ilişkilendirilmesi sonucunda aerosol indeks, NO₂ ve SO₂ üzerindeki etkiler post-hoc ANOVA testleriyle değerlendirilmiştir. Analizler 5 km ve 1 km çözünürlükte ayrı ayrı gerçekleştirilmiş ve çözünürlük karşılaştırmaları sonucunda, analizler için 1 km ölçeği uygun bulunmuştur. İkinci aşamada, İstanbul-Gebze bölgesinde daha detaylı bir inceleme yapılmış, yapay yüzeylerin alt sınıfları (sürekli şehir, kesikli şehir ve endüstriyel/ticari alanlar) ile hava kirleticiler arasındaki ilişkiler araştırılmıştır. Bulgular, yerel iklim, kentsel yapı ve hava kirleticiler arasındaki dinamiklerin daha kapsamlı bir şekilde ele alınmasını sağlamıştır. Çalışmanın üçüncü aşamasında, İstanbul'un kentsel alanlarında, yüzey sıcaklığı ile kentsel doku, hava kirliliği, NDVI, NDBI, yükseklik, kıyıya uzaklık ve ormana uzaklık gibi faktörler arasındaki ilişkiler analiz edilmiştir. Bu analizlerde, korelasyon testleri, karar ağaçları, çoklu doğrusal regresyon analizi ve XGBoost regresyon modeli kullanılarak ilişkiler detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir.

Tez çalışmasının sonuçlarına göre, ilk aşamada İstanbul-Gebze, Kocaeli-Yalova, Bursa ve Çanakkale bölgelerinde yapay yüzeyler, tarım alanları ve orman alanları gibi farklı arazi kullanım türlerinin hava kirleticiler üzerindeki etkilerinin farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Bu etkilerin dönemsel ve mevsimsel olarak değişkenlik gösterdiği ortaya konmuştur. İstanbul-Gebze Bölgesi'ndeki kentsel alanlarda yapılan incelemede, aerosol indeks ve NO₂ verilerinin, sürekli şehir yapısına sahip alanlar ile kesikli şehir yapısına sahip alanlar arasında, sonbahar 2021 dönemi hariç her iki yılın tüm mevsimlerinde anlamlı farklılıklar gösterdiği tespit edilmiştir. İkinci aşamada, hava kirleticiler ile kentsel doku ilişkisi, yol verisi de dahil edilerek korelasyon testleriyle araştırılmıştır. Sonuçlar, aerosol indeks ve NO₂ hava kirleticilerinin, ağırlıklandırılmış kentsel doku-yol sınıfıyla en yüksek korelasyona sahip olduğunu göstermiştir. Bu sınıfı sırasıyla kentsel doku ve yol verisi izlemiştir. Hava kirleticiler ile kentsel doku sınıfları (ayrık düşük katlı, ayrık orta katlı, kompakt düşük/orta katlı) arasındaki ilişki, yol yoğunluğu da dikkate alınarak incelenmiştir. Post-hoc test sonuçları, aerosol indeks ile NO₂ hava kirliliği verilerinin, kompakt düşük/orta katlı ve yol yoğunluğu yüksek doku sınıflarında, ayrık düşük katlı ve ayrık orta katlı doku sınıflarına göre istatistiksel olarak anlamlı farklılık gösterdiğini ortaya koymuştur. Üçüncü aşamada, yüzey sıcaklığı üzerindeki bağımsız değişkenlerin etkisi (mevsim, NDVI, NDBI, kentsel doku, aerosol indeks, NO₂, SO₂, kıyıya uzaklık, ormana uzaklık, yükseklik), herhangi bir dönem ayrımı gözetilmeksizin XGBoost makine öğrenimi tekniği kullanılarak modellenmiş; SHAP analizi yardımıyla da bu değişkenlerin etki derecesi ve yönü değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, yüzey sıcaklığı üzerinde en büyük etkiye mevsimin sahip olduğunu (önem sıralaması değeri, 0.6) göstermiştir. Mevsimi sırasıyla 0.35'lik değerle NDBI, 0.23'lük değerle NDVI ve kent dokusu takip etmektedir. Yerel iklimin modellenmesinde kullanılan çoklu doğrusal regresyon ve XGBoost regresyon modellerinin doğrulukları karşılaştırıldığında, çoklu doğrusal regresyon modelinin doğruluk değeri (R^2) 0.701 olarak hesaplanırken, XGBoost regresyon modelinde bu değer 0.804 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar, XGBoost'un karmaşık veri ilişkilerini modellemede daha başarılı olduğunu ortaya koymuştur. Son olarak, yerel iklim, kentsel doku ve hava kirleticiler arasındaki karşılıklı ilişkilerin incelenmesi sonucunda, kent dokusundaki yoğunlaşmanın yüzey sıcaklığını artırdığı, aynı zamanda NO₂ ve aerosol indeks değerlerinde de artışa neden olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, aerosol indeks ve NO₂ artışının da yüzey sıcaklığını yükselttiği ortaya konulmuştur.

Sonuç olarak, bu çalışmada kullanılan TROPOMI, diğer hava kalitesi gözlem uydularına kıyasla daha yüksek mekânsal çözünürlüğe sahip olması nedeniyle, kentsel iklim ve hava kirliliği araştırmalarında kullanılabilmesine imkân tanımakta ve bu çalışmalara önemli katkılar sunmaktadır. Bu tez çalışmasında, üzerine henüz çok fazla araştırma yapılmamış olan kentsel iklim, kentsel doku ve hava kirleticiler arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Elde edilen bulgular, sürdürülebilir ve iklim değişikliğine dirençli kentlerin planlanmasında, hava kirleticiler ile kentsel dokunun birleşik etkisinin dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

ANAHTAR KELİMELEER: Hava kirleticileri, Kentsel doku, Kentsel iklim, Kentsel morfoloji, Uzaktan algılama

JÜRİ: Doç. Dr. Çağdaş KUŞÇU ŞİMŞEK

Prof. Dr. Alper ÜNAL

Prof. Dr. Ali KILÇIK

Doç. Dr. Senem KOZAMAN AYGÜN

Doç. Dr. Nusret DEMİR



ABSTRACT

INVESTIGATING THE URBAN FABRIC - AIR POLLUTION AND LOCAL CLIMATE RELATIONSHIPS IN THE MARMARA REGION AND ISTANBUL

Derya ARABACI

PhD Thesis in Remote Sensing and Geographic Information Systems Department

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Çağdaş KUŞÇU ŞİMŞEK

January 2025; 137 pages

More than half of the world's rapidly growing population lives in cities, leading to the rapid expansion of urban areas. Urban expansion not only increases environmental pressures, but also creates areas where the effects of climate change are concentrated. This situation makes the effects of extreme weather events more pronounced. Heavy rainfall, heat waves and storms pose significant risks, especially in large cities, and require the reorganisation of cities to adapt to growing populations and environmental threats. It is important to consider human thermal comfort when designing urban areas, to improve air quality and to create cities that are resilient to sudden temperature changes. Factors such as population density, transport networks and industrial activities have a direct impact on urban climate dynamics, leading to problems such as the heat island effect and air pollution. While these problems make sustainable and equitable urban planning difficult, the impacts of poor air quality and thermal stress negatively affect the lives of city dwellers. In this context, planning studies on air pollution and urban climate change are crucial for more liveable cities.

This thesis presents a systematic analysis of the relationship between land use and air pollution, starting from an upper scale investigation of the relationship between land use and air pollution, including seasonal effects, to a lower scale investigation of the relationship between local climate, urban texture and air pollutants. In the first stage, within the scope of Istanbul-Gebze, Kocaeli-Yalova, Bursa and Çanakkale provinces in the Marmara Region, the differentiation of the effects of CORINE land use level-1 classes of artificial surfaces, agricultural areas and forest areas on aerosol index, NO₂ and SO₂ air pollutants obtained from Sentinel 5P/TROPOMI satellite data were examined by post-hoc ANOVA tests. The analyses were carried out separately at 5 km and 1 km resolution and as a result of the resolution comparisons, the 1 km scale was found appropriate for the analyses. In the second stage, a more detailed investigation was carried out in the Istanbul-Gebze region and the relationships between air pollutants and subclasses of artificial surfaces (continuous city, discontinuous city and industrial/commercial areas) were investigated. The results provided a more comprehensive understanding of the dynamics between local climate, urban structure and air pollutants. In the final stage of the study, the relationship between surface temperature and factors such as urban texture, air pollutants, NDVI, NDBI, elevation, distance to coast and distance to forest were analysed within the urban areas of Istanbul. In these analyses, correlation tests, decision trees, linear regression analysis and XGBoost regression model were used to evaluate the relationships in detail.

According to the results of the thesis study, in the first stage, it was determined that the effects of different land use types such as artificial surfaces, agricultural areas and forest areas on air pollutants differ in Istanbul-Gebze, Kocaeli-Yalova, Bursa and Çanakkale regions. It was found that this situation may change periodically and seasonally. In urban areas in the Istanbul-Gebze Region, it was found that aerosol index and NO₂ data showed significant differences between areas with continuous urban fabric and areas with discontinuous urban fabric for both years in all seasons except autumn 2021. Then, in the second stage, the relationship between air pollutants and urban texture was investigated with correlation tests by including road data. The results showed that aerosol index and NO₂ air pollutants had the highest correlation with the weighted urban texture-road class. This class was followed by urban texture and road data respectively. The relationship between air pollutants and urban texture classes (discrete low-rise, discrete mid-rise, compact low/mid-rise) was analysed by taking road density into account. Post-hoc test results revealed that aerosol index and NO₂ air pollution data showed statistically significant differences in compact low/mid-rise and high road density texture classes compared to discrete low-rise and discrete mid-rise texture classes. In the third stage, the effect of independent variables (season, NDVI, NDBI, urban texture, aerosol index, NO₂, SO₂, distance to coast, distance to forest, elevation) on surface temperature was modelled using XGBoost machine learning technique without any period distinction, and the degree and direction of the effect of these variables were evaluated by SHAP analysis. The findings obtained at this stage show that season has the greatest effect on surface temperature (importance ranking value, 0.6). The season is followed by NDBI with a value of 0.35, NDVI with a value of 0.23 and urban texture. When comparing the accuracy of the linear regression and XGBoost regression models used to model the local climate, the accuracy value (R^2) of the linear regression model was calculated as 0.701, while this value was found to be 0.804 in the XGBoost regression model. These results show that XGBoost is more successful in modelling complex data relationships. Finally, as a result of analysing the relationships between local climate, urban texture and air pollutants, it was found that densification in the urban texture increases the surface temperature and also causes an increase in NO₂ and aerosol index values. In addition, it was revealed that the increase in aerosol index and NO₂ also increases the surface temperature. These findings clearly show that the effects of air pollutants and urban fabric should be taken into account in urban planning.

The TROPOMI satellite used in this study has a higher spatial resolution than other air quality satellites, allowing it to be used in and contribute to urban climate and air pollution research studies. This thesis analyses the relationships between urban climate, urban texture and air pollutants, which have not been extensively researched. The findings of this study make an important contribution to the literature by revealing that the effects of air pollutants and urban fabric should be taken into account in the planning of sustainable and climate change-resilient cities.

KEYWORDS: Air pollutants, Remote sensing, Urban climate, Urban morphology, Urban texture,

COMMITTEE: Assoc. Prof. Dr. Çağdaş KUŞÇU ŞİMŞEK

Prof. Dr. Alper ÜNAL

Prof. Dr. Ali KILÇIK

Assoc. Prof. Dr. Senem KOZAMAN AYGÜN

Assoc. Prof. Dr. Nusret DEMİR



ÖNSÖZ

Marmara Bölgesi, Türkiye’de yoğun nüfusu, sanayileşmesi ve ulaşım ağıyla en önemli bölgedir; ancak bu özellikler, bölgede hava kirliliği başta olmak üzere çeşitli çevresel sorunlara yol açmaktadır. Özellikle bölgedeki yoğun fosil yakıt kullanımı, hem iklim değişikliğinin temel sebeplerinden birini oluşturmakta hem de hava kirliliğine neden olmaktadır. Değişen iklim koşulları ise mevcut hava kirliliğini daha da artırarak insan sağlığını doğrudan tehdit etmektedir. Bu durum, özellikle Marmara Bölgesi’ndeki İstanbul, Kocaeli ve Bursa gibi büyük kentlerde hava kalitesini olumsuz etkilerken, kentlerin iklim krizine karşı daha savunmasız hale gelmesine neden olmaktadır. İklim değişikliği, şiddetli sıcak hava dalgaları ve hava kirliliğinin toplum sağlığı üzerindeki gelecek etkileri, günümüzün önemli ve aktif araştırma alanları arasında yer almaktadır. Dünyanın karşı karşıya kaldığı bu çevresel sorunlara yönelik stratejilerin geliştirilmesi için daha çok multidisipliner araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu tez çalışmasında, Marmara Bölgesi genelinde, İstanbul-Gebze, Kocaeli-Yalova, Bursa ve Çanakkale Bölgelerinde, hava kirleticileri (Aerosol İndeks, Azot Dioksit ve Kükürt Dioksit) ile arazi kullanımı (yapay yüzey, tarım alanları ve orman alanları) ilişkilerinin bölgesel ölçekte araştırılması amaçlanmıştır. Ayrıca, çalışma kapsamında kentsel ölçekte İstanbul ili özelinde hava kirleticileri, kentsel doku ve yerel iklim arasındaki etkileşimler detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Bu tez çalışması hem bölgesel hem de kentsel ölçekte, hava kirleticilerinin farklı arazi kullanımları, kentsel morfoloji ve yerel iklim ile olan ilişkilerini anlamaya yönelik önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir. Çalışmadan elde edilen bulguların, sürdürülebilir ve iklim değişikliğine dirençli kentlerin planlanması süreçlerine katkı sağlaması hedeflenmektedir.

Tez sürecimde, araştırmanın anlamını ve değerini fark etmemi sağladığı ve bu uzun yolculukta rehberliği için değerli danışmanım Doç. Dr. Çağdaş KUŞÇU ŞİMŞEK’e en içten teşekkürlerimi sunmak istiyorum. Sabrı, vizyonu, motivasyonu ve desteği için minnettarım. Hava kirleticileri konusundaki bilgi ve deneyim eksikliğimi gidermeme büyük katkıda bulunan Prof. Dr. Alper ÜNAL’a teşekkürlerimi sunarım. Bu süreçte paylaştığı değerli bilgiler ve yönlendirmeler, benim için farklı bir disiplin olan bu alanda ilerlememe katkı sağlamıştır. Ayrıca, çalışmamda istatistiksel analizler konusunda bilgi ve deneyimleriyle bana rehberlik eden Prof. Dr. Ali KILÇIK’a teşekkür ederim.

Marmara Belediyeler Birliği’nin, “Doktora Tez Programları Desteği” kapsamında bu teze sağladığı katkılardan dolayı MBB’ne teşekkürlerimi sunarım. Çalışmamda, güncel verilerin temininde yardımlarını esirgemeyen değerli arkadaşım Harita Mühendis’i Melek BÖLÜKBAŞI’ya teşekkür ederim. Bu emek dolu uzun yolculuk sürecinde, desteklerini esirgemeyen her zaman yanımda olduklarını hissettiğim annem Ayşe IŞIK’a, babam Şükrü IŞIK’a, sevgili kız kardeşim Kübra EROL’e ve sevgisi, desteği ve fedakarlığı için eşim Barış ARABACI’ya sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iv
ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	viii
AKADEMİK BEYAN	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xv
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı	1
1.2. Tezin Yararı.....	2
1.3. Hipotez	3
2. KAYNAK TARAMASI.....	4
2.1. Kentsel İklim	4
2.2 Kentsel Alanda İklimi Etkileyen Faktörler	6
2.3. Hava Kirliliği ve Kentsel İklim İlişkisi	7
2.4. Kentsel İklimi İzleme Yöntemleri.....	9
2.4.1. Sabit İstasyonlar.....	9
2.4.2. Hareketli Mobil İzleme Teknikleri	10
2.4.3. Uzaktan Algılama Teknikleri	11
2.5. Hava Kirleticiler	11
2.6. Hava Kirliliğini Etkileyen Faktörler.....	12
2.7. Kirleticiler ve Etkenleri	13
2.7.1. Aerosoller	13
2.7.2. Azot Dioksit (NO ₂).....	14
2.7.3. Kükürt Dioksit (SO ₂)	14
2.8. Hava Kirleticilerinin Ölçümü.....	15
2.8.1. Yersel Ölçüm	15
2.8.2. Uzaktan Algılama Teknikleri	16
2.9. Literatür Örnekleri.....	17
3. MATERYAL VE METOT	20

3.1. Çalışma Alanı	20
3.1.1. Marmara Bölgesi	20
3.1.2. İstanbul Kentsel Alanı	22
3.2. Kullanılan Veri Setleri.....	23
3.3. Yöntem	23
3.3.1. Landsat 8 verilerinin ön işlenmesi.....	25
3.3.2. Sentinel-5P/TROPOMI veri setleri.....	27
3.3.3. Corine verisi.....	29
3.3.4. Kent dokusu	31
3.3.5. Ağırlıklandırılmış doku sınıfı-yol verisinin oluşturulması.....	36
3.4. XGBoost Regresyon Modeli	38
3.5. SHAP Yöntemi.....	39
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	40
4.1. Arazi Kullanımı ile Hava Kirlilik Verilerinin Bölgesel Bazlı İncelenmesi	40
4.1.1. Aerosol indeks - arazi sınıfları incelemesi.....	40
4.1.2. NO ₂ - arazi sınıfları incelemesi.....	43
4.1.3. SO ₂ - arazi sınıfları incelemesi.....	46
4.2. İstanbul-Gebze Bölgesi Özelinde Yapay Yüzey Alt Sınıflarının İncelenmesi ...	49
4.3. Kentsel doku sınıfı ve yol verilerinin hava kirliliği ile ilişkilerinin incelenmesi	50
4.4. Ağırlıklandırılmış kentsel doku sınıfı-yol ve hava kirlilik ilişkilerinin post-hoc testi ile incelenmesi	52
4.5. Yüzey Sıcaklığı ve Hava Kirlleticiler Arasındaki İlişkinin İncelenmesi	56
4.5.1. Yüzey Sıcaklığı Regresyon Testi.....	56
4.5.2. Yüzey Sıcaklığı - Aerosol İndeks Mevsimsel Korelasyon Testleri.....	62
4.5.3. Yüzey Sıcaklığı - NO ₂ Mevsimsel Korelasyon Testleri	65
4.5.4. Yüzey Sıcaklığı - SO ₂ Mevsimsel Korelasyon Testleri.....	67
4.6. Tüm Dönemlerde Yüzey Sıcaklığı - Hava Kirleticiler ve Mekânsal Değişkenlerin İncelenmesi.....	69
4.6.1. Kentsel Alanlarda Yüzey Sıcaklığı ve İklimsel Değişkenler Arasındaki Korelasyon Analizi	69
4.6.2. Makine Öğrenimi ile Yüzey Sıcaklığı Modelinde Değişkenlerin Rolü: XGBoost ile Değerlendirme	70

4.6.3. Kentsel Doku Sınıflarının Hava Kirleticileri ve Yüzey Sıcaklığı Üzerine Etkisinin İncelenmesi.....	72
4.7. Tartışma.....	74
5. SONUÇLAR	82
6. KAYNAKLAR	86
7. EKLER.....	103
EK-1 Mekânsal Değişkenlerin Haritaları	103
EK-2 2021-2022 Yılları Landsat 8 OLI/TIRS Uydu Görüntü Tarihleri	106
EK-3 Yüzey Sıcaklık Haritaları	107
EK-4 NDVI ve NDBI Haritaları	108
EK-5 Marmara Bölgesi'ne Ait Hava Kirlilik Haritaları.....	110
EK-6 İstanbul'a Ait Hava Kirlilik Haritaları.....	113
EK-7 Varyans Homojenite Testi	116
EK-8 Yüzey Sıcaklığı Regresyon Testi.....	128
EK-9 Yüzey Sıcaklığı-Kentsel Doku - Hava Kirleticileri Karar Ağacı	135
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Doktora Tezi olarak sunduğum “Marmara Bölgesi ve İstanbul Özelinde Kentsel Doku – Hava Kirliliği ve Yerel İklim İlişkilerinin İncelenmesi” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

16/01/2025

Derya ARABACI

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

.	: Ondalık Ayracı
°C	: Santigrat Derece
ϵ	: Emisivite
θ_s	: Yerel güneş zenit açısı
$ESUN_\lambda$	: Ortalama Solar İrradyans Değeri
ha	: Hektar
km	: Kilometre
km ²	: Kilometrekare
L_λ	: Spektral Radyans
m	: Metre
pH	: Potansiyel Hidrojen
P_λ	: Birimsiz yansıtım
Qcal	: Piksel Dijital Değeri
s	: Saniye

Kısaltmalar

AÇA	: Avrupa Çevre Ajansı
AI	: Aerosol İndeks
AOD	: Aerosol Optik Derinliği
AUHI	: Atmosferik Kentsel Isı Adası
BCR	: Bina Kaplama Alanı Oranı
BH	: Bina Yüksekliği
BVD	: Bina Hacim
CBS	: Coğrafi Bilgi Sistemleri
CH ₄	: Metan

CMAQ	: Topluluk Çok Ölçekli Hava Kalitesi
CO ₂	: Karbonmonoksit
CO ₂	: Karbondioksit
CORINE	: Çevresel Bilginin Koordinasyonu
DEM	: Sayısal Yükseklik Modeli
DN	: Dijital Değerler
DSÖ	: Dünya Sağlık Örgütü
EPA	: Çevre Koruma Ajansı
ESA	: Avrupa Uzay Ajansı
FAI	: Ön Alan İndeksi
GOME	: Küresel Ozon İzleme Deneyi
HC	: Hidrokarbon
İHA	: İnsansız Hava Araçları
LCZ	: Yerel İklim Bölgesi
LST	: Kara Yüzey Sıcaklığı
LULC	: Arazi Kullanımı/Arazi Örtüsü
MAP	: Ana Hava Kirleticiler
NDBI	: Normalize Edilmiş Yerleşim İndeksi
NDVI	: Normalize Edilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi
NDVITHM	: Normalize Edilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi Eşik Yöntemi
NO	: Azot Oksit
NO ₂	: Azot Dioksit
NSUPI	: Yüzeye Yakın Kentsel Kirlilik Adaları
O ₃	: Ozon
OMI	: Ozon İzleme Aleti
OSM	: Open Street Map

PM	: Partikül Madde
RL	: Pürüzlülük Uzunluğu
SCIMACHY	: Atmosferik Kartografi için Taramalı Görüntüleme Absorpsiyon Spektrometresi
SHAP	: SHapley Katkı Açıklamaları
SO ₂	: Kükürt Dioksit
SVF	: Gökyüzü Görüş Faktörü
SUHI	: Yüzey Kentsel Isı Adası
SUHII	: Yüzey Kentsel Isı Adası Yoğunluğu
TEMPO	: Troposferik Emisyonlar: Kirliliğin İzlenmesi
THEP	: Temiz Hava Eylem Planı
THHP	: Temiz Hava Hakkı Platformu
TROPOMI	: Troposfer İzleme Aracı
TTB	: Türk Tabipleri Birliği
UHI	: Kentsel Isı Adası
UHII	: UHI yoğunluğu
UN	: Birleşmiş Milletler
UPI	: Kentsel Kirlilik Adaları
VOC	: Uçucu Organik Bileşik
WMO	: Dünya Meteoroloji Örgütü
WRF	: Hava Durumu Araştırma ve Tahmini
WWRP	: Dünya Hava Durumu Araştırma Programı
XGBoost	: Aşırı Gradyan Artırma

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Kentsel ısı adası profili (Aboulnaga vd. 2024).....	4
Şekil 2.2. Kentsel iklim ile çevresel faktörler arasındaki ilişki (Wai vd. 2021).....	5
Şekil 2.3. Kentsel morfoloji ve hava sirkülasyonu ilişkisi	7
Şekil 2.4. Kentsel ısı adası ve hava kirliliği arasındaki ilişki (Ulpiani 2021).....	8
Şekil 2.5. Kentsel iklimi izleme yöntemleri (Oke vd. 2017)	9
Şekil 2.6. Hava kirliliği kaynakları (Ahmed vd. 2023).....	12
Şekil 2.7. Kentsel hava kirliliğine etki eden faktörler	13
Şekil 2.8. Yıllara göre Türkiye'de hava izleme istasyon sayısı (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı 2023)	15
Şekil 2.9. Hava kirliliğinin izlenmesinde uydu verilerinin çözünürlük iyileştirmesi (Malings 2023).....	17
Şekil 3.1. Marmara Bölgesi çalışma alanları	20
Şekil 3.2. 2023 yılı nüfus grafiği	21
Şekil 3.3. İstanbul kentsel alanı çalışma bölgesi.....	23
Şekil 3.4. Çalışma iş akışı.....	26
Şekil 3.5. İstanbul hava kirletici haritaları	29
Şekil 3.6. Corine arazi kullanımı sınıfları (seviye-1).....	30
Şekil 3.7. Kuşçu Şimşek'in (2013) kent doku matrisi.....	32
Şekil 3.8. Kentsel doku matrisi	32
Şekil 3.9. İstanbul kent doku haritası.....	33
Şekil 3.10. Kent Doku Sınıfları.....	35
Şekil 3.11. İstanbul yol haritası.....	36
Şekil 3.12. İstanbul ağırlıklandırılmış yol haritası.....	37
Şekil 3.13. İstanbul ağırlıklandırılmış kentsel doku sınıfı-yol haritası.....	38
Şekil 4.1. Aerosol indeks verisinin arazi kullanım sınıflarındaki dağılımı	40
Şekil 4.2. Aerosol indeks post-hoc testi.....	42
Şekil 4.3. NO ₂ verisinin arazi kullanım sınıflarındaki dağılımı	44
Şekil 4.4. NO ₂ post-hoc testi.....	45
Şekil 4.5. SO ₂ verisinin arazi kullanım sınıflarındaki dağılımı	46
Şekil 4.6. SO ₂ post-hoc testi	48
Şekil 4.7. İstanbul-Gebze bölgesi yapay yüzey alt sınıflarının post-hoc testi	50
Şekil 4.8. Hava kirlilik verilerinin ağırlıklandırılmış kentsel doku-yol verisine göre post-hoc testi	55
Şekil 4.9. Dönemsel aerosol indeks haritaları.....	63
Şekil 4.10. Dönemsel NO ₂ haritaları.....	65
Şekil 4.11. Yüzey sıcaklığı ve iklimsel değişkenlerin korelasyon matrisi	69
Şekil 4.12. Değişkenlerin önem sıralaması.....	71
Şekil 4.13. Değişkenlerin katkı sıralaması.....	72

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Veri setleri	24
Çizelge 3.2. Corine arazi kullanım sınıfları	30
Çizelge 3.3. Çalışma alanındaki kentsel doku sınıflarının yüzdesi	33
Çizelge 3.4. Yolların ağırlık dereceleri.....	37
Çizelge 3.5. Kentsel doku sınıflarının derecelendirilmesi	38
Çizelge 4.1. Aerosol indeksin bölgelerde ayrılma yüzdeleri	43
Çizelge 4.2. NO ₂ 'nin bölgelerde ayrılma yüzdeleri	44
Çizelge 4.3. SO ₂ 'nin bölgelerde ayrılma yüzdeleri	49
Çizelge 4.4. Aerosol indeks korelasyon analiz sonuçları ve elde edilen korelasyon katsayılarına ilişkin güven testleri.....	51
Çizelge 4.5. NO ₂ korelasyon analiz sonuçları ve elde edilen korelasyon katsayılarına ilişkin güven testleri	51
Çizelge 4.6. SO ₂ korelasyon analiz sonuçları ve elde edilen korelasyon katsayılarına ilişkin güven testleri	52
Çizelge 4.7. Yüzey sıcaklığı regresyon testi.....	57
Çizelge 4.8. Yüzey sıcaklığına mevsimsel olarak etki eden mekânsal faktörler	61
Çizelge 4.9. Yüzey sıcaklığı ve aerosol indeks korelasyon testi	64
Çizelge 4.10. Yüzey sıcaklığı ve NO ₂ korelasyon testi	66
Çizelge 4.11. Yüzey sıcaklığı ve SO ₂ korelasyon testi.....	68
Çizelge 4.12. XGBoost regresyon model doğrulaması.....	70
Çizelge 4.13. Farklı kentsel doku tipleri arasında aerosol indeks, NO ₂ ve SO ₂ konsantrasyonları üzerine post-hoc ANOVA analizi.....	73
Çizelge 4.14. Her bir kentsel doku sınıfına göre yüzey sıcaklığı ve hava kirleticileri arasındaki ilişki	74

1. GİRİŞ

1.1. Tezin Amacı

Günümüzde dünya nüfusunun yarısından fazlası şehirlerde ve metropollerde yaşamaktadır (OECD/European Commission 2020). Bu durum, hızlı kentsel nüfus artışı ile birlikte büyük ölçekli kentsel genişleme sürecini beraberinde getirmiştir (Blei ve Angel 2021). Son yıllarda hızla genişleyen kentsel alanların, mevcut eğilimler doğrultusunda, 2050 yılı itibarıyla 1.2 - 3.1 milyon km²'ye ulaşacağı tahmin edilmektedir (Angel 2023). Kentleşme, doğal arazi yüzeylerini antropojenik etkilerle geçirimsiz yüzeylere dönüştürerek termal değişimlere yol açmaktadır (Lin vd. 2018). Çevresine kıyasla daha yüksek arazi yüzey sıcaklığına ve hava sıcaklığına sahip olan alanlar kentsel ısı adası olarak tanımlanmaktadır ve bu kavram ilk kez Howard (1818) tarafından literatüre kazandırılmıştır. Kentsel ısı adalarının ana nedenleri, kentsel ve kırsal alanlar arasındaki yapısal ve arazi örtüsü farklılıklarından kaynaklanmaktadır (Stewart ve Oke 2012). Kentsel ısı adalarındaki artış; sağlık sorunlarına (Heaviside vd., 2017), termal yaşam konforunda olumsuzluklara (Niemelä 1999; Wong ve Jim 2017), enerji tüketim miktarının artmasına (Li vd. 2019) ve hatta bölgesel ölçekte iklim değişikliklerine neden olabilmektedir (Kim ve Brown 2021). Ayrıca, kentsel alanlar nitrojen oksitleri ve ozon gibi yüksek atmosferik kirlletici konsantrasyonlarını; endüstriyel alanlar ise kükürt dioksitleri yoğun olarak barındırmaktadır (D'Amato vd. 2013; Steeneveld vd. 2018).

Hava kirliliği, kentleşme ile artış gösteren enerji tüketimi, sanayileşme ve ulaşımın bir sonucudur. Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ), hava kirliliğini en büyük çevresel sağlık riski olarak tanımlarken (World Health Organization 2016), fosil yakıt kullanımını hem hava kirliliğinin hem de iklim değişikliğinin başlıca nedenlerinden biri olarak göstermektedir (Hassan vd. 2016). Hava kirliliği, iklim değişikliğine yol açtığı gibi, değişen iklim koşullarından da etkilenmekte ve insan sağlığı üzerinde doğrudan olumsuz etkiler yaratmaktadır (Campbell-Lendrum ve Prüss-Ustün 2019). Sağlık Etkileri Enstitüsü (HEI) tarafından hazırlanan rapora göre, 2021 yılında hava kirliliği küresel çapta 8.1 milyon ölüme neden olmuştur (HEI 2021). Bu bağlamda, hava kirliliği ile iklim değişikliği arasındaki ilişkinin incelenmesi, iklim değişikliğine bağlı hava kalitesi değişimlerinin tahmin edilmesi ve bu çevresel problemlerle mücadele edilmesi açısından önemlidir (Hong vd. 2019; Jiang vd. 2013; Kim vd. 2015). Dünya genelinde karşılaşılan bu çevresel sorunlara yönelik etkili stratejilerin geliştirilmesi, disiplinler arası iş birliğine dayalı daha kapsamlı araştırmaları gerektirmektedir.

Bu tez çalışmasında; Sentinel 5P uydusu Troposfer İzleme Aracı (TROPOMI) ile elde edilen hava kirlilik veri setleri (Aerosol İndeks (AI), Azot Dioksit (NO₂), Kükürt Dioksit (SO₂), Karbonmonoksit (CO), Metan (CH₄) ve Ozon (O₃)), uydu görüntüsünden elde edilen termal yüzey sıcaklığı ile kentsel unsurlar arasındaki ilişki istatistiksel olarak incelenmiştir. Fakat, CO, CH₄ ve O₃ hava kirlleticilerinin hipotez doğrulamasını sağlayamaması nedeniyle bu veriler, bu tez çalışmasında kullanılamamıştır. Çalışmanın ilk aşaması, Marmara Bölgesi'nde farklı arazi kullanım fonksiyonlarını içeren İstanbul-Gebze, Kocaeli-Yalova, Bursa ve Çanakkale bölgelerinde arazi kullanımı ve hava kirliliği arasındaki ilişkinin incelenmesini kapsamaktadır. Bu aşamada, arazi kullanımının hava kirlleticiler üzerindeki etkisi iki farklı ölçekte (5 km ve 1 km) post-hoc testleriyle araştırılmıştır. İkinci aşamada, İstanbul-Gebze bölgesinde daha detaylı bir inceleme yapılmış, yapay yüzeylerin alt sınıfları (sürekli şehir, kesikli şehir ve endüstriyel/ticari

alanlar) ile hava kirleticiler arasındaki ilişkiler araştırılmıştır. Son aşamada, İstanbul ili mezo ölçekte ele alınarak, yüzey sıcaklığı, kentsel doku ve her bir hava kirlilik veri seti arasındaki ilişkiler; NDVI (Normalize Edilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi), NDBI (Normalize Edilmiş Yerleşim İndeksi), ormana uzaklık, kıyıya uzaklık ve yükseklik değişkenleri de dikkate alınarak regresyon testleri ve makine öğrenim teknikleriyle incelenmiştir. Bu çalışma, Marmara Bölgesi'nde hava kirliliği, arazi kullanımı ve kentsel morfolojik yapıların etkileşimlerini üst ölçekten alt ölçeğe doğru inceleyerek, aralarındaki ilişkileri ortaya koymakta ve iklim dirençli kentlerin oluşturulmasında kullanılabilecek metodoloji sunmaktadır.

1.2. Tezin Yararı

Dünya ve ülkemizde genişleyen kentsel alanlar, hava, su ve toprağın kirlenmesi de dâhil olmak üzere birçok çevre sorunuyla karşı karşıya kalmaktadır. Hava kirliliği ve iklim değişikliği, özellikle kentlerde sağlık sorunlarını artırmaktadır (Masson vd. 2020). Kentlerin yüksek nüfus yoğunluğu, çevresel zorluklarla birleştiğinde, aşırı hava olaylarını tahmin etme ve yönetme ihtiyacını artırmaktadır (WMO 2017). Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO) ve Dünya Hava Durumu Araştırma Programı (WWRP) tarafından belirlenen dört zorluktan ikisi kentleşme ve yüksek etkili hava olayları ile ilgilidir (WMO 2017). Bu bağlamda, kentsel alanların termal konfor dikkate alınarak planlanması, hava kalitesinin artırılması ve sürdürülebilir, dirençli, yaşanabilir kentlerin oluşturulması büyük önem taşımaktadır (Chen vd. 2021; Huang vd. 2021; Xu vd. 2019).

Kentsel alanlar, ulaşım ağları, yoğun nüfus, çevresel süreçler ve kent dokusunun biçimine bağlı olarak değişen karmaşık ve dinamik sistemlerdir (McPhearson vd. 2016). İnsan faaliyetleri sonucu salınan ek ısı ve kirleticiler, kentsel alanlarda iklim dinamiklerini doğrudan etkiler (Srivastava vd. 2024). Yoğun trafik, sanayi faaliyetleri ve enerji tüketimi, hava kirliliği ile birlikte ısı adası etkisi gibi sorunları artırmaktadır (Ku ve Tsai 2024). Bu durum, kentsel iklim değişiklikleri ve hava kirliliği ile mücadeleyi zorlaştırırken, karar alıcıların daha yaşanabilir ve sürdürülebilir kent planlama stratejileri belirlemesini zorlaştırmaktadır (McPhearson vd. 2016).

Literatürde yerel iklim üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde, yaygın olarak mekânsal ve zamansal faktörlerin, kentsel fonksiyonların ve arazi kullanımının etkilerinin araştırıldığı görülmektedir (Guo vd. 2015; Hu vd. 2023; Liu vd. 2023; Quan vd. 2016). Özellikle kentsel ısı adası (UHI) ve yüzey kentsel ısı adası (SUHI) etkileri üzerine şehir analizleri artmaktadır (Masson vd. 2020). Ancak, kentsel alanlarda hava kirleticiler ve kent dokusunun yerel iklim üzerindeki birleşik etkisine odaklanan çalışmalar oldukça sınırlıdır (Ulpiani 2021; Liang ve Gong 2020).

Bu çalışmada, İstanbul-Gebze, Kocaeli-Yalova, Bursa ve Çanakkale bölgelerinde iki farklı ölçekte hava kirliliği ile arazi kullanımı arasındaki ilişkiler araştırılmıştır. Ayrıca, İstanbul ili özelinde kent dokusu, hava kirleticiler ve yerel iklim arasındaki ilişki, çoklu doğrusal regresyon analizi, karar ağaçları, korelasyon testleri ve makine öğrenimi teknikleri kullanılarak detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Tezin sunacağı potansiyel yararlar aşağıda verilmektedir.

- Bu çalışma, farklı bölgelerde arazi kullanımı ile hava kirliliği arasındaki ilişkiyi anlamaya katkı sağlayarak, bölgesel planlama stratejilerinin geliştirilmesine destek olacaktır.
- Çalışmada kullanılan 5 km ve 1 km'lik iki farklı ölçekteki değerlendirmeler, gelecekte yapılacak araştırmalar için örnek bir ölçek seçim yöntemi sunacaktır.
- Farklı arazi kullanım tiplerinin (kentsel, kırsal ve endüstriyel alanlar) hava kirliliği üzerindeki etkilerinin karşılaştırmalı analizi, yerel ve bölgesel düzeyde hava kalitesini artırmaya yönelik daha etkin planlama çalışmalarına önemli bir bilgi altyapısı sağlayacaktır.
- Makine öğrenimi tekniklerinin kullanılması, hava kirliliği, kentsel doku ve mekânsal değişkenler arasındaki karmaşık ilişkilerin analizinde daha hassas sonuçların elde edilmesine olanak tanıyacaktır.
- Kentsel doku, hava kirleticiler ve mekânsal değişkenlerin yüzey sıcaklığı üzerindeki etkilerinin kapsamlı değerlendirilmesi, kentsel ısı adasını etkileyen faktörlerin ve etki oranlarının daha iyi anlaşılmasına olanak sağlayacaktır.

1.3. Hipotez

Tezin amaç kısmında da belirtildiği üzere, bu tezin ilk aşamasında, Marmara Bölgesi'nde İstanbul-Gebze, Kocaeli-Yalova, Bursa ve Çanakkale bölgeleri, 5 km ve 1 km'lik iki farklı ölçekte karşılaştırılmalı olarak ele alınarak arazi kullanımı ile hava kirliliği verileri arasındaki ilişkiler araştırılmıştır. İkinci aşamasında, İstanbul ilinde, yüzey sıcaklığı, hava kirleticileri ve kent dokusu arasındaki ilişkiler; NDVI, NDBI, kıyıya uzaklık, ormana uzaklık ve yükseklik unsurları göz önünde bulundurularak incelenmiştir. Bu bağlamda, tezde üç ana hipotez tanımlanmıştır.

H₁: Arazi kullanım türleri, hava kirleticiler üzerinde etkilidir.

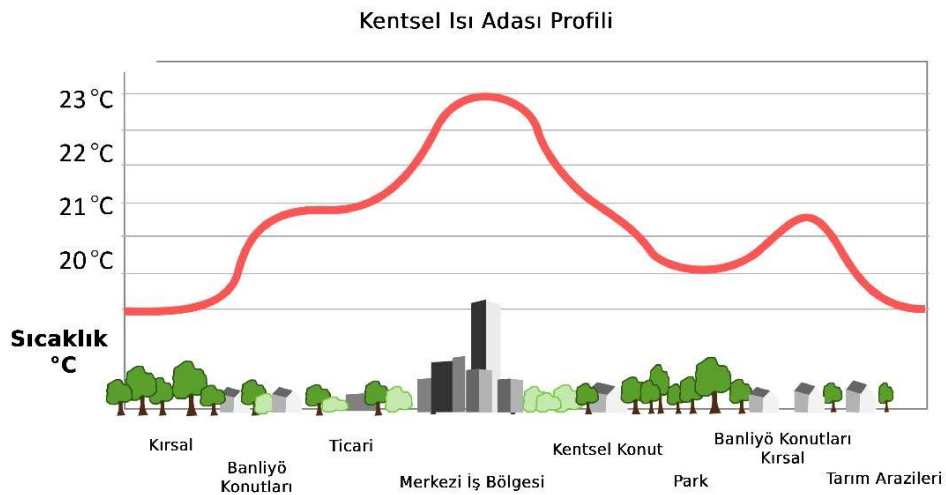
H₂: Kentsel doku tipi, hava kirleticiler üzerinde etkilidir.

H₃: Hava kirleticiler, yüzey sıcaklığı üzerinde etkilidir.

2. KAYNAK TARAMASI

2.1. Kentsel İklim

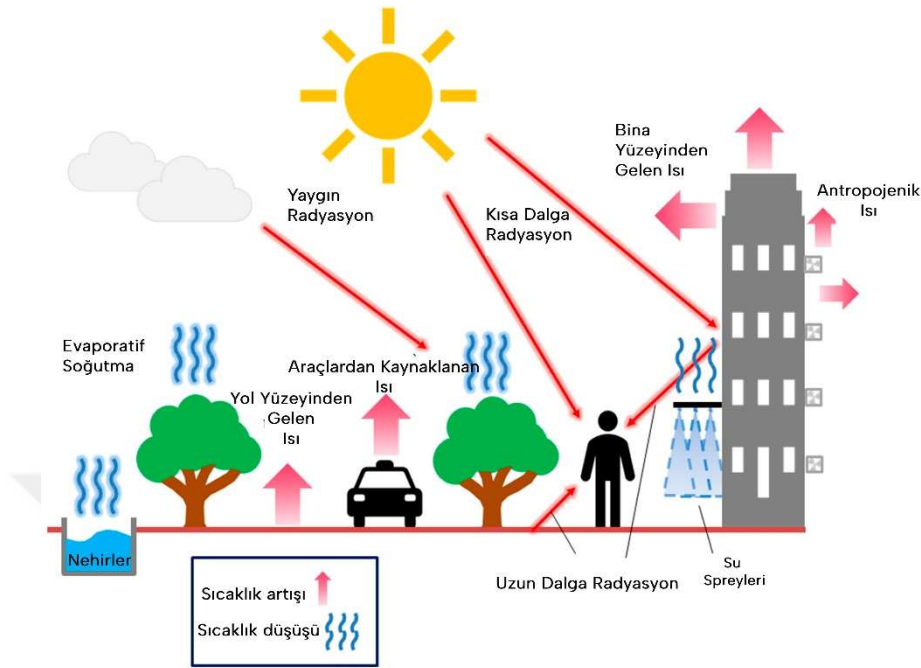
Günümüzde, dünya nüfusunun %55'inden fazlası kentlerde yaşamaktadır ve 2050 yılına kadar bu oranın yaklaşık %68'e ulaşması beklenmektedir (UN-Habitat 2022). Özellikle gelişmekte olan ülkelerde, kentsel nüfusun sayı ve yoğunluğundaki bu artış, yerel iklim, sağlık hizmetleri, kaynak tüketimi, eğitim, iş olanakları, altyapı ve tesisleri üzerinde doğrudan etkiye sahiptir (UN-Habitat 2019). Nüfus artışıyla birlikte, kentsel alanların hızlı büyümesi, arazi kullanım değişikliklerine yol açmaktadır (Shahfahad vd. 2022; Tu vd. 2016; Vujovic vd. 2021). Bu değişiklikler, doğal peyzaj alanlarının bina, yol ve beton gibi geçirimsiz yüzeylerle kaplanmasına ve böylece bitki örtüsü ve açık alanların azalmasına neden olmaktadır (Oke 1982). Kentsel alanlarda yaşanan bu dönüşümler, yerel iklim üzerinde önemli değişikliklere yol açmakta ve kentsel ısı adası (UHI) fenomenini gündeme getirmektedir (Chen vd. 2006; Zhou ve Chen 2018). Bu nedenle, kentsel alanlar, çevrelerindeki kırsal alanlara göre daha yüksek hava ve yüzey sıcaklıkları sergilemekte (Şekil 2.1) ve iklim değişikliğine bağlı ısınmayı daha da şiddetlendirmektedir (Adeyemi vd. 2022; Liu vd. 2023; Vujovic vd. 2021).



Şekil 2.1. Kentsel ısı adası profili (Aboulnaga vd. 2024)

Küresel iklim değişikliği, ortam sıcaklığının yükselmesine ve aşırı sıcak günlerin sıklığının artmasına neden olurken, yerel iklim değişikliği ile etkileşime girerek özellikle kentsel alanlarda bölgesel ısınmayı şiddetlendirmektedir (Zhou vd. 2022). Bu kentsel ısı artışında, antropojenik ısı emisyonlarının %49-83'ünden binalar sorumludur (Quah ve Roth, 2012). Binaların ve açık kentsel alanların yüzeylerinde yüksek ısı emilimine sahip malzemelerin kullanılmasıyla bu yapılar, özellikle yaz aylarında çok yüksek yüzey sıcaklıklarına ulaşabilmekte ve bu durumda kentsel ısınmaya önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır (Paolini ve Santamouris 2022) (Şekil 2.2). Kentlerde özellikle yaz aylarında, yüzey sıcaklıklarının artışı ve dönemsel sıcak hava dalgalarının etkisi, binaların soğutma talebini arttırmakta ve klima kullanımını yaygınlaştırmaktadır. Termal konforun korunması ve klimaların yaygınlaşması, iklim değişikliğine uyum stratejisi olarak

görülmektedir. Ancak, yenilenemeyen enerjiye dayalı klima sistemleri, kentlerde insan kaynaklı ısı salınımını artırmaktadır (Kjellstrom ve McMichael 2013).



Şekil 2.2. Kentsel iklim ile çevresel faktörler arasındaki ilişki (Wai vd. 2021)

Kentlerde antropojenik ısıya katkı sağlayan bir diğer önemli unsur, motorlu taşıtlardan kaynaklanan emisyonlardır (Chen vd. 2021). Kentsel nüfus artışı ve orta sınıf yaşam kalitesinin iyileşmesi, hanelerin gelişen ekonomik durumu, bireysel otomobil sayısında artışa yol açarak kentlerde insan kaynaklı salınan ısıyı arttırmıştır (Zhou vd. 2022). Son yıllarda yaygınlaşan elektrikli araçların kentsel iklim üzerindeki etkisi ise, hala araştırılmakta olan bir konudur. Hava Araştırma ve Tahmin Modeli (WRF) kullanılarak yapılan çalışmalar (Chen vd. 2011; Skamarock vd. 2008), trafiğin yüzeye yakın hava sıcaklığını 1.1°C 'e yakın katkısı olduğunu, elektrikli araçlara tam geçişin 0.9°C 'ye kadar bir azalma sağlayabileceğini göstermişlerdir (Mussetti vd. 2022). Fakat sonuçların doğrulanması, mekânsal ve zamansal değişkenleri yönlendiren mekanizmaların anlaşılması için daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır.

Bölgesel iklim değişikliği, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerdeki sosyoekonomik politikalar ve uygulamalara büyük ölçüde bağlıdır. Gelecekte mega kentlerin çoğunun gelişmekte olan ülkelerde yer alacağı ve kentsel nüfusun büyük bir kısmının bu bölgelerde olacağı göz önüne alındığında, gelişmemiş ekonomik durum, kentlerin enerji tüketimi, altyapı ve çevre ile ilgili politikalarını olumsuz yönde etkileyerek kentsel alanlarda aşırı ısınmada ciddi artışa neden olabileceği düşünülmektedir (Paolini ve Santamouris 2022). Diğer tarafta, kentlerdeki yoğun nüfus artışı ve ekonomik büyüme, gelecekte konut ve ticari binaların gelişimini de yönlendirecektir. Küresel iklim değişikliği, kentsel nüfustaki artış, daha yüksek kentsel yoğunluklar, bina sayısındaki önemli artış ve bina sektöründe beklenen devasa enerji tüketimi, kentsel aşırı ısınmanın boyutunu ciddi şekilde artırabilecek faktörlerdir.

2.2 Kentsel Alanda İklimi Etkileyen Faktörler

Şehirler, kompleks sistemlerdir ve bu durum, kentsel iklime etki eden faktörlerin tespit edilmesini zorlaştırmakta ve UHI'yi azaltmaya yönelik stratejilerin uygulanmasını güçleştirmektedir. Bununla birlikte günümüzde, kentsel iklim üzerine yapılan çalışmaların artmasıyla UHI'ye etki eden faktörler daha iyi anlaşılmaktadır. Bu çalışmalara göre kentsel iklime etki eden ana unsurlar aşağıda verilmiştir.

- Antropojenik ısı emisyonları (araç, bina ve endüstriyel süreçler)
- Kentsel yoğunluk
- Kent morfolojisi
- Yüzey malzemeleri
- Bitki örtüsü
- Rüzgâr yönü ve hızı
- Hava Kirliliği

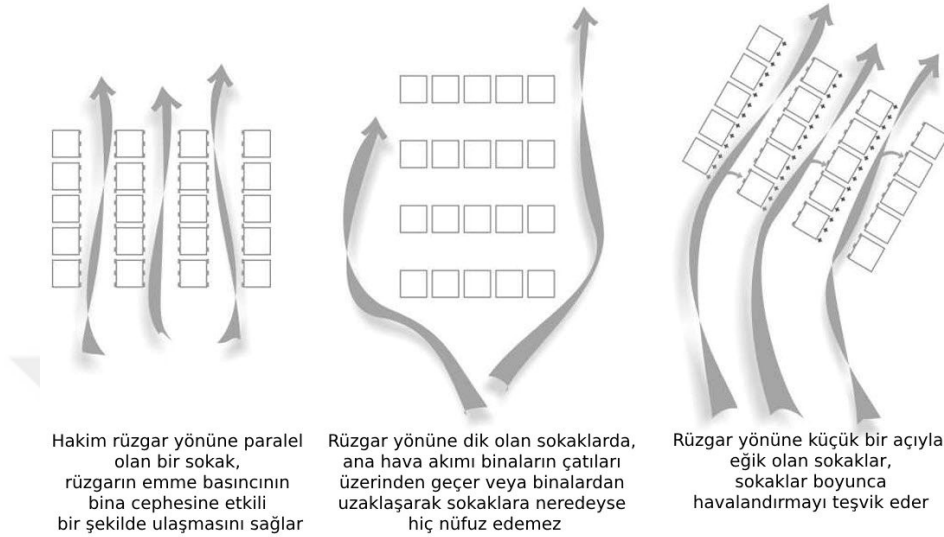
Bu bağlamda yapılan bilimsel araştırmalar incelendiğinde, literatürde çok sayıda yayına rastlanmaktadır. Li ve Norford'un (2016) Singapur-MIT Araştırma ve Teknoloji (SMART) tarafından yürütülen Hava Durumu Araştırma ve Tahmini (WRF) modelleme çalışması, Singapur'un iş merkezlerinin yoğun olduğu bölgede insan kaynaklı ısının, ortam hava sıcaklığı üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermiştir. Çalışmada, serin çatı uygulamasının özellikle öğle saatlerinde yüzeye yakın hava sıcaklığını ve yüzey sıcaklığını büyük ölçüde azaltabileceği, yeşil bitki örtüsü uygulamasının ise UHI yoğunluğunun yüksek olduğu gece saatlerinde, yüzeye yakın hava sıcaklığını 1°C'den fazla azaltabileceği ortaya konulmuştur. Singapur'un farklı kentsel alanlarından (iş alanları, ticari alanlar, yüksek katlı ve alçak katlı konutlar) elde edilen sıcaklık verilerinin kırsal alanın referans verileriyle karşılaştırıldığı çalışma, Singapur'daki UHI'nin düşük rüzgâr hızı ve yoğun antropojenik ısı emisyonu gibi bölgesel faktörlerden etkilendiğini göstermektedir (Chow ve Roth 2006).

Li vd. (2020) Berlin'de, yüzey ve bitki örtüsü özelliklerini kullanarak, aynı hava koşulları altında çeşitli senaryolarla kentsel iklim modellemesi ile UHI yoğunluğunu çıkarmışlardır. Çalışmada, kentteki UHI yoğunluğunun, doğrudan bina yoğunluğu ve kentsel alanların birbirini güçlendirici etkisiyle ilişkili olduğu ortaya konulmuştur.

Kentsel morfoloji, bina hacim yoğunluğu (BVD), bina kaplama alanı oranı (BCR), bina yüksekliği (BH), ön alan indeksi (FAI), pürüzlülük uzunluğu (RL) ve gökyüzü görüş faktörü (SVF) gibi morfolojik parametreleriyle yerel kent iklimini etkilemektedir (He vd. 2020; Yang vd. 2021; Zhang vd. 2021). Özellikle, daha karmaşık kentsel morfolojiye ve daha yüksek bina yoğunluğuna sahip kentsel alanlar daha yoğun UHI etkileri ve daha az hava sirkülasyonu yaşamaktadır (Chen vd. 2012; Ng vd. 2011) (**Şekil 2.3**).

Kentsel ısı adası etkisini azaltmak ve kentsel soğutmayı teşvik etmek için kentsel rüzgâr koridoru etkisini kullanmak, kent planlanmasında önemli bir araştırma konusudur (Liu vd. 2022; Son vd. 2022). Bu yöntem, birçok şehir yönetimi içinde hedefledikleri politika haline gelmiştir (Wu ve Shan 2024). Pekin'de 2009-2018 yılları arasını kapsayan bir çalışmada, kent alanında iki farklı rüzgâr koridorunun (seviye bir ve seviye iki koridoru) yerel iklim üzerindeki etkileri analiz edilmiştir (Liu vd. 2022). Çalışmada, iki rüzgâr koridorunda sırasıyla rüzgâr hızının 0.57 m/s ve 0.75 m/s'yi aştığında

havalandırmayı önemli ölçüde iyileştirdiğini ve pürüzlülük uzunluğunun da önemli bir faktör olduğunu göstermiştir. Kentsel ısının azalması günün saatine ve mevsime bağlı olarak değişmiştir. Seviye bir koridoru, geceleri 0.75°C , gündüzleri ise 0.89°C azalma sağlarken, seviye iki koridoru gün boyunca maksimum 0.30°C 'lık bir azalma ile UHI etkisini düşürmüştür.



Şekil 2.3. Kentsel morfoloji ve hava sirkülasyonu ilişkisi

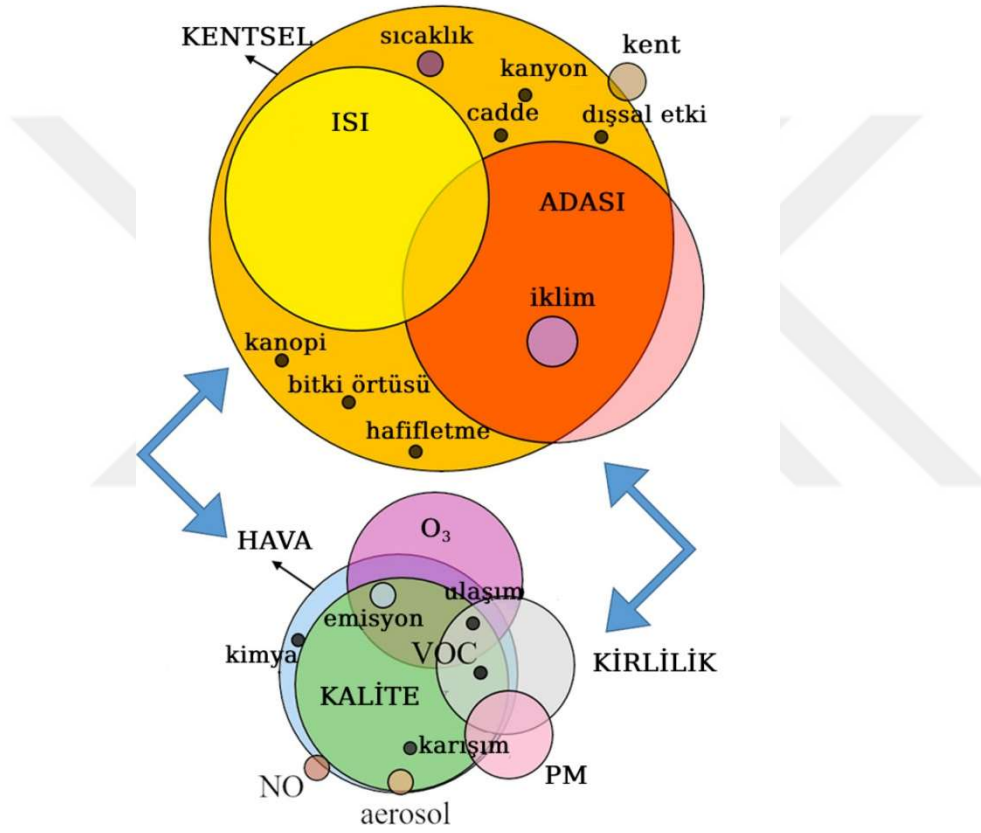
Yüzey malzemelerinin farklılığı, arazi yüzey sıcaklığının günlük davranışını etkilemektedir. (Mathew vd. 2018) Hindistan'ın Ahmedabad ve Jaipur kentinde yüzey malzeme farklılığının kentsel iklim üzerindeki etkisini araştırdığı çalışma, toprağın, yol ve beton gibi antropojenik yüzeylerden daha hızlı ısınma ve soğuma eğiliminde olduğunu, bitki örtüsünün ise tüm gözlem süresince en düşük yüzey sıcaklığına sahip olduğunu göstermiştir.

Bitkiler, UHI etkisini azaltmak için kullanılan doğal çözümlerden biridir. Genellikle beton veya asfalt gibi malzemelerle karşılaştırılmaktadır. (Chen vd. 2012), Singapur'da on bitki türü ve sekiz yapay malzemeyi ele alarak yüzey sıcaklıklarını ölçtükleri çalışma, gölgesiz bitki yüzeylerinin, beyaz veya beyaz boya ile kaplanmış yüzeyler hariç, günün en yüksek sıcaklığında çoğu yapay malzemedan yaklaşık 11°C daha soğuk olduğunu ortaya koymuşlardır. (Rahaman vd. 2022) Malezya'nın Penang şehrinde 1996-2021 yıllarını kapsayan çalışması, son 25 yılda orman alanlarında %17'lik bir azalma, kentsel alanlarda %22'lik artış, ortalama LST'de 8°C 'lık bir yükselme ve UHI'de %38'lik belirgin bir artış olduğunu göstermektedir.

2.3. Hava Kirliliği ve Kentsel İklim İlişkisi

Dünya genelinde birçok şehir, nüfus yoğunluğunun artışı, kentlerin hızla büyümesi, yetersiz kent planlaması ve yoğun trafik nedeniyle hava kirliliği ile karşı karşıyadır. Hava kirliliği, UHI etkisi ile daha da kötüleşmektedir. UHI ve kentsel kirlilik adaları (UPI), hızlı kentleşmenin ortaya çıkardığı başlıca çevre sorunlarıdır.

Hava kirleticileri, UHI etkisi değişiminde önemli bir rol oynamaktadır (EPA 2014). Sıcaklık, deniz seviyesinden yaklaşık 10 km yüksekliğe kadar normal atmosfer koşulları altında yerden her 100 m yükseldikçe, 0.5 ve 1.0°C arasında düşme eğilimi göstermektedir. Yüksekliğin artması ile sıcaklığın azalması beklenirken artış göstermesi sıcaklık inversiyonu olarak tanımlanmaktadır (Feng vd. 2020). Sıcaklık inversiyonları, sıcak hava tabakasının yüzeye yakın olan soğuk hava tabakasını tutmasıyla meydana gelmektedir (Mathew vd. 2024) ve hava kirletici emisyonlarının daha yüksek olduğu şehir merkezlerinde ve endüstriyel alanlarda daha yaygındır. Sıcaklık inversiyonları, dikey hava karışımını kısıtlayarak hava kirleticilerinin yüzeye daha yakın kalmasına neden olmakta; bu da daha yüksek hava kirlilik seviyeleri ve kara yüzey sıcaklığı (LST) oluşumuna yol açmaktadır (Becker 2024).



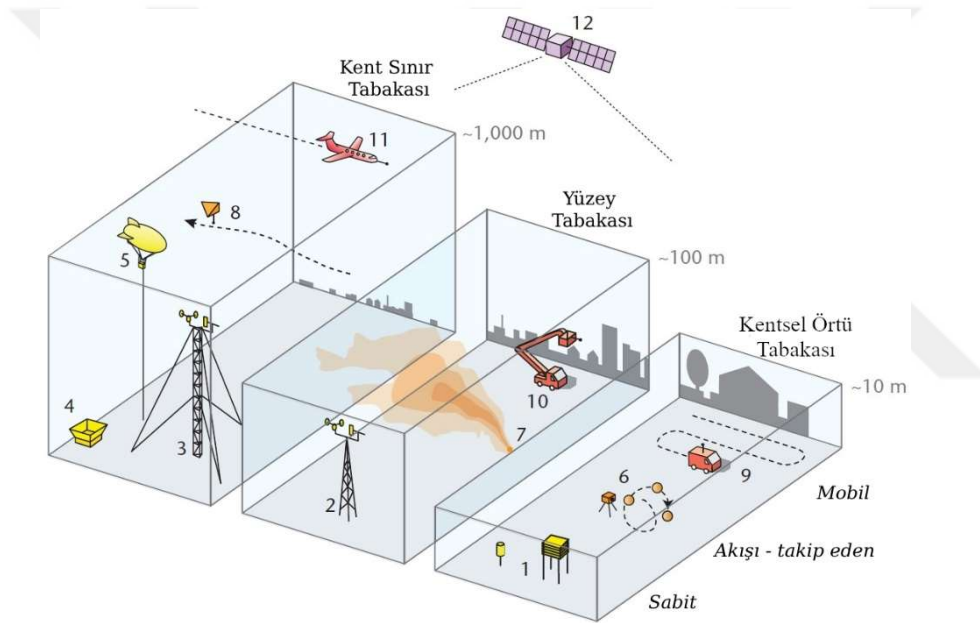
Şekil 2.4. Kentsel ısı adası ve hava kirliliği arasındaki ilişki (Ulpiani 2021)

Şekil 2.4’de görüldüğü gibi UHI ile hava kirleticileri arasındaki ilişki karmaşıktır. Hava kirleticilerinin konsantrasyonu yüzey sıcaklığını etkilerken, yüzey sıcaklığı da hava kirleticilerin dağılımını ve durumunu etkilemektedir (Suthar vd. 2024b; Tian vd. 2019). Bu nedenle, kentsel çevresel sorunların çözümünde her iki faktörün birlikte ele alınması önem arz etmektedir (Li vd. 2018). Çalışmalar Aerosol, Azot Dioksit (NO₂), Kükürt Dioksit (SO₂), Ozon (O₃), Karbon Monoksit (CO₂) ve Partikül Madde (PM) gibi kirleticilerin atmosferin ve yüzeylerin termal özelliklerini değiştirerek yerel sıcaklık modellerini etkileyebileceğini göstermiştir (Mishra ve Mathew 2022; Shi vd. 2023). Mathew vd. (2024), spektral indeks, arazi kullanımı/arazi örtüsü (LULC), hava kirleticiler

ve mekânsal verileri kullanarak yapmış oldukları kapsamlı çalışmada, LST ile çeşitli faktörler arasındaki ilişki araştırılmıştır. Çalışma LST ile aerosoller, NDBI, LULC ve atmosferik bileşenler gibi çeşitli faktörler arasında güçlü korelasyon olduğunu ortaya koymuştur. Fuladlu ve Altan (2021), LST, LULC ve ana hava kirleticiler (MAP) arasındaki ilişkileri regresyon ve korelasyon analizleriyle inceleyerek, LST'nin hava kirlilik seviyelerinden etkilendiğini ortaya koymuştur.

2.4. Kentsel İklimi İzleme Yöntemleri

Kentsel iklim etkilerinin değerlendirilmesinde ve kent planlama stratejilerinin geliştirilmesinde kentsel iklimi izleme yöntemleri önemli bir rol oynamaktadır. Kentlerin hem sayı hem büyüklük olarak genişlemesi ve sınırlı sayıdaki kentsel meteoroloji istasyonları göz önüne alındığında, kentsel alanlarda tutarlı atmosferik gözlemlere olan talep her zamankinden daha fazladır (Oke vd. 2017). Aşağıda kentsel iklimin takibinde yaygın kullanılan yöntemler açıklanmaktadır (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Kentsel iklimi izleme yöntemleri¹ (Oke vd. 2017)

2.4.1. Sabit İstasyonlar

Kent iklimini zamansal olarak izlemenin en basit yöntemi, yağış, rüzgâr ve sıcaklık gibi iklim değişkenlerini diğer bölgelerle karşılaştırabilir bir şekilde kaydeden

¹ Sabit platformlara örnek olarak Stevenson Ekranı (1), meteoroloji kuleleri (2) ve yüksek kuleler (3) verilebilir. Yer tabanlı uzaktan algılama platformları arasında SODAR (4) ve vinçler tarafından kaldırılıp indirilen sensörlere sahip bağlı balonlar (5) bulunmaktadır. Akışı takip eden yaklaşımlarda kameralarla takip edilen küçük ölçekli balonlar (6), iz bırakma deneyi (7) ve tetroon balonları (8) vardır. Mobil veya geçici platformlar arasında araçlar (9), mobil vinç platformları (10), helikopterler, uçaklar ve dronlar (11) bulunmaktadır. Uydu uzaktan algılama, yüzeyi veya atmosferi çeşitli ölçeklerde karakterize edebilir (12).

geleneksel meteoroloji istasyonlarının kullanılmasıdır. Dünya çapında birçok şehirde hava sıcaklığı, rüzgâr hızı ve yönü, nem ve yağış gibi meteoroloji verilerini yıllarca toplayan istasyonlar bulunmaktadır. Bilgisayar teknolojisi ve internetin gelişmesiyle birlikte, uzun vadeli hava durumu veri arşivleri daha erişilebilir hale gelmiş ve saatlik, günlük, aylık veya yıllık verilere düşük bir maliyetle veya hiç maliyet olmadan kolayca alınmasına olanak sağlanmaktadır (Gartland 2012).

Sabit istasyon verileri genellikle (Gartland 2012):

- Kentsel ve kırsal istasyonlardan alınan verilerin karşılaştırılması
- Birden fazla istasyon kullanılarak bölgesel ve iki boyutlu etkilerin değerlendirilmesi
- Kentsel alanların gelişmesiyle, bölgelerde ısı adalarının gelişimini izlemek için kullanılmaktadır.

Kentsel iklimin değerlendirilmesinde, istasyonların tesis edileceği alanın belirlenmesi önemlidir. İdeal olarak, bir istasyon kentin homojen alanlarında yer almalı ve farklı malzemeler veya özellikler içeren bölgelerden kaçınılmalıdır (Oke vd. 2017). İstasyon bir cadde içinde konumlandırılmışsa, kanyonun yükseklik, genişlik ve uzunluğunun çevresindeki alanı temsil etmesi önemlidir. Bu kriterler dikkate alındığında, istasyonlar bölgenin tipik mikro iklimini güvenilir bir şekilde yansıtabilmektedir. Her bir istasyonun, yerleştirileceği konumun seçimi sırasında benzer kriterlerin dikkate alınması ve bu kriterlere uygun şekilde konumlandırılması gerekmektedir; ancak bir kent için en uygun tasarım, şehrin özelliklerine ve ölçülen belirli unsurlara bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Oke vd. 2017).

2.4.2. Hareketli Mobil İzleme Teknikleri

Kentsel iklimin izlenmesinde, istasyon kurulumunun maliyetli olması ve bu nedenle sınırlı sayıda istasyon kurulabilmesi, birçok kentte uygun konumlara yerleştirilmiş yeterli sayıda istasyon bulunamamasına ve sonuç olarak istasyon sayısının yetersiz kalmasına neden olmaktadır. Bu aşamada, hareketli mobil izleme teknikleri ekonomik bir yöntem olarak ön plana çıkmaktadır. Bu yöntemde, önceden belirlenmiş bir güzergâh üzerinde, devamlı ya da temsili noktalarda durarak sensörler aracılığıyla ölçümler gerçekleştirilmektedir.

Bu ölçüm yöntemi, ideal olarak sabit hava koşullarında gerçekleştirilmektedir. Çoğu çalışmada, en yüksek ısı adası yoğunluklarını ölçmek için sakin ve açık havalarda gece saatleri ölçümleri kullanılmıştır (Gartland 2012). Ancak, hareketli mobil izleme tekniklerinin göz önünde bulundurulması gereken bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlar:

- Farklı konumlarda eş zamanlı ölçümler kaydedilememektedir. Bu durumda, aynı anda iki veya daha fazla gezici ekipman ve sensör gerekmede, bu da maliyeti önemli ölçüde arttırmaktadır.
- Her ne kadar ölçümler kısa sürede tamamlanabilse de bu sürede hava koşulları önemli ölçüde değişebilmektedir.

- Mobil ölçümle yapılan sıcaklık ölçümlerinin bir veya daha fazla sabit istasyonlardan alınan verilerle karşılaştırarak ortak bir zamana ayarlanması gerekmektedir.

Hareketli mobil izleme teknikleri ile yapılan çalışmalarda dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta; sıcaklık ölçümleri sırasında sensörlerin karayolu, motor veya kaldırım ısısından ya da trafikten kaynaklanabilecek rüzgârdan etkilenmemesidir. Bu nedenle, sensörler bu ısı kaynaklarından uzak tutulmalı ve daha doğru veriler elde edebilmek için ölçümler yoldan birkaç metre uzaklaşarak yapılmalıdır (Gartland 2012).

2.4.3. Uzaktan Algılama Teknikleri

Şehirlerdeki hava sıcaklıklarını izlemek için genellikle sabit istasyonlar ve hareketli mobil izleme teknikleri kullanılmaktadır. Uzaktan algılama teknikleri, çeşitli yüzeylerden (çatılar, yollar, bitki örtüsü, çıplak zemin vb.) yansıyan ve yayılan enerjiyi ölçerek yüzey sıcaklıklarını ve diğer özelliklerini bulmak için kullanılmaktadır (Gartland 2012). Bu yöntemde, yer yüzeyi uçaklara, İnsansız Hava Araçlarına (İHA) veya uydulara takılan pasif veya aktif alıcılar ile algılanmaktadır

Uzaktan algılama teknikleri ile elde edilen LST, dünyanın yüzey sıcaklığının doğrudan ölçümünü ifade etmektedir. LST, yüzeye yakın sıcaklığı kaydeden meteoroloji istasyonlarının yanı sıra evapotranspirasyon, toprak nemi, su stresi vejetasyonu ve iklim değişkenleri gibi konularda daha ayrıntılı analizlerin yapılmasına imkân sağlamakta (Almeida vd. 2021) ve yüzey kentsel ısı adası (SUHI) çalışmalarında da yaygın olarak kullanılmaktadır (Paolini ve Santamouris 2022).

Kentsel iklimin izlenmesinde, uzaktan algılama teknikleri yaygın olarak kullanılmakta, bu süreçte çoğunlukla uydu görüntülerinden yararlanılmaktadır. Geniş alanların yüzey sıcaklığının belirlenmesinde uydu görüntülerinin kullanılması, hem ekonomik hem de pratik olmasıyla önemli bir avantaja sahiptir. Uydular, Dünya'nın etrafında devamlı döndüklerinden günlük periyotta sürekli bilgi kaydedemezler (Gartland 2012). Bu nedenle uydulardan yararlanılarak yapılan iklim çalışmalarında, genellikle mevsimsel değişimler ya da gece ve gündüz termal özellikler incelenebilmektedir. Bu aşamada uçakların (Ban-Weiss vd. 2015) veya İHA'ların (Haddad vd. 2020) kullanımı, günlük periyotta yüzey sıcaklığının takibinde önemli avantajlar sunmaktadır (Paolini ve Santamouris 2022). Ancak bu uçuşları gerçekleştirmek maliyetlidir ve kentsel alanların üzerinde uçuş kısıtlamalarıyla ilgili zorluklar bulunmaktadır (Gartland 2012; Paolini ve Santamouris 2022).

2.5. Hava Kirlleticiler

Hava kirliliği, insan sağlığına yönelik başlıca çevresel tehditlerden biri olup, solunum sorunlarının ve çeşitli hastalıkların oluşmasının nedenlerindendir. Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ), dış ortam hava kirliliği ve evsel hava kirliliğinin birleşik etkilerinin yılda 6.7 milyon kişinin erken ölümüyle ilişkilendirmektedir. Diğer taraftan, dış ortam hava kirliliğinin 2019 yılında dünya genelinde 4.2 milyon erken ölüme neden olduğu belirtilmektedir (Anonymous 1). Özellikle gelişmekte olan ülkelerdeki çocuklar ve yaşlılar, bu durumdan orantısız bir şekilde etkilenmekte ve yoğun olarak dış ortam ve evsel hava kirliliğine maruz kalmaktadır. THHP'nun (2023) hazırlamış olduğu rapora

göre ise 2021 yılında İstanbul'da yaklaşık 5 bin, Türkiye genelinde ise en az 42 bin kişi hava kirliliğine bağlı hastalıklar nedeniyle ölmüştür. Yaygın hava kirliliği nedenleri arasında, evsel kaynaklar, motorlu taşıtlar, endüstriyel alanlar ve orman yangınları bulunmaktadır (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Hava kirliliği kaynakları (Ahmed vd. 2023)

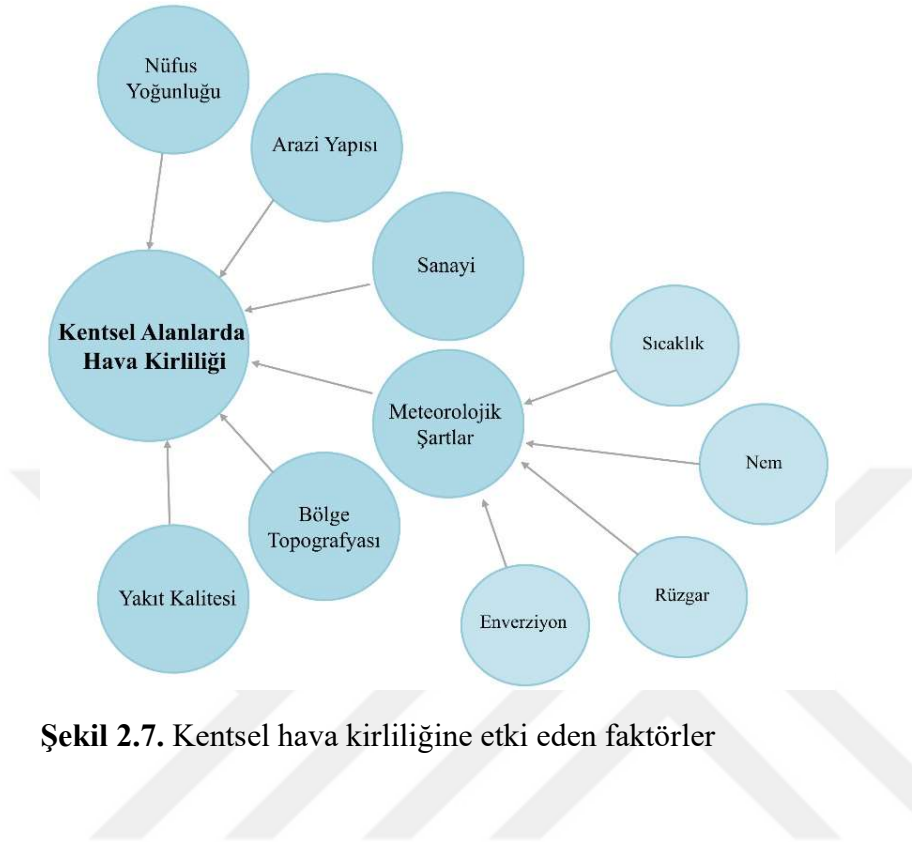
2.6. Hava Kirliliğini Etkileyen Faktörler

Atmosferde bulunan bir veya daha fazla hava kirleticinin, canlıların yaşamı ve çevresinde olumsuz yönde etki yaratacak konsantrasyonlarda ve sürelerde bulunması, hava kirliliği olarak tanımlanmaktadır. Hava kirleticiler fiziksel durumlarına göre gaz (NO_x , SO_2 , CO , CO_2 , HC) ve partikül kirleticiler (aerosoller, partikül madde, duman) olarak ikiye ayrılmaktadır.

Kaynaklarına göre hava kirleticiler, doğal kaynaklar ve antropojenik kaynaklar olmak üzere iki sınıfta ele alınmaktadır. Doğal kaynakların arasında yanardağ faaliyetleri, ve çöl tozları yer almaktadır. Antropojenik kaynakların arasında ise ulaşım (motorlu taşıtlar, uçaklar, gemiler ve demiryolları), ısınma (sobalar ve kalorifer kazanları) ve endüstriyel (fabrikalar, termik santraller ve endüstriyel prosesler) faaliyetler bulunmaktadır.

Kentler, hava kirliliğine yoğun olarak maruz kalmaktadır. Şekil 2.7'de görüldüğü üzere kentsel alanlarda, nüfus yoğunluğu, arazi yapısı, sanayinin gelişmişliği, yakıt kalitesi, bölgenin topografyası ve meteorolojik şartlar (sıcaklık, nem, rüzgâr, enverziyon (sıcaklık terselmesi) vb.) hava kirliliğine neden olan faktörlerdendir (Dutta vd. 2021; Ma vd. 2024; Rodríguez-Sánchez vd. 2024; Seo vd. 2018). Kentlerde, yüksek binalar ve dar sokaklar hava akışını engelleyerek, hava kirleticilerin dağılmasına engel olmakla birlikte arazinin topografyası, kirleticilerin hızını ve yönünü etkileyebilmekte, özellikle hava

kirleticilerin vadi veya çukur alanlarda birikmesi hava kirlilik seviyelerinin artmasına neden olmaktadır (Bózdziuch vd. 2024; Wen vd. 2022).



Şekil 2.7. Kentsel hava kirliliğine etki eden faktörler

2.7. Kirleticiler ve Etkenleri

Bu tez çalışmasında; başlangıçta aerosol indeks (AI), azot dioksit (NO_2), kükürt dioksit (SO_2), karbonmonoksit (CO), metan (CH_4) ve ozon (O_3) hava kirleticilerinin kullanılması planlanmıştır. Ancak, karbonmonoksit, metan ve ozon hava kirleticileri, hipotez doğrulamasını sağlamadıkları için çalışmadan çıkarılmıştır. Aşağıda, çalışmada kullanılan hava kirleticileri detaylı olarak açıklanmaktadır.

2.7.1. Aerosoller

Aerosoller, bir gazda/havada asılı duran katı ve/veya sıvı partiküller olup, yaklaşık 0.001-100 μm boyutlarındadır (Narazaki vd. 2021). Atmosferde ve iklim üzerinde önemli bir rol oynayan bu partiküller, güneş ışığını saçma veya emme yoluyla doğrudan; bulut damlacıkları ve buz parçacıklarının oluşumunda atom çekirdeği gibi davranarak dolaylı yoldan gezegenin radyasyon dengesini etkilemektedir (Andreae ve Crutzen 1997). Birincil aerosoller ve ikincil aerosoller olarak iki çeşidi vardır. Birincil aerosoller doğrudan atmosfere salınırken, ikincil aerosoller birincil aerosollerin çeşitli reaksiyonları sonucu oluşmaktadır.

Aerosoller, toz fırtınaları, orman yangınları, volkanik faaliyetler, deniz tuzları, endüstriyel emisyonlar, fosil yakıtların yanması, tarım ve toprak işleme gibi doğal veya insan kaynaklı faktörlerden kaynaklanmaktadır (Zhang 2020). Orman yangınları, atmosfere saldıgı duman ve ince partiküllerle aerosol seviyelerinde belirgin artışa neden

olmaktadır (Khodzher vd. 2021). Volkanik patlamalar, atmosfere yaydığı kül, toz ve gazların (örneğin, sülfat aerosoller, azot oksitler ve karbondioksit) doğrudan salınımı veya kimyasal dönüşümleri sonucu uzun süreli değişimlere neden olmaktadır. Çöl ve kurak bölgelerde meydana gelen rüzgâr kaynaklı toz fırtınaları, atmosferde büyük miktarda aerosol partikülünün taşınmasına yol açarken; kıyı alanları, deniz ve okyanus yüzeylerinden atmosfere taşınan deniz tuzu partikülleriyle aerosol oluşumuna önemli katkılar sağlamaktadır. Geniş çöl alanları, küresel aerosol dolaşımında önemli bir rol oynamaktadır.

İnsan kaynaklı faktörler de, aerosollerin oluşumunda önemli bir yere sahiptir. Endüstriyel emisyonlar, fosil yakıtların yanması, ormansızlaşma, tarım ve toprak işleme gibi insan faaliyetleri, aerosol seviyelerini büyük ölçüde artırmaktadır. Sanayi tesislerinden salınan emisyonlar, atmosferde yoğun aerosol varlığına neden olurken; enerji santralleri, ulaşım araçları ve endüstriyel faaliyetler, fosil yakıtlarının yanması sonucu ince partikül maddeler salarak aerosol miktarını artırmaktadır (Tomasi ve Lupi 2017). Tarımsal faaliyetler sırasında rüzgârla atmosfere taşınan toprak parçacıkları da aerosol seviyelerini yükseltmektedir (Liu vd. 2023). Bölgesel fonksiyonlar, coğrafi, iklimsel ve insan kaynaklı faaliyetlere bağlı olarak aerosollerin kaynağı, dağılımı ve miktarı üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir (Khan vd. 2023).

2.7.2. Azot Dioksit (NO₂)

Azot Dioksit (NO₂) kentlerde hava kalitesini olumsuz etkileyen ana hava kirleticilerden biridir ve atmosferde azot monoksit (NO) ile çeşitli yanma gibi kimyasal reaksiyonlar sonucunda oluşur (Huang vd. 2024; Vîrghileanu vd. 2020). NO₂ çoğunlukla insan faaliyetlerinden kaynaklanmakla birlikte, orman yangınları, toprak ve atmosferdeki biyolojik süreçler de doğal kaynakları arasında yer almaktadır (Dongshang vd. 2021; Rohit vd. 2023). NO₂'nin en önemli insan kaynaklarından biri yüksek sıcaklıkta gerçekleşen yanma faaliyetleridir. Baldasano (2020) tarafından Madrid ve Barselona şehirlerinde yapılan bir çalışmada, bu emisyonların %65'inin araç trafiğinden, %35'inin ise sanayi, enerji üretimi ve ısınma gibi diğer faaliyetlerden kaynaklandığı belirtilmiştir (Vîrghileanu vd. 2020).

NO₂'nin, insan sağlığı ve çevre üzerinde olumsuz etkileri bulunmaktadır. İnsan sağlığı açısından astım ve diğer kronik hastalıkların artmasına yol açarken, çevrede düşük pH seviyelerine ve asit yağmurlarına neden olarak bitkilere, su ekosistemlerine ve yapı malzemelerine zarar vermektedir (Fatima 2021; Grennfelt vd. 2020; Kowalska vd. 2020; Liu vd. 2018). Özellikle trafik ve nüfus yoğunluğunun fazla olduğu şehir merkezleri ve sanayi alanları, daha yüksek NO₂ emisyon değerlerine maruz kalmakta, bu da insanların olumsuz etkilerle daha fazla karşılaşmasına neden olmaktadır.

2.7.3. Kükürt Dioksit (SO₂)

SO₂, Çevre Koruma Ajansı'nın (EPA) belirlemiş olduğu önemli hava kirleticilerinden biridir. Hava kirliliğine neden olan SO₂'nin, insan sağlığı ve iklim üzerinde çeşitli olumsuz etkileri vardır. Yüksek SO₂ emisyonları, asit yağmurlarına (Amritha vd. 2024) ve hastalıklara (Orellano vd. 2021) neden olmaktadır. %73'lük oranla SO₂ emisyonlarının en büyük kaynağı, enerji santrallerinde fosil yakıtlarının yanmasıdır; bunun yanı sıra, doğal kaynaklar olan volkanik patlamalar ve insan faaliyetleri sonucu kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtlarının yanması da önemli nedenler arasındadır.

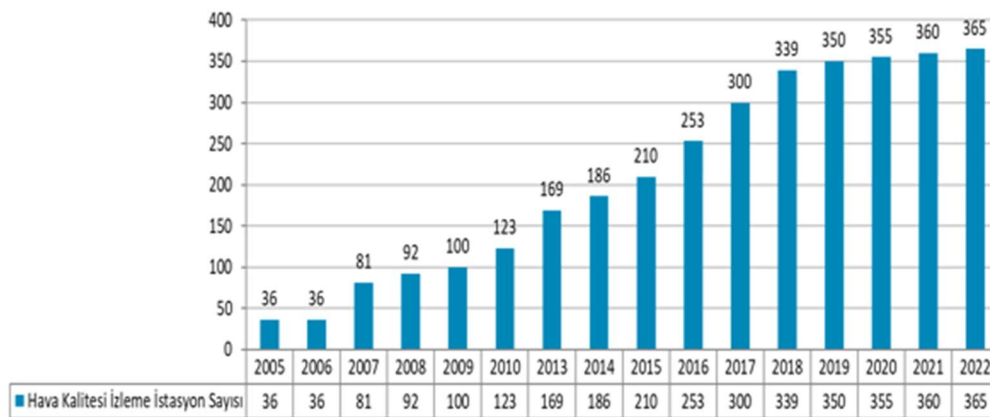
SO₂'nin daha az yaygın kaynakları arasında ise yüksek kükürt yakıt yakan lokomotif, gemiler ve cevherden metal çıkarma gibi endüstriyel işlemler yer almaktadır (Nazari vd. 2012).

Hava kirliliği, Türkiye'de önemli bir çevresel sorun haline gelmektedir. Nitekim THHP'nin (2019) hazırlamış olduğu rapora göre, Türkiye, 2018 yılında dünyada SO₂ emisyonları en yüksek olan ilk 10 ülke arasında yer almıştır ve bu emisyonların %90'ı kömür kullanımından kaynaklanmaktadır. Özellikle, termik santraller, sanayi bölgeleri, çimento fabrikaları büyük miktarlarda SO₂ emisyonu yaymaktadır. Bu emisyonlar sadece salındıkları bölgeleri etkilememekte, partiküller rüzgâr yoluyla farklı bölgelere de taşınarak daha geniş alanlarda kirliliğe yol açmaktadır.

2.8. Hava Kirleticilerinin Ölçümü

2.8.1. Yersel Ölçüm

Geleneksel olarak ülkeler, hava kirliliği konsantrasyonlarını çoğunlukla sabit izleme istasyonları ile ölçmektedirler. Yersel istasyonlardan elde edilen veriler, hava kirleticilerin takibi ve modelleme çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ülkemizde Çevre Şehircilik Bakanlığı, Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı (UHKİA) tarafından şehirlere ve ilçelere ait PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂, O₃, NO_x, CO ve CH₄ hava kirleticilerinin günlük veya saatlik verileri açık erişimli olarak sunulmaktadır. Şekil 2.8'de görüldüğü üzere 2022 yılı itibari ile ülke genelinde toplam 365 istasyon bulunmaktadır. Bu istasyonların 345'inde PM₁₀, 178'inde PM_{2.5}, 310'unda SO₂, 307'sinde NO_x, 211'inde O₃ ve 195'inde CO parametreleri ölçülmektedir (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı 2023). Ülkemizde istasyon sayılarının yıllar içinde artırılmasına rağmen ölçüm yapılan gün sayısı Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliğinde belirtilen değerleri karşılamamasından dolayı veri kalitesinde büyük düşüş görülmektedir (Temiz Hava Hakkı Platformu (THHP) 2023).



Şekil 2.8. Yıllara göre Türkiye'de hava izleme istasyon sayısı (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı 2023)

Yersel istasyonların başlıca avantajları:

- Sürekli izleme ile hava kalitesinin günlük ve saatlik takibini sağlayarak, kısa ve uzun vadeli kirlilik tahmini yapılmasına imkân sunar.
- Hava kirleticilerinin doğrudan ölçümünü yaparak ölçüm güvenilirliğini sağlar.
- Yerel kirlilik kaynaklarını tespit etmede etkilidir.

Dezavantajları:

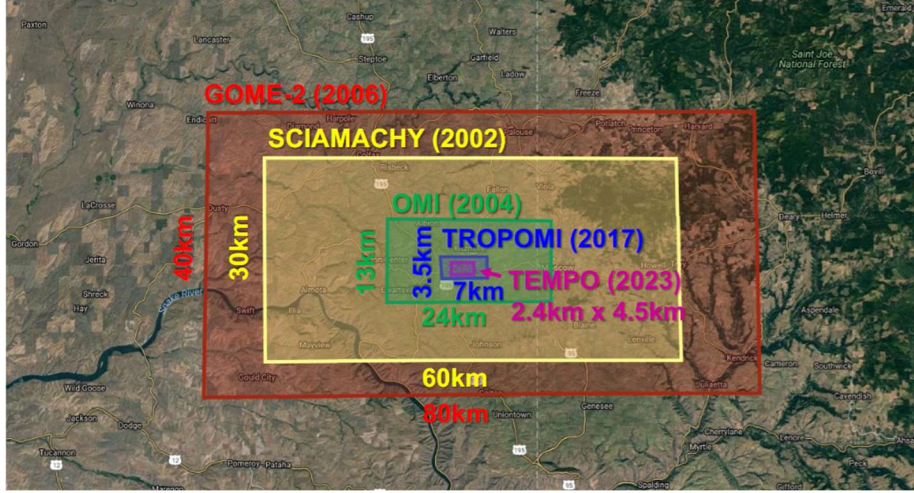
- Ölçüm istasyonlarının yüksek kurulum maliyetleri nedeniyle sayılarının yetersiz kalması ve sadece kuruldukları alanların hava kalitesini ölçebilmeleri, verilerin düşük mekânsal çözünürlükte olmasına yol açmaktadır. Ayrıca, hava şartlarına bağlı olarak hava kirleticilerinin farklı bölgelerde birikmesi, aynı istasyondan aynı kirleticilere ait düzenli veri ölçümlerinin elde edilmesini engellemektedir.

2.8.2. Uzaktan Algılama Teknikleri

Küresel ölçekte, hava kirliliğinin takip edilmesinde ve stratejik eylem planlarının oluşturulmasında uzaktan algılama teknikleri önemli avantajlar sunmaktadır. Sabit istasyon ölçüm yöntemleri, yerel düzeyde yüksek doğruluğa sahip olsa da kısıtlı alanı kapsamaması ve kurulum maliyetleri nedeniyle yetersiz kalmaktadır. Gelişen teknolojiyle birlikte, uydu tabanlı ölçüm yöntemleri, özellikle açık günlerde, 24 saat gibi kısa bir sürede tüm dünya genelinde birçok hava kirleticisini ölçebilmektedir. Uydu tabanlı ölçüm yöntemleri, geniş alanlarda hava kirleticilerinin dağılımını izlemeyi sağlamasıyla hem bölgesel hem de yerel ölçekte hava kalitesinin daha doğru bir şekilde izlenmesine ve modelleme çalışmalarına katkı sunmaktadır.

Uydu tabanlı yöntemlerle hava kirliliği ölçümleri, ilk olarak 1995 yılında Küresel Ozon İzleme Deneyi (GOME) ile başlamış ve sonraki yıllarda gelişmeye devam etmiştir. 2002 yılında Atmosferik Kartografi için Taramalı Görüntüleme Absorpsiyon Spektrometresi (SCIMACHY), 2004 yılında Ozon İzleme Aleti (OMI), 2006 yılında Küresel Ozon İzleme Deneyi-2 (GOME-2), 2019 yılında Troposferik İzleme Aleti (TROPOMI) ve son olarak 2023 yılında Troposferik Emisyonlar: Kirliliğin İzlenmesi (TEMPO) ile çalışmalar devam etmiştir. Şekil 2.9'da uyduların mekânsal çözünürlükleri verilmiştir.

Çalışmanın amacına ve çalışılacak bölgenin büyüklüğüne göre uydu görüntüsünün seçimi önem taşımaktadır. Araştırmada çalışmanın ölçeğine bağlı olarak yersel ölçümler ile desteklenecek uzaktan algılama çalışmaları, çalışma alanının daha doğru bir şekilde tanımlanmasına olanak tanımaktadır. Böylece, hem bölgesel hem de yerel ölçekte hava kalitesinin daha doğru bir şekilde izlenmesi ve modelleme çalışmalarıyla hava kirliliği sorunlarına etkili çözümler üretilmesi mümkün olacaktır.



Şekil 2.9. Hava kirliliğinin izlenmesinde uydu verilerinin çözünürlük iyileştirmesi (Malings 2023)

2.9. Literatür Örnekleri

Kentsel iklimin iyileştirilmesine yönelik politikaların uygulanabilmesinde, LST'ye etki eden parametrelerin belirlenmesi ve yapılacak modeller önem taşımaktadır (Ahmed vd. 2013; Mathew vd. 2019). Literatürdeki önceki çalışmalar, LST ile çeşitli parametreler arasındaki ilişkiyi araştırmak için yaygın olarak çoklu doğrusal regresyon ve korelasyon analizlerini kullanmıştır (Chen vd. 2021; Fuladlu ve Altan 2021; Wang vd. 2021). Ancak, bilgisayar teknolojisindeki son gelişmelerle birlikte kentsel iklim çalışmalarında makine öğrenimi tekniklerinin kullanımı, LST modellerinin doğruluğunu arttırarak önemli bir hale gelmiştir. Özellikle makine öğrenmeleri, büyük verilerin ayırt edici özelliklerini hiyerarşik bir şekilde öğrenerek, bu verilerin sınıflandırılmasında ve modellenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Chen vd. 2020; Demirbaga vd. 2024). Tezin bu bölümünde, hava kirliliği ve binaların yoğunluğu, yüksekliği, şekli, arazi kullanımı ve yeşil alan dağılımı gibi fiziksel özellikler göz önünde bulundurularak, literatürdeki kentsel iklim araştırmaları incelenmiştir.

Li vd. (2018), Berlin'de UHI ve UPI arasındaki ilişkiyi inceledikleri çalışmada, yüzey UHI (SUHI), atmosferik UHI (AUHI), yüzeye yakın UPI (NSUPI) ve atmosferik UPI (AUPI)'ye odaklanmışlardır. Bu çalışmada, SUHI için arazi yüzey sıcaklığı (LST), AUPI için aerosol optik derinliği (AOD) uzaktan algılama teknikleri kullanılarak elde edilmiştir. AUHI, hava sıcaklığı verilerinden, NSUPI ise yersel istasyonlarından elde edilen PM10 konsantrasyonlarından elde edilmiştir. Çalışma, kentsel alanlardaki yüksek AOD ve LST değerlerinin, AUPI ve SUHI ile mekânsal olarak ilişkili olduğunu göstermiştir. Benzer şekilde, AOD ve LST verileri kullanılarak, Ding vd. (2022) tarafından yapılan çalışmada, uzaktan algılama teknikleri ile hava kirliliğinin SUHI değişimine katkısı istatistiksel analizlerle değerlendirmiştir. LST ve AOD verileri mekânsal olarak, arazi kullanım tiplerinde benzer dağılım göstermişlerdir. LST ve AOD değerlerinin geçirimsiz yüzeylerde en yüksek olduğu görülmüştür. SUHI ile aerosol arasındaki ilişki incelendiğinde ise şiddetli hava kirliliği altında SUHI ile aerosol arasında

negatif korelasyon olduğu, nispeten daha temiz hava koşullarında pozitif korelasyon olduğu ortaya konulmuştur. Öte yandan, kentsel ve kırsal alanlardaki hava kirliliği farkı ve SUHI arasında pozitif korelasyon bulunması, kentsel alanlarda hava kirliliğinin artmasının kentsel ısı adası etkisini arttırabileceğini göstermiştir. Kentsel alanlarda gece ve gündüz yüzey sıcaklığı ile AOD arasındaki ilişkiyi araştıran Xiang vd. (2022), yüzey sıcaklığı ile AOD arasındaki ilişkinin geceleri daha yüksek olduğunu ortaya koymuşlardır.

Literatürde yaygın olarak, istasyon verilerinden elde edilen partikül madde ile hava sıcaklığı veya yüzey sıcaklığı arasındaki ilişkileri inceleyen çalışmalar bulunmaktadır. Eanes vd. (2020) Virginia'nın Richmond kentinde, sabit sensörler kullanarak UHI ile hava kirliliği dağılımlarındaki sosyoekonomik eşitsizlikleri incelemiştir. Çalışmada, ele alınan on gün içindeki saatlik ortalamalar ve 2019 yılındaki günlük ortalama değerlerinde, sıcaklık ile PM_{2.5} arasında pozitif korelasyon bulunmuştur. Ayrıca düşük gelirli bölgelerin kentsel ısı adalarına ve daha yüksek düzeyde hava kirliliğine maruz kaldığı saptanmıştır. Sabrin vd. (2020) ise Coğrafi Bilgi Sistemleri platformundaki Topluluk Çok Ölçekli Hava Kalitesi (CMAQ) Modelleme Sistemini kullanarak, New Jersey'nin Camden şehrinde arazi yüzey sıcaklığı ve hava kalitesi (Ozon-PM_{2.5}) verilerinin mahalle ölçeğindeki birleşik etkisini incelemiştir. Çalışmada, UHI ve hava kirliliğinin birlikte ele alınmasının önemini vurgulamakta ve mahalleye özgü riskleri azaltmak ve müdahale stratejileri geliştirmek amacıyla bir kırılganlık indeksi sunulmaktadır.

Partikül maddelerin yanı sıra, Ngarambe vd. (2021), Kore'nin Seul kentinde, 13 istasyon verisinden yararlanarak, UHI ile PM_{2.5}-PM₁₀, CO, SO₂, NO₂ ve O₃ arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Yaptıkları araştırma 2009-2017 yılları arasında kapsamaktadır. Araştırmada, UHI ile CO, NO₂, SO₂ ve PM arasında pozitif korelasyon, O₃ ile negatif korelasyon olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada, UHI ile hava kirliliği arasındaki korelasyon değerinin mevsimlere göre değişkenlik gösterdiği tespit edilmiştir. Wang vd. (2018) Çin'in Yangtze Nehri bölgesinde, UHI etkisi ile O₃ arasındaki zamansal ve mekânsal değişimleri incelediği çalışmada; LST, NO₂, NDVI, DEM ve arazi örtüsü verilerinden de yararlanılmaktadır. Çalışmada LST, NDVI ve DEM verileri uzaktan algılama teknikleriyle, O₃ ve NO₂ verileri ise istasyon verilerinden yararlanılarak elde edilmiştir. Çalışma sonucunda sanayileşme, hızlı kentleşme ve nüfus artışı gibi faktörlerin iklim koşullarını etkileyerek hem UHI hem de O₃ seviyelerinde değişime neden olduğu ortaya konulmuştur. UHI yoğunluğu (UHI) ile O₃ ve NO₂ konsantrasyonları arasındaki ilişki incelendiğinde, UHI ile O₃ arasındaki anlamlı pozitif bir ilişki, UHI ile NO₂ arasında ise anlamlı negatif bir ilişki görülmektedir. Ayrıca, bu ilişkilerin coğrafi konuma bağlı olarak kuzey ve güney bölgeleri arasında farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Çalışmanın bulguları, Ngarambe vd. (2021) tarafından yapılan çalışmayla karşılaştırıldığında UHI ile O₃ ve NO₂ arasındaki korelasyon yönünün farklı olduğu görülmektedir.

Bu çalışmalara ek olarak, kentsel iklim ve hava kirletici verilerinin üzerinde kentin morfolojik yapısının önemli bir etkisi bulunmaktadır (Li vd. 2023; Zhou vd. 2018; Xu 2017). Liang vd. (2021) tarafından yapılan, 2000-2015 yıllarını kapsayan çalışmada, Çin'in 150 kentinde kentsel form ile birlikte hava kirliliğinin, gece UHI yoğunluğundaki rolü çok değişkenli regresyon modelleri, korelasyon testleri ve simülasyonlarla araştırılmıştır. Çalışmada simülasyonlar aracılığıyla, ideal olmayan kentsel yerleşim

düzeninin, gece UHI yoğunluğunu 1.23°C arttırabileceği ortaya konulmuştur. Bu artışın %23'e varan kısmı ise hava kirliliğinin artmasından kaynaklanmaktadır. Pekin benzeri kentsel geometrinin ise bölgenin UHI yoğunluğunu 0.62°C arttırabileceği, hava kirliliğinin ise 0.27°C 'lik etkisinin olduğu tahmin edilmektedir. Aghazadeh vd. (2023) tarafından Tahran'da yapılan çalışmada, SUHI ile kentsel arazi kullanımı (trafik, havaalanı, nüfus yoğunluğu vb.), hava kirleticileri ve NDVI arasındaki ilişki araştırılmıştır. Çalışmada, geceleri tüm arazi kullanımlarıyla ısı adaları arasında bir ilişki olduğu; hava kirleticilerinden PM2.5 ve PM10'un, hem gündüz hem de gece boyunca ısı adalarıyla en yüksek korelasyona sahip olduğu, diğer kirleticilerin (CO , NO_2 , SO_2 , vb.) ise ısı adalarıyla ters yönde bir korelasyon gösterdiği ortaya konulmuştur.

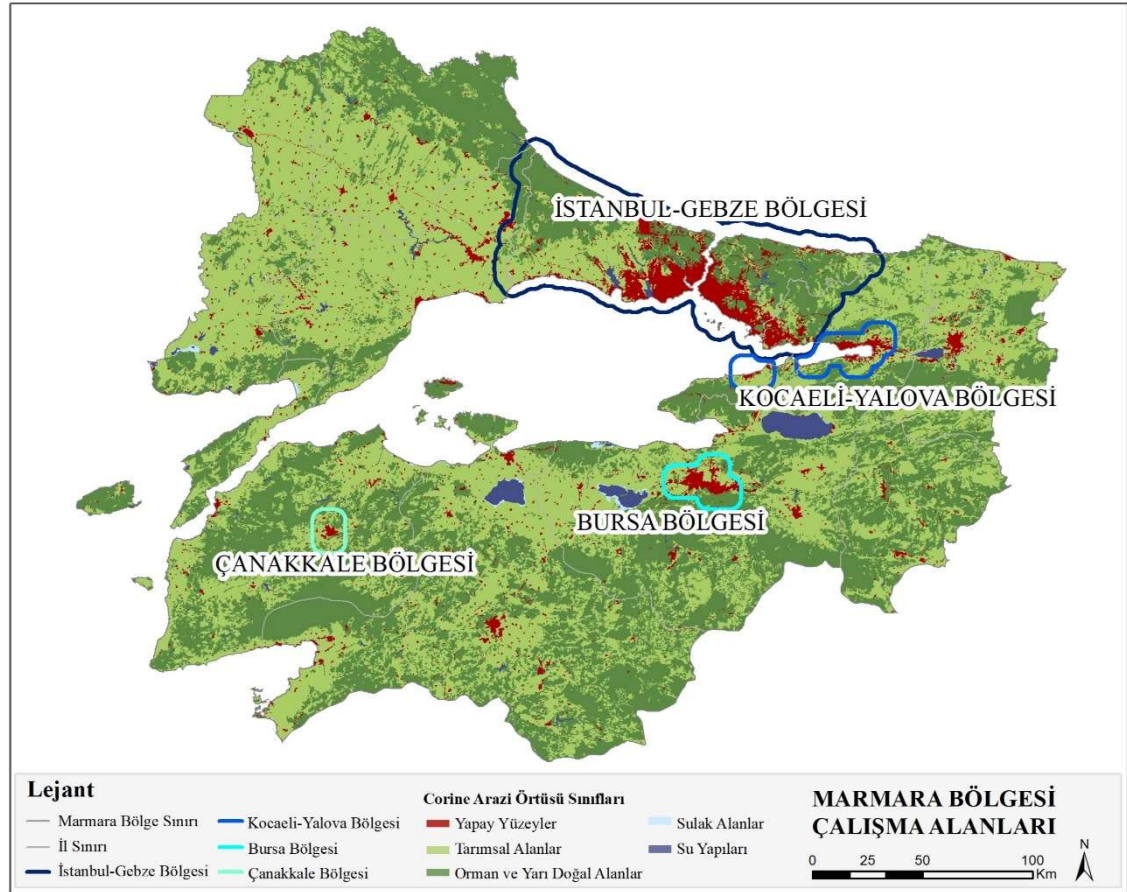
Literatür incelemesinde, geniş alanlarda hava kirleticilerin takibinde yüksek çözünürlüğüyle Sentinel-5P TROPOMI uydusunun öne çıktığı görülmektedir. Ancak, TROPOMI'den elde edilen hava kirletici verilerinin yerel iklimle ilişkisini inceleyen çalışmalar oldukça sınırlıdır. Hereher vd. (2022) tarafından Mısır'ın en kalabalık bölgelerinden biri olan Kahire kentinde yapılan çalışmada, 2018-2021 yılları arasında, MODIS uydusundan elde edilen gece SUHI yoğunluğu (SUHII) ve TROPOMI'den elde edilen NO_2 , SO_2 ve CO hava kirleticilerinin mevsimsel dağılımlarıyla, aralarındaki ilişki incelenmiştir. Çalışma sonuçları, mevsimsel olarak SUHII ile NO_2 arasındaki en yüksek korelasyon ilkbaharda ($R = 0.59$), CO ile en yüksek korelasyon kış aylarında ($R = 0.51$) görülmüştür. Bununla birlikte, SO_2 ile SUHII'nin mevsimsel dağılımı zayıf bir ilişkiye sahiptir, çünkü SO_2 kirleticisi endüstriyel arazi kullanımı ile önemli ölçüde ilişkilidir.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Çalışma Alanı

3.1.1. Marmara Bölgesi

Bu çalışma kapsamında, İstanbul-Gebze, Kocaeli-Yalova ve Bursa bölgeleri benzer sanayi faaliyetleri ve kentsel yoğunlukları nedeniyle seçilmiş, Çanakkale ise bu üç bölgeden farklı bölgesel ve kentsel özelliklere sahip olması nedeniyle çalışma alanı olarak belirlenmiştir (Şekil 3.1). Bu aşamada, CORINE seviye 1 verisine göre, şehirlerdeki yapay yüzeylerin genel sınırından dışarı doğru, tarım ve orman alanlarını içine alan tampon bölgeler oluşturulmuştur. Örnek alanlara ait sınırlar belirlenirken, verilerin karşılaştırılabilir olması için her bölgenin kendi içinde kentsel, tarım ve orman alanlarının benzer yüzölçümüne sahip olmalarına dikkat edilmiştir. İstanbul-Gebze Bölgesi'nde, alan seçiminde sanayi bölgelerinin bütünlüğünü korumak amacıyla, çalışma alanı yalnızca İstanbul ile sınırlı tutulmamış; Gebze ve Dilovası sanayi bölgeleri de bu kapsama dahil edilmiştir.



Şekil 3.1. Marmara Bölgesi çalışma alanları

İstanbul-Gebze bölgesi, sanayi, ulaşım, altyapı ve ticaret faaliyetlerinin yoğun olduğu ve çalışmadaki diğer bölgelere kıyasla yüksek nüfusuyla öne çıkan yerleşim

alanıdır (Şeker 2023). Bu nüfus sayısını Şekil 3.2’de görüldüğü üzere sırasıyla Bursa, Kocaeli, Çanakkale ve Yalova Bölgeleri takip etmektedir. Bu bölgede ayrıca İstanbul ve Sabiha Gökçen gibi iki havalimanı ve Ambarlı, Haydarpaşa gibi iki önemli liman bulunmaktadır. Bu çalışma bölgesi, Kocaeli’nin yüz ölçümü açısından en küçük ilçelerinden biri olan Dilovası’nı da kapsamaktadır. Yüzölçümü açısından büyüklüğüne kıyasla Dilovası, bölgede sanayinin en yoğun olduğu ilçelerdendir. Bölgede sanayiden kaynaklanan hava kirliliği, gaz ve tozların yoğunlaşması, bölgenin çanak biçimindeki topografik yapısıyla birleşerek hava kalitesinin ciddi şekilde düşmesine neden olmaktadır (TTB 2012).



Şekil 3.2. 2023 yılı nüfus grafiği

Kocaeli-Yalova Bölgesinde, Kocaeli ağır sanayiye dayalı bir ekonomik yapıya sahiptir. Bölgede otomotiv, kimya ve metal endüstrisi gibi farklı sektörlerden birçok sanayi tesisi bulunmakla birlikte, Türkiye’nin en büyük petrol rafinerisi olan Tüpraş da bu bölgededir (KİÇDR 2023). Ayrıca, endüstriyel lojistiği destekleyen İzmit Körfez bölgesinde Derince ve Autoport gibi birçok liman bulunmaktadır. Derince Limanı, genel yük taşımacılığı için önemli bir rol oynarken, Autoport ise otomotiv sektörü için önemli bir geçiş noktasıdır. Kocaeli ayrıca, önemli ulaşım arterlerinin kesişim noktasında yer almaktadır. D-100 Karayolu ve TEM Otoyolu gibi ana ulaşım hatları, Kocaeli’yi İstanbul, Bursa ve Ankara gibi büyük şehirlere bağlamaktadır. Körfez’in coğrafi ve ekonomik etkileri nedeniyle, Kocaeli’nin etkisi altında kalan kıyı şeridi ile birlikte Yalova ili de bu çalışma bölgesine dahil edilmiştir. Yalova, sanayi alanında Kocaeli kadar yoğun olmasa da, tarım ve turizm sektörleri ile bölgede önemli bir yer tutmaktadır.

Çalışma alanları arasında yer alan Bursa, nüfusu açısından Türkiye’de dördüncü sırada bulunmakta olup, Marmara Bölgesi’nde İstanbul’dan sonra ikinci büyük şehir konumundadır. Bursa, Türkiye’nin önemli sanayi şehirleri arasında olmakla birlikte Demirtaş, Nilüfer, Kestel ve Bursa Organize Sanayi Bölgeleri olmak üzere dört tane organize sanayi bölgesi barındırmaktadır. Kent merkezinde yoğun sanayi faaliyetleri, taşıt trafiği ve kentsel yerleşim alanlarının genişlemesi, hava kirliliği parametrelerini doğrudan etkileyen unsurlar arasındadır. THEP (2020) raporunda, bölgede en belirgin kirlleticilerin partikül madde (PM10 ve PM2.5), NO₂ ve CO olduğu belirtilmektedir. Partikül madde seviyelerinin, genel olarak Avrupa Birliği tarafından belirlenen sınır değerlerinde ya da bu değerlerin üzerinde seyrettiği tespit edilmiş olup, en yüksek değerlerin Bursa İstasyonu’nda kaydedildiği belirlenmiştir. NO₂ ve CO değerlerinin ise trafik yoğunluğunun en fazla olduğu, Beyazıt Caddesi istasyonunda sınır değerlerinde ya da daha üstünde olduğu görülmüştür. Bölgede SO₂ değerlerinin ise 2013 yılından itibaren düşüş gösterdiği tespit edilmiştir. Nitekim, 1984-2014 yılları arasındaki otuz yıllık süreçte

Bursa’da, kentsel nüfus iki buçuk kat artarken, kentsel yerleşim alanını da altı kat genişletmiştir (Moradi ve Görer Tamer 2017). Kentin, Uludağ’ın eteklerinde kurulu olması ve çevresini saran sıradağlar, kentin çevresinde engebeli bir arazi ve çanak yapısı oluşturmaktadır. Bölgenin kendine özgü bu topografik yapısı, kentsel gelişimi ile Uludağ’dan gelen yatay hava akımları, hava kirleticilerinin dağılımını ve birikimini etkileyen faktörler arasında yer almakta ve bu durum hava kirliliği parametrelerin daha yüksek seviyelere ulaşmasına neden olabilmektedir (THEP 2020).

Çalışma bölgeleri arasında diğerlerine göre daha küçük yüz ölçüme sahip olan Çanakkale, Türkiye’nin kuzeybatısında yer almaktadır ve Marmara Bölgesi’nde kırsal yerleşim özelliği en belirgin olan il durumundadır. Çanakkale şehri, Boğaz’ın her iki yakasında konumlanarak Ege Denizi ile Marmara Denizi arasında önemli bir geçiş bölgesi oluşturmaktadır. Bölgede üç adet organize sanayi bölgesi ve beş adet kömürlü termik santral bulunmaktadır. Bu termik santrallerden ikisi 2005 yılından beri faaliyette olup, diğer üçü ise sırasıyla 2011, 2017 ve 2018 yıllarından itibaren devreye girmiştir. Bölgede bu termik santrallerin varlığı, özellikle SO₂ ve PM gibi başlıca kirleticilerin atmosfere salınmasına neden olarak hava kalitesini, çevreyi ve insan sağlığını olumsuz yönde etkilemektedir (HEAL 2018). Fakat bölgenin topografik yapısı, çevre dağların varlığı, deniz seviyesinden yüksekliğinin değişkenliği ve rüzgâr özellikleri, hava hareketlerini ve hava kirletici maddelerin dağılmasına katkı sağlamaktadır.

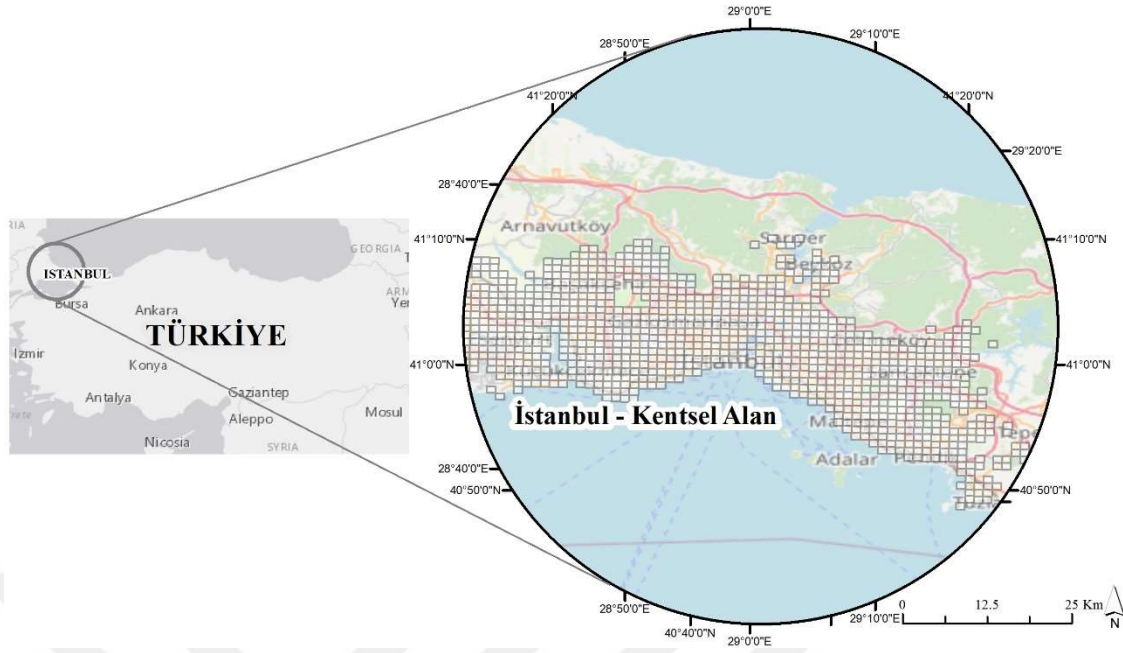
3.1.2. İstanbul Kentsel Alanı

Çalışmanın ikinci aşamasında, yerel iklim ve kentsel yapı da dikkate alınarak hava kirleticileri ile ilişkiler, kentsel nüfus, ulaşım ve sanayi faaliyetlerinin yoğun olduğu İstanbul ili özelinde incelenmiştir (Şekil 3.3). İstanbul, Türkiye’nin Marmara Bölgesinde, yaklaşık 15 milyon nüfusu ile en kalabalık şehri olmasının yanı sıra, Avrupa’nın önde gelen mega kentlerinden birisidir. İstanbul, Avrupa ve Asya kıtalarını birbirine bağlayan önemli bir konuma sahip olup, İstanbul Boğazı ile Karadeniz ve Marmara Denizi arasında coğrafi olarak köprü işlevi görmektedir.

İstanbul, Köppen-Geiger sistemine göre Csa iklim sınıflandırması içinde yer almaktadır. Buna göre kışları ılıman, yazları sıcak ve kurak Akdeniz iklimine sahiptir (Bölük 2016). Bölge, nüfus yoğunluğu, taşıt trafiği ve endüstriyel faaliyetleri nedeniyle Türkiye’nin en yüksek hava kirliliğine sahip şehirlerinden birisidir. Ayrıca, bölgede bulunan boğaz ve üç havalimanı ile hava ve deniz taşımacılığının yaygın olması hava kirliliğine katkıda bulunmaktadır (THHP 2023).

Şehirdeki hızlı kentleşme ve sanayileşme; su kirliliği (Kenanoğlu vd. 2024), motorizasyon oranlarında artış (Canitez vd. 2020), trafik sıkışıklığı (Flores vd. 2020), kentsel genişleme (Öncel ve Levend 2023), yeşil alan kaybı (Değermenci ve Zengin 2024), yerel iklim değişikliği (Kuşçu Şimşek vd. 2024; Kuşçu Şimşek ve Arabacı 2021), hava kirliliği (Çapraz ve Deniz 2021; Gündoğdu ve Elbir 2024) gibi birçok çevresel, sosyal ve ekonomik sorunların ortaya çıkmasına neden olmuştur.

Bu çalışmada, İstanbul’un kentsel alanlarına odaklanılmış, tarım alanları ve ormanlık alanlar, bunun dışında tutulmuştur. Çalışma 99400 ha’lık kentsel alanı kapsamaktadır.



Şekil 3.3. İstanbul kentsel alanı çalışma bölgesi

3.2. Kullanılan Veri Setleri

Çalışmada, Landsat 8 termal görüntüleri, NDVI, NDBI, AI, NO₂, SO₂, kent dokusu, sayısal yükseklik modeli (DEM), ormana uzaklık, kıyıya uzaklık ve yol verileri kullanılmıştır (Çizelge 3.1). Orman alanlarına ve kıyıya olan mesafeler CBS ortamında öklidyen mesafesi kullanılarak yakınlık analizleri ile üretilmiştir. Yol verisi, Open Street Map'den (OSM) elde edilmiştir. 30m x 30m çözünürlüğe sahip DEM verisi NASA, ASTER GDEM veri setinden indirilmiştir. Kent dokusu verisi, İstanbul Büyükşehir Belediyesi'nin (İBB) 2019 yılı yapı verileri kullanılarak oluşturulmuş olup OSM verileri aracılığıyla gerekli güncellemeler yapılmıştır. Orman alanlarına uzaklık, kıyıya olan uzaklık ve sayısal yükseklik haritaları Ek-1'de verilmektedir. Çalışmada, veri tabanlarının hazırlanması, verilerin ilişkilendirilmesi ve haritaların oluşturulması için ArcMap 10.8 yazılımı kullanılmıştır. Kullanılan diğer veri setlerinin detaylarına ilerleyen bölümlerde yer verilmiştir.

3.3. Yöntem

Çalışmanın ilk aşamasında, hava kirleticilerinin arazi kullanımına göre gösterdiği farklılaşmanın İstanbul dışındaki şehirlerde de geçerli olup olmadığı araştırılmıştır. Marmara Bölgesi dört alt bölgeye ayrılarak hava kirleticiler ile arazi kullanımı arasındaki ilişki, 5 km ve 1 km grid boyutlarında iki farklı ölçekte incelenmiştir. CORINE verisinin seviye 1 sınıfları kullanılarak, yapay yüzeyler, tarım alanları ve orman alanlarında hava kirleticilerin farklılaşmaları post-hoc testleri ile incelenip değerlendirilmiştir. Dört bölge için ayrı ayrı yapılan bu analizlerle bölgesel farklılıkların ortaya konulması amaçlanmıştır. Bu aşamada, analizler iki farklı ölçekte yürütülmüş, elde edilen bulgular karşılaştırılarak, en uygun çalışma ölçeği belirlenmiştir.

Çizelge 3.1. Veri setleri

Veri Setleri	Veri Tarihi	Mekansal Çözünürlük	Üretilen Veri
Landsat 8 OLI/TIRS	2021-2022	100 m x 100 m 30 m x 30 m 30 m x 30 m	Yüzey sıcaklığı NDVI NDBI
Sentinel-5P (TROPOMI)	2021-2022	5.5 km x 3.5 km 5.5 km x 3.5 km 5.5 km x 3.5 km	AI NO ₂ SO ₂
Yapı verisi	2022	-	Kent dokusu
ASTER GDEM	2021-2022	30 m x 30 m	Yükseklik
Orman Alanı	2021-2022	-	Ormana uzaklık
Kıyı Çizgisi	2022	-	Kıyıya uzaklık
Yol verisi	2022	-	Ağırlıklandırılmış yol

Ardından, kentsel yapılaşma ve endüstriyel faaliyetlerin daha yoğun olduğu İstanbul-Gebze bölgesi ele alınarak, bu bölge özelinde CORINE seviye 3 arazi sınıfları ile hava kirlilik verileri arasındaki ilişki 1 km’lik ölçekte post-hoc testleriyle incelenmiştir. Bir önceki aşamada, TROPOMI verilerinin 1 km’lik çözünürlükte, 5 km’lik çözünürlüğe göre arazi sınıflarındaki farklılaşmayı daha iyi ortaya koyabilmesi nedeniyle, çalışmanın bu ve sonraki aşamalarında 1 km’lik çözünürlük tercih edilmiştir.

Çalışmanın sonraki aşamasında, İstanbul’da yapı içeren gridler kapsamında hava kirlilik verileri ile kent dokusu arasındaki ilişki, yol verisi de dikkate alınarak incelenmiştir. İstanbul’un kent doku verisi, yapı verisi kullanılarak 150m x 150m grid boyutlarında binaların yerleşim düzeni (ayrık, toplu konut, kompakt), yüksekliği (düşük, orta, yüksek katlı) ve yoğunluğu (seyrek, yarı kompakt, kompakt) dikkate alınarak oluşturulmuştur. Bu veriler daha sonra çalışmanın ana ölçeği olan 1 km’lik gridlere aktarılmış ve her grid, içerdiği kent doku tiplerinden en baskın olanına göre sınıflandırılmıştır. Çalışmada yol verileri ise Open Street Map’den (OSM) elde edilerek, var olan sınıflarına göre sokak, cadde ve otoyol olarak sınıflandırılmıştır. Sonrasında, kent doku verisi yapı yoğunluğu dikkate alınarak yol verisi ise yol genişliğinin göz önünde bulundurularak belirli ağırlıklar atanmış ve bu veriler birleştirilerek yeni bir veri seti oluşturulmuştur. Buna göre, her bir hava kirlilik verisinin kent doku sınıflarında farklılaşıp farklılaşmadığı, yol verisi de göz önünde bulundurularak post-hoc testleri ile incelenmiştir.

Tez çalışmasının son aşamasında ise yüzey sıcaklık verisi ile hava kirlleticiler, kent dokusu, NDVI, NDBI, kıyıya uzaklık, ormana uzaklık ve yükseklik arasındaki ilişki kapsamlı olarak incelenmiştir. Bu aşamada, analizler 2021-2022 zaman aralığında her bir mevsim ayrı ayrı ve tüm zaman aralığı bir bütün olarak ele alınarak iki farklı şekilde gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, her bir mevsimde ayrı ayrı yüzey sıcaklığına etki eden bağımsız değişkenler regresyon testleri ile araştırılmıştır. Bu testler İstanbul’un Avrupa Yakası, Anadolu Yakası ve her iki yaka birlikte olmak üzere üç farklı bölgede, her bir bölgenin kendine özgü işlevleri dikkate alınarak ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Ardından, bu üç bölgede yüzey sıcaklığı ile her bir kirleticisi arasındaki ilişki korelasyon testleri

kullanılarak incelenmiş ve haritadaki dağılımları üzerinden karşılaştırılmıştır. Bu analizlerden sonra, tüm zaman aralığı bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmiş; verilerdeki mevsimsel etkileri gidermek için normalizasyon yöntemi uygulanmıştır. Hava kirleticileri, kentsel doku ve mekânsal değişkenler ile yüzey sıcaklığı arasındaki ilişki spearman korelasyon testi kullanılarak incelenmiştir. Sonraki aşamada, yüzey sıcaklığı üzerindeki bağımsız değişkenlerin etkisi, herhangi bir dönem ayrımı gözetilmeksizin XGBoost makine öğrenimi tekniği kullanılarak modellenmiş; SHAP analizi yardımıyla da bu değişkenlerin etki derecesi ve yönü değerlendirilmiştir. Son aşamada, hava kirleticilerin kentsel doku tipleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık gösterip göstermediği post-hoc ANOVA testleri ile incelenmiş; ardından kentsel doku ve hava kirleticilerin yüzey sıcaklığı üzerindeki etkisi karar ağacı analizi ile modellenmiş ve bu değişkenler arasındaki ilişkiler grafik gösterimler üzerinden detaylı olarak değerlendirilmiştir. Tezdeki iş akışı Şekil 3.4’de verilmiştir.

3.3.1. Landsat 8 verilerinin ön işlenmesi

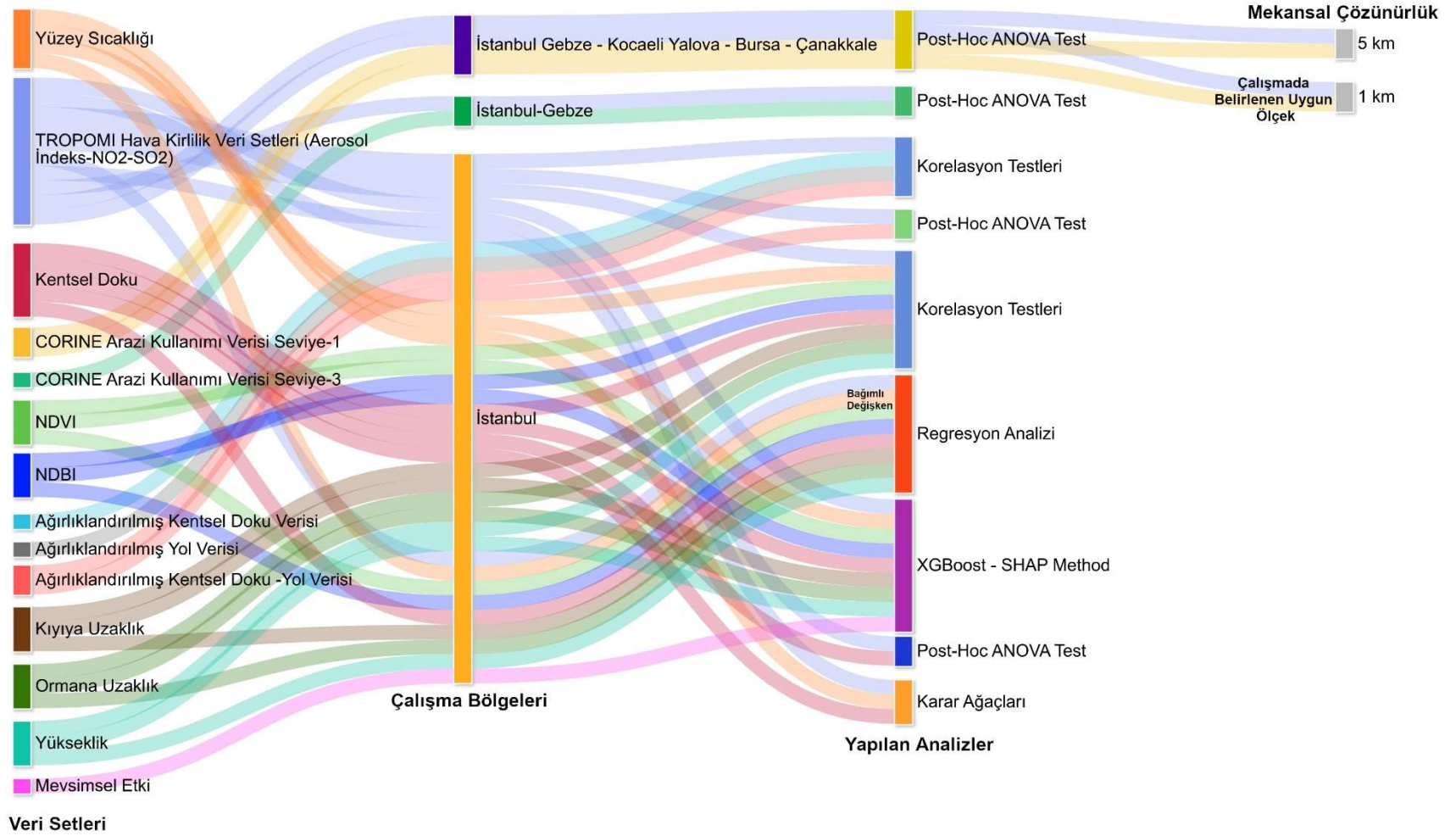
Çalışmada yüzeye ait spektral indeks (NDVI, NDBI) ve yüzey sıcaklık verileri, Landsat 8 (OLI/TIRS) uydusundan elde edilmiştir. OLI sensörü, 30 metre çözünürlükte dokuz spektral bantta (bant 1-7 ve 9) ve 15 metre çözünürlükte bir pankromatik bantta (bant 8) veri toplamaktadır. TIRS sensörü, iki termal bantta (bant 10 ve 11) 100 metre çözünürlükte veri toplar ve bu veriler bir algoritma kullanılarak 30 metreye yeniden örneklenebilir. Landsat 8 uydusu, Dünya yüzeyinin yüksek çözünürlüklü görüntülerini, yaklaşık olarak her 16 günde bir kaydeder. Bu çalışmada, İstanbul kentini kapsayan, 2021-2022 yıllarına ait bulutsuz ve açık uydu görüntüleri kullanılmıştır. Görüntüler, USGS Earth Explorer web sitesinden indirilmiştir. Kullanılan görüntü tarihleri, Ek-2’de bulunmaktadır. Ayrıca günlere ait oluşturulan haritalar Ek-3’de verilmiştir.

Uydu görüntülerine ait piksel değerleri, dijital değerler (DN) ile ifade edilmektedir. Her algılayıcıda farklı bir radyans değerini temsil eden dijital değerlerin anlamlı hale gelebilmesi için görüntü analizlerine başlanılmadan önce uydu görüntüleri ön işleme tabi tutulmuştur. Bu aşamada, uydu görüntüleri Landsat 8 el kitabında (USGS 2019) sunulan radyometrik parametrelere göre formül (3.1) deki gibi düzenlenmiştir. Ardından görüntüler arasında tarih ve zaman değişiminden kaynaklı farklı güneş açılarının etkisini önlemek amacıyla formül (3.2)’ ye göre reflaktans dönüşümü uygulanmıştır.

$$L\lambda = ML.Q_{cal} + AL \quad (3.1^2)$$

$$P\lambda = \frac{\pi.L\lambda.d^2}{Esun\lambda.\cos(Q_{sz})} \quad (3.2^2)$$

² Formülde: $L\lambda$: Spektral Radyans ($W/(m^2 * sr * \mu m)$), ML : Bant için parlaklık radyansı ölçeklendirme faktörü (RADIANCE_MULT_BAND_n from the metadata), AL : Bant için parlaklık katkılı ölçeklendirme faktörü (RADIANCE_ADD_BAND_n from the metadata), Q_{cal} : Piksel Dijital Değeri, $P\lambda$: Birimsiz yansıtım, d : Dünya-Güneş arası mesafe, $ESUN\lambda$: Ortalama solar irradyans değeri, θ_s = Yerel güneş zenit açısı



Şekil 3.4. Çalışma iş akışı

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (3.3)$$

$$NDBI = \frac{SWIR - NIR}{SWIR + NIR} \quad (3.4^3)$$

Bu dönüşümlerin yapılmasının ardından Normalize Edilmiş Bitki Örtüsü İndeksi (NDVI) ile Normalize Edilmiş Bina Örtüsü İndeksleri (NDBI) formül (3.3) ve (3.4)'e göre hesaplanmıştır. NDVI, uzaktan algılama görüntüleri kullanılarak oluşturulan en yaygın spektral indekslerden biridir (Gao 1996). İstanbul'u kapsayan görüntü tarihlerinden referans olarak üretilen NDVI ve NDBI haritaları Ek-3'de verilmiştir.

Termal radyasyon miktarını belirleyen parametrelerden biri olan emisivite (ϵ) yüzey sıcaklığının da hesaplanmasında önemli bir parametredir (Yin vd. 2020). Emisivite hesaplamalarında yaygın olarak NDVI Eşik Yöntemi (NDVITHM) kullanılmaktadır (Neinavaz vd. 2020). Bu yöntem, NDVI değerine bağlı olarak her piksel için farklı emissivite değeri atamaktadır (Digavinti vd. 2017; Sobrino vd. 2008). Formül 3.5'e göre P_v (Orantılı Bitki Örtüsü), NDVI'nın saf piksel değerleri ile temsil edilen bitki örtüsü ($NDVI_v = 0.5$) ve çıplak toprağın ($NDVI_s = 0.2$) oranları ile elde edilmektedir. Emisivite ise formül 3.6'ya göre hesaplanmıştır. Formüldeki ϵ_w (su), ϵ_v (bitki örtüsü), ϵ_{vs} (bitki örtüsü ve çıplak toprak karışımı) ve ϵ_s (çıplak toprak) için Digavinti vd. (2017) tarafından verilen değerler kullanılmıştır. C ise yüzey pürüzlülük değeridir ve sabit 0.005 olarak alınmaktadır.

$$P_v = \left(\frac{NDVI - NDVI_s}{NDVI_v - NDVI_s} \right)^2 \quad (3.5^4)$$

$$\epsilon_\lambda = \begin{cases} \epsilon_w \lambda & NDVI < 0 \\ \epsilon_s \lambda & NDVI < NDVI_s \\ \epsilon_v \lambda P_v + \epsilon_s \lambda (1 - P_v) + C & NDVI_s \leq NDVI < NDVI_v \\ \epsilon_v \lambda + C & NDVI \geq NDVI_v \end{cases} \quad (3.6)$$

3.3.2. Sentinel-5P/TROPOMI veri setleri

Aerosol indeks, NO₂, SO₂ hava kirlilik verilerinin elde edilmesinde, Sentinel-5P uydusuna ait Troposferik İzleme Aracından (TROPOMI) yararlanılmıştır. TROPOMI, ultraviyole görünür (270 - 495 nm), yakın kızılötesi (675 - 775 nm) ve kısa dalga kızılötesi (2305 - 2385 nm) dalga boylarında ölçüm yapmakta ve günlük küresel veri sağlamaktadır (Van Geffen vd. 2016). Çalışmada zaman aralığı olarak 2021-2022 yıllarında, yüzey sıcaklığının elde edilebildiği bulutsuz günler kullanılmıştır. Bu tarih aralığı, TROPOMI verilerinin yakın zamanlı olarak elde edilebilmesi ve pandemi döneminin etkilerinin

³ Formülde: NIR: Yakın Kızılötesi, Red: Kırmızı Bant, SWIR: Kısadalga Kızılötesi

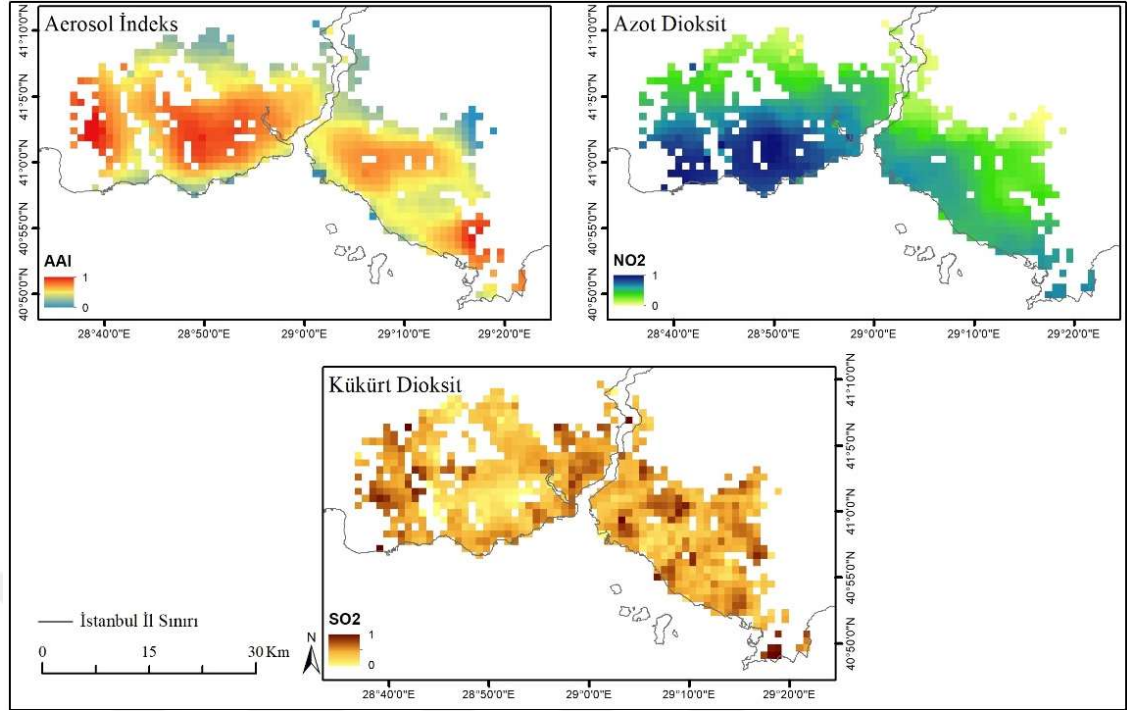
⁴ P_v : Oransal bitki örtüsü, $NDVI_s$: NDVI toprak değeri, $NDVI_v$: NDVI bitki değeri

elimine edilebilmesi amacıyla belirlenmiştir. Ayrıca, görüntü tarihi seçiminde toz taşınımı günleri göz önünde bulundurulmuş ve bu tarihler kullanılmamaya dikkat edilmiştir.

Aerosol indeks, NO₂ ve SO₂ hava kirleticileri, 5.5 km x 3.5 km (across × along track) mekansal çözünürlüğe sahip TROPOMI seviye 2 (L2) verileridir. Seviye 2 verilerindeki pikseller enlem ve boylam ile tanımlanır ve bu durum düzensiz bir ızgara oluşturarak birden fazla görüntünün birleştirilmesini zorlaştırır. Verilerin ortak zamansal ve mekansal çözünürlüğe sahip seviye 3 (L3) verilerine dönüştürülmesinde Python'da HARP atmosferik araç kutusu kullanılmıştır.

HARP, ESA (Avrupa Uzay Ajansı) için uydu verilerini işlemek, modellemek veya birbirleriyle karşılaştırabilmek için özel olarak geliştirilmiş Atmosferik Araç Kutusunun bir parçasıdır (Niemeijer vd. 2017). Verilerde hatalı yansıma neden olan ve bulut içeren pikseller kalite güvence değeri (qa_value) ile filtrelenebilmektedir. ESA tarafından bulutsuz bir veri için genel olarak %50'den büyük kalite güvence değerli piksellerin kullanılması önerilmektedir (Landgraf vd. 2020). Aerosol indeks ve NO₂ için ise bu değerler sırasıyla %80 ve %75'tir (Eskes vd. 2022; Stein Zweers ve Wagner 2021). Hava kirleticisi veriler, bu referans değerler kullanılarak filtrelenmiş ve Marmara bölgesi'nin enlem-boylam aralığı dikkate alınarak, iki farklı grid çözünürlüğünde (0.05°x0.05° ve 0.01°x0.01°) yeniden örneklenmiştir. Bu aşamada 0.05°x0.05° (yaklaşık 5 km²) çözünürlüğü, orijinal veri boyutuna en yakın olduğu için tercih edilmiş, ancak çalışmanın sonraki aşamalarında çözünürlüğün analizlerdeki etkisini değerlendirmek amacıyla 0.01°x0.01° (yaklaşık 1 km²) çözünürlüğünde de veriler üretilmiştir.

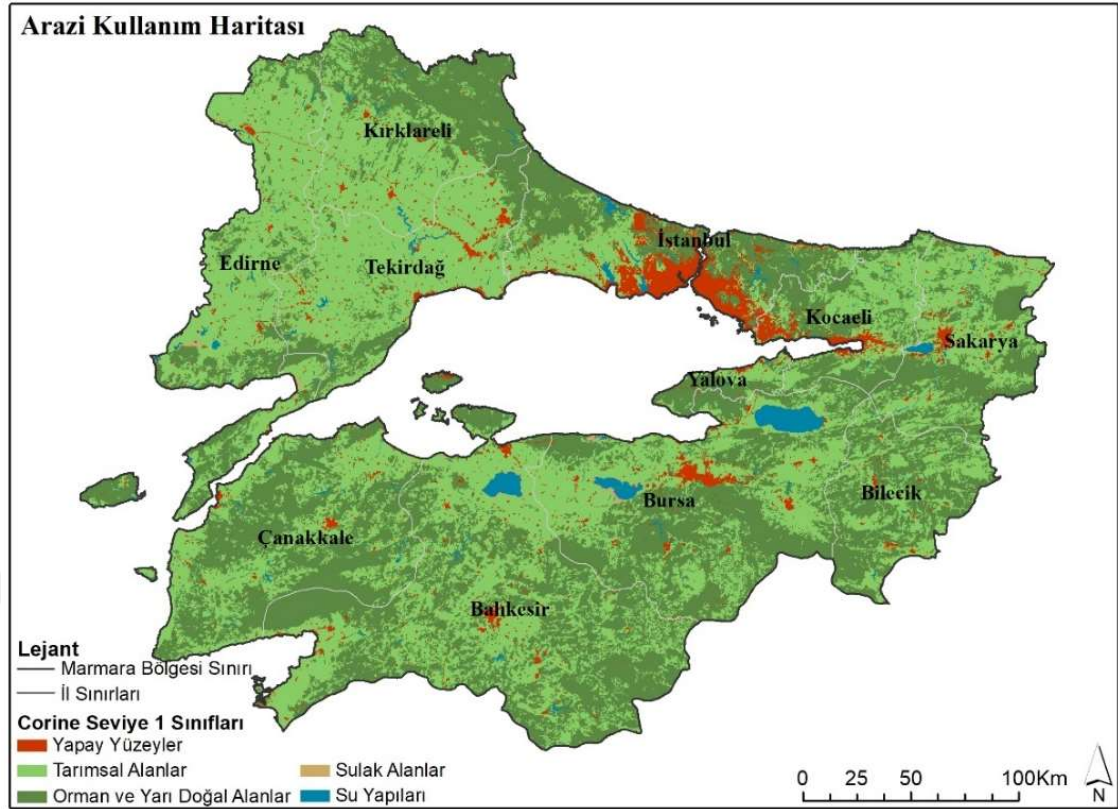
Bu tez çalışmasında, Marmara Bölgesi kapsamında İstanbul-Gebze, Kocaeli-Yalova, Bursa, Çanakkale alanlarında, hava kirlilikleri ile arazi kullanımı arasındaki ilişkilerin araştırılmasında, 2021-2022 dönemi mevsimsel olarak ele alınmıştır. Dönemlere ait oluşturulan haritalar Ek-5'de verilmiştir. Ardından İstanbul kapsamında, ağırlıklandırılmış kentsel doku- yol verisi ile dönemsel ilişkilerin araştırılmasında oluşturulan hava kirlilik verileri Ek-6'da verilmiştir. İstanbul özelinde, hava kirleticileri ile yüzey sıcaklığı arasındaki ilişkinin makine öğrenim yöntemleriyle araştırılmasında dönemsel farklılıkları ortadan kaldırmak için veriler normalize edilerek haritaları oluşturulmuştur (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. İstanbul hava kirletici haritaları

3.3.3. Corine verisi

Çalışmada arazi kullanım verisi olarak 2018 yılı CORINE verisinden yararlanılmıştır. Avrupa Çevre Ajansı (AÇA) tarafından yürütülen bu çalışmada, arazilerin durumu çeşitli uydu görüntüleri kullanılarak incelenir. Projede kullanılan başlıca uydu sistemleri arasında SPOT, Sentinel 2, IRS, RapidEye ve Landsat 8 bulunmaktadır. CORINE projesi 1985 yılında başlamıştır ve günümüze kadar yaklaşık 6-8 yıllık aralıklarla Avrupa'daki arazi örtüsü ve kullanımındaki değişimler düzenli olarak takip edilmektedir. Bu veriler sayesinde, 30 yılı aşkın bir sürede arazilerde meydana gelen değişimler izlenebilmektedir. Bu veriler AÇA tarafından belirlenen üç ana düzeyde hiyerarşik bir yapıda düzenlenmektedir ve 44 sınıfa ait vektör veriler şeklinde sunulmaktadır (Tarım ve Orman Bakanlığı 2019). Bu sınıfların detayları Çizelge 3.2'de verilmiştir. Çalışmada 2018 yılına ait güncel seviye 1-2-3 CORINE verileri kullanılmıştır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Corine arazi kullanımı sınıfları (seviye-1)

Çizelge 3.2. Corine arazi kullanım sınıfları

Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
1. Yapay Yüzeyler	1.1. Şehir Yapısı	1.1.1. Sürekli Şehir Yapısı 1.1.2. Kesikli/Sürekli Şehir Yapısı
	1.2. Endüstriyel, Ticari ve Taşıma Birimleri	1.2.1. Endüstriyel ve Ticari Birimler 1.2.2. Karayolları, Demiryolları ve İlgili Alanlar 1.2.3. Limanlar 1.2.4. Havaalanları
		1.3.1. Maden Çıkarım Sahaları 1.3.2. Boşaltım Sahaları 1.3.3. İnşaat Sahaları
		1.4.1. Yeşil Şehir Alanları 1.4.2. Spor ve Eğlence Alanları
	1.3. Maden, Boşaltım ve İnşaat Alanları	
	1.4. Tarım Dışı Yapay Yeşil Alanlar	
	2. Tarımsal Alanlar	2.1.1. Sulanmayan Ekilebilir Alanlar 2.1.2. Sürekli Sulanan Alanlar 2.1.3. Pirinç Tarlaları
		2.2.1. Üzüm Bağları 2.2.2. Meyve Bahçeleri 2.2.3. Zeytinlikler
		2.3.1. Mera Alanları

Çizelge 3.2'nin devamı

2. Tarımsal Alanlar	2.4. Heterojen Tarımsal Alanlar	2.4.1. Sürekli Ürünlerle Birlikte Bulunan Senelik Ürünler
		2.4.2. Karışık Tarım Alanları
		2.4.3. Doğal Bitki Örtüsü İle Birlikte Bulunan Tarım Alanları
		2.4.4. Ormanla Karışık Tarım Alanları
3. Orman ve Yarı Doğal Alanlar	3.1. Ormanlar	3.1.1. Geniş Yapraklı Ormanlar
		3.1.2. İğne Yapraklı ormanlar
		3.1.3. Karışık Ormanlar
	3.2. Maki ve Otsu Bitkiler	3.2.1. Doğal Çayırliklar
		3.2.2. Fundalıklar
		3.2.3. Sklerofil Bitki Örtüsü
		3.2.4. Bitki Değişim Alanları
	3.3. Bitki Örtüsü ile Kaplı Olmayan veya Az Miktarda Bitki Örtüsü ile Kaplı Açık Alanlar	3.3.1. Sahiller, Kumsallar ve Kumluklar
		3.3.2. Çıplak Kayalıklar
		3.3.3. Seyrek Bitki Alanları
		3.3.4. Yanmış Alanlar
		3.3.5. Buzul ve Kalıcı Kar
4. Sulak Alanlar	4.1. Karasal Bataklıklar	4.1.1. Karasal Bataklıklar
		4.1.2. Turbalıklar
	4.2. Denize Yakın Islak Alanlar	4.2.1. Tuz Bataklığı
		4.2.2. Tuzlalar
		4.2.3. Gelgit Olayı ile Oluşan Düzlükler
5. Su Yapıları	5.1. Karasal/İç Sular	5.1.1. Su Yolları
		5.1.2. Su Kütleleri
	5.2. Deniz Suları	5.2.1. Kıyı Lagünleri
		5.2.2. Nehir Ağızları, Deltalar
		5.2.3. Deniz ve Okyanus

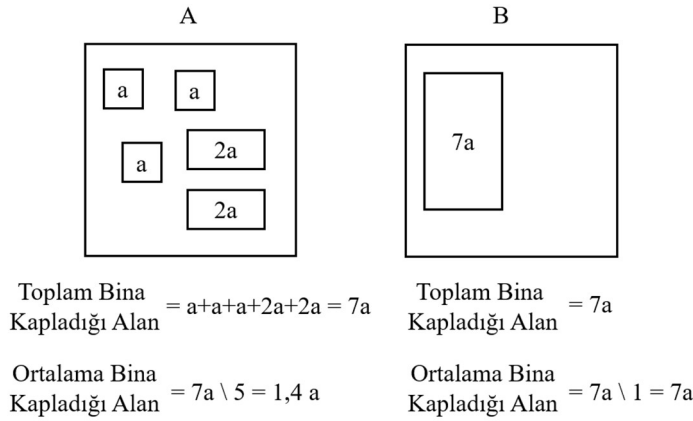
3.3.4. Kent dokusu

Binalar, kentsel morfolojinin ana unsurudur. LST üzerinde, yapı yüksekliği-yönelimi-yoğunluğu, Gökyüzü Görüş Faktörünün (SVF) önemli etkileri olduğu bilinmektedir (Berger vd. 2017; Scarano ve Mancini 2017). Yerel İklim Bölgesi (LCZ) üzerine yapılan çalışmalar, kentsel formlar ve bunların yerel ölçekte, iklim üzerindeki etkilerinin incelenmesinde önemli kaynaklardır (Aslam ve Rana 2022). LCZ, yüz metreden kilometrelere kadar, benzer nüfus aktivitesi, yüzey örtüsü, yapı formu ve malzemesine sahip alanları tanımlamaktadır (Stewart ve Oke 2012).

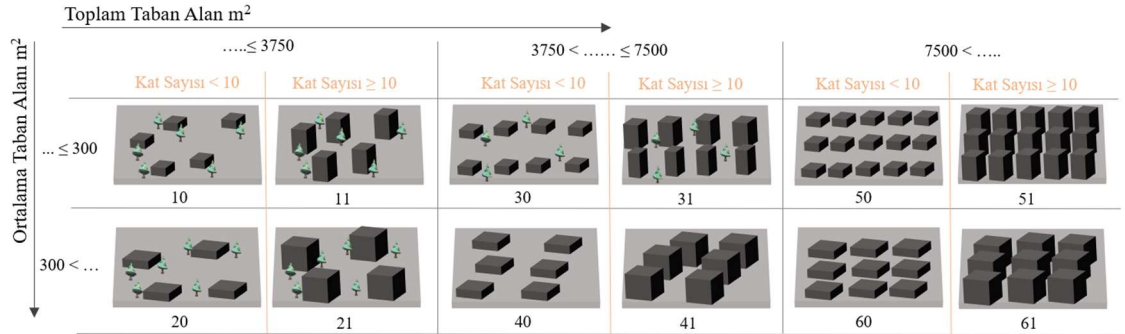
Literatürde kentsel dokunun oluşturulmasında yaygın olarak; bina yerleşimi, bina yüksekliği, bina yoğunluğu, bina taban alanı oranı, yeşil kaplama oranı ve ön alan indeksi gibi birçok kentsel morfoloji parametreler kullanılmaktadır (Li vd. 2021; Yue vd. 2019; Berger vd. 2017). Bu çalışmada kent dokusunun oluşturulmasında, Kuşçu Şimşek (2013) tarafından İstanbul için önermiş olduğu doku matrisi referans alınmıştır. Matrisin oluşturulmasında, grid alanı içerisinde eşit alan kaplayan binaların kaplama ve serpilme farklılıklarının yarattığı etkiden yararlanılmıştır. Şekil 3.7 incelendiğinde A ve B gridleri

içerisindeki toplam alanın eşit olduğu görülmektedir, ancak bina taban alanlarındaki farklılıklar dokusal değişimler yaratmaktadır. Buna göre Şekil 3.8’de verilen matriste, binaların kaplamış oldukları taban alanı ve grid içindeki toplam bina taban alanının dikkate alınması ile sınıflandırma yapılmıştır. Matriste, grid alanı içindeki toplam taban alanı, kaplamayı, ortalama taban alanı ise serpilmeyi yönlendirmektedir.

Çalışmada, önerilen matrise ek olarak, kat yüksekliklerinin de dahil edilmesi ile 3. boyut eklenmiştir. Buna göre bina kat yüksekliklerinin de ele alınması ile doku sınıfları ait oldukları sınıf içinde iki gruba ayrılmıştır. İstanbul için oluşturulan doku sınıfı haritası Şekil 3.9’da verilmiştir. Doku sınıflarının, yüksek çözünürlüklü uydu görüntüsü üzerinden kontrolü yapılmıştır (Şekil 3.10).



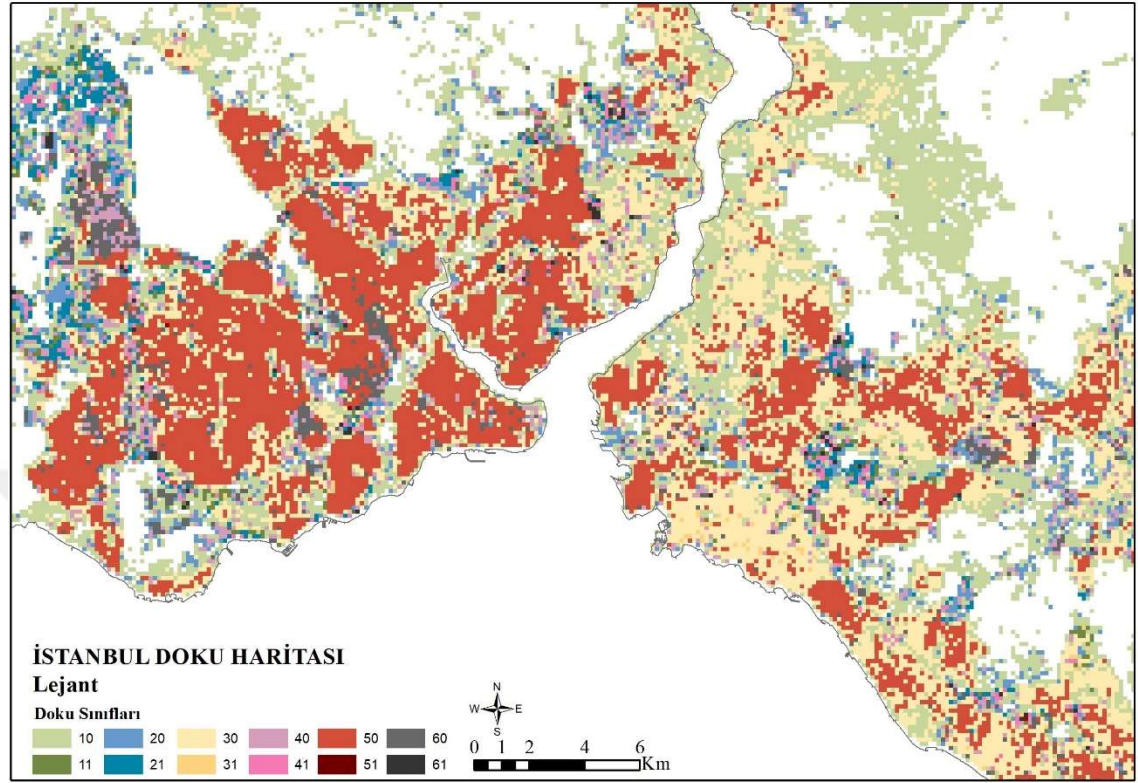
Şekil 3.7. Kuşçu Şimşek'in (2013) kent doku matrisi



Şekil 3.8. Kentsel doku matrisi

Ardından 150 m grid ölçeğindeki doku sınıfları, çalışmanın ana ölçeği olan 1 km'lik gridlere aktarılmış ve her grid, içerdiği kent doku tiplerinden en baskın olanına göre sınıflandırılmıştır. Çalışma alanındaki, doku sınıflarının sayısı dikkate alındığında (Çizelge 3.3) 10 (Ayrık Düşük-Katlı), 30 (Ayrık Orta-Katlı), 50 (Kompakt Düşük/Orta-Katlı) kentsel doku sınıflarının yüzdesel olarak benzer oldukları görülmüştür. Bu nedenle yapılacak analizlerde sadece bu üç doku sınıfı kullanılmıştır (Şekil 3.10). Ayrıca Çizelge 3.3’de, verilerin yüzdesinin çalışmanın ana ölçeği olan 1 km kapsamında hesaplanmış

olması ve 31 (Yarı Kompakt Ayrık Yüksek-Katlı) ile 51 (Kompakt Ayrık Yüksek-Katlı) doku sınıflarının bu ölçekte bulunmaması nedeniyle yer verilmemiştir.



Şekil 3.9. İstanbul kent doku haritası

Çizelge 3.3. Çalışma alanındaki kentsel doku sınıflarının yüzdesi

Kent Dokusu	Kent Doku Sınıfları	Grid Sayısı	Veri Yüzdesi
Ayrık Düşük-Katlı (Seyrek)	10	289	35.8
Ayrık Yüksek-Katlı (Seyrek)	11	3	0.4
Siteler Düşük-Katlı (Seyrek)	20	10	1.2
Siteler Yüksek-Katlı (Seyrek)	21	5	0.6
Ayrık Orta-Katlı (Yarı Kompakt)	30	236	29.2
Toplu Konutlar Düşük-Katlı (Yarı Kompakt)	40	8	1.0
Toplu Konutlar Yüksek-Katlı (Yarı Kompakt)	41	3	0.4
Kompakt Düşük/Orta-Katlı	50	252	31.2
Endüstriyel Binalar Az-Katlı (Yüksek Yoğunluklu Kompakt)	60	2	0.2
	Total	808	100.0

Doku Sınıfı - 10



Doku Sınıfı - 11



Doku Sınıfı - 20



Doku Sınıfı - 21



Doku Sınıfı - 30



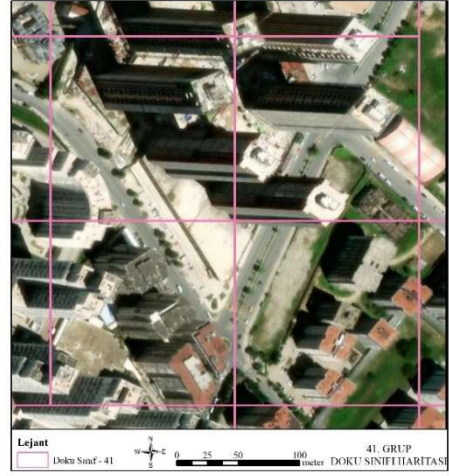
Doku Sınıfı - 31



Doku Sınıfı - 40



Doku Sınıfı - 41

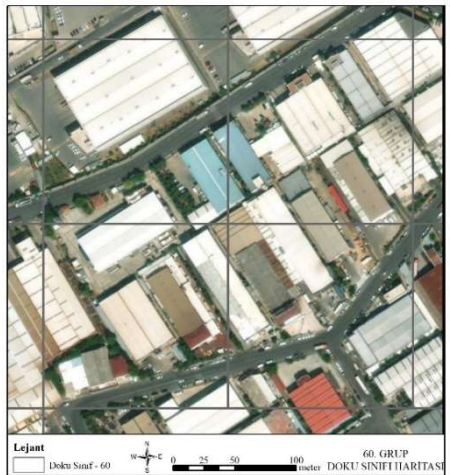


Doku Sınıfı - 50

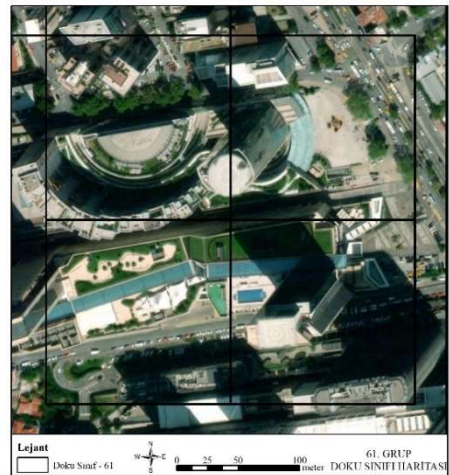


Doku Sınıfı - 51 (Grid bulunmamaktadır)

Doku Sınıfı - 60



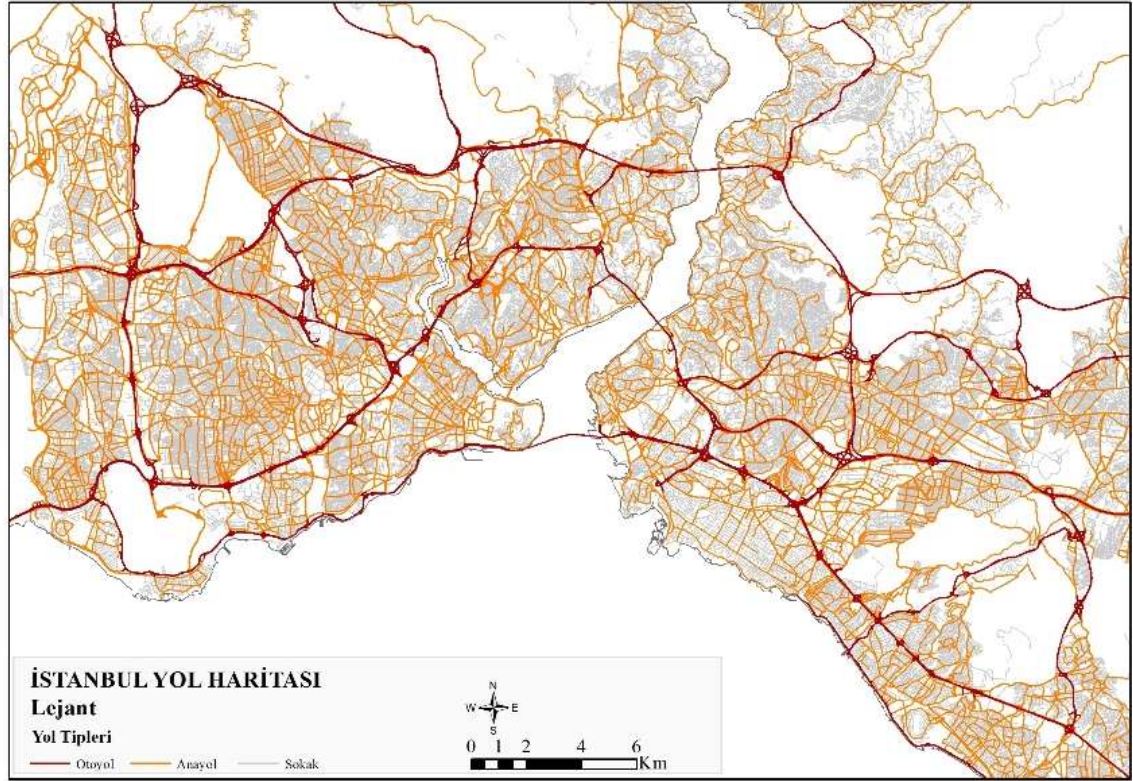
Doku Sınıfı - 61



Şekil 3.10. Kent Doku Sınıfları

3.3.5. Ağırlıklandırılmış doku sınıfı-yol verisinin oluşturulması

Hava kirlilik verileri ile kentsel doku arasındaki ilişki, yol verisinin de dikkate alınmasıyla daha kapsamlı olarak araştırılmıştır. Bu kısımda, gridler içinde bulunan yol tipleri dikkate alınarak hem yalnızca yol verisi hem de doku sınıfı ile ağırlıklandırma yapılmıştır. Şekil 3.11’de Open Street Map (OSM) aracılığıyla elde edilen yol verisi otoyol, anayol ve sokak olarak üç sınıfta görselleştirilmiştir.



Şekil 3.11. İstanbul yol haritası

Sonraki aşamada yollar, Buna göre, aşağıdaki haritada kırmızı ile gösterilen gridler, çoğunlukla otoyolların yer aldığı ve yol yoğunluğunun yüksek olduğu alanları ifade etmektedir. Turuncu ile gösterilen gridler, genellikle anayolları içeren ve orta derecede yol yoğunluğuna sahip bölgeleri temsil ederken; sarı ile gösterilen gridler, yol yoğunluğunun düşük olduğu alanları göstermektedir.

Çizelge 3.4’de yol sınıfları ve yaklaşık şerit genişlikleri göz önünde bulundurularak derecelendirilmiştir. Ardından, gridler formül (3.7)’de belirtilen şekilde, içinde bulundurduğu yol sınıfının derecesi ve grid içindeki uzunluklarının çarpılmasıyla ağırlıklandırılmış ve Şekil 3.12’de verilen yol haritası oluşturulmuştur.

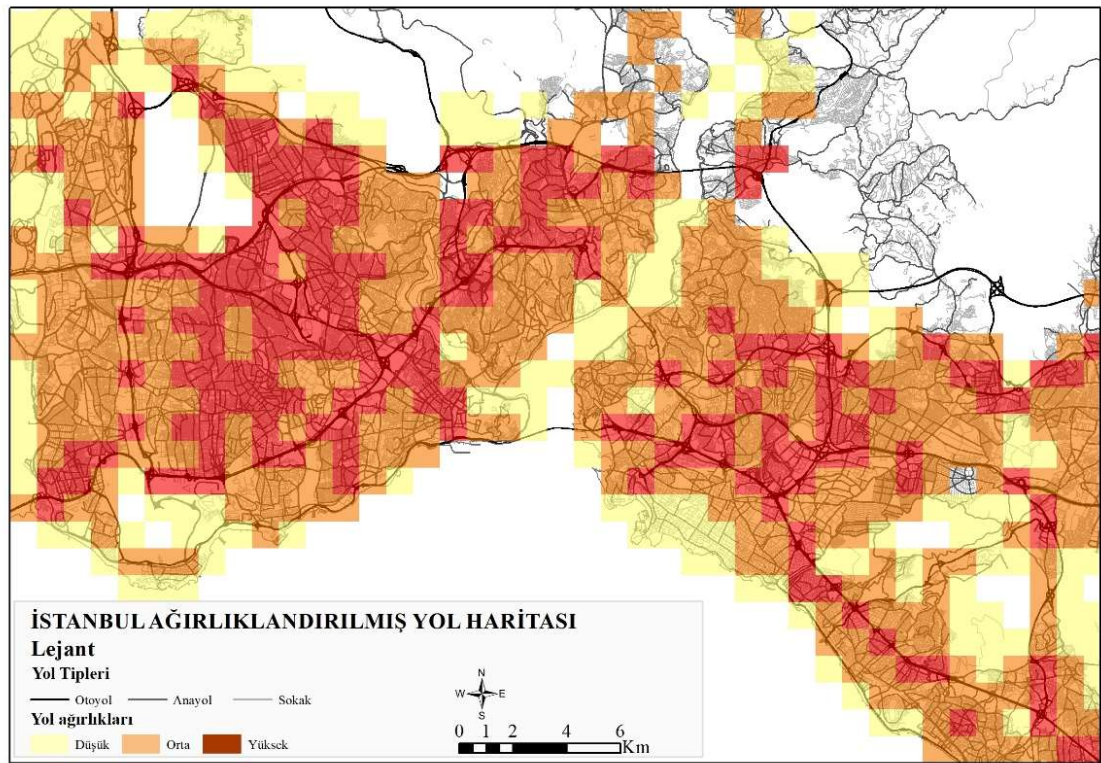
$$\text{Ağırlıklandırılmış yol} = \text{Yol uzunluğu} \times \text{Yolun derecesi} \quad (3.7)$$

Buna göre, aşağıdaki haritada kırmızı ile gösterilen gridler, çoğunlukla otoyolların yer aldığı ve yol yoğunluğunun yüksek olduğu alanları ifade etmektedir. Turuncu ile

gösterilen gridler, genellikle anayolları içeren ve orta derecede yol yoğunluğuna sahip bölgeleri temsil ederken; sarı ile gösterilen gridler, yol yoğunluğunun düşük olduğu alanları göstermektedir.

Çizelge 3.4. Yolların ağırlık dereceleri

Yol Sınıfı	Derece	Şerit Genişliği (~)
Sokaklar	0.1	7 m
Anayollar	0.3	10 m
Otoyollar	0.5	20 m



Şekil 3.12. İstanbul ağırlıklandırılmış yol haritası

Bu tez çalışmasında, kentsel doku sınıflandırmasının, ağırlıklandırılmış yol verisiyle incelenmesi amacıyla, formül 3.8’de verildiği üzere gridler içinde yer alan kentsel doku sınıflarına göre derecelendirilmiş ve bu dereceler gridlerin yol ağırlıklarıyla çarpıtılarak grid bazında ağırlıklandırılmış kentsel doku sınıfı-yol verisi oluşturulmuştur.

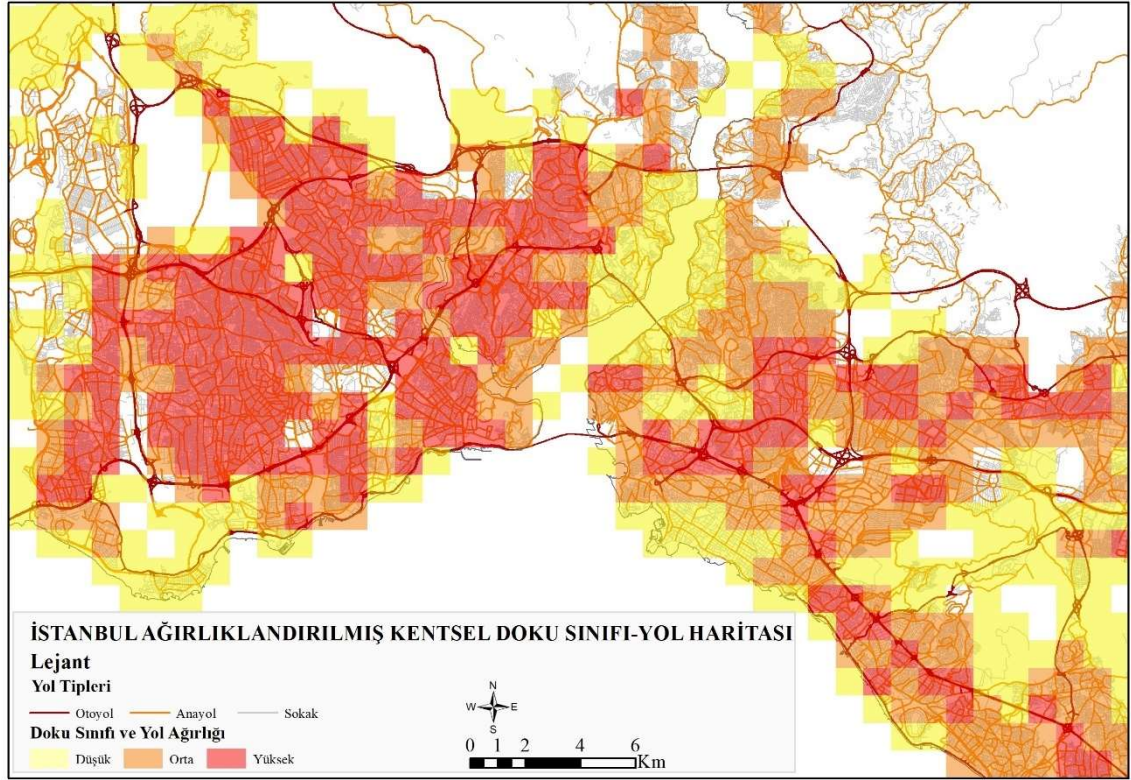
$$\text{Ağırlıklandırılmış kentsel doku sınıfı-yol} = \frac{\text{Derecelendirilmiş kentsel doku}}{\text{Derecelendirilmiş kentsel doku}} \times \frac{\text{Ağırlıklandırılmış yol}}{\text{Ağırlıklandırılmış yol}} \quad (3.8)$$

Ağırlıklandırmalar yapılırken, grid bazlı doku sınıflarının (Çizelge 3.3) çalışma alanındaki yüzdesi göz önünde bulundurularak, analizde kullanılacak doku sınıflarına

yönelik bir derecelendirme yapılmıştır. Bu kentsel doku sınıfları, ayırık düşük katlı (10), ayırık orta katlı (30) ve kompakt düşük/orta katlı (50) olarak belirlenmiştir. Diğer doku sınıfları, çalışma alanı içinde yeterli sayıda veri bulunmaması nedeniyle analizlerde kullanılmamıştır. Doku sınıfları ise yoğunlukları göz önünde bulundurularak Çizelge 3.5’de ki gibi derecelendirilmiş ve Şekil 3.13’te ağırlıklandırılmış kentsel doku sınıfı-yol verisi haritası oluşturulmuştur.

Çizelge 3.5. Kentsel doku sınıflarının derecelendirilmesi

Doku Sınıfları	Derece
Ayrık düşük katlı	1
Ayrık orta katlı	2
Kompakt düşük/orta katlı	3



Şekil 3.13. İstanbul ağırlıklandırılmış kentsel doku sınıfı-yol haritası

3.4. XGBoost Regresyon Modeli

Makine öğrenim yöntemlerinden biri olan XGBoost, yüksek doğruluk ve verimliliği nedeniyle, karmaşık ilişkilerin modellenmesinde yaygın olarak kullanılan bir topluluk öğrenmesi modelidir (Pande vd. 2024; Tan vd. 2021). Yapılan araştırmalar, bu yöntemin, çok sayıda kentsel faktörün yüzey sıcaklığı üzerindeki etkilerinin

modellenmesinde de başarılı olduğunu kanıtlamaktadır (Duan vd. 2023; Mathew vd. 2024; Suthar vd. 2024a). Bu model, karar ağaçları gibi tahmin modellerini yinelemeli olarak birleştirerek daha kararlı bir model oluşturur. Her yeni oluşturulan model, önceki modellerin hatalarını minimize etmeye odaklanarak, süreç sonucunda yüksek doğruluğa sahip nihai model elde edilir (Lin vd. 2024).

Çalışmada XGBoost yöntemi, hava kirliliği ve mekânsal faktörler ile yüzey sıcaklığı arasındaki karmaşık ilişkilerin modellenmesinde kullanılmıştır. Modelde bağımlı değişken olarak yüzey sıcaklığı, bağımsız değişken olarak ise mevsimsel etki, hava kirlilik verileri ve mekânsal faktörler kullanılmıştır. Veri seti, scikit-learn python kütüphanesi kullanılarak %70'i eğitim için %30'u ise modelin doğruluğunun testi için bölünmüştür. XGBoost modelinin parametreleri, aşırı uyumu önlemek ve modelin karmaşıklığını minimize etmek için optimize edilmiştir. Bunun için grid arama tabanlı hyperparametre optimizasyon yöntemi (GridSearchCV) kullanılmıştır. Modelin performansı, belirleme katsayısı (R^2), kök ortalama karesel hata (RMSE) ve ortalama mutlak hata (MAE) gibi metrikler kullanılarak değerlendirilmiştir.

3.5. SHAP Yöntemi

Makine öğrenim modellerinin yorumlanabilirlikleri, kara kutu (black box) doğası nedeniyle sınırlıdır; bu da modelde kullanılan faktörlerin sonuç üzerindeki katkısını tam olarak açıklamayı zorlaştırır. Bu modeller, girdiler ile çıktılar arasındaki ilişkileri karmaşık iç yapıları üzerinden hesaplar, ancak bu süreçte hangi değişkenlerin sonuca ne derecede etki ettiği açık bir şekilde anlaşılamaz. Bu çalışmada, her bir değişkenin modeldeki göreceli etkisini anlamak ve makine öğrenim tahminlerini yorumlamak için (Lundberg ve Lee 2017), yeni bir yaklaşım önerdiği Shapley Additive Explanations (SHAP) yöntemi kullanılmıştır. SHAP değeri, her bir faktörün model tahminine yönelik bireysel katkısını belirlemek için makine öğrenimi alanında kullanılan bir tekniktir. Bu teknik (Lundberg vd. 2018) tarafından belirtilen formülün kullanılması ile hesaplanmıştır (3.7).

$$\phi_j = \sum_{s \subseteq \{x_1, x_2, \dots, x_p\} \setminus \{x_j\}} \frac{|s|!(p-|s|-1)!}{p!} [f_X(s \cup \{x_j\}) - f_X(s)] \quad (3.7)$$

Burada ϕ_j , j. özelliğin katsayısını, x, örneğe ait özellik değeri vektörünü, p, özellik sayısını, $f_X(S)$, S alt kümesindeki özellik değerlerinin tahminini temsil eder. Çalışmada SHAP yöntemi ve TreeExplainer modeli kullanılarak LST üzerinde göreceli olarak daha fazla etkisi bulunan faktörlerin anlaşılmasını sağlamıştır.

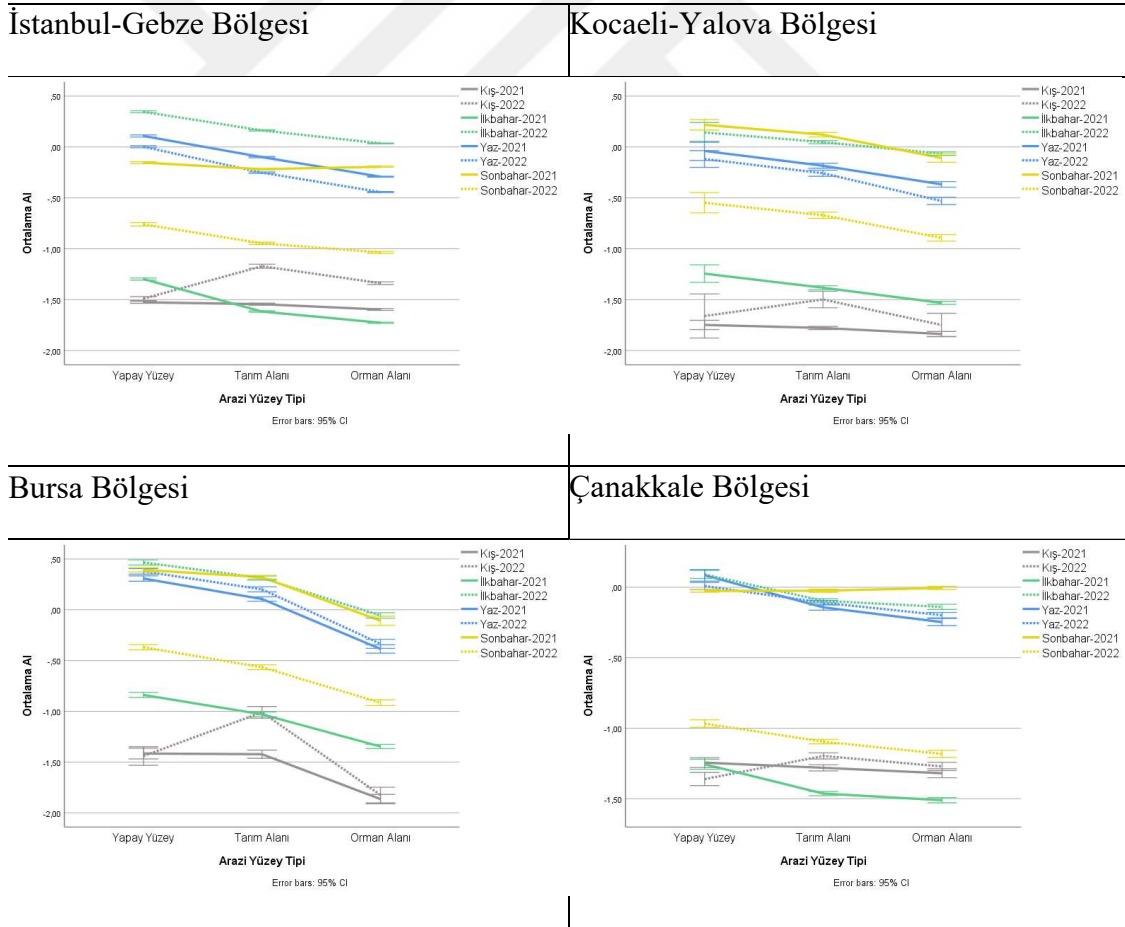
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Arazi Kullanımı ile Hava Kirlilik Verilerinin Bölgesel Bazlı İncelenmesi

Çalışmada, aerosol indeks, NO₂, SO₂ hava kirlilik verilerinin CORINE- seviye 1 arazi kullanım sınıflarına (yapay yüzey, tarım alanı, orman alanı) arasında anlamlı bir farklılık gösterip göstermediği post-hoc testi ile incelenmiştir. Bu aşamada, her bir hava kirlilik verisi ayrı ayrı incelenmiş ve arazi kullanım verisi ile yapılacak post-hoc testine uygunluğunun belirlenmesi için varyans homojenlik testi yapılmıştır. 5 km ve 1 km'lik iki farklı ölçekte gerçekleştirilen varyans homojenlik testlerinin sonuçlarına göre, çoğu veri için varyans homojenliği sağlanamadığı (sig. <0.05) tespit edilmiş (Ek-7) ve bu nedenle analizlerde Tamhane's T2 testi tercih edilmiştir.

4.1.1. Aerosol indeks - arazi sınıfları incelemesi

Çalışmada, hava kirlilik verilerinin tarihleri dikkate alınarak yıl ve mevsimsel olarak gruplandırılmıştır. Bölgesel bazda, aerosol indeks verisinin yapay yüzeyler, tarım alanları ve orman alanlarındaki ortalama değerleri Şekil 4.1'de görselleştirilmiştir. 5 km'lik ve 1 km'lik gridlerde ayrı ayrı yapılan post-hoc test sonuçları ise Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Aerosol indeks verisinin arazi kullanım sınıflarındaki dağılımı

Şekil 4.1 incelendiğinde, tüm bölgelerde mevsimlerin arazi sınıflarına göre farklılık gösterdiği görülmektedir. Yaz mevsiminin her iki dönemi de dikkate alındığında, özellikle kış mevsimiyle kıyaslandığında, her bölgede daha yüksek aerosol konsantrasyonları görülmektedir. Arazi kullanım sınıflarının karşılaştırılmasında, en yüksek ortalama aerosol indeks değerleri yapay yüzeylerde tespit edilmiş, bunu sırasıyla tarım alanları ve en düşük değerlere sahip olan orman alanları izlemiştir. Yalnızca kış-2022 dönemi incelendiğinde, tarım alanlarının yapay yüzeylere kıyasla daha yüksek aerosol indeks değerleri gösterdiği görülmüştür. Bu durumun, ilgili dönemdeki hava koşullarından kaynaklanabileceği; nitekim 19 Ocak 2022 tarihi ile öncesi ve sonrası birer gün ele alındığında, Marmara Bölgesi genelinde karla karışık yağmur etkisinin olduğu tespit edilmiştir.

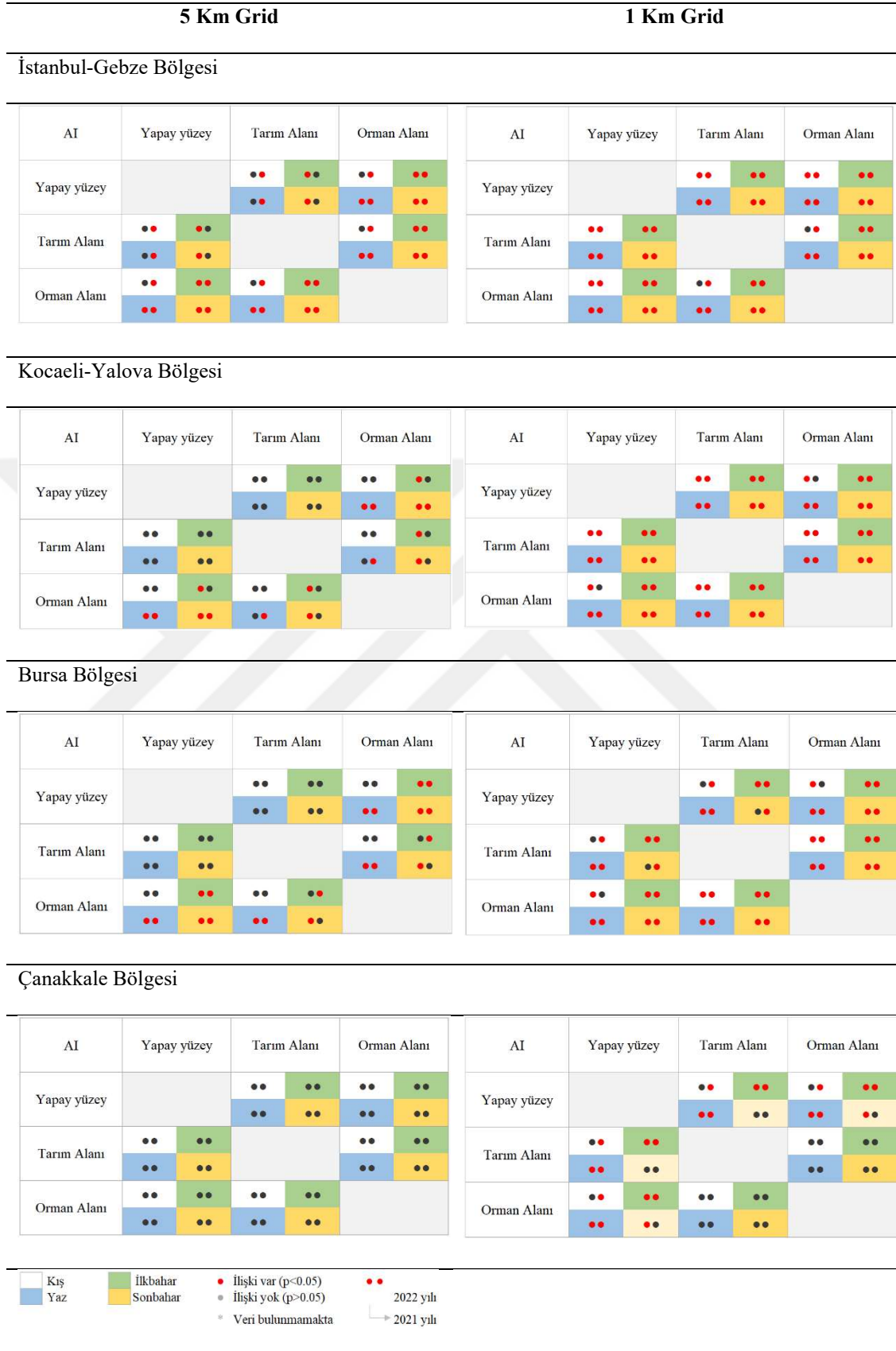
Bölgeler arası karşılaştırma yapıldığında, Çanakkale bölgesinin diğer bölgelere kıyasla daha düşük aerosol indeks değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Özellikle İstanbul-Gebze, Bursa ve Kocaeli-Yalova bölgelerinde yapay yüzeyler daha yüksek aerosol indeks değerlerine sahiptir.

Şekil 4.2’de verilen tabloda renkler, mevsimleri temsil etmektedir. Buna göre, beyaz rengi kışı, yeşil rengi ilkbaharı, mavi renk yazı ve sarı renk ise sonbaharı göstermektedir. Mevsimlerin üstündeki nokta sembolü ise yılları ifade etmektedir. Sol taraftaki nokta 2021 yılına, sağ taraftaki nokta ise 2022 yılına aittir. Noktanın kırmızı renkte olması, verinin post-hoc test sonuçlarına göre arazi kullanım sınıfları arasında anlamlı bir fark olduğunu, gri olması ise anlamlı bir fark olmadığını göstermektedir. Ayrıca Çizelge 4.1’de, 1 km’lik gridlerde farklı arazi kullanım sınıfları için aerosol indeksin istatistiksel olarak anlamlı ayrışma yüzdeleri verilmiştir. Şekil 4.2 incelendiğinde, İstanbul-Gebze bölgesi 5 km’lik gridde, aerosol indeks verisinin %50’si yapay yüzey ile tarım alanı yüzeylerine göre anlamlı ayrılmış, 1 km’lik gridde ise verinin tamamı anlamlı ayrılmıştır. Mevsimsel ve yıllık bazda incelendiğinde, 1 km’lik gridde aerosol indeks verisinin tüm arazi kullanım sınıflarında çoğunlukla anlamlı bir şekilde ayrıldığı görülmüştür.

Kocaeli-Yalova bölgesinde, 5 km’lik gridde yapılan incelemelerde tüm verinin %33’ü anlamlı bir şekilde ayrılmış, 1 km’lik gridde ise bu oran %96’ya yükselmiştir. Mevsimsel ayrılmalar, 5 km’lik gridde genel olarak %50 ve altı seviyelerde iken, 1 km’lik gridde bu oran %83 ve üzerinde gerçekleşmiştir.

Bursa’da, 5 km’lik gridde verilerin %42’si arazi kullanım sınıflarına göre anlamlı bir şekilde ayrılırken, 1 km’lik gridde bu oran %88’e yükselmiştir. Özellikle 5 km’lik grid ağında, veri yapay yüzey ve tarımsal alanlara göre anlamlı bir ayrılma göstermemişken, 1 km’lik grid ağında ilkbahar ve yaz mevsimlerinde verinin tamamı anlamlı bir şekilde ayrılmıştır.

Çanakkale bölgesinde, 5 km’lik grid ağında aerosol indeks hava kirlilik verisi arazi kullanım sınıflarına göre hiç ayrılmamışken, 1 km’lik gridde verinin %46’sı anlamlı bir şekilde ayrılmıştır. 1 km’lik gridde, yapay yüzeylerin diğer arazi kullanımlarına göre ayrılması incelendiğinde, aerosol indeks verisinin ilkbahar ve yaz aylarında tamamen anlamlı bir şekilde ayrıldığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.2. Aerosol indeks post-hoc testi

Çizelge 4.1. Aerosol indeksin bölgelerde ayrılma yüzdeleri

	Yapay Yüzey		Tarım Alanı		Orman Alanı	
İstanbul-Gebze	100%	100%	100%	%87.5	100%	%87.5
Kocaeli-Yalova	100%	%87.5	100%	100%	%87.5	100%
Bursa	75%	%87.5	75%	100%	%87.5	100%
Çanakkale	%62.5	75%	%62.5	0%	75%	0%

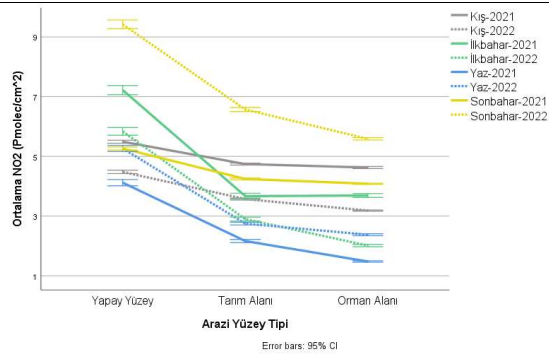
Aerosol indeks için elde edilen bulgular “*H₁: Arazi kullanımları, hava kirleticiler üzerinde etkilidir.*” hipotezini doğrulamaktadır.

4.1.2. NO₂ - arazi sınıfları incelemesi

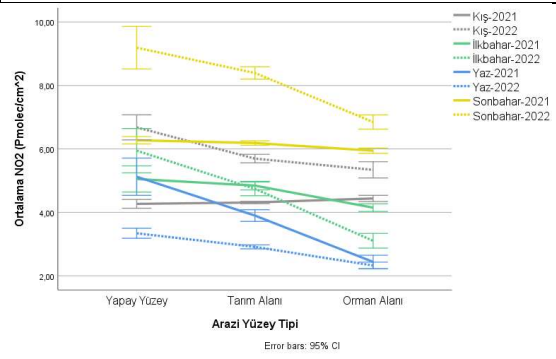
Azot dioksit hava kirlilik verisinin, bölgesel bazlı arazi kullanım türlerindeki ortalama değerleri Şekil 4.3’te gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde, bölgelerin çoğunda hem mevsimsel değişimlerin hem de arazi kullanım türlerine bağlı olarak azot dioksit seviyelerinde belirgin farklılıklar olduğu tespit edilmiştir. Mevsimler karşılaştırıldığında, sonbahar-2022’nin diğer mevsimlere kıyasla daha yüksek ortalama NO₂ konsantrasyonuna sahip olduğu görülmüştür. Arazi kullanım sınıfları kıyaslandığında, Çanakkale hariç diğer üç bölgede yapay yüzeylerde NO₂ değerlerinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 4.4 ve Çizelge 4.2’de NO₂ için yapılan analiz sonuçları incelendiğinde, grid boyutuna göre yapılan karşılaştırmada, tüm bölgelerde 1 km’lik grid ağında anlamlı ayrılan veri sayısının, 5 km’lik grid boyutu kıyasla arttığı görülmüştür. Özellikle 1 km’lik grid boyutunda, İstanbul-Gebze ve Bursa bölgelerindeki sonuçlar incelendiğinde, NO₂ değerlerinin yapay yüzeylerde, tarım alanlarına ve orman alanlarına kıyasla tamamen anlamlı olarak ayrılmaktadır. Kocaeli-Yalova bölgesi incelendiğinde, yapay yüzeylerin iki yılda da yalnızca kış ve ilkbahar mevsimlerinde tarım alanlarından ayrıldığı görülmüştür. Orman alanlarıyla karşılaştırıldığında ise yapay yüzeylerin, kış mevsimi hariç diğer tüm mevsimlerde her iki yılda da ayrıldığı belirlenmiştir. Çanakkale bölgesinde, 5 km’lik gridde anlamlı bir ayrılma tespit edilmezken, 1 km’lik gridde NO₂’nin yapay yüzeylerde, orman alanlarından kış ve yaz mevsimlerinde anlamlı olarak ayrıldığı görülmüştür.

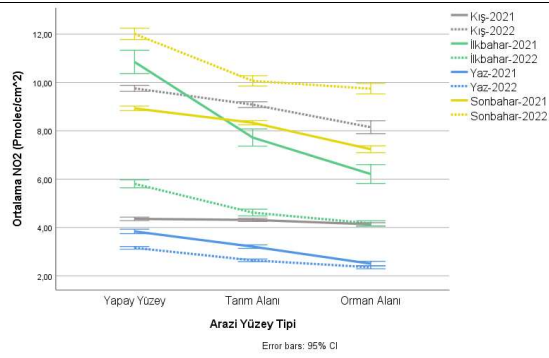
İstanbul-Gebze Bölgesi



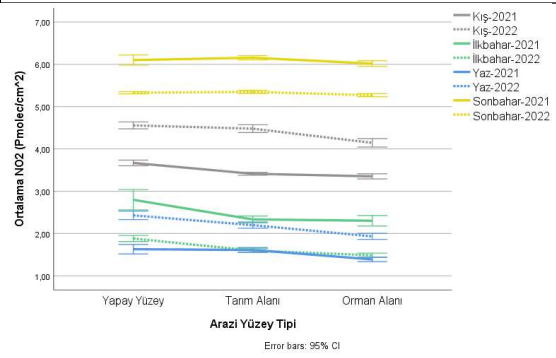
Kocaeli-Yalova Bölgesi



Bursa Bölgesi



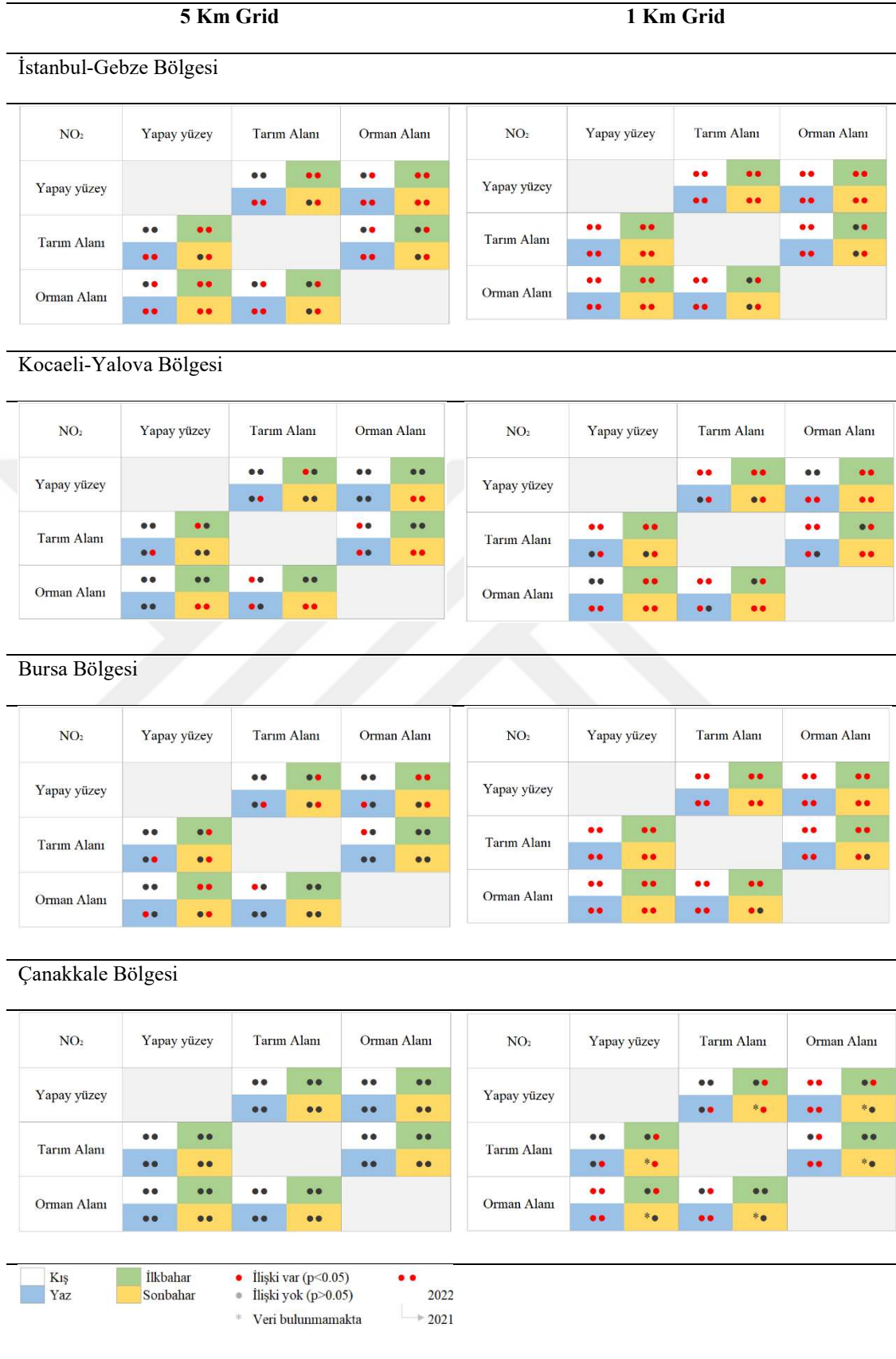
Çanakkale Bölgesi

Şekil 4.3. NO₂ verisinin arazi kullanım sınıflarındaki dağılımı

NO₂ için elde edilen bulgular “*H₁: Arazi kullanımları, hava kirleticiler üzerinde etkilidir.*” hipotezini doğrulamaktadır.

Çizelge 4.2. NO₂'nin bölgelerde ayrılma yüzdeleri

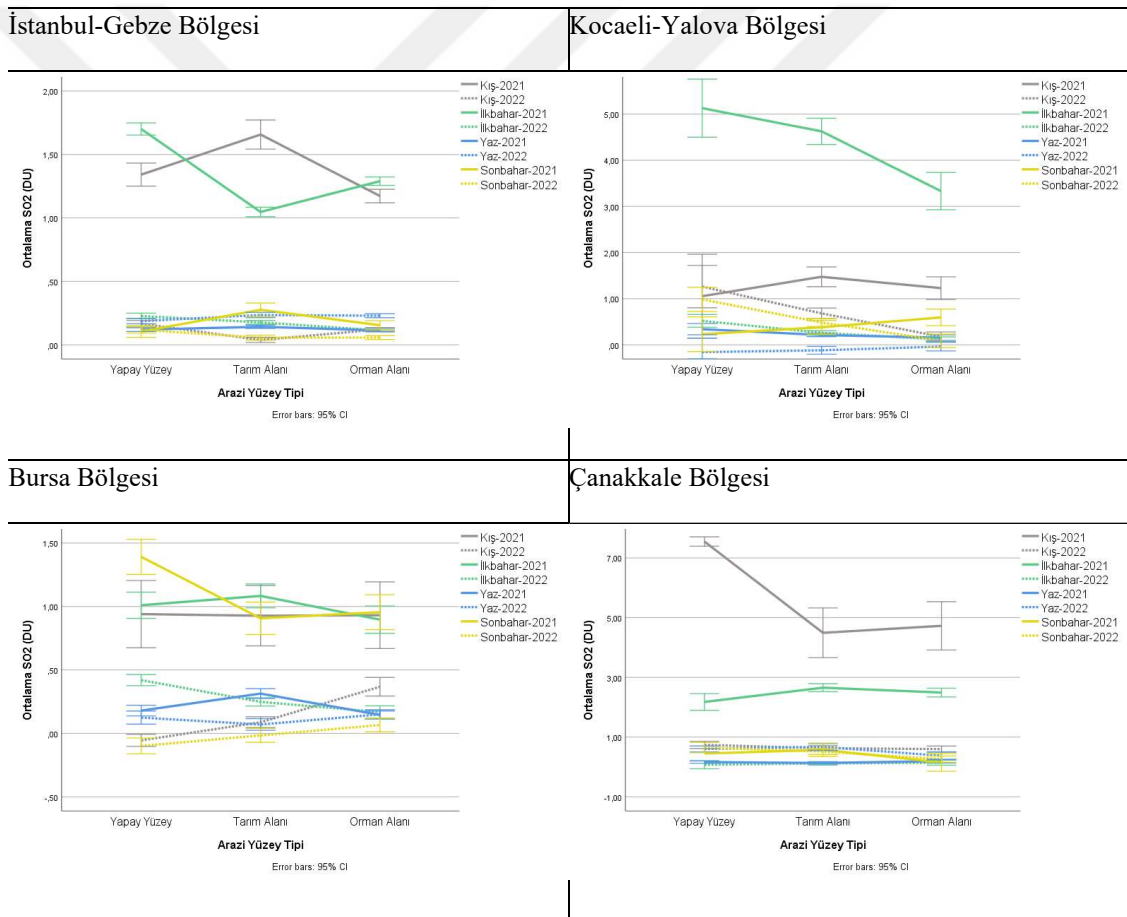
	Yapay Yüzey		Tarım Alanı		Orman Alanı	
İstanbul-Gebze	100%	100%	100%	75%	100%	75%
Kocaeli-Yalova	75%	75%	75%	75%	75%	75%
Bursa	100%	100%	100%	%87.5	100%	%87.5
Çanakkale	%42.86	71.43%	%42.86	%42.86	71.43%	%42.86

Şekil 4.4. NO₂ post-hoc testi

4.1.3. SO₂ - arazi sınıfları incelemesi

SO₂ verisinin Şekil 4.5'te arazi kullanım türlerinde dağılımı incelendiğinde, tüm bölgelerde dağılımın farklılık gösterdiği ve arazi kullanım türleri arasında önemli fark bulunmadığı görülmüştür. İstanbul-Gebze bölgesinde, en yüksek SO₂ değerlerinin kış-2021 ve ilkbahar-2021 dönemlerinde görülmekle birlikte kış-2021 döneminde SO₂ değerlerinin tarımsal alanlarda yapay yüzeylere kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Bursa bölgesi incelendiğinde, kış-2021, sonbahar-2021 ve ilkbahar-2021 dönemlerinde daha yüksek SO₂ değerleri görüldüğü, ayrıca arazi kullanım türlerinin yıllara göre birbirlerinden farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Çanakkale bölgesinde ise kış-2021 ve ilkbahar-2021 dönemleri hariç diğer dönemlerin birbirine çok yakın SO₂ değerleri sergilediği ve arazi kullanım türleri arasındaki değerlerin de birbirine oldukça yakın olduğu belirlenmiştir.



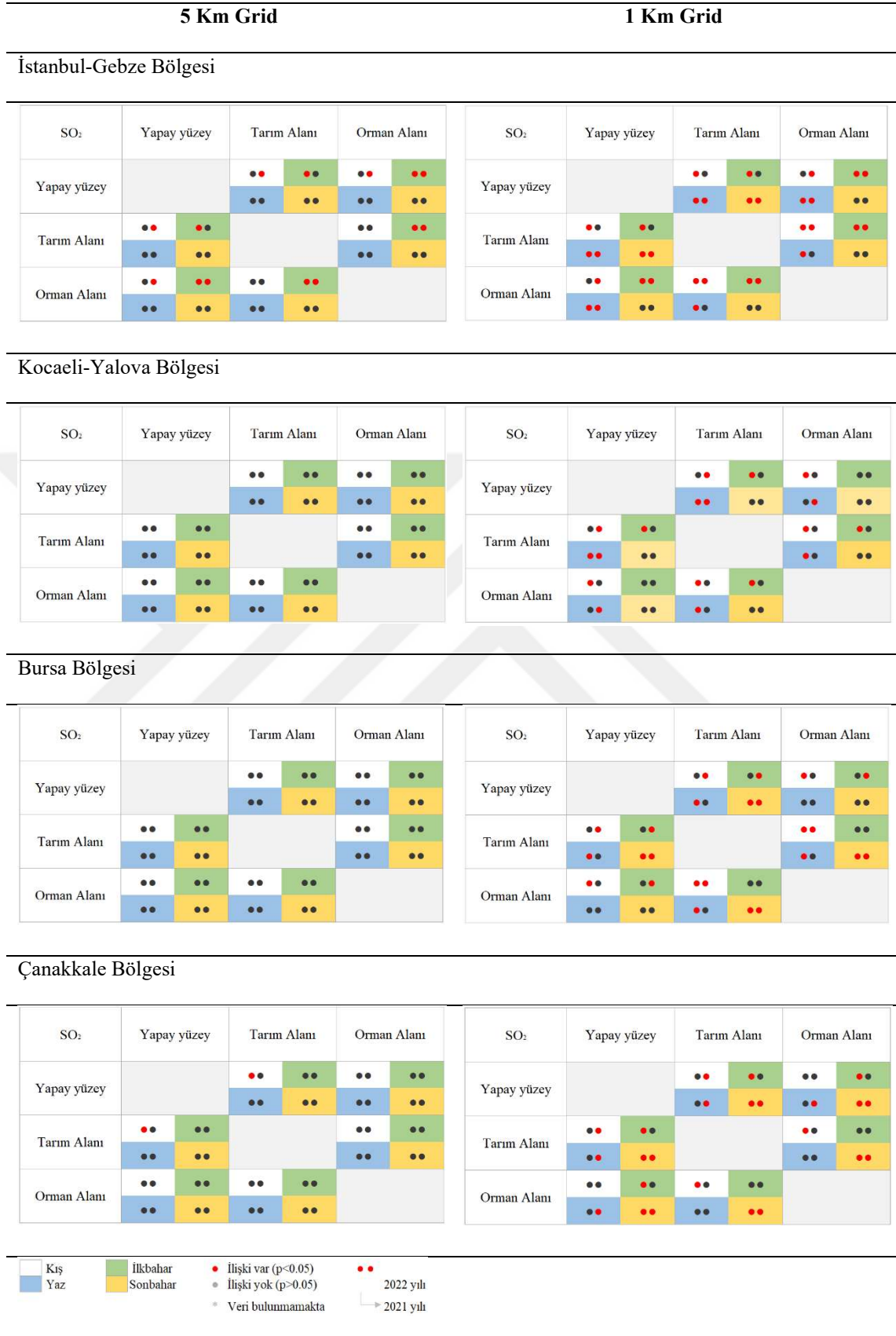
Şekil 4.5. SO₂ verisinin arazi kullanım sınıflarındaki dağılımı

Şekil 4.6'da SO₂ verisi 1 km'lik grid ağında incelendiğinde, 5 km'lik grid ağına göre verilerde ayrılma oranının arttığı fakat diğer hava kirlilik verileri ile karşılaştırıldığında bu oranın daha düşük olduğu görülmüştür. İstanbul-Gebze ve Kocaeli-

Yalova bölgeleri, 1 km'lik grid ağı üzerinden incelendiğinde, yaz mevsiminde her iki yılda da yapay yüzeylerin tarım alanlarından ayrıldığı tespit edilmiştir. Ayrıca, İstanbul-Gebze bölgesinde yapay yüzeylerin sonbahar mevsiminde de tarım alanlarından ayrıldığı ortaya konulmaktadır. Yapay yüzeyler ile orman alanları karşılaştırıldığında ise, İstanbul-Gebze bölgesinde ilkbahar ve yaz mevsimlerinde verilerin farklılık gösterdiği belirlenmiştir. Çanakkale bölgesi incelendiğinde ise sadece sonbahar mevsiminde tüm arazi kullanım türlerinin birbirinden anlamlı bir şekilde ayrıldığı bulgusuna ulaşılmıştır.

Bursa bölgesi incelendiğinde, 5 km'lik gridde anlamlı bir ayrılma görülmemektedir. Ancak 1 km'lik gridde verinin %50'sinin anlamlı bir şekilde ayrıldığı tespit edilmiştir. Çanakkale bölgesi incelendiğinde grid karşılaştırması açısından Bursa ile benzerlik göstermektedir. 1 km'lik gridde arazi kullanım türlerinin mevsimsel olarak farklılaşması incelendiğinde, özellikle sonbahar mevsiminde her iki yılda da tüm arazi kullanım türlerinin birbirinden anlamlı bir şekilde ayrıldığı tespit edilmiştir. Ayrıca Çizelge 4.3'de, 1 km'lik gridlerde farklı arazi kullanım sınıfları için SO₂'nin istatistiksel olarak anlamlı ayrışma yüzdeleri verilmiştir.

SO₂ için elde edilen bulgular "*H₁: Arazi kullanımları, hava kirleticiler üzerinde etkilidir.*" hipotezini doğrulamaktadır.

Şekil 4.6. SO₂ post-hoc testi

Çizelge 4.3. SO₂'nin bölgelerde ayrılma yüzdeleri

	Yapay Yüzey		Tarım Alanı		Orman Alanı	
İstanbul-Gebze	75%	%62.5	75%	%62.5	%62.5	%62.5
Kocaeli-Yalova	50%	25%	50%	37.5%	25%	%37.5
Bursa	%62.5	25%	62.5%	%62.5	25%	%62.5
Çanakkale	%62.5	50%	62.5%	%37.5	50%	%37.5

4.2. İstanbul-Gebze Bölgesi Özelinde Yapay Yüzey Alt Sınıflarının İncelenmesi

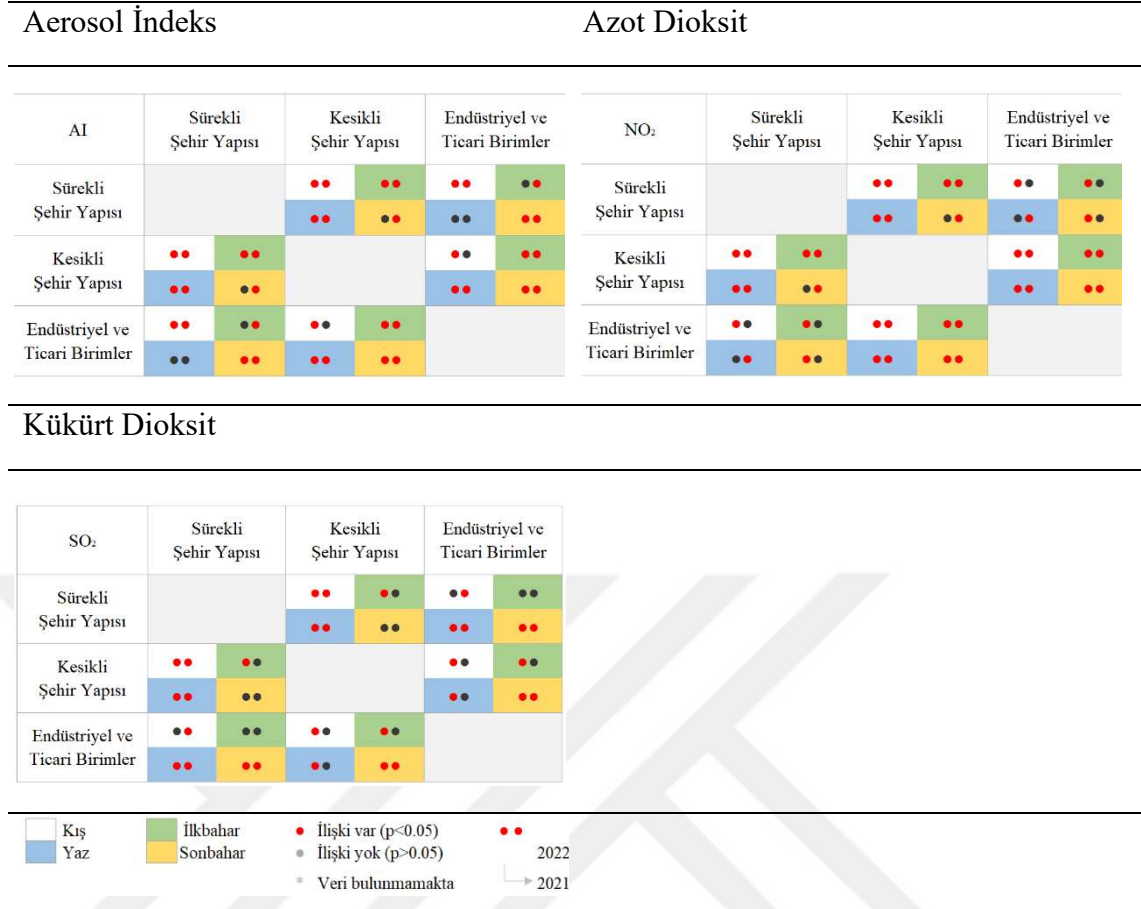
Çalışmanın bu aşamasında kentsel yapılaşmanın, trafiğin ve sanayinin yoğun olduğu İstanbul-Gebze bölgesinde, hava kirlilik verilerinin CORINE seviye 3 sınıflamasında yer alan yapay yüzey sınıfları arasında anlamlı farklılık gösterip göstermediği post-hoc testi yapılarak incelenmiştir. Böylece hava kirlilik verileri bir alt arazi sınıfında daha detaylı araştırılmıştır.

Analizlerin gerçekleştirilmesinde, bir önceki aşamada iki farklı ölçekteki bölgeler için elde edilen post-hoc test sonuçları temel alınmıştır. Hava kirliliği verilerinin arazi kullanım sınıflarında 1 km’lik grid boyutunda anlamlı ayrılma oranlarının daha yüksek olduğu belirlendiğinden, çalışmanın bu ve sonraki aşamalarında 1 km’lik grid boyutu temel ölçek olarak kullanılmıştır.

Şekil 4.7 incelendiğinde, post-hoc test sonuçlarına göre, aerosol indeks ve NO₂ verilerinin, sürekli şehir yapısı ve kesikli şehir yapısına sahip alanlarda, sonbahar-2021 dönemi hariç tüm mevsimlerde her iki yılda anlamlı farklılığa sahip olduğu tespit edilmiştir. Sürekli şehir yapısı ile endüstriyel ve ticari birimler incelendiğinde, aerosol indeks verisinin özellikle kış ve sonbahar dönemlerinde, her iki yılda da kentsel arazi kullanımları arasında anlamlı farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. NO₂ verisi, sürekli şehir yapısı ile endüstriyel ve ticari birimlerde incelendiğinde, verinin %50’sinin kentsel arazi kullanımları arasında anlamlı olarak ayrıldığı ortaya konulmaktadır.

Kesikli şehir yapısı ile endüstriyel ve ticari birimler ele alındığında, NO₂ verisinin tüm dönemlerde, aerosol indeks verisinde ise kış-2022 dönemi hariç diğer tüm dönemlerde bu iki kentsel arazi kullanımına göre anlamlı ölçüde farklılaştığı tespit edilmiştir. SO₂ verisi sürekli şehir yapısı ile kesikli şehir yapısı incelendiğinde, sadece kış ve yaz mevsimlerinde verinin tamamının anlamlı olarak ayrıldığı görülmektedir. Endüstriyel ve ticari alanlar incelendiğinde, sürekli şehir yapısı ile kesikli şehir yapısında, her iki kentsel arazi kullanımı için de yalnızca sonbahar mevsiminde ve her iki yılda SO₂ verisinin anlamlı bir farklılık gösterdiği tespit edilmiştir.

Elde edilen bulgular “*H₁: Arazi kullanımları, hava kirleticiler üzerinde etkilidir.*” hipotezini kentsel alanlarda doğrulamaktadır.



Şekil 4.7. İstanbul-Gebze bölgesi yapay yüzey alt sınıflarının post-hoc testi

4.3. Kentsel doku sınıfı ve yol verilerinin hava kirliliği ile ilişkilerinin incelenmesi

Hava kirliliği verileri ile kentsel doku sınıfları arasındaki ilişkinin araştırılmasında yol verisi de değerlendirmeye dahil edilmiştir. Böylece, analizler yalnızca kentsel doku veri setiyle sınırlı kalmamış; aynı zamanda ağırlıklandırılmış yol verisi ve yol ile dokunun birlikte ele alındığı ağırlıklandırılmış doku-yol verisi üzerinden de gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, üç farklı veri seti üzerinden yapılan analizler, her bir veri seti için spearman korelasyon testi uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Böylece, kentsel doku sınıfları ve yol verisi arasındaki bağlantının hava kirliliği üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Çizelge 4.4’de yer alan korelasyon analiz sonuçları incelendiğinde, ağırlıklandırılmış doku-yol verisinin her dönemde aerosol indeks ile en yüksek korelasyona sahip olduğu görülmektedir. Bu korelasyonun, özellikle ilkbahar ve yaz mevsimlerinde, kış ve sonbahar mevsimlerine kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür. Çizelge 4.5’de yer alan NO₂ için olan korelasyon analiz sonuçları incelendiğinde, üç veri seti de birbirine yakın anlamlı korelasyona sahiptir. Genel olarak değerlendirildiğinde, NO₂’nin yol ve ağırlıklandırılmış kentsel doku-yol verisine kıyasla doku sınıfı ile daha yüksek korelasyona sahip olduğu, fakat bu korelasyonun mevsimlere göre değişkenlik

gösterdiği tespit edilmiştir. Çizelge 4.6'daki SO₂ verisi incelendiğinde, genel olarak ya zayıf bir ilişki bulunduğu ya da anlamlı ilişkinin olmadığı görülmektedir.

Hava kirlilik verileri ile doku sınıfı, yol tipleri ve ağırlıklandırılmış kentsel doku sınıfı-yol verisi arasındaki ilişkilerin incelenmesi sonucunda, doku sınıfı ve yol tiplerinin birlikte değerlendirildiği ağırlıklandırılmış kentsel doku sınıfı-yol verisinin analizlerde kullanılmasına karar verilmiştir.

Çizelge 4.4. Aerosol indeks korelasyon analiz sonuçları ve elde edilen korelasyon katsayılarına ilişkin güven testleri

Hava Kirlilik Verisi	Mevsim-Yıl	Doku Ağırlık			Yol Ağırlık			Doku ve Yol Ağırlık		
		Korelasyon	Sig. (2-uçlu)	N	Korelasyon	Sig. (2-uçlu)	N	Korelasyon	Sig. (2-uçlu)	N
Aerosol İndeks	Kış-2021	0.051	0.138	851	0.043	0.185	958	0.106**	0.002	821
	İlkbahar-2021	0.420**	0.000	851	0.419**	0.000	958	0.496**	0.000	821
	Yaz-2021	0.388**	0.000	851	0.384**	0.000	958	0.479**	0.000	821
	Sonbahar-2021	0.197**	0.000	851	0.105**	0.001	958	0.202**	0.000	821
	Kış-2022	-0.008	0.826	851	0.023	0.483	958	0.021	0.551	821
	İlkbahar-2022	0.310**	0.000	851	0.278**	0.000	958	0.386**	0.000	821
	Yaz-2022	0.353**	0.000	851	0.330**	0.000	958	0.422**	0.000	821
	Sonbahar-2022	0.064	0.062	851	0.108**	0.001	958	0.123**	0.000	821

Tabloda görülen ** işareti anlamlı korelasyon katsayılarını göstermektedir.

Çizelge 4.5. NO₂ korelasyon analiz sonuçları ve elde edilen korelasyon katsayılarına ilişkin güven testleri

Hava Kirlilik Verisi	Mevsim-Yıl	Doku Ağırlık			Yol Ağırlık			Doku ve Yol Ağırlık		
		Korelasyon	Sig. (2-uçlu)	N	Korelasyon	Sig. (2-uçlu)	N	Korelasyon	Sig. (2-uçlu)	N
NO ₂	Kış-2021	0.107**	0.003	748	0.094**	0.006	852	0.142**	0.000	719
	İlkbahar-2021	0.254**	0.000	851	0.264**	0.000	958	0.285**	0.000	821
	Yaz-2021	0.256**	0.000	851	0.162**	0.000	958	0.242**	0.000	821
	Sonbahar-2021	0.237**	0.000	851	0.143**	0.000	958	0.216**	0.000	821
	Kış-2022	0.291**	0.000	851	0.199**	0.000	958	0.258**	0.000	821
	İlkbahar-2022	0.352**	0.000	851	0.265**	0.000	958	0.327**	0.000	821
	Yaz-2022	0.424**	0.000	851	0.369**	0.000	958	0.420**	0.000	821
	Sonbahar-2022	0.301**	0.000	851	0.216**	0.000	958	0.280**	0.000	821

Tabloda görülen ** işareti anlamlı korelasyon katsayılarını göstermektedir.

Çizelge 4.6. SO₂ korelasyon analiz sonuçları ve elde edilen korelasyon katsayılarına ilişkin güven testleri

Hava Kirlilik Verisi	Mevsim-Yıl	Doku Ağırlık			Yol Ağırlık			Doku ve Yol Ağırlık		
		Korelasyon	Sig. (2-uçlu)	N	Korelasyon	Sig. (2-uçlu)	N	Korelasyon	Sig. (2-uçlu)	N
SO ₂	Kış-2021	-0.178**	0.000	784	-0.169**	0.000	873	-0.170**	0.000	754
	İlkbahar-2021	0.164**	0.000	851	0.183**	0.000	958	0.181**	0.000	821
	Yaz-2021	0.131**	0.000	851	0.137**	0.000	958	0.176**	0.000	821
	Sonbahar-2021	-0.012	0.760	677	-0.002	0.946	741	-0.017	0.656	653
	Kış-2022	0.045	0.194	851	-0.006	0.852	958	0.017	0.623	821
	İlkbahar-2022	0.137**	0.000	851	0.087**	0.007	958	0.117**	0.001	821
	Yaz-2022	0.030	0.388	851	-0.049	0.132	958	-0.033	0.345	821
	Sonbahar-2022	0.066	0.053	851	-0.002	0.943	958	0.034	0.325	821

Tabloda görülen ** işareti anlamlı korelasyon katsayılarını göstermektedir.

Elde edilen bulgular neticesinde, çalışmanın hipotez değerlendirmeleri aşağıda verilmektedir.

“H₂: Kentsel doku tipi, hava kirleticiler üzerinde etkilidir.”

- Aerosol indeks, ilkbahar ve yaz mevsimlerinde H₂ hipotezini doğrulamaktadır. Aerosol indeks ile ağırlıklandırılmış kent dokusu ve yolun korelasyon değerinin, sadece kent dokusu ve yola göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir.
- NO₂, H₂ hipotezini hem kent dokusu hem de ağırlıklandırılmış kent dokusu ve yol parametrelerine göre doğrulamaktadır.
- SO₂, H₂ hipotezini büyük ölçüde doğrulayamamaktadır. Genel olarak SO₂'nin üç parametre ile korelasyon katsayıları düşük veya anlamlı değildir.

4.4. Ağırlıklandırılmış kentsel doku sınıfı-yol ve hava kirlilik ilişkilerinin post-hoc testi ile incelenmesi

Çalışmanın bu aşamasında, hava kirlilik verilerinin, ağırlıklandırılmış kentsel doku-yol verisine göre post-hoc testleriyle anlamlı bir şekilde ayrılıp ayrılmadığı incelenmiştir. Bu analiz ile hava kirliliğin mekânsal dağılımında kentsel doku ve ulaşım ağlarının etkisinin anlaşılması amaçlanmaktadır. Bu aşamada, her doku sınıfı (ayrık düşük katlı, ayrık orta katlı, kompakt düşük/orta katlı) için ayrı ayrı ortalama yol yoğunluğu dikkate alınarak, ortalamadan düşük olanlar “az”, ortalamadan yüksek olanlar “yoğun” olarak altı farklı sınıf oluşturulmuştur. Post-hoc testi kapsamında bağımlı değişken olarak bu sınıflandırılmış veri kullanılmıştır.

Analiz sonuçları aşağıda Şekil 4.8’de verilmiştir. Şekilde aerosol indeks verileri incelendiğinde, ayırık düşük ve orta katlı doku sınıflarının, yol yoğunluğundan bağımsız olarak, kompakt düşük/orta katlı doku sınıfından hem ilkbahar hem de yaz mevsimlerinde her iki yılda da anlamlı düzeyde farklılaştığı görülmüştür. Yol yoğunluğunun fazla olduğu kompakt düşük/orta katlı doku sınıfı dikkate alındığında, ayırık düşük ve orta katlı doku sınıflarının 2021 yılında kış ve sonbahar mevsimlerinde de aerosol indeks değerleri açısından anlamlı düzeyde farklılaştığı görülmüştür. Genel olarak kompakt doku yapılarının, aerosol indeks değerleri açısından diğer doku tiplerine göre daha belirgin bir etkiye sahip olduğu ve bu etkinin mevsimsel olarak değiştiği ortaya konulmaktadır. Bunlara ek olarak, aerosol indeks verisinin, yoğun yol ağına sahip kompakt doku sınıfında, diğer doku tiplerinden sadece yaz ve ilkbahar mevsimlerinde değil, aynı zamanda kış ve sonbahar mevsimlerinde de daha belirgin bir farklılık gösterdiği tespit edilmiştir.

Kentsel doku sınıfları kendi içinde yol yoğunluğunun az ya da fazla olmasına göre incelendiğinde, kompakt düşük/orta katlı doku sınıfında aerosol indeks değerlerinin, yol yoğunluğuna bağlı olarak mevsimler arasında sürekli anlamlı bir farklılaşma göstermediği tespit edilmiştir. Ancak, ayırık düşük katlı doku sınıfında aerosol indeks değerlerinin, yol yoğunluğuna bağlı olarak ilkbahar ve yaz mevsimlerinde her iki yılda da anlamlı bir şekilde farklılaştığı görülmüştür. Benzer bir durum, ayırık orta katlı doku sınıfı için de geçerli olup, bu sınıfta da yol yoğunluğuna bağlı olarak, aerosol indeks verisinin, ilkbahar ve yaz mevsimlerinde anlamlı bir şekilde farklılaştığı belirlenmiştir. Bu bulgular, daha seyrek ve ayırık yapıların, yol yoğunluğuna duyarlılığının kompakt yapılara kıyasla daha yüksek olabileceğini göstermektedir.

Şekil 4.8’de NO₂ verisinin sonuçları incelendiğinde, ayırık düşük katlı ve ayırık orta katlı doku sınıflarının, yol yoğunluğundan bağımsız olarak, kompakt düşük/orta katlı doku sınıfından yaklaşık olarak tüm mevsimlerde ve yıllarda anlamlı bir şekilde ayrıldığı görülmüştür. NO₂ verisi, aerosol indeks ile kıyaslandığında, kış ve sonbahar mevsimlerinde yol yoğunluğundan bağımsız olarak doku sınıfları arasında daha belirgin şekilde anlamlı ayrışma gösterdiği tespit edilmiştir. Doku sınıfları ayrı ayrı incelendiğinde, ayırık düşük katlı yol yoğunluğu az olan sınıfın, ayırık orta katlı yol yoğunluğu fazla olan sınıftan ilkbahar mevsiminde her iki yılda da tamamen ayrıldığı, tüm verinin ise %50’sinin anlamlı olarak ayrıldığı görülmüştür. Ayırık düşük katlı yol yoğunluğu az olan sınıfın, kompakt düşük/orta katlı yol yoğunluğu az olan sınıftan 2021 yılı kış mevsimi hariç tüm durumlarda, yol yoğunluğu fazla olan sınıftan ise her iki yılda ve tüm mevsimlerde %100 ayrıldığı belirlenmiştir. Ayırık düşük katlı yol yoğunluğu fazla olan sınıf incelendiğinde, kompakt düşük/orta katlı yol yoğunluğu hem az hem de fazla olan sınıflardan %100’ünün birbirinden anlamlı ayrıldığı tespit edilmiştir. Ayırık orta katlı yol yoğunluğu az olan veri incelendiğinde, kompakt düşük/orta katlı sınıfta NO₂ verisinin nerdeyse tamamının yol yoğunluğundan bağımsız olarak anlamlı bir şekilde ayrıldığı tespit edilmiştir. Ancak bu durum, yalnızca ilkbahar-2021 döneminde gözlemlenmemiştir. Ayırık orta katlı yol yoğunluğu fazla olan veride de bu durum benzer şekildedir. Genel olarak, NO₂ verisi incelendiğinde, ayırık düşük katlı ve ayırık orta katlı yol yoğunluğu az veya fazla olan dört sınıfın, kompakt düşük/orta katlı yol yoğunluğu az veya fazla olan her iki sınıftan da anlamlı ayrılma oranlarının en yüksek olduğu tespit edilmiştir.

SO₂ verisi, aerosol indeks ve NO₂ verileriyle kıyaslandığında, sınıflar arasındaki anlamlı ayrılma oranlarının oldukça düşük olduğu görülmüştür. Tüm sınıflar ile yapılan karşılaştırmada, en fazla anlamlı ayrılma oranına sahip veri, ayırık düşük katlı yol yoğunluğu az olan veridir. Buna göre, ayırık düşük katlı yol yoğunluğu az olan verinin, ayırık orta katlı yol yoğunluğu az olan veriden ilkbahar ve sonbahar mevsimlerinde her iki yılda da anlamlı olarak ayrıldığı, diğer mevsimlerde ise %50 oranında anlamlı ayrılma gösterdiği tespit edilmiştir. Ayırık orta katlı yol yoğunluğu fazla olan veride ise, yaz mevsiminde %100 anlamlı ayrılma olduğu, diğer mevsimlerde %50 oranında anlamlı farklılık olduğu görülmüştür.

Bu aşamada yapılan analizler mevsimsel açıdan değerlendirildiğinde, aerosol indeks verisinin en fazla ayrılma yüzdesinin ilkbahar (%71.86) ve yaz mevsimlerinde (%75) görüldüğü, NO₂ verisinin ise genel olarak tüm mevsimlerinde anlamlı ayrılma oranının %50'nin üzerinde olduğu, ancak en yüksek ayrılma oranlarının kış (%62.5) ve yaz (%59.38) mevsimlerinde olduğu görülmüştür. Tüm sınıf tiplerinde yapılan karşılaştırmalarda ise aerosol indeks verisinin %51.67 oranında, NO₂ verisinin ise %59.17 oranında anlamlı ayrıldığı tespit edilmiştir.

Aerosol İndeks

AI	Ayrık düşük katlı Yol yoğ. az	Ayrık düşük katlı Yol yoğ. fazla	Ayrık orta katlı Yol yoğ. az	Ayrık orta katlı Yol yoğ. fazla	Kompakt düşük/orta katlı Yol yoğ. az	Kompakt düşük/orta katlı Yol yoğ. fazla
Ayrık düşük katlı Yol yoğ. az		•• ••	•• ••	•• ••	•• ••	•• ••
Ayrık düşük katlı Yol yoğ. fazla	•• ••		•• ••	•• ••	•• ••	•• ••
Ayrık orta katlı Yol yoğ. az	•• ••	•• ••		•• ••	•• ••	•• ••
Ayrık orta katlı Yol yoğ. fazla	•• ••	•• ••	•• ••		•• ••	•• ••
Kompakt düşük/orta katlı Yol yoğ. az	•• ••	•• ••	•• ••	•• ••		•• ••
Kompakt düşük/orta katlı Yol yoğ. fazla	•• ••	•• ••	•• ••	•• ••	•• ••	

Azot Dioksit

NO ₂	Ayrık düşük katlı Yol yoğ. az	Ayrık düşük katlı Yol yoğ. fazla	Ayrık orta katlı Yol yoğ. az	Ayrık orta katlı Yol yoğ. fazla	Kompakt düşük/orta katlı Yol yoğ. az	Kompakt düşük/orta katlı Yol yoğ. fazla
Ayrık düşük katlı Yol yoğ. az		•• ••	•• ••	•• ••	•• ••	•• ••
Ayrık düşük katlı Yol yoğ. fazla	•• ••		•• ••	•• ••	•• ••	•• ••
Ayrık orta katlı Yol yoğ. az	•• ••	•• ••		•• ••	•• ••	•• ••
Ayrık orta katlı Yol yoğ. fazla	•• ••	•• ••	•• ••		•• ••	•• ••
Kompakt düşük/orta katlı Yol yoğ. az	•• ••	•• ••	•• ••	•• ••		•• ••
Kompakt düşük/orta katlı Yol yoğ. fazla	•• ••	•• ••	•• ••	•• ••	•• ••	

Kükürt Dioksit

SO ₂	Ayrık düşük katlı Yol yoğ. az	Ayrık düşük katlı Yol yoğ. fazla	Ayrık orta katlı Yol yoğ. az	Ayrık orta katlı Yol yoğ. fazla	Kompakt düşük/orta katlı Yol yoğ. az	Kompakt düşük/orta katlı Yol yoğ. fazla
Ayrık düşük katlı Yol yoğ. az		•• ••	•• ••	•• ••	•• ••	•• ••
Ayrık düşük katlı Yol yoğ. fazla	•• ••		•• ••	•• ••	•• ••	•• ••
Ayrık orta katlı Yol yoğ. az	•• ••	•• ••		•• ••	•• ••	•• ••
Ayrık orta katlı Yol yoğ. fazla	•• ••	•• ••	•• ••		•• ••	•• ••
Kompakt düşük/orta katlı Yol yoğ. az	•• ••	•• ••	•• ••	•• ••		•• ••
Kompakt düşük/orta katlı Yol yoğ. fazla	•• ••	•• ••	•• ••	•• ••	•• ••	

Kış İlkbahar • İlişki var (p<0.05) •• İlişki yok (p>0.05) 2022 yılı
 Yaz Sonbahar * Veri bulunmamakta 2021 yılı

Şekil 4.8. Hava kirlilik verilerinin ağırlıklandırılmış kentsel doku-yol verisine göre post-hoc testi

4.5. Yüzey Sıcaklığı ve Hava Kirleticiler Arasındaki İlişkinin İncelenmesi

4.5.1. Yüzey Sıcaklığı Regresyon Testi

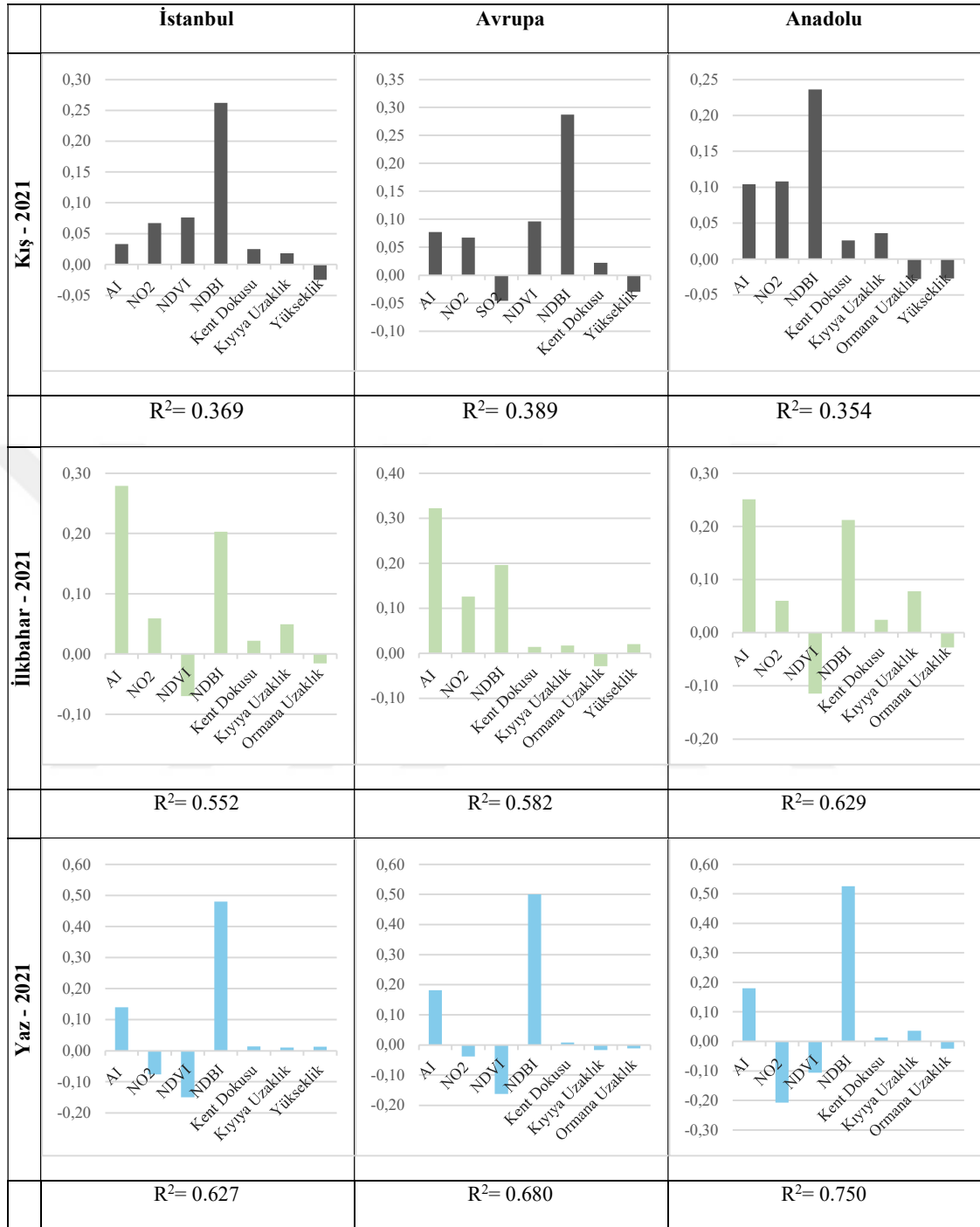
Çalışmada, hava kirliliği verilerinin arazi kullanımı, kentsel doku ve yol verisi ile olan ilişkilerinin incelenmesinin ardından, bu verilerin yüzey sıcaklığı üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla çoklu doğrusal regresyon analizi uygulanmıştır. Analizler üç farklı bölge için yapılmıştır: İstanbul'un tamamı, Avrupa Yakası ve Anadolu Yakası. Bu analizler, hem bölgeler hem de her iki yaka için mevsimsel dönemlere göre ayrı ayrı uygulanarak hava kirliliğinin yüzey sıcaklığı üzerindeki mevsimsel etkiler incelenmiştir.

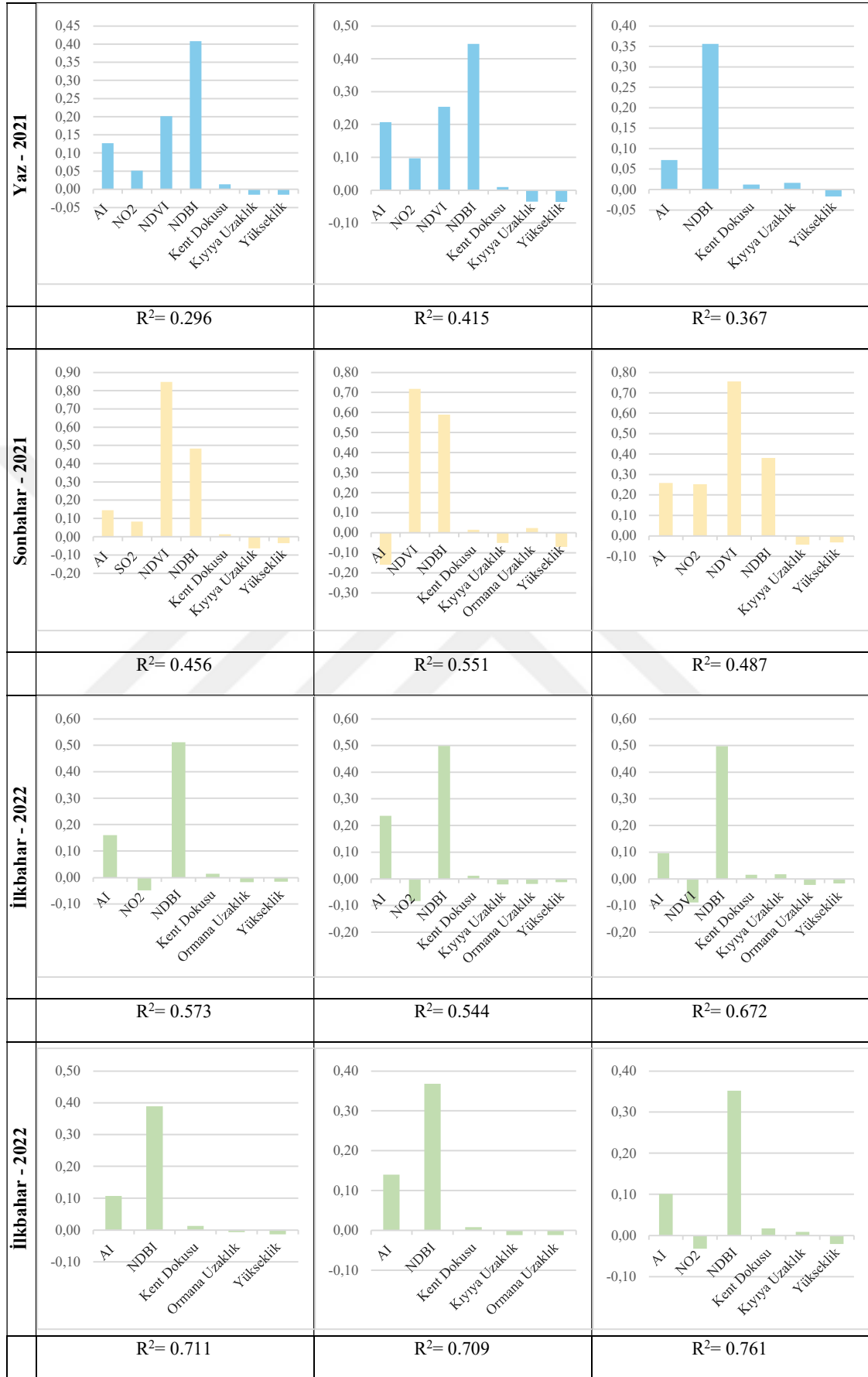
Regresyon analizinde, bağımlı değişken olarak yüzey sıcaklığı, bağımsız değişkenler aerosol indeks, NO₂, SO₂, Normalleştirilmiş Fark Bitki İndeksi (NDVI), Normalleştirilmiş Fark Yapılaşma İndeksi (NDBI), kentsel doku, kıyıya uzaklık, ormana uzaklık, yükseklik verileri kullanılmıştır. Analiz sonuçları Çizelge 4.7'de verilmiştir. Bu çizelgede yalnızca anlamlı ($p < 0.05$) değişkenlere yer verilmiş, detaylı regresyon test sonuçları Ek-8' de sunulmuştur.

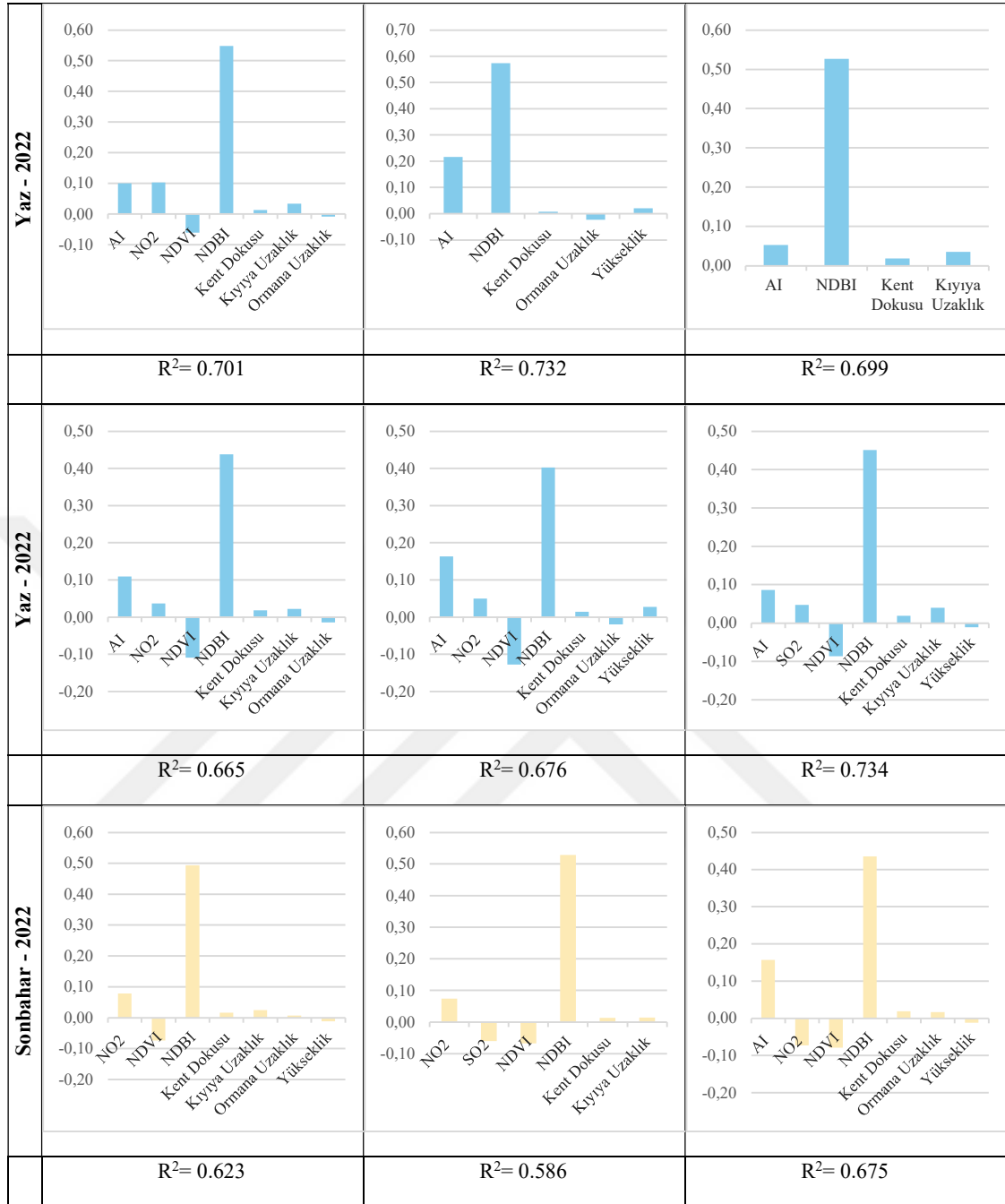
Regresyon test sonuçları aşağıda değerlendirilmiştir.

- Grafiklerin incelenmesi sonucunda, genel olarak ilkbahar ve yaz aylarında R² değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, modelin bu dönemlerde yüzey sıcaklığını açıklamada daha başarılı olduğunu ortaya koymaktadır.
- Tüm bölgelerde ve mevsimlerde, hemen hemen tüm faktörlerin (aerosol indeks, NO₂, SO₂, NDVI, NDBI, kent dokusu, kıyıya uzaklık, ormana uzaklık, yükseklik) yüzey sıcaklığı üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Bu bulgu, yüzey sıcaklığının yalnızca tek bir unsurdan değil, birden fazla çevresel ve antropojenik faktörün etkileşimiyle şekillendiğini ortaya koymaktadır.
- 2021 ilkbahar mevsiminde, yüzey sıcaklığı üzerinde en etkili faktörler sırasıyla NDBI, AI, NO₂ ve NDVI olarak belirlenmişken, 2022 ilkbahar mevsiminde NDBI, AI ve NO₂ olduğu görülmektedir. 2021'de önemli bir etkiye sahip olan NDVI'nın 2022'de etkisinin görülmemesi, bitki örtüsünün etkisinin yıllara göre değiştiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, grafiklerin incelenmesi sonucunda, 2021 ve 2022 yıllarının ilkbahar mevsimleri kıyaslandığında, NO₂'de etki yönünde bir değişim tespit edilmemiştir. Bu durum, NO₂'nin farklı dönemlerde farklı rollere sahip olabileceğini ve etkisinin mevsimsel ve yıllık değişimlere bağlı olarak çeşitlilik gösterebileceğini ortaya koymaktadır.
- Analizler, mevsimlere göre değişen ve sürekli etkili olan faktörlerin varlığını ortaya koymaktadır. Aerosol indeksi, NO₂, NDVI, NDBI, kent dokusu ve kıyıya uzaklık gibi faktörlerin, üç bölgede de mevsimsel tutarlılığını koruduğu görülmüştür. Buna karşılık, SO₂ ve ormana uzaklık gibi faktörlerin etkisinin daha değişken olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 4.7. Yüzey sıcaklığı regresyon testi







Çizelge 4.8’de, yüzey sıcaklığına etkisi olan faktörler özetlenerek, verilerin yüzdesel etki oranları verilmiştir. Bulgular aşağıda listelenmiştir.

- Bağımsız değişkenlerden aerosol indeks, NDBI ve kent dokusu, İstanbul genelinde olduğu gibi Avrupa Yakası ve Anadolu Yakası için ayrı ayrı incelendiğinde de üç bölgede ortak olarak öne çıkan faktörler arasında yer almaktadır.

- NDBI, yapılan analizlerde tüm bölgelerde %100 etkili bir değişken olarak ortaya çıkmaktadır. Diğer taraftan aerosol indeks, İstanbul geneli ve Avrupa Yakası'nda %90, Anadolu Yakası'nda ise %100 etkili bir faktör olarak tespit edilmiştir. Kent dokusunun ise İstanbul geneli ve Avrupa Yakası'nda %100 etkili, Anadolu Yakası'nda ise %90 etkili olduğu görülmüştür. Bu bulgu, bu değişkenlerin kentsel yüzey sıcaklıklarını etkileyen en belirgin faktörler arasında yer aldığını ve bölgesel farklılıklardan bağımsız olarak güçlü bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.
- Bölgeler ayrı ayrı değerlendirildiğinde, SO₂ dışındaki diğer verilerin, tüm bölgelerde dönemlerin yarısından fazlasında yüzey sıcaklığı üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. SO₂'nin diğer verilere kıyasla yüzey sıcaklığı üzerinde daha sınırlı bir etkisi bulunmaktadır.

Çizelge 4.8. Yüzey sıcaklığına mevsimsel olarak etki eden mekânsal faktörler

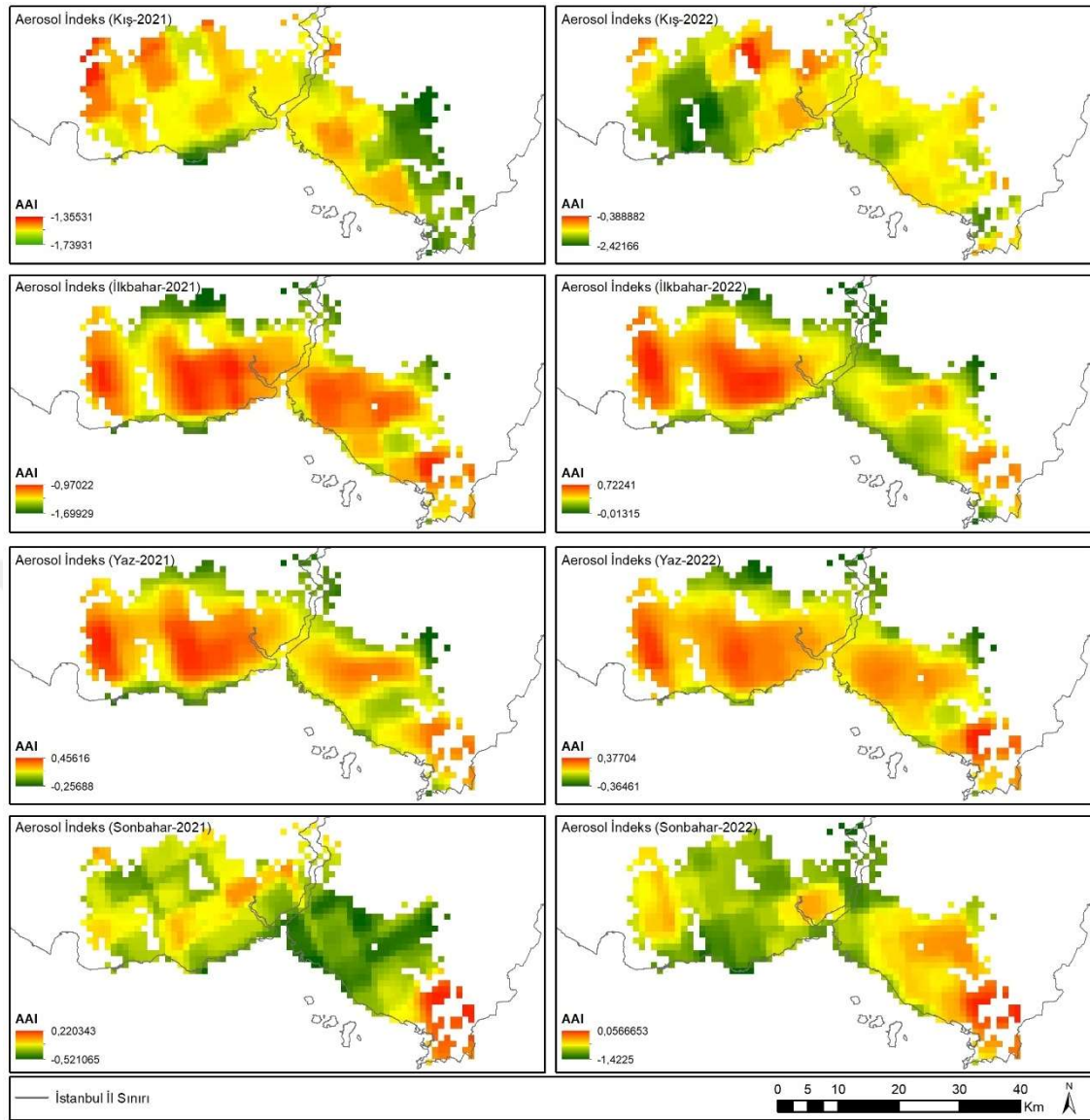
	İstanbul									Avrupa									Anadolu								
	AI	NO ₂	SO ₂	NDVI	NDBI	Kent Dokusu	Kıyıya Uzaklık	Ormana Uzaklık	Yükseklik	AI	NO ₂	SO ₂	NDVI	NDBI	Kent Dokusu	Kıyıya Uzaklık	Ormana Uzaklık	Yükseklik	AI	NO ₂	SO ₂	NDVI	NDBI	Kent Dokusu	Kıyıya Uzaklık	Ormana Uzaklık	Yükseklik
Kış - 2021	X	X		X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X			X	X	X			X	X	X	X	X
İlkbahar - 2021	X	X		X	X	X	X	X		X	X			X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	
Yaz - 2021	X	X		X	X	X	X		X	X	X		X	X	X	X	X		X	X		X	X	X	X	X	
Yaz - 2021	X	X		X	X	X	X		X	X	X		X	X	X	X		X	X				X	X	X		X
Sonbahar - 2021	X		X	X	X	X	X		X	X			X	X	X	X	X	X	X	X		X	X		X		X
İlkbahar - 2022	X	X			X	X		X	X	X	X			X	X	X	X	X	X			X	X	X	X	X	X
İlkbahar - 2022	X				X	X		X	X	X				X	X	X	X		X	X			X	X	X		X
Yaz - 2022	X	X		X	X	X	X	X		X				X	X		X	X	X				X	X	X		
Yaz - 2022	X	X		X	X	X	X	X		X	X		X	X	X		X	X	X		X	X	X	X	X		X
Sonbahar - 2022		X		X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X			X	X		X	X	X		X	X
Etki Yüzdesi (%)	90	80	10	80	100	100	80	60	70	90	70	20	60	100	100	70	70	70	100	60	10	60	100	90	90	50	70

4.5.2. Yüzey Sıcaklığı - Aerosol İndeks Mevsimsel Korelasyon Testleri

Yüzey sıcaklığı ve aerosol indeks arasındaki ilişki, İstanbul, Avrupa ve Anadolu Yakası için ayrı ayrı ele alınarak spearman korelasyon testi ile incelenmiştir. Şekil 4.9'da İstanbul'daki aerosol indeks hava kirlilik verilerinin görselleri verilmiştir. Bu görseller, 2021-2022 yıllarına ait aerosol indeks verisinin mevsimsel dağılımını içermektedir. Görseller incelendiğinde, aerosol indeks verisinin dönemsel ve mevsimsel olarak farklı bölgelerde değişken bir dağılım sergilediği görülmektedir. İlkbahar mevsiminde 2021 yılı incelendiğinde, Avrupa ve Anadolu Yakaları aerosol indeks verisi açısından benzer bir dağılım sergilerken, 2022 yılı için yapılan değerlendirmede dağılımın Avrupa Yakası'nda yoğunlaştığı dikkat çekmektedir. Sonbahar mevsimi dikkate alındığında, aerosol indeks dağılımının iki yılda da, Anadolu Yakası'nda yoğunlaştığı görülmektedir. Kış mevsiminde, 2021 yılı incelendiğinde aerosol indeksinin daha çok Avrupa Yakası'nda yoğunlaştığı görülmüş ancak, 2022 yılı incelendiğinde, Avrupa Yakası'nda aerosol indeks değerlerinin daha düşük bir dağılım gösterdiği, yoğunluğun azaldığı tespit edilmiştir.

Çizelge 4.9'da yüzey sıcaklığı ile aerosol indeks arasındaki korelasyonlar incelendiğinde, aynı mevsimde bölgeden bölgeye farklı sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Genel olarak aerosol indeksin, yüzey sıcaklığı ile hep pozitif yönde korelasyon bulunmaktadır ve bu ilişkinin yaz ve ilkbahar dönemlerinde, sonbahar ve kış dönemlerine kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir. Yaz ve ilkbahar mevsimlerinde bölgeler içindeki en yüksek korelasyon katsayısının 0.612^{**} , en düşük ise 0.384^{**} olduğu tespit edilmiştir.

Korelasyon testleri ve haritaların birlikte değerlendirilmesi sonucunda ise, Çizelge 4.9'da en yüksek korelasyon katsayısına sahip bölge ile Şekil 4.9'da bulunan kirlilik haritası karşılaştırıldığında, kirliliğin yoğun olduğu bölgelerin yüzey sıcaklığı ile daha yüksek bir korelasyon gösterdiği görülmektedir. Örneğin, sonbahar mevsimi her iki yıl da incelendiğinde, yüzey sıcaklığı ile aerosol indeks verisi arasındaki en yüksek korelasyon değerlerinin Anadolu yakası bölgesinde olduğu tespit edilmiştir. Korelasyon sonuçları ve görseller birlikte değerlendirildiğinde, yüzey sıcaklığı ile en yüksek korelasyona sahip olan bölgenin Anadolu yakası olduğu görülmektedir. Aynı zamanda aerosol indeks verisinin dağılımının bölgelere göre yoğunluğu da incelendiğinde, en yoğun olduğu bölgenin Anadolu Yakası olduğu görülmektedir. Bu durum, aerosol indeksin arttığı bölgelerde, aerosol indeks ve yüzey sıcaklığı arasındaki ilişkinin arttığını göstermektedir. Bu nedenle, haritalardan bağımsız istatistiksel sonuç algılanamayacağı ortaya konulmakta ve korelasyon test sonuçlarının aerosol indeks haritaları ile değerlendirilmesi gerektiği sonucuna ulaşılmaktadır.



Şekil 4.9. Dönemsel aerosol indeks haritaları

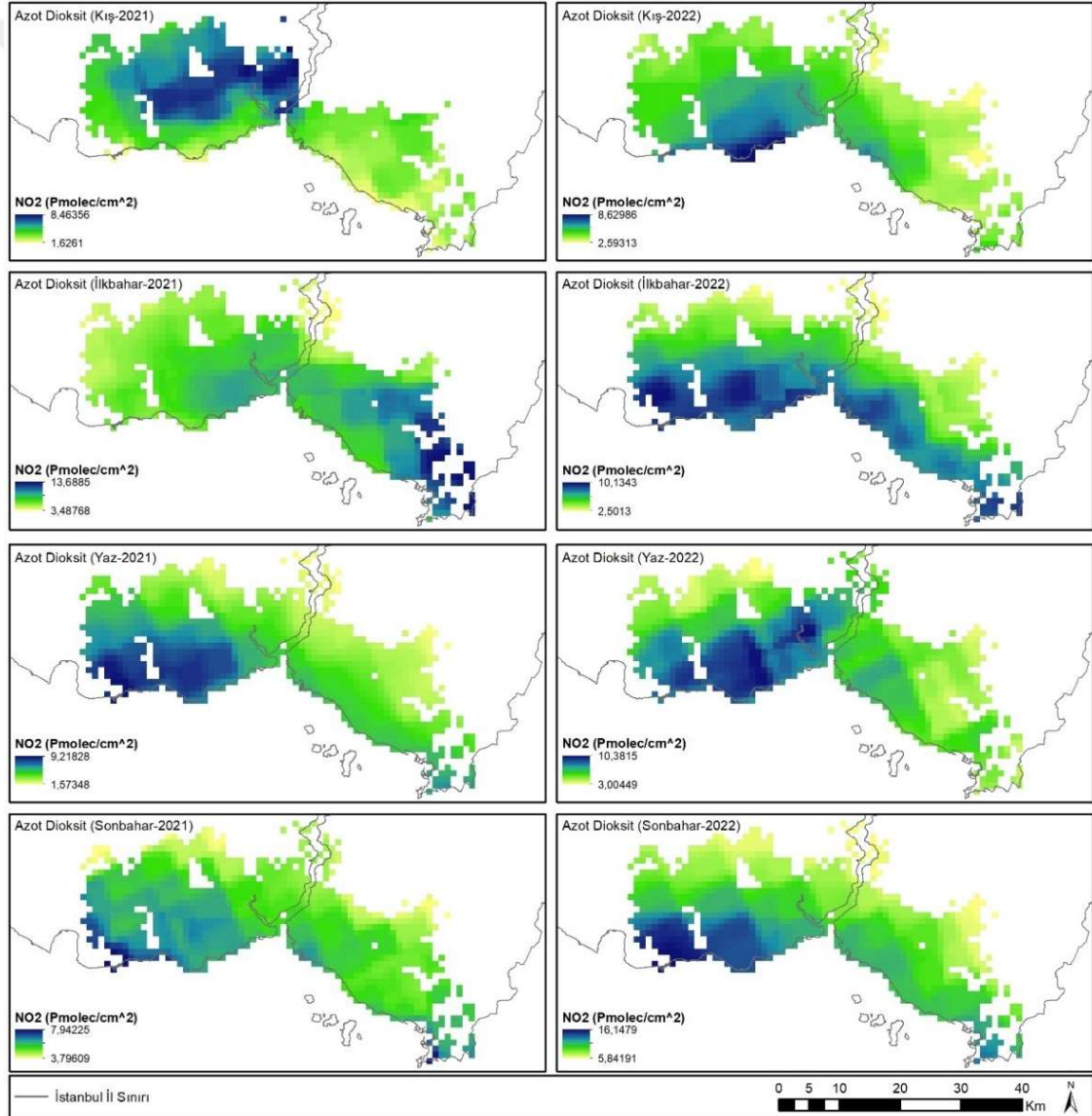
Çizelge 4.9. Yüzey sıcaklığı ve aerosol indeks korelasyon testi

		Aerosol İndeks											
		İstanbul				Avrupa				Anadolu			
		Kış	İlkB	Yaz	SonB	Kış	İlkB	Yaz	SonB	Kış	İlkB	Yaz	SonB
Yüzey Sıcaklığı	2021.02.10	0.137**				0.049				0.097			
	2021.03.14		0.502**				0.612**				0.359**		
	2021.08.05			0.423**				0.467**				0.394**	
	2021.08.21			0.361**				0.387**				0.299**	
	2021.10.08				0.123**				-0.078				0.437**
	2021-Yaz			0.409**				0.460**				0.359**	
	2022.04.02		0.364**				0.409**				0.303**		
	2022.05.20		0.404**				0.397**				0.335**		
	2022.06.05			0.397**				0.421**				0.300**	
	2022.07.23			0.334**				0.384**				0.258**	
	2022.09.09				0.026				0.033				0.340**
	2022-İlkB		0.371**				0.417**				0.333**		
	2022-Yaz			0.373**				0.410**				0.286**	
**. Korelasyon 0,01 düzeyinde anlamlıdır (2 uçlu).													

4.5.3. Yüzey Sıcaklığı - NO₂ Mevsimsel Korelasyon Testleri

Yüzey sıcaklığı ve NO₂ arasındaki ilişki, İstanbul tümü, Avrupa Yakası ve Anadolu Yakası olmak üzere üç farklı şekilde ayrı ayrı ele alınmış ve spearman korelasyon testi ile incelenmiştir. Aşağıda Şekil 4.10'da NO₂ hava kirlilik verilerinin görselleri verilmiştir. Bu görseller 2021-2022 yıllarına ait NO₂ verisinin mevsimsel dağılımını içermektedir. Görseller incelendiğinde, NO₂'nin dağılımının, ilkbahar mevsimi hariç, diğer mevsimlerde yıllardan bağımsız olarak genellikle Avrupa yakasında yoğunlaştığı görülmektedir. İlkbahar mevsiminde ise, 2021 yılında kısmen Anadolu yakasında, 2022 yılında ise tüm İstanbul'un güney yönünde dağılımın daha yüksek olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.10'e göre, yüzey sıcaklığı ile NO₂ verisinin korelasyon sonuçları değerlendirildiğinde, ilişkilerin en yüksek olduğu bölgeler kapsamında, yüzey sıcaklığıyla hep pozitif korelasyon olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.10. Dönemsel NO₂ haritaları

Çizelge 4.10. Yüzey sıcaklığı ve NO₂ korelasyon testi

		NO ₂											
		İstanbul				Avrupa				Anadolu			
		Kış	İlkB	Yaz	SonB	Kış	İlkB	Yaz	SonB	Kış	İlkB	Yaz	SonB
Yüzey Sıcaklığı	2021.02.10	.220**				.161**				0.066			
	2021.03.14		.303**				.367**				.380**		
	2021.08.05			.075*				.225**				-.182**	
	2021.08.21			.358**				.469**				.156**	
	2021.10.08				.238**				.279**				.391**
	2021-Yaz			.221**				.391**				-0.051	
	2022.04.02		.181**				.236**				0.086		
	2022.05.20		.346**				.413**				.245**		
	2022.06.05			.338**				.305**				.119*	
	2022.07.23			.178**				.289**				-0.075	
	2022.09.09				.321**				.344**				.143**
	2022-İlkB		.295**				.358**				.200**		
	2022-Yaz			.266**				.303**				0.024	
**. Korelasyon 0,01 düzeyinde anlamlıdır (2 uçlu).													

Korelasyon test sonuçları ile NO₂ haritaları kıyaslandığında, görsellerde dağılımın yoğun olduğu Avrupa yakasında (2021 yılı ilkbahar mevsimi hariç) korelasyon değerlerinin, İstanbul ve Anadolu yakası bölgelerine göre kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Aerosol indekse benzer şekilde, yüzey sıcaklığı ile NO₂ arasındaki korelasyonlarının incelenmesinde, yalnızca istatistiksel test sonuçları değil, aynı zamanda haritalar ile yapılan değerlendirmelerin daha sağlıklı ve anlamlı sonuçlar vereceği sonucuna ulaşılmaktadır. Görsel verilerin, korelasyon testlerinin bulgularını desteklemesi, farklı bölgelerdeki dağılımın daha net bir şekilde anlaşılmasına olanak sağlamaktadır. Bu tür görsel analizler, verilerin mekânsal ve zamansal değişimlerini daha iyi yorumlayabilmeyi ve ilişkileri daha detaylı inceleyebilmeyi mümkün kılmaktadır.

4.5.4. Yüzey Sıcaklığı - SO₂ Mevsimsel Korelasyon Testleri

Ek-5’de İstanbul için SO₂ verilerinin mevsimsel dağılımı verilmiştir. SO₂ verisinin İstanbul genelindeki dağılımı incelendiğinde, aerosol indeks ve NO₂ verilerinin aksine, belirli bölgelerde yoğunlaşmış bir dağılım göstermektedir. Ayrıca, farklı dönemlerde SO₂ konsantrasyonunun yoğunlaştığı alanlar değişkenlik göstermektedir. SO₂’nin yüzey sıcaklığı ile korelasyon test sonuçları (Çizelge 4.11) incelendiğinde, tutarlı ve anlamlı korelasyon görülememektedir. Bu nedenle görsellere dayalı korelasyon testi değerlendirmesi yapılamamaktadır.

Çizelge 4.11. Yüzey sıcaklığı ve SO₂ korelasyon testi

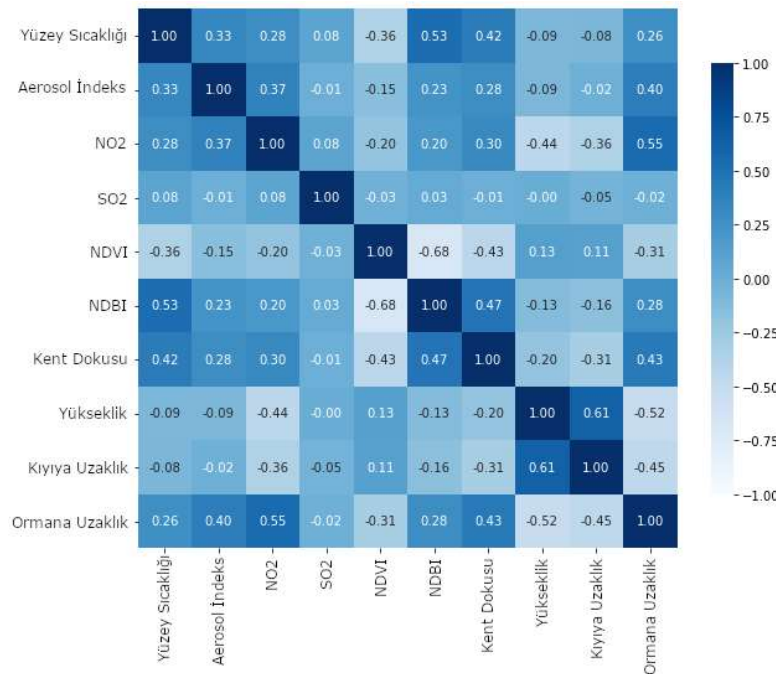
		SO ₂											
		İstanbul				Avrupa				Anadolu			
		Kış	İlkB	Yaz	SonB	Kış	İlkB	Yaz	SonB	Kış	İlkB	Yaz	SonB
Yüzey Sıcaklığı	2021.02.10	-.135**				-.253**				-.101*			
	2021.03.14		-0.018				.142**				-.176**		
	2021.08.05			.160**				0.021				.311**	
	2021.08.21			.117**				0.039				.214**	
	2021.10.08				0.044				.238**				-.243**
	2021-Yaz			.137**				0.027				.275**	
	2022.04.02		.093**				0.078				.103*		
	2022.05.20		.112**				.097*				.124*		
	2022.06.05			-.097**				-.088*				0.05	
	2022.07.23			-0.026				-0.067				0.079	
	2022.09.09				.067*				-.133**				.192**
	2022-İlkB		.105**				.091*				.114*		
	2022-Yaz			-0.063				-0.077				0.065	
**. Korelasyon 0,01 düzeyinde anlamlıdır (2 uçlu).													

4.6. Tüm Dönemlerde Yüzey Sıcaklığı - Hava Kirleticiler ve Mekânsal Değişkenlerin İncelenmesi

Bu aşamada, veriler bir bütün olarak değerlendirilmiştir. Bu nedenle, mevsimsel farklılığın ortadan kaldırılması için verilere normalizasyon işlemi uygulanmıştır. Öncelikle değişkenlerin kentsel alanlarda yüzey sıcaklığı ile ilişkisi, korelasyon analizleriyle incelenmiş; ardından hava kirliliği ve mekânsal değişkenlerin yüzey sıcaklığını açıklama gücü, makine öğrenim tekniklerinden XGBoost regresyon modeliyle modellenmiş ve SHAP yöntemi kullanılarak değişkenlerin yüzey sıcaklığı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Son olarak, yüzey sıcaklığı ve hava kirliliği arasındaki ilişki kent dokusu çerçevesinde post-hoc ANOVA testleri, grafikler ve karar ağaçları ile daha detaylı olarak değerlendirilmiştir.

4.6.1. Kentsel Alanlarda Yüzey Sıcaklığı ve İklimsel Değişkenler Arasındaki Korelasyon Analizi

Çalışmada değişkenler arasındaki ilişkiyi değerlendirmek amacıyla spearman korelasyon testi uygulanmıştır. Şekil 4.11’de elde edilen bulgular, tüm girdi verilerinin yüzey sıcaklığı ile anlamlı bir korelasyona sahip olduğunu göstermektedir. NDBI, kent dokusu ve aerosol indeks gibi girdi parametrelerinin çoğunun yüzey sıcaklığı ile pozitif korelasyona sahip olduğu tespit edilmiştir. Öte yandan, NDVI, yükseklik ve kıyıya uzaklık gibi faktörlerin yüzey sıcaklığı ile negatif korelasyon gösterdiği belirlenmiştir. NDBI, yüzey sıcaklığı ile en yüksek pozitif korelasyona ($r=0.53$) sahip değişkendir ve bunu sırasıyla, kent dokusu ($r=0.42$), aerosol indeks ($r=0.33$), ile NO_2 ($r=0.28$) girdi parametreleri izlemektedir. Yüzey sıcaklığı ile en yüksek negatif korelasyona ise NDVI ($r=-0.36$) sahiptir.



Şekil 4.11. Yüzey sıcaklığı ve iklimsel değişkenlerin korelasyon matrisi

Yüzey sıcaklığı ve hava kirleticileri arasındaki korelasyon analizi, yüzey sıcaklığı ile hem aerosol indeksin ($r = 0.33$) hem de NO_2 'nin ($r = 0.28$) arasında pozitif bir ilişki olduğunu ortaya koymaktadır. Bu kirleticilerin daha yüksek konsantrasyonlarda bulunduğu bölgelerin genellikle daha yüksek yüzey sıcaklıkları sergilediği anlamına gelmektedir. Bu durum, aerosollerin ve NO_2 'nin atmosferik ısınmaya katkıda bulunduğunu ve potansiyel olarak kentsel ısı adası etkisini artırdığını göstermektedir. Buna karşılık, SO_2 ile yüzey sıcaklığı arasındaki korelasyon ($r=0.08$) ihmal edilebilir düzeydedir, bu da SO_2 'nin kentsel alanlarda yüzey sıcaklığı üzerinde belirgin bir etkisi olmadığını göstermektedir.

4.6.2. Makine Öğrenimi ile Yüzey Sıcaklığı Modelinde Değişkenlerin Rolü: XGBoost ile Değerlendirme

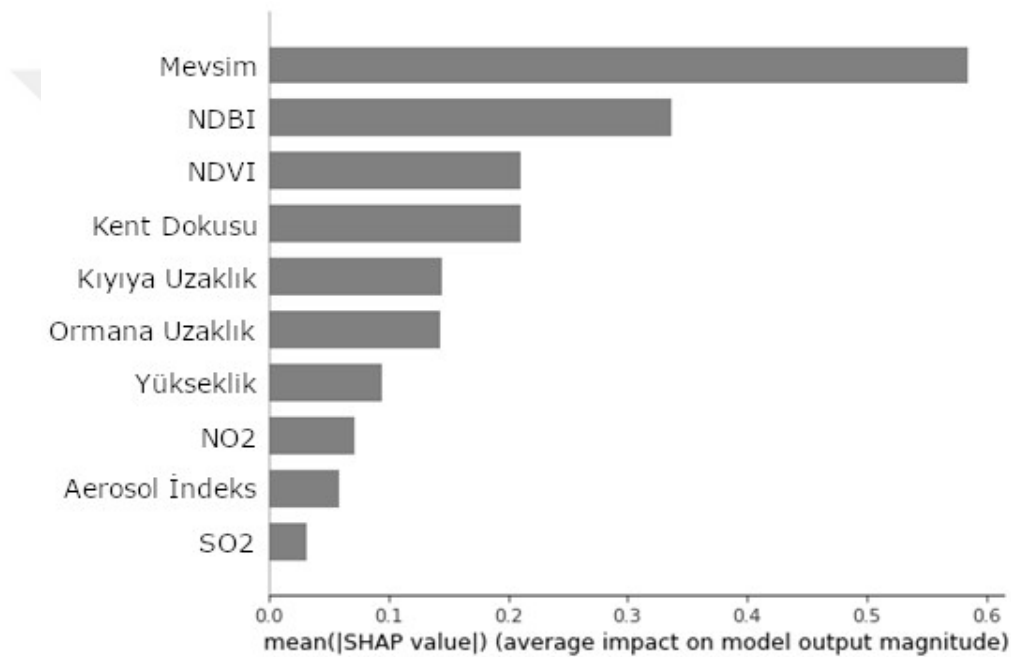
Çalışmada, on bağımsız değişken ve yüzey sıcaklığı bağımlı değişken olarak kullanılarak XGBoost modeli oluşturulmuştur. Eğitim sürecinin ardından model, Çizelge 4.12'de verilen göstergelere dayalı olarak yüzey sıcaklığını açıklamada güvenilir bir performans göstermiştir. Ardından, mekânsal faktörler ve hava kirlilik verilerinin yüzey sıcaklığı değişimine katkısını yorumlamak için SHAP yöntemi kullanılmıştır. Şekil 4.12'de 0-1 arasında değişen SHAP önem sıralama değerleri ile bağımsız değişkenlerin, yüzey sıcaklığı varyansı üzerindeki ortalama etkileri ölçülmüştür. Bu değişkenler arasından, mevsim 0.6'lık önem sıralaması değeriyle göreceli olarak ön plana çıkmaktadır. Ardından sırasıyla, 0.35'lik değeriyle NDBI, 0.23'lük değerleriyle NDVI ve kent dokusu gelmektedir. Aerosol indeks, NO_2 ve SO_2 hava kirlilik verilerinin diğer değişkenlere kıyasla daha düşük SHAP değerlerine sahip olmasına rağmen, yüzey sıcaklığı üzerindeki etkisi göz ardı edilmemelidir. Bu hava kirlilik verileri arasından, NO_2 ve aerosol indeks benzer etki dereceleriyle ön plana çıkarken, SO_2 'nin daha düşük etki derecesi bulunmaktadır.

Çizelge 4.12. XGBoost regresyon model doğrulaması

	R²	RMSE	MAE
Model Doğrulaması	0.841	0.071	0.050

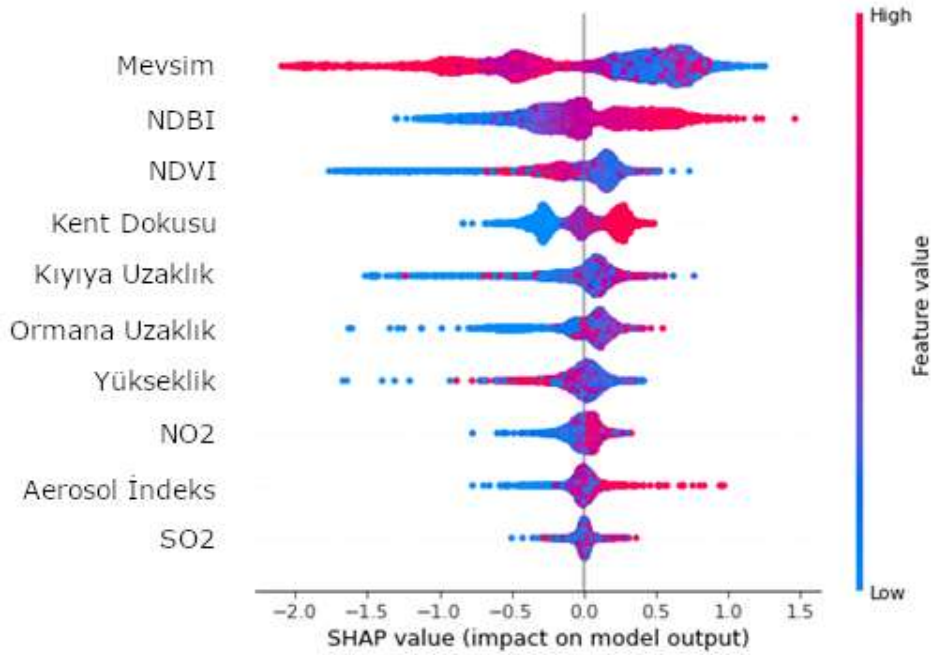
Şekil 4.13'de ise değişkenlerin model üzerindeki katkısının ilişki yönü (negatif – pozitif) gösterilmiştir. Şekilde x eksen, değişkenin SHAP değerini, y eksen ise veri yoğunluğunu göstermektedir. X ekseninde, pozitif SHAP değeri, değişkenin tahmin edilen sonucu artırdığını, negatif SHAP değeri ise azalttığını göstermektedir. Ayrıca her nokta, o değişkenin değerine göre düşükten (mavi) yükseğe (kırmızı) göre renklendirilmiştir. Örneğin, NDBI verisinin değerinin artması ile SHAP değeri artmış ve renk kırmızıya, azalmasıyla ise maviye dönmüştür. Benzer bir durum, kentsel doku ve aerosol indeks değişkenlerinde de belirgin bir şekilde görülmektedir. Burada, kentsel doku verisinin kendi içinde bir skala (ayrık düşük katlı- ayrık orta katlı- kompakt düşük/orta katlı) barındırdığı unutulmamalıdır. Grafikte, kentsel doku değişkenindeki mavi noktalar ayrık düşük katlı doku sınıfını, mor noktalar ayrık orta katlı doku sınıfını, kırmızı noktalar ise kentsel yapılaşmanın en yoğun olduğu kompakt düşük/orta katlı doku sınıfını temsil etmektedir. Buna göre, skalanın artması, kentsel yapılaşma yoğunluğunun artmasını ifade etmektedir. Grafiğe bakıldığında, kent yapılaşma yoğunluğunda artışın

SHAP değerini de arttırdığı görülmektedir. NDVI değişkeni incelendiğinde ise model üzerinde daha karışık bir etkisi olduğu görülmektedir. Bu değişkende, düşük ve yüksek NDVI değerleri hem pozitif hem de negatif SHAP değerlerine sahiptir. Genel dağılım dikkate alındığında, kırmızı noktaların -0.5 ile 0 SHAP değerleri arasında, mavi noktaların ise 0 ile 0.3 SHAP değerleri arasında yoğunlaştığı görülmüştür. Coğrafi değişkenlerden olan kıyıya uzaklık ve ormana uzaklığın model üzerindeki etkisinin benzer olduğu, yüksekliğin ise bu iki veriden ayrıldığı görülmüştür. Kıyıya ya da ormana uzaklık arttıkça (kırmızı), SHAP değerinin genellikle pozitif yöne kaydığı, yükseklik arttıkça ise SHAP değerinin genellikle negatif yöne kaydığı tespit edilmiştir. Hava kirliliği ile ilgili değişkenler olan NO₂, aerosol indeks ve SO₂ için yüksek değerlere sahip noktaların genellikle kırmızı renkte olduğu ve SHAP değerlerinin pozitif yönde arttığı tespit edilmiştir. Bu da bu kirlletici konsantrasyonlarının artışıyla model çıktısının yükseldiğini göstermektedir.



Şekil 4.12. Değişkenlerin önem sıralaması

Genel olarak verilerdeki dağılım iki sınıfta incelendiğinde, NDBI, kent dokusu, kıyıya uzaklık, ormana uzaklık, NO₂, aerosol indeks ve SO₂, yüzey sıcaklığı ile pozitif ilişkiye sahip iken NDVI ve yükseklik negatif ilişkiye sahiptir. Mevsim, kategorik bir değişkendir ve diğer sayısal değişkenlerden farklı olarak incelenmelidir.



Şekil 4.13. Değişkenlerin katkı sıralaması

4.6.3. Kentsel Doku Sınıflarının Hava Kirleticileri ve Yüzey Sıcaklığı Üzerine Etkisinin İncelenmesi

Hava kirlilik verilerinin her bir kentsel doku tipine göre istatistiksel olarak anlamlı farklılık gösterip göstermediği, post-hoc ANOVA testi yapılarak araştırılmıştır (Çizelge 4.13). Levene testi sonucunda aerosol indeks verisinde homojenlik varsayımı sağlandığından ($p > 0.05$) Tukey's testi, NO_2 ve SO_2 'de homojenlik varsayımı sağlanamadığından ($p < 0.05$) Tamhane's testi uygulanmıştır.

Post-hoc ANOVA testi sonuçları incelendiğinde, aerosol indeks ve NO_2 konsantrasyonlarının üç kentsel doku sınıfı arasında anlamlı bir farklılık gösterdiği görülmüştür. SO_2 konsantrasyonu açısından ise, orta düşük katlı doku sınıfı ayırık düşük ve kompakt düşük/orta katlı doku sınıflarından anlamlı biçimde farklılaşırken, ayırık düşük ve kompakt düşük/orta katlı doku sınıfları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmamıştır.

Sonraki aşamada, yüzey sıcaklığının kentsel doku ve hava kirleticisi değişkenler temelinde sınıflandırılması amacıyla CHAID (Chi-square Automatic Interaction Detector) karar ağacı analizi uygulanmış; böylece kent dokusunun hava kirleticileriyle birlikte yüzey sıcaklığı üzerindeki etkileşimi detaylı olarak incelenmiştir. Karar ağacı analizleri Ek-9'de verilmiştir. Bu analizlerde, düğümlerdeki " ≤ 10 " ayırık düşük katlı kentsel dokuyu, " $10-30$ " ayırık orta katlı kentsel dokuyu ve " > 30 " kompakt düşük/orta katlı kentsel dokuyu temsil etmektedir.

Çizelge 4.13. Farklı kentsel doku tipleri arasında aerosol indeks, NO₂ ve SO₂ konsantrasyonları üzerine post-hoc ANOVA analizi

		Aerosol İndeks		NO ₂		SO ₂	
		Ort. Fark. (I-J)	Sig.	Ort. Fark. (I-J)	Sig.	Ort. Fark. (I-J)	Sig.
Ayrık Düşük-Katlı	Ayrık Orta-Katlı	-0.032*	0.000	-0.029*	0.000	-0.300*	0.000
	Kompakt Düşük/Orta-Katlı	-0.135*	0.000	-0.169*	0.000	0.003	0.901
Ayrık Orta-Katlı	Ayrık Düşük-Katlı	0.032*	0.000	0.0287*	0.000	0.030*	0.000
	Kompakt Düşük/Orta-Katlı	-0.103*	0.000	-0.141*	0.000	0.033*	0.000
Kompakt Düşük/Orta-Katlı	Ayrık Düşük-Katlı	0.135*	0.000	0.169*	0.000	-0.003	0.901
	Ayrık Orta-Katlı	0.103*	0.000	0.141*	0.000	-0.033*	0.000

*. Ortalama fark 0,05 düzeyinde anlamlıdır

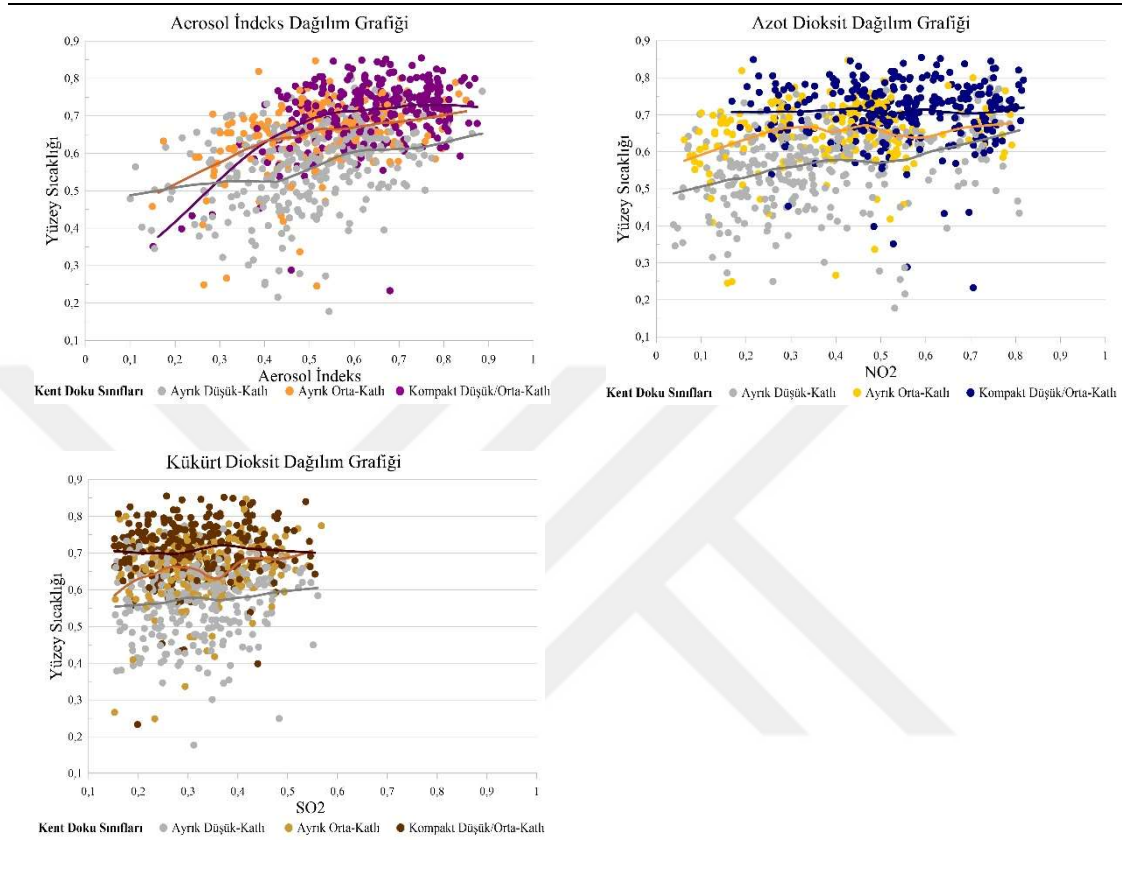
Analiz sonuçları değerlendirildiğinde, kentsel dokunun yüzey sıcaklığına göre üç sınıfa ayrıldığı görülmüştür. Dokular kıyaslandığında ise, ayırık kentsel doku sınıfının, ayırık orta katlı ve kompakt düşük/orta katlı kentsel doku sınıfından daha düşük sıcaklığa sahip olduğu tespit edilmiştir. Aynı şekilde ayırık orta katlı doku sınıfı da kompakt düşük/orta katlı doku sınıfına göre daha düşük yüzey sıcaklığına sahiptir. Aerosol indeks ve NO₂'de ayırık kentsel dokuda, ortalama yüzey sıcaklığı 0.573 iken ayırık orta katlı kentsel dokuda bu değer 0.660, kompakt düşük/orta katlı doku sınıfında ise bu değer 0.713'e yükseldiği görülmektedir. SO₂'de, veri tabanında eksik veri olmasından kaynaklı ortalama yüzey sıcaklık değerleri değişmekte olup, ayırık düşük katlı doku sınıfında 0.594, ayırık orta katlı doku sınıfında 0.662, kompakt düşük/orta katlı doku sınıfında ise 0.727'ye yükselmiştir. Bu bulgulara göre, kentsel yapılaşmanın yoğunlaşması sonucunda yüzey sıcaklığının arttığı sonucuna varılmaktadır. Buradaki ortalama yüzey sıcaklıklarının, tüm dönemlere ait normalizasyon uygulanmış olan yüzey sıcaklığı verisi olduğu unutulmamalıdır.

Kentsel doku tiplerine göre hava kirleticilerinin sınıflandırılması ve ortalama yüzey sıcaklığının değerlendirilmesi sonucunda, üç hava kirleticisinin kentsel dokulara göre belirli bir eşik değerinde farklılaştığı ve her kentsel doku sınıfında hava kirleticisi değerinin artmasıyla yüzey sıcaklığının da yükseldiği görülmüştür. Bu durum, yalnızca ayırık orta katlı doku tipinde SO₂ için tespit edilmiştir.

Son olarak, kent doku sınıflarında yüzey sıcaklığı ve hava kirleticiler arasındaki ilişki incelenmiştir. Çizelge 4.14'de yüzey sıcaklığı ile ilişkiler ele alındığında, aerosol indeks ve NO₂ verilerinde konsantrasyon artışının genel olarak yüzey sıcaklığını arttırdığı tespit edilmiştir. Üç hava kirleticisinde kentsel doku tiplerine göre saçılımlar karşılaştırıldığında, kompakt düşük/orta katlı doku tipinin daha yüksek yüzey sıcaklığı, düşük orta katlı doku sınıfının daha düşük yüzey sıcaklığı ve ayırık orta katlı doku sınıfının ise iki doku sınıfı arasında yüzey sıcaklığı değerleri sergilediği tespit edilmiştir. Ayrıca,

kompakt düşük/orta doku tipi yerleşim bölgeleri, aerosol indeks, NO₂ ve yüzey sıcaklığı arasında tutarlı bir ilişki tespit edilmiştir.

Çizelge 4.14. Her bir kentsel doku sınıfına göre yüzey sıcaklığı ve hava kirleticileri arasındaki ilişki



Bu aşamada, 3.5 ve 3.6 bölümlerinde yerel iklim üzerine yapılan analizlerden elde edilen bulgular, aşağıda ana hipotez kapsamında değerlendirilmiştir.

“H₃: Hava kirleticiler, yüzey sıcaklığı üzerinde etkilidir.”

- H₃ hipotezi hem çoklu doğrusal regresyon sonuçları hem de SHAP makine öğrenme yöntemi ile doğrulanmıştır. Regresyon analizinde R² değerinin mevsimlere göre değiştiği tespit edilmiştir. SHAP yöntemi ise mevsimlerin, yüzey sıcaklığını etkileyen en önemli parametre olduğunu ortaya koymuştur.
- H₃ hipotezleri hava kirleticiler açısından incelendiğinde, aerosol indeks ve NO₂ için doğrulanırken, SO₂ için doğrulanamamıştır.

4.7. Tartışma

Bu tez çalışmasının ilk aşamasında, Marmara Bölgesi'nde seçilen dört farklı çalışma alanında, arazi kullanım türlerinin hava kirleticileri üzerindeki etkilerinin farklılık gösterip göstermediği, arazi kullanım türleri, mevsim ve çalışma alanları göz

önünde bulundurulur, ANOVA ve post-hoc testleri ile analiz edilmiştir. Bu aşamada, bölge ölçeğinde farklı arazi kullanım türlerinde hava kirleticilerin farklı etkileri olduğu ve bu etkilerin mevsimlere göre de farklılık gösterdiği ortaya konulmuştur. Arazi kullanım türleri ile hava kirleticiler arasındaki ilişkinin ortaya konulmasının ardından, bir alt ölçekte kentsel alanlarda, endüstriyel/sanayi alanlar, sürekli şehir ve kırsal şehrin hava kirleticiler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu aşamada, hava kirleticilerinden aerosol indeks ve NO₂'nin sanayi alanlarında ve sürekli şehirde, kırsal alanlara göre anlamlı düzeyde farklılık gösterdiği ortaya konulmuştur. Bu aşamanın da ardından bir alt ölçekte, hava kirleticiler ile kentsel doku ve yol ilişkisi korelasyon testleri ile araştırılmış ve yol yoğunluğunun az veya yoğun olmasına göre doku tiplerine hava kirleticilerin etkileri araştırılmıştır. Çalışmanın son aşamasında ise İstanbul özelinde, yerel iklim- hava kirleticileri ve kentsel doku arasındaki ilişki kapsamlı olarak çoklu doğrusal regresyon testleri ve makine öğrenim teknikleri ile ele alınarak araştırılmıştır. Bu bölümde, araştırmada elde edilen bulgular, literatürdeki örnek çalışmalar ile karşılaştırılarak tartışılmaktadır.

Bu çalışmada, Marmara Bölgesi'nde dört farklı bölge için 5 km ve 1 km olmak üzere iki farklı ölçekte hava kirleticilerin arazi kullanım üzerindeki etkisi incelendiğinde, aerosol indeks, NO₂ ve SO₂ üç farklı hava kirleticisinin de 1 km'lik çözünürlükte yapay yüzeyler, tarım alanları ve ormanlar arasında anlamlı ayrılma yüzdelerinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Sentinel-5P TROPOMI aracı, günlük küresel kapsama alanı ve yaklaşık 5 km'lik mekânsal çözünürlüğü sayesinde atmosferdeki hava kirleticilerinin izlenmesinde önemli avantajlar sunmaktadır. Bu araç, yüksek mekânsal çözünürlüğüyle, bölgesel ve yerel ölçekte hava kirliliği ve emisyonların izlenmesinde ayrıntılı veriler sağlayabilmektedir. Termik santraller, yangınlar, endüstriyel kompleksler ve nakliye rotaları gibi geniş alanların incelenmesinde bu çözünürlük yeterli olsa da kentsel alanlarda detaylı araştırmalar yapmak için genellikle 1 km'lik mekânsal çözünürlük tercih edilmektedir. Literatürde benzer çalışmalar incelendiğinde, TROPOMI verilerinin orijinal çözünürlüğünde veya farklı çözünürlüklere yeniden örneklenerek kullanıldığı bazı araştırmalara rastlanmaktadır. Örneğin, Cersosimo vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada, TROPOMI NO₂ verileri farklı çözünürlüklerde incelenmiştir. Çalışmada, orijinal çözünürlükteki Level 2 verisini ve 1 km'ye yeniden örneklenmiş Level 3 verisi yer ölçümleriyle karşılaştırılmıştır. Araştırma sonucunda, Level 2 verisinin yer ölçümleriyle 0.50 korelasyon gösterdiği, 1 km'ye yeniden örneklenmiş Level 3 verisinin yer ölçümleriyle 0.85 korelasyon katsayısına ulaştığı ortaya konulmuştur. Benzer şekilde Schneider vd. (2021), yüksek çözünürlüklü uydu verilerinin veri asimilasyonu, ters modelleme ve kentsel ölçekli analizlerde daha etkili olduğunu vurgulayarak, 1 km x 1 km gibi daha iyi mekânsal çözünürlüklerin kentsel emisyonların ayrıntılı olarak incelenmesinde daha yaygın ve faydalı bir şekilde kullanıldığını belirtmişlerdir. Özellikle Goldberg vd. (2021), literatürde Judd vd. (2019) ve Zhao vd. (2020) tarafından yapılan çalışmalara dayanarak, 5 km'lik piksel boyutunun sokak seviyesindeki konsantrasyon değişimlerini yeterince ayrıntılı bir şekilde gösterememesinin, kentsel ölçekte doğru analiz ve modelleme yapılmasını zorlaştırdığını öne sürmektedir. Bu çalışma da Marmara Bölgesi özelinde, yüksek çözünürlüklü verilerin, farklı arazi kullanım türleri üzerindeki hava kirliliği etkilerini anlamada daha avantajlı olduğunu ortaya koyarak literatürdeki bulguları desteklemektedir. Bu durum, bölgesel ve kentsel düzeyde hava kirleticilerinin rolünün daha iyi anlaşılabilmesi için yüksek çözünürlüklü verilerin gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Çalışmada aerosol indeks verileri bölgesel olarak incelendiğinde (Şekil 4.1, Şekil 4.2), kış-2022 dönemi hariç tüm dönemlerde ve bölgelerde yapay yüzeydeki aerosol indeks değerinin tarım alanı ve orman alanlarından daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Benzer şekilde, post-hoc ANOVA test sonuçları, farklı arazi tipleri olan yapay yüzeyler, tarım alanları ve orman alanlarında aerosol indeks değerlerinin birbirinden anlamlı olarak farklılaştığı ortaya konulmuştur. Ancak bu durum, özellikle kış ve sonbahar dönemlerinde istisnai bir şekilde değişkenlik göstermektedir. Literatürde Yang vd. (2022) tarafından yapılan çalışmada, Sentinel 2B uydu görüntüsünün sunduğu Aerosol Optik Derinlik (AOD) verisinden yararlanarak beş farklı arazi yüzeyinde, AOD değerleri karşılaştırmıştır. Çalışmada, kentsel ve yapılaşmış alanlar daha yüksek AOD değerine sahipken, bunu çalılık ve ekili araziler takip ettiği, buna karşılık ormanların daha düşük AOD değerine sahip olduğu ortaya konulmuştur. Sharma vd. (2022) tarafından arazi kullanım/arazi örtüsü tiplerine göre AOD değerinin incelendiği çalışmada, yapılaşmış alanlardaki AOD değerinin, otlak ve ekili alanlardan daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Literatürdeki bu örnekler, çalışmadaki bulguları desteklemektedir. Çalışmada, kış-2022 döneminde aerosol indeksin özellikle tüm bölgelerde tarım alanlarında yüksek değerler göstermesi, Marmara Bölgesi'nde o güne ait hava koşullarıyla ilişkilendirilmiştir. O güne ait veri olan, 19 Ocak 2022 görüntü tarihi birer gün öncesi ve sonrası incelendiğinde, bölgenin karla karışık yağmur etkisinde olduğu tespit edilmiştir. Toz ve toprak parçacıklarının aerosol konsantrasyonuna katkıda bulunduğu göz önüne alındığında (Sharma vd. 2022), açık tarımsal alanlardaki bu yüksek değerlerin, rüzgâr ve yağış gibi atmosferik faktörler nedeniyle daha da belirgin hale gelebileceği düşünülmektedir.

İstanbul-Gebze bölgesinde CORINE-seviye 3 arazi kullanım verisi temel alındığında (Şekil 4.7), yapay yüzeylerin alt sınıfları arasında aerosol indeks açısından istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar olduğu tespit edilmiştir. Sürekli şehir yapısı ve kesikli şehir yapısı karşılaştırıldığında, her iki alanın %87.5 oranında birbirinden ayrıldığı tespit edilmiştir. Bu bulgu, kesikli şehir yapısı ile endüstriyel alanlar arasındaki benzer yüksek oranlı farklılaşmayla desteklenmektedir. Bu bulgular, aerosol indeks değerlerinin farklı arazi sınıflarına bağlı olarak değişiklik gösterebileceğini ortaya koymaktadır. Kentsel hava kirliliği üzerine yapılan çalışmalarda, arazi kullanım sınıflarının aerosol değerleri üzerindeki etkisinin dikkate alınması gerektiği vurgulanmaktadır.

Çalışmada bölgeler özelinde azot dioksit için elde edilen bulgular incelendiğinde, Şekil 4.3 İstanbul-Gebze, Kocaeli-Yalova ve Bursa çalışma alanlarında NO₂ konsantrasyon değerlerinin yapay yüzeylerde, tarım ve orman alanlarına göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Literatürde yapılan çalışmalar, ulaşım ve sanayi gibi faktörlerin NO₂ konsantrasyon farkını artırdığını göstermektedir (Wang vd., 2020). Nitekim bu çalışmada da literatürle uyumlu olarak, yoğun kentsel nüfusa, geniş ulaşım ağlarına ve sanayi alanlarına sahip olan İstanbul-Gebze bölgesinde NO₂ konsantrasyon farkının diğer bölgelere göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, özellikle pandemi döneminde NO₂ üzerine araştırmalar yapan çalışmalar, karantina süreçlerinde farklı kentlerde NO₂ konsantrasyonlarında önemli oranda düşüşler (%0.46-%0.85 aralığında) tespit edildiğini göstermiştir (Siddiqui vd. 2020; Vîrghileanu vd. 2020). Şekil 4.4'de NO₂'nin yapay yüzeyler, tarım alanları ve orman alanlarında ANOVA ve post-hoc testleri incelendiğinde, İstanbul-Gebze ve Bursa'da yapay yüzeylerin, tarım ve orman alanlarından tüm mevsimsel periyotlarda ve yıllık bazda istatistiksel olarak anlamlı düzeyde farklılaşma gösterdiği tespit edilmiştir. İncelenen dört bölge arasında nüfus

yoğunluğu karşılaştırıldığında, İstanbul Türkiye'nin en kalabalık ili, Bursa ise dördüncü en kalabalık ilidir. Bu iki şehir, Kocaeli-Yalova ve Çanakkale'ye kıyasla daha yüksek nüfusa sahip olmaları nedeniyle, Marmara Bölgesi'nde şehirleşme ve kentsel faaliyetlerin en yoğun olduğu merkezler olarak öne çıkmaktadır. Kocaeli-Yalova Bölgesi'nde yapılan istatistiksel analizler sonucunda, yapay yüzeylerdeki NO₂ değerlerinin tarım ve orman alanlarındaki değerlerden %75 oranında istatistiksel açıdan anlamlı farklılaşma tespit edilmiştir. Bununla birlikte, anlamlı farklılaşmanın gözlenmediği durumlar da mevcuttur. Bu durumların %12.5'i kış periyodunda yapay yüzeyler ile orman örtüsü arasındaki NO₂ konsantrasyonlarının istatistiksel olarak anlamlı düzeyde ayrışmamasından kaynaklanmaktadır. Kalan %12.5'lik dilim ise 2021 yılının yaz ve sonbahar dönemlerinde yapay yüzeyler ile tarım alanları arasındaki NO₂ değerlerinin istatistiksel olarak anlamlı farklılık göstermemesinden kaynaklı olduğu görülmektedir.

Şekil 4.7'de NO₂ konsantrasyonlarının yapay yüzeyler özelinde alt ölçekte analizi sunulmuştur. Bu analizde, kırsal alanların NO₂ değerlerinin hem sürekli kentsel dokuya sahip yoğun şehir alanlarından hem de endüstriyel bölgelerden istatistiksel açıdan anlamlı düzeyde farklılaştığı tespit edilmiştir. Sürekli şehir merkezleri ile endüstriyel alanlarda bu anlamlı farklılaşma %50 oranında görülebilmektedir. İstatistiksel olarak anlamlı farklılaşmanın %50 seviyesinde kalmasının temel nedeni, her iki bölgede de NO₂ konsantrasyonlarının yüksek seviyelerde seyretmesi olarak değerlendirilmektedir. Şehir merkezlerinde ulaşım faaliyetlerinden, endüstriyel alanlarda ise üretim süreçleri ve enerji tüketiminden kaynaklanan yoğun emisyonlar nedeniyle yüksek NO₂ seviyeleri gözlemlenmektedir. Bu bulguyu destekler nitelikte, Jubaer vd. (2024) ve Erbertseder vd. (2023) tarafından yapılan çalışmalarda, arazi kullanımı ile NO₂ konsantrasyonları arasındaki ilişki incelenmiş ve insan faaliyetlerinin yoğun olduğu endüstriyel ve kentsel alanlarda NO₂ değerlerinin yüksek seviyelerde seyrettiği, buna karşın yerleşimin seyrek ve tarım alanlarının yaygın olduğu bölgelerde NO₂ konsantrasyonlarının düşük olduğu tespit edilmiştir.

Dört bölgede Şekil 4.5'de verilen SO₂ verisinin yapay yüzey, tarım alanları ve orman alanlarındaki dağılımı incelendiğinde, arazi kullanım sınıfları arasındaki farklılığın genel olarak kış 2021 ve ilkbahar 2021 döneminde daha belirgin olduğu görülmüştür. Aynı zamanda bu dönemlerde, dört bölge genelinde SO₂ konsantrasyon değerlerinin diğer mevsimlere kıyasla daha yüksek seyrettiği gözlemlenmiştir. Bu mevsimsel değişim, literatürdeki benzer çalışmalarla paralellik göstermektedir. Nitekim Thi Nguyen ve Kim (2006), Kore'nin yedi büyük şehrindeki kentsel alanları sınıflandırarak yürüttükleri çalışmada, 1998-2003 yılları arasında hava kalitesi izleme istasyonlarından elde edilen SO₂ değerlerinin, istasyon türünden bağımsız olarak özellikle kış ve ilkbahar aylarında belirgin bir artış gösterdiğini tespit etmişlerdir. Fakat 2022 yılında böyle bir durum görülmemekte ve arazi kullanım sınıfları arasında da genel olarak belirgin bir fark bulunmamaktadır. SO₂ için yüzeyler arası farklılaşmanın belirgin olduğu dönemler analiz edildiğinde, yapay yüzeylerde SO₂ değerlerinin, tarım ve orman alanlarına kıyasla daha yüksek olma eğiliminde olduğu görülmektedir. Çanakkale bölgesinde yapılan analizlerde, kış mevsiminde yapay yüzeylerdeki SO₂ konsantrasyonlarının diğer mevsimlere kıyasla yaklaşık yedi kat daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu bağlamda, Akyuz ve Kaynak (2019) tarafından yürütülen çalışmada, Çan ve diğer iki termik santralin bulunduğu bölgeden on iki yıllık periyotta toplanan SO₂ ölçümleri incelenmiştir. Bu araştırma, SO₂ konsantrasyonlarının mevsimsel değişimler

ve rüzgâr dinamikleri etkisiyle genel olarak Çanakkale ilinin güney ve güneybatı kesimlerine doğru taşınım gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu atmosferik taşınım nedeniyle, bölgedeki hava kalitesi izleme istasyonlarından elde edilen SO₂ verilerinde termik santrallerin etkisi net olarak tespit edilememektedir. Bu tez çalışmasında, 2021 kış döneminde yapay yüzeylerde gözlemlenen yüksek SO₂ konsantrasyonlarının, atmosferik taşınımına rağmen bölgedeki termik santrallerin emisyonlarından kaynaklanabileceği değerlendirilmektedir.

Şekil 4.6'da SO₂ için gerçekleştirilen post-hoc ve ANOVA test incelemelerine göre, 5 km'lik grid ölçeğinde dört bölgede de SO₂ arazi kullanım sınıfları arasında anlamlı bir farklılaşma bulunmamakta ya da anlamlı farklılık oranı oldukça düşük seyretmektedir. Buna karşın, 1 km'lik grid ölçeğinde, 5 km'lik gridda anlamlı farklılaşma gözlenmeyen dönemlerde dahi anlamlı ayrışma oranının arttığı tespit edilmiştir. Şekil 4.7'de gösterildiği gibi, İstanbul-Gebze bölgesinde yapay yüzeylerin alt sınıflarında SO₂ için yapılan post-hoc ANOVA testinde, SO₂ konsantrasyonlarının kış ve yaz mevsimlerinde sürekli ve kesikli şehir yapıları arasında, yaz ve sonbahar mevsimlerinde ise sürekli şehir yapıları ve sanayi alanları arasında anlamlı farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Diğer mevsimlerde de yıl bazlı ayrı ayrı anlamlı farklılaşma olduğu görülmektedir. Sanayi alanları ayrı olarak ele alındığında SO₂'nin, hem sürekli şehir yapısından sonbahar döneminde iki yılda da belirgin farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Benzer şekilde Wang vd. (2024) tarafından yapılan çalışmada, antropojenik kaynaklı SO₂ değişikliklerini değerlendirmek amacıyla 1980-2021 döneminde Çin'deki dört ana kentsel ve dört ana kırsal bölge üzerinde, SO₂ konsantrasyonlarının kapsamlı olarak uzun vadeli eğilimlerini incelemişlerdir. Çalışmada, SO₂ konsantrasyonundaki ortalama artışın kentsel bölgelerde, kırsal bölgelerden yaklaşık 16 kat daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, SO₂ dinamiklerinin kentsel alanların genişlemesi, nüfus yoğunluğu ve gayrisafi yurtiçi hasıla ile yüksek oranda ilişkili olduğunu ortaya koymuşlardır. Çalışmanın bulguları, SO₂'nin Çin'deki bölgesel iklim değişikliği üzerindeki etkisine ilişkin daha fazla çalışma yapılması gerektiğini vurgulamaktadır. Yücer vd. (2023), yoğun sanayiye sahip Kocaeli bölgesinde PM₁₀ ve SO₂'nin kent içi değişimini tahmin etmek için sanayi, bina, yükseklik, rüzgâr hız ve yönü gibi daha birçok mekânsal faktörü kullanarak arazi kullanım modellemesi geliştirmişlerdir. Çalışma, yollara olan mesafe, sanayi alanlarının yoğunluğu ve nüfus yoğunluğunun SO₂ üzerinde ana etkili unsurlar olduğunu göstermiş, ayrıca meteorolojik değişkenlerin hava kirleticilerin konsantrasyonu üzerinde önemli bir rol oynadığını vurgulamıştır.

SO₂ konsantrasyonları, büyük ölçüde evsel ısıtmanın ya da endüstriyel alanlardaki faaliyetlerden kaynaklanması nedeniyle mevsimsel olarak değişebilmektedir. Bu nedenle, bu hava kirleticisi için daha kapsamlı incelemeler yapılmasının faydası olacaktır. Özellikle, farklı dönemlerde daha sık ve sürekli veri toplanması, bölgedeki SO₂ kaynaklarının detaylı araştırılması yapılacak çalışmalar için önemlidir.

Hava kirleticiler ile arazi kullanımı arasındaki ilişkilerin incelenmesi sonucunda, kirleticilerin yapay yüzey, tarım alanları ve orman alanlarında farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Bu bulgunun ardından, İstanbul-Gebze Bölgesi'nde yapay yüzeyin alt sınıfları olan sürekli şehir yapısı, kesikli şehir yapısı ve endüstriyel/ticari alanlarda hava kirleticilerin farklı etkilere sahip olduğu ortaya konulmuş ve bu çerçevede hava kirleticiler, kentsel doku bağlamında daha detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu aşamada, hava kirleticilerinin kentsel doku, yol ağı ve bu ikisinin birlikte oluşturduğu kombinasyon

ile olan ilişkisi üç farklı veri seti kullanılarak araştırılmıştır. Literatürde, yoğun kentsel alanlarda hava kirletici konsantrasyonlarının daha yüksek olduğu yönünde çalışmalar bulunmakla birlikte (Baek ve Ban 2020; Hoffmann 2019; Yang vd. 2020), bu tez çalışmasında kentsel doku faktörü, yalnızca hava kirleticiler ile değil mekânsal değişkenler ile birlikte daha kapsamlı bir perspektifle ele almıştır. Çizelge 4.4, Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6'da ki bulgular, aerosol indeks ve NO₂ hava kirleticilerinin, SO₂ hava kirleticisine göre kentsel alanlarda, kentsel doku, yol ve kombinasyonu ile daha yüksek korelasyona sahip olduğunu göstermiştir. Özellikle kentsel doku ve ağırlıklandırılmış doku ve yol verisi ile aerosol indeks korelasyonları incelendiğinde, sadece yol verisinin ele alındığı veri seti ile olan korelasyonlardan daha yüksek bir korelasyon gösterdiği tespit edilmiştir.

Çalışmada aerosol indeks için elde edilen bulgular, hava kirleticilerin kentsel alanlarda incelenmesinde kentsel dokunun yol ile birlikte değerlendirmeye dahil edilmesini vurgulamaktadır. Ayrıca, mevsimsel olarak değerlendirildiğinde aerosol indeks verisinin, yaz ve ilkbahar dönemlerinde üçlü veri setiyle (kentsel doku, yol, kentsel doku-yol) daha yüksek korelasyona sahip olduğu görülmektedir.

NO₂ verisinin kentsel doku, yol ve kentsel doku-yol ile ilişkisi incelendiğinde, her mevsimsel dönemde korelasyon değerlerinin benzer olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, NO₂'nin kentsel doku ile ağırlıklandırılmış kentsel doku-yol verisi arasındaki korelasyonunun da benzer değerler sergilediği görülmüştür. Yapılan ANOVA ve post-hoc testlerinde, hava kirleticilerinin kentsel doku sınıflarına göre anlamlı farklılıkları incelenirken, ağırlıklandırılmış doku ve yol verisi kullanılmıştır. Şekil 4.8'de aerosol indeks verisinde kompakt düşük/orta katlı verinin diğer iki doku sınıfından özellikle ilkbahar ve yaz dönemlerinde %100 olarak farklılaştığını söylemek mümkündür. Ayrık düşük katlı yol yoğunluğu az olan verinin, ayrık düşük katlı yol yoğunluğu fazla ve ayrık orta katlı yol yoğunluğu fazla olan sınıflardan, ilkbahar ve yaz dönemlerinde aerosol indeks üzerinde anlamlı derecede farklı etkilere sahip olduğu görülmektedir. Bu mevsimsel tutarlılık, kentsel doku tiplerinin aerosol yoğunluğuna etkisinin, mevsimsel koşullara bağlı olarak farklılık gösterebileceğini ortaya koymaktadır. Kompakt doku tipinde, yol yoğunluğuna göre belirgin bir değişim görülmemektedirken bu durum ayrık düşük katlı ve orta katlı doku tipleri için farklılık göstermektedir. Ayrık orta katlı yol yoğunluğu az olan verinin, ayrık düşük katlı doku tipi ile yol yoğunluğu fark etmeksizin tutarlı bir şekilde anlamlı farklılık göstermediği, ancak yol yoğunluğu fazla olan veri tipi için bu durumun değişkenlik gösterdiği tespit edilmiştir. NO₂'nin ise yol faktöründen bağımsız olarak, kompakt doku tipinin ayrık doku tipinde nerdeyse tamamen anlamlı bir şekilde ayrıldığı ortaya konulmuştur. Bu bulgu, kentsel doku yoğunluğu ve yapısının NO₂ konsantrasyonu üzerindeki etkisini belirgin bir şekilde göstermektedir.

Literatürde yerel iklim üzerine yapılan çalışmalar, yaygın olarak mekânsal ve zamansal faktörler, kentsel fonksiyonlar ve arazi kullanımının etkisini araştırmıştır (Guo vd. 2015; Hu vd. 2023; Liu vd. 2023; Quan vd. 2016); ancak kentsel alanlarda hava kirleticilerin ve kent dokusunun yerel iklim üzerindeki etkisine odaklanan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bu çalışmada, kentsel doku, hava kirleticileri ve diğer mekânsal faktörler olan NDBI, NDVI, yükseklik, kıyıya uzaklık, ormana uzaklık verileri ele alınarak yüzey sıcaklığı ile aralarındaki ilişkiler araştırılmıştır. Bu aşamada çoklu doğrusal regresyon ve XGBoost regresyon modeli olmak üzere iki farklı regresyon yöntemi uygulanmıştır. Çizelge 4.7'de verilen çoklu doğrusal regresyon testinde her

dönem İstanbul, Anadolu Yakası ve Avrupa Yakası olmak üzere üç farklı bölgede incelenmiş, Şekil 4.12 ve Şekil 4.13’de ise XGBoost regresyon modeli ile SHAP metodu kullanılarak verilerin yüzey sıcaklığı üzerindeki etki değerleri tespit edilmiştir. Makine öğrenim yöntemlerinde, veri sayısının azalmaması amacıyla sadece İstanbul tek bölge olarak değerlendirilmiştir. Çalışmada, dönemsel olarak ayrı ayrı ele alınan regresyon modelinde, model doğruluk katsayısı en yüksek ilkbahar-2022 döneminde 0.711 iken, XGBoost regresyon modelinde bu değer 0.841’e yükselmiştir. Bu durum çok parametrelili, kompleks bir yapıya sahip kentsel iklimin modellenmesinde makine öğrenim tekniklerinin daha başarılı sonuç verdiğini ortaya koymaktadır.

Farklı yıllara ait periyodik verilerin analiz edildiği bu çalışmada, mevsimsel değişimlerin yüzey sıcaklığını etkilemede önemli bir rolü olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, kentsel morfolojiyi temsil eden NDBI ve kentsel doku faktörlerinin kentsel alanda artış göstermesinin yüzey sıcaklığı üzerinde arttırıcı etkisi olduğu ortaya konulmuştur (Şekil 4.12). Diğer araştırmacıların bulgularıyla karşılaştırıldığında, bu çalışma, genellikle yoğun yerleşik alan varlığının ve yüksek NDBI değerine sahip bölgelerin daha yüksek yüzey sıcaklığı sergilediği bulgusunu desteklemektedir (Abulibdeh 2021; Mathew vd. 2024). Kentsel iklimin iyileştirilmesinde yeşil alanların rolü önemlidir, bu nedenle yüzey sıcaklığı modellemelerinde NDVI oldukça yaygın kullanılan bir parametredir. Bu çalışmada da NDVI’nin yüzey sıcaklığı üzerinde önemli üçüncü etken olduğu tespit edilmiştir. Ardından hava kirleticiler ile yüzey sıcaklığı arasındaki ilişkiler incelendiğinde, yapılan korelasyon testleri, aerosol indeks ve NO₂ hava kirleticilerinin yüzey sıcaklığıyla pozitif ilişkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Literatürde, Xiang vd. (2022) pearson korelasyon testi kullanarak gündüz ve gece yüzey sıcaklığı ile AOD arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Bu çalışmada korelasyon katsayıları gündüz için 0.327, gece için 0.437 olarak tespit edilmiştir. Benzer bir çalışmada, Faisal vd. (2022) yüzey sıcaklığı ile AOD arasındaki korelasyon katsayılarının yıllara göre 0.14 ile 0.49 arasında değiştiğini ortaya koymuşlardır. NO₂ ile yüzey sıcaklığı arasındaki ilişkileri inceleyen çalışmalar kısıtlı olmakla beraber, Fuladlu ve Altan (2021) yapmış oldukları çalışmada iki veri arasındaki ilişkiyi 0.111 olarak tespit etmişlerdir. Bu çalışmada da yüzey sıcaklığı ile aerosol indeksi ve NO₂ arasında sırasıyla 0.33 ve 0.28 korelasyon katsayıları tespit edilmiş olup, bu sonuç literatürdeki bulgularla uyum göstermektedir. Ayrıca makine öğrenim tekniğiyle gerçekleştirilen regresyon analizleri de hava kirleticilerin, yüzey sıcaklığının artmasında etkili olduğunu desteklemektedir.

Anadolu ve Avrupa Yakası için ayrı ayrı gerçekleştirilen regresyon testleri incelendiğinde, bulguların makine öğrenim tekniğiyle uyduğu görülmektedir. Çizelge 4.8’de İstanbul geneli, Avrupa Yakası ve Anadolu Yakası için ayrı ayrı incelendiğinde, NDBI, aerosol indeks ve kent dokusu üç bölgede de ortak olarak öne çıkan faktörlerdendir. Bölgeler arası R² değerinde ise dönemsel olarak değişkenlik olduğu görülmüştür. En yüksek R² değerleri genel olarak ilkbahar ve yaz aylarında görülmüştür (0.296-0.761). Bu değerleri sırasıyla, sonbahar mevsimi takip etmektedir.

Yüzey sıcaklığı ve kentsel hava kirleticileri arasındaki ilişki, kentsel planlama ve sürdürülebilir çevre yönetimi açısından önem kazanan önemli bir araştırma konusudur. Özellikle yoğun nüfuslu kentsel alanlar hem hava kirliliği konsantrasyonu hem de yüzey sıcaklığı artışları açısından önemlidir. Bu çalışmanın bulguları, kompakt düşük/orta katlı alanlardaki yüzey sıcaklıklarının genellikle diğer kentsel doku sınıflarına göre daha yüksek olduğunu göstermiştir. Çalışma ayrıca, aerosol indeks ve NO₂

konsantrasyonlarındaki artışın tüm kentsel doku sınıflarında yüzey sıcaklıklarını önemli ölçüde artırdığını, ancak NO₂ konsantrasyonundaki artışın özellikle kompakt düşük/orta yapılaşma alanlarında daha sabit bir etki gösterdiğini ortaya koymaktadır. SO₂ konsantrasyonunun yüzey sıcaklıkları üzerindeki etkisi, kompakt düşük/orta katlı alanlarda daha yüksek yüzey sıcaklıklarıyla, ayrık düşük ve ayrık orta katlı doku tipinde ise daha düşük yüzey sıcaklıkları ile ilişkilidir. Kentsel doku tiplerine göre SO₂ artışı incelendiğinde, kompakt düşük/orta katlı doku tipinde yüzey sıcaklıklarında sürekli bir artış görülmezken, diğer iki doku tipinde yüzey sıcaklıklarının sınırlı bir artış gösterdiği veya sabit kaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca çalışmada aerosol indeks ve NO₂'nin yüzey sıcaklığı üzerindeki etkisi ortaya konulmuş fakat SO₂'nin yüzey sıcaklığı üzerindeki etkisi tam olarak tespit edilememiştir. SO₂'nin atmosferde hızla sülfat içeren aerosol partiküllerine dönüşmesinin (Liu vd. 2021; Yang vd. 2023), bu etkilerinin gözlemlenememesinde etkili olduğu düşünülmektedir.

Uzaktan algılama tekniklerinden elde edilen SO₂ hava kirleticisinin yüzey sıcaklığı üzerindeki etkisi, yapılacak daha hassas yersel ölçümler ile incelenmelidir. Çalışmada elde edilen bu bulgular, hava kirliliğinin yerel sıcaklık dinamikleri üzerindeki etkisini vurgulamakta ve kentsel ısı azaltma stratejilerinde kirletici seviyelerinin dikkate alınmasının önemini altını çizmektedir.

Kentsel alanlardaki hava kalitesi çalışmalarında, kirleticilerin izlenmesi, arazi kullanımı ilişkilerinin analizi ve kentsel ısı adası etkilerinin değerlendirilmesinde geleneksel olarak istasyon bazlı ölçümler kullanılmaktadır (Ngarambe vd. 2021; Wang vd. 2021; Aghazadeh vd. 2023). Bu çalışmada ise, hava kirleticilerinin arazi kullanımları (yapay yüzey, tarım alanları, orman alanları), kentsel alanlar (sürekli şehir, kesikli şehir, endüstriyel alanlar), kentsel doku (ayrık düşük katlı, ayrık orta katlı, kompakt düşük/orta katlı) ve yüzey sıcaklığı ile ilişkilerinin incelenmesinde uzaktan algılama teknikleri kullanılmıştır. Bu yöntem, sınırlı istasyon verilerinin mekânsal kısıtlılıklarını aşarak, geniş alanlarda eş zamanlı ve yüksek çözünürlüklü veri elde etme imkânı sunmaktadır.

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, üst ölçekte arazi kullanımı ile hava kirliliği arasındaki ilişkinin araştırılmasından başlanarak, daha alt ölçekte yerel iklim, kent dokusu ve hava kirleticiler arasındaki ilişkinin incelenmesine doğru bir geçiş yapılmaktadır. İlk olarak, Marmara Bölgesi'ni ele alarak Sentinel 5P- TROPOMI sensöründen elde edilen aerosol indeks, NO₂ ve SO₂ hava kirleticileri ile arazi kullanım sınıfları arasındaki ilişki incelenmiştir. TROPOMI verilerinin orijinal mekânsal çözünürlüğünün yaklaşık 5 km olması nedeniyle, bu çalışmada veriler hem orijinal çözünürlükte hem de 1 km çözünürlüğüne yeniden örneklenerek işlenmiş ve hava kirleticileri iki farklı mekânsal ölçekte incelenmiştir. Çalışmanın bu aşamasında, hava kirleticilerin yapay yüzey, tarım alanları ve orman alanları gibi farklı arazi kullanımı sınıflarında anlamlı bir şekilde ayrışmasının, 1 km mekânsal çözünürlükte daha başarılı olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, çalışmanın sonraki bölümlerinde 1 km çözünürlüğündeki veri tabanı kullanılarak devam edilmiştir. Ayrıca bu aşamada, bölgeler hava kirleticiler ve arazi kullanımı açısından değerlendirildiğinde, aerosol indeks ve NO₂'nin arazi kullanımlarına göre farklılaşmasının, kentleşme ve sanayinin daha yoğun olduğu İstanbul-Gebze, Bursa ve Kocaeli-Yalova bölgelerinde daha belirgin olduğu tespit edilmiştir. Özellikle İstanbul-Gebze ve Bursa bölgelerinde, mevsim ve yıl fark etmeksizin, aerosol indeksin ve NO₂'nin arazi kullanımlarında %75-%100 aralığında istatistiksel olarak anlamlı farklılaştığı belirlenmiştir.

Hava kirleticilerin arazi kullanım tiplerinde istatistiksel olarak anlamlı bir şekilde ayrıştığının tespit edilmesinin ardından, yapay yüzeyin bir alt sınıfı olan sürekli şehir, kırsal şehir ve endüstriyel-ticari alanlar üzerinde hava kirleticilerin anlamlı bir farklılık gösterip göstermediği incelenmiştir. Bu analizler, hem kentsel alanların hem de sanayi alanlarının yoğun olduğu İstanbul-Gebze Bölgesi'nde uygulanmıştır. Bu aşamada elde edilen sonuçlar, çalışmada bir alt ölçeğe geçilmesine olanak tanımıştır. Çalışmanın bundan sonraki kısmında, İstanbul'un sadece kentsel alanlarını kapsayan bir çerçevede, kentsel doku ile hava kirleticiler arasındaki ilişki, yol parametresinin de dahil edilmesiyle daha detaylı bir şekilde incelenmiştir. Ardından, yerel iklimin incelenmesi aşamasında, hava kirleticiler ve kentsel doku arasındaki ilişkiler analizlere mekânsal değişkenlerinde dahil edilmesiyle detaylandırılmıştır.

İstanbul; artan nüfusu, kentsel genişlemesi, antropojenik faaliyetleri dikkate alındığında, yerel iklim değişikliğine karşı savunmasız kalmaktadır. İstanbul'un İklim Değişikliği Eylem Planı, şehrin son yıllarda karşılaştığı artan sıcaklıklar, değişen yağış düzenleri ve aşırı hava olaylarına karşı stratejisini ortaya koymaktadır. Plan, kent politikalarının oluşturulmasında iklim değişikliğinin mevcut ve öngörülen etkilerinin dikkate alınmasını ve kentin bu değişimlere uyum kapasitesinin güçlendirilmesini temel bir öncelik olarak belirlemektedir (İBB 2021). Bununla beraber; sanayi faaliyetleri, yoğun trafik ağır ve konut ısıtma/soğutmasından kaynaklanan hava kirliliği, şehirdeki hava kalitesini olumsuz yönde etkilemekte ve yerel iklim değişikliği etkilerini artırmaktadır.

İstanbul'un kentsel gelişim politikaları çerçevesinde, yeşil alanların korunması ve artırılması büyük önem taşımaktadır. Ancak mevcut kentsel dönüşüm projeleri ve yeni yerleşim alanlarının açılması, yeşil alan varlığını tehdit etmekte, kentsel ısı adası etkisini güçlendirmekte ve hava kirleticilerinin şehir atmosferinde birikmesini hızlandırmaktadır.

Özellikle yeşil alanların azalması, doğal karbon yutaklarının kaybına neden olurken, artan yapılaşma ve trafik yoğunluğu hava kirletici konsantrasyonlarını yükseltmektedir. Bu karmaşık kentsel iklim dinamiklerini anlamak ve yönetmek için, yüzey sıcaklığı modellerinde makine öğrenimi ve uzaktan algılama tekniklerinin entegre kullanımı, kentsel planlama için giderek daha da önemli hale gelmektedir.

Yüzey sıcaklığı ve hava kirleticiler arasındaki ilişki, meteorolojik koşullar, topografya, kentsel morfoloji ve bölgelerin sosyoekonomik özellikleri gibi birçok değişkene bağlıdır (Hidalgo-García ve Arco-Díaz 2023; Rahaman vd. 2024). Bu çalışmada, yüzey sıcaklığının modellenmesi kapsamlı bir şekilde ele alınmıştır. Modelleme sürecinde hava kirleticileri, kentsel doku sınıfları ve çeşitli mekânsal değişkenler (NDVI, NDBI, yükseklik, kıyıya uzaklık, ormana uzaklık) birlikte değerlendirilmiştir. Analizler iki farklı yöntemle gerçekleştirilmiştir; ilk olarak her dönem için ayrı ayrı regresyon modelleri yapılmış, ardından tüm dönemler bir arada ele alınarak XGBoost regresyon modeli uygulanmıştır.

Çalışmanın bulgularından elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda verilmiştir.

- TROPOMI hava kirlilik verilerinin, arazi kullanım sınıflarına göre ayrılma başarısı, 1 km'lik çözünürlükte 5 km'lik çözünürlüğe kıyasla daha yüksek bulunmuştur. 1 km'lik grid ölçeğinde hava kirlilik verilerinin çoğu, farklı arazi kullanım sınıfları arasında anlamlı ayrımlar gösterirken, 5 km'lik grid ağında bu ayrımlar tespit edilememiştir. Bu sonuçlar, TROPOMI hava kirletici verilerinin özellikle 1 km'lik çözünürlükte, arazi kullanımı sınıflarına göre yapılan ayrıştırmada başarılı olduğunu göstermektedir. Çalışmanın sonraki aşamalarında TROPOMI verilerinin, hava kirleticilerinin yapay yüzeylerin alt sınıflarıyla, kentsel dokuyla ve yerel iklimle olan ilişkilerinin incelenmesinde kullanılması sonucunda elde edilen bulgular, TROPOMI'nin mezo ölçekli çalışmalarda önemli bir veri kaynağı olabileceğini göstermiştir. Bununla birlikte, çalışmanın bulguları, veri analizinde seçilen mekânsal ölçeğin sonuçların güvenilirliği açısından önemli olduğunu ortaya koymaktadır. Çalışma, TROPOMI hava kirleticilerinin mezo ölçekli yerel iklim ve kentsel morfoloji araştırmalarında 1 km çözünürlükte incelenmesini önermektedir.
- İstanbul-Gebze bölgesinde yapılan daha detaylı analizlerde, hava kirletici verilerinin birçoğunun yapay yüzeyin alt sınıflarından olan sürekli şehir, kesikli şehir ve endüstriyel alanlarda istatistiksel olarak anlamlı ayrıldığı görülmüştür. Bu bulgu, kentsel alanlarda hava kirliliği ile arazi kullanım sınıfları arasındaki ilişkiyi daha iyi anlamaya yönelik önemli bir veri sunmaktadır. Elde edilen sonuçlar, kentsel planlama ve çevre yönetimi politikalarının, arazi kullanım tiplerine özgü stratejilerle desteklenmesi gerektiğini göstermektedir.
- İstanbul özelinde, ağırlıklandırılmış kentsel doku sınıfı ve yol verisi kullanılarak yapılan analizler sonucunda, aerosol indeks ve NO₂ hava kirlilik verilerinin, kompakt düşük/orta katlı ve yol yoğunluğu fazla olan doku sınıflarının, ayrık düşük katlı ve ayrık orta katlı doku sınıflarından post-hoc ANOVA testlerine göre istatistiksel olarak anlamlı bir şekilde ayrıldığı tespit edilmiştir. Bu bulgu, kentsel doku özellikleri ile hava kirliliği arasındaki ilişkinin anlaşılmasına katkı sağlamakta ve kentlerin planlanması süreçlerinde kentsel doku tipi ve yol yoğunluğu gibi faktörlerin hava kirleticiler üzerindeki etkisinin dikkate alınması

gerektiğini önermektedir. Ayrıca, farklı kentsel doku ve yol yoğunluğu kombinasyonlarının hava kirliliği üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde analiz etmek için önemli bir temel sunmaktadır.

- Yapılan analizler, çevresel faktörlerin (kıyıya uzaklık, ormana uzaklık, yükseklik) yanı sıra, insan faaliyetlerinin (kentleşme, hava kirliliği gibi) yüzey sıcaklığı üzerinde etkisi olduğunu ortaya koymaktadır. Bu etkilerin, bölgesel özelliklere ve mevsimsel koşullara bağlı olarak değişkenlik gösterdiği tespit edilmiştir. Bu bulgu, yerel iklim değişikliklerini anlamak ve yönetmek için hem çevresel hem de insan kaynaklı faktörlerin birlikte ele alınması gerektiğini göstermektedir.
- Mevsimsel analizler, yılın farklı zamanlarında yüzey sıcaklığını kontrol eden temel faktörlerin belirlenmesine yardımcı olmakta ve kentsel ısı adası etkisinin yönetiminde mevsime özgü stratejilerin geliştirilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır.
- Yüzey sıcaklığı üzerinde kent dokusu ve hava kirliliği verilerinin etkisini değerlendirmek için yapılan karar ağacı analizlerinde, kent dokusunun yoğunlaşmasının yüzey sıcaklıklarını artırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca, özellikle aerosol indeks ve NO₂ konsantrasyonlarındaki artışın da yüzey sıcaklığında artışa neden olduğu belirlenmiştir. Bu analizler, kentsel dokunun, aerosol indeks ve NO₂ hava kirlilik seviyelerinin yüzey sıcaklıkları üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermiştir.

Çalışma, hava kirleticilerin kentsel iklim üzerinde etkili olduğunu, ancak kentsel dokunun, yeşil alanın ve mekânsal özelliklerin daha büyük etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Günümüzde birçok belediyenin hazırlamış olduğu Sürdürülebilir Enerji ve İklim Eylem Planı'nın (SECAP) daha çok hava kirleticilere odaklandığı görülmektedir. Bu bağlamda, bu çalışma, iklim dayanıklı kentlerin oluşturulmasında hava kirleticilerin, kentsel dokunun ve mekânsal değişkenlerin birleşik etkisinin birlikte değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. İklimle uyumlu kentsel planlama, bütüncül bir yaklaşımı gerektirir. Dolayısıyla tüm bu faktörler, azaltım stratejilerinin geliştirilmesi ve bu stratejilerden azami fayda sağlanabilmesi için dikkate alınmalıdır. Bu çalışma, kentsel alanlarda hava kirleticiler ile birlikte kent dokusunun yerel iklim üzerindeki etkisini inceleyerek literatürdeki önemli bir boşluğu doldurmaktadır. Literatürde mekânsal ve zamansal faktörlerin, kentsel fonksiyonların, yeşil alanların ve arazi kullanımının yerel iklim üzerindeki etkileri yaygın olarak araştırılmış olsa da (Chen vd. 2023; Hu vd. 2023; Liu vd. 2023; Li vd. 2023; Xu ve Rui 2024), özellikle hava kirleticiler ve kent dokusunun birlikte ele alınmasıyla yapılan çalışmalar sınırlıdır (Ulpiani 2021; Liang ve Gong 2020). Bu bağlamda çalışma, kentsel ısı adası (UHI) ve yüzey kentsel ısı adası (SUHI) analizlerine katkı sağlayarak hava kirleticilerin ve kent morfolojisinin yerel iklim üzerindeki etkisini daha kapsamlı bir perspektiften ele almıştır. Elde edilen bulgular, kentsel planlama süreçlerinde hava kalitesi ve iklim adaptasyonu politikalarının geliştirilmesine yönelik bilimsel bir temel sunmaktadır.

Diğer taraftan, kentsel iklim araştırmalarında uzaktan algılama tekniklerinin kullanımına dikkat çekmekte fayda vardır. Uydu görüntüleri, mezo ölçekli çalışmalarda veri toplama ve uygulanabilme açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Ancak daha detaylı analizler için yüksek çözünürlüklü veri sağlamada sınırlamaları bulunmaktadır. Yersel ölçüm istasyonlarının kurulumu ve maliyetlerin yüksek olması ve kent genelinde yeterli sayıda istasyon bulunmaması nedeniyle, uzaktan algılama verileri ile yapılacak ön

analizler büyük önem taşımaktadır. Bu ön analizler sayesinde, sınırlı sayıdaki istasyonların en uygun konumlara yerleştirilmesi sağlanabilmektedir. Bu çalışmada kullanılan TROPOMI, diğer hava kalitesi gözlem uydularına kıyasla daha yüksek mekânsal çözünürlüğe sahip olması, kentsel iklim ve hava kirliliği araştırma çalışmalarında kullanılabilmesini mümkün kılarak bu çalışmaya önemli katkı sağlamaktadır.

Çalışmadan elde edilen bulgular, sürdürülebilir ve iklim değişikliğine dirençli kentlerin planlanmasında, hava kirleticileri ile birlikte kent dokusunun birlikte dikkate alınması gerekliliğini vurgulamaktadır.

Tezin Kısıtlamaları ve Gelecek Çalışmalar için Öneriler:

Bu tez çalışmasında, pandemi döneminin etkilerinden kaçınmak amacıyla 2021-2022 yılları TROPOMI verileri kullanılmıştır. Ancak, TROPOMI'nin yaklaşık altı yıllık veri arşivi göz önüne alındığında, hava kirleticilerin arazi kullanım tipleriyle olan ilişkisinin ve mevsimsel değişimlerinin daha uzun zaman periyotlarında incelenmesi önerilmektedir. Uzun dönemli analizler, hava kirleticilerin kentsel alan kullanımıyla olan ilişkisinin daha iyi anlaşılmasına ve mevsimsel değişimlerin daha net ortaya konmasına olanak sağlayacaktır. Bu kapsamda, gelecek çalışmalarda uzun periyotlu bir veri arşivi, kentsel hava kirleticiler ve arazi kullanımı arasındaki ilişkilerin zamansal değişiminin daha kapsamlı değerlendirilmesine imkân tanıyacaktır. Çalışmada, kış ve sonbahar dönemlerinde yeterli sayıda bulutsuz gün ve kaliteli hava kirlilik verisi elde edilemediğinden, analizler her iki yıl için seçilen günlerin öncesi ve sonrasını kapsayan sınırlı zaman dilimleri üzerinden gerçekleştirilmiştir. Özellikle kış döneminde konut ısıtmasından kaynaklanan SO₂ emisyonlarının yüksek olduğu bilinmektedir. Ancak bu dönemlere ait yeterli veri bulunmaması nedeniyle, SO₂ konsantrasyonlarının mevsimsel değişimi tam olarak değerlendirilememiştir. TROPOMI sensörünün günlük geçiş periyotlarının yerel saat 11:00-13:00 aralığında gerçekleşmesi, özellikle sabah ve akşam trafik yoğunluğundan kaynaklanan NO₂ ile evsel ısınmadan kaynaklanan SO₂ konsantrasyonlarının çalışma kapsamında değerlendirilmesini kısıtlayan önemli bir faktör olmuştur.

Çalışmanın bir diğer kısıtlayıcı unsuru, rüzgâr verilerinin kullanılamamış olmasıdır. Meteorolojik istasyonlardan elde edilen rüzgâr verilerinin dinamik yapısı ve topografyaya olan duyarlılığı, belirli bir zaman dilimindeki veri alımını ve bu verilerin çalışmanın ana ölçeği olan 1 km'lik grid verileriyle ilişkilendirilmesini zorlaştırmaktadır. Ayrıca, İstanbul genelinde hava kirletici konsantrasyonlarının ölçümü için mevcut 28 istasyonun, araştırmanın ana ölçeği olan 1 km²'lik grid sistemine göre kentsel doku içerisinde yeterli veri yoğunluğu sağlayamamasıdır. Bu sebeple, yersel ölçüm teknikleriyle kapsamlı bir analiz gerçekleştirilememiştir. Çalışmada kullanılan uzaktan algılama teknikleri, büyük alanların araştırılmasında önemli avantajlar sağlarken, sunulan mekânsal çözünürlüğün ve zamansal periyotların yeterli bilgi sağlaması önemlidir. Bununla birlikte, çalışmada uzaktan algılama tekniklerinden elde edilen SO₂ hava kirleticisinin yüzey sıcaklığı üzerindeki etkisinin, gelecek çalışmalarda daha hassas yersel ölçümlerle desteklenerek incelenmesi önerilmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Aboulnaga, M., Trombadore, A., Mostafa, M. and Abouaiana, A. 2024. Understanding Urban Heat Island Effect: Causes, Impacts, Factors, and Strategies for Better Livability and Climate Change Mitigation and Adaptation. *Livable Cities: Urban Heat Islands Mitigation for Climate Change Adaptation Through Urban Greening* (ss. 283-366). Cham: Springer International Publishing.
- Abulibdeh, A. 2021. Analysis of urban heat island characteristics and mitigation strategies for eight arid and semi-arid gulf region cities. *Environmental Earth Sciences*, 80(7), 259. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09540-7>
- Adeyemi, A., Ramoelo, A., Cho, M. A. and Strydom, J. 2022. Spatio-temporal analysis of built-up impervious surface area and interplay with land surface temperature in Pretoria, South Africa. *Geocarto International*, 37(25), 7618-7638. <https://doi.org/10.1080/10106049.2021.1980617>
- Aghazadeh, F., Bageri, S., Garajeh, M. K., Ghasemi, M., Mahmodi, S., Khodadadi, E. and Feizizadeh, B. 2023. Spatial-temporal analysis of day-night time SUHI and its relationship between urban land use, NDVI, and air pollutants in Tehran metropolis. *Applied Geomatics*, 15(3), 697-718. <https://doi.org/10.1007/S12518-023-00515-W/TABLES/6>
- Ahmed, B., Kamruzzaman, M., Zhu, X., Rahman, M. S. and Choi, K. 2013. Simulating Land Cover Changes and Their Impacts on Land Surface Temperature in Dhaka, Bangladesh. *Remote Sensing*, 5(11), 5969-5998. <https://doi.org/10.3390/rs5115969>
- Ahmed, F., Hasan Roni, M., Rahman, A., A Salam, S. M., Hasan, M., A, S. M., Roni, M. H. and Salam, S. M. 2023. Comparative investigations on microextraction and conventional air sampling techniques: challenges and future directions. *Al-Bahir Journal for Engineering and Pure Sciences*, 3(2), 5. <https://doi.org/10.55810/2313-0083.1045>
- Akyuz, E. and Kaynak, B. 2019. Use of dispersion model and satellite SO₂ retrievals for environmental impact assessment of coal-fired power plants. *Science of The Total Environment*, 689, 808-819. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.06.464>
- Almeida, C. R. D., Teodoro, A. C. and Gonçalves, A. 2021. Study of the urban heat island (UHI) using remote sensing data/techniques: A systematic review. *Environments*, 8(10), 105.
- Amritha, S., Patel, V. K., Kuttippurath, J. and Hamza, V. 2024. The COVID-19 lockdown induced changes of SO₂ pollution in its Human-made global hotspots. *Global Transitions*, 6, 152-163.
- Andreae, M. O. and Crutzen, P. J. 1997. Atmospheric Aerosols: Biogeochemical Sources and Role in Atmospheric Chemistry. *Science*, 276(5315), 1052-1058. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.276.5315.1052>
- Angel, S. 2023. Urban expansion: theory, evidence and practice. *Buildings and Cities*, 4(1), 124-138. <https://doi.org/10.5334/BC.348>

- Anonymous 1: Ambient (outdoor) air pollution. [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health) [Son erişim tarihi: 21.12.2024]
- Aslam, A. and Rana, I. A. 2022. The use of local climate zones in the urban environment: A systematic review of data sources, methods, and themes. *Urban Climate*, 42, 101120. <https://doi.org/10.1016/J.UCLIM.2022.101120>
- Baek, J. I. and Ban, Y. U. 2020. The Impacts of Urban Air Pollution Emission Density on Air Pollutant Concentration Based on a Panel Model. *Sustainability* 2020, Vol. 12, Page 8401, 12(20), 8401. <https://doi.org/10.3390/SU12208401>
- Baldasano, J. M. 2020. COVID-19 lockdown effects on air quality by NO₂ in the cities of Barcelona and Madrid (Spain). *Science of The Total Environment*, 741, 140353. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.140353>
- Ban-Weiss, G. A., Woods, J. and Levinson, R. 2015. Using remote sensing to quantify albedo of roofs in seven California cities, Part 1: Methods. *Solar Energy*, 115, 777-790. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2014.10.022>
- Becker, E. 2024. Automotive trends report. *Tribology & Lubrication Technology*, 80(6), 96-98.
- Berger, C., Rosentreter, J., Voltersen, M., Baumgart, C., Schmulius, C. and Hese, S. 2017. Spatio-temporal analysis of the relationship between 2D/3D urban site characteristics and land surface temperature. *Remote Sensing of Environment*, 193, 225-243. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.02.020>
- Blei, A. and Angel, S. 2021. Global Monitoring with the *Atlas of Urban Expansion. Urban Remote Sensing*, 247-282. <https://doi.org/10.1002/9781119625865.CH12>
- Bölük, E. 2016. *Köppen İklim Sınıflandırmasına Göre Türkiye İklimi*. T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Araştırma Dairesi Başkanlığı, Klimatoloji Şube Müdürlüğü, Ankara. https://www.mgm.gov.tr/FILES/iklim/iklim_siniflandirmalari/koppen.pdf
- Bursa Temiz Hava Eylem Planı (THEP). (2020-2024). <https://webdosya.csb.gov.tr/db/bursa/icerikler/thep-2020-1-20201117115722.pdf> [Son erişim tarihi: 07.12.2024].
- Bózdziuch, P., Bogacki, M. and Oleniacz, R. 2024. Street Canyon Vegetation—Impact on the Dispersion of Air Pollutant Emissions from Road Traffic. *Sustainability*, 16(23), 10700.
- Campbell-Lendrum, D. and Prüss-Ustün, A. 2019. Climate change, air pollution and noncommunicable diseases. *Bulletin of the World Health Organization*, 97(2), 160. <https://doi.org/10.2471/BLT.18.224295>
- Canitez, F., Alpkokin, P. and Kiremitci, S. T. 2020. Sustainable urban mobility in Istanbul: Challenges and prospects. *Case Studies on Transport Policy*, 8(4), 1148-1157. <https://doi.org/10.1016/J.CSTP.2020.07.005>
- Cersosimo, A., Serio, C. and Masiello, G. 2020. TROPOMI NO₂ tropospheric column data: regridding to 1 km grid-resolution and assessment of their consistency with in situ surface observations. *Remote sensing*, 12(14), 2212.

- Chen, F., Kusaka, H., Bornstein, R., Ching, J., Grimmond, C. S. B., Grossman-Clarke, S., Loridan, T., Manning, K. W., Martilli, A. and Miao, S. 2011. *The integrated WRF/urban modeling system: development, evaluation, and applications to urban environmental problems*.
- Chen, J., Zhan, W., Jin, S., Han, W., Du, P., Xia, J., Lai, J., Li, J., Liu, Z., Li, L., Huang, F. and Ding, H. 2021. Separate and combined impacts of building and tree on urban thermal environment from two- and three-dimensional perspectives. *Building and Environment*, 194, 107650. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107650>
- Chen, L., Ng, E., An, X., Ren, C., Lee, M., Wang, U. and He, Z. 2012. Sky view factor analysis of street canyons and its implications for daytime intra-urban air temperature differentials in high-rise, high-density urban areas of Hong Kong: a GIS-based simulation approach. *International Journal of Climatology*, 32(1), 121-136.
- Chen, R.-C., Dewi, C., Huang, S.-W. and Caraka, R. E. 2020. Selecting critical features for data classification based on machine learning methods. *Journal of Big Data*, 7(1), 52.
- Chen, X. L., Zhao, H. M., Li, P. X. and Yin, Z. Y. 2006. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. *Remote Sensing of Environment*, 104(2), 133-146. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.11.016>
- Chen, X., Yang, J., Zhu, R., Wong, M. S. and Ren, C. 2021. Spatiotemporal impact of vehicle heat on urban thermal environment: A case study in Hong Kong. *Building and Environment*, 205, 108224.
- Chen, Y., Wang, Y. and Zhou, D. 2021. Knowledge Map of Urban Morphology and Thermal Comfort: A Bibliometric Analysis Based on CiteSpace. *Buildings* 2021, Vol. 11, Page 427, 11(10), 427. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS11100427>
- Chen, Y., Yang, J., Yu, W., Ren, J., Xiao, X. and Xia, J. C. 2023. Relationship between urban spatial form and seasonal land surface temperature under different grid scales. *Sustainable Cities and Society*, 89, 104374.
- Chow, W. T. L. and Roth, M. 2006. Temporal dynamics of the urban heat island of Singapore. *International Journal of Climatology*, 26(15), 2243. <https://doi.org/10.1002/joc.1364>
- Çapraz, Ö. and Deniz, A. 2021. Assessment of hospitalizations from asthma, chronic obstructive pulmonary disease and acute bronchitis in relation to air pollution in İstanbul, Turkey. *Sustainable Cities and Society*, 72, 103040. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2021.103040>
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. 2023. Hava Kalitesi İzleme İstasyon Sayısı. <https://cevreselgostergeler.csb.gov.tr/hava-kalitesi-izleme-istasyon-sayisi-i-85736> [Son erişim tarihi: 21.12.2024]
- D'Amato, G., Baena-Cagnani, C. E., Cecchi, L., Annesi-Maesano, I., Nunes, C., Ansotegui, I., D'Amato, M., Liccardi, G., Sofia, M. and Canonica, W. G. 2013. Climate change, air pollution and extreme events leading to increasing prevalence

- of allergic respiratory diseases. *Multidisciplinary Respiratory Medicine*, 8(2), 1-9. <https://doi.org/10.1186/2049-6958-8-12/TABLES/3>
- Değermenci, A. S. and Zengin, H. 2024. Determining the Effect of Green Space Ratio and Urbanization on the Land Surface Temperature, a Case Study in the Istanbul Metropolitan. *Contemporary Problems of Ecology*, 17(5), 743-760. <https://doi.org/10.1134/S1995425524700513/FIGURES/13>
- Demirbaga, Ü., Aujla, G. S., Jindal, A. and Kalyon, O. 2024. Machine Learning for Big Data Analytics. In *Big Data Analytics: Theory, Techniques, Platforms, and Applications* (pp. 193-231). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Digavinti, J., Reddy, S. and Manikiam, B. 2017. Land surface temperature retrieval from LANDSAT data using emissivity estimation. *International Journal of Applied Engineering Research*, 12, 9679-9687.
- Ding, Y., Feng, H., Zou, B. and Nie, Y. 2022. Heterogeneous air pollution controls its correlation to urban heat island: A satellite perspective. *Advances in Space Research*, 69(12), 4252-4262. <https://doi.org/10.1016/J.ASR.2022.03.027>
- Dongshang, Y., Yi, Z., Yuhan, L., Haijin, Z., Fuqi, S. and Wenqing, L. 2021. Monitoring Australia's Forest Fires Based on EMI Remote Sensing NO₂ Technology. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 16(3), 207. <http://gk.hfcas.ac.cn/EN/>
- Duan, S.-B., Lian, Y., Zhao, E., Chen, H., Han, W. and Wu, Z. 2023. A Novel Approach to All-Weather LST Estimation Using XGBoost Model and Multisource Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 61, 1-14. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2023.3324481>
- Dutta, S., Ghosh, S. and Dinda, S. 2021. Urban air-quality assessment and inferring the association between different factors: A comparative study among Delhi, Kolkata and Chennai megacity of India. *Aerosol Science and Engineering*, 5, 93-111.
- Eanes, A. M., Lookingbill, T. R., Hoffman, J. S., Fong, S. S. and Saverino, K. C. 2020. Assessing Inequitable Urban Heat Islands and Air Pollution Disparities with Low-Cost Sensors in Richmond, Virginia. *Sustainability* 2020, Vol. 12, Page 10089, 12(23), 10089. <https://doi.org/10.3390/SU122310089>
- EPA. 2014. *Heat Island Impacts* | US EPA. Environmental Protection Agency US. <https://www.epa.gov/heatislands/heat-island-impacts>
- Erbertseder, T., Taubenbock, H., Esch, T., Gilardi, L., Paeth, H., Marconcini, M. and Dech, S. 2023. Earth Observation-based analysis of NO₂ pollution and settlement growth in megacities. *2023 Joint Urban Remote Sensing Event, JURSE 2023*. <https://doi.org/10.1109/JURSE57346.2023.10144190>
- Eskes, H., Van Geffen, J., Boersma, F., Eichmann K. U., Apituley A., Pedernana M., Sneep M., Veefkind J. P. and Loyola, D. 2022. *Sentinel-5 precursor/TROPOMI Level 2 Product User Manual Nitrogen dioxide*. 4.
- Faisal, A. Al, Rahman, M. M. and Haque, S. 2022. Retrieving spatial variation of aerosol level over urban mixed land surfaces using Landsat imageries: Degree of air pollution in Dhaka Metropolitan Area. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 126, 103074. <https://doi.org/10.1016/J.PCE.2021.103074>

- Fatima, F. 2021. A review on acid rain: An environmental threat. *Pure and Applied Biology*, 10(1). <https://doi.org/10.19045/BSPAB.2021.100032>
- Feng, X., Wei, S. and Wang, S. 2020. Temperature inversions in the atmospheric boundary layer and lower troposphere over the Sichuan Basin, China: Climatology and impacts on air pollution. *Science of The Total Environment*, 726, 138579. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.138579>
- Flores, R. M., Mertoğlu, E., Özdemir, H., Akkoyunlu, B. O., Demir, G., Ünal, A. and Tayanç, M. 2020. A high-time resolution study of PM_{2.5}, organic carbon, and elemental carbon at an urban traffic site in Istanbul. *Atmospheric Environment*, 223, 117241. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2019.117241>
- Fuladlu, K. and Altan, H. 2021. Examining land surface temperature and relations with the major air pollutants: A remote sensing research in case of Tehran. *Urban Climate*, 39, 100958. <https://doi.org/10.1016/J.UCLIM.2021.100958>
- Gao, B. C. 1996. NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257-266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
- Gartland, L. M. 2012. Heat islands: understanding and mitigating heat in urban areas. Routledge.
- Goldberg, D. L., Anenberg, S. C., Kerr, G. H., Mohegh, A., Lu, Z. and Streets, D. G. 2021. TROPOMI NO₂ in the United States: A Detailed Look at the Annual Averages, Weekly Cycles, Effects of Temperature, and Correlation With Surface NO₂ Concentrations. *Earth's Future*, 9(4), e2020EF001665. <https://doi.org/10.1029/2020EF001665>
- Grennfelt, P., Engleryd, A., Forsius, M., Hov, Ø., Rodhe, H. and Cowling, E. 2020. Acid rain and air pollution: 50 years of progress in environmental science and policy. *Ambio*, 49(4), 849-864. <https://doi.org/10.1007/S13280-019-01244-4/FIGURES/8>
- Guo, G., Wu, Z., Xiao, R., Chen, Y., Liu, X. and Zhang, X. 2015. Impacts of urban biophysical composition on land surface temperature in urban heat island clusters. *Landscape and Urban Planning*, 135, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.11.007>
- Gündoğdu, S. and Elbir, T. 2024. Elevating hourly PM_{2.5} forecasting in Istanbul, Türkiye: Leveraging ERA5 reanalysis and genetic algorithms in a comparative machine learning model analysis. *Chemosphere*, 364, 143096. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2024.143096>
- Haddad, S., Ulpiani, G., Paolini, R., Synnefa, A. and Santamouris, M. 2020. Experimental and Theoretical analysis of the urban overheating and its mitigation potential in a hot arid city – Alice Springs. *Architectural Science Review*, 63(5), 425-440. <https://doi.org/10.1080/00038628.2019.1674128>
- Hassan, N. A., Hashim, Z. and Hashim, J. H. 2016. Impact of Climate Change on Air Quality and Public Health in Urban Areas. *Asia-Pacific Journal of Public Health*, 28(2 Suppl), 38S-48S. <https://doi.org/10.1177/1010539515592951>

- He, B. J., Ding, L. and Prasad, D. 2020. Relationships among local-scale urban morphology, urban ventilation, urban heat island and outdoor thermal comfort under sea breeze influence. *Sustainable Cities and Society*, 60, 102289. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2020.102289>
- HEAL. 2018. Çanakkale, İzmir ve Tekirdağ'da Kömürden Elektrik Üretimi ve Sağlık. http://www.env-health.org/IMG/pdf/20180319_heal_toolkit_tr_canakkale_izmir_tekirdag_final_web.pdf [Son Erişim Tarihi: 26.12.2024]
- Health Effects Institute (HEI). 2024. State of Global Air 2024. Special Report. Boston, MA:Health Effects Institute.
- Heaviside, C., Macintyre, H. and Vardoulakis, S. 2017. The Urban Heat Island: Implications for Health in a Changing Environment. *Current environmental health reports*, 4(3), 296-305. <https://doi.org/10.1007/S40572-017-0150-3/FIGURES/1>
- Hereher, M., Eissa, R., Alqasemi, A. and El Kenawy, A. M. 2022. Assessment of air pollution at Greater Cairo in relation to the spatial variability of surface urban heat island. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(15), 21412-21425. <https://doi.org/10.1007/S11356-021-17383-9/FIGURES/10>
- Hidalgo-García, D. and Arco-Díaz, J. 2023. Spatiotemporal analysis of the surface urban heat island (SUHI), air pollution and disease pattern: an applied study on the city of Granada (Spain). *Environmental Science and Pollution Research*, 30(20), 57617-57637. <https://doi.org/10.1007/S11356-023-26564-7/TABLES/7>
- Hoffmann, B. 2019. Air Pollution in Cities: Urban and Transport Planning Determinants and Health in Cities. *Integrating Human Health into Urban and Transport Planning: A Framework*, 425-441. https://doi.org/10.1007/978-3-319-74983-9_21
- Hong, C., Zhang, Q., Zhang, Y., Davis, S. J., Tong, D., Zheng, Y., Liu, Z., Guan, D., He, K. and Schellnhuber, H. J. 2019. Impacts of climate change on future air quality and human health in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(35), 17193-17200. https://doi.org/10.1073/PNAS.1812881116/SUPPL_FILE/PNAS.1812881116.SAPP.PDF
- Howard, L. 1818. The Climate of London: Deduced from Meteorological Observations, Made at Different Places in the Neighbourhood of the Metropolis; W. Phillips: London, England.
- Hu, Y., Wu, C., Meadows, M. E. and Feng, M. 2023. Pixel level spatial variability modeling using SHAP reveals the relative importance of factors influencing LST. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(3), 407. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-10950-2>
- Huang, Q., Yang, R., Liu, J., Xie, T. and Liu, J. 2024. Investigation of the mechanism behind the surge in nitrogen dioxide emissions in engines transitioning from pure diesel operation to methanol/diesel dual-fuel operation. *Fuel Processing Technology*, 264, 108131. <https://doi.org/10.1016/J.FUPROC.2024.108131>

- Huang, Y., Lei, C., Liu, C. H., Perez, P., Forehead, H., Kong, S. and Zhou, J. L. 2021. A review of strategies for mitigating roadside air pollution in urban street canyons. *Environmental Pollution*, 280, 116971. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2021.116971>
- İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB). 2021. İstanbul İklim Değişikliği Eylem Planı, https://cevre.ibb.istanbul/wp-content/uploads/2022/01/ist_iklim_degisikligi_eylem_plani.pdf [Son erişim tarihi: 10.12.2024].
- Jiang, H., Liao, H., Pye, H. O. T., Wu, S., Mickley, L. J., Seinfeld, J. H. and Zhang, X. Y. 2013. Projected effect of 2000–2050 changes in climate and emissions on aerosol levels in China and associated transboundary transport. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(16), 7937-7960.
- Jubaer, A., Hossain, R., Ahmed, A. and Hossain, Md. S. 2024. *Factors Influencing Spatiotemporal Variability of NO₂ Concentration in Urban Area: A GIS and Remote Sensing-Based Approach*. <https://doi.org/10.21203/RS.3.RS-4672218/V1>
- Judd, L. M., Al-Saadi, J. A., Janz, S. J., Kowalewski, M. J. G., Bradley Pierce, R., Szykman, J. J., Valin, L. C., Swap, R., Cede, A., Mueller, M., Tiefengraber, M., Abuhassan, N. and Williams, D. 2019. Evaluating the impact of spatial resolution on tropospheric NO₂ column comparisons within urban areas using high-resolution airborne data. *Atmospheric Measurement Techniques*, 12(11), 6091-6111. <https://doi.org/10.5194/AMT-12-6091-2019>
- Kenanoğlu, Z., Malkoç True, E., Kılıçaslan Deniz, Ç., Deniz, B. and Özeren Alkan, M. 2024. Residents' Perception of Urban Water System-Based Environmental Issues. *Water* 2024, Vol. 16, Page 1846, 16(13), 1846. <https://doi.org/10.3390/W16131846>
- Khan, M., Tariq, S. and Haq, Z. U. 2023. Variations in the aerosol index and its relationship with meteorological parameters over Pakistan using remote sensing. *Environmental Science and Pollution Research International*, 30(16), 47913. <https://doi.org/10.1007/S11356-023-25613-5>
- Khodzher, T. V., Zagaynov, V. A., Lushnikov, A. A., Chausov, V. D., Zhamsueva, G. S., Zayakhanov, A. S. ... and Agranovski, I. E. 2021. Study of aerosol nano-and submicron particle compositions in the atmosphere of Lake Baikal during natural fire events and their interaction with water surface. *Water, Air, & Soil Pollution*, 232(7), 266.
- KİÇDR (Kocaeli İli 2022 Yılı Çevre Durum Raporu). 2023. <https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/kocaeli-ilcdr-2022-20230706104825.pdf> [Son erişim tarihi: 07.12.2024].
- Kim, M. J., Park, R. J., Ho, C.-H., Woo, J.-H., Choi, K.-C., Song, C.-K. and Lee, J.-B. 2015. Future ozone and oxidants change under the RCP scenarios. *Atmospheric Environment*, 101, 103-115.
- Kim, S. W. and Brown, R. D. 2021. Urban heat island (UHI) intensity and magnitude estimations: A systematic literature review. *Science of The Total Environment*, 779, 146389.

- Kjellstrom, T. and McMichael, A. J. 2013. Climate change threats to population health and well-being: the imperative of protective solutions that will last. *Global health action*, 6(1), 20816.
- Kowalska, M., Skrzypek, M., Kowalski, M. and Cyrus, J. 2020. Effect of NO_x and NO₂ Concentration Increase in Ambient Air to Daily Bronchitis and Asthma Exacerbation, Silesian Voivodeship in Poland. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2020, Vol. 17, Page 754, 17(3), 754. <https://doi.org/10.3390/IJERPH17030754>
- Ku, C. A. and Tsai, S. S. 2024. Simulating the effects of planning strategies on urban heat island and air pollution mitigation in an urban renewal area. *Journal of Geographical Systems*, 1-22.
- Kuşçu Şimşek, Ç. 2013. *İstanbul'da Kentsel İklim Üzerine Antropojenik Etkiler: Kent Isı Adalarının İncelenmesi*. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Şehir ve Bölge Planlama Anabilim Dalı.
- Kuşçu Şimşek, Ç. and Arabacı, D. 2021. Simulation of the climatic changes around the coastal land reclamation areas using artificial neural networks. *Urban Climate*, 38, 100914. <https://doi.org/10.1016/J.UCLIM.2021.100914>
- Kuşçu Şimşek, Ç., Arabacı, D., Yücel, C. and Öztürk, B. 2024. Monitoring the climatic effects of street tree plantation in different urban patterns by synthetic image based BPNN simulations. *Building and Environment*, 250, 111173. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2024.111173>
- Landgraf, J., Borsdorff, T., Langerock, B. and Keppens, A. 2020. *S5P mission performance centre carbon monoxide (L2 CO) readme*. S5P-MPC-SRON-PRF-CO, 1.5, SRON Netherlands Institute for Space Research.
- Li, H., Li, Y., Wang, T., Wang, Z., Gao, M. and Shen, H. 2021. Quantifying 3D building form effects on urban land surface temperature and modeling seasonal correlation patterns. *Building and Environment*, 204, 108132.
- Li, H., Meier, F., Lee, X., Chakraborty, T., Liu, J., Schaap, M. and Sodoudi, S. 2018. Interaction between urban heat island and urban pollution island during summer in Berlin. *Science of The Total Environment*, 636, 818-828. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2018.04.254>
- Li, S., Zou, B., Ma, X., Liu, N., Zhang, Z., Xie, M. and Zhi, L. 2023. Improving air quality through urban form optimization: A review study. *Building and Environment*, 110685.
- Li, X. X. and Norford, L. K. 2016. Evaluation of cool roof and vegetations in mitigating urban heat island in a tropical city, Singapore. *Urban Climate*, 16, 59-74. <https://doi.org/10.1016/J.UCLIM.2015.12.002>
- Li, X., Zhou, Y., Yu, S., Jia, G., Li, H. and Li, W. 2019. Urban heat island impacts on building energy consumption: A review of approaches and findings. *Energy*, 174, 407-419. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2019.02.183>
- Li, Y., Schubert, S., Kropp, J. P. and Rybski, D. 2020. On the influence of density and morphology on the Urban Heat Island intensity. *Nature Communications*, 11(1), 1-9. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16461-9>

- Li, L., Zhan, W., Hu, L., Chakraborty, T. C., Wang, Z., Fu, P., ... and Wang, S. 2023. Divergent urbanization-induced impacts on global surface urban heat island trends since 1980s. *Remote Sensing of Environment*, 295, 113650.
- Liang, L. and Gong, P. 2020. Urban and air pollution: a multi-city study of long-term effects of urban landscape patterns on air quality trends. *Scientific reports*, 10(1), 18618.
- Liang, Z., Huang, J., Wang, Y., Wei, F., Wu, S., Jiang, H., Zhang, X. and Li, S. 2021. The mediating effect of air pollution in the impacts of urban form on nighttime urban heat island intensity. *Sustainable Cities and Society*, 74, 102985. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2021.102985>
- Lin, A., Wu, H., Luo, W., Fan, K. and Liu, H. 2024. How does urban heat island differ across urban functional zones? Insights from 2D/3D urban morphology using geospatial big data. *Urban Climate*, 53, 101787. <https://doi.org/10.1016/J.UCLIM.2023.101787>
- Lin, Y., Jim, C. Y., Deng, J. and Wang, Z. 2018. Urbanization effect on spatiotemporal thermal patterns and changes in Hangzhou (China). *Building and Environment*, 145, 166-176. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2018.09.020>
- Liu, B. ;, Guo, X. ;, Jiang, J., Liu, B., Guo, X. and Jiang, J. 2023. How Urban Morphology Relates to the Urban Heat Island Effect: A Multi-Indicator Study. *Sustainability* 2023, Vol. 15, Page 10787, 15(14), 10787. <https://doi.org/10.3390/SU151410787>
- Liu, T., Chan, A. W. and Abbatt, J. P. 2021. Multiphase oxidation of sulfur dioxide in aerosol particles: Implications for sulfate formation in polluted environments. *Environmental Science & Technology*, 55(8), 4227-4242.
- Liu, X., Zhao, W., Meng, M., Fu, Z., Xu, L., Zha, Y., Yue, J., Zhang, S. and Zhang, J. 2018. Comparative effects of simulated acid rain of different ratios of SO_4^{2-} to NO_3^- on fine root in subtropical plantation of China. *Science of The Total Environment*, 618, 336-346. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2017.11.073>
- Liu, Y., Xuan, C., Xu, Y., Fu, N., Xiong, F. and Gan, L. 2022. Local climate effects of urban wind corridors in Beijing. *Urban Climate*, 43, 101181. <https://doi.org/10.1016/J.UCLIM.2022.101181>
- Liu, Y., Zhao, H., Zhao, G., Cao, X., Zhang, X. and Xiu, A. 2023. Estimates of dust emissions and organic carbon losses induced by wind erosion in farmland worldwide from 2017 to 2021. *Agriculture*, 13(4), 781.
- Lundberg, S. M., Erion, G. G. and Lee, S.-I. 2018. Consistent individualized feature attribution for tree ensembles. *arXiv preprint arXiv:1802.03888*.
- Lundberg, S. M. and Lee, S.-I. 2017. A unified approach to interpreting model predictions. *Advances in neural information processing systems*, 30.
- Ma, D., Zhang, Q., Huang, Q. and Liu, B. 2024. Analysis of temporal and spatial changes in urban air pollution and influencing factors from 2017 to 2021—a case study of 54 cities in the Yellow River Basin. *Environment, Development and Sustainability*, 1-20.

- Malings, C. 2023. *Satellite Data for Air Quality Environmental Justice and Equity Applications Part 2: Satellite Remote Sensing of Air Quality for Environmental Justice*.
- Masson, V., Lemonsu, A., Hidalgo, J. and Voogt, J. 2020. Urban climates and climate change. *Annual Review of Environment and Resources*, 45(Volume 45, 2020), 411-444. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV-ENVIRON-012320-083623/CITE/REFWORKS>
- Mathew, A., Arunab, K. S. and Sharma, A. K. 2024. Revealing the urban heat Island: Investigating spatiotemporal surface temperature dynamics, modeling, and interactions with controllable and non-controllable factors. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 35, 101219. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101219>
- Mathew, A., Khandelwal, S. and Kaul, N. 2018. Analysis of diurnal surface temperature variations for the assessment of surface urban heat island effect over Indian cities. *Energy and Buildings*, 159, 271-295. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2017.10.062>
- Mathew, A., Sreekumar, S., Khandelwal, S. and Kumar, R. 2019. Prediction of land surface temperatures for surface urban heat island assessment over Chandigarh city using support vector regression model. *Solar Energy*, 186, 404-415. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.04.001>
- McPhearson, T., Haase, D., Kabisch, N. and Gren, Å. 2016. Advancing understanding of the complex nature of urban systems. *Ecological Indicators*, 70, 566-573.
- Mishra, M. K. and Mathew, A. 2022. Investigating the spatio-temporal correlation between urban heat island and atmospheric pollution island interaction over Delhi, India using geospatial techniques. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(20), 1591. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10854-4>
- Moradi, M. and Görer Tamer, N. 2017. The Urban Growth Effects Over the Local Climate Change in the Case of Bursa. *PLANLAMA-PLANNING*, 27.
- Mussetti, G., Davin, E. L., Schwaab, J., Acero, J. A., Ivanchev, J., Singh, V. K., Jin, L. and Seneviratne, S. I. 2022. Do Electric Vehicles Mitigate Urban Heat? The Case of a Tropical City. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 810342. <https://doi.org/10.3389/FENV.2022.810342/BIBTEX>
- Narazaki, Y., Sakoda, A., Takahashi, S. and Momoshima, N. 2021. Cosmogenic ⁷Be: Particle size distribution and chemical composition of ⁷Be-carrying aerosols in the atmosphere in Japan. *Journal of Environmental Radioactivity*, 237, 106690. <https://doi.org/10.1016/J.JENVRAD.2021.106690>
- Nazari, S., Shahhoseini, O., Sohrabi-Kashani, A., Davari, S., Sahabi, H. and Rezaeian, A. 2012. SO₂ pollution of heavy oil-fired steam power plants in Iran. *Energy Policy*, 43, 456-465. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2012.01.040>
- Neinavaz, E., Skidmore, A. K. and Darvishzadeh, R. 2020. Effects of prediction accuracy of the proportion of vegetation cover on land surface emissivity and temperature using the NDVI threshold method. *International Journal of Applied Earth*

- Observation and Geoinformation*, 85.
<https://doi.org/10.1016/J.JAG.2019.101984>
- Ng, E., Yuan, C., Chen, L., Ren, C. and Fung, J. C. H. 2011. Improving the wind environment in high-density cities by understanding urban morphology and surface roughness: A study in Hong Kong. *Landscape and Urban Planning*, 101(1), 59-74. <https://doi.org/10.1016/J.LANDURBPLAN.2011.01.004>
- Ngarambe, J., Joen, S. J., Han, C.-H. and Yun, G. Y. 2021. Exploring the relationship between particulate matter, CO, SO₂, NO₂, O₃ and urban heat island in Seoul, Korea. *Journal of Hazardous Materials*, 403, 123615. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123615>
- Niemeijer, S. 2017. ESA Atmospheric Toolbox. *EGUGA*, 19, 8286.
- Niemelä, J. 1999. Ecology and urban planning. *Biodiversity & Conservation* 1999 8:1, 8(1), 119-131. <https://doi.org/10.1023/A:1008817325994>
- Oke, T. R. 1982. The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1-24. <https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>
- Oke, T. R., Mills, G., Christen, A. and Voogt, J. A. 2017. *Urban climates*. Cambridge university press.
- Orellano, P., Reynoso, J. and Quaranta, N. 2021. Short-term exposure to sulphur dioxide (SO₂) and all-cause and respiratory mortality: A systematic review and meta-analysis. *Environment International*, 150, 106434. <https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2021.106434>
- Öncel, H. and Levend, S. 2023. The effects of urban growth on natural areas: the three metropolitan areas in Türkiye. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(7), 1-20. <https://doi.org/10.1007/S10661-023-11383-7/TABLES/6>
- Pande, C. B., Egbueri, J. C., Costache, R., Sidek, L. M., Wang, Q., Alshehri, F., Din, N. M., Gautam, V. K. and Chandra Pal, S. 2024. Predictive modeling of land surface temperature (LST) based on Landsat-8 satellite data and machine learning models for sustainable development. *Journal of Cleaner Production*, 444, 141035. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141035>
- Paolini, R. and Santamouris, M. 2022. *Urban Climate Change and Heat Islands: Characterization, Impacts, and Mitigation*. Elsevier.
- OECD/European Commission. 2020. Cities in the World: A New Perspective on Urbanisation, OECD Urban Studies, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/d0efcbda-en>.
- Quah, A. K. L. and Roth, M. 2012. Diurnal and weekly variation of anthropogenic heat emissions in a tropical city, Singapore. *Atmospheric Environment*, 46, 92-103.
- Quan, J., Zhan, W., Chen, Y., Wang, M. and Wang, J. 2016. Time series decomposition of remotely sensed land surface temperature and investigation of trends and seasonal variations in surface urban heat islands. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(6), 2638-2657. <https://doi.org/10.1002/2015JD024354>

- Rahaman, S. N., Nelson, J., Ali, A. A. Bin, Shermin, N., Pricope, N. G., Al Kafy, A., Sabuj, M. S. and Toa, S. S. 2024. A Multivariate Geostatistical Framework to Assess the Spatio-Temporal Dynamics of Air Pollution and Land Surface Temperature in Bangladesh. *Earth Systems and Environment*. <https://doi.org/10.1007/s41748-024-00418-9>
- Rahaman, Z. A., Kafy, A. Al, Saha, M., Rahim, A. A., Almulhim, A. I., Rahaman, S. N., Fattah, M. A., Rahman, M. T., Kalaivani, S., Faisal, A. Al. and Rakib, A. A. 2022. Assessing the impacts of vegetation cover loss on surface temperature, urban heat island and carbon emission in Penang city, Malaysia. *Building and Environment*, 222, 109335. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2022.109335>
- Rodríguez-Sánchez, A., Santiago, J. L., Vivanco, M. G., Sanchez, B., Rivas, E., Martilli, A. and Martín, F. 2024. How do meteorological conditions impact the effectiveness of various traffic measures on NOx concentrations in a real hot-spot?. *Science of the Total Environment*, 954, 176667.
- Rohit, P., Mira Shivani, S. and Singh, A. 2023. Remote Sensing of the Forest Fire Pollutant Flow of the 2019 Australian Bush Fire. *2023 IEEE India Geoscience and Remote Sensing Symposium, InGARSS 2023*. <https://doi.org/10.1109/INGARSS59135.2023.10490389>
- Sabrin, S., Karimi, M. and Nazari, R. 2020. Developing Vulnerability Index to Quantify Urban Heat Islands Effects Coupled with Air Pollution: A Case Study of Camden, NJ. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 2020, Vol. 9, Page 349, 9(6), 349. <https://doi.org/10.3390/IJGI9060349>
- Scarano, M. and Mancini, F. 2017. Assessing the relationship between sky view factor and land surface temperature to the spatial resolution. *International Journal of Remote Sensing*, 38(23), 6910-6929. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1368099>
- Schneider, P., Hamer, P. D., Kylling, A., Shetty, S. and Stebel, K. 2021. Spatiotemporal Patterns in Data Availability of the Sentinel-5P NO2 Product over Urban Areas in Norway. *Remote Sensing* 2021, Vol. 13, Page 2095, 13(11), 2095. <https://doi.org/10.3390/RS13112095>
- Seo, J., Park, D. S. R., Kim, J. Y., Youn, D., Lim, Y. B. and Kim, Y. 2018. Effects of meteorology and emissions on urban air quality: a quantitative statistical approach to long-term records (1999–2016) in Seoul, South Korea. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(21), 16121-16137.
- Shahfahad, Naikoo, M. W., Towfiqul Islam, A. R. Md., Mallick, J. and Rahman, A. 2022. Land use/land cover change and its impact on surface urban heat island and urban thermal comfort in a metropolitan city. *Urban Climate*, 41, 101052. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.101052>
- Sharifi, A. 2020. Trade-offs and conflicts between urban climate change mitigation and adaptation measures: A literature review. *Journal of Cleaner Production*, 276, 122813. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.122813>
- Sharma, V., Ghosh, S., Singh, S., Vishwakarma, D. K., Al-Ansari, N., Tiwari, R. K. and Kuriqi, A. 2022. Spatial Variation and Relation of Aerosol Optical Depth with

- LULC and Spectral Indices. *Atmosphere* 2022, Vol. 13, Page 1992, 13(12), 1992. <https://doi.org/10.3390/ATMOS13121992>
- Shi, H., Song, X. and Zeng, S. 2023. Impact of the Urban Heat Island Effect on Ozone Pollution in Chengdu City, China. *Chinese Geographical Science* 2023 33:6, 33(6), 1017-1032. <https://doi.org/10.1007/S11769-023-1391-8>
- Siddiqui, A., Halder, S., Chauhan, P. and Kumar, P. 2020. COVID-19 Pandemic and City-Level Nitrogen Dioxide (NO₂) Reduction for Urban Centres of India. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 48(7), 999-1006. <https://doi.org/10.1007/S12524-020-01130-7/FIGURES/5>
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X.-Y., Wang, W. and Powers, J. G. 2008. A description of the advanced research WRF version 3. *NCAR technical note*, 475(125), 10-5065.
- Sobrino, J. A., Jimenez-Munoz, J. C., Soria, G., Romaguera, M., Guanter, L., Moreno, J., Plaza, A. and Martinez, P. 2008. Land Surface Emissivity Retrieval From Different VNIR and TIR Sensors. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(2), 316-327. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.904834>
- Son, J. M., Eum, J. H. and Kim, S. 2022. Wind corridor planning and management strategies using cold air characteristics: The application in Korean cities. *Sustainable Cities and Society*, 77, 103512. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2021.103512>
- Srivastava, V. T., Sharma, A. and Jadon, S. S. 2024. A review of the formation, mitigation strategies from 50 years of global urban heat island studies. *Environment, Development and Sustainability*, 1-18.
- Steenenveld, G. J., Klompmaker, J. O., Groen, R. J. A. and Holtslag, A. A. M. 2018. An urban climate assessment and management tool for combined heat and air quality judgements at neighbourhood scales. *Resources, Conservation and Recycling*, 132, 204-217. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2016.12.002>
- Stein Zweers, D. and Wagner, T. 2021. *S5P Mission Performance Centre UV Aerosol Index [L2_AER_AI] Readme*. <https://doi.org/10.5270/S5P-3dgz66p>
- Stewart, I. D. and Oke, T. R. 2012. Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879-1900. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>
- Suthar, G., Singh, S., Kaul, N. and Khandelwal, S. 2024a. Prediction of land surface temperature using spectral indices, air pollutants, and urbanization parameters for Hyderabad city of India using six machine learning approaches. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 35, 101265. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101265>
- Suthar, G., Singh, S., Kaul, N. and Khandelwal, S. 2024b. Understanding the multifaceted influence of urbanization, spectral indices, and air pollutants on land surface temperature variability in Hyderabad, India. *Journal of Cleaner Production*, 470, 143284. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143284>
- Şeker, M., Saldanılı, A. ve Bektaş, H. 2023. İller Arası Rekabet Endeksi: 2021 – 2022. İÜ Şehir Politikaları Uygulama ve Araştırma Merkezi Şehir Araştırma Notları, 6.

- Tan, W., Wei, C., Lu, Y. and Xue, D. 2021. Reconstruction of all-weather daytime and nighttime MODIS aqua-terra land surface temperature products using an XGBoost approach. *Remote Sensing*, 13(22), 4723.
- Tarım ve Orman Bakanlığı. 2019. *Corine Projesi*. <https://corine.tarimorman.gov.tr/corineportal/index.html>
- Temiz Hava Hakkı Platformu (THHP). 2023. *Kara Rapor 2022: Türkiye'nin Tüm İlleri Kirli Hava Soluyor! - Temiz Hava Hakkı*. https://www.temizhavahakki.org/wp-content/uploads/2023/03/KaraRapor_v6.pdf
- Temiz Hava Hakları Platformu (THHP). 2019. *Kükürtdioksit (SO₂) Emisyon Raporu - Temiz Hava Hakkı*. <https://www.temizhavahakki.org/so2/>
- Thi Nguyen, H. and Kim, K. H. 2006. Evaluation of SO₂ pollution levels between four different types of air quality monitoring stations. *Atmospheric Environment*, 40(36), 7066-7081. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2006.06.011>
- Tian, Y., Yao, X. and Chen, L. 2019. Analysis of spatial and seasonal distributions of air pollutants by incorporating urban morphological characteristics. *Computers, Environment and Urban Systems*, 75, 35-48. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2019.01.003>
- Tomasi, C. and Lupi, A. 2017. Primary and secondary sources of atmospheric aerosol. *Atmospheric Aerosols: Life Cycles and Effects on Air Quality and Climate*, 1-86.
- Tu, L., Qin, Z., Li, W., Geng, J., Yang, L., Zhao, S., Zhan, W. and Wang, F. 2016. Surface urban heat island effect and its relationship with urban expansion in Nanjing, China. *Journal of Applied Remote Sensing*, 10(2), 026037. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.10.026037>
- Türkiye Tabipler Birliği (TTB). 2012. *Dilovası Raporu*. <https://www.ttb.org.tr/kutuphane/dilovasirpr.pdf> [Son erişim tarihi: 05.12.2024].
- Ulpiani, G. 2021. On the linkage between urban heat island and urban pollution island: Three-decade literature review towards a conceptual framework. *The Science of the Total Environment*, 751, 141727. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141727>
- UN-Habitat. 2019. Annual report 2019 | UN-Habitat. <https://unhabitat.org/annual-report-2019>
- UN-Habitat: United Nations Human Settlements Programme. 2022. *World Cities Report 2022: Envisaging the future of cities*. United Nations Research Institute for Social Development. <https://unhabitat.org/world-cities-report-2022-envisaging-the-future-of-cities>
- USGS. 2019. Landsat 8 Data Users Handbook. *NASA*, 8, 114.
- Van Geffen, J. H. G. M., Eskes, H. J., Boersma, K. F. and Veefkind, J. P. 2016. *TROPOMI ATBD of the total and tropospheric NO₂ data products document number : S5P-KNMI-L2-0005-RP*. <https://sentinel.esa.int/documents/247904/2476257/sentinel-5p-tropomi-atbd-no2-data-products>
- Virghileanu, M., Săvulescu, I., Mihai, B. A., Nistor, C. and Dobre, R. 2020. Nitrogen Dioxide (NO₂) Pollution Monitoring with Sentinel-5P Satellite Imagery over

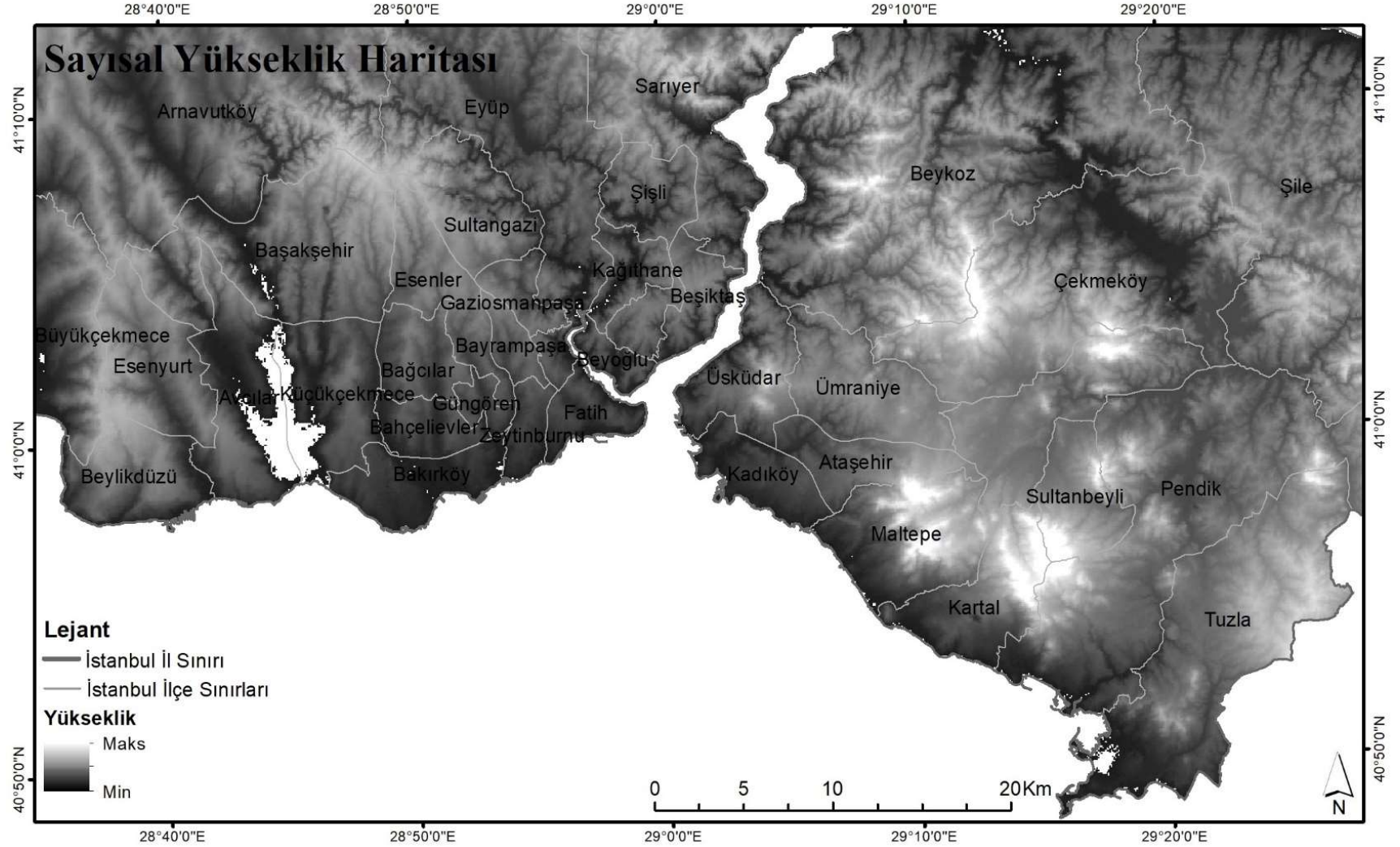
- Europe during the Coronavirus Pandemic Outbreak. *Remote Sensing* 2020, Vol. 12, Page 3575, 12(21), 3575. <https://doi.org/10.3390/RS12213575>
- Vujovic, S., Haddad, B., Karaky, H., Sebaibi, N. and Boutouil, M. 2021. Urban Heat Island: Causes, Consequences, and Mitigation Measures with Emphasis on Reflective and Permeable Pavements. *CivilEng*, 2(2), 459-484. <https://doi.org/10.3390/civileng2020026>
- Wai, K. M., Xiao, L. and Tan, T. Z. 2021. Improvement of the Outdoor Thermal Comfort by Water Spraying in a High-Density Urban Environment under the Influence of a Future (2050) Climate. *Sustainability* 2021, Vol. 13, Page 7811, 13(14), 7811. <https://doi.org/10.3390/SU13147811>
- Wang, F., Shaheen, A., Yousefi, R., Ge, Q., Wu, R., Lelieveld, J., Kaskaoutis, D. G., Lu, Z., Zhan, Y. and Zhou, Y. 2024. Long-Term Dynamics of Atmospheric Sulfur Dioxide in Urban and Rural Regions of China: Urbanization and Policy Impacts. *Remote Sensing*, 16(2), 391. <https://doi.org/10.3390/RS16020391/S1>
- Wang, Y., Du, H., Xu, Y., Lu, D., Wang, X. and Guo, Z. 2018. Temporal and spatial variation relationship and influence factors on surface urban heat island and ozone pollution in the Yangtze River Delta, China. *Science of The Total Environment*, 631-632, 921-933. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2018.03.050>
- Wang, Y., Guo, Z. and Han, J. 2021. The relationship between urban heat island and air pollutants and them with influencing factors in the Yangtze River Delta, China. *Ecological Indicators*, 129, 107976. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2021.107976>
- Wang, Y., Yuan, Y., Wang, Q., Liu, C. G., Zhi, Q. and Cao, J. 2020. Changes in air quality related to the control of coronavirus in China: Implications for traffic and industrial emissions. *Science of The Total Environment*, 731, 139133. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.139133>
- Wen, Y., Xiao, J., Yang, J., Cai, S., Liang, M. and Zhou, P. 2022. Quantitatively disentangling the geographical impacts of topography on PM2.5 pollution in China. *Remote Sensing*, 14(24), 6309.
- Wong, G. K. L. and Jim, C. Y. 2017. Urban-microclimate effect on vector mosquito abundance of tropical green roofs. *Building and Environment*, 112, 63-76. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2016.11.028>
- World Health Organization (WHO). 2016. *Ambient air pollution: a global assessment of exposure and burden of disease*. World Health Organization.
- World Meteorological Organization (WMO). 2017. Catalysing Innovation in Weather Science:WWRP Implementation Plan 2016-2023. <https://community.wmo.int/en/activity-areas/wwrp> [Son erişim tarihi: 01.06.2017].
- Wu, K. L. and Shan, L. 2024. Make Way for the Wind—Promoting Urban Wind Corridor Planning by Integrating RS, GIS, and CFD in Urban Planning and Design to Mitigate the Heat Island Effect. *Atmosphere* 2024, Vol. 15, Page 257, 15(3), 257. <https://doi.org/10.3390/ATMOS15030257>

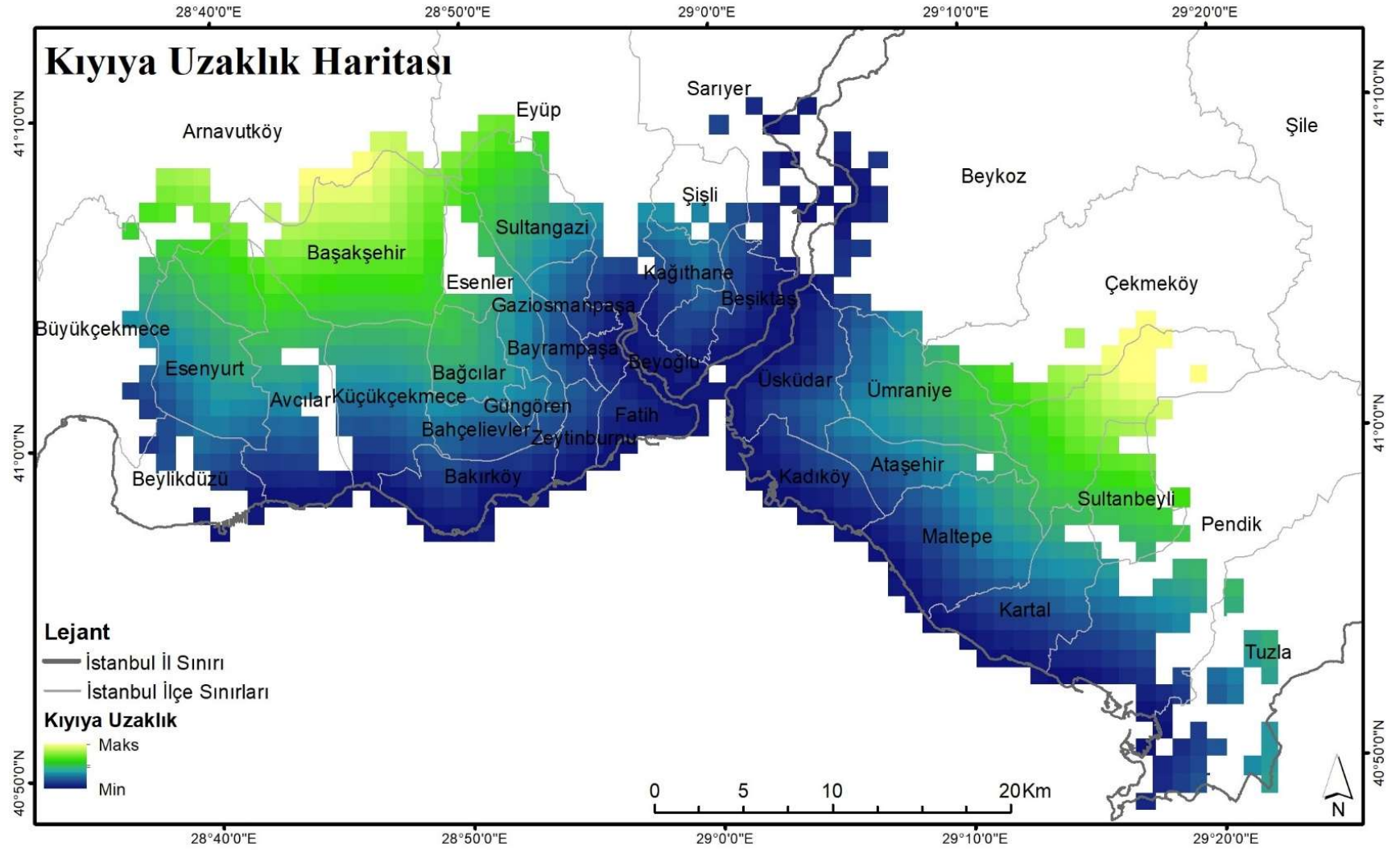
- Xiang, Y., Ye, Y., Peng, C., Teng, M. and Zhou, Z. 2022. Seasonal variations for combined effects of landscape metrics on land surface temperature (LST) and aerosol optical depth (AOD). *Ecological Indicators*, 138, 108810. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2022.108810>
- Xu, X., Yin, C., Wang, W., Xu, N., Hong, T. and Li, Q. 2019. Revealing Urban Morphology and Outdoor Comfort through Genetic Algorithm-Driven Urban Block Design in Dry and Hot Regions of China. *Sustainability* 2019, Vol. 11, Page 3683, 11(13), 3683. <https://doi.org/10.3390/SU11133683>
- Xu, Y., Ren, C., Ma, P., Ho, J., Wang, W., Lau, K. K. L. and Ng, E. 2017. Urban morphology detection and computation for urban climate research. *Landscape and urban planning*, 167, 212-224.
- Xu, Z. and Rui, J. 2024. The mitigating effect of green Space's spatial and temporal patterns on the urban heat island in the context of urban densification: A case study of Xi'an. *Sustainable Cities and Society*, 117, 105974.
- Yang, J., Shi, B., Shi, Y., Marvin, S., Zheng, Y. and Xia, G. 2020. Air pollution dispersal in high density urban areas: Research on the triadic relation of wind, air pollution, and urban form. *Sustainable Cities and Society*, 54, 101941. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2019.101941>
- Yang, J., Yang, Y., Sun, D., Jin, C. and Xiao, X. 2021. Influence of urban morphological characteristics on thermal environment. *Sustainable Cities and Society*, 72, 103045. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2021.103045>
- Yang, Y., Cermak, J., Yang, K., Pauli, E. and Chen, Y. 2022. Land Use and Land Cover Influence on Sentinel-2 Aerosol Optical Depth below City Scales over Beijing. *Remote Sensing* 2022, Vol. 14, Page 4677, 14(18), 4677. <https://doi.org/10.3390/RS14184677>
- Yang, Z., Li, K., Tsona, N. T., Luo, X. and Du, L. 2023. SO₂ enhances aerosol formation from anthropogenic volatile organic compound ozonolysis by producing sulfur-containing compounds. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23(1), 417-430.
- Yin, C. L., Meng, F. and Yu, Q. R. 2020. Calculation of land surface emissivity and retrieval of land surface temperature based on a spectral mixing model. *Infrared Physics & Technology*, 108, 103333. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2020.103333>
- Yue, W., Qiu, S., Xu, H., Xu, L. and Zhang, L. 2019. Polycentric urban development and urban thermal environment: A case of Hangzhou, China. *Landscape and urban planning*, 189, 58-70.
- Yücer, E., Erener, A. and Sarp, G. 2023. A Land Use Regression Model to Estimate Ambient Concentrations of PM₁₀ and SO₂ in İzmit, Turkey. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 51(6), 1329-1341. <https://doi.org/10.1007/S12524-023-01704-1/FIGURES/5>
- Zhang, A., Li, W., Wu, J., Lin, J., Chu, J. and Xia, C. 2021. How can the urban landscape affect urban vitality at the street block level? A case study of 15 metropolises in China. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 48(5), 1245-1262. <https://doi.org/10.1177/2399808320924425>

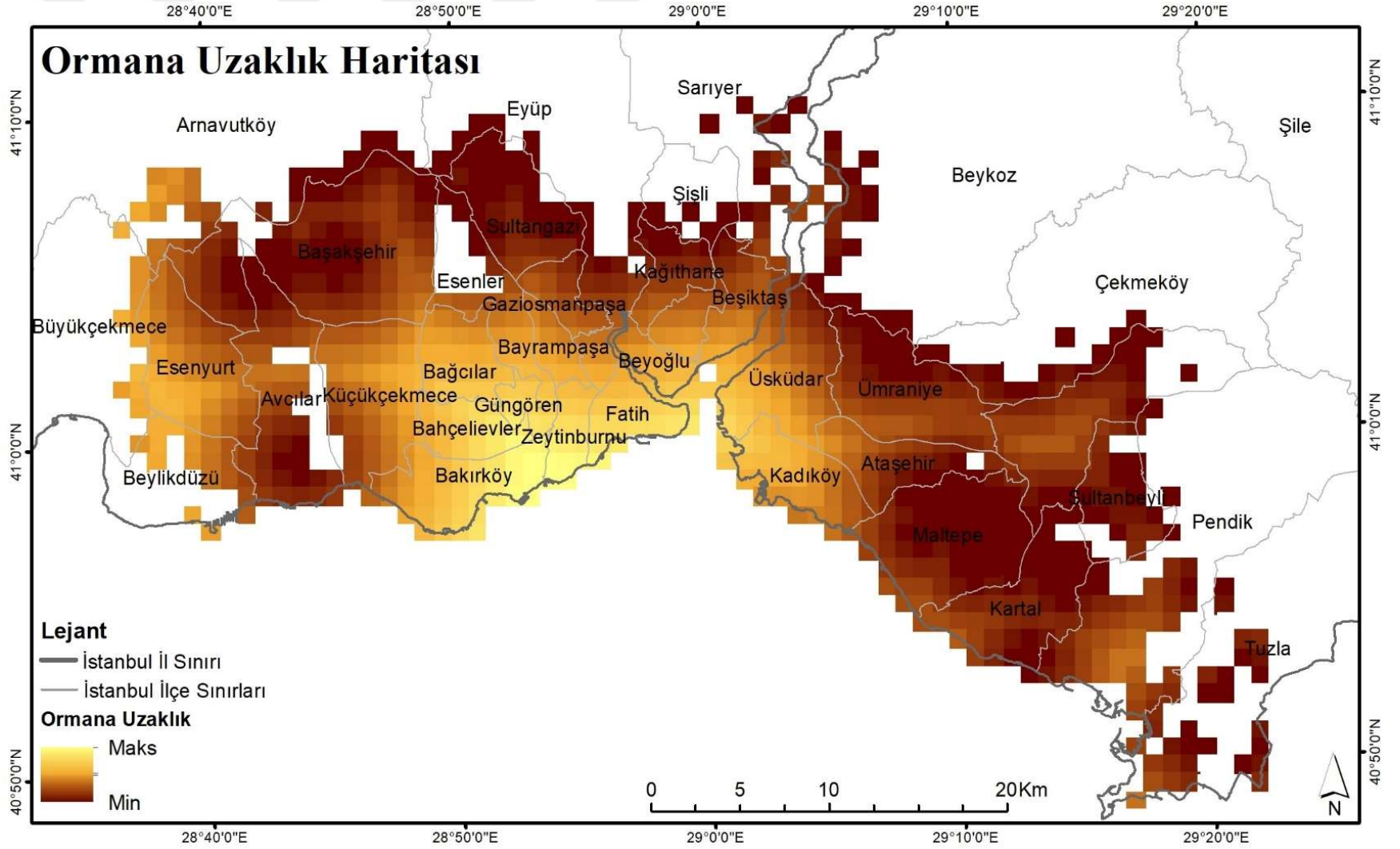
- Zhang, B. 2020. The effect of aerosols to climate change and society. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 8(08), 55.
- Zhao, X., Griffin, D., Fioletov, V., McLinden, C., Cede, A., Tiefengraber, M., Müller, M., Bogner, K., Strong, K., Boersma, F., Eskes, H., Davies, J., Ogyu, A. and Chi Lee, S. 2020. Assessment of the quality of tropomi high-spatial-resolution NO₂ data products in the greater toronto area. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13(4), 2131-2159. <https://doi.org/10.5194/AMT-13-2131-2020>
- Zhou, C., Li, S. and Wang, S. 2018. Examining the impacts of urban form on air pollution in developing countries: A case study of China's megacities. *International journal of environmental research and public health*, 15(8), 1565.
- Zhou, D., Xiao, J., Frolking, S., Zhang, L. and Zhou, G. 2022. Urbanization contributes little to global warming but substantially intensifies local and regional land surface warming. *Earth's Future*, 10(5), e2021EF002401
- Zhou, X. and Chen, H. 2018. Impact of urbanization-related land use land cover changes and urban morphology changes on the urban heat island phenomenon. *Science of The Total Environment*, 635, 1467-1476. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.091>
- Zhou, X., Yamamoto, M., Yan, S., Ishida, Y., Cai, M., Ji, Q., Makvandi, M. and Li, C. 2022. Exploring the impacts of heat release of vehicles on urban heat mitigation in Sendai, Japan using WRF model integrated with urban LCZ. *Sustainable Cities and Society*, 82, 103922. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2022.103922>

7. EKLER

EK-1 Mekânsal Değişkenlerin Haritaları

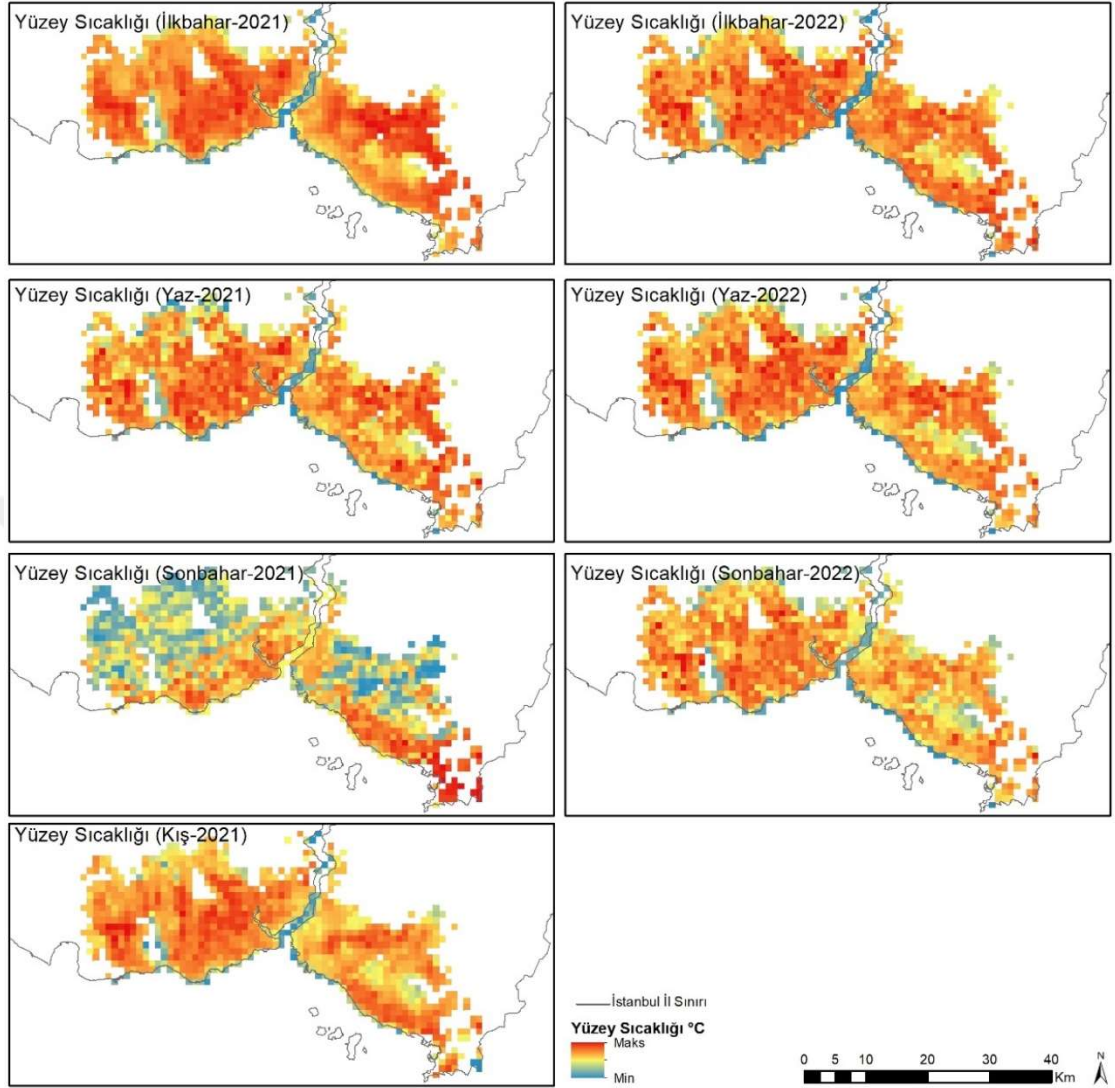




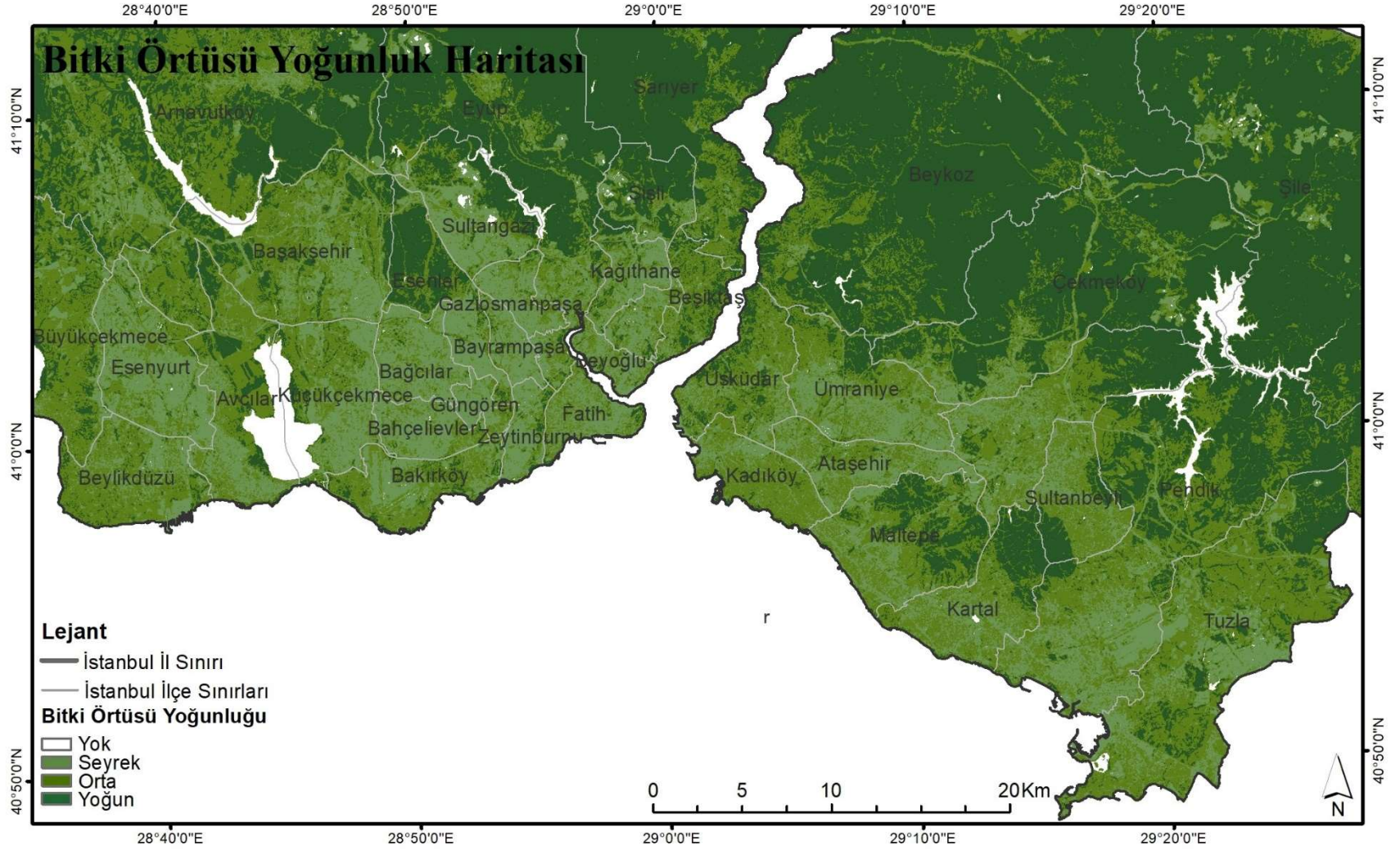


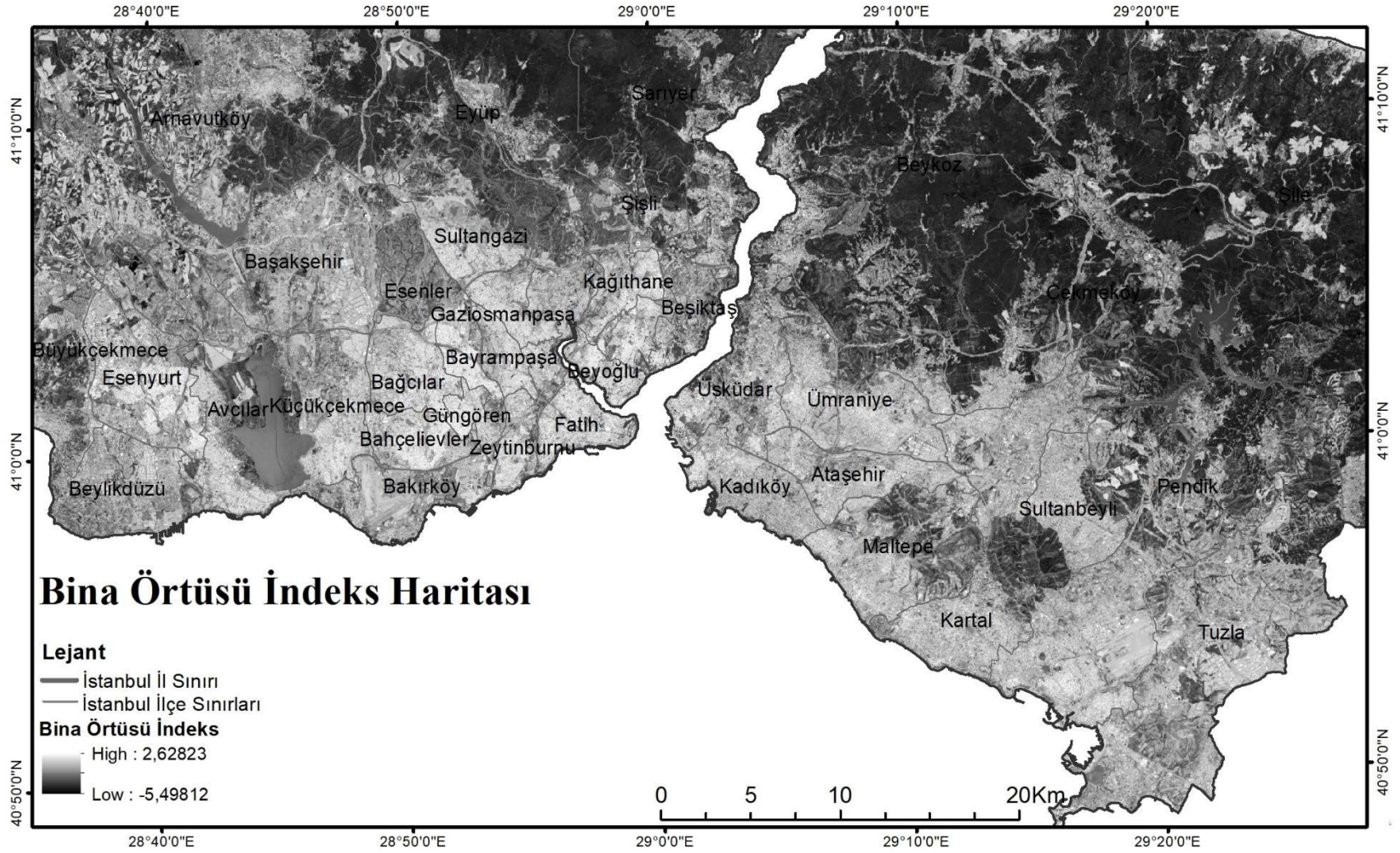
EK-2 2021-2022 Yılları Landsat 8 OLI/TIRS Uydu Görüntü Tarihleri

Path:181 Row:31	Path:181 Row:32	Path:180 Row:31	Path:180 Row:32	Path:179 Row:32
2022 Yılı				
14.07.2022	14.07.2022	23.07.2022	09.09.2022	17.08.2022
27.05.2022	27.05.2022	05.06.2022	23.07.2022	29.05.2022
25.04.2022	11.05.2022	20.05.2022	05.06.2022	13.05.2022
24.03.2022	09.04.2022	02.04.2022	20.05.2022	27.04.2022
19.01.2022				
2021 Yılı				
27.07.2021	28.08.2021	05.08.2021	08.10.2021	06.11.2021
24.05.2021	27.07.2021	14.03.2021	21.08.2021	29.07.2021
	09.06.2021	10.02.2021	05.08.2021	13.07.2021
	24.05.2021			10.05.2021
	05.03.2021			

EK-3 Yüzey Sıcaklık Haritaları

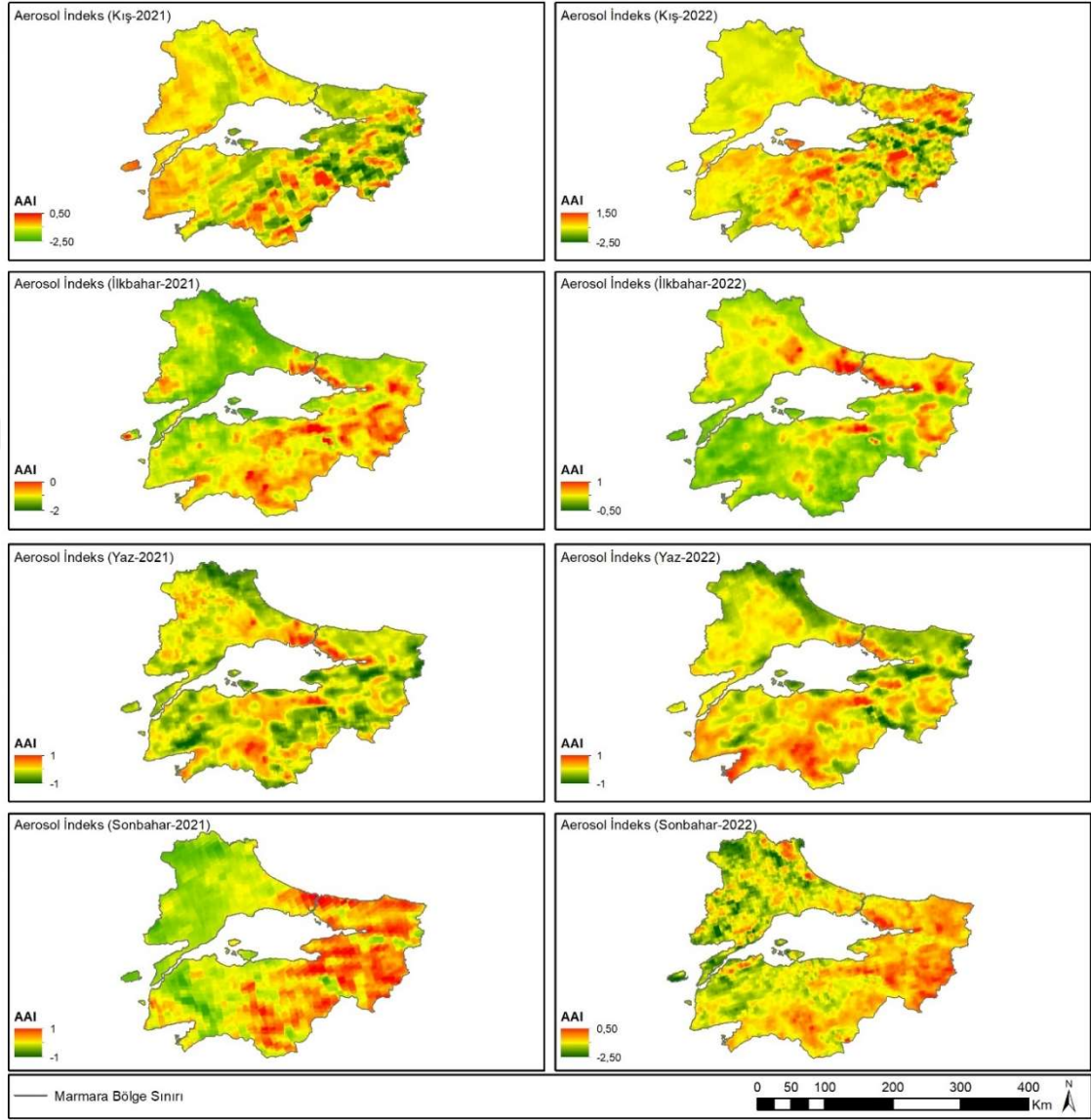
EK-4 NDVI ve NDBI Haritaları



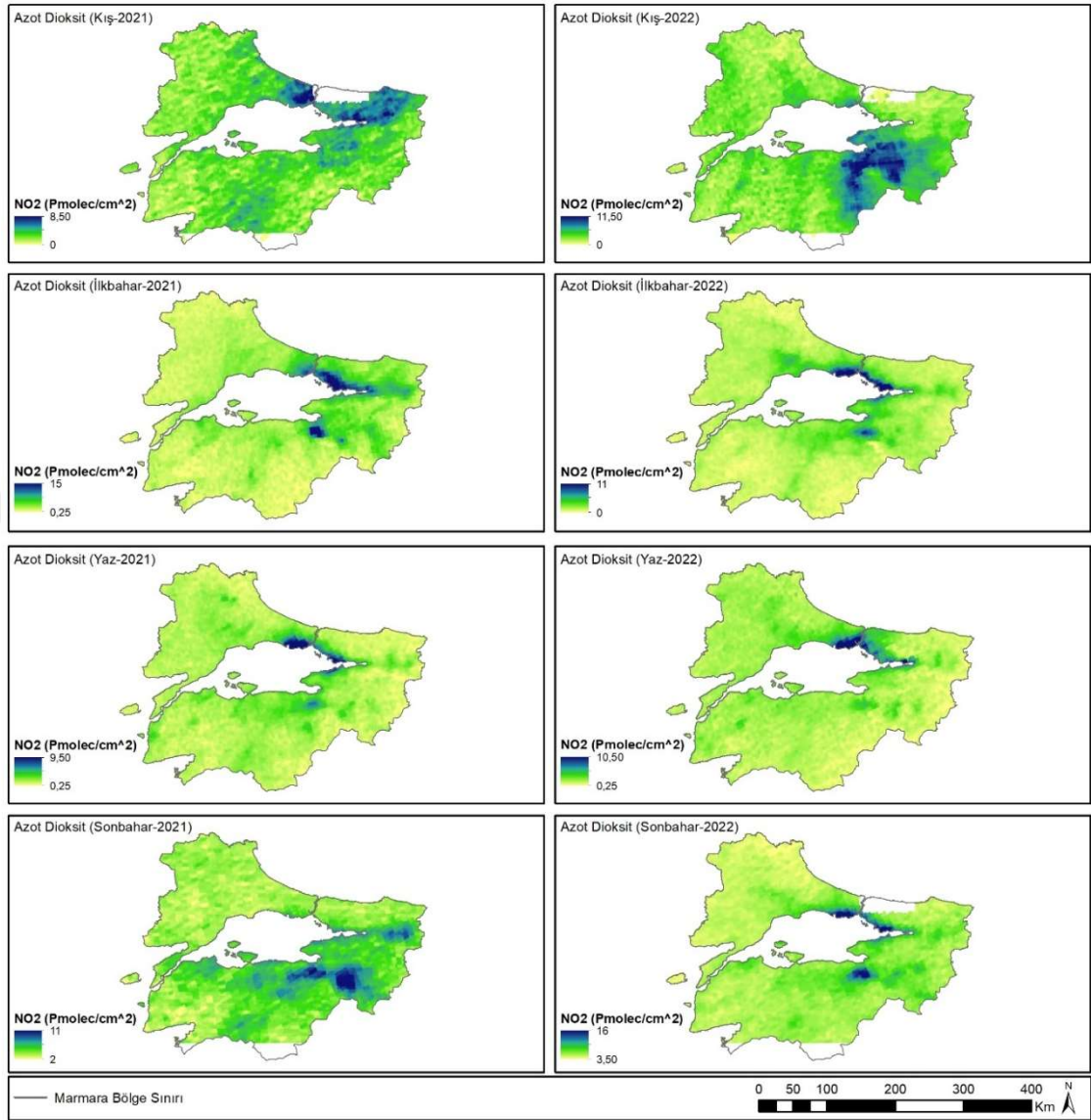


EK-5 Marmara Bölgesi'ne Ait Hava Kirlilik Haritaları

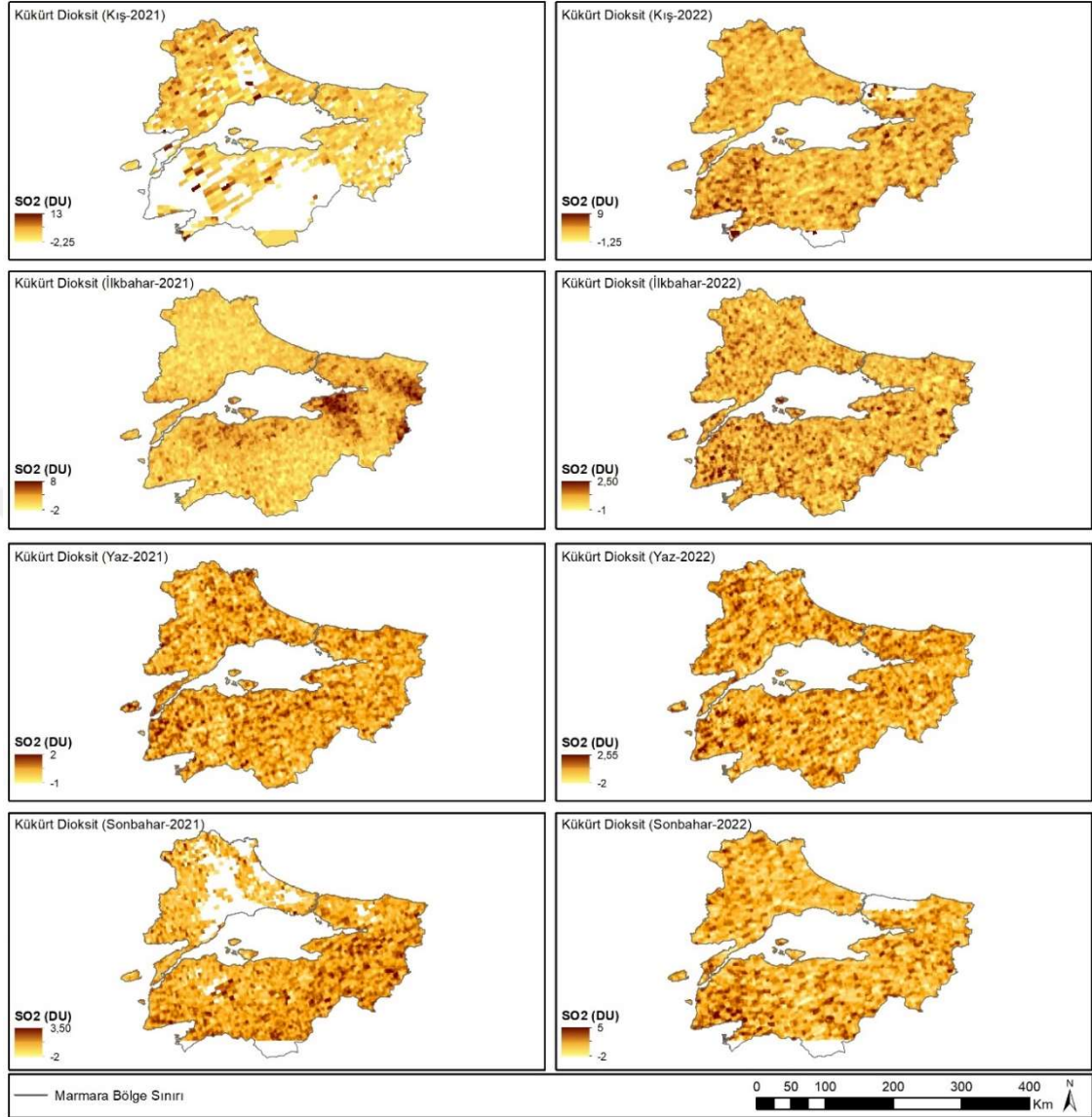
Aerosol İndeks Haritaları



Azot Dioksit Haritaları

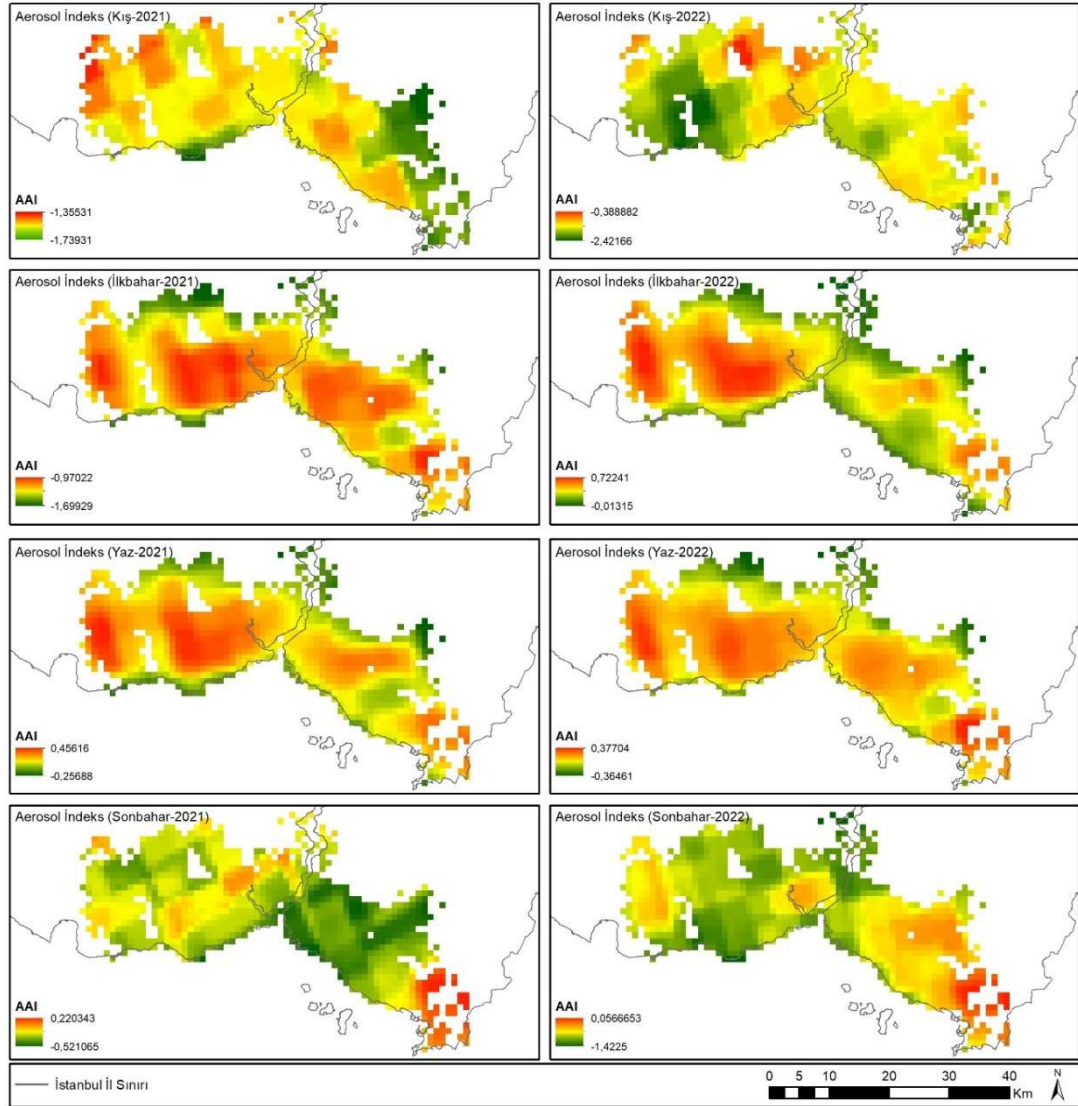


Kükürt Dioksit Haritaları

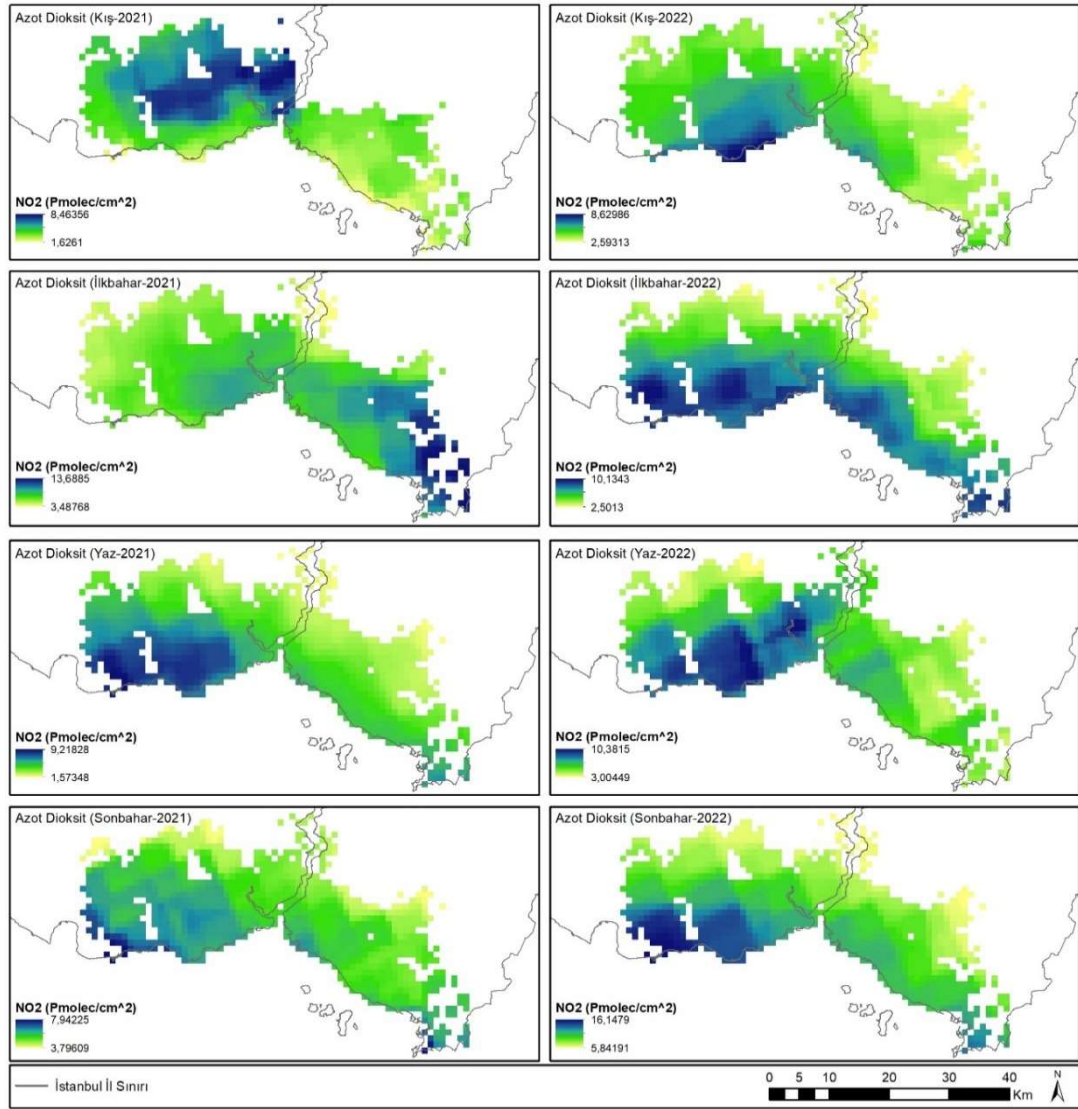


EK-6 İstanbul'a Ait Hava Kirlilik Haritaları

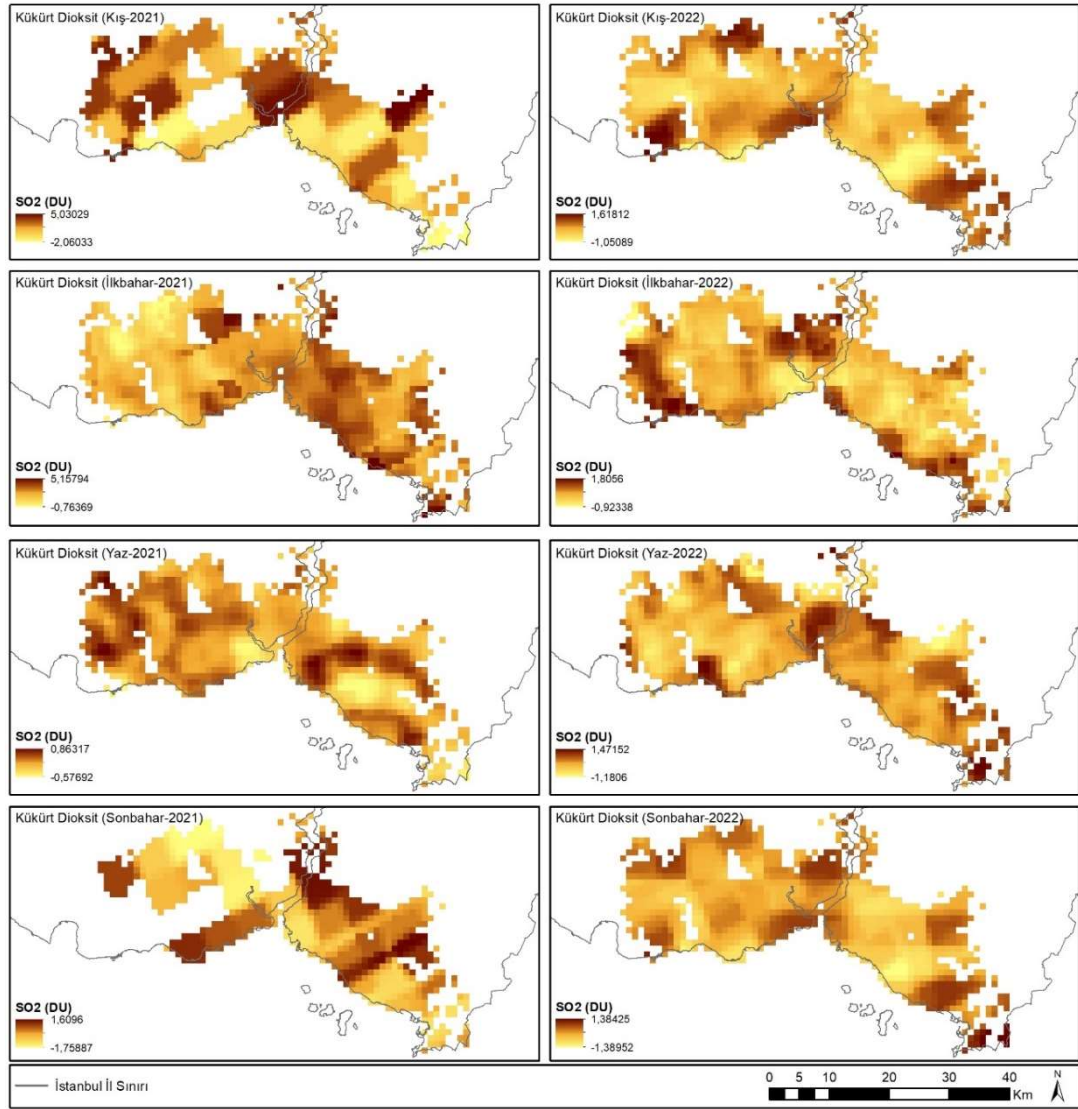
Aerosol İndeks



Azot Dioksit



Kükürt Dioksit



EK-7 Varyans Homojenite Testi

Aerosol İndeks		İstanbul-Gebze				Bursa			
		Levene Stat.	df1	df2	Sig.	Levene Stat.	df1	df2	Sig.
Kış 2021	Aritmetik ort. day.	94.865	2	5890	.000	14.222	2	643	.000
	Medyan day.	63.517	2	5890	.000	12.159	2	643	.000
	Medyan day. (düz. sd.)	63.517	2	4640.038	.000	12.159	2	571.370	.000
	Kırp. ort. day.	75.086	2	5890	.000	16.112	2	643	.000
İlkbahar 2021	Aritmetik ort. day.	79.254	2	5890	.000	7.980	2	643	.000
	Medyan day.	54.931	2	5890	.000	7.948	2	643	.000
	Medyan day. (düz. sd.)	54.931	2	5705.097	.000	7.948	2	636.410	.000
	Kırp. ort. day.	74.304	2	5890	.000	7.835	2	643	.000
Yaz 2021	Aritmetik ort. day.	133.259	2	5890	.000	99.580	2	643	.000
	Medyan day.	127.298	2	5890	.000	93.997	2	643	.000
	Medyan day. (düz. sd.)	127.298	2	5763.637	.000	93.997	2	545.264	.000
	Kırp. ort. day.	135.602	2	5890	.000	99.948	2	643	.000
Sonbahar 2021	Aritmetik ort. day.	66.872	2	5890	.000	293.150	2	643	.000
	Medyan day.	12.370	2	5890	.000	122.857	2	643	.000
	Medyan day. (düz. sd.)	12.370	2	5627.998	.000	122.857	2	263.563	.000
	Kırp. ort. day.	62.032	2	5890	.000	280.050	2	643	.000

Kış 2022	Aritmetik ort. day.	74.380	2	5890	.000	52.904	2	643	.000
	Medyan day.	68.809	2	5890	.000	31.488	2	643	.000
	Medyan day. (düz. sd.)	68.809	2	4468.008	.000	31.488	2	476.410	.000
	Kırp. ort. day.	70.716	2	5890	.000	50.657	2	643	.000
İlkbahar 2022	Aritmetik ort. day.	286.425	2	5890	.000	12.190	2	643	.000
	Medyan day.	260.164	2	5890	.000	12.145	2	643	.000
	Medyan day. (düz. sd.)	260.164	2	5748.152	.000	12.145	2	633.803	.000
	Kırp. ort. day.	283.410	2	5890	.000	12.261	2	643	.000
Yaz 2022	Aritmetik ort. day.	41.759	2	5890	.000	63.412	2	643	.000
	Medyan day.	33.847	2	5890	.000	56.382	2	643	.000
	Medyan day. (düz. sd.)	33.847	2	5831.734	.000	56.382	2	565.710	.000
	Kırp. ort. day.	40.330	2	5890	.000	63.777	2	643	.000
Sonbahar 2022	Aritmetik ort. day.	25.942	2	5890	.000	76.200	2	643	.000
	Medyan day.	26.848	2	5890	.000	73.857	2	643	.000
	Medyan day. (düz. sd.)	26.848	2	5883.072	.000	73.857	2	359.098	.000
	Kırp. ort. day.	28.325	2	5890	.000	76.430	2	643	.000

Aerosol İndeks		Kocaeli-Yalova				Çanakkale			
		Levene Stat.	df1	df2	Sig.	Levene Stat.	df1	df2	Sig.
Kış 2021	Aritmetik ort. day.	2.574	2	811	.077	5.711	2	118	.004
	Medyan day.	3.103	2	811	.045	4.927	2	118	.009
	Medyan day. (düz. sd.)	3.103	2	732.284	.046	4.927	2	107.163	.009
	Kırp. ort. day.	2.925	2	811	.054	5.505	2	118	.005
İlkbahar 2021	Aritmetik ort. day.	7.625	2	811	.001	1.364	2	118	.260
	Medyan day.	8.193	2	811	.000	1.282	2	118	.281
	Medyan day. (düz. sd.)	8.193	2	788.248	.000	1.282	2	117.070	.281
	Kırp. ort. day.	7.974	2	811	.000	1.397	2	118	.251
Yaz 2021	Aritmetik ort. day.	3.788	2	811	.023	2.307	2	118	.104
	Medyan day.	3.118	2	811	.045	1.874	2	118	.158
	Medyan day. (düz. sd.)	3.118	2	810.753	.045	1.874	2	116.665	.158
	Kırp. ort. day.	3.678	2	811	.026	2.365	2	118	.098
Sonbahar 2021	Aritmetik ort. day.	10.437	2	811	.000	1.806	2	118	.169
	Medyan day.	7.240	2	811	.001	.304	2	118	.739
	Medyan day. (düz. sd.)	7.240	2	764.244	.001	.304	2	94.200	.739
	Kırp. ort. day.	10.576	2	811	.000	1.492	2	118	.229

Kış 2022	Aritmetik ort. day.	3.440	2	811	.033	13.542	2	118	.000
	Medyan day.	3.328	2	811	.036	12.802	2	118	.000
	Medyan day. (düz. sd.)	3.328	2	768.892	.036	12.802	2	113.769	.000
	Kırp. ort. day.	3.359	2	811	.035	14.625	2	118	.000
İlkbahar 2022	Aritmetik ort. day.	15.589	2	811	.000	2.472	2	118	.089
	Medyan day.	8.776	2	811	.000	2.718	2	118	.070
	Medyan day. (düz. sd.)	8.776	2	745.056	.000	2.718	2	117.987	.070
	Kırp. ort. day.	14.011	2	811	.000	2.726	2	118	.070
Yaz 2022	Aritmetik ort. day.	6.892	2	811	.001	5.275	2	118	.006
	Medyan day.	6.590	2	811	.001	4.464	2	118	.014
	Medyan day. (düz. sd.)	6.590	2	781.170	.001	4.464	2	113.151	.014
	Kırp. ort. day.	6.795	2	811	.001	5.506	2	118	.005
Sonbahar 2022	Aritmetik ort. day.	1.567	2	811	.209	.900	2	118	.409
	Medyan day.	1.480	2	811	.228	.673	2	118	.512
	Medyan day. (düz. sd.)	1.480	2	800.470	.228	.673	2	116.171	.512
	Kırp. ort. day.	1.503	2	811	.223	.991	2	118	.374

Azot Dioksit		İstanbul-Gebze				Bursa			
		Levene Stat.	df1	df2	Sig.	Levene Stat.	df1	df2	Sig.
Kış 2021	Aritmetik ort. day.	216.346	2	4127	.000	109.307	2	484	.000
	Medyan day.	131.658	2	4127	.000	103.853	2	484	.000
	Medyan day. (düz. sd.)	131.658	2	3430.350	.000	103.853	2	416.706	.000
	Kırp. ort. day.	194.342	2	4127	.000	108.328	2	484	.000
İlkbahar 2021	Aritmetik ort. day.	238.174	2	5890	.000	.320	2	635	.726
	Medyan day.	221.703	2	5890	.000	.090	2	635	.914
	Medyan day. (düz. sd.)	221.703	2	5220.229	.000	.090	2	633.368	.914
	Kırp. ort. day.	239.192	2	5890	.000	.133	2	635	.876
Yaz 2021	Aritmetik ort. day.	1134.143	2	5890	.000	5.852	2	635	.003
	Medyan day.	973.054	2	5890	.000	5.063	2	635	.007
	Medyan day. (düz. sd.)	973.054	2	4640.689	.000	5.063	2	603.179	.007
	Kırp. ort. day.	1091.790	2	5890	.000	5.472	2	635	.004
Sonbahar 2021	Aritmetik ort. day.	10.668	2	197	.000	68.271	2	467	.000
	Medyan day.	4.182	2	197	.017	45.373	2	467	.000
	Medyan day. (düz. sd.)	4.182	2	163.839	.017	45.373	2	421.352	.000
	Kırp. ort. day.	9.259	2	197	.000	67.335	2	467	.000

Kış 2022	Aritmetik ort. day.	124.797	2	2114	.000	a			
	Medyan day.	98.626	2	2114	.000				
	Medyan day. (düz. sd.)	98.626	2	1740.576	.000				
	Kırp. ort. day.	121.051	2	2114	.000				
İlkbahar 2022	Aritmetik ort. day.	1029.908	2	5890	.000	15.009	2	635	.000
	Medyan day.	968.361	2	5890	.000	9.455	2	635	.000
	Medyan day. (düz. sd.)	968.361	2	5789.249	.000	9.455	2	562.885	.000
	Kırp. ort. day.	1026.753	2	5890	.000	14.247	2	635	.000
Yaz 2022	Aritmetik ort. day.	647.948	2	5890	.000	4.613	2	635	.010
	Medyan day.	556.696	2	5890	.000	4.463	2	635	.012
	Medyan day. (düz. sd.)	556.696	2	4490.137	.000	4.463	2	602.132	.012
	Kırp. ort. day.	634.523	2	5890	.000	4.679	2	635	.010
Sonbahar 2022	Aritmetik ort. day.	1097.135	2	5890	.000	27.387	2	635	.000
	Medyan day.	948.780	2	5890	.000	26.976	2	635	.000
	Medyan day. (düz. sd.)	948.780	2	5194.049	.000	26.976	2	591.595	.000
	Kırp. ort. day.	1055.108	2	5890	.000	29.527	2	635	.000

^a: Levene'in hata varyanslarının eşitliği testi hesaplanmamıştır.

Azot Dioksit		Kocaeli-Yalova				Çanakkale			
		Levene Stat.	df1	df2	Sig.	Levene Stat.	df1	df2	Sig.
Kış 2021	Aritmetik ort. day.	5.556	2	766	.004	6.965	2	118	.001
	Medyan day.	4.444	2	766	.012	8.428	2	118	.000
	Medyan day. (düz. sd.)	4.444	2	748.479	.012	8.428	2	99.472	.000
	Kırp. ort. day.	5.898	2	766	.003	7.115	2	118	.001
İlkbahar 2021	Aritmetik ort. day.	2.096	2	811	.124	.106	2	118	.899
	Medyan day.	.793	2	811	.453	.220	2	118	.803
	Medyan day. (düz. sd.)	.793	2	789.530	.453	.220	2	112.782	.803
	Kırp. ort. day.	2.019	2	811	.133	.120	2	118	.887
Yaz 2021	Aritmetik ort. day.	61.949	2	811	.000	13.570	2	118	.000
	Medyan day.	35.393	2	811	.000	9.638	2	118	.000
	Medyan day. (düz. sd.)	35.393	2	683.820	.000	9.638	2	107.632	.000
	Kırp. ort. day.	54.241	2	811	.000	13.101	2	118	.000
Sonbahar 2021	Aritmetik ort. day.	1.483	2	643	.228	a			
	Medyan day.	1.073	2	643	.343				
	Medyan day. (düz. sd.)	1.073	2	624.941	.343				
	Kırp. ort. day.	1.150	2	643	.317				

Kış 2022	Aritmetik ort. day.	a				2.666	2	118	.074
	Medyan day.					2.776	2	118	.066
	Medyan day. (düz. sd.)					2.776	2	93.407	.067
	Kırp. ort. day.					2.722	2	118	.070
İlkbahar 2022	Aritmetik ort. day.	23.455	2	811	.000	2.871	2	118	.061
	Medyan day.	16.078	2	811	.000	2.763	2	118	.067
	Medyan day. (düz. sd.)	16.078	2	755.872	.000	2.763	2	107.803	.068
	Kırp. ort. day.	22.195	2	811	.000	2.945	2	118	.056
Yaz 2022	Aritmetik ort. day.	60.775	2	811	.000	7.006	2	118	.001
	Medyan day.	59.964	2	811	.000	4.002	2	118	.021
	Medyan day. (düz. sd.)	59.964	2	743.378	.000	4.002	2	99.865	.021
	Kırp. ort. day.	60.336	2	811	.000	6.117	2	118	.003
Sonbahar 2022	Aritmetik ort. day.	15.320	2	811	.000	1.043	2	118	.356
	Medyan day.	10.843	2	811	.000	.817	2	118	.444
	Medyan day. (düz. sd.)	10.843	2	711.920	.000	.817	2	112.847	.444
	Kırp. ort. day.	14.203	2	811	.000	1.115	2	118	.331

^a: Levene'in hata varyanslarının eşitliği testi hesaplanmamıştır.

Kükürt Dioksit		İstanbul-Gebze				Bursa			
		Levene Stat.	df1	df2	Sig.	Levene Stat.	df1	df2	Sig.
Kış 2021	Aritmetik ort. day.	75.157	2	5617	.000	58.863	2	588	.000
	Medyan day.	64.619	2	5617	.000	38.624	2	588	.000
	Medyan day. (düz. sd.)	64.619	2	4253.679	.000	38.624	2	549.701	.000
	Kırp. ort. day.	68.820	2	5617	.000	59.095	2	588	.000
İlkbahar 2021	Aritmetik ort. day.	27.512	2	5890	.000	1.778	2	643	.170
	Medyan day.	25.199	2	5890	.000	1.052	2	643	.350
	Medyan day. (düz. sd.)	25.199	2	5823.743	.000	1.052	2	614.462	.350
	Kırp. ort. day.	26.814	2	5890	.000	1.596	2	643	.203
Yaz 2021	Aritmetik ort. day.	2.623	2	5890	.073	16.893	2	643	.000
	Medyan day.	2.627	2	5890	.072	16.220	2	643	.000
	Medyan day. (düz. sd.)	2.627	2	5884.897	.072	16.220	2	620.935	.000
	Kırp. ort. day.	2.628	2	5890	.072	16.689	2	643	.000
Sonbahar 2021	Aritmetik ort. day.	77.030	2	5618	.000	4.080	2	643	.017
	Medyan day.	76.412	2	5618	.000	6.125	2	643	.002
	Medyan day. (düz. sd.)	76.412	2	5479.357	.000	6.125	2	628.663	.002
	Kırp. ort. day.	75.962	2	5618	.000	4.625	2	643	.010

Kış 2022	Aritmetik ort. day.	20.832	2	2176	.000	56.255	2	73	.000
	Medyan day.	19.453	2	2176	.000	7.126	2	73	.001
	Medyan day. (düz. sd.)	19.453	2	2138.299	.000	7.126	2	35.461	.003
	Kırp. ort. day.	20.188	2	2176	.000	50.257	2	73	.000
İlkbahar 2022	Aritmetik ort. day.	55.333	2	5890	.000	9.500	2	643	.000
	Medyan day.	52.062	2	5890	.000	9.675	2	643	.000
	Medyan day. (düz. sd.)	52.062	2	5763.024	.000	9.675	2	570.795	.000
	Kırp. ort. day.	54.699	2	5890	.000	9.726	2	643	.000
Yaz 2022	Aritmetik ort. day.	14.587	2	5890	.000	10.594	2	643	.000
	Medyan day.	14.617	2	5890	.000	10.485	2	643	.000
	Medyan day. (düz. sd.)	14.617	2	5869.525	.000	10.485	2	593.973	.000
	Kırp. ort. day.	14.566	2	5890	.000	10.632	2	643	.000
Sonbahar 2022	Aritmetik ort. day.	77.030	2	5618	.000	4.080	2	643	.017
	Medyan day.	76.412	2	5618	.000	6.125	2	643	.002
	Medyan day. (düz. sd.)	76.412	2	5479.357	.000	6.125	2	628.663	.002
	Kırp. ort. day.	75.962	2	5618	.000	4.625	2	643	.010

Kükürt Dioksit		Kocaeli-Yalova				Çanakkale			
		Levene Stat.	df1	df2	Sig.	Levene Stat.	df1	df2	Sig.
Kış 2021	Aritmetik ort. day.	9.542	2	786	.000	9.664	2	65	.000
	Medyan day.	7.984	2	786	.000	3.600	2	65	.033
	Medyan day. (düz. sd.)	7.984	2	752.226	.000	3.600	2	30.824	.039
	Kırp. ort. day.	9.090	2	786	.000	6.298	2	65	.003
İlkbahar 2021	Aritmetik ort. day.	32.358	2	811	.000	2.641	2	118	.075
	Medyan day.	28.538	2	811	.000	.979	2	118	.379
	Medyan day. (düz. sd.)	28.538	2	731.112	.000	.979	2	106.299	.379
	Kırp. ort. day.	31.440	2	811	.000	2.400	2	118	.095
Yaz 2021	Aritmetik ort. day.	2.953	2	811	.053	9.700	2	118	.000
	Medyan day.	2.972	2	811	.052	8.078	2	118	.001
	Medyan day. (düz. sd.)	2.972	2	808.098	.052	8.078	2	106.490	.001
	Kırp. ort. day.	2.927	2	811	.054	9.569	2	118	.000
Sonbahar 2021	Aritmetik ort. day.	11.827	2	745	.000	23.153	2	118	.000
	Medyan day.	11.281	2	745	.000	12.738	2	118	.000
	Medyan day. (düz. sd.)	11.281	2	740.164	.000	12.738	2	91.123	.000
	Kırp. ort. day.	11.890	2	745	.000	22.457	2	118	.000

Kış 2022	Aritmetik ort. day.	.942	2	41	.398	4.724	2	92	.011
	Medyan day.	.076	2	41	.927	2.914	2	92	.059
	Medyan day. (düz. sd.)	.076	2	37.689	.927	2.914	2	69.694	.061
	Kırp. ort. day.	.812	2	41	.451	4.129	2	92	.019
İlkbahar 2022	Aritmetik ort. day.	2.842	2	811	.059	1.227	2	118	.297
	Medyan day.	2.832	2	811	.059	1.130	2	118	.326
	Medyan day. (düz. sd.)	2.832	2	794.505	.059	1.130	2	116.511	.326
	Kırp. ort. day.	2.842	2	811	.059	1.198	2	118	.305
Yaz 2022	Aritmetik ort. day.	3.603	2	811	.028	3.793	2	118	.025
	Medyan day.	3.165	2	811	.043	2.822	2	118	.064
	Medyan day. (düz. sd.)	3.165	2	751.603	.043	2.822	2	106.276	.064
	Kırp. ort. day.	3.392	2	811	.034	3.791	2	118	.025
Sonbahar 2022	Aritmetik ort. day.	11.827	2	745	.000	23.153	2	118	.000
	Medyan day.	11.281	2	745	.000	12.738	2	118	.000
	Medyan day. (düz. sd.)	11.281	2	740.164	.000	12.738	2	91.123	.000
	Kırp. ort. day.	11.890	2	745	.000	22.457	2	118	.000

EK-8 Yüzey Sıcaklığı Regresyon Testi

Bağımlı Değişken: Yüzey Sıcaklığı

Bağımsız Değişken: Aerosol indeks, NO₂, SO₂, NDVI, NDBI, Kent Dokusu, Kıyıya Uzaklık, Ormana Uzaklık, Yükseklik

	İstanbul				Avrupa				Anadolu			
Tarih	R	R ²	Düzeltilmiş R ²	Tahminin Std. Hatası	R	R ²	Düzeltilmiş R ²	Tahminin Std. Hatası	R	R ²	Düzeltilmiş R ²	Tahminin Std. Hatası
Şub.21	0.608	0.369	0.363	0.088	0.624	0.389	0.378	0.079	0.595	0.354	0.339	0.095
Mar.21	0.743	0.552	0.548	0.084	0.763	0.582	0.574	0.078	0.793	0.629	0.621	0.081
Ağu.21	0.792	0.627	0.624	0.073	0.825	0.680	0.675	0.067	0.866	0.750	0.744	0.061
Ağu.21	0.544	0.296	0.289	0.120	0.645	0.415	0.405	0.127	0.606	0.367	0.353	0.084
Eki.21	0.675	0.456	0.451	0.171	0.742	0.551	0.543	0.139	0.698	0.487	0.475	0.183
Nis.22	0.757	0.573	0.569	0.067	0.738	0.544	0.536	0.071	0.820	0.672	0.665	0.056
May.22	0.843	0.711	0.708	0.054	0.842	0.709	0.704	0.054	0.872	0.761	0.755	0.049
Haz.22	0.837	0.701	0.698	0.064	0.856	0.732	0.727	0.060	0.836	0.699	0.692	0.061
Tem.22	0.815	0.665	0.662	0.067	0.822	0.676	0.670	0.068	0.856	0.734	0.727	0.058
Eyl.22	0.789	0.623	0.619	0.078	0.766	0.586	0.579	0.081	0.822	0.675	0.668	0.070

		İstanbul					Avrupa					Anadolu				
		Std. Olmayan Katsayı		Std. Katsayı	t	Sig.	Std. Olmayan Katsayı		Std. Katsayı	t	Sig.	Std. Olmayan Katsayı		Std. Katsayı	t	Sig.
		B	Std. Hata	Beta			B	Std. Hata	Beta			B	Std. Hata	Beta		
Kış - 2021	(Constant)	0.599	0.016		37.406	0.000	0.607	0.026		23.141	0.000	0.521	0.031		16.613	0.000
	AI	0.033	0.016	0.058	2.083	0.038	0.077	0.028	0.110	2.775	0.006	0.104	0.030	0.192	3.445	0.001
	NO ₂	0.067	0.014	0.143	4.916	0.000	0.067	0.024	0.102	2.792	0.005	0.108	0.024	0.223	4.430	0.000
	SO ₂	-0.005	0.013	-0.010	-0.354	0.723	-0.046	0.017	-0.100	-2.674	0.008	0.041	0.024	0.085	1.686	0.093
	NDVI	0.076	0.025	0.126	3.090	0.002	0.096	0.027	0.179	3.515	0.000	0.033	0.046	0.049	0.715	0.475
	NDBI	0.262	0.031	0.336	8.453	0.000	0.287	0.036	0.395	7.906	0.000	0.236	0.054	0.294	4.330	0.000
	Kent Dokusu	0.025	0.002	0.382	11.348	0.000	0.022	0.003	0.403	8.493	0.000	0.026	0.004	0.316	6.358	0.000
	Kıyıya Uzaklık	0.018	0.004	0.158	4.763	0.000	0.005	0.005	0.050	0.985	0.325	0.036	0.007	0.305	4.914	0.000
	Ormana Uzaklık	-0.004	0.004	-0.034	-1.028	0.304	-0.005	0.004	-0.052	-1.181	0.238	-0.028	0.009	-0.162	-3.170	0.002
	Yükseklik	-0.025	0.004	-0.216	-6.799	0.000	-0.030	0.005	-0.230	-5.403	0.000	-0.027	0.006	-0.263	-4.782	0.000
İlkbahar - 2021	(Constant)	0.476	0.018		27.212	0.000	0.454	0.022		20.542	0.000	0.488	0.034		14.494	0.000
	AI	0.279	0.019	0.453	14.712	0.000	0.322	0.023	0.596	14.244	0.000	0.251	0.031	0.333	8.161	0.000
	NO ₂	0.059	0.015	0.099	3.823	0.000	0.126	0.038	0.141	3.273	0.001	0.060	0.022	0.103	2.697	0.007

Yaz – 2021	SO ₂	0.014	0.025	0.016	0.581	0.561	0.026	0.034	0.027	0.769	0.442	0.018	0.046	0.014	0.387	0.699
	NDVI	-0.070	0.026	-0.091	-2.645	0.008	-0.040	0.030	-0.057	-1.352	0.177	-0.115	0.047	-0.132	-2.451	0.015
	NDBI	0.203	0.033	0.203	6.240	0.000	0.196	0.038	0.205	5.128	0.000	0.212	0.055	0.200	3.821	0.000
	Kent Dokusu	0.022	0.002	0.296	10.376	0.000	0.014	0.003	0.226	5.722	0.000	0.024	0.004	0.256	6.750	0.000
	Kıyıya Uzaklık	0.049	0.004	0.383	12.630	0.000	0.017	0.005	0.136	3.180	0.002	0.078	0.005	0.576	14.730	0.000
	Ormana Uzaklık	-0.016	0.004	-0.125	-4.038	0.000	-0.029	0.005	-0.258	-5.928	0.000	-0.028	0.008	-0.142	-3.475	0.001
	Yükseklik	0.003	0.004	0.019	0.718	0.473	0.020	0.006	0.128	3.386	0.001	-0.005	0.005	-0.043	-1.030	0.304
	(Constant)	0.663	0.014		46.302	0.000	0.644	0.017		38.030	0.000	0.656	0.021		30.823	0.000
	AI	0.140	0.016	0.244	9.034	0.000	0.182	0.019	0.322	9.683	0.000	0.180	0.021	0.273	8.417	0.000
	NO ₂	-0.076	0.014	-0.155	-5.434	0.000	-0.038	0.016	-0.083	-2.358	0.019	-0.207	0.036	-0.226	-5.823	0.000
	SO ₂	-0.020	0.013	-0.034	-1.521	0.129	-0.029	0.019	-0.042	-1.536	0.125	0.016	0.017	0.031	0.921	0.358
	NDVI	-0.150	0.028	-0.189	-5.383	0.000	-0.163	0.032	-0.200	-5.024	0.000	-0.106	0.039	-0.133	-2.744	0.006
	NDBI	0.480	0.034	0.465	13.981	0.000	0.500	0.041	0.461	12.291	0.000	0.526	0.048	0.529	11.050	0.000
	Kent Dokusu	0.014	0.002	0.202	7.982	0.000	0.008	0.002	0.126	3.775	0.000	0.013	0.003	0.154	5.026	0.000

Yaz - 2021	(Constant)	0.562	0.021		26.782	0.000	0.444	0.029		15.578	0.000	0.685	0.026		25.958	0.000
	AI	0.127	0.025	0.184	5.012	0.000	0.207	0.036	0.259	5.811	0.000	0.072	0.029	0.125	2.457	0.014
	NO ₂	0.051	0.023	0.087	2.231	0.026	0.097	0.031	0.151	3.165	0.002	0.003	0.049	0.003	0.052	0.959
	SO ₂	-0.002	0.021	-0.003	-0.103	0.918	0.048	0.035	0.051	1.363	0.174	-0.012	0.024	-0.026	-0.494	0.622
	NDVI	0.201	0.032	0.234	6.313	0.000	0.254	0.044	0.240	5.726	0.000	0.022	0.036	0.037	0.627	0.531
	NDBI	0.408	0.041	0.365	9.899	0.000	0.445	0.058	0.322	7.687	0.000	0.356	0.045	0.455	7.907	0.000
	Kent Dokusu	0.014	0.003	0.164	4.813	0.000	0.009	0.004	0.104	2.343	0.020	0.012	0.004	0.164	3.407	0.001
	Kıyıya Uzaklık	-0.015	0.005	-0.107	-3.018	0.003	-0.035	0.008	-0.211	-4.340	0.000	0.016	0.006	0.153	2.711	0.007
	Ormana Uzaklık	-0.003	0.006	-0.022	-0.559	0.576	-0.007	0.008	-0.048	-0.980	0.327	-0.010	0.009	-0.068	-1.218	0.224
	Yükseklik	-0.015	0.005	-0.105	-2.988	0.003	-0.036	0.009	-0.169	-4.011	0.000	-0.017	0.005	-0.179	-3.084	0.002
Sonbahar - 2021	(Constant)	0.255	0.031		8.153	0.000	0.459	0.043		10.683	0.000	0.262	0.063		4.165	0.000
	AI	0.145	0.033	0.120	4.408	0.000	-0.159	0.057	-0.091	-2.777	0.006	0.259	0.047	0.250	5.513	0.000
	NO ₂	0.057	0.045	0.039	1.270	0.204	0.028	0.044	0.023	0.635	0.526	0.252	0.116	0.114	2.166	0.031
	SO ₂	0.083	0.028	0.077	2.913	0.004	-0.067	0.035	-0.071	-1.903	0.058	-0.035	0.062	-0.026	-0.566	0.572
	NDVI	0.848	0.055	0.441	15.390	0.000	0.718	0.069	0.353	10.476	0.000	0.756	0.083	0.406	9.146	0.000
	NDBI	0.483	0.063	0.217	7.647	0.000	0.589	0.075	0.253	7.826	0.000	0.381	0.097	0.178	3.926	0.000
	Kent Dokusu	0.014	0.004	0.101	3.476	0.001	0.015	0.004	0.136	3.700	0.000	0.012	0.008	0.070	1.649	0.100
	Kıyıya Uzaklık	-0.064	0.007	-0.274	-8.592	0.000	-0.051	0.009	-0.243	-5.836	0.000	-0.043	0.013	-0.169	-3.274	0.001

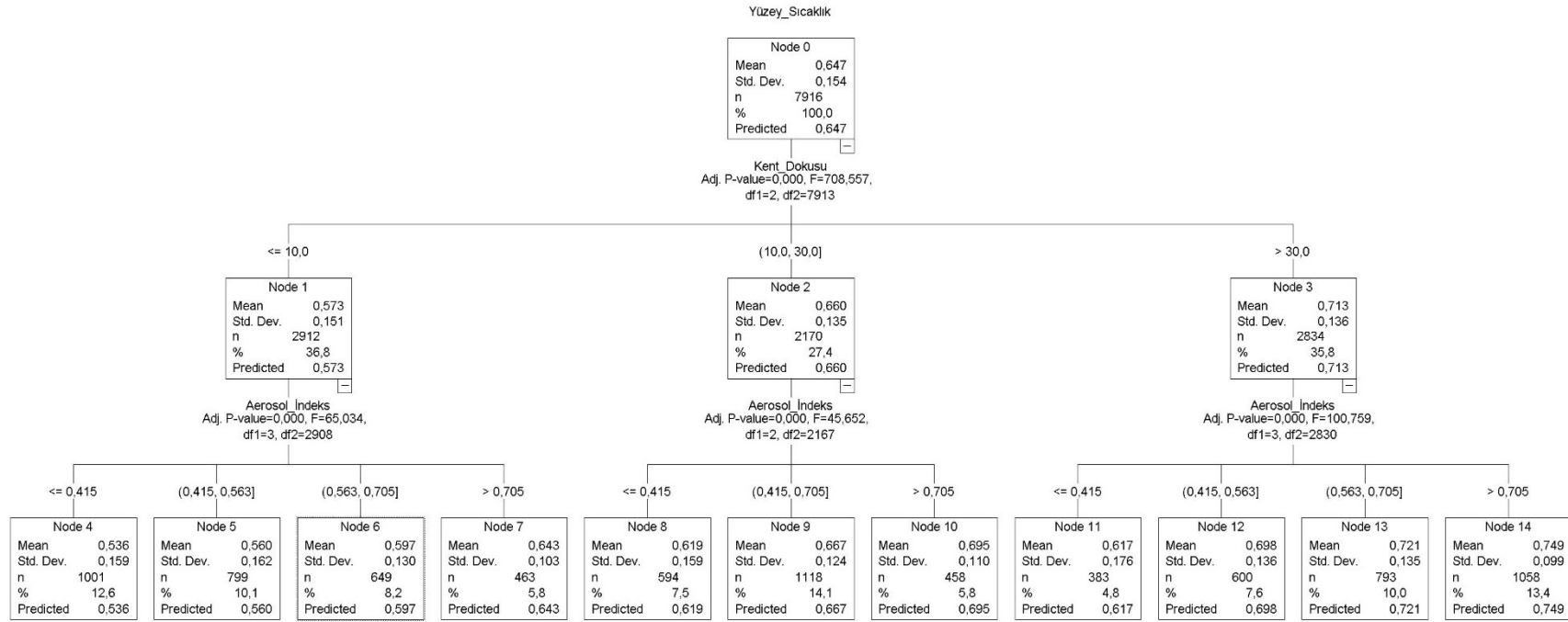
	Ormana Uzaklık	-0.012	0.008	-0.051	-1.575	0.116	0.023	0.008	0.118	2.909	0.004	-0.035	0.019	-0.094	-1.803	0.072
	Yükseklik	-0.036	0.007	-0.150	-4.958	0.000	-0.071	0.010	-0.270	-7.354	0.000	-0.032	0.011	-0.140	-2.871	0.004
İlkbahar - 2022	(Constant)	0.623	0.012		50.047	0.000	0.593	0.018		33.186	0.000	0.659	0.019		35.516	0.000
	AI	0.160	0.015	0.324	10.786	0.000	0.236	0.022	0.465	10.669	0.000	0.096	0.022	0.154	4.383	0.000
	NO ₂	-0.049	0.014	-0.127	-3.528	0.000	-0.083	0.022	-0.213	-3.813	0.000	-0.018	0.017	-0.047	-1.058	0.291
	SO ₂	0.003	0.014	0.005	0.228	0.819	-0.010	0.023	-0.017	-0.447	0.655	0.006	0.022	0.009	0.283	0.777
	NDVI	-0.006	0.027	-0.009	-0.237	0.813	0.033	0.035	0.047	0.948	0.343	-0.089	0.039	-0.119	-2.270	0.024
	NDBI	0.511	0.035	0.521	14.744	0.000	0.498	0.048	0.499	10.440	0.000	0.497	0.049	0.521	10.173	0.000
	Kent Dokusu	0.014	0.002	0.239	8.506	0.000	0.012	0.002	0.214	5.267	0.000	0.015	0.002	0.215	6.051	0.000
	Kıyıya Uzaklık	-0.001	0.003	-0.010	-0.287	0.774	-0.021	0.006	-0.197	-3.650	0.000	0.017	0.004	0.171	4.008	0.000
	Ormana Uzaklık	-0.018	0.003	-0.173	-5.538	0.000	-0.019	0.005	-0.191	-3.787	0.000	-0.023	0.005	-0.163	-4.516	0.000
	Yükseklik	-0.016	0.003	-0.148	-5.508	0.000	-0.013	0.005	-0.097	-2.497	0.013	-0.017	0.004	-0.193	-4.443	0.000
İlkbahar - 2022	(Constant)	0.670	0.010		67.276	0.000	0.653	0.013		48.754	0.000	0.691	0.016		42.400	0.000
	AI	0.107	0.012	0.220	8.909	0.000	0.140	0.017	0.288	8.265	0.000	0.101	0.019	0.158	5.288	0.000
	NO ₂	-0.012	0.011	-0.031	-1.058	0.290	0.015	0.017	0.039	0.880	0.379	-0.032	0.015	-0.080	-2.142	0.033
	SO ₂	0.004	0.012	0.007	0.372	0.710	-0.018	0.018	-0.029	-0.976	0.330	-0.001	0.019	-0.002	-0.064	0.949
	NDVI	-0.017	0.018	-0.034	-0.940	0.348	-0.013	0.021	-0.027	-0.590	0.555	-0.054	0.030	-0.104	-1.769	0.078
	NDBI	0.389	0.024	0.596	15.992	0.000	0.368	0.030	0.592	12.421	0.000	0.352	0.042	0.504	8.275	0.000

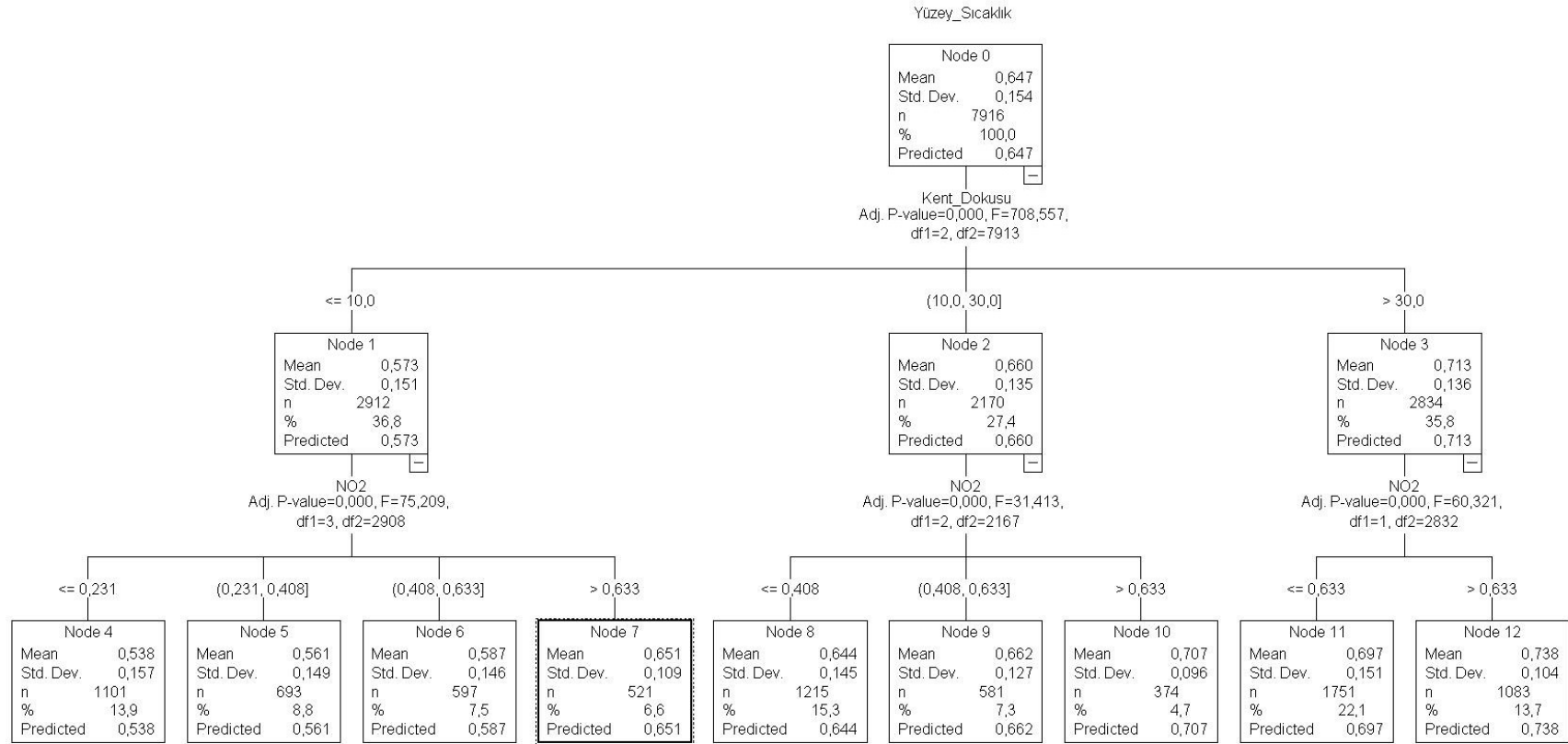
Yaz - 2022	Kent Dokusu	0.013	0.001	0.214	9.293	0.000	0.008	0.002	0.153	4.679	0.000	0.017	0.002	0.244	8.027	0.000
	Kıyıya Uzaklık	0.002	0.003	0.017	0.623	0.533	-0.012	0.004	-0.116	-2.699	0.007	0.009	0.004	0.091	2.487	0.013
	Ormana Uzaklık	-0.007	0.003	-0.065	-2.539	0.011	-0.012	0.004	-0.128	-3.168	0.002	0.001	0.004	0.007	0.238	0.812
	Yükseklik	-0.014	0.002	-0.138	-6.234	0.000	0.001	0.004	0.005	0.169	0.866	-0.021	0.003	-0.237	-6.534	0.000
	(Constant)	0.511	0.015		34.009	0.000	0.522	0.019		27.182	0.000	0.526	0.024		21.749	0.000
	AI	0.100	0.014	0.160	6.952	0.000	0.216	0.021	0.357	10.192	0.000	0.053	0.023	0.084	2.294	0.022
	NO ₂	0.103	0.014	0.216	7.260	0.000	0.021	0.021	0.046	0.969	0.333	0.054	0.040	0.061	1.375	0.170
	SO ₂	0.007	0.015	0.009	0.448	0.654	-0.005	0.018	-0.008	-0.297	0.767	0.024	0.024	0.031	0.972	0.332
	NDVI	-0.061	0.026	-0.086	-2.340	0.020	-0.053	0.030	-0.077	-1.763	0.079	-0.074	0.044	-0.106	-1.680	0.094
	NDBI	0.548	0.036	0.567	15.383	0.000	0.574	0.043	0.596	13.257	0.000	0.527	0.058	0.575	9.024	0.000
	Kent Dokusu	0.013	0.002	0.184	8.004	0.000	0.007	0.002	0.117	3.811	0.000	0.018	0.003	0.229	6.931	0.000
	Kıyıya Uzaklık	0.033	0.003	0.279	11.323	0.000	0.003	0.005	0.026	0.628	0.530	0.035	0.004	0.307	7.823	0.000
	Ormana Uzaklık	-0.009	0.003	-0.074	-2.751	0.006	-0.023	0.004	-0.209	-6.091	0.000	-0.001	0.006	-0.004	-0.110	0.912
	Yükseklik	0.005	0.003	0.039	1.750	0.080	0.020	0.005	0.133	4.290	0.000	0.000	0.004	0.004	0.109	0.914
Yaz - 2022	(Constant)	0.529	0.015		34.549	0.000	0.525	0.021		24.854	0.000	0.563	0.022		25.356	0.000
	AI	0.109	0.015	0.173	7.125	0.000	0.163	0.024	0.261	6.743	0.000	0.086	0.022	0.135	3.931	0.000
	NO ₂	0.037	0.015	0.078	2.460	0.014	0.050	0.024	0.107	2.065	0.039	-0.055	0.038	-0.062	-1.470	0.142
	SO ₂	0.022	0.015	0.030	1.451	0.147	-0.012	0.021	-0.016	-0.577	0.564	0.047	0.023	0.062	2.038	0.042

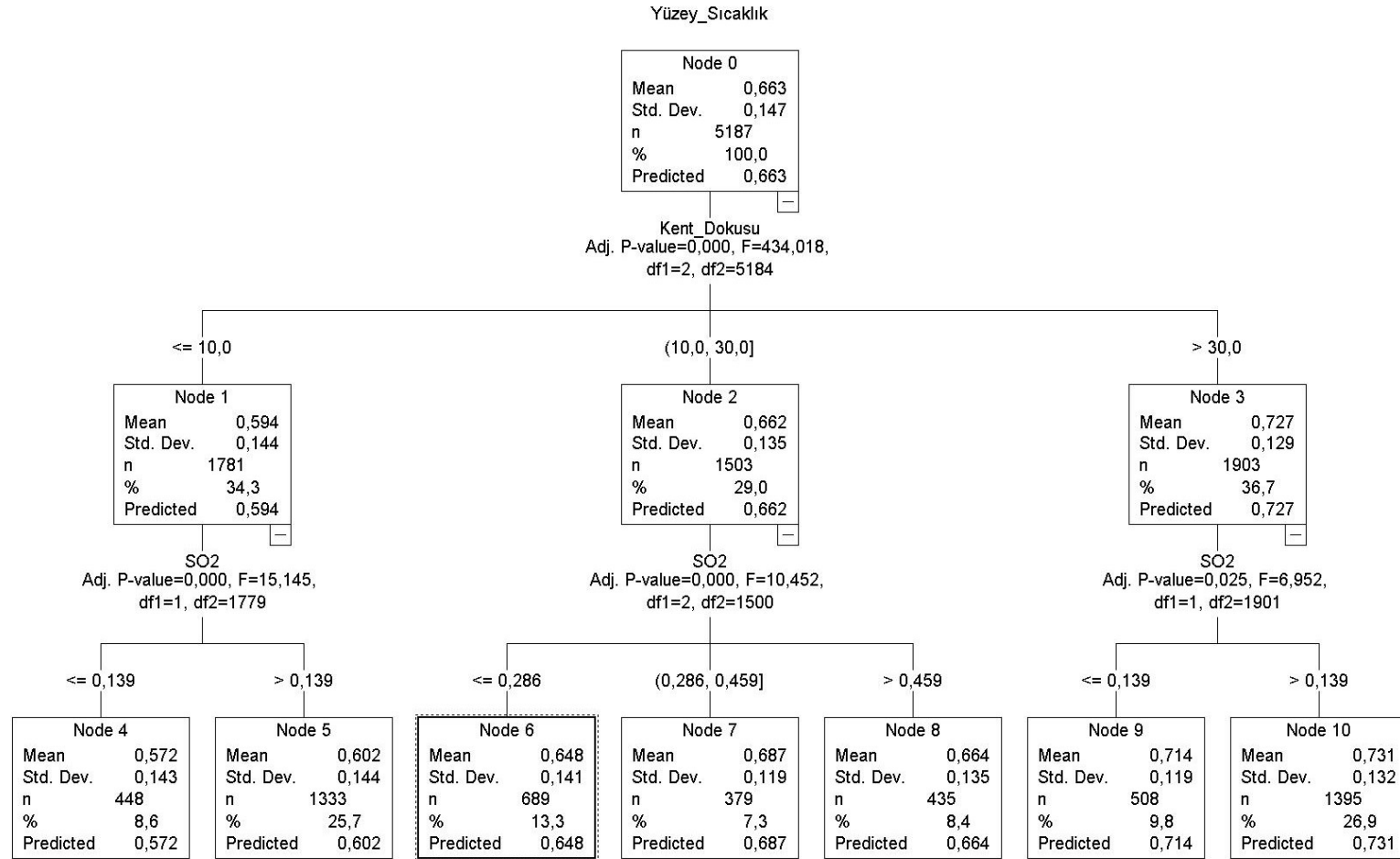
Sonbahar- 2022	NDVI	-0.109	0.021	-0.165	-5.285	0.000	-0.128	0.026	-0.192	-5.002	0.000	-0.087	0.032	-0.132	-2.713	0.007
	NDBI	0.438	0.027	0.490	16.078	0.000	0.402	0.035	0.438	11.647	0.000	0.451	0.041	0.525	10.993	0.000
	Kent Dokusu	0.018	0.002	0.269	11.429	0.000	0.014	0.002	0.212	6.481	0.000	0.019	0.002	0.236	7.788	0.000
	Kıyıya Uzaklık	0.022	0.003	0.189	7.244	0.000	0.000	0.005	0.001	0.026	0.979	0.040	0.004	0.356	9.683	0.000
	Ormana Uzaklık	-0.014	0.003	-0.117	-4.107	0.000	-0.020	0.004	-0.178	-4.721	0.000	-0.009	0.006	-0.057	-1.618	0.106
	Yükseklik	0.005	0.003	0.045	1.868	0.062	0.027	0.005	0.174	5.176	0.000	-0.011	0.004	-0.114	-3.183	0.002
	(Constant)	0.526	0.015		35.645	0.000	0.578	0.023		24.735	0.000	0.481	0.020		23.761	0.000
	AI	0.029	0.017	0.037	1.671	0.095	0.030	0.030	0.030	1.015	0.310	0.157	0.032	0.207	4.952	0.000
	NO ₂	0.078	0.015	0.146	5.380	0.000	0.074	0.018	0.157	4.111	0.000	-0.073	0.036	-0.096	-1.992	0.047
	SO ₂	-0.005	0.015	-0.007	-0.354	0.723	-0.060	0.025	-0.071	-2.417	0.016	-0.003	0.019	-0.005	-0.144	0.885
	NDVI	-0.074	0.022	-0.106	-3.409	0.001	-0.067	0.028	-0.099	-2.441	0.015	-0.079	0.035	-0.116	-2.283	0.023
	NDBI	0.493	0.029	0.518	16.983	0.000	0.528	0.038	0.544	13.773	0.000	0.435	0.044	0.490	9.832	0.000
Sonbahar- 2022	Kent Dokusu	0.016	0.002	0.213	8.635	0.000	0.013	0.002	0.191	5.296	0.000	0.019	0.003	0.226	6.626	0.000
	Kıyıya Uzaklık	0.025	0.003	0.192	7.466	0.000	0.014	0.005	0.110	2.780	0.006	0.009	0.006	0.073	1.582	0.115
	Ormana Uzaklık	0.007	0.004	0.056	2.021	0.044	0.002	0.005	0.013	0.329	0.743	0.016	0.007	0.090	2.417	0.016
	Yükseklik	-0.012	0.003	-0.091	-3.530	0.000	-0.009	0.006	-0.055	-1.559	0.120	-0.012	0.004	-0.110	-2.687	0.008

EK-9 Yüzey Sıcaklığı-Kentsel Doku - Hava Kirleticileri Karar Ağacı

Yüzey Sıcaklığı-Kentsel Doku - Aerosol İndeks



Yüzey Sıcaklığı-Kentsel Doku - NO₂

Yüzey Sıcaklığı-Kentsel Doku - SO₂

ÖZGEÇMİŞ

Derya ARABACI

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Doktora	Akdeniz Üniversitesi
2019-2025	Fen Bilimleri Enstitüsü, Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Anabilim Dalı, Antalya
Yüksek Lisans	Sivas Cumhuriyet Üniversitesi
2018-2019	Fen Bilimleri Enstitüsü, Geomatik Mühendisliği Anabilim Dalı, Sivas
Lisans	Erciyes Üniversitesi
2012-2017	Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği, Bölümü, Kayseri

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Öğretim Görevlisi	Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Atça MYO
2020-Devam Ediyor	Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, Aydın
Bölüm Başkan Yardımcısı	Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Atça MYO
2023-Devam Ediyor	Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, Aydın
Komisyon Üyesi	Aydın Adnan Menderes Üniversitesi
2024-Devam Ediyor	Proje ve Arge Koordinatörlüğü, Aydın

ESERLER

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

- 1- Kuşçu Şimşek Çağdaş, Arabacı Derya, Yücel Cengiz, Öztürk Büşra (2024). Monitoring the climatic effects of street tree plantation in different urban patterns by synthetic image-based BPNN simulations. Building and Environment, 250(111173), 1-12., Doi: 10.1016/j.buildenv.2024.111173
- 2- Arabacı Derya, Kuşçu Şimşek Çağdaş (2023). Prediction of climatic changes caused by land use changes in urban area using artificial neural networks. Theoretical and Applied Climatology, Doi: 10.1007/s00704-023-04386-4
- 3- Kuşçu Şimşek Çağdaş, Arabacı Derya (2021). Simulation of the climatic changes around the coastal land reclamation areas using artificial neural networks. Urban Climate, 38, Doi: 10.1016/j.uclim.2021.100914

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler

- 1- Arabacı Derya, Kuşçu Şimşek Çağdaş, Ünal Alper, Kılçık Ali (2024). An Investigation of the Relationship Between Air Pollutants and Local Climate. ANISF Antalya International Science Forum (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)
- 2- Arabacı Derya, Kuşçu Şimşek Çağdaş, Olgun Büşra (2023). Cooling Cities Through Street Tree Plantation As A Nature-Based Solution: Case Study of Antalya. ANISF Antalya International Science Forum (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)
- 3- Kuşçu Şimşek Çağdaş, Arabacı Derya, Olgun Büşra (2022). Creating Cool Island with Street Afforestation: The Case Study of Antalya. 5th International Conference of Contemporary Affairs in Architecture and Urbanism (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)
- 4- Kuşçu Şimşek Çağdaş, Arabacı Derya (2021). The Impacts of Coastal Land Reclamation Areas on Urban Climate. Cedesu 2021 2nd International City and Ecology Congress Within the Framework of Sustainable Urban Development, 1(1), 228-233. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)
- 5- Kuşçu Şimşek Çağdaş, Arabacı Derya, Çelik Ufuk (2021). The Impacts of Coastal Reclamation Areas on Cooling of the Urban Environment. 34th International Geographical Congress (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)
- 6- Arabacı Derya, Kuşçu Şimşek Çağdaş (2020). Comparison of the Success Rates of Different Study Scales in ANN-based Urban Climate Simulations. The Mediterranean Scientific Association for Environmental Protection International (MESAEP) (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)
- 7- Işık Derya, Kuşçu Şimşek Çağdaş (2019). Urban Climate Change Prediction by Using Artificial Neural Networks: A Case Study of 3rd Bosphorus Bridge. Production of Climate Responsive Urban Built Environments (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)

Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler

1- Kuşçu Şimşek Çağdaş, Arabacı Derya (2023). Kıyı Arazi Islah Alanlarının Kentsel İklim Üzerine Etkileri. Türkiye Ulusal Fotogrametri ve Uzaktan Algılama Birliği (TUFUAB) XII. Teknik Sempozyumu (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)

2- Işık Derya, Kuşçu Şimşek Çağdaş (2019). Yapay Sinir Ağları ile Kentsel İklim Simülasyonu. TMMOB 6.Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)

