
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

HAVA KİRLİLİĞİ'NİN TÜRKİYE'NİN UNESCO DÜNYA MİRAS LİSTESİ'NDE YER ALAN TAŞINMAZ KÜLTÜR VARLIKLARI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Hasret ŞAHİN

DOKTORA TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAZİRAN 2025

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Hasret ŞAHİN

20/06/2025

HAVA KİRLİLİĞİ'NİN TÜRKİYE'NİN UNESCO DÜNYA MİRAS LİSTESİ'NDE YER ALAN TAŞINMAZ KÜLTÜR VARLIKLARI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

(Doktora Tezi)

Hasret ŞAHİN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2025

ÖZET

Yapısal kültürel miras alanlarının yüzey aşınım ve korozyon derecesi, COVID-19 pandemisi süresince hava kirliliği eğilimlerinde meydana gelen değişimler göz önünde bulundurularak incelenmiştir. İstanbul Tarihi Yarımadası bu bağlamda örnek çalışma alanı olarak ele alınmıştır. Elde edilen temel bulgular, sıkı karantina önlemleri sırasında hareketliliğin kısıtlanmasının PM_{10}, SO_2, NO_2 ve O_3 seviyelerinde gözle görülür bir azalmaya katkı sağladığını göstermektedir. Bu durum, malzemelerdeki yüzey aşınım oranında ya da korozyon derinliğinde geçici bir düşüşe yol açmıştır. Portland kireçtaşı ve beyaz mansfield dolomitik kumtaşı için yüzey aşınma oranındaki en yüksek azalma sırasıyla %7,2 ve %7,5'e ulaşırken, dökme bronz için bu oran %17,1'e, çinko için ise %4'e kadar çıkmaktadır. Sultanahmet Kentsel Arkeolojik Alanı hariç olmak üzere, karbon çeliği ve bakırın korozyon derinliklerinde gözlemlenen değişim sınırlı kalmış ve %2'nin altında gerçekleşmiştir. Pandemi dönemindeki azalmaya rağmen, portland kireçtaşının yüzey aşınma oranı ile bakır ve çinkonun korozyon derinliği değerleri 2050 eşiklerini aşmış olduğu tespit edilmiştir. Bu da söz konusu malzemelerin ciddi hasar gördüğünü ortaya koymaktadır. Bu bulgular, İstanbul Tarihi Yarımadası için geçici çözümlerin ötesine geçen, artan kentsel ve trafik kaynaklı hareketliliği dikkate alan kapsamlı koruma stratejilerinin gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Bilim Kodu	:	90103
Anahtar Kelimeler	:	Kültürel miras, çoklu kirletici risk değerlendirmesi, hava kirliliği, korozyon, haritalama, COVID-19.
Sayfa Adedi	:	103
Danışman	:	Prof. Dr. Adnan SÖZEN

AIR POLLUTION EFFECTS ON TANGIBLE CULTURAL HERITAGE PROPERTIES OF TURKEY'S LISTED AS UNESCO WORLD HERITAGE

(Ph. D Thesis)

Hasret ŞAHİN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2025

ABSTRACT

The surface recession and corrosion levels of built cultural heritage sites were examined by considering the changes in air pollution trends during the COVID-19 pandemic. In this context, Istanbul's Historic Peninsula was selected as a case study area. The main findings indicate that the restriction of mobility during strict lockdown measures contributed significantly to the visible decrease in PM_{10}, SO_2, NO_2, and O_3 levels. This situation led to a temporary reduction in the surface recession rates or corrosion depths of materials. The highest decrease in surface recession rates was recorded as 7.2% for Portland limestone and 7.5% for white mansfield dolomitic sandstone, while the reduction reached 17.1% for cast bronze and up to 4% for zinc. Except for the Sultanahmet Urban Archaeological Site, the observed changes in the corrosion depths of carbon steel and copper remained limited, staying below 2%. Despite the decrease during the pandemic period, the surface recession rate of portland limestone and the corrosion depths of copper and zinc were found to have exceeded the 2050 thresholds. This indicates that these materials have suffered significant damage. These findings highlight the necessity of comprehensive conservation strategies that go beyond temporary measures and take into account the increasing urban and traffic-related mobility in the Historic Peninsula of Istanbul.

Science Code	:	90103
Key Words	:	Cultural heritage, multi-pollutant risk assessment, air pollution, corrosivity, mapping, COVID-19.
Page Number	:	103
Supervisor	:	Prof. Dr. Adnan SÖZEN

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sürecinde bilgi ve deneyimlerini benden esirgemeyen değerli tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Adnan SÖZEN başta olmak üzere, Tez İzleme Komitesi üyeleri Sayın Prof. Dr. Tayfun MENLİK ve Doç. Dr. Ata HANLAR'a içten teşekkürlerimi sunarım. Doktora sürecim boyunca bana her türlü desteği sağlayan, çalıştığım araştırma alanına olan ilgimi ve sevgimi daha da pekiştiren, karşılaştığım her güçlükte yanımda olan Gazi Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü'nün kıymetli öğretim üyelerine en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu akademik yolda bana özellikle ilham veren ve sabırla öğrenme sürecimi destekleyen emekli Prof. Dr. Kurtuluş BORAN'a; nükleer enerji alanında çevresel konulara dair altyapımı güçlendiren Prof. Dr. Âdem ACIR'a; enerji verimliliği konusundaki katkılarıyla bana yeni bakış açıları kazandıran Prof. Dr. Mustafa AKTAŞ'a ve beni hidrojen teknolojileri ile tanıştıran Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ'a şükranlarımı sunarım.

Sonsuz sevgileri, anlayışları ve sürekli teşvikleriyle her zaman yanımda olan aileme gönülden teşekkür ederim. Özverili çalışmaları ve manevi destekleriyle beni her daim destekleyen kıymetli anne ve babam Aliekber ŞAHİN ile Pervin ŞAHİN'e, sevgili kardeşim Yusuf Oğul ŞAHİN'e ve güzel yüreğiyle her zaman yanımda olan teyzem Müjgan ATEŞ'e müteşekkirim. Tez yazım sürecinde bana rehberlik eden, sabır ve sevgiyle bu sürecin tamamlanmasını bekleyen Yousef POURJAMAL'a içtenlikle teşekkür ederim. Ayrıca, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, varlıklarıyla bana güç veren tüm dostlarıma da en derin teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ xi

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xiii

RESİMLERİN LİSTESİ xiv

HARİTALARIN LİSTESİ xvi

SİMGELER VE KISALTMALAR xvii

1. GİRİŞ 1

2. KÜLTÜREL MİRAS 7

2.1. Kültürel Miras Tanımı ve Sınıflandırılması 7

2.2. Türkiye'nin Somut ve Taşınamayan Kültürel Miras Varlıkları 8

2.2.1. Divriği ulu camii ve darüşşifası 9

2.2.2. İstanbul'un tarihi alanları 10

2.2.3. Göreme milli parkı ve Kapadokya 11

2.2.4. Hattuşa-Hitit başkenti 12

2.2.5. Nemrut dağı 13

2.2.6. Hierapolis-Pamukkale 14

2.2.7. Xanthos-Letoon 15

2.2.8. Safranbolu şehri 15

2.2.9. Troya antik kenti 16

2.2.10. Edirne Selimiye camii ve külliyesi 17

Sayfa

2.2.11. Çatalhöyük neolitik alanı 17
2.2.12. Bursa ve Cumalıkızık 18
2.2.13. Bergama çok katmanlı kültürel peyzaj alanı 19
2.2.14. Diyarbakır kalesi ve hevsel bahçeleri kültürel peyzajı 19
2.2.15. Efes 20
2.2.16. Ani arkeolojik alanı 21
2.2.17. Afrodisias antik kenti 21
2.2.18. Göbeklitepe 22
2.2.19. Arslantepe höyüğü 23
2.2.20. Gordion 23
2.2.21. Anadolu'nun ortaçağ dönemi ahşap hipostil camiileri 24
3. HAVA KİRLİLİĞİ'NİN ETKİLERİ 25
3.1. Kültürel Varlıklarının Üzerinde Oluşabilecek Hasarlar 25
3.2. Çevresel Etkenler 29
3.2.1. Radyasyon 29
3.2.2. Sıcaklık 29
3.2.3. Yağış ve nem 30
3.2.4. Hava kirliliği 31
3.2.5. Rüzgâr 33
3.2.6. Meteorolojik ve klimatolojik etkenler 33
3.2.7. Hava kirliliği ve meteorolojik olaylarının sinerjik etkisi 34
4. ÇALIŞMA ALANI 37
4.1. Çalışma Alanın Seçilmesinde Kullanılan Kriterler 37
4.2. Çalışma Alanı Hakkında 38

Sayfa

5. UYGULANAN YÖNTEM 41
5.1. Verilerin Toplanması ve İşlenmesi 41
5.1.1. Hava kirliliği verileri 42
5.1.2. Meteoroloji gözlem verileri 47
5.2. Ordinary Kriging Analizi 49
5.2.1. Ordinary kriging yöntemi 49
5.2.2. Moran I testi 51
5.2.3. Smart-Map eklentisi 52
5.2.4. Ordinary kriging analizinin yapılması 54
5.3. Doz-Etki Fonksiyonları 55
5.3.1. Yüzey aşınımı ve korozyon derinlik miktarlarının hesaplanması 59
6. ANALİZ SONUÇLARI 61
6.1. Hava Kirliliği Haritaları 61
6.1.1. Sonuçların literatür bulguları ile karşılaştırılması 68
6.1.2. Hava kirliliği modellemesinde R^2 ve RMSE değerleri 69
6.2. Meteorolojik Parametrelerin Modellenmesi 69
6.2.1. Meteoroloji parametrelerinin R2 ve RMSE değerleri 71
6.3. Yüzey Aşınım ve Korozyon Haritaları 73
6.3.1. Portland kireçtaşı 73
6.3.2. Beyaz mansfield dolomitik kumtaşı 76
6.3.3. Dökme bronz 77
6.3.4. Karbon çelik 79
6.3.5. Çinko 80
6.3.6. Bakır 82

Sayfa

7. TARTIŞMA 85

8. SONUÇ VE ÖNERİLER 87

8.1. Sonuçlar ve Öneriler 87

8.2. Sınırlılıklar 88

KAYNAKLAR 89

ÖZGEÇMİŞ 103

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Türkiye'nin Dünya Kültür Miras Listesi'ndeki kültürel miras varlıkları... 9

Çizelge 5.1. Çalışma alanı için seçilen HKİ istasyonları..... 43

Çizelge 5.2. 2019 yılına ait yıllık ortalama hava kalitesi verileri 46

Çizelge 5.3. 2020 yılına ait yıllık ortalama hava kalitesi verileri 46

Çizelge 5.4. 2021 yılına ait yıllık ortalama hava kalitesi verileri 47

Çizelge 5.5. 20 km yarıçap mesafesinin içinde yer alan MG istasyonları..... 48

Çizelge 5.6. 2019 yılına ait yıllık ortalama sıcaklık, yağış ve bağıl nem verileri..... 48

Çizelge 5.7. 2020 yılına ait yıllık ortalama sıcaklık, yağış ve bağıl nem verileri..... 48

Çizelge 5.8. 2021 yılına ait yıllık ortalama sıcaklık, yağış ve bağıl nem verileri..... 49

Çizelge 5.9. pH ve [H^+] (mg/L) değerleri..... 57

Çizelge 5.10. Tolere edilebilir korozyon ve yüzey aşınım sınırları (µm)..... 59

Çizelge 6.1. Dört alt bölge için yıllık ortalama PM_{10} (µg/m^3) tahmini değerleri 62

Çizelge 6.2. Dört alt bölge için yıllık ortalama SO_2 (µg/m^3) tahmini değerleri 64

Çizelge 6.3. Dört alt bölge için yıllık ortalama NO_2 (µg/m^3) tahmini değerleri..... 67

Çizelge 6.4. Dört alt bölge için yıllık ortalama O_3 (µg/m^3) tahmini değerleri 67

Çizelge 6.5. Hava kirliliği modellemesinin R^2 ve RMSE değerleri 69

Çizelge 6.6. Dört alt bölge için yıllık ortalama sıcaklık (°C) tahmini değerleri..... 70

Çizelge 6.7. Dört alt bölge için yıllık ortalama yağış (mm) tahmini değerleri..... 70

Çizelge 6.8. Dört alt bölge için yıllık ortalama bağıl nem (%) tahmini değerleri 71

Çizelge 6.9. Sıcaklık, yağış ve bağıl nem parametrelerinin R^2 ve RMSE değerleri..... 72

Çizelge 6.10. Dört alt bölge için yıllık ortalama nitrik asit (µg/m^3) tahmini değerleri .. 72

Çizelge 6.11. Portland kireçtaşının yüzey aşınım değerleri (µm)..... 76

Çizelge 6.12. Beyaz mansfield dolomitik kumtaşının yüzey aşınım değerleri..... 77

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 6.13. Dökme bronzun korozyon derinlik değerleri (µm)..... 79

Çizelge 6.14. Karbon çeliğin korozyon derinlik değerleri (µm)..... 80

Çizelge 6.15. Çinkonun korozyon derinlik değerleri (µm)..... 82

Çizelge 6.16. Bakırın kütle kaybı değerleri (g/m^2)..... 83

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. UNESCO tarafından miras sınıflandırılması 8

Şekil 3.1. Çevresel etkenlerin yol açtığı hasar tipleri 26

Şekil 4.1. İnceleme alanı ve HKİ istasyonlarının gösterimi 39

Şekil 5.1. Bu çalışmada kullanılan veri yönetim süreci 41

Şekil 5.2. Çalışma alanın 20 km yarıçap çevresinde bulunan HKİ istasyonları 43

Şekil 5.3. Başakşehir istasyonundaki konsantrasyonlarındaki değişimleri 45

Şekil 5.4. Ordinary Kriging enterpolasyon yöntemi ve yarı variogram grafiği 50

Şekil 5.5. Moran I istatistiğinde kullanılan otokorelasyon tanımları 52

Şekil 5.6. Ordinary Kriging analiz sürecine ilişkin akış şeması 55

Şekil 5.7. Hasar haritalarının hesaplanma sürecine ilişkin yöntem akış şeması 60

Şekil 7.1. Yüzey aşınma miktarı ve korozyon derinliklerinin karşılaştırılması 86

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 2.1. Divriği Ulu Camii ve darüşşifası 10

Resim 2.2. İstanbul'un tarihi alanları..... 11

Resim 2.3. Göreme Milli Parkı ve Kapadokya 12

Resim 2.4. Hattuşa-Hitit Başkenti 12

Resim 2.5. Nemrut dağı 13

Resim 2.6. Pamukkale 14

Resim 2.7. Hierapolis Antik Kenti..... 14

Resim 2.8. Xanthos-Letoon 15

Resim 2.9. Safranbolu Şehri 16

Resim 2.10. Troya Antik Kenti..... 16

Resim 2.11. Edirne Selimiye Camii ve Külliyesi 17

Resim 2.12. Çatalhöyük Neolitik alanı..... 18

Resim 2.13. Bursa ve Cumalıkızık: Osmanlı İmparatorluğunun doğuşu 18

Resim 2.14. Bergama Çok Katmanlı Kültürel Peyzaj Alanı 19

Resim 2.15. Diyarbakır Kalesi ve Hevsel Bahçeleri kültürel peyzajı..... 20

Resim 2.16. Efes-Celsus kütüphanesine ait kalıntılar..... 20

Resim 2.17. Ani Arkeolojik alanı 21

Resim 2.18. Afrodisias Antik Kenti..... 22

Resim 2.19. Göbeklitepe'de kireçtaşından oluşan sütunlar..... 22

Resim 2.20. Arslantepe Höyüğü 23

Resim 2.21. Gordion kültürel miras alanı..... 24

Resim 2.22. Ahşap kirişli tavanlar..... 24

Resim 3.1. Diyarbakır Ulu Camii sütunlarda gözlemlenen yüzey aşınması..... 27

Resim **Sayfa**

Resim 3.2. Fethiye kaya mezarlarında görülen kirlenme ve renk değişimleri..... 27

Resim 3.3. Edirne Bayezid Camii'nde görülen liken ve yosunlar..... 27

Resim 3.4. Metal malzemelerde gözlemlenen korozyon..... 28

Resim 5.1. Başakşehir istasyonu için oluşturulan veri tabanı..... 44

Resim 5.2. 2021 yılı için seçilen HKİ istasyonlarına ait veri tabanı..... 44

Resim 5.3. Ordinary Kriging yöntemini uygulanırken kullanılan arayüzü 53

Resim 5.4. Destek vektör makine yöntemini uygulanırken kullanılan arayüzü 54

HARİTALARIN LİSTESİ

Harita **Sayfa**

Harita 6.1. PM_{10} ve SO_2 analiz sonuçları 63

Harita 6.2. NO_2 ve O_3 analiz sonuçları 66

Harita 6.3. HNO_3 haritaları 73

Harita 6.4. Seçilen taş türlerinde meydana gelen yüzey aşınım seviyeleri 75

Harita 6.5. Dökme bronz ve karbon çeliğinin hesaplanan korozyon derinlikleri 78

Harita 6.6. Çinkonun korozyon derinliği ve bakırın yıllık kütle kaybı seviyeleri 81

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
%	Yüzde
°C	Santigrat
µg	Mikrogram
µm	Mikrometre (micron)
E	Matematiksel beklentiyi değeri
e	Euler'in sayısı (~2.71828)
f	Fonksiyon
km	Kilometre
L	Litre
m	Metre
m3	Metreküp
mg	Miligram
ML	Kütle kaybı (g/m^2)
mm	Milimetre
n	Veri küme setinde bulunan nokta sayısı
n_b	Aşınma ve korozyon oranlarının sabiti
R	Korozyon derinliği (**µm)**
R^2	Determinasyon katsayısı
R_b	Arka plan korozyon/yüzey aşınma oranları
Rb	Metrekare
Rh	Yıllık ortalama bağıl nem (%)
Rh60	60% seviyesinde olan Rh (%)
Rtol	Tolere edilebilir hasar oranları
T	Sıcaklık
x	Nokta
z (x)	Seçilen noktanın mekânsal temsili

Simgeler	Açıklamalar
λ	Mekânsal ağırlık değeri
σ	Tahmini hata varyansı

Kısaltmalar	Açıklamalar
BM	United Nations
CH_4	Metan
CO	Karbon monoksit
CO_2	Karbon dioksit
COVID-19	Yeni Koronavirüs hastalığı
E	Endüstriyel
H^+	Hidrojen iyonu
H_2O	Su
H_2SO_4	Sülfürik asit
HKİ	Hava kalitesi izleme
HNO_3	Nitrik asit
HSO_3^-	Hidrojen sülfit iyonu
ICP	Uluslararası Kooperatif Programı
K	Kentsel
KAP	Kentsel arka plan
KIR	Kırsal
MG	Meteoroloji gözlem
MGM	Meteoroloji Genel Müdürlüğü
N_2O	Azot proksit
NaCl	Sodyum klorür
NO	Azot monoksit
NO_2	Azot dioksit
NO_3^-	Nitrat
NO_X	Azot oksitler
O_3	Ozon
pH	Asit veya bazlık derecesi, potansiyel hidrojen

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
PM	Partikül maddeler
PM_{10}	Çapı 10 mikron veya daha küçük olan PM
QGIS	Quantum Geographic Information System
RMSE	Kök ortalama kare hatası
SO_2	Sülfür dioksit
SO_4^{2-}	Sülfat
SO_X	Sülfür oksitler
UHKİA	Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı
UNESCO	BM Eğitim, Bilim ve Kültür Örgütü
UV	Ultraviyole

1. GİRİŞ

Kültürel miras, bir ulusun veya ulusların geçmişten aldığı ve gelecek nesillere aktardığı birikimler olarak tanımlanmaktadır. Birleşmiş Milletler (BM) Eğitim, Bilim ve Kültür Örgütü (UNESCO)'nün kurucu sözleşmesine taraf olunması ile medeniyetlerin beşiği olarak adlandırılan ülkemiz, 1972 yılında UNESCO Dünya Kültürel ve Doğal Mirasının Korunmasına Dair Sözleşmeyi 1982 yılında kabul etmiş ve onaylamıştır [1]. Ülkemizin, UNESCO'nun katı kriterler çerçevesinde kabul ettiği kültürel miras listesinde 16 adet somut taşınamayan kültürel miras ve hem doğal hem de kültürel miras olarak kabul edilen 2 adet karma somut kültürel miras olmak üzere toplamda 18 adet taşınamayan somut kültürel miras alanı bulunmaktadır [2]. UNESCO önderliğinde 2014 yılında kültürel miras varlıkları üzerindeki çevresel ve sosyal etkileri inceleyen genel kapsamlı araştırma yapılmıştır. Bu çalışmada, çevresel, sosyal ve ekonomik dış etkenlerin oluşturduğu on dört ana faktör belirlenmiştir [3]. Bu faktörler içerisinde insan aktiveleri, hava kirliliği, iklim değişikliği, şiddetli hava olayları, ekolojik ve jeolojik olaylar son yıllarda kültürel miras varlıklarına en fazla zarar veren faktörler listelenmiştir.

Çevresel etkilerin, kültürel miras varlıklarının yapısal malzemelerinde korozyon, kirlenme, aşındırma ve yapısal bozulma yarattığı, hava koşullarına bağlı olarak bu bozulmayı hızlandırdığı bilinmektedir [4]. Kültürel miraslar üzerindeki malzeme kayıpları ve kalıcı zararlar, biyolojik, fiziksel ve kimyasal süreçler ya da bu süreçlerin bir kombinasyonu sonucunda meydana gelmektedir. Kimyasal süreçlerde, atmosfer kimyasındaki değişiklikler, hava kirliliğinin uzun süreli ve sınır ötesi etkileri nedeniyle malzemeler üzerinde geri dönüşü olmayan yıkıcı etkilere yol açmaktadır [4]. İklim değişikliği, kültürel miras üzerinde geri dönüşü olmayan yıkıcı etkilerin güçlendirebilmekte ve bu etkileri daha da kalıcı hale getirebilmektedir [5–7]. Bu noktada, hava kirliliğinin ölçülebilirliği, bu çevresel dış faktörlerin potansiyel sonuçlarını tahmin edebilmeyi ve kültürel miras varlıklarının malzemeleri üzerindeki somut etkilerini ölçmeyi daha kolay hale getirmektedir.

Çeşitli hava kirleticilerinin ekosistem ve malzemelerin hayati bileşenleri üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla, 1980'lerin ortalarında Uluslararası Kooperatif Programı (ICP) başlatılmıştır. 1995 yılından itibaren ICP-Materyaller programı, gaz halindeki kirleticilerle ilgili çalışmaları başlatarak hava kirliliğinin kültürel miras üzerindeki olası

etkilerini tahmin etmeye çalışmaktadır. Bu program, hava kirliliğinin birincil ve ikincil kirleticilerini ölçmek için formüllerin geliştirilmesine yardımcı olmuş, hava koşullarının karmaşıklığını (özellikle sıcaklık, yağış ve nem değişkenlerini) göz önüne alarak bir dizi hesaplama yöntemleri geliştirmiştir [8–10]. Özellikle, belirlenen temel hava kirleticileri, sülfür içeren bileşikler (sülfür dioksit, SO_2), azot içeren bileşikler (azot protoksit, N_2O; azot oksitleri, NO_X), karbon içeren bileşikler (karbon dioksit, CO_2; karbon monoksit, CO; metan, CH_4) ve troposferik ozon (O_3) olarak sıralanmaktadır. Bunlar arasında, atmosferdeki zincir reaksiyonları sonucu oluşan ikincil hava kirleticileri, başta sülfürik asit (H_2SO_4) ve nitrik asit (HNO_3) olmak üzere, asitleşmeye bağlı malzeme bozulmalarını hızlandırmaları nedeniyle kritik öneme sahiptir [4,11]. Ayrıca, kültürel miras varlıklarında bulunan yaygın metaller (örneğin, çelik, çinko, alüminyum, bakır ve döküm bronz), atmosferdeki SO_2 konsantrasyonundaki artışa bağlı olarak korozyon ve yüzey aşınmasına karşı hassastır. Bu artış, esasen fosil yakıtların yakılması ve sülfürlü cevherlerin eritilmesiyle salınmaktadır [12,13].

Özellikle, sülfür dioksitin karbonat bazlı malzemelerle reaksiyona girmesi sonucu alçı taşı oluşmaktadır. Atmosferden gelen partiküller bu oluşum sırasında bileşiğe yapışarak yapısını değiştirir. Oluşan bu bileşik, zamanla yağış ve nem etkisi ile kararmış bir yüzeye dönüşerek malzeme kaybı ve çatlaklara yol açarak aşınmayı hızlandırmaktadır [14,15]. Öte yandan, kültürel mirasla ilgili materyaller, birincil hava kirletici olan atmosferik azot monoksit (NO) konsantrasyonundan direk olarak etkilenmemektedir. Ancak, azot monoksit ozonun oksitlemesi sonucu atmosferde azot dioksit (NO_2) oluşumunu sağlamakla beraber daha bir ileri proses olan HNO_3 ve partiküler nitrat (NO_3^-) konsantrasyonlarında artışa yol açmaktadır [4,16]. Benzer bir durum, ozonun ve SO_2'nin oksidasyonunun bir sonucu olan H_2SO_4 için de geçerlidir [12]. Kısacası, ikincil kirletici konsantrasyonları, malzeme korozyonu ve taş yüzey aşınımı ile bağlantılı olmasının yanı sıra malzeme kaybı tahminlerinde belirleyici faktörlerden biri olan yağış pH'ı üzerinde dolaylı bir etkiye sahiptir [4,12]. Bunlar arasında farklı bir konuma sahip olan CO_2, kirletici olarak değil, iklime bağlı bir emisyon olarak kabul edilmektedir. Ancak atmosferik konsantrasyonundaki yoğun artış, karbonat taşlarının kimyasal olarak çözünmesine ve böylece malzemenin ayrışmasına yol açmaktadır [6,17]. Bunun ötesinde, çoğunlukla ulaşım faaliyetleri nedeniyle fosil yakıtların eksik yanmasının sonucu olarak partikül maddelerin (PM) salınması, kültürel miras varlıklarının kararmasına yol açmaktadır. Partikül maddeler, atmosferde bulunan SO_2

kirleticisi ve nem ile etkileşime girerek kültürel miras varlıklarında yüzey aşınım miktarını ve korozyon oranını daha da arttırmaktadır [11,18].

Öncü çalışmalar [13,19–23], hava kirliliği ve meteorolojik koşulların konuma bağlı olarak değişmesi nedeniyle, atmosferik bozulmanın kültürel miras malzemeleri üzerindeki ölçülebilir etkilerini aktarmak için çeşitli yöntemler sunmaktadır. Yerel etkileri daha doğru bir şekilde tasvir etmek için haritalama, hava kirliliği ve meteorolojik verilerin birlikte kullanılmasını kapsaması nedeniyle hasar tahmin teknikleri tercih edilmektedir. Bu yöntemde, doz-etki fonksiyonlarında hava kirliliği ve meteorolojik kilit parametreler olarak kullanılmaktadır. Yıllık verilerin karşılaştırılması yoluyla, kültürel miras materyallerine verilen zararın boyutu tahmin edilmektedir. Örneğin, doz-tepki fonksiyonları, farklı modelleme dönemlerinde Madrid için yapılan iki tamamlayıcı çalışmada dökme bronz korozyonunu ve portland kireçtaşının yüzey aşınma seviyelerini tahmin etmek için kullanılmaktadır [19,20]. Her iki çalışmanın bulguları, dökme bronz korozyonu ve portland kireçtaşı yüzey aşınma seviyelerinin tolere edilebilir bozulma eşikleri içinde kaldığını göstermektedir. Ancak, haritalama tekniği kullanılarak bu çalışmaların bulgularının derinlemesine karşılaştırılması, zaman içinde hava kirletici konsantrasyonlarının artmasıyla birlikte yapılı mirasa yönelik tahmin edilen hasarın da arttığını ortaya koymaktadır [19,20].

Materyaller üzerinde bakır korozyonu kapsayan, Avrupa'nın kültürel miras varlıklarındaki bozulma derecesini tespit etmeye yönelik bir araştırmanın sonucunda, materyaller üzerinde oluşan korozyonunun başlıca sorumlusunun PM_{10} (çapı 10 mikron veya daha küçük olan partikül maddeler) olduğunu göstermektedir. Bu durumun ana nedeni, PM_{10} ve SO_2'nin atmosferde bulunan nem ile reaksiyon oluşturması ve bunun da kültürel miras varlıklarının yapısal malzeme yüzeylerini aşındıran ve zarar veren asidik bileşikler üretmesidir. Ek olarak, aşınma ve yüzey bozulmasının temelinde yatan kimyasal süreçlerde yağış pH'ının kilit bir faktör olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, 2030 yılına yönelik senaryolarda ise, bakır ve bronz korozyon seviyeleri ile portland kireçtaşı yüzey aşınım seviyelerinin, özellikle Balkanlar ve Türkiye'de uluslararası standartlara göre belirlenen tolere edilebilir bozulma eşiklerini aşabileceğini göstermektedir [22].

Benzer bulgular, Avrupa'ya odaklanan ve ayrıca çelik, çinko ve camın bozulma seviyelerini inceleyen yakın tarihli bir çalışma tarafından da gözlemlenmiştir. Ana bulgular, Avrupa'daki 375 anıttan 65'inin hava kirliliğinden dolayı risk altında olduğunu, Avrupa Akdeniz

Bölgesinde bulunanların ise daha yüksek risk altında olduğunu göstermektedir. Bunlar arasında, İstanbul'un Tarihi Yarımadası, çelik, çinko, portland kireçtaşı ve beyaz mansfield dolomitik kumtaşında yüzey aşınım riski yüksek olan materyaller olarak belirtilmiştir [13]. Bu çalışmaların dikkate değer bir yönü, hava kirliliğinin büyük ölçekli çalışma bölgeleri üzerindeki orta ve/veya uzun vadeli etkilerine odaklanarak geniş ölçekli çalışma bölgelerini incelemeleridir. Ancak hiçbiri, hava kirliliğinin yapılı miras üzerindeki kısa vadeli etkilerini hesaplamak için mikro ölçekli analizler sunmamaktadır.

Bu tez çalışmasında, Türkiye'deki İstanbul Tarihi Yarımadası, aşağıdaki faktörler göz önünde bulundurularak çalışma alanı olarak seçilmiştir: (i) Birleşmiş Milletler Eğitim, Bilim ve Kültür Örgütü Dünya Mirası Listesi'nde yer alması nedeniyle çok sayıda turistin ilgisini çekmesi ve en fazla tercih edilen ziyaret alanlarından biri olması [24–27], (ii) somut kültürel miras yapı malzemelerine bakıldığında birden fazla çeşitliliğe sahip olması [28], (iii) özellikle PM_{10} açısından bir metropol şehri olarak hava kirletici konsantrasyonundaki artışa karşı yüksek hassasiyet göstermesi [29–32], ve (iv) her ikisinin de önümüzdeki yıllarda artması beklenen kentsel hareketliliğe ve yoğun trafiğe önemli ölçüde maruz kalmasıdır [33–35]. Yayımlanan çalışmalara bakıldığında [30,36–38], COVID-19 pandemisinin kısıtlamalarının, trafiğin azaltılması ve kentsel hareketliliğin sınırlanmasının, hava kirliliğinin yapılı miras üzerindeki olumsuz etkilerini nasıl azaltabileceğini araştırmak için nadir bir fırsat sunduğu görülmektedir. Hava kirliliğinin İstanbul'un yapısal kültürel mirası üzerindeki etkisinin inceleyen sınırlı sayıda araştırma bulunmaktadır [21,39] ve yalnızca bir çalışma özellikle COVID-19 sürecine olan etkileri ele almaktadır [23]. Ancak, söz konusu bu son çalışma küresel düzeyde bir inceleme yapmakta olup, haritalamaya dayanılarak yapılan hava kirliliği, meteorolojik parametrelerin ve hava kirliliği modellemelerinde Dünya üzerinde farklı lokasyonlarda yer alan 21 metropol şehirlerin toplu verilerini kullanmaktadır. Başka bir deyişle, kullanılan veri, modelleme alanı, seçilen yöntem geniş ölçekli düzeyde kalmaktadır. Örneğin, İstanbul'daki sıcaklık ve nem değişimlerine yönelik haritalama ve modelleme de sadece tek bir meteoroloji istasyonundan alınan veriler kullanılmıştır.

Bütün bunlar göz önüne alınarak, bu tez çalışmasının yenilikçi yönü, pandemi öncesi ve sonrası dönemde (2019-2021) hava kirliliği konsantrasyonlarındaki değişimlerin İstanbul Tarihi Yarımadası'nda bulunan somut yapısal kültürel miras varlıklarında oluşabilecek materyal aşınmasına ve bozulmasına olan kısa dönem etkileri incelemektedir. Bu tez çalışması, günlük hava kirliliği verilerini kullanarak, Tarihi İstanbul Yarımadası'nın detaylı

materyal yüzey aşınım ve korozyon analizlerini gerçekleştirmektedir. Hava kirletici konsantrasyonları (SO_2, NO_2, NO_X, O_3 ve PM_{10}) verileri Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı'ndan (UHKİA) alınırken, meteorolojik veriler ise Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM)'nden temin edilmiştir. Yazılım olarak, açık kaynaklı coğrafi bilgi yazılımı olan Quantum Geographic Information System (QGIS) kullanılmaktadır. Modelleme sırasında Avrupa üzerine yapılan benzer çalışmalarda olduğu gibi Ordinary Kriging yöntemi uygulanmaktadır. Malzemelerin çeşitliliği ve doz-etki işlevleri göz önüne alındığında, portland kireçtaşı, beyaz mansfield dolomitik kumtaşı, bakır, dökme bronz, karbon çeliği ve çinko malzemeleri analiz edilmiştir. Hava kirletici konsantrasyonları ve meteorolojik koşullar, QGIS yazılımı içerisine el ile girilen doz-etki fonksiyonlarına anahtar parametreler olarak tanımlanmaktadır. Ardından seçilen malzemelerin korozyon ve yüzey aşınım seviyeleri haritalandırılmaktadır. Oluşturulan haritalar sayısal verilere dönüştürülerek, seçilen materyallerin uluslararası standartlarda belirlenen hesaplama yöntemlerine göre gerçekleştirilmiş olup, tahminlerin tolere edilebilir sınır seviyelerin altında kalıp kalmadığının incelenmesi bu tez çalışmasının özgün yönünü ortaya koymaktadır.

2. KÜLTÜREL MİRAS

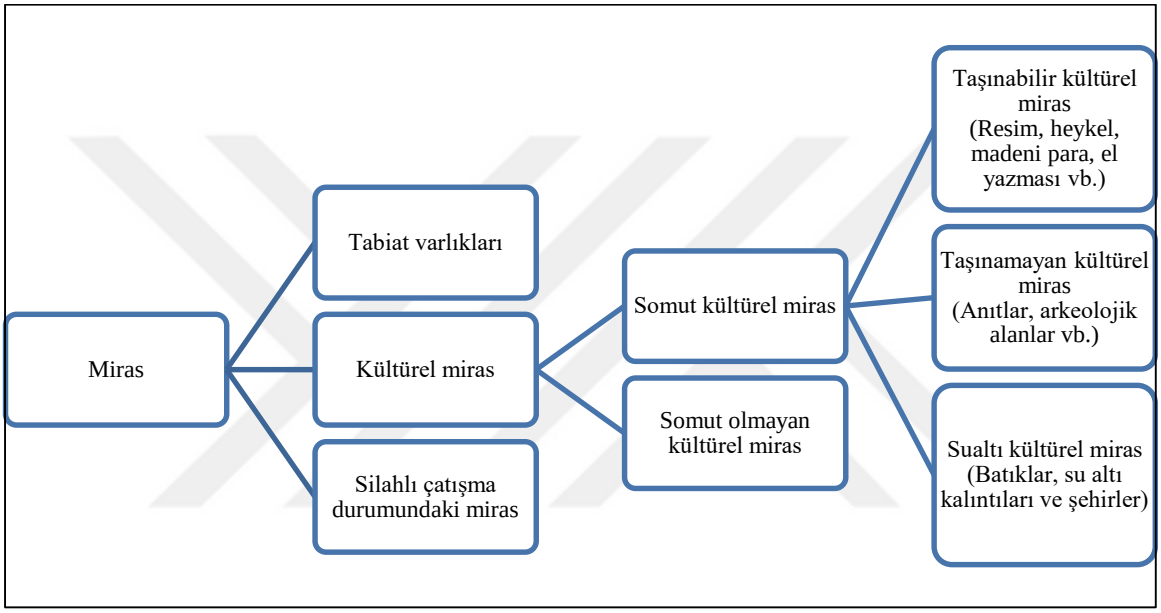
2.1. Kültürel Miras Tanımı ve Sınıflandırılması

20. yüzyılın sonlarına doğru anlamsal açıdan genişletilen ve kültürel varlıkların tanımlanmasında kullanılan Latince kökenli *patrimoine* kelimesi, bir nesilden diğer nesle aktarım anlamına gelmektedir. Latince kökenli bu kavram ilk defa 1790 yılında Fransa'da yaşayan göçmenlerin aileden gelen miraslarının ülke mirası olarak kabul edilmesine yönelik kullanılmıştır. Fransız İhtilali'nden sonra monarşi yönetiminin etkileri ile ulusal bir anlam kazanan bu kavram, genişletilerek ve çeşitlendirilerek günümüzde sıkça dillendirilen ortak miras kavramı olarak kullanılmaktadır. Ancak, 1930 ile 1945 yılları arasında uluslararası kurumlar bu kavramın geniş bir ölçeği kapsamasından dolayı daha detaylı alt kavramlar türetmeye başlamıştır [40].

Tarihsel süreçte geliştirilen miras kavramların içeriğine ve kullanım alanlarına bakıldığında, kültürel miras bahsedilen kavramlardan nitelik ve nicelik olarak daha nitelikli bir anlam taşıdığı görülmektedir. *Kültürel miras tanımı* 1945 yılında kurulan ve 1946 yılında resmi olarak UNESCO tarafından 1954 yılında Lahey'de imzalanan Silahlı Çatışma Durumunda Kültürel Varlıkların Korunmasına Dair Lahey Anlaşması'nda resmiyet kazanmıştır [41]. Yapılan antlaşma içeriğine ve UNESCO'nun kültürel miras tanımlamasına bakıldığında miras kavramı öncelikli olarak üç grupta tanımlanmıştır. Bunlar tabiat varlıkları, silahlı çatışma durumundaki miras ve kültürel mirastır. Kültürel mirası somut kültürel miras ve somut olmayan kültürel miras olarak ikiye ayırmaktadır [42]. Somut kültürel miras, gelecek için korunmaya değer görülen yer üstünde ve su altında bulunan binaları, tarihi mekanları, arkeolojik sahaları ve aynı zamanda tarih ile ilintili olan resim, heykel, el yazması, arkeolojik kazılardan elde edilen eşyalar gibi bir kültürü tanımlamak ve anlamak adına önem teşkil eden değerli nesneleri kapsamaktadır. Geniş bir yelpazeye sahip olan somut kültürel miras, bulunan nesnelerin sınıflandırılmasını kolaylaştırmak adına taşınabilen, taşınamayan ve sualtı kültürel miras şeklinde ayrıştırılmıştır [43].

Kültürel miras dışında tutulan tabiat varlıkları ise estetik ve bilimsel bakımdan üstün evrensel değeri olan fiziksel ve biyolojik formasyonları veya grup formasyonlarını içeren doğal güzelleri, jeolojik ve fizyografik formasyonlar ile tehdit altında olan hayvan ve bitki

türlerinin yaşam alanlarını oluşturan alanlarını, bilim, koruma veya doğal güzellik açısından üstün evrensel değerleri olan doğal alanları kapsamaktadır. Burada bahsedilen üstün evrensel değerler herhangi bir ulusal sınıra bağlı kalmada bugünkü ve gelecek nesiller için kültürel ve doğal güzellikler açısından önem arz eden anlamına gelmektedir. Silahlı çatışma durumunda miras ise savaş sırasında kaçırılan veya zarar görme ihtimali olan miras olarak tanımlanmaktadır [44]. UNESCO'nun miras sınıflandırması görsel olarak Şekil 2.1'de verilmektedir.



Şekil 2.1. UNESCO tarafından miras sınıflandırılması [44]

2.2. Türkiye'nin Somut ve Taşınamayan Kültürel Miras Varlıkları

UNESCO'nun kurucu sözleşmesine taraf olunması ile birlikte medeniyetlerin beşiği olarak adlandırılan Türkiye, 1972 yılında gündeme getirilen "UNESCO Dünya Kültürel ve Doğal Mirasının Korunmasına Dair Sözleşme"yi kabul etmiştir [45]. UNESCO'nun katı kriterler çerçevesinde kabul ettiği miras listesinde Türkiye'nin toplamda 21 adet kültürel miras alanı bulunmaktadır. Bunlardan 19 tanesi sadece kültürel miras kategorisinde yer alırken, 2 tanesi hem doğal hem de somut kültürel miras olarak listelenmiştir [46]. Türkiye'de bulunan kültürel miras alanları, Çizelge 2.1'de gösterilen UNESCO'nun kültürel miras alanı sınıflandırılmasına tabi tutulmaktadır.

Çizelge 2.1. Türkiye'nin Dünya Kültür Miras Listesi'ndeki kültürel miras varlıkları [46]

Onaylanma Yılı	Miras Alan Adı	Bulunduğu Şehir	Kültürel Miras Kategorisi
1985	Divriği Ulu Camii ve Darüşşifası	Sivas	Kültürel
1985	İstanbul'un Tarihi Alanları	İstanbul	Kültürel
1985	Göreme Millî Parkı ve Kapadokya	Nevşehir	Karma
1986	Hattuşa: Hitit Başkenti	Çorum	Kültürel
1987	Nemrut Dağı	Adıyaman	Kültürel
1988	Hierapolis-Pamukkale	Denizli	Karma
1988	Xanthos-Letoon	Antalya-Muğla	Kültürel
1994	Safranbolu Şehri	Karabük	Kültürel
1998	Truva Arkeolojik Alanı	Çanakkale	Kültürel
2011	Edirne Selimiye Camii ve Külliyesi	Edirne	Kültürel
2012	Çatalhöyük Neolitik Alanı	Konya	Kültürel
2014	Bursa ve Cumalıkızık: Osmanlı İmparatorluğunun Doğuşu	Bursa	Kültürel
2014	Bergama Çok Katmanlı Kültürel Peyzaj Alanı	İzmir	Kültürel
2015	Diyarbakır Kalesi ve Hevsel Bahçeleri Kültürel Peyzajı	Diyarbakır	Kültürel
2015	Efes	İzmir	Kültürel
2016	Ani Arkeolojik Alanı	Kars	Kültürel
2017	Aphrodisias	Aydın	Kültürel
2018	Göbekli Tepe	Şanlıurfa	Kültürel
2021	Arslantepe Höyüğü	Malatya	Kültürel
2023	Gordion	Ankara	Kültürel
2023	Anadolu'nun Ortaçağ Dönemi Ahşap Hipostil Camiileri: Afyonkarahisar Ulu Camii, Ahi Şerefeddin (Arslanhane) Camii, Sivrihisar Ulu Camii, Mahmut Bey Camii ve Eşrefoğlu Camii.	Afyon, Eskişehir, Ankara, Konya ve Kastamonu	Kültürel

2.2.1. Divriği ulu camii ve darüşşifası

Anadolu taş işçiliğinin en güzel örneklerini sergileyen Divriği Ulu Camii ve Darüşşifası, Sivas İl'inin Divriği ilçesinde bulunmaktadır (Resim 2.1). Divriği, Hitit, Pers, Makedon, Roma, Sasani, Pavlikian, Bizans, Selçuklu ve Osmanlı medeniyetlerinden izler taşımaktadır [47]. Savaşlar ve yıkımlar nedeniyle yapım süreci oldukça uzun sürmüştür. Mengücekliler döneminde, 1228 yılında Divriği melikinin oğlu Ahmet Şah tarafından tamamlanmıştır. Camii, kuzeyde yer almakta olup, güneyinde ise şifahane bulunmaktadır [48]. Camii ve darüşşifanın en önemli özelliklerinden biri, detaylı işçiliği sergileyen kapıları ve sütunlarındaki el oymalarıdır. Selçuklu döneminin mimari estetiğini yansıtan bu taşınmaz kültürel mirasta, en ilgi çekici özelliklerden biri de sekiz köşeli yıldızların kullanılmasıdır [47].

Yapımı sırasında, rengi kirli sarıdan koyu kırmızıya kadar değişen tüf malzemesinden oluşan taşlar kullanılmıştır. Bu taşlar, oyma ve süslemeye elverişli yumuşak bir dokuya sahiptir [49]. Yapılar, taş malzeme ile inşa edilirken, tonoz adı verilen kemer yükseltilerinde ise tuğla

kullanıldığı gözlemlenmektedir [47]. 1985 yılında UNESCO Dünya Kültür Miras Listesi'ne dahil edilmiştir [46].



Resim 2.1. Divriği Ulu Camii ve Darüşşifası [49]

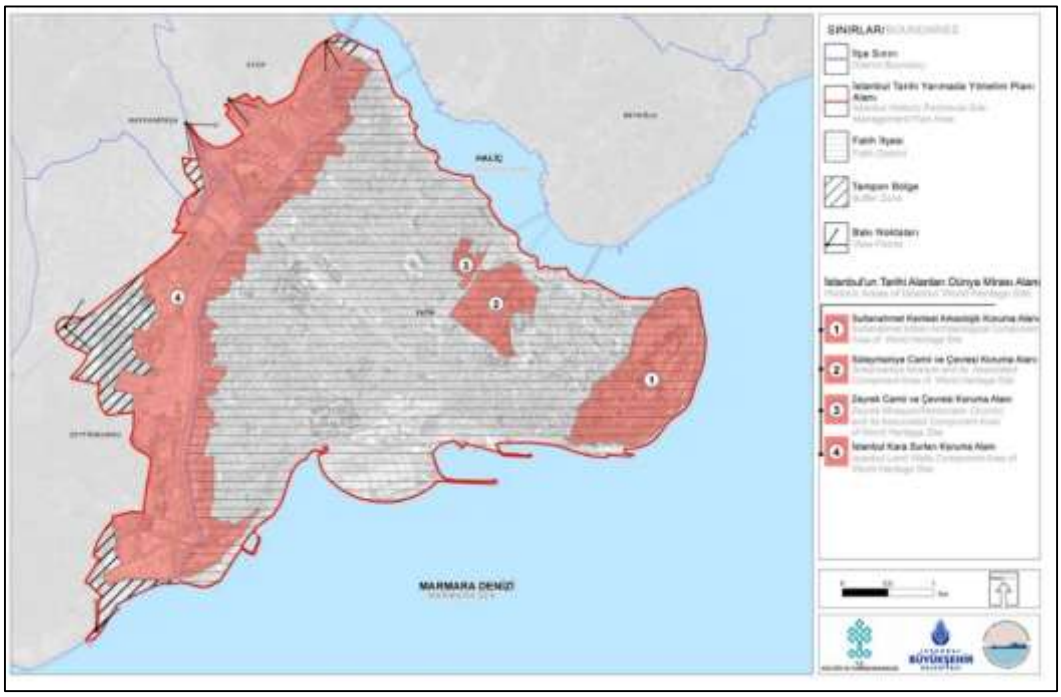
2.2.2. İstanbul'un tarihi alanları

Avrupa ile Asya kıtalarını birbirine bağlayan İstanbul Boğazı'nın güneyinde yer alan İstanbul'un Tarihi Alanları, Roma, Bizans ve Osmanlı İmparatorluklarından izler taşımaktadır. Bu kültürel miras alanlarında, saraylar, stadyumlar, hamamlar ve yollar gibi çeşitli yapılar inşa edilmiştir [50]. Ayasofya, Sultanahmet Camii, Topkapı Sarayı ve Yerebatan Sarnıcı, Roma, Bizans ve Osmanlı dönemlerinde inşa edilmiş, İstanbul'un tarihî ve kültürel mirasını yansıtan en bilinen yapılar arasında yer almakta olup bu zengin kültürün sadece birkaç örneğini teşkil etmektedir [51].

Diğer bir adı İstanbul Tarihi Yarımadası, Sultanahmet Kentsel Arkeolojik Koruma Alanı, Süleymaniye Camii ve Çevresi Koruma Alanı, İstanbul Kara Surları Koruma Alanı ve Zeyrek Camii ve Çevresi Koruma Alanı olmak üzere dört farklı koruma alanından oluşmaktadır (Resim 2.2).

İstanbul Tarihi Yarımadasındaki yapılar, Marmara mermeri, Bakırköy küfeki taşı ve Hereke konglomerası gibi farklı taş türlerinden oluşan çeşitli malzeme bileşimlerine sahiptir [53]. Zamanla yapılan restorasyonlar sonucunda, özgün malzeme bileşimi; portland kireçtaşı ve beyaz mansfield dolomitik kumtaşı gibi farklı bileşenlerle karışmıştır. İstanbul'un Bizans ve

Osmanlı İmparatorluklarına başkentlik yapması ve dönemin Roma ile diğer medeniyetleriyle yoğun etkileşim içinde olması nedeniyle, bazı tarihi anıtlarda bu malzemelerin kullanıldığı görülmektedir [25,54]. Yeni yapılan bir çalışmada Süleymaniye Camii ve külliyesi ile İstanbul Kara Surlarını da kapsayan alanlardan örnekler alınarak, tarihi yapıların kireçtaşı yüzeylerinde oluşan siyah kabuklar ayrıntılı biçimde incelenmiştir [54]. Bu alan, 1985 yılında UNESCO Dünya Kültür Miras Listesi'ne dahil edilmiştir [46].



Resim 2.2. İstanbul'un Tarihi Alanları [52]

2.2.3. Göreme milli parkı ve Kapadokya

Bu karma kültürel miras alanı Nevşehir İl'inde bulunmaktadır. Volkanik patlamalar sonucunda ortaya çıkan eriyik mineraller ve kül yığınları, çevrede volkanik kökenli katmanlar oluşturmuştur. Bu katmanlar, zamanla rüzgâr, yağmur ve benzeri doğal çevresel etkenlerle aşınarak, halk arasında "peri bacaları" olarak anılan özgün oluşumların yer aldığı Kapadokya Bölgesi'ni meydana getirmiştir [55,56].

Kapadokya Bölgesi içerisinde, kayalara oyulmuş kiliseler, odalar ve yer altı şehirleri bulunmaktadır. Göreme Milli Parkı ise, Göreme kasabasına ait bir vadi olup, Kapadokya'nın karakteristik özelliklerini yansıtır. Park içerisinde, kaya içine oyulmuş kiliseler, şapeller ve

yaşam alanları yer almaktadır [57,58]. 1985 yılında UNESCO Dünya Kültür Miras Listesi'ne dahil edilmiştir [46]. Resim 2.3'te bu karma kültürel miras alanı gösterilmektedir.



Resim 2.3. Göreme Milli Parkı ve Kapadokya [59]

2.2.4. Hattuşa-Hitit başkenti

1834 yılında Çorum İl'inin Boğazkale İlçe'sinde keşfedilen Hattuşa, Hitit İmparatorluğu'nun başkentidir (Resim 2.4). Yapılan kazı çalışmalarında, surların ve diğer mimari yapıların çok iyi korunmuş olduğu görülmüştür [60]. Bu yapılar arasında Aslanlı Kapı, Sfenksli Kapı ve kent surları yer almaktadır [61]. Ayrıca Yazılıkaya'da bulunan kabartmalar, Geç Tunç Çağı'na ait Hitit uygarlığının dinî ve astrolojik gelişimini yansıtmaktadır [62].



Resim 2.4. Hattuşa-Hitit Başkenti [64]

Yapılan kazı çalışmalarında, yapıların çoğunlukla ana kayadan alınan malzemelerle inşa edildiği belirlenmiştir. Ancak bazı yapı taşlarının hem şehrin içinden hem de dışındaki farklı kaynaklardan getirildiği tespit edilmiştir. Hitit uygarlığına ait diğer yapılardan farklı olarak, bu yapılarda duvar temellerinin kireçtaşından yapıldığı görülmüştür [63]. Bu kültürel miras alanı, 1986 yılında UNESCO Dünya Kültür Miras Listesi'ne dahil edilmiştir [46].

2.2.5. Nemrut dağı

Adıyaman il sınırları içerisinde yer alan, 2150 metre yüksekliğe sahip Nemrut Dağı'nın zirvesinde tümülüs ve etkileyici heykeller bulunmaktadır (Resim 2.5).



Resim 2.5. Nemrut Dağı [65]

Bu heykeller, Kommagene Krallığı'nın tanrılarına ve atalarına duyduğu minnettarlığı ifade etmek amacıyla inşa edilmiştir. Heykellerin yer aldığı alan, volkanik bir patlama sonucunda oluşmuş krater yapısına sahiptir [66]. Bu alanda, beş adet anıtsal boyutta kireçtaşından yapılmış tanrı heykelleri ve koruyucu hayvan heykelleri bulunmaktadır [67]. Ek olarak, üzerine kurulu olan krater yapısının piroklastik malzemeden oluştuğu tespit edilmiştir [68]. 1987 yılında UNESCO Dünya Kültür Miras Listesi'ne alınmıştır [46].

2.2.6. Hierapolis-Pamukkale

Denizli il sınırlarında bulunan Pamukkale (Resim 2.6), Hierapolis Antik Kenti (Resim 2.7) ile iç içe geçmiştir. Şifalı suları, hamamları ve traverten havuzlarıyla ünlüdür. Hierapolis Antik Kenti ise tiyatro, hamamlar, agora, sütunlu caddeler, kapılar ve tapınaklarla bir bütün oluşturmaktadır [69]. 1988 yılında UNESCO Dünya Kültür Miras Listesi'ne alınmıştır [46].



Resim 2.6. Pamukkale [70]



Resim 2.7. Hierapolis Antik Kenti [70]

Pamukkale Üniversitesi tarafından yapılan restorasyon çalışmaları sonucunda, polikarbonat panellerden oluşan metal bir yapı eklenmiştir. Mevcut yapıya ek olarak, dış etkenlerden korunabilmesi için mermer, kum ve taş yapılar eklenmiştir [69]. Yapılan bir çalışmada sıcaklık ve bağıl nem değişiminin bu çalışma alanında bulunan mermer yüzeylerde termal

gerilime yol açtığı tespit edilmiştir. Ayrıca, mermerlerden yapılan anıtların ve travertenlerin sülfat il etkileşim sonucu tuzlanma etkisi tespit edilmiştir [71].

2.2.7. Xanthos-Letoon

Antalya ili içerisinde Likya bölgesinde bulunan bu arkeolojik alanda Xanthos idari merkezi temsil ederken Letoon ise dini merkez olarak kullanılmaktadır. Bu iki alan içerisinde Roma dönemine ait eserler ve yapılar görülmektedir (Resim 2.8). Yapıların çoğu çamur, kil, taş ve tahtadan oluşmaktadır [72]. 1988 yılında UNESCO Dünya Kültür Miras Listesi'ne alınmıştır [46].



Resim 2.8. Xanthos-Letoon [73]

2.2.8. Safranbolu şehri

Karabük il sınırları içerisinde yer alan ve Osmanlı Devleti'nin izlerini taşıyan Safranbolu (Resim 2.9), 1994 yılında UNESCO Dünya Kültür Miras Listesi'ne alınmıştır [46]. Safranbolu, 18. yüzyıldan itibaren Asya ile Avrupa arasında önemli bir ticaret merkezi konumuna gelmiştir. Kent, özgün ve geleneksel dokusunu koruyan mimarisiyle dikkat çekmektedir. Özellikle ahşap yığma evleri ve konakları, Türk sivil mimari anlayışının özgün örneklerini yansıtmaktadır [74–76].



Resim 2.9. Safranbolu Şehri [77]

2.2.9. Troya antik kenti

Troya Antik Kenti, Çanakkale İl'inde yer almaktadır (Resim 2.10). Yapılan arkeolojik kazılarda, Troya Antik Kenti yerleşiminde yedi ana yerleşim katmanı ve bu katmanlara ait elli yapı aşaması tespit edilmiştir [78,79]. Bu katmanlar, Yunan, Roma ve Bizans dönemlerine ait kültürel izler barındırmaktadır. Bu kültürel miras alanı Erken Bronz Çağını yansıtmaktadır. Yapısal açıdan andezit ve bölgedeki taş ocaklarından çıkarılan taşlar kullanılmıştır. Ayrıca, kireçtaşı, bakır ve mermer malzemelerinin kullanımı yaygındır [80]. 1998 yılında UNESCO Dünya Kültür Miras Listesi'ne alınmıştır [46].



Resim 2.10. Troya Antik Kenti [81]

2.2.10. Edirne Selimiye camii ve külliyesi

Mimar Sinan tarafından yaptırılan Edirne Selimiye Camii ve Külliyesi (Resim 2.11), Osmanlı İmparatorluğuna ait izleri taşımaktadır. Külliye içerisinde medreseler, kütüphane ve muvakkithane yer almaktadır [82]. Selimiye Camii'nin yapımında kesme taş, mermer, granit, kireçtaşı, ahşap, kurşun kullanılmıştır. İç ve dış kısımlarında mermer ve çini üzerine yazılar mevcuttur [83–86]. 2011 yılında UNESCO Dünya Kültür Miras Listesi'ne kabul edilmiştir [46].



Resim 2.11. Edirne Selimiye Camii ve Külliyesi [87]

2.2.11. Çatalhöyük neolitik alanı

2012 yılında UNESCO Dünya Kültür Miras Listesi'ne alınan [46], Konya ilinin Çumra ilçesinde bulunan Çatalhöyük (Resim 2.12) 1960'ların sonlarına doğru keşfedilmiştir [88]. Kazı süreci, Neolitik Dönem'e ait 18 katlı bir yerleşim alanı olduğunu göstermektedir. Tek katlı evler bitişik olarak inşa edilmiştir. İlk yerleşik düzeni temsil eden bu kentte, çoğunlukla kerpiç, çamur ve ahşap kullanılmıştır [88,89].



Resim 2.12. Çatalhöyük Neolitik Alanı [90]

2.2.12. Bursa ve Cumalıkızık

İpek Yolu üzerinde bulunan Bursa, Osmanlı Devleti'ne başkentlik yapmıştır. Uludağ yakınlarında kurulan Kızık köyleri arasında yer alan Cumalıkızık ise 700 yıllık bir Türk köyü olarak adlandırılmaktadır [91,92]. Bursa ve Cumalıkızık kültürel miras alanı (Resim 2.13), 2014 yılında UNESCO Dünya Kültür Miras Listesi'ne dâhil edilmiştir [46]. Yapılarda çoğunlukla tuğla, moloz taşı, kabaca yontulmuş taş ve kesme taş kullanılmıştır. Buna ek olarak, kereste ve kireç harcı bağlayıcı materyal olarak tercih edilmiştir. Yapıların özellikle minare kısımlarında taş ve tuğlanın yanı sıra kurşun, bakır, demir ve bronz gibi farklı malzemelere de rastlanmaktadır. Örneğin, pencere kısımlarında tatlı kireç, cam ve tahta kullanılmıştır [92].



Resim 2.13. Bursa ve Cumalıkızık: Osmanlı İmparatorluğunun Doğuşu [93]

2.2.13. Bergama çok katmanlı kültürel peyzaj alanı

Bergama Çok Katmanlı Kültürel Peyzaj Alanı (Resim 2.14), Helenistik, Roma, Doğu Roma ve Osmanlı dönemlerinin izlerini taşımaktadır [94]. Bu alan çeşitli katmanlardan oluşmaktadır ve çevresinde bulunan yapılar tampon bölge ile birlikte kültürel miras alanın içerisine dahil edilmiştir. Birinci derece arkeolojik sit alanı, Akropol, Asklepeion ve tümülüsleri içermektedir. İkinci ve üçüncü derece arkeolojik sit alanları yakın mahallelerden oluşmaktadır [95,96]. Mermer, tuğla, kurşun, andezit ve kalkerli taşlar kullanılmıştır [95]. 2014 yılında UNESCO Dünya Kültür Miras Listesi'ne kabul edilmiştir [46].



Resim 2.14. Bergama Çok Katmanlı Kültürel Peyzaj Alanı [97]

2.2.14. Diyarbakır kalesi ve hevsel bahçeleri kültürel peyzajı

Diyarbakır Kalesi ve Hevsel Bahçeleri (Resim 2.15), Asur, Roma, Bizans ve Osmanlı imparatorluklarına ait kültürel izler taşımaktadır. Kale içerisinde yer alan çeşitli kabartmalar, yazıtlar ve bezemeler, bu izlerin varlığını doğrulamaktadır. Yaklaşık 5 kilometre (km) uzunluğa ve 10 metre (m) yüksekliğe sahip olan kale, tarihsel süreç içerisinde birçok onarım ve restorasyon geçirmiştir [98,99]. Hevsel Bahçeleri ise kalenin çevresinde, Dicle Nehri kıyısında yer almaktadır [99]. Diyarbakır Kalesinin surlarında bazalt taşı, kireç harcı, dökme demir ve tuğla kullanılmıştır. Hevsel Bahçelerinde ise yapı malzemeleri olarak taş ve ahşap tespit edilmiştir [99,100]. 2015 yılında UNESCO Dünya Kültür Miras Listesi'ne kabul edilmiştir [46].



Resim 2.15. Diyarbakır Kalesi ve Hevsel Bahçeleri Kültürel Peyzajı [101]

2.2.15. Efes

Efes Antik Kenti (Resim 2.16), İzmir ili sınırları içerisinde konumlanmakta olup, Helenistik ve Roma dönemlerine ait çok katmanlı kültürel izler barındırmaktadır. Kent, Celsus Kütüphanesi gibi farklı işlevlere sahip çok sayıda anıtsal yapıya ev sahipliği yapmaktadır [102,103]. Arkeolojik incelemeler sonucunda, yapı malzemesi olarak mermer, ahşap, yeşil kayrak taşı, kireçli marn, pişmiş toprak kiremit, kesme taş ve seramik kullanıldığı tespit edilmiştir [104]. 2015 yılında UNESCO Dünya Kültür Miras Listesi'ne kabul edilmiştir [46].



Resim 2.16. Efes-Celsus kütüphanesine ait kalıntılar [105]

2.2.16. Ani arkeolojik alanı

Türkiye ile Ermenistan sınırında yer alan Kars ilinde bulunan Ani Harabeleri (Resim 2.17), 2016 yılında UNESCO Dünya Kültür Mirası Listesi'ne dahil edilmiştir [46]. Bizans, Ermeni, Gürcü ve Selçuklu kültür izlerini taşıyan bu arkeolojik alanda, katedral, kilise ve camiler bir arada bulunmaktadır [106,107]. Yapılarda genellikle yığma kırmızı, siyah ve/veya kahverengi düzgün kesme taşlardan oluşan traverten taşları kullanılmıştır [108,109]. Yapıların bazılarında az miktarda seramik parçaları bulunmuştur [109].



Resim 2.17. Ani Arkeolojik Alanı [110]

2.2.17. Afrodisias antik kenti

Roma İmparatorluğu'nda mermer sanatının gelişiminin canlı bir örneği olan Afrodisias Antik Kenti (Resim 2.18), Aydın İl'inde bulunmaktadır [111]. Bu arkeoloji yapı içerisinde tiyatro, agora, stadyum gibi anıtsal yapılar bulunmaktadır [112]. Yapının orijinal versiyonunda mermer, tuğla, kireç harcı, şist ağırlıktadır [112,113]. 2015 yılında UNESCO Dünya Kültür Miras Listesi'ne kabul edilmiştir [46].



Resim 2.18. Afrodisias Antik Kenti [114]

2.2.18. Göbeklitepe

Göbeklitepe, Şanlıurfa il sınırlarında keşfedilmiştir. Neolitik Dönem'e uzanan bu kutsal ve anıtsal yapı; T biçimindeki sütunlar, hayvan figürleri ve çember benzeri düzenlemelerden oluşmaktadır (Resim 2.19). T-biçimindeki sütunlar birbirlerine bağlanmış olup, on metreden fazla yüksekliğe sahiptir [115,116]. Dinin doğuşu ve gelişimi hakkında önemli bilgiler sunan Göbeklitepe, bir tapınak olmasının yanı sıra, kamu hizmetleri ve kült merkezi olarak kullanıldığına dair çeşitli görüşler de öne sürülmüştür [118]. Göbeklitepe'nin çevresinde kırıntılı kireçtaşları ve bazalt kayaçlar bulunmaktadır [119]. Ancak ören yerinde yer alan yapılar, kireçtaşından inşa edilmiştir [116]. 2018 yılında UNESCO Dünya Kültür Miras Listesi'ne kabul edilmiştir [46].



Resim 2.19. Göbeklitepe'de kireçtaşından oluşan sütunlar [117]

2.2.19. Arslantepe höyüğü

Malatya il sınırları içerisinde yer alan Arslantepe Höyüğü (Resim 2.20), toplumsal geçiş sürecinde eşitlikçi bir sistemden hiyerarşik bir sisteme geçişi temsil etmektedir. Neolitik döneme kadar uzanan tarihiyle bu kültürel miras alanında bulunan yapılar ve duvarlardaki motifler, sarayın varlığını işaret etmektedir [120,121]. Yapım aşamasında kerpiç, kireçtaşı ve ahşap kullanılmıştır [121,122]. 2021 yılında UNESCO Dünya Kültür Miras Listesi'ne kabul edilmiştir [46].



Resim 2.20. Arslantepe Höyüğü [123]

2.2.20. Gordion

Ankara İl sınırları içerisinde yer alan Gordion (Resim 2.21), Frigya'nın siyasi ve kültürel başkenti olarak bilinmektedir. Antik kentte saray ve mezar yapılarının kalıntıları yer almaktadır. Tarihi Kral Yolu üzerinde konumlanan Gordion, özellikle Frigya dönemine ait hayvancılık, tarım ve ticaret faaliyetlerine dair önemli örnekler sunmaktadır [124,125]. Kentin inşasında taş, tuğla, kerpiç ve ahşap gibi yapı malzemeleri kullanılmıştır. 1999 yılında meydana gelen depremde ciddi hasar gören yapı, daha fazla bozulmasını önlemek amacıyla paslanmaz çelik destek elemanları ile güçlendirilmiştir [125]. 2023 yılında UNESCO Dünya Kültür Miras Listesi'ne kabul edilmiştir [46].



Resim 2.21. Gordion kültürel miras alanı [126]

2.2.21. Anadolu'nun ortaçağ dönemi ahşap hipostil camiileri

Afyonkarahisar Ulu Camii, Ahi Şerefeddin (Arslanhane) Camii, Sivrihisar Ulu Camii, Mahmut Bey Camii ve Eşrefoğlu Camii; düz ahşap kirişli tavanları (Resim 2.22) ve ahşap direkleriyle özgün bir mimari yapıya sahip olmalarının yanı sıra, İslam mimarisinin karakteristik özelliklerini yansıtmalarıyla da dikkat çekmektedir [127,128]. 2023 yılında UNESCO Dünya Kültür Miras Listesi'ne kabul edilmiştir [46].



Resim 2.22. Ahşap kirişli tavanlar [129]

3. HAVA KİRLİLİĞİ'NİN ETKİLERİ

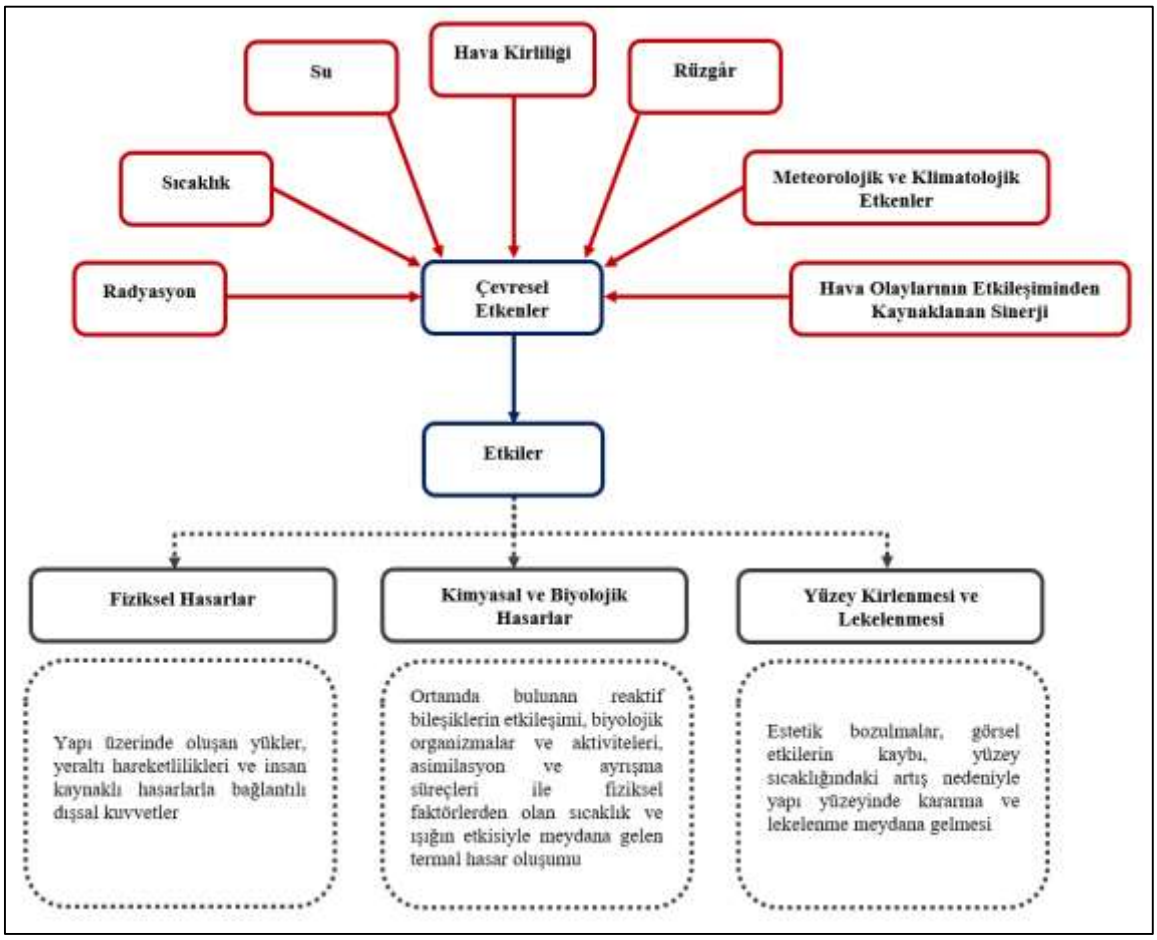
3.1. Kültürel Varlıklarının Üzerinde Oluşabilecek Hasarlar

Somut ve taşınamayan kültürel miras yapıları, karmaşık ve çeşitli yapı malzemelerinden oluşmaktadır. Bu malzemeler, yüzyıllar boyunca farklı çevresel ve fiziksel etkenlere maruz kalarak doğal olarak yıpranmakta ve zamanla bozulmaya uğramaktadır. Hava kirliliği, iklim değişikliği, sel, erozyon gibi çevresel dış etkenler, kültürel miras yapılarını oluşturan taş, ahşap, metal ve benzeri malzemelerin yanı sıra üzerlerindeki çizim ve sanat eserlerinde de madde kaybına ve yüzey aşınmasına neden olmaktadır [4,5,22].

Kültürel miras üzerinde meydana gelen aşınma ve bozulmaları tespit etmek ve bunların oluşumunu önlemek, kültürel varlıkların çeşitliliği ve özgünlüğü göz önünde bulundurulduğunda oldukça karmaşık bir süreçtir. Özellikle taşınmaz kültür varlıklarının farklı coğrafi bölgelerde yer alması, bu bölgelerin değişken iklim ve çevresel koşullara sahip olması, yapıların inşasında kullanılan malzemelerin, işçiliğin ve tasarımların çeşitlilik göstermesi, izleme ve değerlendirme çalışmalarını zorlaştırmaktadır. Hava koşulları uzun süredir dış çevresel bir etken olarak değerlendirilmeye devam etmekteyken, artan hava kirliliği kültürel miras yapılarına yönelik zararı daha karmaşık ve çok boyutlu hale getirmiştir. Bu bağlamda, dış etkenlerin zararlı etkilerini en aza indirmek amacıyla, çeşitli uluslararası kuruluşlar restorasyon süreçlerine ilişkin belirli sınırlamalar ve güvenlik protokolleri geliştirmiş, bu doğrultuda koruma ve müdahale yaklaşımlarını standartlaştırma yoluna gitmişlerdir [4,130].

Şekil 3.1'de gösterildiği üzere, hava kirliliği ile meteorolojik ve klimatolojik faktörler ile bunların çeşitli hava olaylarıyla etkileşimi, taşınmaz kültür varlıkları üzerinde üç temel hasar tipi oluşturmaktadır. Fiziksel hasarlar, yapı üzerinde oluşan yükler, darbeler, insan kaynaklı müdahaleler gibi dış kuvvetlerin etkisiyle çoğunlukla meydana gelmektedir. Sıcaklık ve nem değişiklikleri sonucu deformasyon süreci hızlanmaktadır [4]. Kimyasal ve biyolojik hasarlar, yapı malzemesinin çevresinde bulunan reaktif bileşikler tarafından yıpranarak bozulma sürecinin başlamasıyla ortaya çıkar [4,6]. Biyolojik hasarlar ise organizmalar, bakteriler gibi biyolojik unsurların zamanla kültürel yapı malzemelerinde bozulmaya yol açmasıdır [6,131]. Bu hasarlar, özümleme ve yadsıma kaynaklı bozulmalar olarak iki ana

gruba ayrılabilir. Özümleme hasarında, kültürel miras varlıklarının yapısında bulunan malzemeler, biyolojik organizmalar için besin kaynağıdır. Örneğin, ahşapta bulunan selüloz, termitler ve mantarlar tarafından besin kaynağı olarak kullanılabilir [132,133].



Şekil 3.1. Çevresel etkenlerin yol açtığı hasar tipleri

Yüzey kirlenmesi ve lekelenmesi, tarihi yapıların üzerinde koyu kabuk görünümünün yani siyahlaşmanın oluşması, yüzey geriliminin artması gibi gözlemlenen estetik bozulmalardır. Kirlenme, çevresel etkenler, birikinti, biyolojik aşınmalar ve yanlış restorasyon malzemenin kullanılmasıyla meydana gelebilir [4,18].

Taşınmaz kültürel miras varlıklarının başlıca yapı malzemeleri üzerinde bu hasar tipleri, taş, metal, ağaç ve cam malzemeler olarak sınıflandırılabilir. Taş yapılar üzerinde meydana gelen hasarlar, yüzey aşınması (Resim 3.1) ve taşlar üzerinde var olan oymaların ya da kabartmaların zamanla detay kaybına uğramasıdır. Fiziksel hasar hariç, dış çevre ortamında bulunan kirleticilerin yol açtığı kimyasal reaksiyonlar sonucunda kirlenme, kararma,

lekelenme ve sararma meydana gelmekte (Resim 3.2); taşlar yapısal özelliklerini kaybetmekte ve gözenekli bir yapı halini almaktadır [134,135]. Biyolojik hasar (Resim 3.3) olarak ise mantar ve diğer bitkilerin taşlar arasında girerek kırması ve bozulması söz konusudur [136].



Resim 3.1. Diyarbakır Ulu Camii sütunlarda gözlemlenen yüzey aşınması [137]



Resim 3.2. Fethiye kaya mezarlarında görülen kirlenme ve renk değişimleri [137]



Resim 3.3. Edirne Bayezid Camii'nde görülen liken ve yosunlar [137]

Metal malzemeler üzerinde meydana gelen hasarlar, özellikle hava kirleticilerinden kaynaklanmaktadır. Bu tip yüzeylerin aşınması, korozyon sonucunda gerçekleşmektedir [138] (Resim 3.4). Korozyon, su ve oksijen bulunan ortamlarda metal ve metal alaşımlı malzemelerin katmanlarının elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda bozulması, yani zamanla aşınma ve tahribat sürecidir [12,139]. Korozyona uğrayan metallerin, neme ve sıcaklığa uzun süre maruz kalması sonucunda yeşil yüzey küfü oluşmaktadır. Bu tür hasarların meydana gelmesiyle birlikte, yapılar içerisinde genellikle eklem noktalarında kullanılan metal malzemelerde oyulma, delinme, kaplama kaybı ve çürüme görülmektedir [4].



Resim 3.4. Metal malzemelerde gözlemlenen korozyon [137]

Ağaçtan elde edilen malzemeler üzerinde meydana gelen hasarlar, biyolojik bozuma, kaplama kaybı, çürüme ile istilacı böcek ve diğer bitkilerin yerleşmesi olarak tanımlanabilir [4,132,133].

Cam malzemeler üzerinde meydana gelen hasarlar, cam içerisinde bulunan potasyum miktarındaki değişimlerle doğru orantılıdır [17,138]. Kalya taşındaki aşınma, soda camındaki kirlenme ve kararma örnek olarak gösterilebilir [4]. Diğer malzemeler, beton, sıva ve tuğla işleri olarak sınıflandırılabilir. Yapısal sürece dahil olan bu malzemelerde, zamanla su nüfuzu ve diğer dış etkenlerden dolayı çatlaklar oluşabilir [4].

Hava koşullarıyla ilintili çevresel faktörler incelendiğinde, sıcaklık, nem oranı ve atmosferde bulunan kirleticiler öne çıkmaktadır. Şekil 3.1'de gösterilen çevresel faktörlerin birbiriyle etkileşimi, etki oranını artırdığı bilinmektedir. Bu etkileşimler sonucunda taşınmaz kültür varlıkları üzerinde meydana gelen hasarların şiddeti artmaktadır.

3.2. Çevresel Etkenler

Çevresel etkenler, hava kirliliği, meteorolojik ve klimatolojik etkenler ile bunların sinerjisi sonucu oluşan kümülatif etkileri içermektedir [4]. Hava kalitesinin düşmesiyle birlikte, iklim değişikliğinin getirdiği baskılar, taşınmaz kültür varlıkları üzerinde oluşan stresi arttırmakta ve yüzey aşınması ile korozyon seviyelerini yükseltmektedir [5,6,17,140,141]. Bu bölümde, çevresel etkenler ve bunların taşınmaz kültürel miras varlıkları üzerinde oluşturabileceği kümülatif etkiler incelenmektedir.

3.2.1. Radyasyon

Güneş ışınımına sürekli maruz kalınması sonucunda, yayılan ısı ve ultraviyole (UV) radyasyon nedeniyle zamanla hasar oluşabilmektedir [4]. Özellikle yapı malzemelerinin bozulmasını etkileyen başlıca etkenlerden biri olan sıcaklık değişimlerinin temel nedeni doğrudan güneş ışınımıdır. Malzeme türüne ve kültürel miras alanının gün ışığı alma potansiyeline bağlı olarak farklı ısıl tepkimeler meydana gelebilmektedir [6,142]. Gündüz ve gece döngüsü dikkate alındığında bu sıcaklık değişimlerin 3°C'yi aşabildiğini gözlemlenmiştir [143].

3.2.2. Sıcaklık

Sıcaklık, kültürel miras alanlarında coğrafi konum, iklim sınıflandırması ve yılın zamanına bağlı olarak geniş aralıklarda değişkenlik gösterebilir. Yapı malzemeleri, sıcaklık artışı ile genleşme, sıcaklık düşüşü ile büzülme eğilimindedir. Bu nedenle, sıcaklık farklarının yüksek olduğu bölgelerde söz konusu malzemelerde fiziksel hasarların görülmesi olasıdır [4,6]. Öte yandan sıcaklık, kimyasal reaksiyonların hızını da artırmaktadır. Bu durum, özellikle metal malzemelerin korozyon hızının artmasında önemli bir rol oynamaktadır [4,5].

Diğer bir açıdan sıcaklık atmosfere salınan kirleticilerden dolaylı yoldan etkilenmektedir. Atmosferde bu kirleticilerin artışı sera etkisini arttırmaktadır. Güneş ışınları yeryüzü tarafından emildikten sonra kızılötesi ışınlar tekrardan atmosfere yansıtılmaktadır. Ancak, yansıtılan bu ışınlar, atmosferde biriken sera gazları nedeni ile atmosferde tutulur ve bu da küresel ortalama sıcaklıklarının zamanla artmasına yol açmaktadır [6,7,141]. Özellikle, ani sıcaklık değişimleri donma-çözünme döngülerini ve ısısal parçalanma oranını artırabilir. Donma ve çözülme döngülerinde, gözenekli malzemelerde suyun tutulması nedeniyle iç gerilmeler meydana gelir [5,6,144]. Bu durum, mekanik aşınmalara yol açar ve taş, tuğla gibi yapısal malzemelerde hasara neden olabilir [144]. Isısal parçalanma olarak bilinen termoklastizm, yapı malzemelerinde bulunan mineral taneciklerinin genişlemesi ve büzüşmesi ile meydana gelmektedir. Isısal varyasyonlardan kaynaklanan kireçtaşı gibi gözenekli taş yüzeylerinde çatlama ve soyulma meydana gelebilmektedir [145–147].

3.2.3. Yağış ve nem

Farklı fazlarda etkili olan su, kültürel miras varlıklarında kullanılan yapı malzemeleri üzerinde farklı etkilere yol açmaktadır. Havanın bağıl nemini artırarak malzemelerin nem içeriğinin artmasına neden olmaktadır. Bu durum, biyolojik ve kimyasal bozulmaları hızlandırmaktadır. Ek olarak, çözünebilen tuzların fazla nemin olduğu ortamlarda kristalleşmeye neden olması veya kilden yapılan malzemelerde şişme yaratması mümkündür. Kireçtaşı gibi materyallerin, uzun sürede sıcaklık ve nem artışı ile serbest bağlı suyunu hızla kaybetmesi, parçalanmasına yol açabilmektedir [4]. Diğer yandan, yağış miktarının artması, kültürel miras varlıklarının yüzeyinde biriken kirletici madde miktarını artırabilmekte ve bu maddelerin zamanla sıcaklıkla birlikte gözeneklere nüfuz etmesine katkıda bulunmaktadır. Mekanik aşındırma ve suya doygunluk, yani nem oranının artması, doğrudan hasarlardır [6].

Dolaylı olarak ise, sıcaklığın etkisiyle donma-çözünme döngüleri, kimyasal etkileşimler ve biyolojik bozulmalar meydana gelmektedir. Sıcak iklimlerde, karbonatlı taşların yüzey aşınma oranları artabilmektedir [148,149]. Yüksek bağıl nem ve sıcaklık nedeniyle bu malzemelerin çürümesi, istilacı böceklerin ve diğer bitkilerin yerleşmesiyle sonuçlanabilir [132,133].

3.2.4. Hava kirliliği

Hava kirliliği, doğal kaynaklardan ve insan kökenli aktiviteler sonucunda belirli emisyonların salınmasıyla oluşmaktadır. Salınan bu kirleticilerin miktarları, doğanın taşıma ve yutma kapasitesini aştığında, kirleticiler atmosferde karakteristik özelliklerine bağlı olarak kalmakta ve atmosferdeki diğer moleküller ile bileşenlerle etkileşime girebilmektedir. Atmosferik kirleticilerin büyük bir bölümü insan kaynaklı etkinlikler sonucunda ortaya çıkmaktadır. Doğal kaynaklı kirleticilerin tespiti güç olduğundan ve bu tür kirleticilerin yönetimi sınırlı imkânlarla gerçekleştirilebildiğinden, hava kalitesi izleme ve kontrol çalışmaları genellikle antropojenik kirleticiler üzerine yoğunlaştırılmaktadır [4,150,151].

Hava kalitesinin belirlenmesi ve yönetilmesinde iki temel unsur önem taşımaktadır. Bunlardan ilki, hava kirleticisinin kaynağının tespit edilmesidir. Kirleticilerin kaynak bazlı öncelikli sınıflandırılması, kirleticinin birincil mi yoksa ikincil mi olduğuna göre yapılmaktadır. Birincil kirleticiler, doğrudan ana kaynaklarından atmosfere salınan kirleticilerdir. Örneğin, sülfür oksitler (SO_X), NO_X, CO ve PM, birincil kirleticiler arasında yer almaktadır. İkincil kirleticiler ise, birincil kirleticilerin atmosferde taşınma ve kalma sürelerine bağlı olarak, atmosferde mevcut diğer bileşenlerle girdikleri kimyasal reaksiyonlar veya fiziksel süreçler sonucunda oluşmaktadır. Bu gruba giren en bilinen kirletici, O_3'dur [4].

Kaynak bazında sınıflandırmanın yanı sıra diğer bir özellik ise kirleticinin alabileceği fiziksel formlardır. Bu formlar, gaz ve partikül olarak ayrılmaktadır. NO_2, SO_2 ve O_3 gibi kirleticiler ortam sıcaklığında atmosferde gaz formunda bulunmaktadır. Partikül madde ise atmosferde sıvı veya katı madde formunda bulunan ve askıda kalabilen madde olarak tanımlanmaktadır. Bu maddelerin büyük bir kısmı türbülans ve rüzgâr gibi yerden hava hareketleri ile atmosferde askıda kalan ve havada süren bazı tepkimeler sonucunda yoğuşan maddelerden meydana gelmektedir [4,11]. Partikül maddelerin inceliği, karakteristik yapısı ve boyutuna göre atmosferde askıda kalma ve taşınım süreleri değişmektedir. Bu maddeler, boyutlarına ve aldıkları forma göre duman, sis veya toz olarak adlandırılmaktadır. Bu partikül maddeler 0,1 ile 100 μm arasında değişen boyutlarda bulunmaktadırlar [11].

Hava kirliliğinin yapısal kültürel miras üzerinde hasara yol açmasının iki temel kaynağı bulunmaktadır: Atmosferin asitlik düzeyini artıran gaz hâlindeki hava kirleticileri ile açık

renkli yüzeylerde birikerek kirlenmeye neden olan parçacıklar. Bu iki kirletici türü, yağmur, kar ve sis gibi suyun çeşitli fiziksel hâllerinin gözlemlendiği hava koşullarında kimyasal dönüşüme uğrayarak asidik bileşiklere dönüşmektedir. Örneğin, fosil yakıtların yakılması ve sülfür içeren cevherlerin işlenmesi sonucu atmosfere salınan SO_2 ve NO_X atmosferdeki su buharı ile tepkimeye girerek sülfürik asit ve nitrik asit oluştururlar. Havanın nemli olduğu koşullarda bu asidik bileşikler, çeşitli yağış formları ile yeryüzüne ulaşır ve temas ettikleri kültürel miras varlıklarında zamanla kimyasal bozulmaya ve yapısal hasara neden olur. Ayrıca, kuru çökelim yoluyla yüzeylere biriken kirleticiler, yağışın başlamasıyla birlikte su molekülleriyle etkileşime girerek kimyasal reaksiyonları hızlandırmakta ve bu da yüzeylerde korozyon sürecini tetiklemektedir [4,11].

Kültürel miras yapılarına zarar veren dört temel hava kirletici bulunmaktadır. Bunlar, SO_2, NO_2, PM ve O_3'tür. Sülfür bazlı emisyonlardan olan SO_2, volkanik patlamalar ve okyanuslardaki biyolojik aktiviteler gibi doğal kaynaklardan salındığı gibi, fosil yakıt tüketimi ve taşıt emisyonları gibi insan kaynaklı faaliyetlerden de salınmaktadır [4,152]. Yıldırım ve toprak ortamındaki mikrobiyal aktiviteler gibi doğal kaynaklardan salınan NO_2, fosil yakıt kullanımı ve endüstriyel üretim süreçlerinin sonucunda ortaya çıkmaktadır [4,153]. PM, orman tahribatı, toz fırtınaları gibi doğal kaynaklardan salındığı gibi, sanayi sektöründe üretim sırasında, motorlu taşıtlarda ve tarım gibi insan kaynaklı faaliyetlerden de salınabilmektedir [4,11]. Ancak, SO_2, NO_2 ve PM başlıca kaynağı, fosil yakıtların elektrik üretimi ve ısınma amacıyla kullanıldığı enerji sektörü, imalatın ağırlıklı olduğu sanayi sektörleridir [11,148]. 2024 yılında yayımlanan Ulusal Sera Gazı Emisyon Envanteri'ne göre, 2022 yılında enerji sektörü 0,98 milyon ton NO_X emisyon salımı gerçekleştirmiştir. Bu miktar, ülke genelindeki toplam NO_x emisyonlarının %99,5'ine karşılık gelmektedir. NOx emisyonları NO ve NO_2'den oluşmaktadır. Yine aynı yıl içerisinde, 2,7 milyon tonluk sülfür emisyonlarının ise neredeyse tamamı yine enerji sektöründen kaynaklanmıştır [154]. PM oranında önümüzdeki yıllarda ciddi artış beklenmektedir. 2022 yılı verilerine bakıldığında İstanbul İl'inde ortalama PM değeri yaklaşık 40 $\mu g/m^3$ olarak ölçülmüştür. Bu değer Dünya Sağlık Örgütünün belirlediği sınır değerin yaklaşık 3 katı daha fazladır [155].

Troposferik ozon diğer adıyla yer seviyesi ozon, birincil kirleticilerin reaksiyonları sonucu oluşan ikincil kirleticidir. Bu ikincil kirletici, atmosferin 11 ile 15 km yüksekliğinde yer alan doğal olarak oluşan stratosferik ozondan farklıdır. Yer seviyesi ozon, uçucu organikler ve NO_X UV ışığı altında kompleks kimyasal reaksiyonları neticesinde meydana gelmektedir

[4]. NO_X kirleticilerinin UV ışığında NO_2'ye dönüşmesine neden olmaktadır. Bu dönüşüm sırasında serbest oksijen radikalleri oluşmaktadır. Bu radikaller hava da bulunan oksijen molekülleri ile birleştiğinde ozon meydana gelmektedir. Ozon, uzun mesafeler boyunca taşınabilmekte ve atmosferde uzun süre kalabilmektedir. Yer seviyesindeki ozon fotokimyasal duman olarak adlandırılmaktadır [156].

3.2.5. Rüzgâr

Yapılar üzerinde yüklenmeyi artıran ve mekanik hasara yol açabilen rüzgâr, aynı zamanda atmosferdeki kimyasal reaksiyonların kültürel miras varlıklarının yapı malzemeleri üzerindeki etkilerini hem azaltabilir hem de hızlandırabilir. Özellikle yağış ve nemin bulunduğu durumlarda, rüzgâr ıslaklık ve kuruma döngülerini değiştirebilmektedir [4]. Tuzları, suyu, gazları, kirleticileri ve kumları taşıyan rüzgâr hem tetikleyici hem de azaltıcı önlemler olarak işlev görebilmektedir. Rüzgâr ile taşınan partiküller, materyaller üzerindeki yüzey aşınımını hızlandırabilir [5,6,143,148].

3.2.6. Meteorolojik ve klimatolojik etkenler

Güneşten gelen enerjinin yaklaşık %70'i, yeryüzü ve atmosfer tarafından soğurulmaktadır. Bu enerji, gezegenimizin ve yeryüzünün ısınmasını sağlayan temel mekanizmadır. Yeryüzü ve atmosfer tarafından emilen enerji, uzun dalga boylu (kızılötesi) radyasyon şeklinde tekrar yayılarak bir kısmı uzaya geri gönderilir. Bu süreç, gelen güneş enerjisinin atmosferde tutulmasını ve bir kısmının geri yansımasını sağlar. Zamanla bu radyasyon enerjisi dengeye ulaşır ve Dünya'nın küresel ortalama sıcaklığını belirleyen bir sınır oluşturur. Başlıca CO_2, CH_4, N_2O, florlu gazlar ve su buharından oluşan sera gazları, kızılötesi radyasyonu emme ve yayma özelliğine sahiptir. Aynı zamanda aerosol parçacıkları, güneş radyasyonunu hem soğurur hem de saçar. Özellikle CO_2, yayılan uzun dalga radyasyonu kısa sürede tutar. CO_2 molekülü içerisindeki atomların titreşimiyle oluşan frekanslar, uzun dalga boylu kızılötesi radyasyonun belirli dalga boylarıyla çakışmaktadır. Yeryüzünden ve atmosferden yayılan radyasyonun bu titreşim frekanslarıyla örtüşmesi sonucunda, söz konusu radyasyon CO_2 tarafından emilir [150,151,157].

Bu emilim süreciyle alınan enerji, atmosferdeki diğer hava molekülleriyle çarpışarak ısı enerjisine dönüşür ve bu enerji yeniden yeryüzüne yönlendirilir. Bu mekanizma, adeta bir

battaniye gibi işlev görerek yeryüzünün ısınmasına neden olur. Atmosferdeki CO_2 konsantrasyonunun artması, atmosferde CO_2 örtü tabakasının kalınlaşmasına ve dolayısıyla sistemin enerji dengesinin bozulmasına yol açar. Bu durum, zamanla daha fazla ısınmaya neden olur [150,151].

İklim değişikliğine neden olan bu süreç, atmosferdeki diğer gazların ve güçlü bir doğal sera gazı olan su buharının konsantrasyonunun artmasıyla daha da şiddetlenmektedir [150,157]. Özellikle atmosfere salınan kirleticiler, meteorolojik olaylar aracılığıyla dağılmakta ve seyrelmektedir. Ancak bu durum; rüzgâr hızı, sıcaklık ve nem gibi çeşitli atmosferik etkenlere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Örneğin, rüzgâr hızının düşük olduğu bölgelerde hava kütlesinin hareketi sınırlanmakta; bu durum, atmosfere salınan kirleticilerin birikmesine ve yoğunluklarının artmasına yol açmaktadır. Bu da fotokimyasal duman oluşturabilmektedir [4]. Özetle, sıcaklık, nem, güneş radyasyonu ve diğer meteorolojik faktörlerdeki değişimler; fotokimyasal, oksidatif ve kimyasal reaksiyon hızlarını etkileyebilmektedir [151].

3.2.7. Hava kirliliği ve meteorolojik olaylarının sinerjik etkisi

Su, yağış ya da atmosferik nem yoluyla dolaylı olarak etki eder ve metal yüzeylerde ince bir film tabakası şeklinde yüzeye tutunur ya da gözenekli taş malzeme içerisine emilir. Sıcaklık ile hava kirleticilerinin etkisiyle birlikte, bu durum yüzey aşınımına ve korozyon süreçlerine neden olabilir. Bu tür hasarların oluşabilmesi için dört farklı koşuldan birinin ya da birkaçının aynı anda mevcut olması gerekmektedir.

İlk durum, uygun sıcaklık ve nem koşullarında gaz formunda olan SO_2'nin NO_2 ve O_3 ile birlikte etkileşime girerek asidik kimyasal ortaya çıkarmasıdır [4]. Bu kimyasal reaksiyon Eş. 3.1'de verilmektedir.

$$SO_2 + H_2O \rightarrow H^+ + HSO_3^- + O_3 \rightarrow 2H^+ + SO_4^{2-} + O_2 \quad (3.1)$$

Troposfer seviyesinde gaz formunda bulunan SO_2'nin konsantrasyonu genellikle düşük seviyelerde kalmaktadır. Bu nedenle, oksitleyici kirleticilerden olan NO_2 ve O_3'ün konsantrasyonları, bu maddelerin etkileşimi sonucu korozyon hızını ve miktarını belirleyen esas faktörlerdir [4,11]. Korozyon ve yüzey aşınımı dışında, SO_2, karbonat içeren taşlar

üzerinde farklı bir bozulma etkisi yaratmaktadır. Örneğin, taş yapısında kalsiyum karbonat bulunması, Eş. 3.1'de verilen kimyasal reaksiyonun gerçekleşmesiyle, suda çözünebilen jips (kalsiyum sülfat) kabuklarının oluşmasına yol açmaktadır. Bu durum, yüzey aşınımına ek olarak taş üzerinde kirlenmeye ve lekenmeye neden olmaktadır [148,158].

İkinci durum, atmosferde bulunan NO_2 konsantrasyonlarının uygun sıcaklık ve nem koşullarında nitrojen asidi üretmesi ve ortamda O_3 varlığında ise bu asidin korozif bileşik olan HNO_3'e dönüşmesidir [4,159]. NO_X bileşiklerinin bulunduğu ortamlarda, uygun koşullar altında HNO_3 oluşumu, genellikle bir gün içinde gerçekleşebilmektedir [4]. Ortamdaki nemi çekme ve emme özelliğine sahip olan higroskopik tuzları içeren HNO_3, güçlü bir asit olup çökelme hızı yüksektir [12]. Özellikle, kalsiyum karbonat içeren kalkerli taşlar üzerinde korozyon etkisi, SO_2'den çok daha fazladır [4,11,148].

Üçüncü durum, yağış ve asit yağmurlarının etkisidir. Yağışla birlikte gelen su, iki farklı işlevi yerine getirmektedir. Kültürel miras alanının bulunduğu ortam dikkate alındığında, yüksek su miktarı, miras yapıları üzerinde biriken klorür gibi agresif maddeleri çözebilir ve bunları malzeme yüzeyinden taşıyabilir. Bu durum, yıkama etkisi veya koruyucu etki olarak tanımlanmaktadır. Bunun tam tersi olarak, kültürel miras varlıklarının malzeme yüzeyinin ıslanması ve yağışın pH değerine bağlı olarak korozif etki yaratabilir. Bu durum, asit yağmuru etkisi olarak tanımlanmaktadır. Bu iki işlevin gerçekleşmesi, incelenen kültürel miras varlık alanının özelliklerine bağlıdır. Kırsal ve kentsel alanlarda bulunan kültürel miras varlıkları daha çok asit yağmuru etkisine maruz kalmaktadır. Ancak, deniz ortamının baskın olduğu bölgelerde bulunan kültürel miras varlıklarında ise yıkama etkisi belirli oranda görülebilmektedir [4,12,13].

Son ve dördüncü etki ise sodyum klorür de dahil olmak üzere partikül maddelerin uygun sıcaklık ve nem koşullarında oluşturduğu yüzey aşınımı ve korozif etkileridir. Higroskopik özellik taşıyan partikül maddeler, özellikle metal ve metal alaşım maddeleri üzerinde yüksek korozyon hızlarına yol açabilir ve taş gibi materyaller üzerinde yüzey aşınım oranını arttırabilmektedir [4,148]. Özellikle taş malzemelerde PM etkisi iki temel mekanizma ile gerçekleşmektedir. Birincisi tuzların çözeltiden kristalleşmesidir. Atmosferde bulunan tuzlar, yağış ile birlikte materyallerin yüzeyine taşınır ve zamanla suyun buharlaşması ile kristalleşirler. Bu kristallerin büyümesi ile taş malzemelerin yüzeyinde iç gerilme yaratarak çatlama ve dökülmeye neden olmaktadır. İkincisi ise tuzlar su moleküllerine bağlanması ile

hidrasyon ve dehidrasyon döngüsünün oluşmasıdır. Bu döngülerdeki hacim değişiklikleri hava koşuları etkisi ile birlikte mekanik strese yol açmaktadır [11].

Ele alınan bu dört etkinin özellikle portland kireçtaşı, beyaz mansfield dolomitik kumtaşı, dökme bronz, karbon çelik, çinko ve bakır üzerindeki etkileri, ICP-Materyaller Çoklu Kirletici Maruziyet Programı kapsamında laboratuvar ortamında gerçekleştirilen uzun dönemli analizlerle incelenmiştir. Bu materyaller üzerinde oluşabilecek etkileri ölçmek amacıyla özel doz-etki fonksiyonları geliştirilmiştir [130].

4. ÇALIŞMA ALANI

4.1. Çalışma Alanın Seçilmesinde Kullanılan Kriterler

Tez çalışma sürecinde, UNESCO Dünya Miras Listesi'nde yer alan on sekiz taşınmaz kültür varlıkları arasından sadece taşınmaz kültürel alanları seçilmiştir. Karma kültürel miras alanları kapsam dışında bırakılmıştır. Çalışma alanın seçilmesinde uygulanan başlıca kriterler aşağıda listelenmiştir.

- Restorasyon süreci ve mimari yapılar ile ilgili teknik verilerin bulunması,
- Ulusal ve uluslararası araştırmaların sürdürülmesi, kültürel miras özelliklerine yönelik yayınlanmış makaleler ve diğer kaynakların mevcut olması,
- Mevcut literatürde hava kirliliğinin kültürel miras üzerine etkisine yönelik araştırma yapılmamış olması ya da sınırlı sayıda araştırma yapılmış olması,
- Günlük hava kirliliği verilerinin bulunması ve 8 adetin üzerinde hava kalitesi izleme (HKİ) istasyonunun bulunması,
- Bir yıl süresince hava kalitesi değerlerinin %60'nın belirlenen ulusal yönetmelik sınırlarını aşarak, seçilen alanın hava kalitesi açısından riskli sınıfta yer alması,
- Seçilen çalışma alanında bulunan materyaller için doz-etki fonksiyonlarının türetilmiş olması gerekmektedir.

İstanbul ve Bursa illerinde yer alan kültürel miras alanları yukarıda verilen birçok kriterleri sağlamaktadır. Ancak, 2016 yılında gerçekleştirilen doktora tezi çalışmasında Bursa ve Cumalıkızık: Osmanlı İmparatorluğunun Doğuşu kültürel miras alanı çalışma alanı olarak analiz edilmiştir [92].

İstanbul Tarihi Yarımadası, en popüler turistik alanlardan biri olup, yıllık ziyaretçi oranın diğer illere göre daha yüksek kalmaktadır [24–27]. Ayrıca, mimari yapılarında ICP-Materyaller Çoklu Kirletici Maruz Programında yer alan korozyon ve yüzey aşınıma fazla dayanıklı olmayan materyalleri içermektedir [28,130]. Metropol bir şehir olmasından ötürü hava kirletici sınıfı değişmekte ve hava kirleticilerin konsantrasyonları gittikçe artış göstermektedir [29–32]. Özellikle, önümüzdeki yıllarda hava kirliliği parametrelerinin konsantrasyonlarının beklenen kentsel hareketlilikteki artış ve yoğun trafikle daha fazla

artacağı öngörülmektedir [33–35]. Bugüne kadar yayınlanan çalışmalar derinlemesine incelendiğinde [36–38,160] COVID-19 pandemisinin yan etkilerinden biri olan trafiğin azaltılması ve kentsel hareketliliğin sınırlanmasının, hava kirliliğinin yapılı miras üzerindeki olumsuz etkilerini nasıl azaltabileceğini araştırmak için nadir bir fırsat sunmaktadır.

Hava kirliliğinin, İstanbul'un yapısal kültürel mirası üzerindeki etkisinin inceleyen üç adet araştırma bulunmaktadır. Bunlardan ikisi yer seviyesi ozon maruziyeti ve dağılımı [39] ile hava kirliliğinin korozyon etkisini [21] incelemektedir. Söz konusu bu iki çalışmada HKİ istasyonları yerine 50 adet örnekleme noktasından kısmi ölçümler alınmıştır. Gerçekleştirilen son çalışmada ise COVID-19 dönemine ilişkin etkiler incelenmektedir [23]. Öncelikle, yapılan bu son çalışma 21 metropol şehirlerin toplu verileri kullanılarak hava kirliliği modellemesi gerçekleştirmiştir. Ek olarak, İstanbul İl'i içerisinde bulunan istasyonlardan birkaçını almakta olup, bu istasyonların lokasyonları İstanbul Tarihi Yarımadasının 20 km inceleme yarıçapının dışında kalmaktadır. Özetle, kullanılan veri, modelleme alanı, seçilen yöntem geniş ölçekli düzeyde kalmaktadır. Örneğin, İstanbul'daki sıcaklık ve nem değişimlerine yönelik haritalama ve modelleme de sadece tek bir meteoroloji istasyonundan alınan veriler kullanılmıştır.

Bütün bunlar dikkate alındığında, İstanbul Tarihi Yarımadası'na yönelik detaylı bir analiz yapılmamıştır. Sunulan tez çalışması ile literatürdeki bu eksikliğin giderilmesi hedeflenmektedir.

4.2. Çalışma Alanı Hakkında

İstanbul Tarihi Yarımadası, Avrupa kıtasında yer almaktadır. 41°00′30.0′ N enlemi ve 28°58′40.6′ E boylamı merkez olmak üzere toplam 2165 hektarlık bir alanı kapsamaktadır [161]. Doğusunda İstanbul Boğazı, güneyinde Marmara Denizi, kuzeyinde Haliç bulunmakta olup, bu kültürel miras alanın batısında ise bir kara duvarı bu alanı çevrelemektedir. Roma, Osmanlı ve Bizans gibi büyük imparatorluklara başkentlik yapan İstanbul 35.000'den fazla kültürel varlık içermektedir. Hipodrom, Ayasofya, Topkapı Sarayı, Süleymaniye Camii ve Zeyrek Camii bu yarımadanın tarihi simgeleri arasında yer almaktadır [162]. Bu çalışmada, İstanbul Tarihi Yarımadası dört ana alt bölgeye ayrılmıştır. Birinci alt bölge Sultanahmet Kentsel Arkeolojik Koruma Alanı, ikinci alt bölge Süleymaniye Camii ve Çevresi Koruma Alanı, üçüncü alt bölge İstanbul Kara Surları

Koruma Alanı ve son olarak dördüncü alt bölge ve Zeyrek Camii ve Çevresi Koruma Alanı olarak adlandırılmaktadır.

Deniz seviyesinden 40 metre yükseklikte bulunan İstanbul'un iklim koşulları üzerinde Marmara Denizi ve İstanbul Boğazı'nın etkisi olmakla birlikte, çoğunlukla Akdeniz iklim özellikleri hâkimdir. İstanbul'un yazları tipik olarak sıcak, kışları ise ılımandır ve şehrin ortalama yaz sıcaklığı 23°C ile 5°C arasında değişmektedir [163,164]. Yıllık toplam yağış miktarı 600 mm'yi aşabilmektedir [164–166].

23'ü şehrin Avrupa yakasında olmak üzere İstanbul'un her iki yakasında toplamda 38 adet HKİ istasyonu bulunmaktadır. Bu istasyonların çalışma uzaklıkları dikkate alınarak Avrupa yakasında yer alan 22 adet HKİ istasyonu çalışma kapsamına alınmıştır. Bu istasyonlarda 7 tanesi kentsel, 3 tanesi endüstriyel, 8 tanesi trafik, 3 tanesi kentsel arka plan istasyon ve 1 tanesi kırsal HKİ istasyonu olarak sınıflandırılmaktadır. Şekil 4.1'de çalışma alanı ve HKİ istasyonları gösterilmektedir.



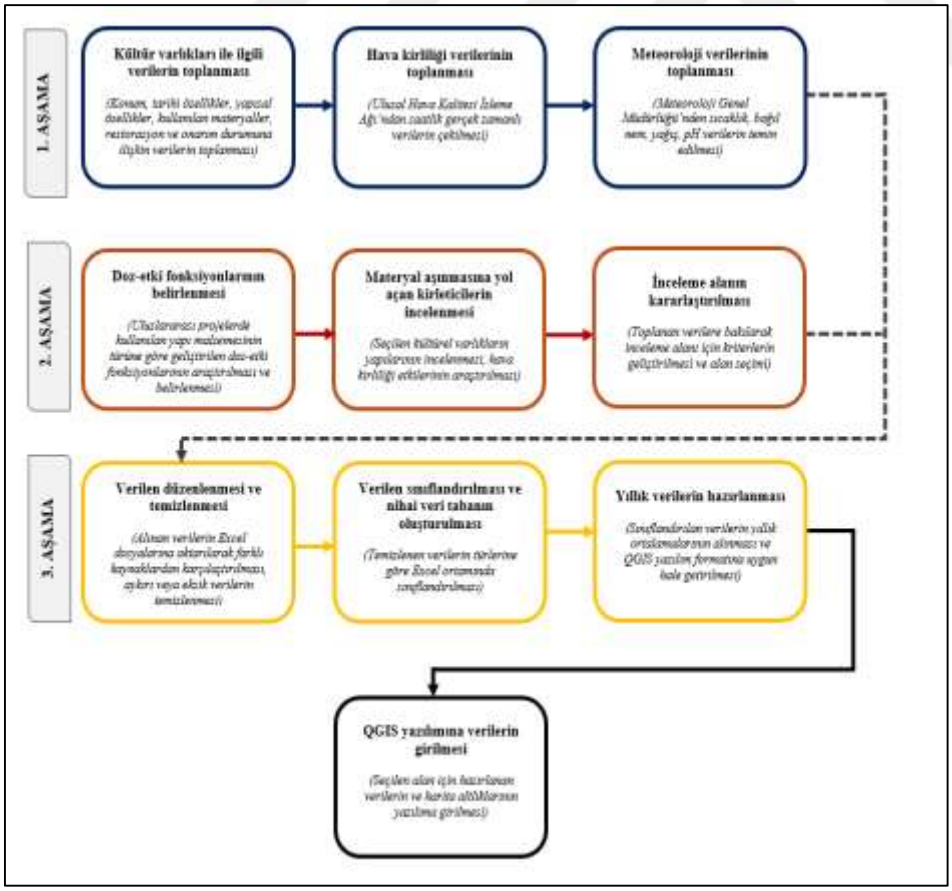
Şekil 4.1. İnceleme alanı ve HKİ istasyonlarının gösterimi

İstanbul Tarihi Yarımada'daki dört ana alt bölge kırmızı poligonlarla gösterilmiştir. Alt bölgeler sırasıyla (1) Sultanahmet Kentsel Arkeolojik Koruma Alanı, (2) Süleymaniye Camii ve Çevresi Koruma Alanı, (3) İstanbul Kara Surları Koruma Alanı ve (4) Zeyrek Camii ve Çevresi Koruma Alanı'nı göstermektedir. HKİ istasyonlarının konumları, Kentsel (K), Endüstriyel (E), Trafik (T), Kentsel Arka Plan (KAP) ve Kırsal (KIR) olarak Şekil 4.1'de gösterilmektedir. Bu çalışmada seçilen alan, sağ altta verilen Türkiye haritasında kırmızı kare ile gösterilmektedir. Haritalama sırasında altlık olarak Google Uydu görüntüsü kullanılmıştır.

5. UYGULANAN YÖNTEM

5.1. Verilerin Toplanması ve İşlenmesi

Veri yönetim süreci, Şekil 5.1'de gösterildiği üzere üç aşamada gerçekleştirilmektedir. İlk aşamada, kültürel varlıklarla ilgili sayısal ve sözel veriler toplanmıştır. Seçilen alanlarda yürütülen restorasyon ve onarım çalışmaları tespit edilmiştir. Ardından, hava kirliliği ile meteoroloji verileri, ulusal kamu kurumlarının açık ya da kısmen açık veri tabanlarından temin edilmiştir. Bu veriler, tek bir veri tabanı hâline getirilmiştir. İkinci aşamada, kültürel varlıkların yapı özellikleri dikkate alınarak, uluslararası projelerde kullanılan doz-etki fonksiyonları incelenmiştir. Materyal aşınmasına neden olan kirleticiler ve diğer dış etkenler değerlendirilmiştir. Elde edilen tüm veriler doğrultusunda inceleme alanı belirlenmiştir. Üçüncü aşamada ise toplanan verilerin düzenlenmesi, sınıflandırılması ve yıllık verilere dönüştürülmesi sağlanmıştır.



Şekil 5.1. Bu çalışmada kullanılan veri yönetim süreci

Detaylandırılırsa, gerçek zamanlı hava kalitesi verileri, Türkiye Cumhuriyeti Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından kurulan ve açık bir veri tabanı olan UHKİA platformundan alınmıştır [167]. 2019 yılından 2021 yılına kadar günlük hava kalitesi verileri UHKİA veri tabanından çekilmiştir. SO_2, NO_2 NO_X, O_3 ve PM_{10} parametrelerine ait günlük veriler 21 adet istasyon düzeyinde tek analiz edilmiştir. Ek olarak, İstanbul Tarihi Yarımadası alanın tam merkezinden başlamak üzerek yaklaşık 20 km dairesel çap içerisinde kalan 21 meteoroloji istasyonu tespit edilmiştir. Bu istasyonlar günlük ortalama sıcaklık (°C), yağış (mm) ve bağıl nem (%) verilerini sağlamaktadır. 2019-2021 yıllarına ait bu üç parametreye ait günlük veriler MGM'den temin edilmiştir [168]. Bunlara ek olarak, İstanbul İl'inde MGM tarafından işletilen Çatalca Meteoroloji istasyonu İstanbul ili için yıllık ortalama yağış pH değerlerini sağlamaktadır. Bu veriler yıllık raporlardan alınmıştır [169].

Veriler toplandıktan sonra, tutarsız günlük değerler (örneğin boş veya aykırı değerler) oluşturulan veri tabanından çıkarılmış ve analiz sürecine dahil edilmemiştir. Yıllık korozyon derinliği ve yüzey aşınma seviyelerinin hesaplanması sebebi ile hem hava kalitesi hem de meteorolojik parametreler için yıllık ortalamalar hesaplanmıştır. Ardından, tüm veriler QGIS yazılımı içerisine girilen doz-etki fonksiyonlarına yerleştirilmektedir (Şekil 5.1).

5.1.1. Hava kirliliği verileri

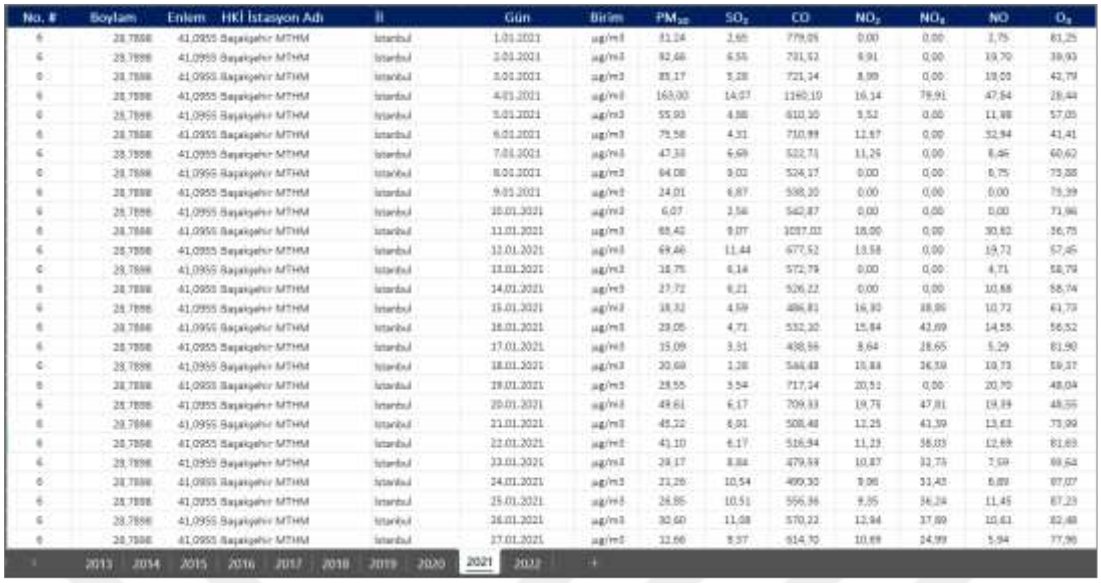
Seçilen hava kirliliği parametrelerinin eğilim analizini doğru tespit edebilmek amacıyla, 1 Ocak 2013 ile 31 Aralık 2022 yılları arasındaki tüm günlük veriler çekilmiştir. 2013-2022 dönemi için PM_{10}, SO_2, CO, NO_2, NO_x, NO ve O_3 parametrelerini kapsayan detaylı bir hava kirliliği veri tabanı kurulmuştur. Eski istasyonlar dışında (8 adet), diğer istasyonların 2018 yılından sonra sağlıklı veri aldığı görülmektedir. Çizelge 5.1'de belirtilen istasyonlar için Resim 5.1'de olduğu üzere her bir HKİ istasyonu için ayrı günlük veri tabanları geliştirilmiştir. Ardından, oluşturulan her veri tabanı için veriler aykırı değerlerden temizlenmiş ve iyileştirilmiştir. Bu işlemin tamamlanmasından sonra yıllık ortalama veriler hesaplanmıştır. QGIS yazılımı içerisine seçilen tüm istasyonların yıllık verilerinin girilmesi gerekmektedir. Oluşturulan ikinci yıllık veri tabanı tüm istasyonları kapsayacak şekilde yapılandırılmıştır.

Çizelge 5.1. Çalışma alanı için seçilen HKİ istasyonları

HKİ İstasyon Adı	HKİ İstasyon Türü	Sorumlu Kurum	Enlem	Boylam
Aksaray	Trafik	İBB	41,0147	28,9547
Alibeyköy	Kentsel	İBB	41,0576	28,9456
Arnavutköy	Kentsel Arka Plan	İBB	41,2067	28,7451
Avcılar	Kentsel Arka Plan	İBB	40,9873	28,7299
Bağcılar	Kentsel	İBB	41,0317	28,8428
Başakşehir	Kentsel Endüstriyel	ÇŞİDB	41,0955	28,7898
Beşiktaş	Trafik	İBB	41,0538	29,0100
Çatladıkapı	Trafik	İBB	41,0025	28,9752
Esenler	Kentsel	İBB	41.0383	28.8880
Esenyurt	Kentsel	ÇŞİDB	41,0202	28,6695
Kağıthane	Trafik	İBB	41,0877	28,9827
Kağıthane	Kentsel	ÇŞİDB	41,0923	28,9747
Kumköy	Kırsal	İBB	41,2511	29,0382
Maslak	Kentsel Arka Plan	İBB	41,1013	29,0244
Mecidiyeköy	Trafik	ÇŞİDB	41,0659	28,9944
Sarıyer	Kentsel	İBB	41,1288	29,0497
Şirinevler	Trafik	ÇŞİDB	41,0024	28,8386
Sultangazi	Trafik	ÇŞİDB	41,1019	28,8720
Sultangazi1	Kentsel Endüstriyel	İBB	41,1092	28,8939
Sultangazi2	Trafik	İBB	41,1150	28,8516
Sultangazi3	Kentsel Endüstriyel	İBB	41,1142	28,8519



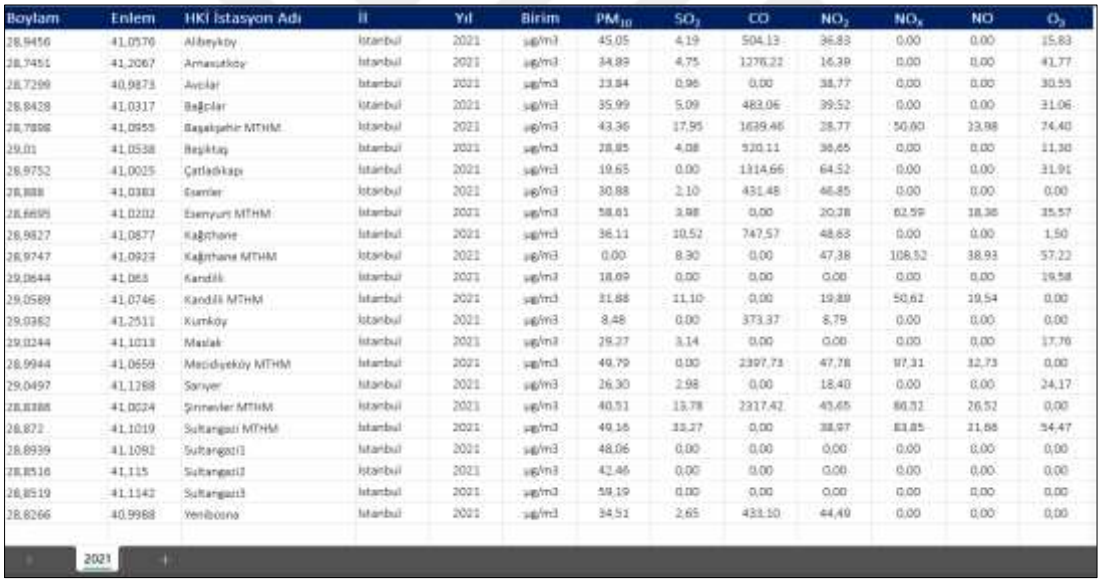
Şekil 5.2. Çalışma alanın 20 km yarıçap çevresinde bulunan HKİ istasyonları



No. #	Boylam	Enlem	HKİ İstasyon Adı	İl	Gün	Birim	PM_{10}	SO_2	CO	NO_2	NO_x	NO	O_3
6	28,7888	41,0955	Başakşehir MTHM	İstanbul	1.01.2021	µg/m3	81,24	2,65	779,05	0,00	0,00	1,75	81,25
6	28,7888	41,0955	Başakşehir MTHM	İstanbul	2.01.2021	µg/m3	92,46	6,55	781,52	8,91	0,00	19,70	39,93
6	28,7888	41,0955	Başakşehir MTHM	İstanbul	3.01.2021	µg/m3	85,17	5,28	721,14	8,99	0,00	19,03	42,79
6	28,7888	41,0955	Başakşehir MTHM	İstanbul	4.01.2021	µg/m3	163,00	14,07	1160,10	16,14	78,91	47,84	28,44
6	28,7888	41,0955	Başakşehir MTHM	İstanbul	5.01.2021	µg/m3	55,93	4,86	610,10	9,52	0,00	11,98	57,05
6	28,7888	41,0955	Başakşehir MTHM	İstanbul	6.01.2021	µg/m3	79,58	4,31	710,99	12,67	0,00	32,94	41,41
6	28,7888	41,0955	Başakşehir MTHM	İstanbul	7.01.2021	µg/m3	47,33	6,69	522,71	11,25	0,00	8,46	60,62
6	28,7888	41,0955	Başakşehir MTHM	İstanbul	8.01.2021	µg/m3	64,08	9,02	524,17	0,00	0,00	0,75	75,88
6	28,7888	41,0955	Başakşehir MTHM	İstanbul	9.01.2021	µg/m3	24,01	6,87	598,20	0,00	0,00	0,00	79,39
6	28,7888	41,0955	Başakşehir MTHM	İstanbul	10.01.2021	µg/m3	6,07	3,56	562,87	0,00	0,00	0,00	71,96
6	28,7888	41,0955	Başakşehir MTHM	İstanbul	11.01.2021	µg/m3	68,42	9,07	1037,03	18,00	0,00	30,92	36,75
6	28,7888	41,0955	Başakşehir MTHM	İstanbul	12.01.2021	µg/m3	69,46	11,44	677,52	13,58	0,00	19,72	57,45
6	28,7888	41,0955	Başakşehir MTHM	İstanbul	13.01.2021	µg/m3	18,75	6,14	572,79	0,00	0,00	4,71	58,79
6	28,7888	41,0955	Başakşehir MTHM	İstanbul	14.01.2021	µg/m3	27,72	6,21	526,22	0,00	0,00	10,88	58,74
6	28,7888	41,0955	Başakşehir MTHM	İstanbul	15.01.2021	µg/m3	18,32	4,59	486,81	16,30	38,86	10,72	61,73
6	28,7888	41,0955	Başakşehir MTHM	İstanbul	16.01.2021	µg/m3	29,05	4,71	532,10	15,84	42,69	14,55	56,52
6	28,7888	41,0955	Başakşehir MTHM	İstanbul	17.01.2021	µg/m3	35,09	3,31	488,96	8,64	28,65	5,29	61,90
6	28,7888	41,0955	Başakşehir MTHM	İstanbul	18.01.2021	µg/m3	20,69	1,28	566,48	15,84	36,59	18,73	59,37
6	28,7888	41,0955	Başakşehir MTHM	İstanbul	19.01.2021	µg/m3	28,55	3,54	717,14	20,51	0,00	20,70	48,04
6	28,7888	41,0955	Başakşehir MTHM	İstanbul	20.01.2021	µg/m3	49,61	6,17	709,33	19,79	47,81	19,39	48,55
6	28,7888	41,0955	Başakşehir MTHM	İstanbul	21.01.2021	µg/m3	45,22	6,91	508,48	12,25	41,39	13,63	73,99
6	28,7888	41,0955	Başakşehir MTHM	İstanbul	22.01.2021	µg/m3	41,10	6,17	516,94	11,23	38,03	12,69	81,83
6	28,7888	41,0955	Başakşehir MTHM	İstanbul	23.01.2021	µg/m3	28,17	8,84	479,59	10,87	32,75	7,59	89,64
6	28,7888	41,0955	Başakşehir MTHM	İstanbul	24.01.2021	µg/m3	21,29	10,54	499,30	9,06	31,43	6,89	97,07
6	28,7888	41,0955	Başakşehir MTHM	İstanbul	25.01.2021	µg/m3	26,86	10,51	556,36	9,35	36,24	11,45	87,23
6	28,7888	41,0955	Başakşehir MTHM	İstanbul	26.01.2021	µg/m3	30,60	11,08	570,22	12,94	37,89	10,61	82,48
6	28,7888	41,0955	Başakşehir MTHM	İstanbul	27.01.2021	µg/m3	32,66	8,37	614,70	10,69	34,99	5,94	77,96

2013 2014 2015 2016 2017 2018 2019 2020 2021 2022 +

Resim 5.1. Başakşehir istasyonu için oluşturulan veri tabanı

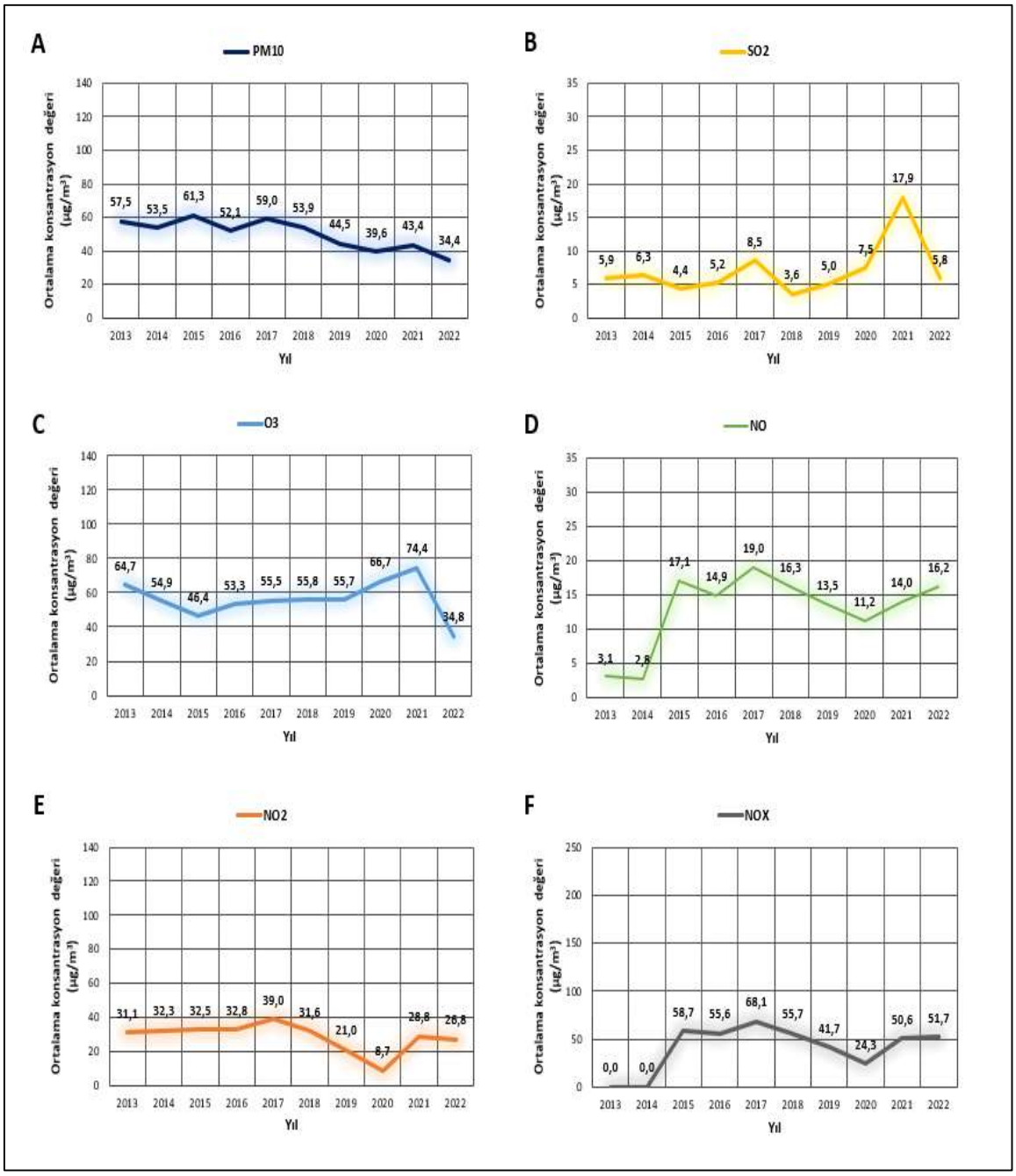


Boylam	Enlem	HKİ İstasyon Adı	İl	Yıl	Birim	PM_{10}	SO_2	CO	NO_2	NO_x	NO	O_3
28,9456	41,0576	Alibeykoy	İstanbul	2021	µg/m3	45,05	4,19	504,13	36,83	0,00	0,00	15,83
28,7451	41,2067	Arnavutkoy	İstanbul	2021	µg/m3	34,89	4,75	1276,22	16,39	0,00	0,00	41,77
28,7209	40,9873	Avcılar	İstanbul	2021	µg/m3	23,84	0,96	0,00	38,77	0,00	0,00	30,55
28,8428	41,0317	Bağcılar	İstanbul	2021	µg/m3	35,99	5,09	483,06	39,52	0,00	0,00	31,06
28,7888	41,0955	Başakşehir MTHM	İstanbul	2021	µg/m3	43,36	17,95	1639,46	28,77	50,60	13,98	74,40
29,01	41,0538	Beşiktaş	İstanbul	2021	µg/m3	28,85	4,08	520,11	38,65	0,00	0,00	11,30
28,9752	41,0025	Çatladikapı	İstanbul	2021	µg/m3	19,65	0,00	1314,66	64,52	0,00	0,00	31,91
28,888	41,0363	Esenler	İstanbul	2021	µg/m3	30,88	2,10	431,48	46,85	0,00	0,00	0,00
28,8695	41,0202	Esenyurt MTHM	İstanbul	2021	µg/m3	58,61	3,98	0,00	20,28	62,59	18,36	35,57
28,9827	41,0877	Kağıthane	İstanbul	2021	µg/m3	36,11	10,52	747,57	48,63	0,00	0,00	1,50
28,9747	41,0923	Kağıthane MTHM	İstanbul	2021	µg/m3	0,00	8,30	0,00	47,38	108,52	38,93	57,22
29,0644	41,065	Kandilli	İstanbul	2021	µg/m3	18,69	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	19,58
29,0589	41,0746	Kandilli MTHM	İstanbul	2021	µg/m3	31,88	11,10	0,00	19,89	50,62	19,54	0,00
29,0362	41,2511	Kumköy	İstanbul	2021	µg/m3	8,48	0,00	373,37	6,79	0,00	0,00	0,00
29,0244	41,1013	Maslak	İstanbul	2021	µg/m3	29,27	3,14	0,00	0,00	0,00	0,00	17,76
28,9944	41,0659	Mecidiyeköy MTHM	İstanbul	2021	µg/m3	49,79	0,00	2397,73	47,78	97,31	32,73	0,00
29,0497	41,1288	Sarıyer	İstanbul	2021	µg/m3	26,30	2,98	0,00	18,40	0,00	0,00	24,17
28,8388	41,0024	Sirinevler MTHM	İstanbul	2021	µg/m3	40,51	13,78	2317,42	45,65	86,51	26,52	0,00
28,872	41,1019	Sultangazi MTHM	İstanbul	2021	µg/m3	49,16	33,27	0,00	38,97	83,85	21,88	54,47
28,8939	41,1092	Sultangazi1	İstanbul	2021	µg/m3	48,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
28,8516	41,115	Sultangazi2	İstanbul	2021	µg/m3	42,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
28,8519	41,1142	Sultangazi3	İstanbul	2021	µg/m3	59,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
28,8266	40,9988	Yenibosna	İstanbul	2021	µg/m3	34,51	2,65	433,10	44,49	0,00	0,00	0,00

2021 +

Resim 5.2. 2021 yılı için seçilen HKİ istasyonlarına ait veri tabanı

Şekil 5.3'te, Başakşehir HKİ istasyonunda olduğu gibi her bir HKİ istasyonunun eğilim analiz grafikleri çıkarılmıştır. 2013-2022 döneminde hava kirletici parametrelerinin ortalamaları incelendiğinde, COVID-19 ve sonrası dönemde konsantrasyonlarda değişimler gözlemlenmiştir. Bu değişimler, COVID-19 kısıtlamalarının, özellikle üretim, hareket ve trafik kısıtlamalarının getirdiği sonuçları yansıtmaktadır. Ortalama konsantrasyonlardaki eğilimler sırasıyla (A) PM_{10}, (B) SO_2, (C) O_3, (D) NO, (E) NO_2 ve son olarak (F) NOx parametreleri için verilmektedir.



Şekil 5.3. Başakşehir istasyonundaki konsantrasyonlarındaki değişimleri

Seçilen HKİ istasyonları için 2019-2021 dönemine ait yıllık ortalama hava kalitesi verileri hesaplanmıştır. 2022 yılının analiz kapsamı dışında bırakılmasının nedeni, bu yıl içerisinde kısıtlamaların oldukça hafifletilmiş olmasıdır. Tespit edilemeyen diğer dış faktörlerin hava kirliliği parametreleri üzerinde etkili olabileceğinden, bu dönem analize dahil edilmemiştir. Her bir HKİ istasyonu verileri için PM_{10}, SO_2, NO_2 ve O_3 değerleri, 2019 yılı için Çizelge 5.2'de, 2020 yılı için Çizelge 5.3'te ve 2021 yılı için Çizelge 5.4'te verilmektedir.

Çizelge 5.2. 2019 yılına ait yıllık ortalama hava kalitesi verileri

HKİ İstasyon Adı	HKİ İstasyon Türü	PM_{10} ($\mu g/m^3$)	SO_2 ($\mu g/m^3$)	NO_2 ($\mu g/m^3$)	O_3 ($\mu g/m^3$)
Aksaray	Trafik	0,00	0,00	0,00	0,00
Alibeyköy	Kentsel	70,62	2,20	43,79	14,88
Arnavutköy	Kentsel Arka Plan	34,46	4,88	22,29	47,85
Avcılar	Kentsel Arka Plan	28,03	3,24	37,28	0,00
Bağcılar	Kentsel	43,49	4,06	51,53	37,17
Başakşehir	Kentsel Endüstriyel	44,52	5,01	20,97	55,66
Beşiktaş	Trafik	33,31	4,98	65,56	24,52
Çatladıkapı	Trafik	30,90	0,00	62,61	20,95
Esenler	Kentsel	38,46	3,18	56,98	0,00
Esenyurt	Kentsel	59,42	6,66	28,49	22,09
Kağıthane	Trafik	69,11	2,56	47,62	28.74
Kağıthane	Kentsel	0,00	3,95	18,13	56,92
Kumköy	Kırsal	17,13	0,00	13,30	0,00
Maslak	Kentsel Arka Plan	33,76	1,98	29,66	22,15
Mecidiyeköy	Trafik	63,83	0,00	65,35	0,00
Sarıyer	Kentsel	15,53	0,00	0,00	9,33
Şirinevler	Trafik	44,15	6,94	70,73	0,00
Sultangazi	Trafik	57,76	3,94	29,48	41,90
Sultangazi1	Kentsel Endüstriyel	56,19	0,00	0,00	0,00
Sultangazi2	Trafik	53,17	0,00	0,00	0,00
Sultangazi3	Kentsel Endüstriyel	75,30	0,00	0,00	0,00

Çizelge 5.3. 2020 yılına ait yıllık ortalama hava kalitesi verileri

HKİ İstasyon Adı	HKİ İstasyon Türü	PM_{10} ($\mu g/m^3$)	SO_2 ($\mu g/m^3$)	NO_2 ($\mu g/m^3$)	O_3 ($\mu g/m^3$)
Aksaray	Trafik	61,83	3,69	36,50	13,30
Alibeyköy	Kentsel	37,59	4,49	11,92	28,77
Arnavutköy	Kentsel Arka Plan	26,13	3,19	30,31	6,05
Avcılar	Kentsel Arka Plan	38,20	3,65	41,84	32,69
Bağcılar	Kentsel	39,60	7,46	8,69	66,68
Başakşehir	Kentsel Endüstriyel	24,13	4,04	49,73	17,59
Beşiktaş	Trafik	15,98	0,00	43,68	25,76
Çatladıkapı	Trafik	33,03	4,71	50,62	0,00
Esenler	Kentsel	51,43	4,60	13,55	21,77
Esenyurt	Kentsel	58,27	11,96	18,39	5,18
Kağıthane	Trafik	0,00	6,86	27,62	71,41
Kağıthane	Kentsel	12,02	0,00	11,39	0,00
Kumköy	Kırsal	21,69	3,06	9,84	18,13
Maslak	Kentsel Arka Plan	48,34	0,00	47,21	0,00
Mecidiyeköy	Trafik	14,91	1,47	16,55	13,88
Sarıyer	Kentsel	41,67	8,45	52,71	0,00
Şirinevler	Trafik	53,56	8,30	42,98	28,77
Sultangazi	Trafik	60,95	0,00	0,00	0,00
Sultangazi1	Kentsel Endüstriyel	47,40	0,00	0,00	0,00
Sultangazi2	Trafik	76,32	0,00	0,00	0,00
Sultangazi3	Kentsel Endüstriyel	75,30	0,00	0,00	0,00

Çizelge 5.4. 2021 yılına ait yıllık ortalama hava kalitesi verileri

HKİ İstasyon Adı	HKİ İstasyon Türü	PM_{10} ($\mu g/m^3$)	SO_2 ($\mu g/m^3$)	NO_2 ($\mu g/m^3$)	O_3 ($\mu g/m^3$)
Aksaray	Trafik	45,05	4,19	36,83	15,83
Alibeyköy	Kentsel	34,89	4,75	16,39	41,77
Arnavutköy	Kentsel Arka Plan	23,84	0,96	38,77	30,55
Avcılar	Kentsel Arka Plan	35,99	5,09	39,52	31,06
Bağcılar	Kentsel	43,36	17,95	28,77	74,40
Başakşehir	Kentsel Endüstriyel	28,85	4,08	36,65	11,30
Beşiktaş	Trafik	19,65	0,00	64,52	31,91
Çatladıkapı	Trafik	30,88	2,10	46,85	0,00
Esenler	Kentsel	58,61	3,98	20,28	35,57
Esenyurt	Kentsel	36,11	10,52	48,63	1,50
Kağıthane	Trafik	0,00	8,30	47,38	57,22
Kağıthane	Kentsel	18,69	0,00	0,00	19,58
Kumköy	Kırsal	31,88	11,10	19,89	0,00
Maslak	Kentsel Arka Plan	8,48	0,00	8,79	0,00
Mecidiyeköy	Trafik	29,27	3,14	0,00	17,76
Sarıyer	Kentsel	49,79	0,00	47,78	0,00
Şirinevler	Trafik	26,30	2,98	18,40	24,17
Sultangazi	Trafik	40,51	13,78	45,65	0,00
Sultangazi1	Kentsel Endüstriyel	49,16	33,27	38,97	54,47
Sultangazi2	Trafik	48,06	0,00	0,00	0,00
Sultangazi3	Kentsel Endüstriyel	42,46	0,00	0,00	0,00

5.1.2. Meteoroloji gözlem verileri

2019 ile 2021 yılları arasındaki aylık ortalama meteoroloji gözlem (MG) istasyonları verileri, MGM'den temin edilmiştir. Çizelge 5.5'te, bu istasyonların adları ve koordinatlarıyla birlikte verilmiştir. İstanbul Avrupa Yakası'nda bulunan MG istasyonlarının aylık ve yıllık verileri, sıcaklık, yağış ve bağıl nem parametreleri açısından incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda, bazı MG istasyonlarının tutarsız veriler sunduğu tespit edilmiştir. Bu verilerin büyük bir kısmı, yakın istasyonlardan alınan değerlerle örtüşmemektedir. Bu nedenle, çalışma alanının 20 km yarıçapı içerisinde yer alan ve sürekli veri alabilen istasyonlar analize dahil edilmiştir. Yapılan analiz sonucunda, yıllık ortalama bağıl nem miktarının söz konusu yıllar için %66 ile %84 arasında değişim gösterdiği; yıllık ortalama sıcaklık değerlerinin ise 14°C ile 17°C arasında kaldığı belirlenmiştir. Lokasyona göre değişen ve 430 mm ila 930 mm arasında değişen yıllık ortalama yağış değerleri, MG istasyonları arasında büyük farklılıklar göstermektedir [168]. Seçilen MG istasyonlarının verileri için sıcaklık, yağış ve bağıl nem değerleri, 2019 yılına ait olarak Çizelge 5.6'da 2020 yılına ait olarak Çizelge 5.7'de ve 2021 yılına ait olarak Çizelge 5.8'de verilmektedir.

Çizelge 5.5. 20 km yarıçap mesafesinin içinde yer alan MG istasyonları

MG İstasyon Adı	MG İstasyon Numarası	Enlem	Boylam
Eyüpsultan	18101	28,9242	41,1028
Fatih / İstanbul Deniz Bilimleri Enstitüsü	17063	28,9601	41,0155
Fatih/Kumkapı Fener	17454	28,9547	41,0042
Florya	17636	28,7865	40,9758
Güngören/Davutpaşa Marmara	17814	28,8853	41,0266
İstanbul Atatürk Havalimanı	17060	28,8208	40,9819
Kâğıthane Akom	20016	28,9620	41,0854
Olimpiyat Akom	20022	28,7662	41,0849
Sarıyer	17061	29,0502	41,1464
Sarıyer/İstanbul Teknik Üniversitesi Maslak Yerleşkesi	18980	29,0251	41,0999
Sarıyer/Yavuz Sultan Selim Köprüsü	19365	29,1049	41,2099
Şişli	18401	28,9683	41,0547

Çizelge 5.6. 2019 yılına ait yıllık ortalama sıcaklık, yağış ve bağıl nem verileri

MG İstasyon Adı	MG İstasyon Numarası	Ortalama Sıcaklık (°C)	Ortalama Yağış (mm/yıl)	Ortalama Bağıl Nem (%)
Eyüpsultan	18101	15,50	658,10	81,20
Fatih / İstanbul Deniz Bilimleri Enstitüsü	17063	16,50	665,20	66,80
Fatih/Kumkapı Fener	17454	16,30	–	72,90
Florya	17636	16,40	456,60	71,50
Güngören/Davutpaşa Marmara	17814	16,20	434,40	71,90
İstanbul Atatürk Havalimanı	17060	16,80	–	69,40
Kâğıthane Akom	20016	15,30	–	73,20
Olimpiyat Akom	20022	14,20	–	82,60
Sarıyer	17061	15,60	778,40	77,00
Sarıyer/İstanbul Teknik Üniversitesi Maslak Yerleşkesi	18980	16,20	754,70	74,80
Sarıyer/Yavuz Sultan Selim Köprüsü	19365	15,70	721,80	78,90
Şişli	18401	16,60	629,60	72,60

Çizelge 5.7. 2020 yılına ait yıllık ortalama sıcaklık, yağış ve bağıl nem verileri

MG İstasyon Adı	MG İstasyon Numarası	Ortalama Sıcaklık (°C)	Ortalama Yağış (mm/yıl)	Ortalama Bağıl Nem (%)
Eyüpsultan	18101	15,30	764,80	80,90
Fatih / İstanbul Deniz Bilimleri Enstitüsü	17063	16,60	547,20	66,20
Fatih/Kumkapı Fener	17454	16,20	–	73,60
Florya	17636	16,20	513,20	73,90
Güngören/Davutpaşa Marmara	17814	16,50	630,00	71,60
İstanbul Atatürk Havalimanı	17060	16,30	–	70,70
Kâğıthane Akom	20016	–	–	–
Olimpiyat Akom	20022	–	–	–
Sarıyer	17061	15,70	604,60	80,00
Sarıyer/İstanbul Teknik Üniversitesi Maslak Yerleşkesi	18980	15,80	720,10	73,70
Sarıyer/Yavuz Sultan Selim Köprüsü	19365	15,50	323,00	82,90
Şişli	18401	16,50	621,8	76,40

Çizelge 5.8. 2021 yılına ait yıllık ortalama sıcaklık, yağış ve bağıl nem verileri

MG İstasyon Adı	MG İstasyon Numarası	Ortalama Sıcaklık (°C)	Ortalama Yağış (mm/yıl)	Ortalama Bağıl Nem (%)
Eyüpsultan	18101	15,00	832,50	80,70
Fatih / İstanbul Deniz Bilimleri Enstitüsü	17063	15,90	818,80	67,40
Fatih/Kumkapı Fener	17454	16,30	–	74,10
Florya	17636	15,60	610,60	76,40
Güngören/Davutpaşa Marmara	17814	15,80	622,20	70,50
İstanbul Atatürk Havalimanı	17060	15,70	–	71,90
Kâğıthane Akom	20016	–	–	–
Olimpiyat Akom	20022	–	–	–
Sarıyer	17061	15,00	837,00	82,90
Sarıyer/İstanbul Teknik Üniversitesi Maslak Yerleşkesi	18980	15,50	879,30	73,40
Sarıyer/Yavuz Sultan Selim Köprüsü	19365	15,00	804,70	90,60
Şişli	18401	16,00	926,70	76,70

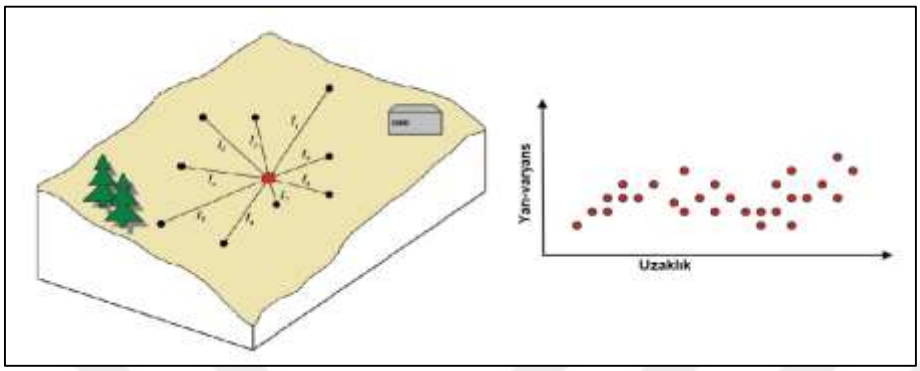
5.2. Ordinary Kriging Analizi

5.2.1. Ordinary kriging yöntemi

Kriging enterpolasyon yöntemi, bilinen veri noktaları arasındaki mesafeyi ve değişkenlik derecesini göz önünde bulundurarak, hesaplanması istenen noktasal değerleri tahmin etmek için kullanılan ve Coğrafi Bilgi Sistemi uygulamalarıyla yapılan çalışmalarda yaygın olarak tercih edilen bir jeoistatistik enterpolasyon yöntemidir [170–172]. Kriging yöntemi, örnekleme noktaları arasındaki mesafe ve yönün, örneklenen yüzeydeki varyasyonu açıklayabilecek mekânsal bir korelasyonu yansıttığını varsaymaktadır. Örneklenen alan içerisinde kalan noktalarının çıktılarını değerlendirerek bir fonksiyon oluşturur ve belirli bir yarıçap içerisindeki tüm noktalar için bir çıktı üretmektedir. Tahmin edilen değerler ağırlıklı ortalama tekniği kullanılarak hesaplanmaktadır. Alınacak olan çalışma yarıçapı sabit olabilmekte veya analizi gerçekleştirilen kullanıcı tarafından tanımlanabilmektedir [171,173].

Ordinary Kriging yönteminin uygulanmasında, öncelikle dağınık ve farklı koordinatlara sahip, aynı parametrelerde ölçüm yapılmış ya da yapılamamış karmaşık verilerden oluşan bir veri seti oluşturulmaktadır. Bu veri setlerinin analizi dağılım grafiği oluşturularak incelenir, veri setinde aykırılık durum teşkil eden veriler ayıklanır. Veri iyileştirilmesi yapıldıktan sonra veri setinde olan noktaların dağılımına bakılır. Seçilen analiz alanı için en

uygun alan seçilir ve ardından enterpolasyon yapılır. Seçilen analiz alanı için belirlenen her örnekleme alanına bir değer atanır [4,174]. Bu süreçte Eş 5.1'de gösterilen ağırlık değerleri hesaplamada kritik önem taşımaktadır.



Şekil 5.4. Ordinary Kriging enterpolasyon yöntemi ve yarı variogram grafiği [170,173]

Ordinary Kriging yönteminin hesaplanmasında kullanılan denklem Eş 5.1'de verilmektedir. $\hat{Z}(x)$ noktası Ordinary Kriging ile hesaplanması planlanan noktayı, $z(x_i)$ bilinen noktayı, λ_i ağırlık değerini belirtmektedir. n değeri ise veri küme setinde bulunan nokta sayısını ifade etmektedir. Bulunan ağırlık değerlerinin, tahmin hatalarının ortalamasının sıfır ve varyansı en küçük olacak şekilde seçmektedir [175]. Bu ağırlıkların tahmini hata varyansı Eş. 5.2'de tanımlanmaktadır. $\sigma^2(x_0)$ tahmini hata varyansıdır. E matematiksel beklentiyi ifade etmektedir. x_0 ise ilk bilinen noktayı göstermektedir [174,176–178].

$$\hat{Z}(x) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i z(x_i) \tag{5.1}$$

$$\sigma^2(x_0) = E\left[\left(\hat{Z}(x_0) - Z(x_0)\right)^2\right] \tag{5.2}$$

Kullanılan temel verilerin birbirine olan mekânsal uzaklıklarına bakılarak gerçekleştirilen enterpolasyon sonucunda determinasyon katsayısı (R^2) ve kök ortalama kare hatası (RMSE) hesaplanmaktadır. R^2 değerleri yapılan analizin doğruluğunu ölçmek için kullanılırken, RMSE değerinin sıfıra yaklaşması tahmini değerlerin gerçek değerlere yakın olduğu göstermektedir [174,177–179]. R^2 ve RMSE hesaplamaları, Eş. 5.3 ve Eş. 5.4'te gösterilmektedir.

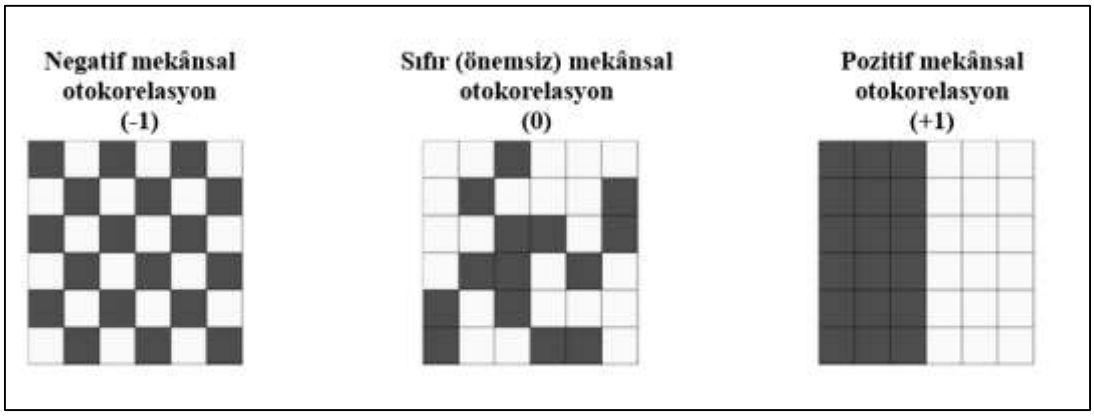
$$R^2 = \sum_{i=1}^{n} (\mathrm{Z}(x_i) - \hat{\mathrm{Z}}(x_i))^2 \quad (5.3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (\mathrm{Z}(x_i) - \hat{\mathrm{Z}}(x_i))^2} \quad (5.4)$$

5.2.2. Moran I testi

Değişkenler arasındaki ilişkileri göstermek için kullanılan korelasyonun aksine, mekânsal otokorelasyon, seçilen analizdeki değişkenlerin coğrafi olarak işaretlenmiş bir mesafede kendi içlerindeki korelasyonu göstermektedir [180]. Örneğin, bir dizi N içeren n coğrafi birimler, her yerleşim biriminde gözlemlenen bir değişken ile n birimlerinden seçilen tüm n (n-1) çiftleri için tanımlanan bir coğrafi yakınlık ölçüsü arasındaki ilişkiyi ifade etmektedir [181]. Coğrafyanın birinci yasası göz önünde bulundurulursa, mekânsal otokorelasyonda her nokta birbiri ile ilişkilidir, fakat birbirine yakın noktalar uzaktaki noktalara göre daha fazla ilişkilidir [182]. Bu noktaları birbiri olan ilişkileri yani komşuluk göstergeleri Moran I istatistiği kullanılarak test edilebilmektedir. Moran I testi, mekânsal otokorelasyonda kullanılan en yaygın test olarak bilinmektedir [183]. Smart-Map eklentisinde de Ordinary Kriging analiz sürecinde Moran I testi kullanılmaktadır [184].

Moran I testinde, noktaların belirlenen mekânsal alan içerisindeki dağılım ve ilişkilendirilmesi üç farklı şekilde tanımlanmaktadır (Şekil 5.5). Pozitif otokorelasyon, seçilen noktaların belirli bir yerde kümelendiğini ve benzer özellikler gösterdiğini göstermektedir. Pozitif bir (+1) sayısı gösterilmektedir. Negatif otokorelasyon, seçilen noktaların birbirine yakın olduğunu ancak benzer özellik taşınmadığını belirtir ve negatif bir (-1) sayısı ile ifade edilir. Sıfır ya da önemsiz otokorelasyon ise noktalar ve mekan arasında ilişki ya da etki olmadığını gösterir ve sıfır (0) sayısı ile ifade edilmektedir [184–187].



Şekil 5.5. Moran I istatistiğinde kullanılan otokorelasyon tanımları [186,188]

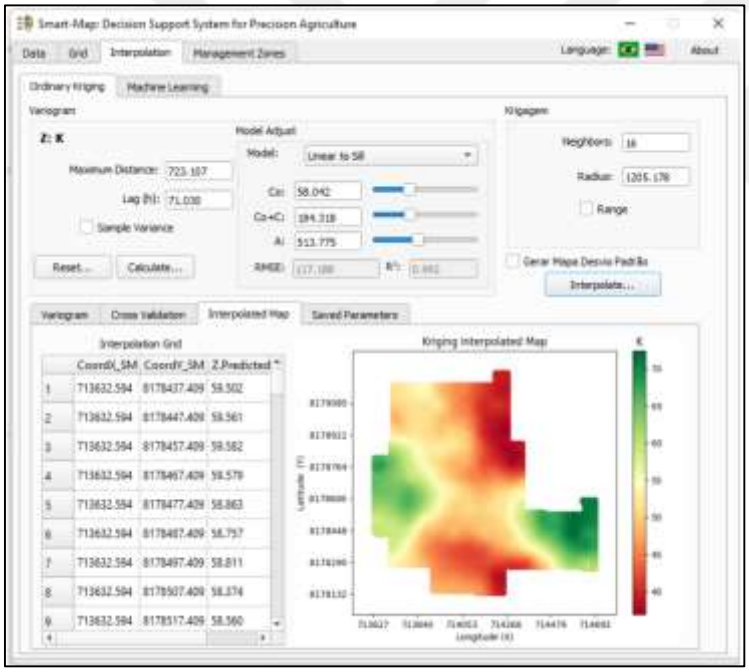
5.2.3. Smart-Map eklentisi

Seçilen alan için belirlenen hava kirliliği ve meteoroloji parametrelerinin tahmini değerlerinin hesaplanabilmesi için Ordinary Kriging yöntemi, QGIS yazılımının 3.28 sürümünde yer alan Smart-Map eklentisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir [184,189]. Smart-Map eklentisi, Brezilya'da bulunan Endüstriyel Mülkiyet Ulusal Enstitüsü tarafından, öncelikle tarım odaklı araştırmalarda kullanılmak üzere 2022 yılında geliştirilmiştir. Bu eklenti, açık kaynaklı bir yazılım olup, programlama bilgisi gerektirmeden dijital haritalama işlemlerinde Ordinary Kriging ve makine öğrenimi tekniklerinin kullanımını kolaylaştıran bir hesaplama aracıdır. Makine öğrenimi tekniğinde Destek Vektör Makine yöntemi kullanarak enterpolasyon gerçekleştirmektedir [184]. Resim 5.2 ve Resim 5.3'te Smart-Map eklentisinin arayüzü gösterilmektedir.

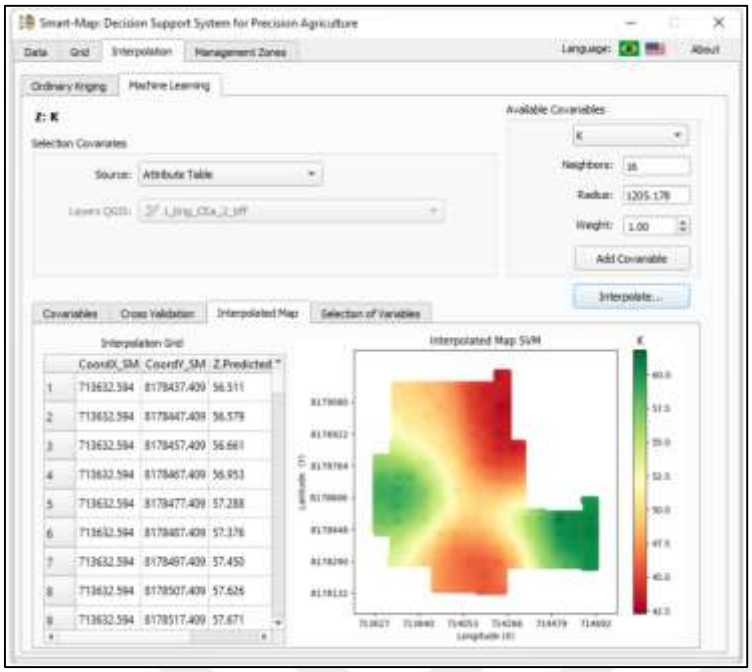
Smart-Map eklentisi, iki boyutlu Ordinary Kriging tekniğini destekleyen PyK-rige adlı açık kaynaklı bir Python kütüphanesi üzerine inşa edilmiştir. Arama yarıçapı, komşu nokta sayısı, yarı variogram türleri ve diğer faktörler (yapısal uzaklık, eşik değeri, külçe etkisi ve regresyon analizi) dahil olmak üzere Ordinary Kriging yönteminin önemli parametrelerini kullanıcı tarafından seçmeye izin vermektedir [190]. Bu eklentinin önemli bir özelliği, R değerlerinin en iyi aralıkta olduğu arama yarıçapını, veri noktaları arasındaki optimum mesafeyi ve yarı variogram türünü otomatik olarak göstermesidir [184,190]. 2022 yılında piyasaya sürülmesinden bu yana arazi [191], toprak çalışmaları [192], su kalitesi [193,194] ve hava kirliliği [195] modelleri oluşturarak haritalama ile ilgili çok sayıda makalede kullanılmıştır. Özellikle, gürültü kirliliğinin modellenmesi üzerine yapılan çalışmada Smart-Map ile Ordinary Kriging yönteminin QGIS yazılımında yer alan dijital haritalamada

kullanılan ters mesafe ağırlıklı enterpolasyon yönteminden daha iyi performans gösterdiği belirtilmektedir [190].

Ordinary Kriging'in hesaplama yöntemleri Smart-Map eklentisi içerisine yerleştirilmiştir [184,196]. Algoritma bulanık k-ortalamalar yöntemine dayanmakta ve yönetim bölgesi haritaları üretmektedir [197]. Literatürde sıklıkla kullanılan bulanık performans göstergeleri ve normalleştirilmiş sınıflandırma entropisi göstergeleri, Smart-Map tarafından optimum sınıf sayısını belirlemek için kullanılmaktadır [198,199]. Kümeleme işlemlerini gerçekleştirmek için Scikit-Fuzzy Python kütüphanesinin fuzzy k-mean kümeleme yöntemi kullanılmaktadır [184]. Çalışan tüm algoritmalar ve yöntemler eklentinin arka planında çalışmaktadır ve kullanıcı müdahalesi gerekmemektedir.



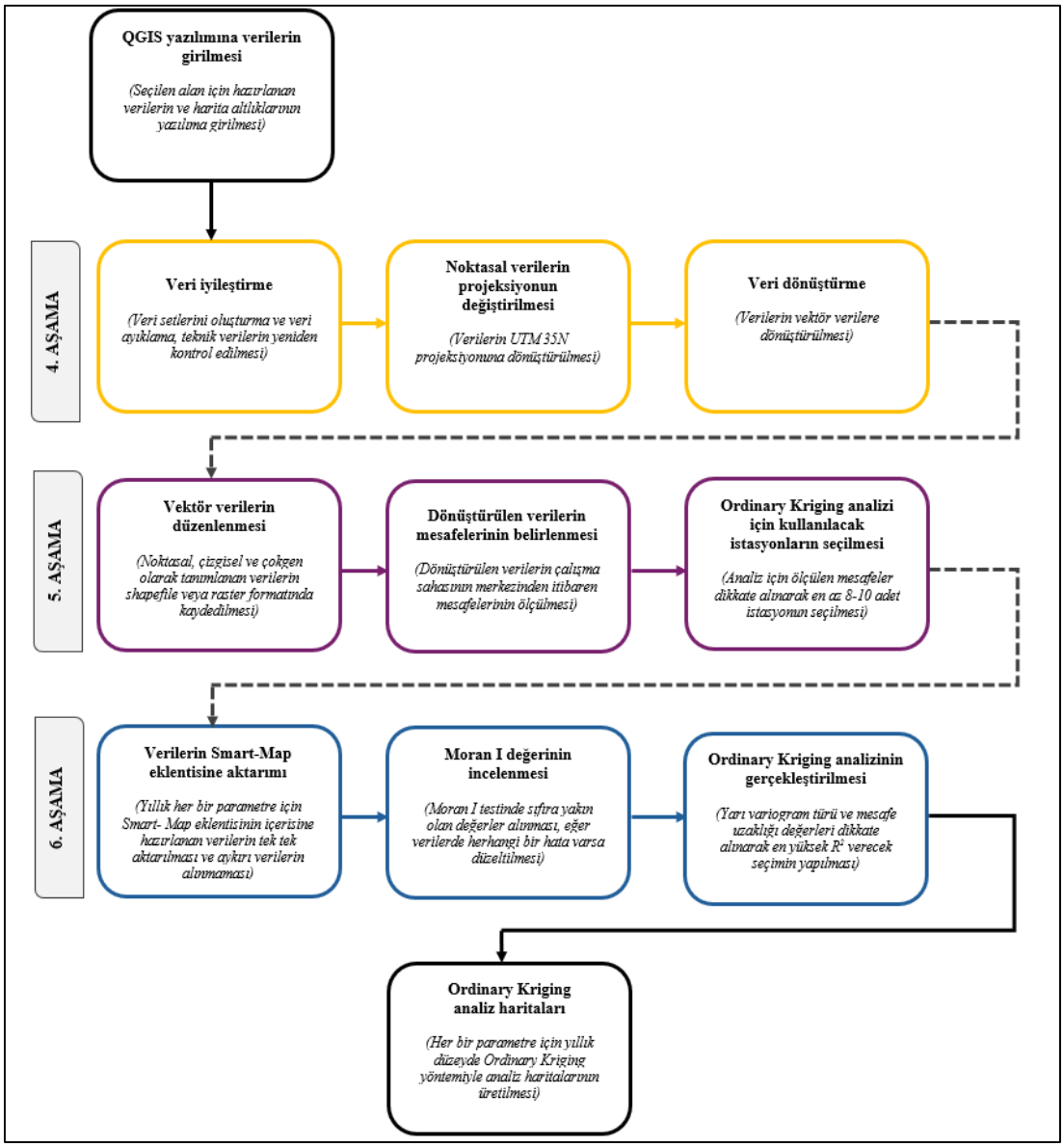
Resim 5.3. Ordinary Kriging yöntemini uygulanırken kullanılan arayüzü [184]



Resim 5.4. Destek Vektör Makine yöntemini uygulanırken kullanılan arayüzü [184]

5.2.4. Ordinary Kriging analizinin yapılması

Takip edilen analiz süreci aşamaları Şekil 5.6'da gösterilmektedir. Hava kirliliği haritalarının yarı variogram türü çoğunlukla küresel ve Gauss olarak seçilmiştir. R^2 değeri 0,8'in üzerinde kalmaktadır. Meteorolojik haritaların yarı variogram türü ise küresel, doğrusal ve Gauss olarak seçilmiştir. Bu haritaların R^2 değeri 0,7 ile 1,0 arasında kalmaktadır. Moran I değeri ise bu çalışmada çoğu parametre için 0,5 ile 0,7 arasında kalırken, sınırlı veriler nedeniyle yer seviyesi ozon için bu değer 0,4 ile 0,5 arasında kalmaktadır.



Şekil 5.6. Ordinary Kriging analiz sürecine ilişkin akış şeması

5.3. Doz-Etki Fonksiyonları

Meteorolojik koşullar ve hava kirliliğinin sinerjik etkileşim sonucunda kalkerli malzemelerde yüzey aşınmasına ve korozyona meydana gelmektedir [144]. Ana kirleticiler olan SO_2, NO_2 ve O_3, atmosferde bulunan su ile reaksiyona girerek güçlü asitler oluşturur. Bu da karbonat malzemelerin kimyasal olarak çözünmesine ve özellikle portland kireçtaşı ve beyaz mansfield dolomitik kumtaşı malzemelerinde yüzey aşınımına neden olmaktadır [13,138,200]. Öte yandan, korozyon süreci temelde elektrokimyasal bir süreç olup, elektronların çeşitli arayüzler boyunca karmaşık hareketini içermektedir. Korozyon bozulma hızı, korozyon ürününün esasen katmanları pasifleştirmesi veya inhibe etmesinin sonucunda

gerçekleşmektedir [12,139]. Kültürel miras varlıklarının yapı inşasında kullanılan metaller ve demir alaşımları korozyona maruz kalmaktadırlar [201].

Doz-etki fonksiyonları, hava kirliliği ile meteorolojik koşulların sinerjisini hesaba katarak kümülatif etkiyi seçilen her bir malzeme için ilgili korozyon derecesi ve/veya yüzey aşınma seviyesini hesaplamak için kullanılmaktadır. Bu fonksiyonlar, uzun yıllar boyunca farklı kültürel miras varlıklarından alınan örneklerin laboratuvar ortamında incelenmesini yürüten ICP-Materyaller Çoklu Kirletici Maruz Programından elde edilen veriler kullanılarak MULTI-ASSESS projesinde geliştirilmiştir [13,21,22]. Detaylı gelişim süreci ICP-Malzemeler programı ve Birleşmiş Milletler Avrupa Ekonomik Komisyonu Uzun Menzilli Sınır Ötesi Hava Kirliliği Sözleşmesi Organizasyon Çalışma Grubu iş birliği ile yayınlanan malzeme korozyonu ve yüzey gerileme analizleri kılavuzunda belirtilmektedir [130].

Portland kireçtaşı ve beyaz mansfield dolomitik kumtaşının yüzey aşınma oranları ile dökme bronz, karbon çeliği ve çinkonun korozyon derinlikleri R (µm) olarak ifade edilmektedir. Bakırın korozyon derinliği kütle kaybı (ML) g/m^2 olarak ölçülmektedir. Diğer yandan, yıllık ortalama bağıl nem (Rh) yüzde (%) olarak alınırken, yıllık ortalama yağış miktarı ($Yağış$) mm/yıl olarak hesaba katılmaktadır. Yıllık ortalama sıcaklık (T) santigrat (°C) olarak alınmıştır. Rh_{60} değeri doz-etki fonksiyonlarında sınır olarak konulan 60% bağıl nem oranı dikkate alınarak hesaplanmaktadır. Eş. 5.5'te Rh_{60} değerinin hesaplanması ilişkin kural verilmektedir [130].

$$Rh > 60\% \ ise \ Rh_{60} = Rh - 60 \text{ aksi takdirde } Rh_{60} = 0 \tag{5.5}$$

Malzemelerin yüzey aşınma ve korozyon haritalarını oluşturmak için hava kirliliği ve meteoroloji gözlem verilerin yanı sıra pH değerleri ve tahmini HNO_3 değerleri de kullanılmaktadır. Çatalca Meteoroloji Radar istasyonu yıllık ortalama yağış pH değerlerini ölçmektedir [169]. Bu değerler Eş. 5.6 kullanılarak $[H^+]$ (mg/L) değerine dönüştürülmüştür. Çizelge 5.9'da pH ve $[H^+]$ değerleri verilmektedir.

$$pH = -\log[H^+] \tag{5.6}$$

Çizelge 5.9. pH ve [H^+] (mg/L) değerleri

Yıl	Parametre	Değer
2019	pH değeri	5,00
2020	pH değeri	4,87
2021	pH değeri	4,86
2019	[H^+]	0,010
2020	[H^+]	0,013
2021	[H^+]	0,014

Eş. 5.7'de, $[HNO_3]$ yıllık nitrik asit konsantrasyonunu, $[NO_2]$ yıllık ortalama azot dioksit konsantrasyonunu gösterirken $[O_3]$ ise yıllık ozon konsantrasyonunu göstermektedir. $[SO_2]$ yıllık sülfür dioksit konsantrasyonu iken PM_{10} çapı 10 mikron veya daha küçük olan partikül madde konsantrasyonunu belirtmektedir. Bu parametrelerin değerleri µg/m³ olarak alınmaktadır.

$$[HNO_3] = 516\ e^{-3400/(T+273)}\ ([NO_2][O_3]Rh)^{0,5} \quad (5.7)$$

Portland kireçtaşının yıllık yüzey aşınım oranı Eş. 5.8'de beyaz mansfield dolomitik kumtaşının yıllık yüzey aşınım oranı ise Eş. 5.9'da verilmektedir.

Portland kireçtaşı:

$$R = 4{,}0 + 0{,}0059\ [SO_2]Rh_{60} + 0{,}054\ Yağış[H^+] + \ 0{,}078[HNO_3]Rh_{60}$$
$$+0{,}0258PM_{10} \quad (5.8)$$

Beyaz Mansfield Dolomitik kumtaşı:

$$\boldsymbol{R} = 2{,}0\ [SO_2]^{0,52}e^{f(T)} + 0{,}028\ Yağış[H^+] \quad (5.9)$$

$T \leq 10$°C $ise\ \ f(T) = 0$ aksi takdirde $f(T) = \ -0{,}013\ (T - 10)$

Metal alaşımı olan dökme bronz ve karbon çeliğine ait doz-etki fonksiyonları sırasıyla Eş. 5.10 ve Eş. 5.11'de verilmektedir. Metal grubunda yer alan çinko'ya ait doz-etki fonksiyonu ise Eş. 5.12'de gösterilmektedir. Yine metal grubunda yer alan Bakır'ın korozyon derinliği kütle kaybı olarak Eş. 5.13 uygulanarak hesaplanmaktadır.

Dökme Bronz:

$$R = 0{,}15 + 0{,}000985\,[SO_2]Rh_{60}e^{f(T)} + 0{,}00465\,Yağış[H^+] + 0{,}00432PM_{10} \quad (5.10)$$

$T < 10°\text{C}\ \ ise\ \ f(T) = 0{,}060(T - 11)$ aksi takdirde $f(T) = -0{,}067\,(T - 11)$

Karbon Çelik:

$$R = 6{,}5 + 0{,}178\,[SO_2]^{0{,}6}Rh_{60}\,e^{f(T)} + 0{,}166\,Yağış[H^+] + 0{,}076PM_{10} \quad (5.11)$$

$T < 10°\text{C}\ \ ise\ \ f(T) = 0{,}15(T - 10)$ aksi takdirde $f(T) = -0{,}054\,(T - 10)$

Çinko:

$$R = 0{,}49 + 0{,}066\,[SO_2]^{0{,}22}e^{0{,}018Rh + f(T)} + 0{,}0057\,Yağış[H^+] + 0{,}192[HNO_3] \quad (5.12)$$

$T < 10°\text{C}\ \ ise\ \ f(T) = 0{,}062(T - 10)$ aksi takdirde $f(T) = -0{,}021\,(T - 10)$

Bakır:

$$ML = 4{,}2 + 0{,}00201\,[SO_2]\,0{,}4\,[O_3]\ \ Rh_{60}\,e^{f(T)} + 0{,}0878\,Yağış[H^+] \quad (5.13)$$

$T < 10°\text{C}\ \ ise\ \ f(T) = 0{,}083(T - 10)$ aksi takdirde $f(T) = -0{,}032\,(T - 10)$

Tolere edilebilir korozyon ve yüzey aşınma oranları (R_{tol}), malzeme türlerinin arka plan bozulma seviyeleri dikkate alınarak ifade edilmektedir. ICP-Materyaller programı, yıllar boyunca laboratuvar ortamında gözlemlenerek çıkarılan korozyon ve yüzey aşınma oranlarının belirli bir sabit (n_b) ile çarpılan arka plan korozyon ve yüzey aşınma oranlarını (R_b) sağlamaktadır. Bunların basitleştirilmiş ilişkisi Eş. 5.14'te verilmektedir.

$$R_{tol} = n_b R_b \quad (5.14)$$

Malzemelerin bozulma seviyelerinin üst eşikleri tolere edilebilir oranlar olarak adlandırılmaktadır. Bu eşiklerin aşılması, malzemelerin ciddi korozyon saldırısı veya yüzeysel aşınma altında olduğunu ve yüksek hava kirliliğinin önemli ölçüde zarar görebileceğini gösterir. 2020 ve 2050 yılları için tolere edilebilir malzeme korozyonu ve yüzey aşınma oranlarını vermektedir. Bakırın korozyon derinliği (R, µm), malzeme yoğunluğunun kütle kaybına (ML, g/m^2) bölünmesiyle hesaplanır. ML açısından, bakır için tolere edilebilir bozulma oranları 2020 için 7,0 g/m^2 ve 2050 için 5,6 g/m^2'dir. Çizelge 5.10'da bu değerler sunulmaktadır.

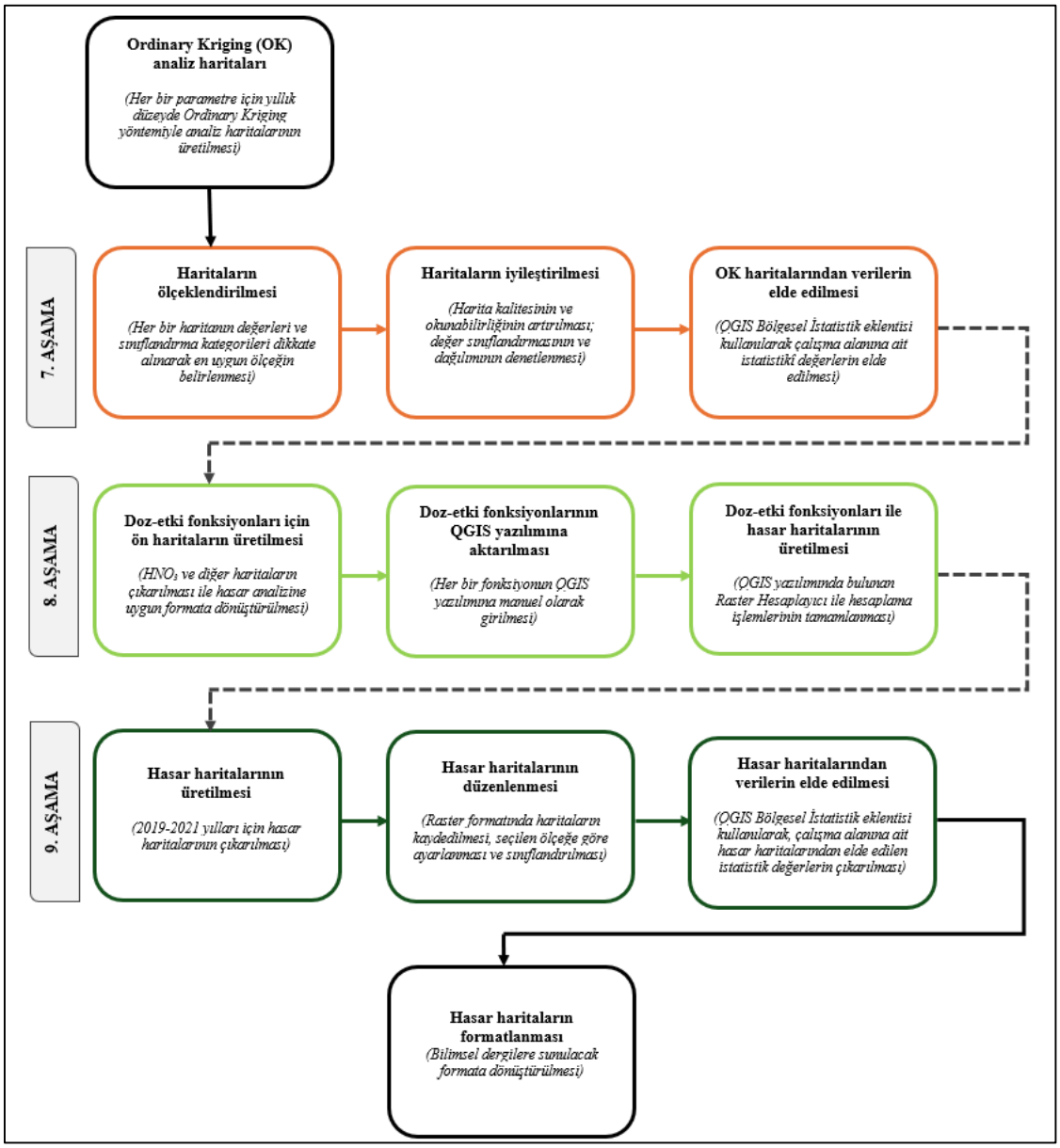
Çizelge 5.10. Tolere edilebilir korozyon ve yüzey aşınım sınırları (µm) [8,21,23,130]

Materyal Türü	Birim	Arka plan (n_b=1)	Yıl 2050 (n_b= 2,0)	2020 Yılı (n_b = 2,5)
Portland kireçtaşı	µm	3,20	6,40	8,00
Beyaz mansfield dolomitik kumtaşı	µm	2,80	5,50	7,00
Dökme Bronz	µm	0,25	0,50	0,60
Karbon Çelik	µm	8,50	16,00	20,00
Çinko	µm	0,45	0,90	1,10
Bakır	g/m^2	0,32	0,64	0,80

5.3.1. Yüzey aşınımı ve korozyon derinlik miktarlarının hesaplanması

Bu çalışma için, Smart-Map eklentisinde 500'e 500 m'lik bir grid hücre boyutu kullanılırken, maksimum arama yarıçapı, en az 10 noktayı kapsayan vaka çalışması alanının merkez noktasından 20 km olarak ayarlanmıştır. Ordinary Kriging yöntemini kullanan Smart-Map eklentisi kullanılarak hava kirliliği ve meteoroloji haritaları türetildikten sonra, doz-etki fonksiyonları QGIS yazılımdaki raster hesaplama özelliğine girilerek malzeme bozulma haritaları oluşturulmuştur. İstanbul Tarihi Yarımada'nın dört alt bölgesi için ortalama, standart sapma, maksimum ve minimum değerleri elde etmek için QGIS yazılımdaki bölge istatistikleri eklentisi kullanılmıştır. Şekil 5.7'de yüzey aşınımı ve korozyon derinlik miktarlarının hesaplanma sürecine ilişkin akış şeması verilmektedir.

Tüm haritalama prosedürlerinin, ICP-Malzemeler programı ve Birleşmiş Milletler Avrupa Ekonomik Komisyonu Uzun Menzilli Sınır Ötesi Hava Kirliliği Sözleşmesi Organizasyon Çalışma Grubu iş birliği ile yayınlanan malzeme korozyonu ve yüzey gerileme analizleri kılavuzunda belirtilen son kriterlere göre yapılmıştır [130].



Şekil 5.7. Hasar haritalarının hesaplanma sürecine ilişkin yöntem akış şeması

6. ANALİZ SONUÇLARI

6.1. Hava Kirliliği Haritaları

2019-2021 yılları arasındaki dönemde PM_{10} ve SO_2 konsantrasyonlarındaki değişiklikler göstermektedir. 2019'dan 2020'ye kadar hava kirleticilerin konsantrasyonlarında belirgin bir düşüş eğilimi vardır, ancak bu eğilim çoğu alt bölgede 2020'den sonra hafif pozitif büyümeye dönüşmüştür. Eğilimler bu bölümde yer alan hava kirliliği haritalarından görünebilir. Hava kirliliği haritalarındaki sıcak renkler daha yüksek konsantrasyonları, soğuk renkler ise daha düşük konsantrasyonları göstermektedir.

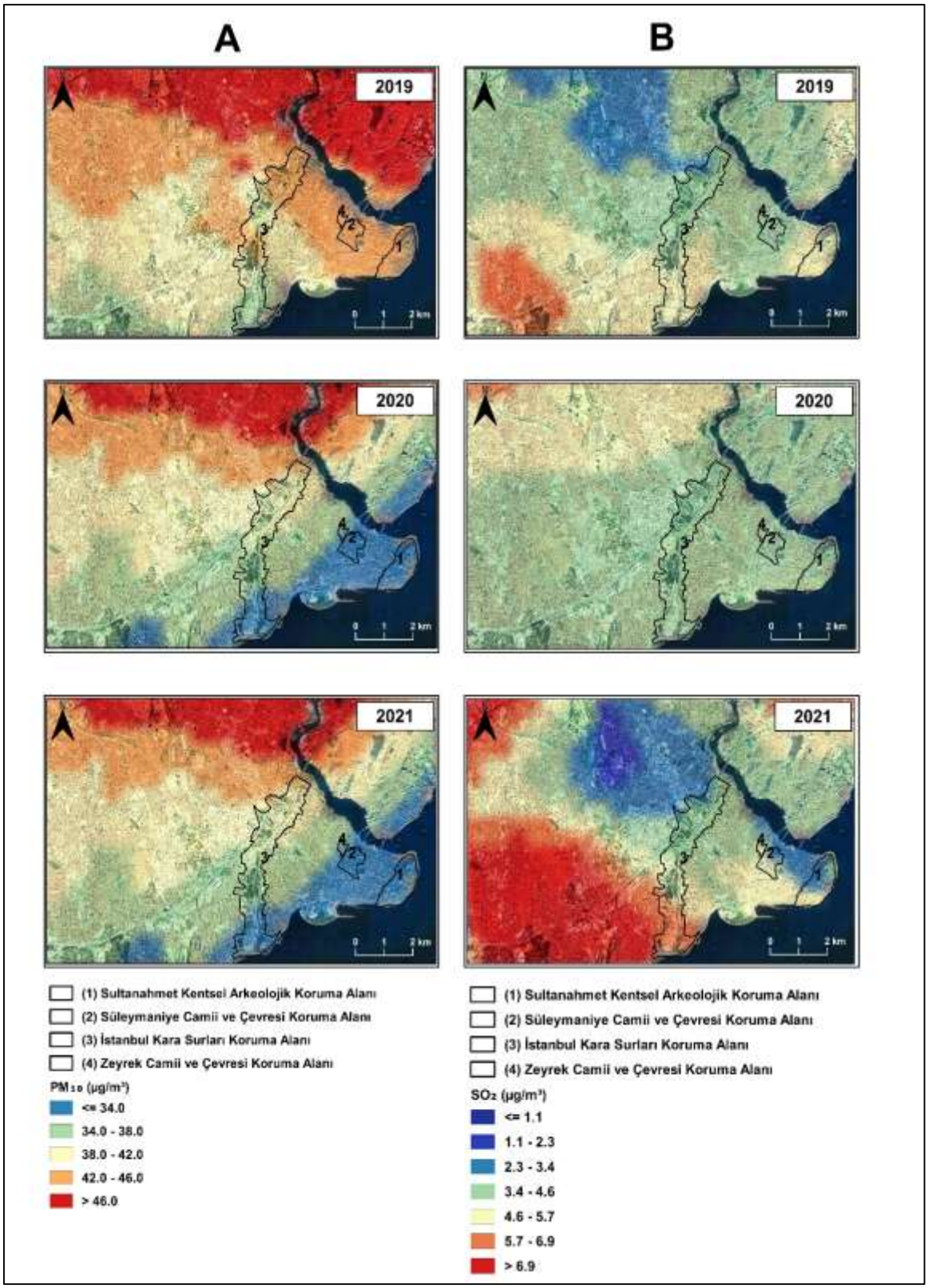
PM_{10} konsantrasyonları, Harita 6.1'in A sütununda görüldüğü üzere İstanbul'un Tarihi Yarımadası'nın üst bölgelerinde 46 $\mu g/m^3$'ü geçmektedir. Bu noktadan aşağıya doğru inildikçe PM_{10} konsantrasyonları fark edilebilir şekilde azalmaktadır. İstanbul Tarihi Yarımadası'ndaki PM_{10} konsantrasyonlarının ortalama değerleri 26,8 ± 0,2 µg ile 44,1 ± 3,0 $\mu g/m^3$ arasında değişmekte olduğu tespit edilmiştir. Alt Bölge-1 ile gösterilen Sultanahmet Kentsel Arkeolojik Koruma Alanı için PM_{10} konsantrasyonunun 2019 yılı için 43,39 ± 0,22 $\mu g/m^3$, 2020 ve 2021 yılları için ise 26,76 ± 0,85 $\mu g/m^3$ olduğu tespit edilmiştir. COVID-19 pandemi kısıtlamaları, PM_{10} seviyelerinde %38'lik bir azalmaya yol açmıştır. İstanbul Tarihi Yarımadası'nın diğer alt bölgeleri için PM_{10} konsantrasyonlarında benzer eğilimler tespit edilmiştir. Alt Bölge-2 (Süleymaniye Camii ve Çevresi Koruma Alanı) için PM_{10} konsantrasyonlarının tahmini değeri 2019'da 43,87 ± 0,17 $\mu g/m^3$ olarak bulunmuştur. 2020 ve 2021 yılları için bu değer 32,64 ± 0,54 $\mu g/m^3$ düşmektedir. Bu da PM_{10} konsantrasyonundaki azalma seviyesinin %26 civarında olduğunu göstermektedir. Alt Bölge-4 (Zeyrek Camii ve Çevresi Koruma Alanı), 2019-2020 yılları arasında %23'lük bir düşüşle benzer bir eğilim izlemektedir. PM_{10} konsantrasyonu 2019-2020 dönemi için 44,13 ± 0,19 $\mu g/m^3$'ten 33,82 ± 1,11 $\mu g/m^3$'e düşmekte olup, 2021 yılında herhangi bir değişiklik göstermemektedir. Öte yandan, PM10 konsantrasyonlarındaki en düşük seviyede iyileşme 2019-2020 yılları arasında %10'luk bir azalma ile Alt Bölge-3 olarak gösterilen İstanbul Kara Surları Koruma Alanı'nda tespit edilmiştir. PM_{10} değerleri 2019 yılı için 41,31 ± 3,0 $\mu g/m^3$ aralığında kalırken, 2020 yılında 37,11 ± 2,92 $\mu g/m^3$'e düşmekte ve 2021 yılında 2020 yılı seviyesinde kalmaktadır. Çizelge 6.1'de detaylı analiz değerleri alt-bölge bazında

verilmektedir. Sütun A, PM_{10}'u gösterirken, sütun B SO_2 ortalama konsantrasyon seviyelerini göstermektedir. Alt bölgeler numaralarıyla gösterilmektedir.

Çizelge 6.1. Dört alt bölge için yıllık ortalama PM_{10} ($\mu g/m^3$) tahmini değerleri

Alt Bölge Adı	Yıl	Ortalama Değer	Standart Sapma	Minimum Değer	Maksimum Değer
Alt Bölge 1: Sultanahmet Kentsel Arkeolojik Alanı	2019	43,39	0,22	43,18	43,79
Alt Bölge 1: Sultanahmet Kentsel Arkeolojik Alanı	2020	26,76	0,85	25,66	27,95
Alt Bölge 1: Sultanahmet Kentsel Arkeolojik Alanı	2021	26,76	0,85	25,66	27,95
Alt Bölge 2: Süleymaniye Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2019	43,87	0,17	43,70	44,03
Alt Bölge 2: Süleymaniye Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2020	32,64	0,54	32,16	33,40
Alt Bölge 2: Süleymaniye Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2021	32,64	0,54	32,16	33,40
Alt Bölge 3: İstanbul Kara Surları Koruma Alanı	2019	41,31	3,00	36,80	45,26
Alt Bölge 3: İstanbul Kara Surları Koruma Alanı	2020	37,11	2,92	32,71	41,98
Alt Bölge 3: İstanbul Kara Surları Koruma Alanı	2021	37,11	2,92	32,71	41,98
Alt Bölge 4: Zeyrek Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2019	44,13	0,19	44,03	44,39
Alt Bölge 4: Zeyrek Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2020	33,82	1,11	33,40	35,70
Alt Bölge 4: Zeyrek Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2021	33,82	1,11	33,40	35,70

Harita 6.1'in B sütununda, SO_2 seviyeleri genellikle Marmara Denizi'ne yakın bölgelerden yukarı bölgelere doğru çıkıldıkça düştüğü görülmektedir. SO_2 değerleri, kültürel alanların konumuna bağlı olarak $4,01 \pm 0,01$ ile $4,85 \pm 1,15$ $\mu g/m^3$ arasında değiştiği tespit edilmiştir. COVID-19 kısıtlamaları kaldırıldığında, belirli alanlarda SO_2 seviyelerinde artış olmaktadır. 2019 ile 2020 yılları arasındaki en büyük fark %14,3'lük düşüşle Alt Bölge-1'de, başka bir deyişle Sultanahmet Kentsel Arkeolojik Koruma Alanı'nda görülmektedir. 2019 yılında $4,78 \pm 0,05$ $\mu g/m^3$ olan ortalama SO_2 değeri, bir yıl sonra $4,10 \pm 0,01$ $\mu g/m^3$'e düşmekte ve daha sonra aynı seviyede kalmaktadır. Alt Bölge-3 olarak adlandırılan İstanbul Kara Surları Koruma Alanı'nda ise 2019 ile 2020 yılları arasında SO_2 konsantrasyonunda %6,7'lik bir düşüşle bu eğilimi takip etmektedir. Ortalama değer 2019 yılında $4,30 \pm 0,54$ $\mu g/m^3$ iken 2020 yılında $4,01 \pm 0,16$ $\mu g/m^3$'e düşmüştür. Ancak, 2021 yılında SO_2 konsantrasyonunun $4,85 \pm 1,15$ $\mu g/m^3$'e yükselmesiyle yaklaşık %21'lik önemli bir artış görülmektedir. Diğer alt bölgelerde SO_2 seviyelerinde küçük farklılıklar tespit edilmiştir. Bu farklılıklar Çizelge 6.2'de verilmektedir.



Harita 6.1. PM_{10} ve SO_2 analiz sonuçları

Alt Bölge-2'de SO_2 tahmini ortalama değerleri 2019 yılı için 4,34 ± 0,05 µg/m^3, 2020 yılı için 4,13 ± 0,05 µg/m^3 ve son olarak 2021 yılı için 4,20 ± 0,71'dır. COVID-19 döneminde

SO_2 seviyeleri %4,7'lik bir düşüş göstermektedir. En az farklılık Alt Bölge-4 olan Zeyrek Camii ve Çevresi Koruma Alanı'nda tespit edilmiştir. COVID-19 döneminde, SO_2 seviyesi 2019 yılında 4,25 ± 0,11 µg/m^3'ten 2020 yılında 4,18 ± 0,05 µg/m^3'e düşmektedir. Azalma seviyesi %1,8 olarak hesaplanmıştır. 2021 yılında ise ortalama SO_2 seviyesi 4,56 ± 0,14 µg/m^3'e yükselmektedir ve bu da SO_2 konsantrasyonunda %9,1'lik önemli bir artışa karşılık gelmektedir.

Çizelge 6.2. Dört alt bölge için yıllık ortalama SO_2 (µg/m^3) tahmini değerleri

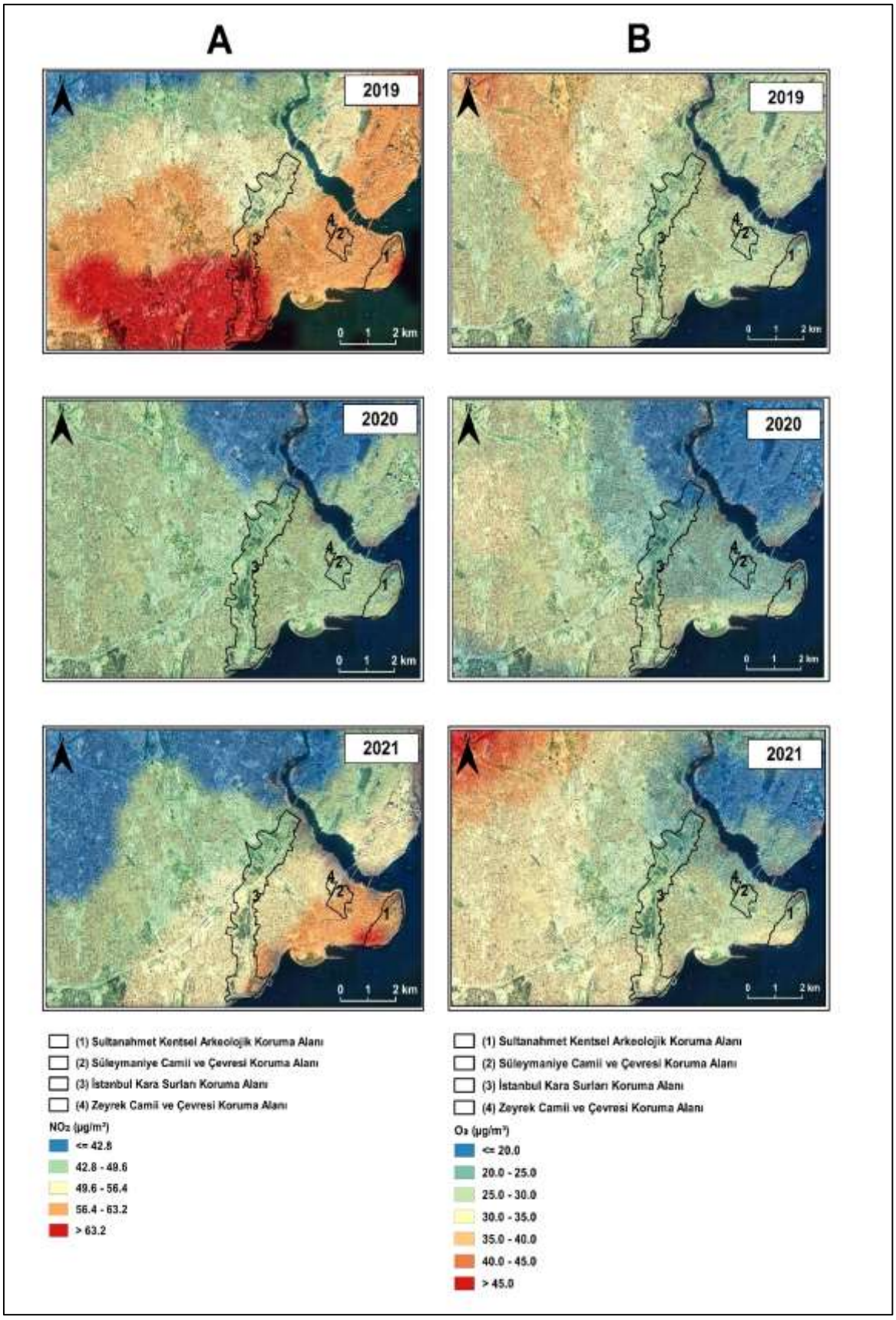
Alt Bölge Adı	Yıl	Ortalama Değer	Standart Sapma	Minimum Değer	Maksimum Değer
Alt Bölge 1: Sultanahmet Kentsel Arkeolojik Alanı	2019	4,78	0,05	4,72	4,83
Alt Bölge 1: Sultanahmet Kentsel Arkeolojik Alanı	2020	4,10	0,01	4,08	4,11
Alt Bölge 1: Sultanahmet Kentsel Arkeolojik Alanı	2021	1,09	0,90	3,32	5,37
Alt Bölge 2: Süleymaniye Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2019	4,34	0,05	4,28	4,39
Alt Bölge 2: Süleymaniye Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2020	4,13	0,05	4,06	4,18
Alt Bölge 2: Süleymaniye Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2021	4,20	0,71	3,21	4,79
Alt Bölge 3: İstanbul Kara Surları Koruma Alanı	2019	4,30	054	3,41	5,05
Alt Bölge 3: İstanbul Kara Surları Koruma Alanı	2020	4,01	0,16	3,77	4,29
Alt Bölge 3: İstanbul Kara Surları Koruma Alanı	2021	4,85	1,15	3,43	6,74
Alt Bölge 4: Zeyrek Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2019	4,25	0,11	4,08	4,28
Alt Bölge 4: Zeyrek Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2020	4,18	0,05	4,08	4,21
Alt Bölge 4: Zeyrek Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2021	4,56	0,14	4,31	4,61

Harita 6.2'de, NO_2 ve O_3 seviyelerinin, çalışma dönemi olan 2019 ile 2021 yılları arasındaki değişimi gösterilmektedir. Harita 6.2'nin A sütununda görüldüğü üzere NO_2 değerleri, alt bölgelerden üst bölgelere doğru gidildiğinde önemli bir azalma göstermektedir. Bunu örnek çalışma alanın tümü için detaylandıracak olursak, tahmini değerler 44,25 ± 0,05 µg/m^3 ile 62,60 ± 5,32 µg/m^3 aralığında kalmaktadır. Alt Bölge-1, %28,6'lık bir düşüşle 2019 ve 2020 yılları arasında 62,60 ± 0,28 µg/m^3'ten 44,68 ± 0,05 µg/m^3'e düşerek en büyük düşüşü göstermektedir. Takiben Alt Bölge-3, 60,86 ± 5,32 µg'dan 44,60 ± 0,56 µg/m^3'e düşerek %26,7'lik bir azalma göstermektedir.

Diğer bir taraftan 59,70 ± 0,37 µg/m^3'ten 44,37 ± 0,08 µg/m^3'e düşen Alt Bölge-2 %25,8'lik bir düşüş sergilemektedir. Bu alt bölgede NO_2 konsantrasyonu 58,67 ± 0,54 µg/m^3'ten 44,25 ± 0,12 µg/m^3'e düşmektedir. En az düşüş %24,6'lık bir oranla Alt Bölge-4'te görülmektedir. Alt bölgelerin NO_2 konsantrasyonları, COVID-19 kısıtlamalarının bir sonucu olarak 44-45 µg/m^3 civarında seyretmektedir. Ancak 2021 yılı konsantrasyonları, bu kısıtlamalar büyük ölçüde kaldırıldığı için önemli ölçüde iyileşmektedir. NO_2 konsantrasyonu Alt Bölge-1'de %39,9 artarak 62,50 ± 1,13 µg/m^3'e yükselmiştir. Bu, Alt Bölge-2 için %28,3'lük bir artışla 56,91 ± 0,86 µg/m^3 olarak tahmin edilmektedir. Alt Bölge-4 NO_2 konsantrasyonlarında %24,1'lik bir artış göstererek 2021 yılında 54,92 ± 1,04 µg/m^3'e ulaşmıştır. Konsantrasyon 52,04 ± 3,32 µg/m^3'e yükselirken, en küçük ilerleme %16,7 ile Alt Bölge-3'te gerçekleşmiştir.

Örnek çalışma alanındaki yer seviyesi O_3 konsantrasyonu 22,40 ± 0,04 µg/m^3 ile 29,59 ± 2,77 µg/m^3 arasında değişmektedir ve çoğu değişim %22'nin altında kalmaktadır (Harita 6.2). En büyük değişim, konsantrasyonların 2019 ve 2020 yılları arasında %21,4 oranında düşerek 28,50 ± 0,08 µg/m^3'ten 22,40 ± 0,49 µg/m^3'e geriledi̇ği Alt Bölge-4'te meydana gelmektedir. Alt Bölge-2, 28,42 ± 0,04 µg/m^3'ten 22,93 ± 0,41 µg/m^3'e düşüş ile %19,3'lük bir azalma gösterirken, Alt Bölge-3'te bu oran %17'dir. O_3 konsantrasyon seviyeleri 29,08 ± 0,11 µg/m^3'ten 24,13 ± 2,42 µg/m^3'e düşmektedir. Alt Bölge-1, O_3 konsantrasyonunda az bir değişim ile %6,2'lik azalma göstermektedir. Bu bölgede, konsantrasyon 26,18 ± 0.89 µg/m^3'ten 24,54 ± 0,64 µg/m^3'e düşmektedir. O_3 konsantrasyonları, diğer hava kirliliği eğilimlerinde görüldüğü üzere 2021 yılında önemli ölçüde artmaktadır. Alt Bölge-1, 24,54 ± 0,64 µg'den 29,59 ± 1,35 µg/m^3'e çıkarak %20,6'lık bir artışla en üst sırada yer almaktadır. Bu oranı Alt-Bölge 2 takip ederek %15,5 artışla 26,49 ± 0,57 µg/m^3'e yükselmektedir. Altbölge-4'ün büyüme oranı %14,4 iken Altbölge-3'ün büyüme oranı %13,9'dur. Bu iki alt bölge büyüme oranı farkları birbirine oldukça yakındır. Bu bölgeler için konsantrasyonlar Alt Bölge-4 için 25,63 ± 0,75 µg/m^3 ve Alt Bölge-3 için 27,47 ± 2,77 µg/m^3 olarak bulunmuştur.

Harita 6.2' de sütun A, NO_2 seviyelerini, sütun B ise O_3 seviyelerini göstermektedir. Alt bölgeler numaralarıyla gösterilmektedir.



Harita 6.2. NO_2 ve O_3 analiz sonuçları

Çizelge 6.3. Dört alt bölge için yıllık ortalama NO_2 ($\mu g/m^3$) tahmini değerleri

Alt Bölge Adı	Yıl	Ortalama Değer	Standart Sapma	Minimum Değer	Maksimum Değer
Alt Bölge 1: Sultanahmet Kentsel Arkeolojik Alanı	2019	62,60	0,28	62,16	62,99
Alt Bölge 1: Sultanahmet Kentsel Arkeolojik Alanı	2020	44,68	0,05	44,62	44,76
Alt Bölge 1: Sultanahmet Kentsel Arkeolojik Alanı	2021	62,50	1,13	60,67	64,04
Alt Bölge 2: Süleymaniye Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2019	59,70	0,37	59,33	60,07
Alt Bölge 2: Süleymaniye Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2020	44,37	0,08	44,31	44,48
Alt Bölge 2: Süleymaniye Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2021	56,91	0,86	56,05	57,77
Alt Bölge 3: İstanbul Kara Surları Koruma Alanı	2019	60,86	5,32	53,04	67,26
Alt Bölge 3: İstanbul Kara Surları Koruma Alanı	2020	44,60	0,56	43,21	45,45
Alt Bölge 3: İstanbul Kara Surları Koruma Alanı	2021	52,04	3,32	45,99	56,91
Alt Bölge 4: Zeyrek Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2019	58,67	0,54	57,83	59,33
Alt Bölge 4: Zeyrek Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2020	44,25	0,12	44,10	44,33
Alt Bölge 4: Zeyrek Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2021	54,92	1,04	53,33	56,05

Çizelge 6.4. Dört alt bölge için yıllık ortalama O_3 ($\mu g/m^3$) tahmini değerleri

Alt Bölge Adı	Yıl	Ortalama Değer	Standart Sapma	Minimum Değer	Maksimum Değer
Alt Bölge 1: Sultanahmet Kentsel Arkeolojik Alanı	2019	26,18	0,89	25,64	27,95
Alt Bölge 1: Sultanahmet Kentsel Arkeolojik Alanı	2020	24,54	0,64	23,55	25,37
Alt Bölge 1: Sultanahmet Kentsel Arkeolojik Alanı	2021	29,59	1,35	27,42	31,44
Alt Bölge 2: Süleymaniye Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2019	28,42	0,04	28,38	28,47
Alt Bölge 2: Süleymaniye Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2020	22,93	0,41	22,64	23,51
Alt Bölge 2: Süleymaniye Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2021	26,49	0,57	26,00	27,29
Alt Bölge 3: İstanbul Kara Surları Koruma Alanı	2019	29,08	0,11	28,85	29,28
Alt Bölge 3: İstanbul Kara Surları Koruma Alanı	2020	24,13	2,42	19,39	27,33
Alt Bölge 3: İstanbul Kara Surları Koruma Alanı	2021	27,47	2,77	21,86	31,11
Alt Bölge 4: Zeyrek Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2019	28,50	0,08	28,47	28,64
Alt Bölge 4: Zeyrek Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2020	22,40	0,49	21,72	22,69
Alt Bölge 4: Zeyrek Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2021	25,63	0,75	24,57	26,00

6.1.1. Sonuçların literatür bulguları ile karşılaştırılması

Bu çalışmadaki hava kirliliği konsantrasyonlarına ilişkin tahminler, literatürdeki bulgularla kısmen uyumludur. COVID-19 ile gelen kısmi kapanmaların İstanbul'daki hava kalitesi üzerindeki etkilerini araştıran çalışmalardan biri pandemi sırasında PM_{10}, SO_2, NO_2 ve O_3 konsantrasyonlarında azalma eğilimleri göstermektedir. Spesifik olarak, PM_{10}'daki azalma seviyesi %1,32 ile %38,27 arasında değişirken, O_3 konsantrasyonundaki maksimum azalma ve artış seviyeleri %78,71 ve %61,67'dir [37]. Öte yandan, yakın tarihli bir çalışmada, 2020 yılı mart ayına ait hava kalitesi verileri kullanılarak yapılan analizlerin sonuçları PM_{10}, SO_2 ve NO_2 konsantrasyonlarındaki azalmaların sırasıyla %36-44, %28-55 ve %18-59 aralığında olduğu tahmin edilmiştir [30]. Bir başka çalışma, İstanbul için COVID-19 pandemi sürecinde araç trafiğine ilişkin hava kalitesi endeksinin değerlendirmesini incelemekte ve önceki çalışmaya kıyasla daha düşük değerler bulmaktadır. 2020 yılları için ocak ve mayıs ayları arasında, özellikle PM_{10} için %21,2, SO_2 için %16,5 ve NO_2 için %28,62 olmak üzere konsantrasyonlarda önemli düşüşler kaydedilmiştir [36]. Bu çalışmalar İstanbul Yarımadası'na özgü olmayıp şehir düzeyinde yapılmış olsa da Avrupa yakasındaki kirlilik seviyeleri bu tez çalışmasındaki tahmini sonuçların sınırları içerisinde kalmaktadır. Öte yandan, COVID-19 kapanışı sırasında İstanbul'daki hava kirliliğinin kültürel miras üzerindeki etkisini inceleyen kritik bir çalışma, önceki çalışmalara kıyasla önemli ölçüde farklı tahminler sunmaktadır. Broomandi ve diğerleri (2022) sonuçları ile karşılaştırıldığında, bu tez çalışmasında yer alan PM_{10} tahminleri daha düşük kalmakta olup, NO_2 konsantrasyonları biraz daha yüksek seviyelerde kaldığı tespit edilmiştir [23]. Aynı çalışmanın SO_2 ve O_3 seviyeleri ise bu tez çalışmasında bulunan tahmin aralığı ile tutarlı olduğu görülmektedir [23]. İki çalışma arasındaki temel farklılık, Broomandi ve diğerleri (2022) çalışmasında İstanbul'un Anadolu yakasında daha fazla HKİ bulunmasından, veri seçimindeki farklılıklardan, uygulanan yöntemlerden ve küresel ölçekte haritalama ölçeğinden kaynaklanmaktadır.

Ayrıca, deniz aerosolleri, bağıl nem, sıcaklık değişimleri ve deniz taşımacılığındaki artış özellikle PM_{10}, SO_2 ve NO_X konsantrasyonlarını etkileyerek kıyı bölgelerindeki hava kirliliği seviyelerinin yükselmesine katkıda bulunmaktadır [31,160,202,203]. Bu faktör, özellikle metallerde ve demir alaşımlarında yüzey gerilemesini hızlandırabilmekte ve korozyon oranlarını artırabilmektedir [9]. Artan korozyon, deniz tuzu aerosolleri yoluyla klorür birikiminden kaynaklanan yağış ve klorür yıkanmasının birleşik etkileri

yaratmaktadır [12,13]. Bu etken, bu tez çalışmasında verilen doz-etki fonksiyonlarında genellikle göz ardı edilmiştir. Ayrıntılı veri eksikliği nedeniyle, seçilen malzeme türleri için yüzey durgunluğunu ve korozyon derinliklerini etkileyebilecek doz-etki fonksiyonlarında yer almayan diğer dış faktörler ve/veya parametreler bu tez çalışmasının kapsamı dışında bırakılmıştır.

6.1.2. Hava kirliliği modellemesinde R^2 ve RMSE değerleri

Çizelge 6.5'te, Ordinary Kriging sonucunda elde edilen hava kirliliği parametrelerinin ortalama yıllık tahmini değerlerine yönelik R^2 ve RMSE sunulmaktadır. Ozon haricinde, tüm R^2 değerleri 0,9'un üzerinde kalmaktadır. Bu istisnanın nedeni ise bazı istasyonların O_3 değerini sürekli olarak ölçmemesinden kaynaklanmaktadır. R^2 ve RMSE değerleri Smart-Map eklentisi ile hesaplanmıştır.

Çizelge 6.5. Hava kirliliği modellemesinin R^2 ve RMSE değerleri

Hava kirliliği parametresi	Yıl	R^2	RMSE
PM_{10}	2019	0,98	16,17
PM_{10}	2020	0,97	14,57
PM_{10}	2021	0,95	10,91
SO_2	2019	0,97	1,88
SO_2	2020	0,91	0,55
SO_2	2021	0,91	1,34
NO_2	2019	0,99	11,26
NO_2	2020	0,93	5,10
NO_2	2021	0,99	12,38
O_3	2019	0,86	7,15
O_3	2020	0,95	10,03
O_3	2021	0,75	7,41

6.2. Meteorolojik Parametrelerin Modellenmesi

Günlük ortalama sıcaklık (°C), yağış (mm) ve bağıl nem (%) verilerini alınarak, yıllık ortalamalar bulunmuştur. Ardından hava kirliliği parametrelerinin modellenmesinde uygulanan aynı yöntem, meteorolojik parametrelerin alansal tahminin yapılması için kullanılmıştır.

Çizelge 6.6'da görüldüğü üzere sıcaklık, yağış ve bağıl nem oranları seçilen çalışma alanında çok büyük farklılıklar göstermemektedir, çoğunlukla aynı değer aralığında kalmaktadır. Sıcaklık değerleri 15,65°C ile 16,68°C aralığında kalmaktadır. Yağış için bu aralık 549,90

mm ile 831,41 mm'dir (Çizelge 6.7). Bağıl nem is 68,16% ile 72,16% arasında değişmektedir (Çizelge 6.8).

Çizelge 6.6. Dört alt bölge için yıllık ortalama sıcaklık (°C) tahmini değerleri

Alt Bölge Adı	Yıl	Ortalama Değer	Standart Sapma	Minimum Değer	Maksimum Değer
Alt Bölge 1: Sultanahmet Kentsel Arkeolojik Alanı	2019	16,49	0,03	16,44	16,53
Alt Bölge 1: Sultanahmet Kentsel Arkeolojik Alanı	2020	16,45	0,13	16,28	16,62
Alt Bölge 1: Sultanahmet Kentsel Arkeolojik Alanı	2021	16,07	0,04	16,00	16,13
Alt Bölge 2: Süleymaniye Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2019	16,49	0,01	16,48	16,50
Alt Bölge 2: Süleymaniye Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2020	16,61	0,01	16,60	16,62
Alt Bölge 2: Süleymaniye Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2021	16,08	0,001	16,07	16,08
Alt Bölge 3: İstanbul Kara Surları Koruma Alanı	2019	16,36	0,03	16,31	16,41
Alt Bölge 3: İstanbul Kara Surları Koruma Alanı	2020	16,33	0,43	15,51	16,80
Alt Bölge 3: İstanbul Kara Surları Koruma Alanı	2021	16,03	0,14	15,83	16,32
Alt Bölge 4: Zeyrek Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2019	16,50	0,02	16,47	16,50
Alt Bölge 4: Zeyrek Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2020	16,68	0,06	16,60	16,70
Alt Bölge 4: Zeyrek Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2021	16,05	0,02	16,04	16,07

Çizelge 6.7. Dört alt bölge için yıllık ortalama yağış (mm) tahmini değerleri

Alt Bölge Adı	Yıl	Ortalama Değer	Standart Sapma	Minimum Değer	Maksimum Değer
Alt Bölge 1: Sultanahmet Kentsel Arkeolojik Alanı	2019	672,92	4,75	665,74	680,33
Alt Bölge 1: Sultanahmet Kentsel Arkeolojik Alanı	2020	560,67	3,48	556,81	567,02
Alt Bölge 1: Sultanahmet Kentsel Arkeolojik Alanı	2021	831,41	9,31	818,57	845,96
Alt Bölge 2: Süleymaniye Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2019	660,65	4,74	655,91	665,39
Alt Bölge 2: Süleymaniye Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2020	549,90	1,13	548,77	551,02
Alt Bölge 2: Süleymaniye Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2021	818,77	5,64	813,14	824,41
Alt Bölge 3: İstanbul Kara Surları Koruma Alanı	2019	560,20	19,67	530,87	598,31
Alt Bölge 3: İstanbul Kara Surları Koruma Alanı	2020	587,90	13,44	562,68	609,39
Alt Bölge 3: İstanbul Kara Surları Koruma Alanı	2021	739,69	34,43	700,59	812,11

Çizelge 6.7. (devam) Dört alt bölge için yıllık ortalama yağış (mm) tahmini değerleri

Alt Bölge 4: Zeyrek Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2019	651,93	2,91	650,89	655,91
Alt Bölge 4: Zeyrek Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2020	557,06	4,41	551,02	558,64
Alt Bölge 4: Zeyrek Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2021	819,48	4,64	813,14	821,13

Çizelge 6.8. Dört alt bölge için yıllık ortalama bağıl nem (%) tahmini değerleri

Alt Bölge Adı	Yıl	Ortalama Değer	Standart Sapma	Minimum Değer	Maksimum Değer
Alt Bölge 1: Sultanahmet Kentsel Arkeolojik Alanı	2019	70,03	0,4	69,33	70,84
Alt Bölge 1: Sultanahmet Kentsel Arkeolojik Alanı	2020	71,61	0,07	71,53	71,74
Alt Bölge 1: Sultanahmet Kentsel Arkeolojik Alanı	2021	71,36	0,37	70,84	71,89
Alt Bölge 2: Süleymaniye Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2019	67,41	0,08	67,33	67,48
Alt Bölge 2: Süleymaniye Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2020	71,77	0,00	71,76	71,77
Alt Bölge 2: Süleymaniye Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2021	68,16	0,11	68,05	68,27
Alt Bölge 3: İstanbul Kara Surları Koruma Alanı	2019	71,33	0,55	70,13	72,17
Alt Bölge 3: İstanbul Kara Surları Koruma Alanı	2020	72,16	0,78	71,32	73,44
Alt Bölge 3: İstanbul Kara Surları Koruma Alanı	2021	71,76	0,49	71,06	72,75
Alt Bölge 4: Zeyrek Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2019	67,65	0,50	67,48	68,50
Alt Bölge 4: Zeyrek Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2020	71,98	0,15	71,77	72,03
Alt Bölge 4: Zeyrek Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2021	68,54	0,20	68,27	68,61

6.2.1. Meteoroloji parametrelerinin R^2 ve RMSE değerleri

Meteoroloji parametrelerinin tahmini değerlerine yönelik R^2 ve RMSE değerleri Çizelge 6.9'da verilmektedir. R^2 değerleri 0,90'nın üzerinde kalmaktadır. RMSE değerlerindeki farklılıklar, istasyonların zaman zaman eksik ölçüm alması veya inceleme alanı içinde öngörülemeyen meteorolojik olaylardan kaynaklanmaktadır. 2020 yılı için yağış parametresindeki RMSE değeri, diğer yıllara göre yüksek kalmaktadır. Bunun nedeni, yıl içinde mevsimsel yağış miktarındaki ani değişikliklerdir. Aynı şekilde, 2019 yılında bağıl nem parametresine ait RMSE değeri, diğer yıllara göre yüksek kalmaktadır. Bu durum, seçilen alanın denize olan yakınlığından kaynaklanmaktadır.

Çizelge 6.9. Sıcaklık, yağış ve bağıl nem parametrelerinin R^2 ve RMSE değerleri

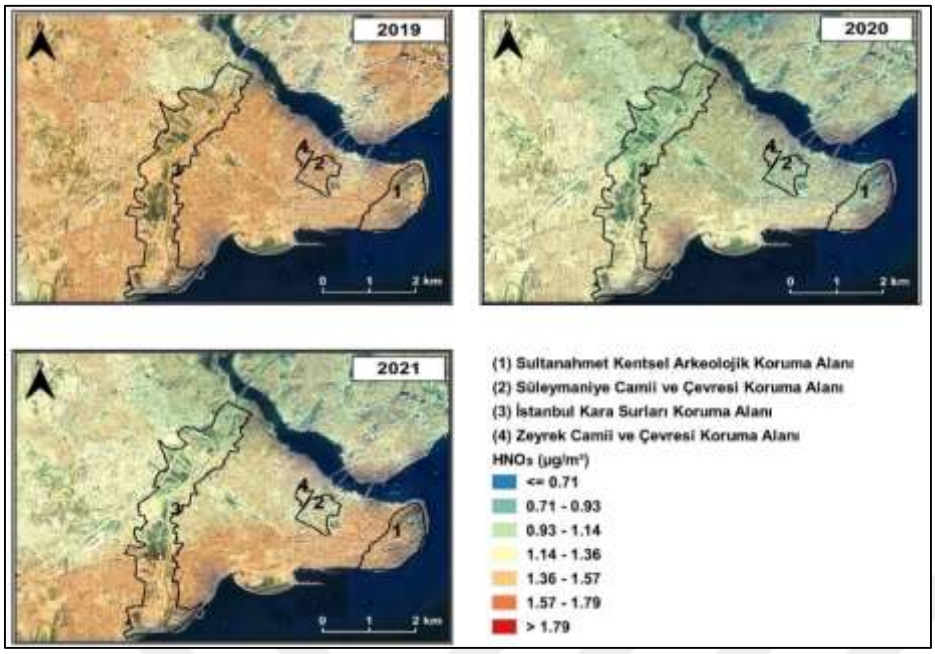
Meteoroloji parametresi	Yıl	R^2	RMSE
Sıcaklık	2019	0,95	0,001
Sıcaklık	2020	0,93	0,001
Sıcaklık	2021	0,94	0,001
Yağış	2019	0,95	79,29
Yağış	2020	0,98	124,21
Yağış	2021	0,98	63,25
Bağıl Nem	2019	0,95	9,88
Bağıl Nem	2020	0,99	0,09
Bağıl Nem	2021	0,94	0,04

6.3. Nitrik asit konsantrasyon tahminleri

Nitrik asit konsantrasyonlarının tahminleri (Çizelge 6.10), Eş. 5.7 kullanılarak hesaplanmıştır.

Çizelge 6.10. Dört alt bölge için yıllık ortalama nitrik asit ($\mu g/m^3$) tahmini değerleri

Alt Bölge Adı	Yıl	Ortalama Değer	Standart Sapma	Minimum Değer	Maksimum Değer
Alt Bölge 1: Sultanahmet Kentsel Arkeolojik Alanı	2019	43,39	0,22	43,18	43,79
Alt Bölge 1: Sultanahmet Kentsel Arkeolojik Alanı	2020	26,76	0,85	25,66	27,95
Alt Bölge 1: Sultanahmet Kentsel Arkeolojik Alanı	2021	26,76	0,85	25,66	27,95
Alt Bölge 2: Süleymaniye Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2019	43,87	0,17	43,70	44,03
Alt Bölge 2: Süleymaniye Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2020	32,64	0,54	32,16	33,40
Alt Bölge 2: Süleymaniye Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2021	32,64	0,54	32,16	33,40
Alt Bölge 3: İstanbul Kara Surları Koruma Alanı	2019	41,31	3,00	36,80	45,26
Alt Bölge 3: İstanbul Kara Surları Koruma Alanı	2020	37,11	2,92	32,71	41,98
Alt Bölge 3: İstanbul Kara Surları Koruma Alanı	2021	37,11	2,92	32,71	41,98
Alt Bölge 4: Zeyrek Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2019	44,13	0,19	44,03	44,39
Alt Bölge 4: Zeyrek Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2020	33,82	1,11	33,40	35,70
Alt Bölge 4: Zeyrek Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2021	33,82	1,11	33,40	35,70



Harita 6.3. HNO_3 haritaları

6.3. Yüzey Aşınım ve Korozyon Haritaları

2019-2021 dönemi için hava kirliliği haritalarının hazırlanmasının ardından, doz-etki fonksiyonları kullanılarak yüzey aşınımı ve korozyon haritaları oluşturulmuştur. Portland kireçtaşı ve beyaz mansfield dolomitik kumtaşının yüzey aşınım değerlerindeki değişiklikler ile dökme bronz, karbon çeliği, çinko ve son olarak bakırın korozyon oranlarındaki değişiklikler, bu bölümde haritalandırılarak açıklanmaktadır.

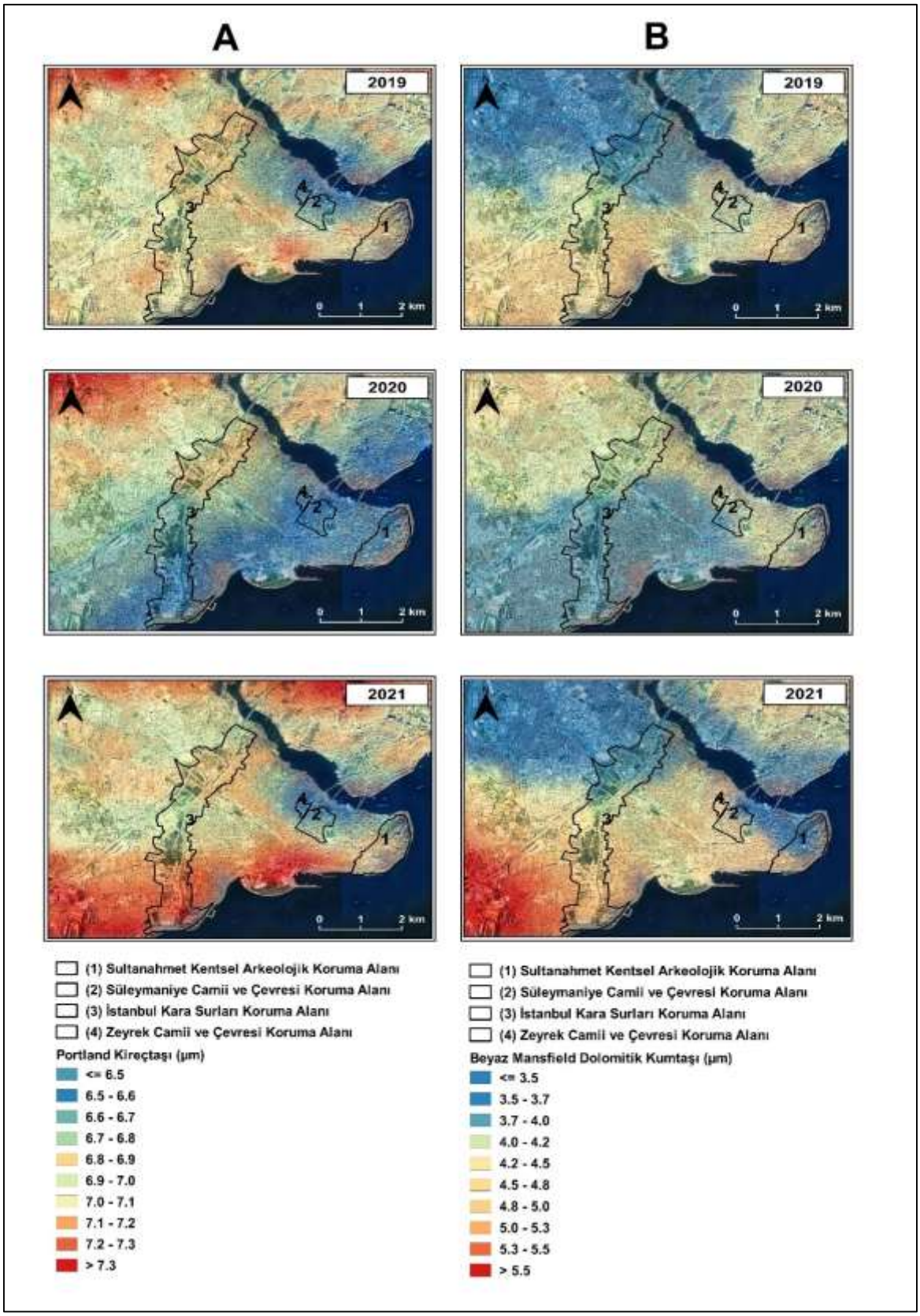
6.3.1. Portland kireçtaşı

İstanbul Tarihi Yarımada'daki alt bölgeler için yüzey aşınım seviyeleri 6,38 ± 0,01 µm ile 7,31 ± 0,17 µm arasında değişmektedir. Harita 6.4'te sütun A portland kireçtaşına ve sütun B beyaz mansfield dolomitik kumtaşına ait yüzey aşınım seviyelerini göstermektedir. Alt bölgeler, numaralar ile belirtilmiştir.

Harita 6.4'ün A sütununda görüldüğü üzere, COVID-19 pandemi dönemindeki kısıtlamaların uygulanması ile birlikte yüzey aşınım seviyeleri çoğunlukla düşmektedir. Bu kısıtlamaların kaldırılmasıyla, inceleme alanının bazı bölgelerinde yüzey aşınım seviyeleri yükselmiştir. Detaylandırılacak olursa, 2019-2020 döneminde Alt Bölge-1'de %7,2

oranında gözle görülür bir azalma mevcuttur. Portland kireçtaşının yüzey aşınım seviyesi 6,91 ± 0,08 µm'den 6,41 ± 0,02 µm'ye düşmektedir. Bunu takiben, 6,95 ± 0,10 µm ve 6,70 ± 0,14 µm değerleriyle aynı dönemde %3,6'lık bir düşüş gösteren Alt Bölge-3 gelmektedir. Buna karşılık, Alt Bölge-2'de ve Alt Bölge-4'te %2'den oranından daha az değişiklikler mevcuttur. Alt Bölge-2 için değerler 6,60 ± 0,11 µm'den 6,54 ± 0,01 µm'ye düşmektedir. Alt Bölge-4'teki değişiklikler en düşük noktada, %1'in altında kalmaktadır ve portland kireçtaşı yüzey aşınım seviyeleri 2019 yılı için 6,59 ± 0,07 µm ve 2020 yılı için 6,60 ± 0,03 µm olarak hesaplanmıştır.

2021 yılında yüzey aşınım seviyeleri yükselmektedir. Alt Bölge-1 %8,1'lik bir artışla 6,93 ± 0,17 µm'ye ulaşırken, onu %5,2'lik bir değer artışıyla 7,05 ± 0,17 µm'ye karşılık gelen Alt Bölge-3 takip etmektedir. Diğer alt bölgelerde ise %2'nin altında kalan küçük iyileşmeler gözlemlenebilir. Değerler Alt Bölge-2 için 6,64 ± 0,12 µm ve Alt Bölge-4 için 6,63 ± 0,08 µm'ye ulaşmaktadır. Portland kireçtaşına ait değer aralıkları, 2019-2021 dönemi için Çizelge 6.11'de sunulmaktadır.



Harita 6.4. Seçilen taş türlerinde meydana gelen yüzey aşınım seviyeleri

Çizelge 6.11. Portland kireçtaşının yüzey aşınım değerleri (µm)

Alt Bölge Adı	Yıl	Ortalama Değer	Standart Sapma	Minimum Değer	Maksimum Değer
Alt Bölge 1: Sultanahmet Kentsel Arkeolojik Alanı	2019	6,91	0,08	6,81	7,01
Alt Bölge 1: Sultanahmet Kentsel Arkeolojik Alanı	2020	6,41	0,02	6,38	6,44
Alt Bölge 1: Sultanahmet Kentsel Arkeolojik Alanı	2021	6,93	0,17	6,74	7,16
Alt Bölge 2: Süleymaniye Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2019	6,60	0,11	6,49	6,71
Alt Bölge 2: Süleymaniye Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2020	6,54	0,01	6,53	6,55
Alt Bölge 2: Süleymaniye Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2021	6,64	0,01	664	6,66
Alt Bölge 3: İstanbul Kara Surları Koruma Alanı	2019	6,95	0,10	6,81	7,11
Alt Bölge 3: İstanbul Kara Surları Koruma Alanı	2020	6,70	0,14	6,52	6,91
Alt Bölge 3: İstanbul Kara Surları Koruma Alanı	2021	7,05	0,17	6,86	7,31
Alt Bölge 4: Zeyrek Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2019	6,59	0,07	6,49	6,65
Alt Bölge 4: Zeyrek Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2020	6,60	0,03	6,55	6,65
Alt Bölge 4: Zeyrek Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2021	6,63	0,08	6,52	6,70

6.3.2. Beyaz mansfield dolomitik kumtaşı

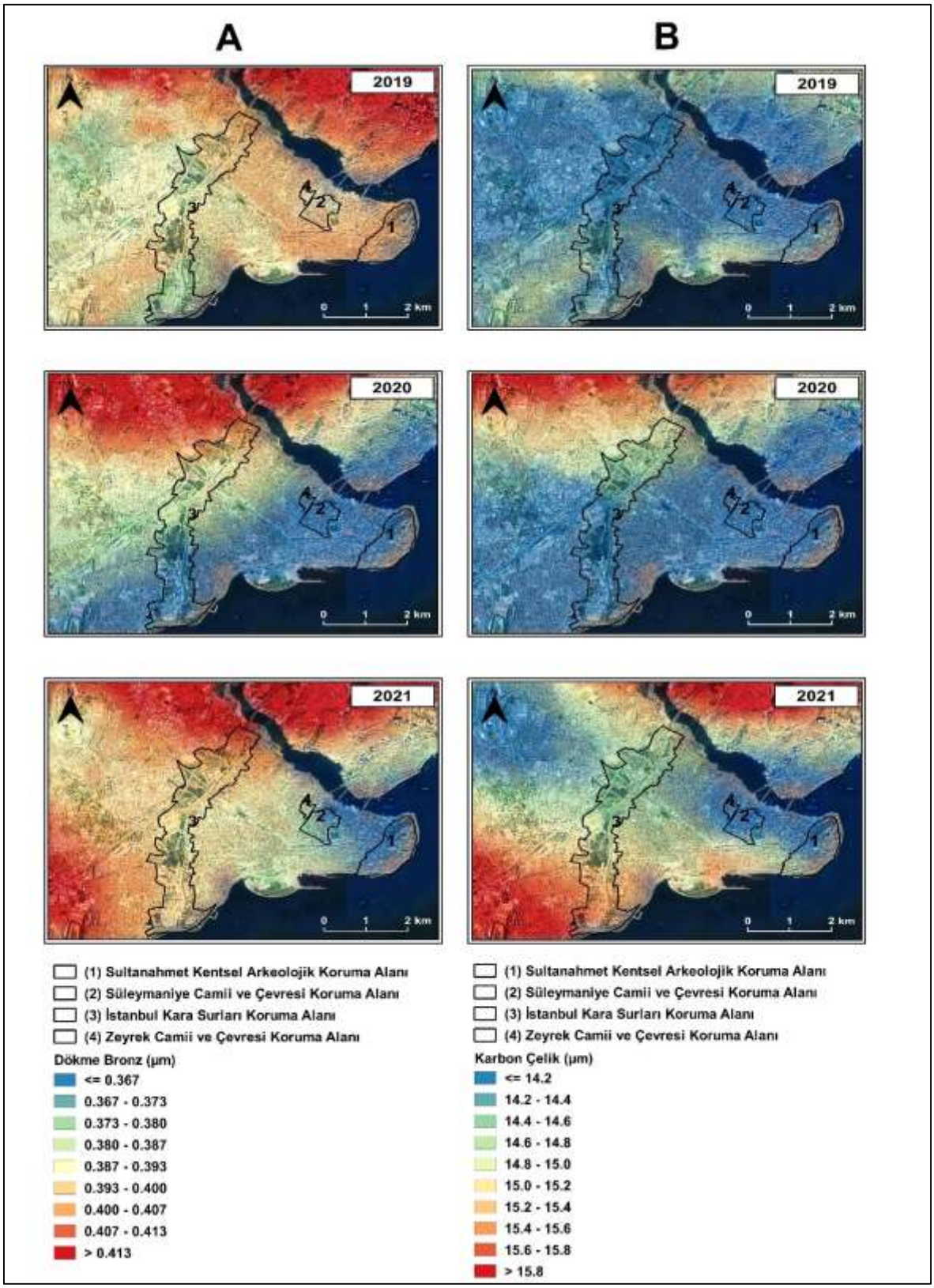
Harita 6.4'un B sütununda görüldüğü üzere seçilen alan için yüzey aşınım değerlerinin 4,00 ± 0,03 µm'nin altına düştüğü tespit edilmiştir. Yüzey aşınım değerleri en büyük azalmayı Alt Bölge-1'de %7,5 oranında göstermiştir; 4,32 ± 0,03 µm'den 3,99 ± 0,01 µm'ye düşmüştür. %3,4'lük bir düşüş oranıyla Alt Bölge-3'te de azalma gözlemlenmektedir. 2019 yılında yüzey aşınım değeri 4,09 ± 0,27 µm iken, 2020 yılında bu değer 3,95 ± 0,07 µm'ye düşmektedir. Alt Bölge-2'deki değişiklikler de %3'lük bir düşüşle 4,11 ± 0,02 µm'den 3,99 ± 0,03 µm'ye inerek bu eğilimi yakından takip etmektedir. Alt Bölge-4 ise sadece %1,2'lik bir düşüşle 4,05 ± 0,04 µm'den 4,00 ± 0,03 µm'ye inerek en az değişikliği sergilemektedir. 2021 yılında Alt Bölge-3'ün yüzey aşınım değeri büyük ölçüde toparlanarak 4,43 ± 0,56 µm'ye yükselerek %12'lik artış göstermektedir. Alt Bölge-2'nin yüzey aşınım değeri 2021 yılında %9,2 artarak 4,36 ± 0,04 µm ulaşmaktadır. Altbölge-4'ün yüzey aşınım oranı artışı %6,5'te kalarak 42,6 ± 0,05 µm'ye çıkmıştır. Son olarak, Alt Bölge-1 değerleri %2,3 oranında artarak 4,08 ± 0,46 µm'ye ulaşmaktadır. Analiz sonuçlarına ait detaylı bilgiler, Çizelge 6.12'de verilmektedir.

Çizelge 6.12. Beyaz mansfield dolomitik kumtaşının yüzey aşınım değerleri

Alt Bölge Adı	Yıl	Ortalama Değer	Standart Sapma	Minimum Değer	Maksimum Değer
Alt Bölge 1: Sultanahmet Kentsel Arkeolojik Alanı	2019	4,32	0,03	4,26	4,36
Alt Bölge 1: Sultanahmet Kentsel Arkeolojik Alanı	2020	3,99	0,01	3,98	4,00
Alt Bölge 1: Sultanahmet Kentsel Arkeolojik Alanı	2021	4,08	0,46	3,68	4,65
Alt Bölge 2: Süleymaniye Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2019	4,11	0,02	4,10	4,13
Alt Bölge 2: Süleymaniye Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2020	3,99	0,03	3,96	4,02
Alt Bölge 2: Süleymaniye Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2021	4,36	0,04	4,32	4,40
Alt Bölge 3: İstanbul Kara Surları Koruma Alanı	2019	4,09	0,27	3,65	4,44
Alt Bölge 3: İstanbul Kara Surları Koruma Alanı	2020	3,95	0,07	3,86	4,07
Alt Bölge 3: İstanbul Kara Surları Koruma Alanı	2021	4,43	0,56	3,73	5,31
Alt Bölge 4: Zeyrek Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2019	4,05	0,04	4,00	4,10
Alt Bölge 4: Zeyrek Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2020	4,00	0,03	3,97	4,03
Alt Bölge 4: Zeyrek Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2021	4,26	0,05	4,18	4,32

6.3.3. Dökme bronz

Harita 6.5'in A sütununda görüldüğü üzere seçilen alan için korozyon derinlikleri 0,33 ± 0,001 µm ile 4,00 ± 0,02 µm arasında değiştiği tespit edilmiştir. 2019-2020 yıllarında Alt Bölge-1 %17,1 ile en büyük düşüşü göstermektedir. 2019 yılı korozyon derinliği 0,40 ± 0,001 µm olup, bu değer 2020 yılında 0,33 ± 0,003 µm'ye düşmektedir. Benzer şekilde, Alt Bölge-2 için korozyon derinlik değerleri sırasıyla 0,36 ± 0,003 µm ve 0,39 ± 0,002 µm olup %9,3'lük bir düşüşe işaret etmektedir. Aynı eğilimler Alt Bölge-4'te tespit edilmiştir. %7,2'lik bir düşüş görülmekte ve dökme bronz korozyon derinliği 0,39 ± 0,001 µm'den 0,37 ± 0,004 µm'ye düşmektedir. Tüm alt bölgeler arasında Alt Bölge-3 en az değişikliğe sahiptir. Tahmini korozyon derinliği değeri 2019 yılı için 0,38 ± 0,02 µm'den yaklaşık %3 düşüşle 2020 yılında 0,39 ± 0,01 µm'ye gerilemiştir. Tam tersine, 2021 yılında tüm bölgelerde korozyon derinliği artmaktadır. Alt Bölge-1'de %6,3 artışla 0,35 ± 0,01 µm'ye yükselmektedir. Alt Bölge-3'te bu değer 0,40 ± 0,004 µm ulaşarak ve %5,4'lük bir artışa sahiptir. Alt Bölge-2'de ise %4,6'lık artış yakalanarak, değer 0,37 ± 0,001 µm olarak hesaplanmıştır. Son olarak, Alt Bölge-4 %3,9'luk bir artış göstererek korozyon derinlik değeri 0,38 ± 0,004 µm'ye ulaşmaktadır. Detaylı veriler Çizelge 6.13'te verilmektedir.



Harita 6.5. Dökme bronz ve karbon çeliğinin hesaplanan korozyon derinlikleri

Çizelge 6.13. Dökme bronzun korozyon derinlik değerleri (µm)

Alt Bölge Adı	Yıl	Ortalama Değer	Standart Sapma	Minimum Değer	Maksimum Değer
Alt Bölge 1: Sultanahmet Kentsel Arkeolojik Alanı	2019	0,40	0,001	0,40	0,40
Alt Bölge 1: Sultanahmet Kentsel Arkeolojik Alanı	2020	0,33	0,003	0,33	0,34
Alt Bölge 1: Sultanahmet Kentsel Arkeolojik Alanı	2021	0,35	0,008	0,35	0,37
Alt Bölge 2: Süleymaniye Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2019	0,39	0,002	0,39	0,40
Alt Bölge 2: Süleymaniye Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2020	0,36	0,003	0,35	0,36
Alt Bölge 2: Süleymaniye Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2021	0,37	0,001	0,37	0,38
Alt Bölge 3: İstanbul Kara Surları Koruma Alanı	2019	0,39	0,01	0,38	0,40
Alt Bölge 3: İstanbul Kara Surları Koruma Alanı	2020	0,38	0,02	0,36	0,41
Alt Bölge 3: İstanbul Kara Surları Koruma Alanı	2021	0,40	0,004	0,39	0,41
Alt Bölge 4: Zeyrek Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2019	0,39	0,001	0,39	0,39
Alt Bölge 4: Zeyrek Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2020	0,37	0,004	0,36	0,37
Alt Bölge 4: Zeyrek Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2021	0,38	0,004	0,37	0,39

Harita 6.5'te sütun A dökme bronza ve sütun B karbon çeliğine ait yüzey korozyon seviyelerini göstermektedir. Alt bölgeler, numaralar ile belirtilmiştir.

6.3.4. Karbon çelik

Karbon çeliği için korozyon derinlikleri 14,42 ± 0,59 µm ile 0,39 ± 0,01 µm arasında kalmaktadır (Harita 6.5, Sütun B). COVID-19 pandemi döneminde en büyük değişim %7,3 ile Alt Bölge-1'de gözlenmiştir. Korozyon derinlikleri 14,22 ± 0,12 µm'den 13,18 ± 0,07 µm'ye düşmüştür. Bunu %3,2'lik bir azalma ile Alt Bölge-4 takip etmektedir. 2019 ve 2020 için tahmini değerler sırasıyla 13,38 ± 0,14 ve 13,81 ± 0,12 hesaplanmıştır. Buna karşılık, diğer alt bölgelerde küçük değişiklikler tespit edilmiştir. Alt Bölge-2, %1,4'lük bir düşüş yaşarken, Alt Bölge-3 ise %0,2'lik bir azalma göstermektedir. Alt Bölge-2 için korozyon derinliği 13,43 ± 0,25 µm'den 13,62 ± 0,07 µm'ye yükselirken, Alt Bölge-3'te ise 14,04 ± 0,23 µm'den 14,07 ± 0,46 µm'ye bir düşüş yaşanmıştır (Çizelge 6.14). 2021 yılı itibarıyla, diğer malzemelerle benzer şekilde artan eğilimler gözlemlenmektedir. Alt Bölge-3, 14,95 ± 0,48 µm korozyon derinliği ile %6,3'lük bir büyüme göstermektedir. Alt Bölge-1 ise %5,7'lik büyüme oranıyla benzer bir eğilim sergileyerek korozyon derinliği 13,94 ± 0,59

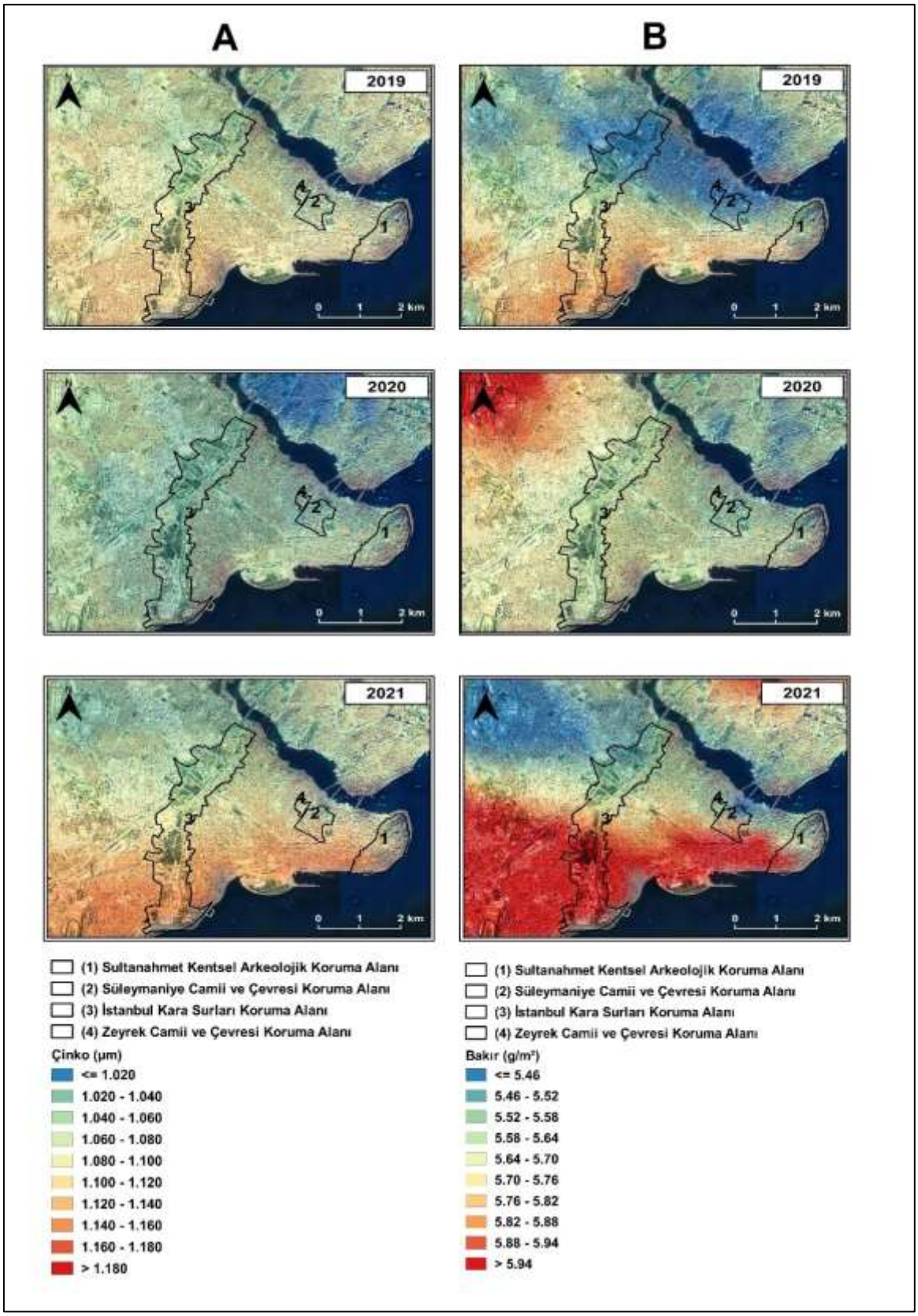
µm'ye ulaşmaktadır. Geri kalan alt bölgelerde ise %2'den daha düşük kayıplarla, önemsenmeyecek düzeyde artışlar gözlemlenmiştir. Alt Bölge-2 için tahmini değer 13,84 ± 0,26 µm, Alt Bölge-4 içinse 13,88 ± 0,18 µm olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 6.14. Karbon çeliğin korozyon derinlik değerleri (µm)

Alt Bölge Adı	Yıl	Ortalama Değer	Standart Sapma	Minimum Değer	Maksimum Değer
Alt Bölge 1: Sultanahmet Kentsel Arkeolojik Alanı	2019	14,22	0,12	14,05	14,37
Alt Bölge 1: Sultanahmet Kentsel Arkeolojik Alanı	2020	13,18	0,07	13,10	13,29
Alt Bölge 1: Sultanahmet Kentsel Arkeolojik Alanı	2021	13,94	0,59	13,44	14,77
Alt Bölge 2: Süleymaniye Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2019	13,43	0,25	13,18	13,68
Alt Bölge 2: Süleymaniye Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2020	13,62	0,07	13,55	13,69
Alt Bölge 2: Süleymaniye Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2021	13,84	0,26	13,58	14,10
Alt Bölge 3: İstanbul Kara Surları Koruma Alanı	2019	14,04	0,23	13,66	14,44
Alt Bölge 3: İstanbul Kara Surları Koruma Alanı	2020	14,07	0,46	13,53	14,89
Alt Bölge 3: İstanbul Kara Surları Koruma Alanı	2021	14,95	0,48	14,42	15,76
Alt Bölge 4: Zeyrek Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2019	13,38	0,14	13,18	13,51
Alt Bölge 4: Zeyrek Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2020	13,81	0,12	13,69	14,00
Alt Bölge 4: Zeyrek Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2021	13,88	0,18	13,58	14,01

6.3.5. Çinko

Harita 6.6'da 2019-2021 dönemi için çinko malzemeler üzerinde oluşabilecek korozyon derinlikleri görselleştirilmiştir. Sütun A, çinkonun yüzey aşınma seviyelerini gösterirken, sütun B, bakırın kütle kayıp değerlerini göstermektedir. Alt bölgeler, numaralar ile belirtilmiştir. Seçilen alan için korozyon derinliği 1,03 ± 0,001 µm ile 1,16 ± 0,04 µm arasında değişmektedir. 2019-2020 yılları arasındaki en büyük değişiklikler, sırasıyla %4,8 ve %3,7'lik düşüş oranlarıyla Alt Bölge-3 ve Alt Bölge-1'de gözlemlenmektedir. Korozyon derinlikleri, aynı dönem için Alt Bölge-3'te 1,09 ± 0,02 µm'den 1,04 ± 0,001 µm'ye ve Alt Bölge-1'de 1,08 ± 0,01 µm'den 1,04 ± 0,002 µm'ye düşmektedir. Geriye kalan iki alt bölgede ise yaklaşık %2,5'lik bir azalma gözlemlenmektedir.



Harita 6.6. Çinkonun korozyon derinliği ve bakırın yıllık kütle kaybı seviyeleri

2019 yılında korozyon derinlik değerleri yaklaşık 1,06 ± 0,003 µm civarında kalırken, 2020 yılında bu değerler 1,04 ± 0,003 µm'ye düşmektedir (Çizelge 6.15). 2021 yılında ise tam tersi bir durum söz konusudur: Alt Bölge-1 %7,6'lık bir iyileşme göstererek 1,12 ± 0,03 µm'ye ulaşmaktadır. Alt Bölge-3 ise %5,9'luk bir artış göstererek korozyon derinliği 1,10 ± 0,04 µm olarak hesaplanmıştır. Geriye kalan iki alt bölge için korozyon derinliği Alt Bölge-2 için 1,09 ± 0,01 µm ve Alt Bölge-4 için 1,08 ± 0,01 µm olarak tahmin edilirken, artış oranları %5'in altında kalmaktadır.

Çizelge 6.15. Çinkonun korozyon derinlik değerleri (µm)

Alt Bölge Adı	Yıl	Ortalama Değer	Standart Sapma	Minimum Değer	Maksimum Değer
Alt Bölge 1: Sultanahmet Kentsel Arkeolojik Alanı	2019	1,08	0,01	1,08	1,09
Alt Bölge 1: Sultanahmet Kentsel Arkeolojik Alanı	2020	1,04	0,002	1,04	1,05
Alt Bölge 1: Sultanahmet Kentsel Arkeolojik Alanı	2021	1,12	0,03	1,09	1,16
Alt Bölge 2: Süleymaniye Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2019	1,07	0,01	1,06	1,07
Alt Bölge 2: Süleymaniye Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2020	1,04	0,001	1,04	1,04
Alt Bölge 2: Süleymaniye Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2021	1,09	0,01	1,08	1,10
Alt Bölge 3: İstanbul Kara Surları Koruma Alanı	2019	1,09	0,02	1,05	1,12
Alt Bölge 3: İstanbul Kara Surları Koruma Alanı	2020	1,04	0,003	1,03	1,04
Alt Bölge 3: İstanbul Kara Surları Koruma Alanı	2021	1,10	0,04	1,04	1,15
Alt Bölge 4: Zeyrek Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2019	1,06	0,003	1,06	1,06
Alt Bölge 4: Zeyrek Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2020	1,04	0,001	1,03	1,04
Alt Bölge 4: Zeyrek Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2021	1,08	0,007	1,07	1,08

6.3.6. Bakır

Harita 6.6'nın B sütununda, 2019-2021 yılları arasında bakırın kütle kaybında yaşanan değişiklikler gösterilmektedir. Alt Bölge-4, 2019 ve 2020 yılları arasında %2,7'lik bir artışla alt bölgeler arasında en büyük yüzde değişimini göstermektedir. Bakırın kütle kaybı 5,41 ± 0,03 g/m²'den 5,56 ± 0,01 g/m²'ye yükselmiştir. Kütle kaybı, Alt Bölge-2 için %2,1 artışla 5,44 ± 0,07 g/m²'den 5,56 ± 0,003 g/m²'ye ulaşmaktadır. Diğer alt bölgeler için kütle kaybındaki değişiklikler ise önemsiz düzeydedir (%1'in altında). Örneğin, Alt Bölge-1 için kütle kaybı 5,64 ± 0,06 g/m²'den 5,60 ± 0,02 g/m²'ye düşmektedir (Çizelge 6.16). Bu artışlar,

2021 yılında daha da belirginleşerek bakırın kütle kaybı değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Alt Bölge-3, %5,8'lik bir büyüme oranı ile 5,96 ± 0,41 g/m²'ye ulaşarak en büyük artışı göstermektedir. Alt Bölge-1 ise %5'lik bir artışla Alt Bölge-3'ü takip etmektedir ve bu alt bölge için kütle kaybı 5,88 ± 0,30 g/m² olarak hesaplanmıştır. Kalan iki alt bölge 2021'de çok az oranda artarak, Alt Bölge-2 için 5,67 ± 0,10 g/m² ve Alt Bölge-4 için 5,60 ± 0,04 g/m² değerlerine ulaşmıştır.

Çizelge 6.16. Bakırın kütle kaybı değerleri (g/m^2)

Alt Bölge Adı	Yıl	Ortalama Değer	Standart Sapma	Minimum Değer	Maksimum Değer
Alt Bölge 1: Sultanahmet Kentsel Arkeolojik Alanı	2019	5,64	0,06	5,58	5,72
Alt Bölge 1: Sultanahmet Kentsel Arkeolojik Alanı	2020	5,60	0,02	5,57	5,64
Alt Bölge 1: Sultanahmet Kentsel Arkeolojik Alanı	2021	5,88	0,30	5,61	6,25
Alt Bölge 2: Süleymaniye Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2019	5,44	0,07	5,37	5,51
Alt Bölge 2: Süleymaniye Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2020	5,56	0,003	5,55	5,56
Alt Bölge 2: Süleymaniye Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2021	5,67	0,10	5,57	5,77
Alt Bölge 3: İstanbul Kara Surları Koruma Alanı	2019	5,64	0,16	5,42	5,84
Alt Bölge 3: İstanbul Kara Surları Koruma Alanı	2020	5,63	0,02	5,61	5,66
Alt Bölge 3: İstanbul Kara Surları Koruma Alanı	2021	5,96	0,41	5,50	6,61
Alt Bölge 4: Zeyrek Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2019	5,41	0,03	5,37	5,44
Alt Bölge 4: Zeyrek Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2020	5,56	0,01	5,55	5,57
Alt Bölge 4: Zeyrek Camii ve Çevresi Koruma Alanı	2021	5,60	0,04	5,55	5,64

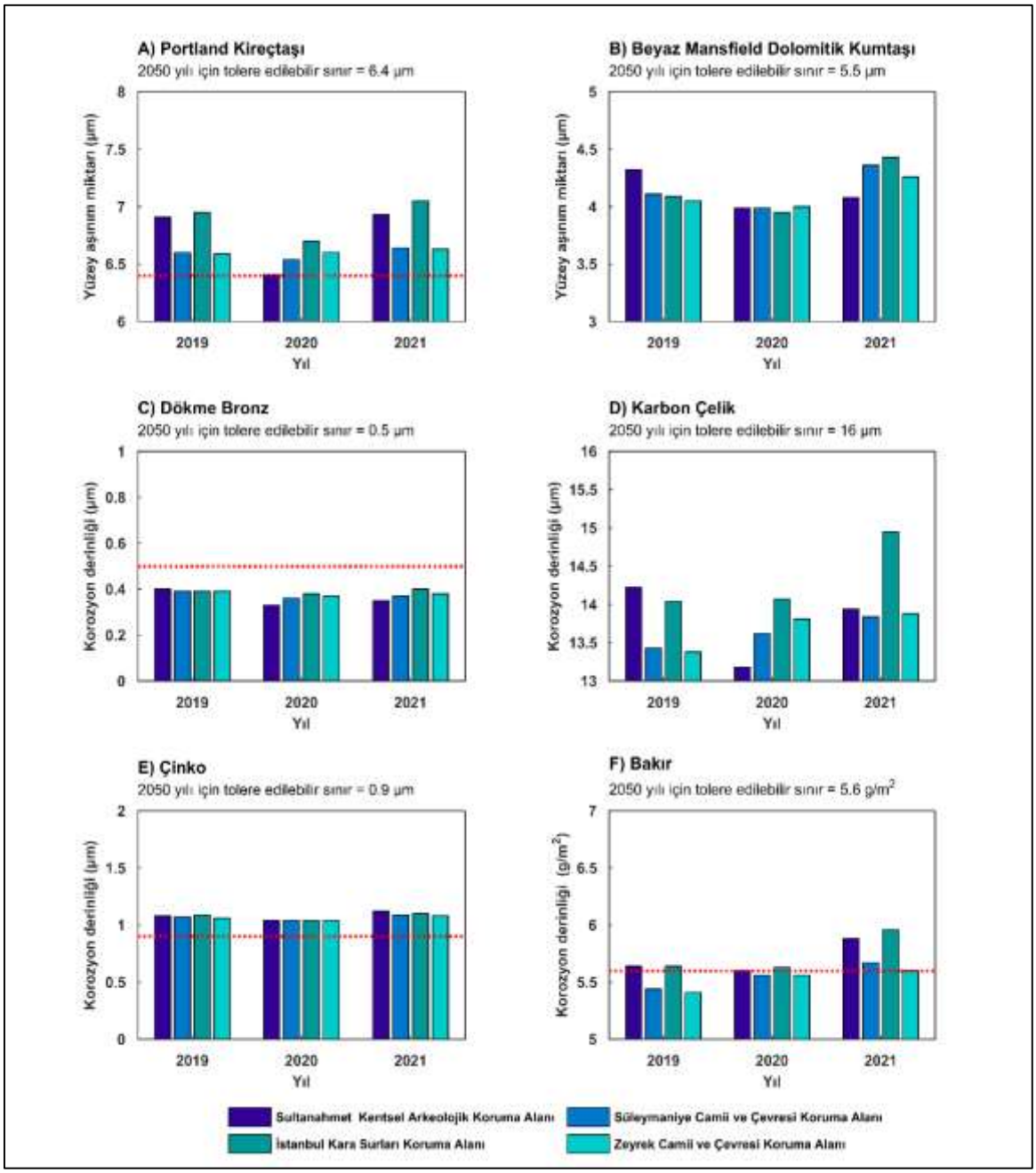
7. TARTIŞMA

Tolere edilebilir yüzey aşınım ve korozyon oranı, sabitin katları olarak ifade edilmektedir [21–23,130]. Arka plan yüzey aşınması ve korozyonu için referans seviyeleri, 1987'den 1995'e kadar süren malzeme maruziyet programı sırasında kaydedilen yüzey aşınması ve korozyon oranlarının alt yüzde 10'luk dilimi kullanılarak ICP-Materyaller tarafından belirlenmiştir. Yapısal kültürel varlıkların malzemelerinin korunması için 2050 ve 2020 hedefleri, 2020 için n_b=2.5 ve 2050 için n_b=2,0 olmak üzere farklı sabitler tanımlanmıştır [130]. 2020 ve 2050 yılları için her bir malzeme türü için eşik değerlerle birlikte arka plan yüzey aşınım ve korozyon seviyeleri listelenmiştir. Özetle, 2020 yılında çinko hariç tüm malzemelerin yüzey aşınım ve korozyon değerleri sınır değerlerin altındadır. Bununla birlikte, bu değerler 2050 yılı için tanımlanan değerlere oldukça yakınken, dökme bronz, karbon çeliği ve beyaz mansfield dolomitik kumtaşı belirtilen sınırın altında kalmaktadır.

Alt-bölgeleri inceleyen daha kapsamlı analiz sonucu (Şekil 7.1.) portland kireçtaşı yüzey aşınım seviyesinin 0,01-0,50 µm'ye düştüğünü ortaya koymaktadır. beyaz mansfield dolomitik kumtaşı için bu farkın aralığı 0,12 µm ila 0,33 µm'dir. Dökme bronz korozyon bozulma seviyelerinde 0,01-0,07 µm bant aralığında kalarak, değişimlerin az olduğu tespit edilmiştir. Karbon çeliğinin dört alt bölgesi için farklılıklar 0,03 µm ila 1,04 µm arasında değişmektedir. Diğer yandan, çinkonun korozyon derinliği 0,03 µm ila 0,05 µm arasında değiştiği belirlenmiştir. Son olarak, 2019 ve 2020 yılları arasında bakır kütle kaybındaki değişim 0,01 µm ile 14 µm arasında değişmektedir.

Yüzey aşınması veya korozyon oranlarının tolere edilebilir maksimum değerlerden daha düşük olmasının hiç bozulma olmadığı anlamına gelmediği unutulmamalıdır. 2019-2021 hesaplamalarına göre, portland kireçtaşı için yüzey gerileme seviyesi ve dökme bronz, bakır ve çinko için korozyon derinliği değerleri, malzemelerin halihazırda yüksek hasar saldırısı altında olduğunu göstermektedir.

Şekil 7.1'de (A) portland kireçtaşı, (B) beyaz mansfield dolomitik kumtaşı, (C) dökme bronz, (D) karbon çelik, (E) çinko ve (F) bakır olarak gösterilmektedir. Yüzey aşınım oranları veya korozyon derinliklerinin birimleri g/m^2 olarak tahmin edilen bakır haricinde diğer malzemeler için mikron (µm) olarak verilmektedir.



Şekil 7.1. Yüzey aşınma miktarı ve korozyon derinliklerinin karşılaştırılması

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, hava kirliliğinin Türkiye'nin UNESCO Dünya Miras Listesi'nde yer alan taşınmaz kültür varlıkları üzerindeki etkileri araştırılmış olup, direkt ve dolaylı yoldan etkiler incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda insan faaliyetleri dışında, meteorolojik koşullar ve hava kirliliğindeki değişimlerin, öngörülemeyen iklim değişikliği etkileriyle birleşmesi ile kültürel miras varlıklarına dolaylı yoldan büyük ölçüde materyal bozulmalarını hızlandırarak dış müdahalelere karşı kırılganlıklarını arttırdığı tespit edilmiştir. Hava kirliliği etkilerinin kültürel miras varlıkları üzerindeki etkilerinin detaylı olarak incelenmesi ve diğer faktörlerin minimuma indirgenerek veya ortadan kaldırıldığı özel bir durumun bulunması gerekmektedir.

Bu nedenle, bu tez çalışmasında, COVID-19 pandemi öncesi ve sonrası döneminde hava kirliliği konsantrasyonlarındaki değişimin etkilerinin İstanbul Tarihi Yarımadası'nda bulunan UNESCO Dünya Miras Listesi'nde yer alan kültürel miras alanlarında oluşabilecek yüzey aşınma ve korozyon seviyeleri araştırılmıştır. Bu çalışma, mikro ölçekte modellemeyi hedeflemekte olup, günlük ve aylık gerçek zamanlı verilerin kullanılması, Ordinary Kriging yönteminin uygulanması ve son olarak analiz için QGIS yazılımında Python tabanlı Smart-Map eklentisinin kullanılması nedeniyle literatürdeki benzer çalışmalardan ayrılmaktadır.

8.1. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmanın ana bulguları aşağıda listelenmiştir. Bunlar:

- Meteorolojik koşullarda önemli bir değişiklik yoksa, yüzey aşınma hızı ve korozyon derinliği öncelikle hava kirliliği konsantrasyonlarıyla ilişkilidir.
- SO_2 ve HNO_3 kirleticileri portland kireçtaşı ve çinko üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.
- PM_{10} değerlerinin yükselmesi portland kireçtaşının yüzey aşınma hızını arttırırken, dökme bronz ve karbon çeliğinde korozyon hızını arttırmaktadır.
- Yüksek SO_2 konsantrasyonunu bakır ve beyaz mansfield dolomitik kumtaşı üzerindeki hasarı daha da kötüleştirmektedir.

- COVID-19 pandemi nedeniyle kısıtlanan hareketlilik, hava kalitesini geçici olarak iyileştirmektedir ve bu da malzemelerin yüzey aşınma ve korozyon derinliklerini azaltmada olumlu bir etkiye sahiptir.
- COVID-19 pandemi dönemindeki bu iyileşmeye rağmen, portland kireçtaşı, bakır ve çinko, 2050 yılı için verilen tahmini eşik seviyelerine oldukça yakındır. Özetle, söz konusu bu materyaller olması gerektiğinden daha fazla yüzey aşınımı göstermiş ve korozyon hasarı almıştır.

Özetle, COVID-19 pandemi sürecindeki kısıtlamalar sonucu hava kirliliği konsantrasyonlarında bir azalma gözlemlenmiş ve bunun İstanbul Tarihi Yarımadası'ndaki UNESCO Dünya Mirası Listesi'ne dahil kültürel miras varlıklarının materyallerinde meydana gelen yüzey aşınımı ve korozyon oranlarında geçici bir azalma sağladığı belirlenmiştir. Ancak, pandemi dönemi kısıtlamalarının kaldırılması durumunda bu hava kirleticilerinin konsantrasyonlarında bir artış yaşanması beklenmektedir. Bu nedenle, ülkemizin kültürel miras varlıklarını korumak amacıyla, geçici çözümler yerine artan kentsel ve trafik hareketliliği potansiyelini göz önünde bulundurarak kapsamlı kültürel miras koruma stratejileri geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır.

8.2. Sınırlılıklar

Bu çalışma, haritalama süreciyle ilgili belirsizlikleri içermektedir. Örnek çalışma alanının yakınındaki istasyon sayısının sınırlı olması nedeniyle, veri kapsamı sınırlıdır. Bu da hava kirletici konsantrasyon seviyelerinin tahminiyle ilgili öngörülemeyen etkileri beraberinde getirmektedir. Özellikle, Ordinary Kriging sonuçları yakındaki istasyonların tanımlanmasına, ana hatların belirlenmesine, mesafe seçimine ve yarı variogram modellerinin seçimine duyarlıdır. Bu tez çalışmasında bu etkiyi en aza indirmek için haritalama işlemi sırasında maksimum mesafe olarak 20 km'lik bir yarıçap belirlenmiştir. Ayrıca, Smart-Map eklentisi kullanıcı müdahalesine gerek kalmadan en yüksek R değerlerini veren yarı variogram modelini ve noktalar arasındaki mesafeyi otomatik olarak seçmektedir. Son olarak, hava kirliliği ve meteoroloji koşullarının malzemelerin yüzey aşınması ve korozyonu üzerindeki mevsimsel etkileri bu tez çalışmasının kapsamı dışında bırakılmıştır.

KAYNAKLAR

1. Ürün, Ş. (2016). *Dünya kültürel ve doğal mirasın korunmasına dair sözleşme: doğal miras alanları başvuru, adaylık ve değerlendirme süreçleri.* Ankara: UNESCO Türkiye Millî Komisyonu. 93.
2. Güneş, G. S. Ulusoy, Ş. (2019). *UNESCO Doğal ve Kültürel Miras Listesinde Türkiye.* 6th International Multidisciplinary Studies Congress içinde (419–429).
3. Veillon, R. (2014). *State of conservation of world heritage properties*. A statistical analysis (1979–2013). Paris: World Heritage Centre. Report on file at UNESCO (whc. unesco. org/document/134872).
4. Tidblad, J., Kucera, V., Hamilton, R. (2009). *The Effects of Air Pollution on Cultural Heritage*. J. Watt (Ed.). New York: Springer. 6, 10-12.
5. Brimblecombe, P., Grossi, C. M. ve Harris, I. (2011). Climate change critical to cultural heritage. *Survival and sustainability: environmental concerns in the 21st century*, 195-205.
6. Sesana, E., Gagnon, A. S., Ciantelli, C., Cassar, J. ve Hughes, J. J. (2021). Climate change impacts on cultural heritage: A literature review. *WIREs Climate Change*, 12(4), e710.
7. Lin, B. B., Melbourne-Thomas, J., Hopkins, M., Dunlop, M., Macgregor, N. A., Merson, S. D., Vertigan, C. ve Hill, R. (2023). Holistic climate change adaptation for World Heritage. *Nature Sustainability*, 6(10), 1157–1165.
8. Kucera, V., Tidblad, J., Kreislova, K., Knotkova, D., Faller, M., Reiss, D., Snethlage, R., Yates, T., Henriksen, J., Schreiner, M. and Melcher, M. (2007). UN/ECE ICP materials dose-response functions for the multi-pollutant situation. *Water, Air, & Soil Pollution: Focus*, 7(1–3), 249–258.
9. Tidblad, J. (2012). Atmospheric corrosion of metals in 2010-2039 and 2070-2099. *Atmospheric Environment*, 55, 1–6.
10. Tidblad, J., Kreislová, K., Faller, M., De la Fuente, D., Yates, T., Verney-Carron, A., Hans, U. (2017). ICP materials trends in corrosion, soiling and air pollution (1987–2014). *Materials*, 10(8), 969.
11. Vidović, K., Hočevar, S., Menart, E., Drventić, I., Grgić, I. ve Kroflič, A. (2022). Impact of air pollution on outdoor cultural heritage objects and decoding the role of particulate matter: A critical review. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(31), 46405–46437.
12. Vidal, F., Vicente, R. ve Mendes Silva, J. (2019). Review of environmental and air pollution impacts on built heritage: 10 questions on corrosion and soiling effects for urban intervention. *Journal of Cultural Heritage*, 37, 273–295.
13. Spezzano, P. (2021). Mapping the susceptibility of UNESCO World Cultural Heritage sites in Europe to ambient (outdoor) air pollution. *Science of The Total Environment*, 754, 142345.
14. Bonazza, A., Brimblecombe, P., Grossi, C. M. ve Sabbioni, C. (2007). Carbon in black crusts from the Tower of London. *Environmental Science & Technology*, 41(12), 4199–4204.

15. Calparsoro, E., Maguregui, M., Giakoumaki, A., Morillas, H. ve Madariaga, J. M. (2017). Evaluation of black crust formation and soiling process on historical buildings from the Bilbao metropolitan area (north of Spain) using SEM-EDS and Raman microscopy. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(10), 9468–9480.

16. Seinfeld, J. H. ve Pandis, S. N. (1998). *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. John Wiley & Sons. 1152.

17. Bonazza, A., Messina, P., Sabbioni, C., Grossi, C. M. ve Brimblecombe, P. (2009). Mapping the impact of climate change on surface recession of carbonate buildings in Europe. *Science of The Total Environment*, 407(6), 2039–2050.

18. Watt, J., Jarrett, D. ve Hamilton, R. (2008). Dose–response functions for the soiling of heritage materials due to air pollution exposure. *Science of The Total Environment*, 400(1–3), 415–424.

19. de la Fuente, D., Vega, J. M., Viejo, F., Díaz, I. ve Morcillo, M. (2011). City scale assessment model for air pollution effects on the cultural heritage. *Atmospheric Environment*, 45(6), 1242–1250.

20. de la Fuente, D., Vega, J. M., Viejo, F., Díaz, I. ve Morcillo, M. (2013). Mapping air pollution effects on atmospheric degradation of cultural heritage. *Journal of Cultural Heritage*, 14(2), 138–145.

21. Karaca, F. (2013). Mapping the corrosion impact of air pollution on the historical peninsula of Istanbul. *Journal of Cultural Heritage*, 14(2), 129–137.

22. Di Turo, F., Proietti, C., Screpanti, A., Fornasier, M. F., Cionni, I., Favero, G. ve De Marco, A. (2016). Impacts of air pollution on cultural heritage corrosion at European level: What has been achieved and what are the future scenarios. *Environmental Pollution*, 218, 586–594.

23. Broomandi, P., Tleuken, A., Zhaxylykov, S., Nikfal, A., Kim, J. R. ve Karaca, F. (2022). Assessment of potential benefits of traffic and urban mobility reductions during COVID-19 lockdowns: dose-response calculations for material corrosions on built cultural heritage. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(5), 6491–6510.

24. Gezici, F. ve Kerimoglu, E. (2010). Culture, tourism and regeneration process in Istanbul. *International Journal of Culture, Tourism and Hospitality Research*, 4(3), 252–265.

25. Gultekın, N. (2012). Cultural heritage management: The case of historical peninsula in İstanbul. *Gazi University Journal of Science*, 25(1), 235–243.

26. Ibrahim, I., Bas, A. ve Zakariya, K. (2023). Cultural heritage and urban tourism in historic cities: Case study of Melaka, Malaysia, and Istanbul, Türkiye. *Journal of Architecture, Planning & Construction Management*, 13(2), 69-81.

27. Barakazı, M. (2023). Unsustainable tourism approaches in touristic destinations: A Case study in Turkey. *Sustainability*, 15(6), 4744.

28. Santa, A. C., Gómez, M. A., Castaño, J. G., Tamayo, J. A. ve Baena, L. M. (2023). Atmospheric deterioration of ceramic building materials and future trends in the field: a review. *Heliyon*, 9(4).

29. Güçlü, Y. S., Dabanlı, İ., Şişman, E. ve Şen, Z. (2019). Air quality (AQ) identification by innovative trend diagram and AQ index combinations in Istanbul megacity. *Atmospheric Pollution Research*, 10(1), 88–96.

30. Şahin, Ü. A. (2020). The effects of COVID-19 measures on air pollutant concentrations at urban and traffic sites in Istanbul. *Aerosol and Air Quality Research*, *20*(9), 1874–1885.

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

32. Mentese, S. ve Ogurtani, S. Ö. (2022). Spatial and temporal look at ten-years air quality of Istanbul city. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *19*, 925–938.

33. Harrison, R. M., Allan, J., Carruthers, D., Heal, M. R., Lewis, A. C., Marner, B., Murrells, T. ve Williams, A. (2021). Non-exhaust vehicle emissions of particulate matter and VOC from road traffic: A review. *Atmospheric Environment*, 262, 118592.

34. Harrison, R. M., Vu, T. Van, Jafar, H. ve Shi, Z. (2021). More mileage in reducing urban air pollution from road traffic. *Environment International*, 149, 106329.

35. Doğan Güzel, T. ve Alp, K. (2024). The effects of technological developments in transportation vehicles on air pollution mitigation of metropolitan cities: A case study of Istanbul. *Science of The Total Environment*, 912, 168996.

36. Alemdar, K. D., Kaya, Ö., Canale, A., Çodur, M. Y. ve Campisi, T. (2021). Evaluation of air quality index by spatial analysis depending on vehicle traffic during the COVID-19 outbreak in Turkey. *Energies*, 14(18), 5729.

37. Celik, E. ve Gul, M. (2022). How Covid-19 pandemic and partial lockdown decisions affect air quality of a city? The case of Istanbul, Turkey. *Environment, Development and Sustainability*, 1-39.

38. Shahzad, K., Farooq, T. H., Doğan, B., Zhong Hu, L. ve Shahzad, U. (2023). Does environmental quality and weather induce COVID-19: Case study of Istanbul, Turkey. *Environmental Forensics*, 24(1–2), 9–20.

39. Karaca, F. ve Öztürk, Z. (2012). Ground level ozone exposure and distribution over the historical Peninsula of Istanbul. *Journal of Cultural Heritage*, 13(1), 69–76.

40. Vecco, M. (2010). A definition of cultural heritage: From the tangible to the intangible. *Journal of Cultural Heritage*, 11(3), 321–324.

41. Jokilehto, J. (2005). Definition of cultural heritage: references to documents in history. *ICCROM Working Group 'Heritage and Society, 4(8).*

42. Kurniawan, H., Salim, A., Suhartanto, H. ve Hasibuan, Z. A. (2011). E-Cultural Heritage and Natural History Framework : an Integrated Approach To Digital Preservation. *2011 International Conference on Telecommunication Technology and Applications (IACSIT)*, (177-182). Singapore.

43. Adıgüzel, B. ve Dülger, A. S. (2018). Intangible Cultural Heritage Museum in The Heart Of Turkey. *Journal of Multidisciplinary Academic Tourism*, 3(1), 51–65.

44. İnternet: UNESCO. Operational Guidelines for the Implementation of the World Heritage Convention. URL: http://whc.unesco.org/archive/opguide08-en.pdf, Son Erişim Tarihi : 12.03.2025.

45. Eraslan, Ş. (2020). UNESCO Dünya Miras Listesinde Arkeolojinin Temsiliyeti: Türkiye Örneği. *Journal of Awareness*, 5(2), 119–134.

46. İnternet: UNESCO World Heritage Convention. Properties inscribed on the World Heritage List (Türkiye). URL: https://whc.unesco.org/en/statesparties/tr, Son Erişim Tarihi: 24.03.2025.

47. Peker, A. U. (2007). Divriği Ulu Camisi ve Darüşşifası. *Tasarım Merkezi Dergisi*, 18–25.

48. Altın, A. (2022). Divriği Ulu Camisi ve Darüşşifası'ndaki Figürlü Süslemeler. *Selçuklu Medeniyeti Araştırmaları Dergisi*, 7, 132–153.

49. Biçer, İ. (2022). *Divriği Ulu Camii ve Darüşşifası Taş Bezemelerinin İncelenip Tezhip Sanatı ile Birleştirilerek Yorumlanması*, Yüksek Lisans Tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Güzel Sanatlar Enstitüsü, İstanbul, 1-106.

50. Kubat, A. S. ve Kürkçüoğlu, E. (2014). Morphological Evolution of Urban Form Components in the Historical Peninsula of Istanbul. *ISUF–21st International Seminar on Urban Form*, 563–575.

51. Ölmez, M. (2021). *İstanbul Tarihi Yarımada Bölgesi'nin Geçmişten Günümüze Tarihi Alanları ve Ekonomisi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi Mimarlık Anabilim Dalı, İstanbul,1-116.

52. İnternet: İstanbul Tarihi Alanları Başkanlığı. Tarihi Yarımada Yönetim Planı Sınırları. URL: http://www.alanbaskanligi.gov.tr/yonetim_plani_sinirlari.html, Son Erişim Tarihi: 22.10.2024.

53. Angi, S. (2019). İstanbul Tarihi Yarımada'daki antik yapılarda ve anıtlarda kullanılan doğal taşların özellikleri ve korunmuşluk durumları. *Restorasyon Konservasyon Çalışmaları Dergisi*, (6), 31–43.

54. Yıldız, A., Küçükkaya, A. G. Mıhlayanlar, E. (2024). Investigation and characterization of black crusts on limestone at historical buildings in the cities of İstanbul and Edirne (Turkey). *Instrumentation Science and Technology*, 52(3), 291–308.

55. Ayhan, M. (2020). *Görme Açık Hava Müzesi ve UNESCO'nun Periyodik Raporlarında Göreme ve Kapadokya Kayalık Sit Alanı Raporlarının İncelenmesi ve Değerlendirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Nevşehir Hacı Bektaş Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Nevşehir, 1-97.

56. Manola, M. (2023). Cultural Routes in Cappadocia – Suggestions for Tourist Development. *Open Journal for Anthropological Studies*, 7(1).

57. Dem, B. M. (2017). Göreme Millî Parkı ve Kapadokya Kayalık Bölgeleri'ne İlişkin UNESCO Raporu Değerlendirmeleri ve Öneriler. *Turizm Akademik Dergisi*, 4(2), 91–106.

58. Tucker, H. ve Emge, A. (2010). Managing a world heritage site: The case of Cappadocia. *Anatolia*, 21(1), 41–54.

59. İnternet: Türkiye Kültür Portalı. Göreme Milli Parkı ve Kapadokya. URL: https://www.kulturportali.gov.tr/portal/gorememilliparkivekapadokya, Son Erişim Tarihi: 13.02.2025.

60. Yılmaz, İ. A. ve Atila, N. (2021). Profesyonel Turist Rehberlerinin Gözüyle "Hattuşa". *Turkish Studies-Social Sciences*, 16(3), 1375–1404.

61. Uğurlu, B. H. (2023). *Hitit Sosyo-Ekonomik Yapısının Konut Mimarisine Yansıması*, Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Bursa,1-125.

62. Zangger, E. ve Gautschy, R. (2019). Hitit Dininin Göksel Yönleri: Açık Hava Tapınağı Yazılıkaya Üzerine Bir İnceleme. *Journal of Skyscape Archaeology*, *5*(1), 5–38.

63. Yılmaz, İ. Ö., Schachner, A., Uysal, T. İ. ve İmer, Ü. E. (2022). Geochemical and petrographic approach for the origin of the limestone blocks of thewalls of the Great Temple of Hattusha, Çorum (N-Turkey). *Turkish Journal of Earth Sciences*, 31(3), 294–304.

64. İnternet: Türkiye Kültür Portalı. Hattuşa. URL: https://www.kulturportali.gov.tr/turkiye/corum/gezilecekyer/hattusa, Son Erişim Tarihi: 13.02.2025.

65. İnternet: Türkiye Kültür Portalı. Nemrut Dağı. URL: https://www.kulturportali.gov.tr/portal/nemrutdagi, Son Erişim Tarihi: 14.02.2025.

66. Yaşar, M. (2019). Nemrut Dağı Kutsal Alanı: I. Antiochus'un Dehası. *İnönü Üniversitesi Sanat ve Tasarım Dergisi*, 9(19), 19–27.

67. Topal, T., Deniz, B. E. ve Güçhan, N. Ş. (2015). Decay of Limestone Statues at Mount Nemrut (Adiyaman, Turkey). *International Journal of Architectural Heritage*, 9(3), 244–264.

68. Karaoğlu, Ö. ve Kılıç, S. (2017). Nemrut Volkanı ve Kral Nemrut'un Efsanesi. *Mavi Gezegen Popüler Yerbilim Dergisi*, JMO Yayını, 22.

69. D'Andria, F. (2018). "Hierapolis Alma Philippum": Havari'nin Kutsal Alanın'daki Yeni Kazılar, Araştırmalar ve Restorasyonlar. *Anadolu*, (44), 83–106.

70. İnternet: Türkiye Kültür Portalı. Pamukkale-Hierapolis. URL: https://www.kulturportali.gov.tr/portal/pamukkalehierapolis, Son Erişim Tarihi: 15.02.2025.

71. Vettori, S., Cabassi, J., Cantisani, E. ve Riminesi, C. (2019). Environmental impact assessment on the stone decay in the archaeological site of Hierapolis (Denizli, Turkey). *Science of the Total Environment*, 650, 2962–2973.

72. Megrelis, M. (2013). *Religion and Cultural Conservatism in Lycia : Xanthos and the Letoon*, Doktora Tezi, The University of Edinburgh, İngiltere,1-192 .

73. İnternet: Türkiye Kültür Portalı. Xanthos-Letoon. URL: https://www.kulturportali.gov.tr/portal/xanthosletoon , Son Erişim Tarihi: 15.02.2025.

74. Ceylan, S. ve Somuncu, M. (2016). Kültür turizmi alanlarında turizmin çeşitlendirilmesine eleştirel bir bakış: Safranbolu UNESCO dünya miras alanı. *Uluslararası Türk Dünyası Turizm Araştırmaları Dergisi*, 1(1), 53–64.

75. Şahin Körmeçli, P. (2024). Accessibility of Urban Tourism in Historical Areas: Analysis of UNESCO World Heritage Sites in Safranbolu. *Sustainability*, 16(6), 2485.

76. Şahin, R. ve Dinçer, A. E. (2024). Evaluating the Design Principles of Traditional Safranbolu Houses. *Buildings, 14(8), 2553.*

77. İnternet: Türkiye Kültür Portalı. Safranbolu: Geleneğin Özgün Bir Örneği. URL: https://www.kulturportali.gov.tr/portal/safranbolusehri, Son Erişim Tarihi: 15.02.2025.

78. Akbulak, C. ve Cengiz, T. (2014). Determining ecotourism strategies using A'WOT hybrid method: Case study of Troia Historical National Park, Çanakkale, Turkey. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 21(4), 380–388.

79. Yıldız Kuyrukçu, E. (2021). Bir " Yapı " Değil Bir " His " Yaratmak : Troya Müzesi Örneği. *Online Journal of Art and Design*, 9(3), 53–70.

80. Wagner, G. A., Pernicka, E., & Uerpmann, H. P. *Troia ve the Troad*. Scientific Approaches (Berlin 2003). Simone Riehl–Elena Marinova–Hans-Peter Uerpmann, 768.

81. İnternet: Türkiye Kültür Portalı. Troya Antik Kenti. URL: https://www.kulturportali.gov.tr/portal/truvaantikkenti, Son Erişim Tarihi: 16.02.2025.

82. Köse, A. (2013). *Edirne Selimiye Camii'nde Yazının Süsleme Unsuru Olarak Kullanımı*, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Edirne, 1-131.

83. Geisler, P. (2019). *Challenging the Hagia Sophia. The Selimiye Mosque in Edirne as Ottoman Empire Branding*. *The Heritage of Edirne in Ottoman and Turkish Times* : *Continuities, Disruptions and Reconnections*, 91-151.

84. Harmankaya, N. Ç. A. (2019). Edirne Selimiye Külliyesinde Bilinmeyen Bir Çeşme. *Art-Sanat Dergisi*, 12(12), 1–18.

85. Dal, M. ve Öcal, A. D. (2013). Limestone In Islamic Religious Architecture: İstanbul And Turkish Thrace. M*ETU Journal of the Faculty of Architecture*, 30(1).

86. Erdogan, H., Basar, M., Sezer, R. ve Kara, N. (2010). Structural Analysis Comparing The Minarets of The Selimiye Mosque with Ince Minaret Madrasa. *The International Conference on Civil and Architecture Engineering*, 8(8), 1–13.

87. İnternet: Türkiye Kültür Portalı. Edirne Selimiye Camii ve Külliyesi. URL:https://www.kulturportali.gov.tr/portal/edirneselimiyecamiivekulliyesi, Son Erişim Tarihi: 16.02.2025.

88. Tuncer, B. (2019). Arkeo-Turizm Potansiyeli Açısından Çatalhöyük. *Journal of International Social Research*, 12(64), 278–292.

89. Hodder, I. (2007). Çatalhöyük in the context of the Middle Eastern Neolithic. *Annual Review of Anthropology*, 36(1), 105–120.

90. İnternet: Türkiye Kültür Portalı. Çatalhöyük Neolitik Kenti. URL: https://www.kulturportali.gov.tr/portal/catalhoyukneolitikkenti, Son Erişim Tarihi: 18.02.2025.

91. Bilgin, E. A., Arslan, T. V. ve Durak, S. (2019). Physical Changes in World Heritage Sites under the Pressure of Tourism: The Case of Cumalıkızık Village in Bursa. *European Journal of Sustainable Development*, 8(2), 249.

92. Başkan, E. G. (2016). *A proposed model for understanding the impacts of climate change on tangible cultural heritage*, Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Mimarlık Bölümü, Ankara, 1-355.

93. İnternet: Türkiye Kültür Portalı. Bursa ve Cumalıkızık: Osmanlı İmparatorluğunun Doğuşu. URL: https://www.kulturportali.gov.tr/portal/bursavecumalikizk, Son Erişim Tarihi: 16.02.2025.

94. Emekli, G. (2003). Bergama ve Selçuk'un İzmir'in Kültürel Turizmindeki Yeri. *İzmir Aegean Geographical Journal*, 12, 39–50.

95. Kaya, M. (2014). *Constructing the Present over the Past: The Case of Bergama*, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Mimarlik Bölümü, Ankara, 1-221.

96. Süer, S. (2021). Kültürel Mirasın Turizm Amaçlı Kullanımı: Bergama İlçesi Örneği. *Journal of humanities and tourism research*, 11(3), 479–502.

97. İnternet: Türkiye Kültür Portalı. Bergama Çok Katmanlı Kültürel Peyzaj Alanı. URL: https://www.kulturportali.gov.tr/portal/bergama, Son Erişim Tarihi: 18.02.2025.

98. Dalkiliç, N. ve Nabikoğlu, A. (2012). The architectural features of the Diyarbakir city walls: A report on current status and issues of conservation. *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, 12(2), 171–182.

99. Soyukaya, N. (2015). *Diyarbakır Kalesi ve Hevsel Bahçeleri Kültürel Peyzajı Yönetim Planı*. L'Hevsel à Amida-Diyarbakır: Études et Réhabilitation de Jardins Mésopotamiens. Istanbul: Institut Français D'études Anatoliennes.

100. Halifeoglu, F. M. (2013). Castle architecture in Anatolia: Fortifications of Diyarbakir. *Frontiers of Architectural Research*, 2(2), 209–221.

101. İnternet: Türkiye Kültür Portalı. Diyarbakır Kalesi ve Hevsel Bahçeleri. URL: https://www.kulturportali.gov.tr/portal/diyarbakirkalesivehevselbahceleri, Son Erişim Tarihi: 18.02.2025.

102. Finley, S. (2014). Celsus Library of Ephesus: The Man and the City behind the Famous Façade. *Libri*, 64(3), 277–292.

103. Yılmaz, B. ve Suri, L. (2024). Evaluation of Restoration Interventions in the Ancient Theater of Ephesus in Terms of National and International Conservation Principles. *Journal of Protected Areas Research*, 3(2), 141–154.

104. Kraft, J. C., Brückner, H., Kayan, I. ve Engelmann, H. (2007). The geographies of ancient Ephesus and the Artemision in Anatolia. *Geoarchaeology*, 22(1), 121–149.

105. İnternet: Türkiye Kültür Portalı. Efes. URL: https://www.kulturportali.gov.tr/portal/efes, Son Erişim Tarihi: 18.02.2025.

106. Eşitti, B. (2017). Ani Harabelerinin Bölgesel Kalkınma Üzerindeki Etkileri. *Sosyal Ve Beşeri Bilimler Araştırmaları Dergisi*, 18(40), 129–147.

107. Balta, S. (2023). Tarihsel Çevre Peyzajlarında Dini Yapı Tipolojilerinin İncelenmesi: Ani Harabeleri, Kars Örneği. *Akdeniz University Journal of the Faculty of Architecture*, 2(2), 178–209.

108. Ardahanlı, M. ve Kotan, T. (2025). Kars-Ani Harabeleri Bölgesindeki Traverten Taşların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8(1), 299–313.

109. Özlü, T. ve Kaleli, C. (2019). Kültürel Miras Turizmi Açısından Bir Değerlendirme: Ani Ören Yeri. *Amisos*, 4(7), 195–218.

110. İnternet: Türkiye Kültür Portalı. Ani Arkeolojik Alanı. URL: https://www.kulturportali.gov.tr/portal/aniarkeolojikalani, Son Erişim Tarihi: 18.02.2025.

111. Özbey, V. (2019). Unesco Dünya Miras Listesi'ne Doğru Anavarza Antik Kenti. *Art-Sanat*, (11), 299–324.

112. Smith, B., Jacobs, I., & Somersan, S. (2022). Aphrodisias' ta Güncel Çalışmalar. *Lycus Dergisi*, (6), 25-63.

113. Wielgosz-Rondolino, D., Antonelli, F., Bojanowski, M.J., Degryse, P., Gładki, M., Göncüoğlu, M.C., Lazzarini, L., Long, L. and Mandera, S., (2024). Ancient white and grey marbles from Aphrodisias: multi-method characterization. *Archaeometry*, 66(1), 30–56.

114. İnternet: Türkiye Kültür Portalı. Afrodisias Antik Kenti. URL: https://www.kulturportali.gov.tr/portal/afrodisiasantikkenti, Son Erişim Tarihi: 18.02.2025.

115. Mancı, A. R. (2021). Antik Yerleşimlerin Somut Olmayan Kültürel Miras Açisindan Değerlendirilmesi: Göbeklitepe Örneği. *Safran Kültür ve Turizm Araştırmaları Dergisi*, 4(2), 274–284.

116. Necmettin, G. ve Sağlık, E. (2024). Tarihin Sıfır Noktasında Bir Mekânsal Çözümleme Çalışması: Göbeklitepe Ören Yeri (Şanlıurfa). *GSI Journals Serie A: Advancements in Tourism Recreation and Sports Sciences*, 7(1), 76–91.

117. İnternet: Türkiye Kültür Portalı. Göbeklitepe. URL: https://www.kulturportali.gov.tr/portal/gobeklitepe, Son Erişim Tarihi: 18.02.2025.

118. Kurt, A. ve Göler, M. (2017). Anadolu'da İlk Tapınak: Göbeklitepe. *Cumhuriyet İlahiyat Dergisi*, 21(2).

119. Knitter, D., Braun, R., Clare, L., Nykamp, M. ve Schütt, B. (2019). Göbekli Tepe: A Brief Description of the Environmental Development in the Surroundings of the UNESCO World Heritage Site. *Land*, 8(4), 72.

120. Yılmaz, H. (2021). Geleneksel Bürokrasinin İlk İzleri: Malatya Arslantepe. *Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 31(2), 795–806.

121. Cereda, S. ve Draganits, E. (2022). Lived monuments: A microarchaeological study of monumental architecture in the tell-site of Arslantepe (Malatya, Turkey). *Journal of Archaeological Science: Reports*, 41, 103318.

122. Moscone, D., D'Errico, D., Pellegrini, D., Pellegrini, A., Nobile, E. ve Lemorini, C. (2024). Arslantepe in the foreground: The economic and social role of the large blades at the end of the 4th millennium BC. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 56, 104544.

123. İnternet: Türkiye Kültür Portalı. Arslantepe Höyüğü. URL: https://www.kulturportali.gov.tr/portal/arslantepe-hoyugu-, Son Erişim Tarihi: 15.03.2025.

124. Mandaloğlu, M. (2024). MÖ 7. Yüzyılda Gordion ve Çevresinde Kimmerler. *OANNES - International Journal of Ancient History*, 6(1), 319-339.

125. Rose, C. B. (2023). Excavating the Phrygian Capital of Gordion. *Türk Arkeoloji ve Etnografya Dergisi*, (85), 13–25.

126. İnternet: Türkiye Kültür Portalı. Gordion. URL: https://www.kulturportali.gov.tr/portal/gordion, Son Erişim Tarihi: 15.03.2025.

127. Karakuş, F. (2021). 13. Yüzyıl'da Anadolu'da İnşa Edilen Ahşap Direkli Camiler Üzerine Değerlendirme Çalışması. *Turkish Online Journal of Design Art and Communication*, 11(1), 131–161.

128. Bekiroğlu, B., Alaçam, S. ve Güzelci, O. Z. (2024). Tarihi Ahşap Yapı Bileşenlerinin Belgelenmesi ve CNC ile Yeniden Üretimi. *XVIII. Mimarlıkta Sayısal Tasarım Ulusal Sempozyumu*, 586-600.

129. İnternet: Türkiye Kültür Portalı. Anadolu'nun Orta Çağ Dönemi Ahşap Hipostil Camileri. URL: https://www.kulturportali.gov.tr/portal/anadolu-nun-orta-cag-donemi-ahsap-hipostil-camileri, Son Erişim Tarihi: 15.03.2025.

130. İnternet: CLRTAP. Manual on methodologies and criteria for modelling and mapping critical loads and levels and air pollution effects, risks, and trends. URL: https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/manual-on-methodologies-criteria-for-modelling-0, Son Erişim Tarihi: 05.01.2025.

131. Strlič, M., Cigić, I. K., Možir, A., Thickett, D., de Bruin, G., Kolar, J., Cassar, M. (2010). Test for compatibility with organic heritage materials: a proposed procedure. *e-Preservation Science*, 7, 78-86.

132. Brimblecombe, P. ve Hayashi, M. (2018). Pressures from long term environmental change at the shrines and temples of Nikkō. *Heritage Science*, 6, 1-12.

133. Brimblecombe, P., Brimblecombe, C. T., Thickett, D. ve Lauder, D. (2013). Statistics of insect catch within historic properties. *Heritage Science*, 1, 1-11.

134. Grossi, C. M., Brimblecombe, P. ve Harris, I. (2007). Predicting long term freeze-thaw risks on Europe built heritage and archaeological sites in a changing climate. *Science of the Total Environment*, 377(2–3), 273–281.

135. Brimblecombe, P. (2014). Refining climate change threats to heritage. *Journal of the Institute of Conservation*, 37(2), 85–93.

136. Haugen, A. ve Mattsson, J. (2011). Preparations for climate change's influences on cultural heritage. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, 3(4), 386–401.

137. Öcal, A. D. ve Dal, M. (2012). Dogal Taslardaki Bozunmalar. *Mimarlik Vakfi iktisadi îçletmesi, Bogota-Kirklareli.*

138. Brimblecombe, P. ve Grossi, C. M. C. M. (2009). Millennium-long damage to building materials in London. *Science of the Total Environment*, 407(4), 1354–1361.

139. Dillmann, P., Bellot-Gurlet, L. ve Nenner, I. (2016). *Nanoscience and cultural heritage*. Paris, France: Atlantis Press.

140. Doytchinov, S. ve Screpanti, A. (2006). European UNESCO Cultural Heritage sites and the air pollution effects. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 86.

141. Brimblecombe, Peter. (2000). Air pollution and architecture: Past, present and future. *Journal of Architectural Conservation*, 6(2), 30–46.

142. Wu, R., Ma, Y., Xie, H., Wang, X., Hokoi, S., Yue, Y., Hue, J., Mu, B., Li, Y. (2023). Influence of solar radiation on the surface loss of the painted statues in Grotto No. 3 of Maijishan Grottoes, China. *Building and Environment*, 240, 110416.

143. Jenkins, K. A. ve Smith, B. J. (1990). Daytime rock surface temperature variability and its implications for mechanical rock weathering: Tenerife, Canary Islands. *Catena*, 17(4–5), 449–459.

144. Grossi, C. M., Bonazza, A., Brimblecombe, P., Harris, I. ve Sabbioni, C. (2008). Predicting twenty-first century recession of architectural limestone in European cities. *Environmental Geology*, 56, 455–461.

145. Sitzia, F., Lisci, C. ve Mirão, J. (2021). Accelerate ageing on building stone materials by simulating daily, seasonal thermo-hygrometric conditions and solar radiation of Csa Mediterranean climate. *Construction and Building Materials*, 266, 121009.

146. Sitzia, F. (2022). Climate change and cultural heritage: from small-to large-scale effects—the case study of Nora (Sardinia, Italy). *Heritage*, 5(4), 3495–3514.

147. Germinario, L., Andriani, G. F. ve Laviano, R. (2015). Decay of calcareous building stone under the combined action of thermoclastism and cryoclastism: A laboratory simulation. *Construction and Building Materials*, 75, 385–394.

148. Esteban-Cantillo, O. J., Menendez, B. ve Quesada, B. (2024). Climate change and air pollution impacts on cultural heritage building materials in Europe and Mexico. *Science of the Total Environment*, 921, 170945.

149. Carroll, P. ve Aarrevaara, E. (2018). Review of potential risk factors of cultural heritage sites and initial modelling for adaptation to climate change. *Geosciences*, 8(9), 322.

150. İnternet: IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report.URL: https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/, Son Erişim Tarihi: 22.09.2024.

151. Im, U., Geels, C., Hanninen, R., Kukkonen, J., Rao, S., Ruuhela, R., R., Sofiev, M., Schaller, N., Hodnebrog, Ø., Sillmann, J., Schwingshackl, C., Christensen, J.H., Bojariu, R. ve Aunan, K. (2022). Reviewing the links and feedbacks between climate change and air pollution in Europe. *Frontiers in Environmental Science*, *10*, 954045.

152. Arghya Sardar, P. R. (2015). SO_2 emission control and finding a way out to produce sulphuric acid from industrial SO_2 emission. *J Chem Eng Process Technol*, 6(2), 1000230.

153. Srivastava, R. K., Neuffer, W., Grano, D., Khan, S., Staudt, J. E. ve Jozewicz, W. (2005). Controlling NOx emission from industrial sources. *Environmental Progress*, 24(2), 181–197.

154. İnternet: TÜİK. Turkish Greenhouse Gas Inventory: 1990-2022.URL: https://unfccc.int/documents/644387. Son Erişim Tarihi: 05.02.2025.

155. İnternet: Temiz Hava Hakkı Platformu. Kara rapor 2024 : Hava Kirliliği ve Sağlık Etkileri. URL: https://www.temizhavahakki.com/kara-rapor/, Son Erişim Tarihi: 24.11.2024.

156. Geddes, J. A. ve Murphy, J. G. (2012). *The science of smog: A chemical understanding of ground level ozone and fine particulate matter*. In Metropolitan sustainability (pp. 205-230). Woodhead Publishing.

157. Ramanathan, V. ve Feng, Y. (2009). Air pollution, greenhouse gases and climate change: Global and regional perspectives. *Atmospheric Environment*, 43(1), 37–50.

158. Tidblad, J., Kucera, V., Ferm, M., Kreislova, K., Brüggerhoff, S., Doytchinov, S., Karmanova, N. (2012). Effects of air pollution on materials and cultural heritage: ICP materials velebrates 25 years of research. *International Journal of Corrosion*, 1–16.

159. Samie, F., Tidblad, J., Kucera, V. ve Leygraf, C. (2005). Atmospheric corrosion effects of HNO_3 - Method development and results on laboratory-exposed copper. *Atmospheric Environment*, 39(38), 7362–7373.

160. Şahin, Ü. A., Onat, B., Akın, Ö., Ayvaz, C., Uzun, B., Mangır, N., Doğan, M., Harrison, R. M. (2020). Temporal variations of atmospheric black carbon and its relation to other pollutants and meteorological factors at an urban traffic site in Istanbul. *Atmospheric Pollution Research*, 11(7), 1051–1062.

161. İnternet: Historic Areas of Istanbul Site Directorate. Istanbul Historical Peninsula Management Plan. URL: http://www.alanbaskanligi.gov.tr/evrak/engtyp.pdf, Son Erişim Tarihi: 26.04.2024.

162. Can, Y., Tura, S. ve Kudde, E. (2019). Evaluation of the reservationstate of Historical Peninsula in Istanbul based on geospatial data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 353–357.

163. Yılmaz, M., Kara, Y., Çulpan, H. C., Can, G. ve Toros, H. (2023). Detection and regional analysis of heatwave characteristics in İstanbul. *Sustainable Cities and Society*, 97, 104789.

164. Şahin, Ü. A., Ayvaz, C., Hama, S., Onat, B., Uzun, B., Dogan, M., Bediroglu, G., Harrison, R. M. (2024). Assessment of ambient particulate matter and trace gases in Istanbul: Insights from long-term and multi-monitoring stations. *Atmospheric Pollution Research*, *15*(5), 102089.

165. Ünal, Y. S., Sonuç, C. Y., Incecik, S., Topcu, H. S., Diren-Üstün, D. H. ve Temizöz, H. P. (2020). Investigating urban heat island intensity in Istanbul. *Theoretical and Applied Climatology*, 139(1–2), 175–190.

166. Kara, Y., Yavuz, V., Temiz, C. ve Lupo, A. R. (2024). Exploring spatio-temporal precipitation variations in Istanbul: Trends and patterns from five stations across two continents. *Atmosphere*, 15(5), 539.

167. İnternet: ÇŞB. Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı. URL: https://sim.csb.gov.tr/, Son Erişim Tarihi: 10.05.2024.

168. İnternet: Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü. Meteoroloji veri satımı ve informasyon sistemi. URL: https://mevbis.mgm.gov.tr/mevbis/ui/index.html#/Workspace, Son Erişim Tarihi: 01.06.2024.

169. İnternet: Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü. Asit Yağmur Çalışmaları. URL: https://www.mgm.gov.tr/arastirma/asit_yagmurlari.aspx?il=Catalca, Son Erişim Tarihi: 25.06.2024.

170. Ozturk, D. ve Kilic, F. (2016). Geostatistical approach for spatial interpolation of meteorological data. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 88(4), 2121–2136.

171. Liu, Z. ve Yan, T. (2021). Comparison of spatial interpolation methods based on ArcGIS. *Journal of Physics: Conference Series*, 1961(1), 012050.

172. Salehi, M. ve Oral, H. V. (2023). An Example of Kriging method based on environmental temperature for altitude mapping using ArcGIS software. *Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation*, 392–401.

173. Childs, C. (2004). *Interpolating surfaces in ArcGIS spatial analyst. ArcUser, July-September*, 3235(569), 32-35.

174. Cressie, N. (1988). Spatial prediction and ordinary kriging. *Mathematical Geology*, 20, 405–421.

175. Üstüntaş, T. (2006). Sayısal Arazi Modellerinde Bazı Enterpolasyon Yöntemlerinin Karşılaştırılması. *Selçuk- Teknik Dergisi*, *5*(2), 41–48.

176. Bostan, P. (2017). Basic kriging methods in geostatistics. *Yuzuncu Yil University Journal of Agricultural Sciences*, 27(1), 10–20.

177. Bostan, P. A., Heuvelink, G. B. M. ve Akyurek, S. Z. (2012). Comparison of regression and kriging techniques for mapping the average annual precipitation of Turkey. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 19(1), 115–126.

178. Lloyd, C. D. (2005). Assessing the effect of integrating elevation data into the estimation of monthly precipitation in Great Britain. *Journal of Hydrology*, 308(1–4), 128–150.

179. Spadavecchia, L. ve Williams, M. (2009). Can spatio-temporal geostatistical methods improve high resolution regionalisation of meteorological variables? *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(6–7), 1105–1117.

180. Getis, A. (2008). A History of the Concept of Spatial Autocorrelation: A Geographer's Perspective. *Geographical Analysis*, 40(3), 297–309.

181. Hubert, L. J., Golledge, R. G. ve Costanzo, C. M. (1981). Generalized Procedures for Evaluating Spatial Autocorrelation. *Geographical Analysis*, 13(3), 224–233.

182. Tobler, W. R. (1970). A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region. *Economic Geography*, 46, 234.

183. Negreiros, J. G., Painho, M. T., Aguilar, F. J. ve Aguilar, M. A. (2010). A comprehensive framework for exploratory spatial data analysis: Moran location and variance scatterplots. *International Journal of Digital Earth*, 3(2), 157–186.

184. Pereira, G. W., Valente, D. S. M., Queiroz, D. M. de, Coelho, A. L. de F., Costa, M. M. ve Grift, T. (2022). Smart-Map: An open-source QGIS plugin for digital mapping using machine learning techniques and ordinary kriging. *Agronomy*, 12(6), 1350.

185. Chen, Y. (2023). Spatial autocorrelation equation based on Moran's index. *Scientific Reports*, 13(1), 19296.

186. Moran, P. A. (1950). Notes on continuous stochastic phenomena. *Biometrika*, 37(1–2), 17–23.

187. Massie, T. M., Weithoff, G., Kuckländer, N., Gaedke, U. ve Blasius, B. (2015). Enhanced Moran effect by spatial variation in environmental autocorrelation. *Nature Communications*, 6(1), 5993.

188. Moraga, P. (2023). *Spatial Statistics for Data Science: Theory and Practice with R*. CRC Press.

189. QGIS. (2024). QGIS Geographic Information System v3.28. Open Source Geospatial Foundation.

190. Nasser, Z. M., Abedali, A. H. ve Alkanaani, H. A. (2023). Reliability of smart noise pollution map. *Noise Mapping*, 10(1), 1–22.

191. Licata, M., Buleo Tebar, V., Seitone, F. ve Fubelli, G. (2023). The open landslide Project (OLP), a new inventory of shallow landslides for susceptibility models: The autumn 2019 extreme rainfall event in the Langhe-Monferrato Region (Northwestern Italy). *Geosciences*, 13(10), 289.

192. De Caires, S. A., Keshavarzi, A., Leonel Bottega, E. ve Kaya, F. (2024). Towards site-specific management of soil organic carbon: Comparing support vector machine and ordinary kriging approaches based on pedo-geomorphometric factors. *Computers and Electronics in Agriculture*, 216, 108545.

193. Berhanu, K. G., Lohani, T. K. ve Hatiye, S. D. (2024). Spatial and seasonal groundwater quality assessment for drinking suitability using index and machine learning approach. *Heliyon*, 10(9).

194. Berhanu, K. G., Hatiye, S. D. ve Lohani, T. K. (2023). Coupling support vector machine and the irrigation water quality index to assess groundwater quality suitability for irrigation practices in the Tana sub-basin, Ethiopia. *Water Practice & Technology*, 18(4), 884–900.

195. Collaveri, C., Andreini, B. P., Bini, E., Borin, L., Dini, F., Fortunato, S., Grossi, C., Rosato, M. ve Sivieri, B. (2024). Monitoring of NO_2 air pollution in the port of Livorno and spatialization of data. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 17(8), 1629-1643.

196. Isaaks, E. H. ve Srivastava, R. M. (1989). An introduction to applied geostatistics. New York, 561: Oxford University Press.

197. Bezdek, J. C., Ehrlich, R. ve Full, W. (1984). FCM: The fuzzy c-means clustering algorithm. *Computers & Geosciences*, 10(2–3), 191-203.

198. Albornoz, E. M., Kemerer, A. C., Galarza, R., Mastaglia, N., Melchiori, R. ve Martínez, C. E. (2018). Development and evaluation of an automatic software for management zone delineation. *Precision Agriculture*, 19, 463–476.

199. Chen, S., Wang, S., Shukla, M. K., Wu, D., Guo, X., Li, D. ve Du, T. (2020). Delineation of management zones and optimization of irrigation scheduling to improve irrigation water productivity and revenue in a farmland of Northwest China. *Precision Agriculture*, 21, 655–677.

200. Grossi, C. M. ve Murray, M. (1999). Characteristics of carbonate building stones that influence the dry deposition of acidic gases. *Construction and Building Materials*, 13(3), 101–108.

201. Angelini, E., Grassini, S., Parvis, M. ve Zucchi, F. (2019). Corrosion prediction of metallic cultural heritage assets by EIS. *Corrosion Science and Technology*, 18(4), 121–128.

202. Koçak, M., Theodosi, C., Zarmpas, P., Im, U., Bougiatioti, A., Yenigun, O. ve Mihalopoulos, N. (2011). Particulate matter (PM_{10}) in Istanbul: Origin, source areas and potential impact on surrounding regions. *Atmospheric Environment*, 45(38), 6891–6900.

203. Kuzu, S. L. ve Saral, A. (2017). The effect of meteorological conditions on aerosol size distribution in Istanbul. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 10, 1029–1038.



Gazili olmak ayrıcalıktır