T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YEREL İKLİM BÖLGELERİNDE MEKÂNSAL MORFOLOJİ VE KENTSEL SICAKLIK ETKİLEŞİMİNİN YAPAY ZEKÂ DESTEKLİ ANALİZİ: İSTANBUL ÖRNEĞİ

Ahmet KOÇAK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Şehir ve Bölge Planlama Anabilim Dalı

Kentsel Mekân Organizasyonu ve Tasarımı Programı

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Deniz ERDEM OKUMUŞ

Temmuz, 2025

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YEREL İKLİM BÖLGELERİNDE MEKÂNSAL MORFOLOJİ VE KENTSEL SICAKLIK ETKİLEŞİMİNİN YAPAY ZEKÂ DESTEKLİ ANALİZİ: İSTANBUL ÖRNEĞİ

Ahmet KOÇAK tarafından hazırlanan tez çalışması 14.07.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Şehir ve Bölge Planlama Anabilim Dalı, Kentsel Mekân Organizasyonu ve Tasarımı Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Deniz ERDEM OKUMUŞ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Deniz ERDEM OKUMUŞ, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Nilgün Çolpan ERKAN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Fatih TERZİ, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Deniz ERDEM OKUMUŞ sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "Yerel İklim Bölgelerinde Mekânsal Morfoloji ve Kentsel Sıcaklık Etkileşiminin Yapay Zekâ Destekli Analizi: İstanbul Örneği" başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Ahmet KOÇAK

İmza

Geleceğe dair umudu, bilime olan inancı ve gençliğe duyduğu güvenle

Ulu Önderimiz Gazi Mustafa Kemal Atatürk'e

TEŞEKKÜR

Tez sürecim boyunca sahip olduğu bilgi ve birikimle rehberliğini hiç esirgemeyen, eleştirel bakış açısı, vizyoner tutumu ve yönlendirici yapısıyla çalışmamı daima bir adım öteye taşımamı sağlayan saygıdeğer tez danışmanın Dr. Öğr. Üyesi Deniz ERDEM OKUMUŞ'a en içten teşekkürlerimi sunuyorum.

Ayrıca tez süreci boyunca değerli görüşleriyle katkı sunan, yapıcı eleştirileri ve yönlendirici değerlendirmeleriyle tezimin daha nitelikli yapıya gelmesini sağlayan kıymetli jüri üyelerim Prof. Dr. Nilgün Çolpan ERKAN ve Prof. Dr. Fatih TERZİ'ye teşekkürlerimi sunuyorum.

Bu zorlu süreçte bana koşulsuz destek veren ve daima yanımda olduklarını hissettiren değerli aileme - annem Sultan KOÇAK, babam Mehmet KOÇAK, ablam Çiçek ZEYBEK ve kardeşim Emre KOÇAK - göstermiş oldukları sabır, anlayış ve inanç için gönülden minnettarım.

Son olarak, stres dolu bu yolculukta birlikte yol arkadaşlığı yaptığım ve fikirlerimi tartıştığım Mikail KIZILTOPRAK'a ve sahip oldukları teknik donanımla yardımlarını esirgemeyen Mustafa Yağız FIRAT, Merve SARUHAN ve Efsun TOĞRUL'a teşekkür ederim.

Ahmet KOÇAK

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ **ix**

KISALTMA LİSTESİ **x**

ŞEKİL LİSTESİ **xii**

TABLO LİSTESİ **xv**

ÖZET **xvii**

ABSTRACT **xix**

1 GİRİŞ **1**

1.1 Amaç ve Hedefler 4

1.2 Kapsam 4

1.3 Araştırma Soruları ve Hipotezler 6

1.4 Yöntem 7

1.5 Özgün Değer 9

1.6 Yaygın Etki 11

2 KENTSEL ISI ADASI OLGUSU VE MİKRO İKLİMSEL DİNAMİKLER **13**

2.1 Küresel ve Yerel İklim Etkileşimleri: Kentsel Alanlarda Aşırı Isınma Eğilimi 13

2.2 Kent İklimi ve Kentsel Isı Adası Olgusu 18

2.2.1 Kent İklimini Sınıflandırma Sistemleri ve Kentsel Mikro İklim 19

2.2.2 Kentsel Isı Adası Formasyonu 34

2.2.3 Kentsel Isı Adasının Çok Ölçekli Yapısı ve Türleri 36

2.2.4 Kentsel Isı Adası Yoğunluğu Ölçme Yöntemleri……40

2.3 Mekânsal Morfolojik Yapı ve Kentsel Sıcaklık Etkileşimleri 42

2.3.1 Kentsel Yoğunluk……42

2.3.2 Kent Geometrisi……43

2.3.3 Kentsel Vejetasyon……... 47

3 YEREL İKLİM BÖLGELERİNDE MEKÂNSAL MORFOLOJİ VE KENTSEL SICAKLIK ETKİLEŞİMİNİN YAPAY ZEKÂ DESTEKLİ ANALİZ MODELİ 49

3.1 Metodolojik Çerçeve.....49

3.2 Arazi Yüzey Sıcaklığı Ölçümü 51

3.3 Yerel İklim Bölgelerinin Sınıflandırması 56

3.4 LCZ Tipolojilerinde Kentsel Sıcaklık Varyasyonlarının Non-Parametrik Analizi.....58

3.4.1 Kolmogorov-Smirnov Normallik Testi…….58

3.4.2 Kruskal Wallis H Anlamlılık Testi……... 59

3.4.3 Çoklu Karşılaştırma: Post Hoc Bonferroni Testi……..60

3.5 Yerel İklim Bölgelerinde Mekânsal Morfolojik Parametrelerinin Ölçümü.....61

3.5.1 Ortalama Bina Yüksekliği…….62

3.5.2 Bina Yüzey Alanı Oranı……63

3.5.3 Kat Alanı Katsayısı Oranı…….63

3.5.4 Ortalama Bina Hacmi……... 64

3.5.5 Bina Cephe Alanı Oranı……64

3.5.6 Bina Cephe/Hacim Oranı……..65

3.5.7 Açık Alan Oranı……66

3.5.8 Gözeneklilik Oranı……66

3.5.9 Mutlak Pürüzlülük Oranı…….. 67

3.5.10 Normalize Edilmiş Yapılaşma İndeksi……67

3.5.11 Normalize Edilmiş Bitki Örtüsü İndeksi……..……67

3.6 Z-Skor Normalizasyonu 68

3.7 Extreme Gradient Boosting Regresyon Modeli 68

3.8 SHAP Analizi..... 70

3.9 Model Doğrulaması..... 71

4 İSTANBUL YEREL İKLİM BÖLGELERİNDE MEKÂNSAL MORFOLOJİ VE KENTSEL SICAKLIK ETKİLEŞİMİ 73

4.1 İstanbul'un Mekânsal Özellikleri ve İklimsel Yapısı 73

4.2 İstanbul'da Arazi Yüzey Sıcaklığı Dağılımı 76

4.3 İstanbul Yerel İklim Bölgeleri 80

4.4 İstanbul Yerel İklim Bölgelerindeki Isı Adası Yoğunluğu 97

4.4.1 Kolmogorov-Smirnov Normallik Testi Sonuçları…….. 102

4.4.2 Kruskal Wallis H Anlamlılık Testi Sonuçları……104

4.4.3 Çoklu Karşılaştırma: Post Hoc Bonferroni Testi Sonuçları……107

4.5 İstanbul Yerel İklim Bölgeleri'nde Mekânsal Morfolojik Yapı 109

4.5.1 Ortalama Bina Yüksekliği……...109

4.5.2 Bina Yüzey Alanı Oranı……..110

4.5.3 Kat Alanı Katsayısı Oranı……...111

4.5.4 Ortalama Bina Hacmi……. 112

4.5.5 Bina Cephe Alanı Oranı……..113

4.5.6 Bina Cephe/Hacim Oranı……114

4.5.7 Açık Alan Oranı……..115

4.5.8 Gözeneklilik Oranı……..116

4.5.9 Mutlak Pürüzlülük Oranı…… 117

4.5.10 Normalize Edilmiş Yapılaşma İndeksi……..……118

4.5.11 Normalize Edilmiş Bitki Örtüsü İndeksi……..…….....119

4.6 İstanbul'da Mekânsal Morfoloji ile Kentsel Sıcaklık Varyasyonları Arasındaki Lineer ve Lineer Olmayan Nicel İlişki.....122

4.6.1 XGBoost Regresyon Modeli Sonuçları…….. 122

4.6.2 SHAP Analizi Sonuçları……. 127

4.6.3 Model Doğrulama Sonuçları: Hata Metriklerinin Mekânsal Dağılımı. 151

5 SONUÇ **159**

KAYNAKÇA **167**

A MEKANSAL MORFOLOJİ ANALİZLERİ **182**

B ÇOKLU KARŞILAŞTIRMA: POST HOC BONFERRONİ TESTİ SONUÇLARI **188**

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **199**

SİMGE LİSTESİ

p	Anlamlılık Düzeyi
Q1	Birinci Çeyrek
IQR	Çeyrekler Arası Aralık
Δ	Değişim/Fark
m	Metre (Uzunluk/Yükseklik Birimi)
µm	Mikrometre (Dalga Boyu Birimi)
°C	Santigrat (Sıcaklık Birimi)
df	Serbestlik Derecesi
Σ	Toplam
Q3	Üçüncü Çeyrek

KISALTMA LİSTESİ

ABH	Ortalama Bina Yüksekliği
ABV	Ortalama Bina Hacmi
AR	En/Boy Oranı
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
BMİDÇS	Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi
BSF	Bina Yüzey/Taban Alanı Oranı
CBS	Coğrafi Bilgi Sistemleri
ENVISAT	Environmental Satellite
FAR	Kat Alanı Katsayısı Oranı
FSR	Bina Cephe Oranı
FVR	Bina Cephe Hacim Oranı
HCMM	Heat Capacity Mapping Mission
HRE	Pürüzlülük Elemanlarının Yüksekliği
IPCC	Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli
ISF	Geçirimsiz Yüzey Oranı
LANDSAT	Land Satellite
LCZ	Yerel İklim Bölgeleri
LST	Arazi Yüzey Sıcaklığı
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NDBI	Normalize Edilmiş Yapılaşma İndeksi
NDVI	Normalize Edilmiş Bitki Örtüsü İndeksi
OLI	Operational Land Imager
OSR	Açık Alan Oranı
Po	Gözeneklilik Oranı
PSF	Geçirimli Yüzey Oranı
RCP	Representative Concentration Pathways

RBL	Kentsel Sınır Katmanı
RU	Mutlak Pürüzlülük Oranı
SHAP	Shapley Additive Explanations
SSP	Paylaşılan Sosyo-Ekonomik Yollar
SUHI	Yüzey Kentsel Isı Adası
SVF	Gökyüzü Görünürlük Faktörü
TIMS	Thermal Infrared Multispectral Scanner
TRC	Arazi Pürüzlülük Sınıfı
UBL	Kentsel Sınır Katmanı
UCL	Kentsel Örtü Katmanı
UCZ	Kentsel İklim Bölgeleri
UHI	Kentsel Isı Adası
UTZ	Kentsel Arazi Bölgeleri
WUDAPT	Dünya Kentsel Veritabanı ve Erişim Portalı Araçları
XGBoost	Extreme Gradient Boosting

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Yöntem şeması **8**

Şekil 2.1 2024 yılına ait anomali yüzey sıcaklığı (a) ve anomali okyanus sıcaklığı (b) **15**

Şekil 2.2 2024 yılına ait güçlü ısı stresinin görüldüğü toplam gün sayısı (a) ve anomali değerlerin görüldüğü gün sayısı (b) **16**

Şekil 2.3 RCP 4.5 senaryosu kapsamında 2025-2040 döneminde meydana gelen sıcaklık artışının küresel ölçekte dağılımı **17**

Şekil 2.4 Oke'nin kentsel iklim bölgeleri sınıflandırma sistemi **24**

Şekil 2.5 Yerel iklim bölgeleri (LCZ) **30**

Şekil 2.6 Atmosferik ve yüzey sıcaklığının kentsel ve kırsal alanlardaki gece ve gündüz vakitlerindeki değişimi **35**

Şekil 2.7 Kentsel ısı adası ölçekleri: mezo ölçek (a), yerel ölçek (b), mikro ölçek(c) **37**

Şekil 2.8 Gökyüzü görünürlük faktörü (SVF) **44**

Şekil 2.9 Kanyon geometrisi **45**

Şekil 2.10 Sokak kanyonlarında meydana gelen enerji dengesi **46**

Şekil 2.11 Ratti vd., (2003) tarafından incelenen 6 kentsel form **47**

Şekil 3.1 Yerel iklim bölgelerinde mekânsal morfoloji ve kentsel sıcaklık etkileşiminin yapay zeka destekli analiz modeli (ISF: Geçirimsiz yüzey oranı, PSF: Geçirimli yüzey oranı, BSF: Bina yüzey/taban alanı oranı, HRE: Pürüzlülük elemanlarının yüksekliği, ABH: Ortalama bina yüksekliği, FAR: Kat Alanı Katsayısı Oranı, ABV: Ortalama bina hacmi, FSR: Bina cephe alanı oranı, FVR: Bina cephe hacim oranı, OSR: Açık alan oranı, Po: Gözeneklilik oranı, RU: Mutlak pürüzlülük oranı, NDVI: Normalize edilmiş bitki örtüsü indeksi, NDBI: Normalize edilmiş yapılaşma indeki) **50**

Şekil 3.2 Mekânsal morfoloji parametreler (NDVI ve NDBI uzaktan algılma indeksi olup yukarıda şema üzerinde gösterilmemiştir) **62**

Şekil 4.1 İstanbul'un Türkiye'deki konumu (a), Marmara Bölgesi'ndeki konumu (b) ve 2024 yılına ait arazi örtüsü (c) **74**

Şekil 4.2 23 Temmuz 2022 tarihine ait İstanbul arazi yüzey sıcaklığı haritası **78**

Şekil 4.3 23 Temmuz 2022 tarihine ait İstanbul sıcaklık anomali haritası **79**

Şekil 4.4 İstanbul'da yerel iklim bölgeleri mekansal dağılımı, Arnavutköy (a), Beylikdüzü (b), Bağcılar-Bahçelievler (c), Fatih-Beyoğlu (d), Sarıyer-Beykoz Boğaz Hattı (e), Ataşehir (f), Sancaktepe (g), Pendik (h) **81**

Şekil 4.5 İstanbul kent merkezi ve boğaz hattı yerel iklim bölgeleri **83**

Şekil 4.6 İstanbul Avrupa Yakası Küçükçekmece Gölü ve Sazlıdere Barajı yerel iklim bölgeleri **84**

Şekil 4.7 İstanbul Anadolu Yakası Ömerli Barajı ve Çevresi yerel iklim bölgeleri **85**

Şekil 4.8 LCZ 1, LCZ 2, LCZ 3, ve LCZ 4 tipolojileri örnek kent dokusu..... **92**

Şekil 4.9 LCZ 4E, LCZ 5, LCZ 5E, ve LCZ 6 tipolojileri örnek kent dokusu..... **93**

Şekil 4.10 LCZ 6E, LCZ 8, LCZ 9, ve LCZ 9A tipolojileri örnek kent dokusu ... **94**

Şekil 4.11 LCZ 9E, LCZ 9F ve LCZ 10 tipolojileri örnek kent dokusu **95**

Şekil 4.12 Arazi örtüsü tipolojilerine ait örnek dokular **96**

Şekil 4.13 Yerel iklim bölgelerindeki kentsel ısı adası yoğunluğu **97**

Şekil 4.14 Kentsel sıcaklık değerlerine ait histogram grafiği..... **104**

Şekil 4.15 LCZ tipolojilerindeki kentsel sıcaklık değerlerinin dağılımına ait kutu grafiği..... **105**

Şekil 4.16 Ortalama bina yüksekliği değerlerine ait histogram grafiği..... **110**

Şekil 4.17 Ortalama bina yüzey alanı değerlerine ait histogram grafiği **111**

Şekil 4.18 Ortalama kat alanı katsayısı değerlerine ait histogram grafiği..... **112**

Şekil 4.19 Ortalama bina hacmi değerlerine ait histogram grafiği..... **113**

Şekil 4.20 Ortalama bina cephe alanı değerlerine ait histogram grafiği **114**

Şekil 4.21 Ortalama bina cephe/hacim oranı değerlerine ait histogram grafiği .. **115**

Şekil 4.22 Ortalama açık alan oranı değerlerine ait histogram grafiği..... **116**

Şekil 4.23 Ortalama gözeneklilik oranı değerlerine ait histogram grafiği **117**

Şekil 4.24 Ortalama mutlak pürüzlülük oranı değerlerine ait histogram grafiği. **118**

Şekil 4.25 Ortalama NDBI değerlerine ait histogram grafiği..... **119**

Şekil 4.26 Ortalama NDVI değerlerine ait histogram grafiği **120**

Şekil 4.27 Mekânsal morfoloji parametrelerine ait analizler **121**

Şekil 4.28 XGBoost regresyon modelinde mekânsal morfoloji parametrelerinin kentsel sıcaklık değerleri üzerindeki önem düzeyleri..... **126**

Şekil 4.29 Global ortalama mutlak SHAP değerleri..... **128**

Şekil 4.30 Yerel SHAP değerleri..... **130**

Şekil 4.31 NDBI SHAP bağımlılık grafiği..... **132**

Şekil 4.32 NDVI SHAP bağımlılık grafiği..... **134**

Şekil 4.33 BSF SHAP bağımlılık grafiği..... **136**

Şekil 4.34 ABV SHAP bağımlılık grafiği **139**

Şekil 4.35 FVR SHAP bağımlılık grafiği **141**
Şekil 4.36 FSR SHAP bağımlılık grafiği **142**
Şekil 4.37 ABH SHAP bağımlılık grafiği **145**
Şekil 4.38 FAR SHAP bağımlılık grafiği **147**
Şekil 4.39 Po SHAP bağımlılık grafiği **149**
Şekil 4.40 RU SHAP bağımlılık grafiği **150**
Şekil 4.41 OSR SHAP bağımlılık grafiği **150**
Şekil 4.42 MAE hata değerlerinin mekânsal dağılımı **152**
Şekil 4.43 MAPE hata değerlerinin mekânsal dağılımı **153**
Şekil 4.44 RMSE hata değerlerinin mekânsal dağılımı **154**
Şekil 4.45 LCZ tipolojilerine ait MAE histogram grafikleri **155**
Şekil 4.46 LCZ tipolojilerine ait MAPE histogram grafikleri **156**
Şekil 4.47 LCZ tipolojilerine ait RMSE histogram grafikleri **157**
Şekil A.1 Ortalama bina yüksekliği oranı (BSF) **182**
Şekil A.2 Bina yüzey alanı oranı (BSF) **182**
Şekil A.3 Kat alanı katsayısı oranı (FAR) **183**
Şekil A.4 Ortalama bina hacmi oranı (ABV) **183**
Şekil A.5 Bina cephe alanı oranı (FSR) **184**
Şekil A.6 Bina cephe hacim oranı (FVR) **184**
Şekil A.7 Açık alan oranı (OSR) **185**
Şekil A.8 Gözeneklilik oranı (Po) **185**
Şekil A.9 Mutlak pürüzlülük oranı (RU) **186**
Şekil A.10 Normalize edilmiş yapılaşma indeksi (NDBI) **186**
Şekil A.11 Normalize edilmiş bitki örtüsü indeksi (NDVI) **187**

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Auer'in iklime dayalı sınıflandırma bölgeleri **21**

Tablo 2.2 Kentsel arazi bölgeleri sınıflandırması. **23**

Tablo 2.3 Kentsel iklim bölgeleri (UCZ) sınıflandırma sistemi parametreleri **25**

Tablo 2.4 Yerel iklim bölgeleri (LCZ) sınıflandırma sistemi parametreleri **31**

Tablo 2.5 Yerel iklim bölgelerine (LCZ) ait ısıl, ışınımsal ve metabolik özellik değerleri **32**

Tablo 3.1 Landsat-8 uydu görüntüsüne ait bantların özellikleri **51**

Tablo 3.2 Yerel iklim bölgelerinin sınıflandırma parametrelerinin ölçümü **56**

Tablo 4.1 23 Temmuz 2022 tarihine ait Landsat-8 uydu görüntüsü bilgileri **77**

Tablo 4.2 İstanbul'da sıcaklık anomalisinin etki düzeylerine göre dağılımı (°C) **80**

Tablo 4.3 İstanbul'da yerel iklim bölgelerinin alansal dağılımı **82**

Tablo 4.4 İstanbul yerel iklim bölgelerine ait kentsel sıcaklık değerleri **98**

Tablo 4.5 Standart LCZ tipolojileri ve alt LCZ tipolojileri arasındaki sıcaklık farklılıkları **101**

Tablo 4.6 Kolmogorov-Smirnov Normallik Testi sonuçları **102**

Tablo 4.7 Kolmogorov-Smirnov Normallik Testi istatistik değerleri **103**

Tablo 4.8 Kruskal Wallis Anlamlılık Testi sonuçları **105**

Tablo 4.9 Çoklu Karşılaştırma Post Hoc Bonferroni Testi sonuçları (anlamlılık düzeyi en yüksek ilk 10 grup verilmiştir) **108**

Tablo 4.10 LCZ tipolojilerindeki ortalama bina yüksekliği değerleri **109**

Tablo 4.11 LCZ tipolojilerindeki ortalama bina yüzey alanı değerleri **110**

Tablo 4.12 LCZ tipolojilerindeki ortalama kat alanı kat sayısı değerleri **111**

Tablo 4.13 LCZ tipolojilerindeki ortalama bina hacmi değerleri **112**

Tablo 4.14 LCZ tipolojilerindeki ortalama bina cephe alanı değerleri **113**

Tablo 4.15 LCZ tipolojilerindeki ortalama bina cephe/hacim oranı değerleri **114**

Tablo 4.16 LCZ tipolojilerindeki ortalama açık alan oranı değerleri **115**

Tablo 4.17 LCZ tipolojilerindeki ortalama gözeneklilik oranı değerleri **116**

Tablo 4.18 LCZ tipolojilerindeki ortalama mutlak pürüzlülük oranı değerleri **117**

Tablo 4.19 LCZ tipolojilerindeki ortalama NDBI değerleri **118**

Tablo 4.20 LCZ tipolojilerindeki ortalama NDVI değerleri **120**

Tablo 4.21 XGBoost regresyon modeline ait hiperparametre değerleri **123**

Tablo 4.22 XGBoost regresyon modeline ait performans göstergeleri..... **124**

Tablo 4.23 XGBoost regresyon modelinde mekânsal morfoloji parametrelerinin kentsel sıcaklık değerleri üzerindeki önem düzeyleri..... **125**

Tablo 4.24 LCZ tipolojilerine ait MAE, MAPE ve RMSE hata değerleri..... **158**

Tablo B.1 Çoklu Karşılaştırma Bonferroni Testi Sonuçları..... **188**

ÖZET

Yerel İklim Bölgelerinde Mekânsal Morfoloji ve Kentsel Sıcaklık Etkileşiminin Yapay Zekâ Destekli Analizi: İstanbul Örneği

Ahmet KOÇAK

Şehir ve Bölge Planlama Anabilim Dalı
Kentsel Mekân Organizasyonu ve Tasarımı Programı
Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Deniz ERDEM OKUMUŞ

Son yıllarda, kentsel nüfus artışıyla birlikte ortaya çıkan kentsel yayılma ve kent merkezlerindeki yoğunlaşmaya bağlı olarak değişen arazi örtüsü ve mekânsal morfolojik yapı, kentsel ısı adası etkisinin yoğunlaşmasına ve kentsel aşırı ısınma eğilimine neden olmaktadır. Kentlerin mikro iklimsel yapısında meydana gelen bu değişimler, büyük ölçüde kentlerin mekânsal morfolojik özelliklerden etkilenmektedir. Bu bağlamda, mekânsal morfoloji temelli sınıflandırmalar sunan yerel iklim bölgeleri (LCZ), kentsel alanlarda mikroklimatik açıdan farklılaşan kentsel formları ve bu formların kentsel sıcaklık üzerindeki etkilerinin belirlenmesi açısından etkili bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır. Bu kapsamda ortaya koyulan tez çalışması, yerel iklim bölgeleri bağlamında mekânsal morfolojik özellikler ile kentsel sıcaklık varyasyonları arasındaki etkileşimi yapay zekâ tabanlı modelleme ile ortaya koymayı amaçlamaktadır. Bu amaç doğrultusunda, kentsel sıcaklığın mekânsal dağılımını anlamak, mekânsal morfolojik özelliklere bağlı olarak mikro ölçekte farklılaşan yerel iklim bölgelerini tespit etmek, yerel iklim bölgelerindeki

sıcaklık varyasyonlarını belirlemek, kentsel sıcaklık ile mekânsal morfolojik özellikler arasındaki ilişkinin analizine yönelik yapay zekâ tabanlı bir model ortaya koymak ve kentsel sıcaklığın azaltımına ilişkin tasarım kodları tanımlamak şeklinde hedefler belirlenmiştir. Söz konusu amaç ve hedefler doğrultusunda tez çalışması beş aşamadan oluşan bir metodolojik çerçeve izlemiştir: (1) kentsel sıcaklıkları temsilen arazi yüzey sıcaklığının (LST) haritalanması, (2) yerel iklim bölgelerinin sınıflandırılması, (3) yerel iklim bölgelerindeki kentsel sıcaklık değerlerinin hesaplanması ve sıcaklık değerleri bakımından anlamlı farklılık gösteren LCZ tipolojilerinin belirlenmesi, (4) En yüksek anlamlı farklılık düzeyine sahip LCZ tipolojilerinde mekânsal morfoloji parametrelerinin ölçülmesi (5) XGBoost ve SHAP algoritmaları kullanılarak mekânsal morfolojik yapı ile kentsel sıcaklık değerleri arasındaki lineer ve lineer olmayan ilişkilerin ortaya koyulmasıdır. Tez çalışması kapsamında, kentsel sıcaklık değerlerini temsilen 23 Temmuz 2022 tarihine ait Landsat-8 uydu görüntüsünden üretilen LST değerleri kullanılmıştır. Elde edilen bulgular, İstanbul'daki LCZ tipolojilerinin kentsel sıcaklık değerleri bakımından anlamlı farklılıklara sahip olduğunu ortaya koymuştur. Yüksek anlamlı farklılık gösteren LCZ tipolojileri kapsamında yapılan XGBoost ve SHAP analizleri ise NDBI ve NDVI parametrelerinin kentsel sıcaklıklar üzerinde en yüksek etkiye sahip parametreler olduğunu göstermiştir. SHAP bağımlılık grafikleri doğrultusunda ise mekânsal morfolojik parametrelerin kentsel sıcaklık değerleri üzerinde hem lineer (NDBI, BSF) hem de lineer olmayan (NDVI, ABV, BSF, FAR Po, RU, OSR, FSR, FVR) etkilere sahip olduğu belirlenmiştir. Bu tez çalışması, kentsel sıcaklık ve mekânsal morfoloji arasındaki ilişkiyi yalnızca lineer varsayımlar üzerinden değerlendirmekle kalmayıp lineer olmayan ilişkileri de ortaya koyarak kentsel sıcaklıkların azaltımına ilişkin daha hassas ve bağlama özgü stratejik mekânsal kararların geliştirilmesine ışık tutmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kentsel sıcaklık, mekânsal morfoloji SHAP, XGBoost, yerel iklim bölgeleri.

ABSTRACT

AI-Assisted Analysis of Urban Heat and Spatial Morphology in Local Climate Zones: The Case of Istanbul

Ahmet KOÇAK

Department of City and Regional Planning
Master of Science Thesis

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Deniz ERDEM OKUMUŞ

In recent years, urban sprawl and concentration in city centers, which have emerged alongside urban population growth, have led to changes in land cover and spatial morphological structure, causing the urban heat island effect to intensif and leading to a trend toward urban overheating. These changes in the microclimatic structure of cities are largely influenced by the spatial morphological characteristics of cities. In this context, local climate zones (LCZ), which offer spatial morphology-based classifications, In this context, local climate zones (LCZ), which offer spatial morphology-based classifications, emerge as an effective approach for determining the microclimatically differentiated urban forms in urban areas and the effects of these forms on urban temperature. The thesis study presented in this context aims to reveal the interaction between spatial morphological characteristics and urban temperature variations within the context of local climate zones using artificial intelligence-based modeling. To this end, the objectives are to understand the spatial distribution of urban heat, identify local climate zones that vary at the micro scale depending on spatial morphological characteristics, determine temperature variations in local climate zones, develop an artificial intelligence-based model for analyzing the relationship between urban temperature and spatial morphological

characteristics, and define design codes for reducing urban temperature. In line with these objectives and goals, the thesis study followed a methodological framework consisting of five stages: (1) mapping land surface temperature (LST) to represent urban temperatures, (2) classifying local climate zones, (3) calculating urban temperature values in local climate zones and identifying LCZ typologies that show significant differences in temperature values, (4) Measuring spatial morphological parameters in LCZ typologies with the highest level of significant differences, (5) Revealing linear and non-linear relationships between spatial morphological structure and urban temperature values using XGBoost and SHAP algorithms. As part of the thesis study, LST values generated from Landsat-8 satellite imagery dated July 23, 2022, were used to represent urban temperature values. The findings revealed that LCZ typologies in Istanbul exhibit significant differences in terms of urban temperature values. XGBoost and SHAP analyses conducted on LCZ typologies showing high significant differences indicated that the NDBI and NDVI parameters have the highest impact on urban temperatures. According to SHAP dependency graphs, spatial morphological parameters were found to have both linear (NDBI, BSF) and non-linear (NDVI, ABV, BSF, FAR Po, RU, OSR, FSR, FVR) effects on urban temperature values. This thesis study not only evaluates the relationship between urban temperature and spatial morphology based on linear assumptions but also reveals non-linear relationships, thereby shedding light on the development of more precise and context-specific strategic spatial decisions regarding the reduction of urban temperatures.

Keywords: Local climate zones, SHAP, spatial morphology, urban heat, XGBoost

1
GİRİŞ

Dünya genelinde meydana gelen hızlı ve kontrolsüz nüfus artışı, beraberinde kentleşme eğiliminin de artmasına yol açmaktadır. Mevcut demografik göstergeler incelendiğinde küresel nüfusun 2050 yılında 9.8 milyar kişiye yükseleceği ve bu nüfusun yaklaşık %65'inin ise kentsel alanlarda yaşayacağı tahmin edilmektedir (Bhowmick vd., 2023; Punia & Singh, 2012). Artış trendinde olan küresel nüfusun kentlerde yoğunlaşma eğilimi; arazi yüzey özelliklerinin değişmesine, tüketim eğiliminin artmasına, doğal ekosistemlerin tahrip edilmesine ve insan faaliyetleri sonucunda atmosferdeki sera gazı salımlarının artmasına neden olmaktadır. Kentsel alanlarda yaşanan bu tür olumsuz gelişmeler, küresel ölçekte iklim değişikliği ve küresel ısınma süreçlerini tetikleyerek geri döndürülemez sonuçlara yol açmaktadır. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) tarafından yayımlanan raporlarda, gelecekteki küresel ısınma eğiliminin büyük ölçüde sera gazı emisyonlarının düzeyine ve net CO_2 salımlarına bağlı olarak şekilleneceği vurgulanmaktadır (IPCC, 2023). 2081-2100 dönemi için öngörülen küresel sıcaklık artışının çeşitli emisyon senaryolarına göre 1.4°C (çok düşük emisyon senaryosu: SSP1-1.9) ile 4.4°C (çok yüksek emisyon senaryosu: SSP5-8.5) aralığında değişeceği ve mevcut politika eğilimlerinin devam etmesi durumunda ise 2100 yılına kadar küresel ortalama sıcaklık artışının 3.2°C düzeyine ulaşacağı tahmin edilmektedir (IPCC, 2023). Küresel ısınmanın 3°C düzeyine çıkması durumunda, endemik türlerin yok olması, biyolojik çeşitliliğin azalması, ekonomik sektörlerin değişmesi, aşırı iklim olaylarının görülmesi, su kıtlığının yaşanması ve yangın riskinin artması gibi çeşitli olumsuz etkilerin görülmesi beklenmektedir (IPCC, 2023).

Dünya genelinde artan sıcaklık eğilimi yalnızca küresel iklim sistemlerini değil aynı zamanda kentlerin mikro iklimsel yapılarını da etkilemektedir. Özellikle,

yoğun yapılaşmış kentsel alanlarda, arazi yüzey örtüsünün değişmesi, antropojenik faaliyetlerin yoğunlaşması, bitki örtüsü oranının azalması ve geçirimsiz yüzeylerin artması gibi meydana gelen olumsuz etkiler, kentsel alanlarda enerji dengesini ve atmosferin yapısını değiştirerek önemli çevresel sorunlardan biri olan kentsel ısı adasına neden olmaktadır. (Bhowmick vd., 2023; Quan, 2019; Y. Zhang vd., 2021; Y. Zheng vd., 2018). Kentsel ısı adası olgusu genel olarak kent merkezlerinde, çevrelerindeki kırsal alanlara oranla daha yüksek sıcaklıkların gözlemlenmesi olarak tanımlanmaktadır (Oke, 1973; Oke & Maxwell, 1975). Kentsel ve kırsal alanlardaki sıcaklık farkıyla karakterize edilen bu olgu, özellikle yaz aylarında, düşük rüzgâr hızı, düşük bulut örtüsü ve açık gökyüzü koşullarında en yüksek etkisini göstermektedir (Oke & Maxwell, 1975). İklim değişikliğiyle birlikte kentsel ısı adasının maksimum etkisini gösterdiği koşulların artması, ısı adası etkilerinin de görülme sıklığını arttırarak kentsel alanlarda aşırı ısınmaya neden olmaktadır. Kentsel ısı adası ile küresel ısınmanın kent iklimi üzerindeki etkileriyle oluşan kentsel aşırı ısınma eğilimi, özellikle yoğun yapılaşmış kentlerdeki enerji dengesini değiştirerek mikroklimatik koşulları etkilemektedir (Santamouris vd., 2015; World Bank, 2024).

Kentsel ısı adası kapsamında yapılan araştırmalar genellikle ısı adası etkisini "kent-kır" ayrımı üzerinden incelemiş ve kentlerin hem üç boyutlu yapısını hem de mekânsal heterojenliğini göz ardı etmiştir. Ancak, bu bakış açısı kentsel ısı adası olgusunun mekânsal dağılımının kapsamlı bir şekilde incelenmesini kısıtlamıştır (Duckworth & Sandberg, 1954; C. Wang vd., 2024). Bu kapsamda hem kentsel ısı adası sorununu ele alan hem de kentsel ve kırsal alanlar arasındaki karmaşıklığı çözümlemeyi amaçlayan yeni bir sınıflandırma sistemi geliştirilmiştir. Kentsel morfoloji ve arazi örtüsü farklılıklarını dikkate alan "yerel iklim bölgeleri (LCZ) sınıflandırma sistemi" kentsel ısı adası incelemelerine daha ayrıntılı bir çerçeve sunmaktadır (Stewart & Oke, 2012). Bu sınıflandırma sistemi 10 adet kentsel morfoloji tipi (LCZ 1-10) ve 7 adet arazi örtüsü tipi (LCZ A-G) olmak üzere toplamda 17 farklı standart sınıftan oluşmaktadır (Stewart & Oke, 2012). Kentsel morfoloji ve kentsel ısı adası etkisi arasındaki ilişkiyi karşılaştırmalı olarak daha ayrıntılı bir şekilde incelemeye imkan veren yerel iklim bölgeleri, farklı ölçeklerdeki kentlere uygulanabilir olması bakımından evrensel nitelik taşımaktadır (Duckworth & Sandberg, 1954).

Kentsel ısı adasına neden olan parametrelerin ele alındığı çalışmalarda her ne kadar arazi kullanım değişikliği ve iklim bileşenleri üzerine yoğunlaşılmış olsa da mekânsal morfolojik yapının da kentsel ısı adası etkisi üzerinde belirleyici rol oynadığı bilinmektedir (Güller & Toy, 2024; Karimimoshaver vd., 2021). Özellikle kentlerin fiziksel yapısı ve mekânsal organizasyonu kapsamında değerlendirilen bina yüksekliği, bina yoğunluğu, bina hacmi, açık alan oranı, bina cephe alanı oranı, yüzey özellikleri ve bitki örtüsü oranı gibi parametreler, güneş radyasyonunun erişimi, absorbe edilmesi, depolanması ve ısı salımı gibi mikroklimatik süreçleri etkileyerek kentsel mikro iklimlerin değişmesine neden olmaktadır (Chatzipoulka vd., 2015; Güller & Toy, 2024). Söz konusu parametreler, kentsel mekânın iki ve üç boyutlu yapısını değiştirerek yüzey sıcaklıklarında belirgin farklılaşmalara neden olmakta ve kentsel ısı adası oluşumuna katkıda bulunmaktadır. Bu durum, mekânsal morfolojik yapı ile kentsel sıcaklık arasındaki mikro ölçekli ilişkinin anlaşılmasını gerekli kılmaktadır.

İstanbul, gelişmiş ekonomik yapısı ve yoğun nüfusuyla birlikte hızla büyüyen bir kenttir (Ünal vd., 2020). İstanbul'un plansız yapılaşma süreci ve uygulanan kentleşme politikaları, kentin arazi kullanımında belirgin değişiklere neden olmuş ve doğal yüzeyler tahrip edilerek yerini kentsel yüzeylere bırakmıştır. Bu durum, iklim değişikliği ve küresel ısınmanın etkileriyle birlikte düşünüldüğünde yüksek kentsel sıcaklıkların mekânsal dağılımını arttıracağı tahmin edilmektedir. Kentin iklimsel göstergeleri incelendiğinde, ortalama sıcaklıkların artış trendinde olduğu dikkat çekmektedir. 2024 yılı itibariyle 16.3°C'ye yükselen ortalama sıcaklık, 1980 yılı ortalamasının 1.6°C üzerine çıkmıştır (Meteoblue, 2024). RCP'nin 2096 yılı için öngördüğü sıcaklık projeksiyonları incelendiğinde ise kentte görülen sıcaklık değerlerinin artacağını vurgulamaktadır (İBB, 2021).

Geliştirilen senaryolar, İstanbul'un gelecekte yüksek sıcaklıklara maruz kalacağını ve görülen anomali sıcaklık değerlerinin artacağını belirtmektedir. Bu durum, İstanbul'da küresel ısınma eğilimi ve kentsel ısı adası etkisiyle birlikte meydana gelen yüksek sıcaklıkların azaltımına yönelik uygulanabilir mekânsal müdahalelerin gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu kapsamda tez çalışması, İstanbul özelinde yerel iklim bölgeleri sınıflandırmasını temel alarak kentsel sıcaklıkların mekânsal dağılımını ortaya koymakta ve mekânsal morfolojik özelliklerin kentsel sıcaklıklar üzerindeki etkisini analiz etmektedir.

1.1 Amaç ve Hedefler

Tez çalışması, yerel iklim bölgeleri bağlamında mekânsal morfolojik özellikler ile kentsel sıcaklık dağılımı arasındaki etkileşimi yapay zekâ tabanlı modelleme ile ortaya koymayı amaçlamaktadır. Bu doğrultuda, (1) kentsel sıcaklığın mekânsal dağılımını anlamak, (2) mekânsal morfolojik özelliklere bağlı olarak mikro ölçekte farklılaşan yerel iklim bölgelerini tespit etmek, (3) yerel iklim bölgelerindeki sıcaklık varyasyonlarını belirlemek, (4) kentsel sıcaklık ile mekânsal morfolojik özellikler arasındaki ilişkinin analizine yönelik yapay zekâ tabanlı bir model ortaya koymak ve (5) kentsel sıcaklığın azaltımına ilişkin tasarım kodları tanımlamak şeklinde hedefler belirlenmiştir.

1.2 Kapsam

Tez çalışması, İstanbul örnek alanı üzerinden yerel iklim bölgeleri bağlamında mekânsal morfolojik özellikler ile kentsel sıcaklık arasındaki niceliksel ilişkiyi çok boyutlu istatistiksel yöntemlerle analiz etmektedir. Bu doğrultuda çalışma beş ana bölümde ele alınmıştır.

Tez çalışmasının birinci bölümünde, araştırmanın genel hatları çizilerek çalışmanın amacı ve hedefleri tanımlanmaktadır. Söz konusu amaç ve hedefler doğrultusunda, çalışmanın kapsamı belirlenmekte ve araştırmanın dayandığı güncel problem, araştırma soruları ve hipotezlerle birlikte sistematik bir şekilde ortaya koyulmaktadır. Ardından, araştırma sorularının cevaplanması ve hipotezlerin test edilmesi amacıyla izlenen yöntemsel çerçeve genel hatlarıyla açıklanmaktadır. Son olarak ise araştırmanın bilimsel açıdan sahip olduğu özgün değeri ve yaygın etkisi aktarılmaktadır.

Tez çalışmasının ikinci bölümünde, literatür araştırması yapılarak kavramsal çerçeve sunulmaktadır. Bu kapsamda, ilk olarak küresel kriz olarak iklim değişikliği ve küresel ısınma eğilimi ele alınmakta ve bu olguların kentsel alanlarda neden olduğu kentsel aşırı ısınma kavramı üzerinde durulmaktadır. Ardından, kent ikliminin genel yapısı, mikro iklimsel özellikleri ve kent ikliminin sınıflandırılmasına yönelik geliştirilen sistemler detaylı bir şekilde incelenerek yerel iklim bölgelerine değinilmektedir. Daha sonra, yoğun yapılaşmış kentsel alanlardaki mikro iklimsel yapının değişimine neden olan kentsel ısı adası olgusu

ele alınmakta; bu olgunun farklı iklimsel ölçeklerdeki yansımaları, tanımı, oluşum mekanizmaları, türleri ve ölçüm yöntemleri açıklanmaktadır. Son olarak ise kentsel ısı adası olgusunu etkileyen kentsel yoğunluk, kent geometrisi ve kentsel vejetasyon parametreleri sistematik bir şekilde ortaya koyulmaktadır.

Tez çalışmasının üçüncü bölümünde, yerel iklim bölgelerindeki mekânsal morfoloji ve kentsel sıcaklık arasındaki niceliksel ilişkinin ortaya koyulmasına yönelik olarak tasarlanan araştırma modeli ayrıntılı bir şekilde açıklanmaktadır. Bu bağlamda araştırmada kullanılan bağımlı ve bağımsız değişkenler belirlenerek söz konusu değişkenlerin ölçümüne yönelik olarak kullanılan matematiksel yöntemler tanımlanmaktadır. Bu doğrultuda, ilk olarak kentsel sıcaklık değerlerini temsilen arazi yüzey sıcaklığı haritalanmış ve mikro ölçekte mekânsal morfoloji özelliklerinin farklılaşmasıyla oluşan yerel iklim bölgeleri sınıflandırılmıştır. Ardından, yerel iklim bölgelerindeki sıcaklık varyasyonlarının tespit edilmesine yönelik non-parametrik analizler yapılmıştır. Veri setinin istatistiksel olarak geçerliliğini sağlamak ve normal dağılıma uygunluk durumunu tespit etmek için Kolmogorov Smirnov Normallik Testi, yerel iklim bölgeleri ile kentsel sıcaklık değerleri arasındaki anlamlılık düzeyini ortaya koymak amacıyla Kruskal Wallis H Anlamlılık Testi ve hangi yerel iklim bölgeleri arasında anlamlı farklılıkların olduğunu ortaya koymak için ise Çoklu Karşılaştırma Post Hoc Bonferroni Testi uygulanmıştır. Bu test doğrultusunda anlamlı farklılık düzeyi en yüksek olan yerel iklim bölgelerinde mekânsal morfoloji analizleri yapılmıştır. Söz konusu yerel iklim bölgelerindeki mekânsal morfoloji özelliklerinin sıcaklık varyasyonları üzerindeki etki düzeyinin belirlenmesi amacıyla XGBoost Regresyon Modeli, ardından bu model kapsamında elde edilen çıktıların okunabilirliğini artırmak ve yorumlayabilmek için ise SHAP analizi uygulanmıştır. Bu analizler sonucunda ise modelin doğruluğu elde edilen hata göstergeleri kapsamında incelenmiş ve yerel iklim bölgeleri bazında mekânsal dağılımı ortaya koyulmuştur.

Tez çalışmasının dördüncü bölümünde, tasarlanan araştırma modelinin İstanbul örnek alanı üzerinde uygulanmasıyla elde edilen bulgular sunulmaktadır. Bu bağlamda, ilk olarak İstanbul'un doğal yapısı, mekânsal gelişimi ve iklimsel özellikleri kapsamlı bir şekilde ele alınmaktadır. Ardından, İstanbul'daki kentsel sıcaklığın mekânsal dağılımı değerlendirilmekte ve yerel iklim bölgeleri sınıflandırılarak her bir LCZ tipolojisindeki kentsel sıcaklık varyasyonları

açıklanmaktadır. Devamında, yapılan istatistiksel analizler sonucunda kentsel sıcaklıklar bakımından anlamlı farklılıklara sahip yerel iklim bölgelerindeki mekânsal morfolojik özelliklerin kentsel sıcaklıklar üzerindeki etkisi yapay zekâ destekli analiz modelleriyle ortaya koyulmaktadır.

Tez çalışmasının beşinci ve son bölümünde ise elde edilen bulgular ışığında yerel iklim bölgelerindeki kentsel sıcaklık varyasyonları ile mekânsal morfoloji ve kentsel sıcaklık ilişkisi literatürdeki diğer çalışmalar ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmekte ve mikro ölçekteki kentsel ısı adası etkilerinin azaltımına yönelik tasarım stratejileri ortaya koyulmaktadır.

1.3 Araştırma Soruları ve Hipotezler

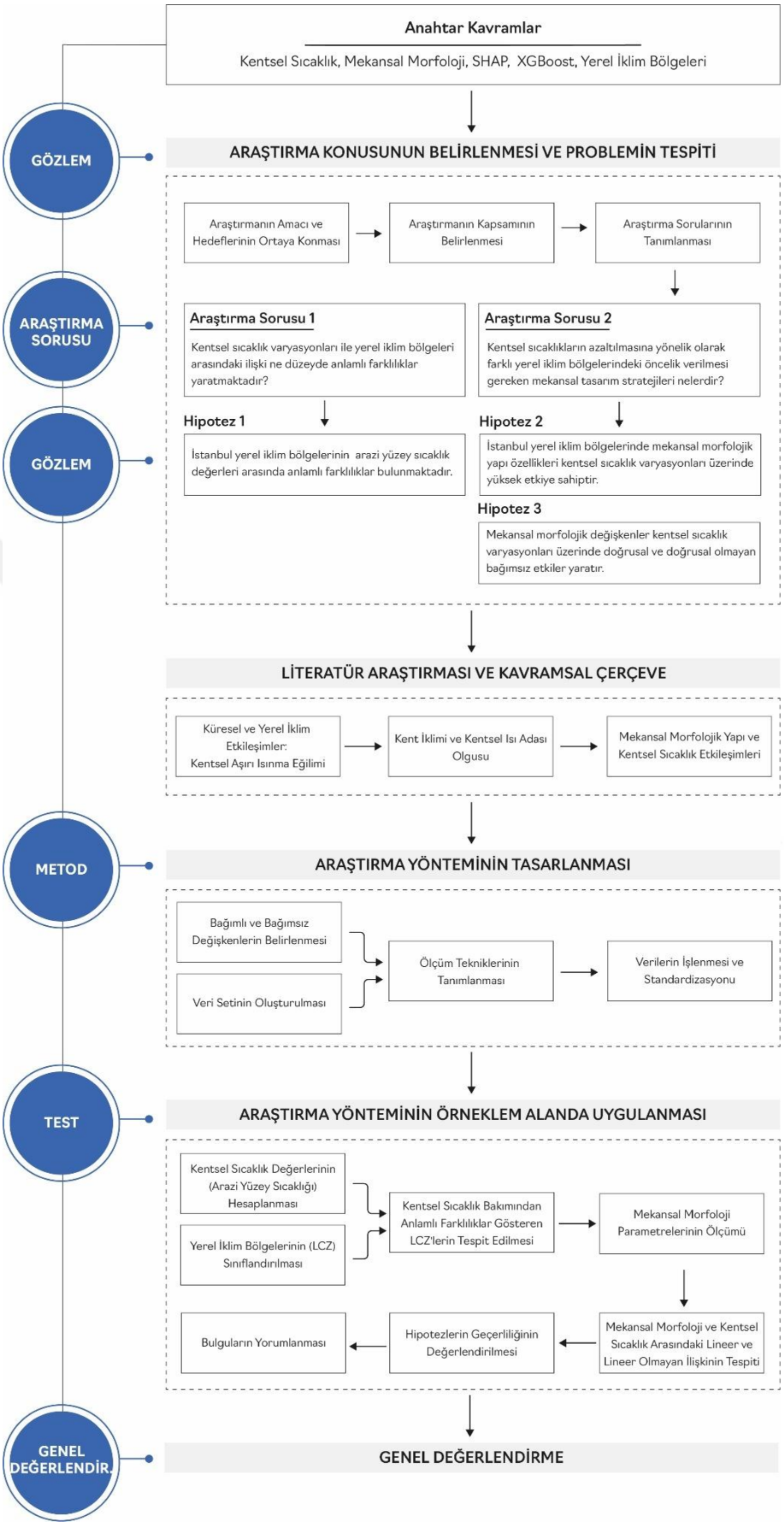
Tez çalışması kapsamında, iki araştırma sorusu ve üç ayrı hipotez ortaya koyulmaktadır. İstanbul örnekleminde yanıt aranan ilk araştırma sorusu (1) kentsel sıcaklık varyasyonlarının yerel iklim bölgeleriyle olan ilişkisinin ne düzeyde anlamlı farklılıklar yarattığına ilişkindir. Bu soru, kentsel sıcaklıkların mekânsal dağılımı ile yerel iklim bölgeleri arasında anlamlı farklılıklar olup olmadığını anlamaya yönelik olarak ortaya koyulmuştur. Bu araştırma sorusu bağlamında, çalışmanın ilk hipotezi "İstanbul yerel iklim bölgelerinin kentsel sıcaklık değerleri arasında anlamlı farklılıklar bulunmaktadır" şeklinde belirlenmiştir.

Tez araştırması kapsamında gündeme getirilen ikinci araştırma sorusu ise (2) yerel iklim bölgeleri düzeyinde, mekânsal morfolojik yapının kentsel sıcaklık varyasyonları üzerinde ne düzeyde etkili olduğu ve morfolojik özelliklerin kentsel sıcaklıklar üzerindeki bağımsız etkilerinin ne düzeyde olduğu yönündedir. Bu araştırma sorusu bağlamında 2 adet hipotez ortaya koyulmaktadır. Çalışmanın ikinci hipotezi "İstanbul yerel iklim bölgelerindeki mekânsal morfolojik yapı özellikleri kentsel sıcaklık varyasyonları üzerinde yüksek etkiye sahiptir", üçüncü hipotezi ise mekânsal morfolojik değişkenler kentsel sıcaklık varyasyonları üzerinde doğrusal ve doğrusal olmayan bağımsız etkiler yaratır" şeklindedir.

1.4 Yöntem

Tez çalışması, farklı yerel iklim bölgelerinde gözlemlenen kentsel sıcaklık varyasyonlarının mekânsal morfoloji parametreleri ile ilişkisini açıklamak üzere bütüncül bir yaklaşım benimsemiştir. Bu bağlamda, tez çalışması beş ana adımda gerçekleştirilmiştir: (1) araştırma konusunun belirlenmesi ve problemin tanımlanması, (2) literatür araştırması ve kavramsal çerçevenin oluşturulması, (3) araştırma yönteminin tasarlanması, (4) araştırma yönteminin örneklem alanda uygulanması, (5) bulguların yorumlanması ve genel değerlendirmedir (Şekil 1.1).

Birinci adımda, belirlenen anahtar kavramlar çerçevesinde araştırmanın amacı, hedefi ve kapsamı ortaya koyularak problem tanımı yapılmış, araştırma soruları ve hipotezler belirlenmiştir. İkinci adımda, konu ile ilgili mevcut literatür taraması yapılarak araştırmanın kavramsal çerçevesi oluşturulmuştur. Üçüncü adımda, belirlenen araştırma sorularının cevaplanmasına yönelik metodolojik çerçeve çizilmiş ve araştırma modeli tasarlanmıştır. Dördüncü adımda, belirlenen araştırma modelinin örneklem alanda uygulaması yapılmış ve model test edilmiştir. Beşinci ve son aşamada ise elde edilen bulgular literatürle karşılaştırılarak yorumlanmış ve genellemeler yapılarak mekânsal tasarım stratejileri önerilmiştir.



Şekil 1.1 Yöntem şeması

1.5 Özgün Değer

Tez çalışması, yerel iklim bölgeleri temelinde mekânsal morfolojik yapı ile kentsel sıcaklık arasındaki niceliksel ilişkiyi tespit etmek amacıyla çeşitli analitik yaklaşımları bütüncül olarak ele alan çok katmanlı hibrit bir yöntem ortaya koymaktadır. Söz konusu yöntemde farklı disiplinlerde ele alınan uzaktan algılama tekniklerini, mekânsal veri yönetimini sağlayan Coğrafi Bilgi Sistemlerini (CBS), niceliksel ilişkilerin ortaya koyulmasına yönelik olarak kullanılan istatistiksel analiz modellerini ve son olarak ise son dönemlerde sıklıkla kullanılan yapay zekâ tekniklerini bütüncül şekilde bir araya getirerek disiplinlerarası bir yöntemsel çerçeve sunmaktadır. Yerel iklim bölgeleri temelinde geliştiren yapay zekâ tabanlı bu analiz modeli, yalnızca kentsel sıcaklık varyasyonlarının mekânsal dağılımını ortaya koymakla kalmayıp farklı mekânsal morfolojik parametrelerin kentsel sıcaklıklar üzerindeki etkisini de değerlendirmektedir. Bu doğrultuda kentsel ısı adası kapsamında yürütülen sınırlı analiz teknikleri yerine daha kapsayıcı ve entegre bir analiz modeli kullanılmaktadır.

Tez çalışmasının ikinci özgün yönü, kentsel sıcaklıkların mekânsal heterojenliğini, geleneksel arazi örtüsü/kullanımı üzerinden değil, kentlerin iklimsel özelliklerini temel alan yerel iklim bölgeleri sınıflandırması üzerinden tespit etmesidir. Bu sınıflandırma sistemi, kentlerin iklimsel karakteristiklerini ortaya koyarak hem kentsel ısı adası sorunun ele alan hem de kentsel ve kırsal alanlar arasındaki karmaşıklığı çözümlemeyi amaçlayan bir yaklaşım sunmaktadır. Yerel iklim bölgeleri ayrıca, kent iklimi kapsamında yapılan çalışmaların standartlaştırılmasına ve farklı yerel iklim bölgelerinin sıcaklık varyasyonlarının karşılaştırmalı olarak incelenmesine olanak tanıyarak genellemelerin önüne geçmektedir.

Tezin bir diğer özgün değeri, yapay zekâ destekli makine öğrenimi algoritmalarının kent iklimi ve mekânsal morfoloji araştırmalarına entegre edilerek yenilikçi metodolojik yaklaşımlar sunmasıdır. Bu bağlamda kentsel sıcaklık ve mekânsal morfoloji arasındaki niceliksel ilişkilerin tespitinde kullanılan geleneksel istatistik modellerinin ötesine geçerek yüksek veri setine uygun, karmaşık ve çok boyutlu ilişkileri yüksek tahmin gücünde ortaya koymaktadır. Yapay zekâ destekli algoritmaların kullanılması, mekânsal heterojenliği yüksek kentlerdeki morfolojik parametrelerin kentsel sıcaklık üzerindeki etkilerinin anlaşılmasında büyük avantaj sağlamaktadır.

Geleneksel istatiksel modelleri genellikle mekânsal morfoloji ve kent iklimi arasındaki lineer ilişkilere odaklanmakta ve bunun ötesinin geçememektedir. Ancak kentler, çok katmanlı yapısı ve mekânsal heterojenliği nedeniyle lineer olmayan ilişkileri de barındırmaktadır. Bu doğrultuda, lineer olmayan ilişkilerin açığa çıkarılması ve buna neden olan morfolojik özelliklerin belirlenmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, tez çalışmasında kullanılan yapay zekâ destekli makine öğrenimi algoritmalarının en dikkat çekici noktalarından biri, kent iklimi ve mekânsal morfoloji etkileşiminde, değişkenler arası lineer ilişki varsayımını aşarak lineer olmayan ilişkileri tespit etmesidir. Böylelikle kentsel planlama ve tasarım süreçlerinde geliştirilecek olan stratejik mekânsal kararlarda kentsel sıcaklıkların azaltımına ilişkin daha etkin tasarım kodlarının belirlenmesine ışık tutmaktadır.

Tezin metodolojik açıdan özgün yönlerinden biri de XGBoost regresyon modeliyle elde edilen MAE, MAPE ve RMSE gibi hata göstergelerinin modelin yalnızca başarı düzeyini yansıtmakla kalmayıp aynı zamanda bu hata göstergelerinin yerel iklim bölgeleri bazında mekânsal olarak nasıl dağılım gösterdiğinin analiz edilmesidir. Literatürde çoğunlukla ihmal edilen bu tür mekânsal hata heterojenliği, tez çalışmasında sistematik bir şekilde değerlendirilerek modelin kentsel sıcaklık değerlerini tahmin etme başarısının farklı yerel iklim bölgelerinde ne ölçüde değişkenlik gösterdiği ortaya koyulmuştur. Bu yaklaşım, kent iklimini temel alan çalışmalarda yapay zekâ temelli modellerin çıktılarının yerel bağlama duyarlılığı açısından nasıl değerlendirilebileceğine yönelik metodolojik bir katkı sunmaktadır.

Son olarak bu tez çalışması, şehir planlama ve kentsel tasarım disiplinlerine kent iklimi, mekânsal morfoloji, yapay zekâ ve tasarım ekseninde yeni bir bakış açısı getirmektedir. Yapay zekâ destekli analiz modellerinin kent iklimi ve mekânsal morfoloji etkileşimini konu alan analizlere entegre edilmesi hem lineer hem de lineer olmayan ilişkileri tespit ederek kentsel planlamada veri temelli karar verme süreçlerine imkân sağlamaktadır. Bu kapsamda, yapay zekâ modelleri yalnızca bir analiz aracı olarak değil aynı zamanda mekânsal müdahale kararlarının geliştirilmesi süreçlerine de entegre edilmektedir. Böylelikle kentlerin iklim değişikliği ve buna bağlı meydana gelen etkilere karşı daha dirençli bir yapıya kazandırılması konusunda dinamik ve uygulanabilir çözümlerin geliştirilmesine katkı sunmaktadır.

1.6 Yaygın Etki

Tez çalışması, kentsel sıcaklık, yerel iklim bölgeleri ve mekânsal morfoloji ekseninde geliştirdiği analiz modeliyle kentsel planlama ve tasarım literatürüne önemli katkılar sunmaktadır. Geliştirilen analiz modeli, uzaktan algılama teknikleri, Coğrafi Bilgi Sistemleri, istatistiksel modeller ve yapay zekâ algoritmalarını entegre bir şekilde kullanan disiplinlerarası bir metodolojik yaklaşım niteliği taşımaktadır. Bu bağlamda, mekânsal morfoloji ve kentsel sıcaklık arasındaki niceliksel ilişkinin tespitine yönelik elde edilen çıktılar hem lineer hem de lineer olmayan ilişkileri ortaya koyması bakımından önem arz etmektedir. Ayrıca bu çalışma, kent mekanına yapılan müdahalelerin sonuçlarını termal etkiler bağlamında değerlendirmesi ve geleceğe yönelik stratejik kararlar geliştirilmesine imkân vererek kentsel sıcaklık ve kentsel morfoloji ilişkisinin sürdürülebilirliği açısından literatüre yeni açılımlar kazandırmaktadır.

Çalışma, sadece bir kuramsal çerçeve sunmasın ötesinde, planlama ve tasarım pratiğine yönelik somut çıktılar da üretmektedir. Bu kapsamda elde edilen bulgular, mekânsal morfolojik parametrelerin kentsel sıcaklık üzerindeki etkisini ortaya koyarak yerel iklim bölgeleri özelinde etkin soğutma stratejilerinin geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Çalışmada tasarlanan analiz modelinin, farklı coğrafya ve iklimsel koşullara sahip kentlerde de uygulanabilir olması, hem ortaya koyulan metodolojik yaklaşımın iklime duyarlı kentleşme stratejileri için evrensel bir araç haline getirmekte hem de şehirlerin iklimsel karşılaştırmalarına olanak sağlayarak benzer özelliklere sahip kentler için yürütülecek çalışmalarda yol gösterici bir nitelik kazanmaktadır.

Tez çalışmasının ortaya koyduğu bulgular ve analiz modeli, karar vericilere, politika yapıcılara ve şehir plancısı, mimar ve kentsel tasarım uzmanı gibi mesleki açıdan uzman kişilere kentsel mikro iklimin iyileştirilmesi adına kent dokularının yenilenmesi veya yeniden geliştirilmesi konusunda rehber niteliği taşımaktadır. Çalışma kapsamında tasarlanan analiz modeli, kentlerde meydana gelen sıcaklık artışıyla mücadele konusunda yalnızca mevcut durumu ortaya koymakla kalmayıp aynı zamanda da mekânsal morfoloji parametrelerinin kentsel sıcaklık üzerindeki etkisini karşılaştırmalı olarak tespit ederek kentlerin iklim değişikliğine karşı mücadelesinde veri temelli karar verme süreçlerine olanak tanımaktadır. Bu bağlamda, kentlerdeki öncelikli müdahale alanları belirlenerek termal açıdan daha

yaşanılabilir kentsel mekanların oluşturulmasına ve çevresel sürdürülebilirliğin sağlanmasına yönelik olarak geliştirilen/geliştirilecek olan planlama ve tasarım politikaları için bilimsel bir zemin hazırlamaktadır.

Son olarak bu tez çalışması, şehir planlama, mimarlık ve kentsel tasarım disiplinlerinin eğitimi açısından önemli değerlere sahiptir. Kentlerin gün geçtikçe hızlı bir şekilde büyümeye devam etmesi ve daha karmaşık hale gelen veri altyapısı, geleneksel planlama pratikleri ile kentlerin analiz edilmesini zorlaştırmaktadır. Bu kapsamda çalışmada sunulan analiz modeli, planlama eğitiminin gelişen yetkinlik alanlarına hitap ederek sadece mekânsal çözümler üreten değil aynı zamanda mekânsal değişkenleri çok boyutlu bir şekilde analiz edebilen, sistematik ve çok boyutlu düşünebilen, niceliksel ilişkileri okuyabilen, bilimsel temelli stratejiler geliştiren ve çeşitli analiz modelleri geliştirerek bunu tasarımsal karar alma süreçlerine entegre edebilen bir eğitim altyapısının oluşturulmasına katkı sağlamaktadır.

2
KENTSEL ISI ADASI OLGUSU VE MİKRO İKLİMSEL DİNAMİKLER

Tez çalışmasının bu bölümünde, iklim değişikliği, küresel ısınma ve kentsel aşırı ısınma olgularının doğal iklim sistemi üzerindeki etkileri ele alınmış, ayrıca küresel iklim değişikliğinin yoğun yapılaşmış kentsel alanlardaki mikro iklimsel yapıya olan etkileri değerlendirilerek kentsel ısı adası olgusu detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

2.1 Küresel ve Yerel İklim Etkileşimleri: Kentsel Alanlarda Aşırı Isınma Eğilimi

İklim değişikliği, içinde bulunduğumuz yüzyılın maruz kaldığı en kritik küresel sorunlardan biri olarak gösterilmektedir. İnsan sağlığı, doğal ekosistemler, gıda üretimi, kent iklimi vb. pek çok konu üzerinde doğrudan veya dolaylı bir şekilde negatif etki yaratabilecek bu olgu, özellikle son yıllarda ulusal ve uluslararası düzeydeki gündemin üst sıralarında yer almaktadır.

Küresel iklim değişikliği genel olarak, fosil yakıt kullanımı, hızlı nüfus artışı, tüketim eğiliminin artması, arazi kullanım değişiklikleri, doğal alanların tahrip edilmesi, ormansızlaşma gibi insan faaliyetleri sonucunda atmosfere salınan sera gazlarının (CO_2, CH_4, O_3, N_2O, CFC-11, HFCs, PFCs, NF_3, SF_6) birikimiyle oluşan sera etkisi sonucunda dünyanın ortalama yüzey sıcaklığındaki artışı ve iklimsel dinamiklerde meydana gelen değişimleri tanımlamaktadır. Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'nde (BMİDÇS) ise "karşılaştırılabilir belirli bir zaman aralığında gözlemlenen iklimsel değişiklikler" olarak ifade edilmektedir. IPCC ise iklimin ortalama değerlerinde veya iklimsel değişkenlerde meydana gelen ve yüzyıllar boyunca devam eden değişim olarak tanımlamaktadır (Calvin vd., 2023).

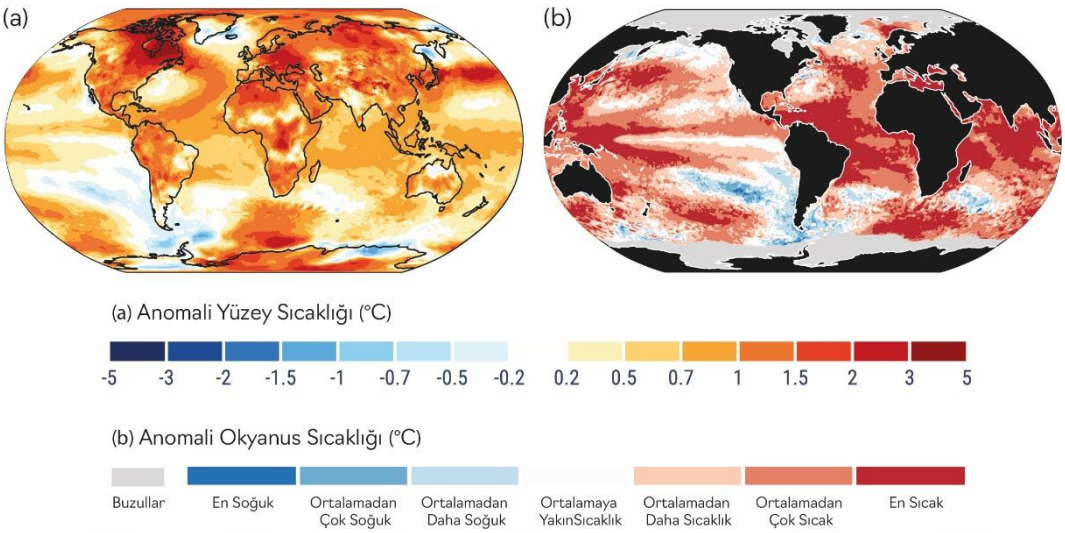
İklim değişikliği, insan faaliyetleri sonucu gerçekleştiği gibi doğal bir süreç olarak da gerçekleşebilir. Ancak, bu konudaki bilimsel görüş birliği, iklim değişikliğinin insan faaliyetleri sonucu gerçekleştiği ve geri döndürülemez etkilere sebep olduğudur (Kakaki, 2013; Speelman vd., 2009). İklim değişikliği temel olarak iki faktörden kaynaklanmaktadır. Bunlar: doğal süreçler ve insan faaliyetleridir. Doğal süreçler, dünya yörüngesindeki değişiklikler, ekliptik düzlem eğikliğindeki değişiklikler, yörüngesel hareketler ve güneş radyasyonu gibi etkenleri içerirken insan faaliyetleri ise atmosfere sera gazı salımına neden olan veya karbon emilimini azaltan faaliyetleri kapsamaktadır (Akpodiogaga-a & Odjugo, 2010).

İklim değişikliğine sebep olan sera gazlarının aşırı emisyonu ve konsantrasyonu nedeniyle troposferik sıcaklığın kademeli olarak artması küresel ısınma olarak tanımlanmaktadır. Başka bir ifadeyle, özellikle sürdürülebilir olmayan enerji sistemlerinin kullanılması, doğal alanların yok olması ve insan faaliyetleri sonucunda sera gazlarının artışına ve kentleşmenin de etkilerine bağlı olarak atmosferin alt bölümlerindeki sıcaklık artışı olarak ifade edilmektedir (Karaman vd., 2010). Küresel ısınma her ne kadar iklim değişikliği kavramı ile karıştırılsa da iki kavram arasında bazı farklar bulunmaktadır. Küresel ısınma, yerkürenin ortalama sıcaklık seviyelerindeki gözlenen artışı tanımlarken, iklim değişikliği ise iklimsel değişkenlerin ortalama değerlerindeki değişimi ifade etmektedir.

İklim değişikliği, atmosfer, buzullar, okyanuslar, karasal alanlar ve biyosferde hızlı ve geri döndürülemez değişimlere yol açmıştır. Bunların en belirgin örneği dünya çapında aşırı hava ve iklimsel olayların gerçekleşmesi olarak gösterilmektedir. Öyle ki 1901 ve 2018 yılları arasında küresel ortalama deniz seviyesinde 0.20 m'lik bir artış gözlemlenmiştir. Deniz seviyesindeki artışın ortalama hızı ise 1973-1971 arasında 1.3 mm/yıl, 1971-2006 arasında 1.9 mm/yıl ve 2006-2018 arasında ise 3.7 mm/yıl olarak ölçülmüştür. Özellikle kara ve okyanus ekosistemlerini etkileyen iklim değişikliği; buzulların erimesi, yerel türlerin yok olması, kitlesel ölümler, hidrolojik değişimler gibi ekosistemlerin işleyişini bozan sorunlara yol açmaktadır (Calvin vd., 2023).

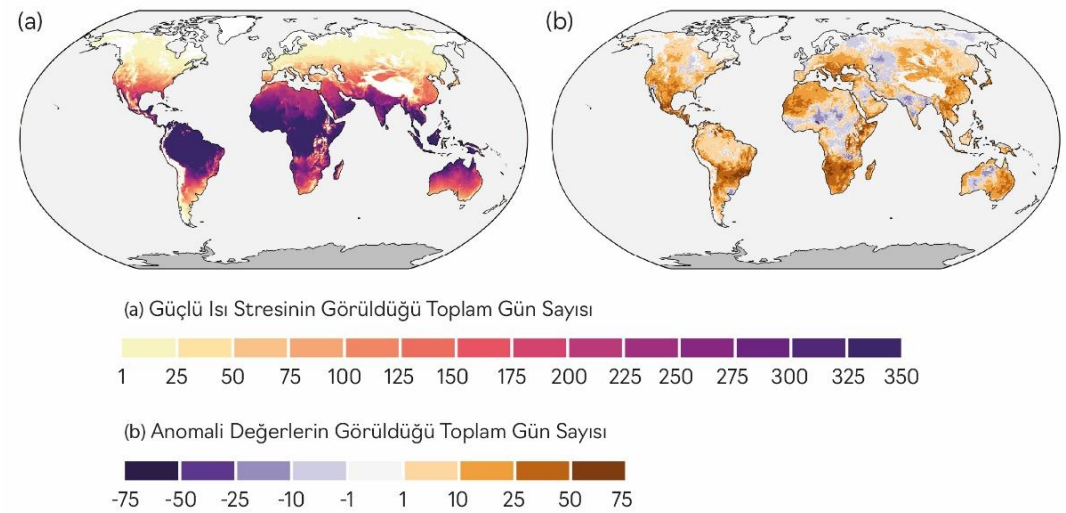
İnsan faaliyetleri, küresel ölçekte yerkürenin yüzey sıcaklığının artmasında temel etken olarak kabul edilmektedir (Akpodiogaga-a & Odjugo, 2010; Calvin vd., 2023). Bu kabulün temel göstergesi olarak 2011-2020 dönemindeki küresel yüzey sıcaklığının 1850-1900 dönemine göre 1.1°C'lik artış göstermesidir (Calvin vd.,

2023). Bu durum, 2023 yılına gelindiğinde ise 1850-1900 ortalamasının 1.45 °C üzerinde ölçülmüştür (World Meteorological Organization (WMO), 2023). Copernicus Climate Change Service (C3S) tarafından 1850-2024 yıllarını kapsayan verileri incelendiğinde, 2024 yılı küresel sıcaklığın sanayi öncesi dönemdeki seviyenin 1.5°C üzerine çıktığı ilk yıl olarak kayıtlara geçmiştir. 2024 yılı itibariyle küresel ortalama sıcaklık 15.10°C'ye (ERA5'e göre) çıkmış ve bu değer 1850-1900 ortalamasının 1.6°C üzerinde seyretmiştir (Şekil 2.1) (Copernicus Climate Change Service, 2025).



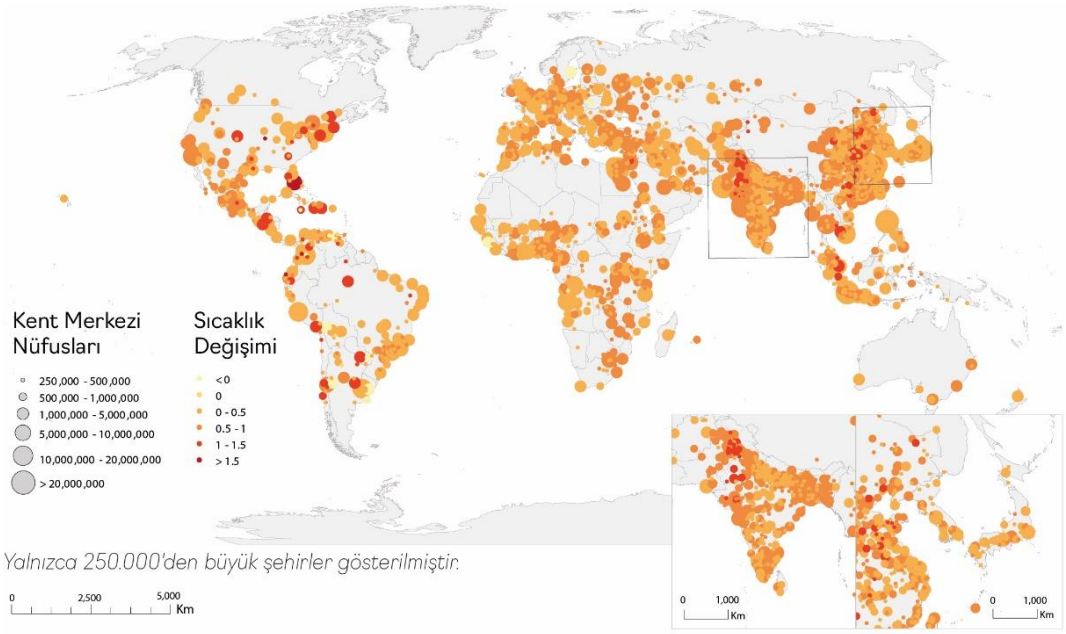
Şekil 2.1 2024 yılına ait anomali yüzey sıcaklığı (a) ve anomali okyanus sıcaklığı (b) (Copernicus Climate Change Service, 2025)

2024 yılı itibariyle dünya yüzeyinin yaklaşık %24'ünde, karasal alanların %32'sinde ve okyanus yüzeylerinin ise %21'inde rekor düzeyde yıllık ortalama sıcaklık değerleri ölçülmüştür. Bu alanlar aynı zamanda yoğun nüfusun kümelendiği alanlarla da örtüşmektedir (Berkeley Earth, 2025). Küresel ortalama sıcaklıklar, yılın 11 ayında 1.5°C olarak belirlenen eşik değerin üzerine çıkarak yüksek sıcaklık anomalileri göstermiştir. En yüksek sıcaklık anomalisi 1.5°C ile Kuzey Amerika kıtasında ölçülürken bunu sırasıyla 1.24°C ile Avrupa, 1,06°C ile Afrika, 1.06°C ile Asya, 0.87°C ile Güney Amerika ve 0.62°C ile Avustralya kıtaları takip etmektedir. Küresel ölçekte artan yüzey ve hava sıcaklıkları aynı zamanda, hissedilen sıcaklığın 32°C'nin üzerinde çıktığı koşullar olarak tanımlanan "güçlü ısı stresine" de neden olmaktadır. Nitekim, 2024 yılı boyunca yüzey alanlarının %61'inde güçlü ısı stresi yaşanmıştır (**Şekil 2.2**) (Copernicus Climate Change Service, 2025).



Şekil 2.2 2024 yılına ait güçlü ısı stresinin görüldüğü toplam gün sayısı (a) ve anomali değerlerin görüldüğü gün sayısı (b) (Copernicus Climate Change Service, 2025)

Mevcut iklimsel politikaların devam etmesi ve küresel ısınmanın sahip olduğu mevcut hızla artması durumunda 2040 yılına gelindiğinde, dünya kentlerinin %50'sinde ortalama sıcaklık 2025 yılına kıyasla 0.5°C artacağı ve bununla birlikte kentlerde yaşayan 3.7 milyar kişinin ise yüksek sıcaklıklara maruz kalacağı tahmin edilmektedir (Şekil 2.3). Kentlerde meydana gelen bu tür aşırı sıcak koşulların çok boyutlu etkileri bulunmaktadır. Bu etkilere örnek olarak yüksek ısı stresi, aşırı sıcaklıkların artışı, yoğun yağış sıklığı, yağışların şiddeti ve miktarındaki artış, kuraklıkların sıklığı, termal konfor problemleri, su ve gıda temini üzerindeki baskılar ve kaynak kıtlığı gösterilmektedir (UN HABITAT, 2024).



Şekil 2.3 RCP 4.5 senaryosu kapsamında 2025-2040 döneminde meydana gelen sıcaklık artışının küresel ölçekte dağılımı (UN HABITAT, 2024)

Dünya nüfusunun giderek artması beraberinde kentleşmeyi de arttırmaktadır. Kentleşmeyle birlikte meydana gelen yoğun ve kontrolsüz yapılaşma süreci, doğal yüzeylerin yerini sert ve geçirimsiz yüzeylerin almasına neden olmaktadır. Bu durum, kentsel yüzeylerin termal dengesini etkileyerek sıcaklıklar üzerindeki baskıyı arttırmakta ve kentleri aşırı sıcaklıklara karşı daha kırılgan hale getirmektedir. Özellikle iklim değişikliği ve küresel ısınmayla birlikte kentsel alanlarda meydana gelen bu etkilerin daha fazla yayılması ve şiddetinin artması söz konusudur (World Bank, 2024).

İnsanları en çok etkileyen iklim değişikliği fenomenlerinden biri olarak gösterilen kentsel aşırı ısınma (Santamouris, 2020) genellikle pozitif sıcaklık anomalisi gösteren şehirlerde meydana gelen kentsel ısı adası olgusu ile küresel ısınmanın kent iklimi üzerinde neden olduğu sıcaklık artışlarından kaynaklanmaktadır (Santamouris vd., 2015). Kentsel aşırı ısınma kavramı kentsel ısı adasından farklı olarak kentleşme düzeyi, antropojenik ısı akışları ve sinoptik hava koşulları gibi parametreleri de kapsayacak şekilde kentin farklı bölgelerindeki sıcaklık varyansları olarak tanımlanmaktadır (Feng vd., 2024). Nazarian vd., (2022) ise kentsel aşırı ısınmayı, insanları veya kentsel sistemleri olumsuz etkileyebilecek düzeydeki termal eşiklerin aşılması durumu olarak ifade etmektedir. Kentsel aşırı ısınma, bölgesel ölçekteki sıcak hava dalgaları ve sinoptik hava koşullarıyla

etkileşime girerek kent iklimini etkilemektedir (Feng vd., 2024). Kentsel aşırı ısınma sorunu, yalnızca kentlerde meydana gelen termal dengenin değişmesini ifade eden bir olgu değil aynı zamanda kentleşmenin de neden olduğu antropojenik kaynaklı iklim değişikliğini kapsayan geniş bir yelpazeye sahiptir. Bu olgu, gündüzleri yüzey sıcaklıklarının artması, geceleri ise yükselen çevresel sıcaklıklar ile karakterize edilmiştir (World Bank, 2024). Hem yüzey hem de atmosferik koşulların aşırı ısınması temel olarak, güneş radyasyonunun yüzeyler tarafından emilmesi, yapı malzemelerinin termal özellikleri, düşük bitki örtüsü yoğunluğu, sera etkisi ve doğal yüzeylerin azalması gibi etkenlere bağlı olarak gelişmektedir (Santamouris, 2020; World Bank, 2024). Kentsel aşırı ısınmanın şiddeti özellikle akşam ve gece saatlerinde en yüksek seviyeye ulaşmaktadır. Bu durumun temel sebebi ise kentsel yüzeylerin gündüzleri depoladığı ısıyı akşam saatlerinde yavaş bir şekilde atmosfere geri salmasıdır (World Bank, 2024).

Kentlerde meydana gelen yüksek sıcaklıklar hem kentleri hem de nüfusu önemli ölçüde etkilemektedir. Artan sıcaklıklar nedeniyle soğutma ihtiyacına bağlı olarak enerji ve elektrik tüketiminin artması, termal koşulların kötüleşmesi, hava kirliliği ve sera gazı emisyonlarının artması, rüzgâr yönlerinin ve yağış rejimlerinin değişmesi, son olarak ise sağlık risklerinin meydana gelmesi kentsel aşırı ısınmanın önemli etkileri arasında gösterilmektedir (Santamouris vd., 2015; World Bank, 2024).

2.2 Kent İklimi ve Kentsel Isı Adası Olgusu

İklim değişikliği, dünya genelinde hızlı kentleşme ve nüfus artışı gibi sebeplerle kentsel iklimin daha ayrıntılı bir şekilde incelenmesini gerekli kılmaktadır (Kubilay vd., 2020). Kentler; sağlık, çevresel, sosyal ve ekonomik etkiler nedeniyle iklim değişikliğinden ciddi bir şekilde etkilenmektedir. İklim değişikliğine bağlı olarak artan küresel sıcaklıklar bu etkinin şiddetini ve sıklığını artırmaktadır.(Reinwald vd., 2024).

Kent iklimi, kentsel gelişime bağlı olarak metropol alanlarda çevresindeki kırsal alanlardan farklı iklimsel koşulların görülmesi olarak tanımlanmaktadır (Encyclopedia Britannica, 2021; Kuttler, 2008). Kent iklimi genel olarak; yüksek yüzey ve hava sıcaklıkları, radyasyon dengelerindeki değişim, düşük nem oranı, çeşitli atmosfer kirleticilerinin birikimi ve atmosferik değişimler ile karakterize

edilmiştir. Bu iklime sahip alanlar; hava sıcaklığı, yüzey sıcaklığı, nem oranı, rüzgâr hızı, rüzgâr yönü ve yağış miktarı gibi parametreler konusunda çevresindeki kırsal alanlardan farklılık göstermektedir. Bu farkın temel nedeni, arazi kullanımın değişerek kentsel alanlarda yapay yüzeylerin artması olarak vurgulanmaktadır (Encyclopedia Britannica, 2021). Kent iklimin oluşmasında dört etken bulunmaktadır. Bunlar;

- Doğal yüzeylerin değişerek sert ve geçirimsiz yüzeylerin artması,
- Bitki örtüsüyle kaplı yüzey alanının azalması,
- Sokak kanyonları nedeniyle kentsel yüzeylerde uzun dalga emisyonlarının azalması,
- İnsan kaynaklı faaliyetler sonucunda atmosfer kirleticilerinin salınımı ve atık ısının açığa çıkmasıdır.

Bu etkenlerin kentlerde gözlemlenmesi, kentlerin çevrelerindeki kırsal alanlara kıyasla daha farklı iklimsel dinamikler sergilemesine neden olmaktadır. İklimsel özelliklerde meydana gelen bu farklılık, kentlerin mekânsal özellikleri ile atmosferik süreçler arasındaki etkileşimden kaynaklanmaktadır.

2.2.1 Kent İklimini Sınıflandırma Sistemleri ve Kentsel Mikro İklim

Dünyada hızla artan kentleşme ve sanayileşme süreci son on yılda kentsel çevrenin bozulmasına ve kırılganlıklara karşı daha duyarlı hale gelmesine neden olmaktadır. Küresel nüfusun artması ve kentlerin hızlı bir şekilde büyümeye devam etmesi arazi kullanım üzerindeki radikal değişiklikleri tetiklemektedir. Doğal alanların yapay alanlarla (insan yapımı) değiştirilmesi ve bu alanların değişen fiziksel özellikleri nedeniyle kentsel çevreyi etkileyen çeşitli mikro iklim alanlarını oluşturmaktadır (S. Yang vd., 2023).

Kentsel mikro iklim, kentsel alanlarda gözlemlenen yerel iklimlerin etkilerini ifade etmektedir (Hong vd., 2021). Aynı zamanda küçük ölçekli kentsel alanlardaki belirgin iklim tipi olarak da tanımlanmakta ve yapılı çevrenin büyük ölçekli iklim koşulları üzerindeki etkisiyle oluşmaktadır (Pijpers-van Esch, 2015). Mikro iklimlerdeki atmosferik/iklimsel koşullar çevrelerindeki daha geniş alanlardan farklılık gösterebilmektedir (Pijpers-van Esch, 2015; Shi vd., 2016). Bu alanlar, çevrelerindeki kırsal alanlara oranla daha yüksek heterojenliğe sahiptir. Kentsel

mikro iklimlerdeki iklimsel fenomenler, sokak kanyonu düzeyinden mahalle veya birkaç yapı topluluğu düzeyine kadar olan çeşitli ölçeklerde ele alınmaktadır (S. Yang vd., 2023). Bu çözünürlükte ele alınan iklimsel ölçeklerde insan kaynaklı faaliyetlerin birçoğu kentsel mikro iklimi etkileyebilmektedir (Hong vd., 2021).

Kentler, çok katmanlı ve çeşitli morfolojik yapıları nedeniyle farklı mikro iklimsel bölgelere sahiptir. Bu karmaşık iklimsel yapıyı anlamak ve değerlendirebilmek amacıyla farklı sınıflandırma sistemlerinin geliştirilmesi gereklilik haline gelmiştir. Söz konusu sınıflandırma sistemleri, kentlerdeki farklı mikro iklimsel bölgelerin nicel bir biçimde analiz edilmesini ve aynı zamanda bu analizlerin planlama ve tasarım süreçlerine entegre edilmesine olanak sağlamaktadır. Tez çalışmasının bu bölümünde kent iklimini sınıflandırmaya yönelik yapılan çalışmalar tarihsel süreç kapsamında incelenmiş ve sınıflandırma sisteminin temelini oluşturan parametreler ortaya koyulmuştur.

2.2.1.1 Londra Kenti İklim Bölgeleri Sınıflandırması

Chandler, iklime dayalı kentsel ve kırsal alan sınıflandırması yapan ilk ısı adası araştırmacılarından biridir (Stewart & Oke, 2012). Greater London Bölgesi'ni iklim, topografya ve yapı morfolojisi parametreleri kapsamında dört yerel bölgeye ayırmıştır (Lee & Oh, 2018; Stewart & Oke, 2012). Bu bölgeler;

(I) Yüksek yoğunluklu ve ticari alanları kapsayan merkez bölgeleri,

(II) İç banliyö alanları,

(III) Yüksek ve düşük yoğunluklu konut ve ticari alanların gelişim gösterdiği dış banliyö alanları,

(IV) Açık alanlar ve düşük yoğunluklu konut alanlarıdır (Stewart, 2011b).

Bu bölgelerden açık alanlar ve düşük yoğunluklu konut alanları kentin diğer bölgelerine göre daha soğuk, yüksek yoğunluklu konut ve ticari alanların olduğu bölgeler ise daha sıcak bir mikro iklime sahiptir (Stewart, 2011b).

2.2.1.2 St. Louis Kenti İklim Bölgeleri Sınıflandırması

Chandler'i takiben 1978 yılında Auer tarafından St. Louis kenti için iklime dayalı bir sınıflandırma sistemi önerilmiştir. Bu sınıflandırmanın çıkış noktası meteorolojik açıdan yayınlanan değerlerin kentsel iklimleri tanımlamada yetersiz kalması ve bu nedenle arazi kullanım gibi daha spesifik parametrelerle ilişkilendirme ihtiyacının doğmasıdır (Auer, 1978). Bu kapsamda bitki örtüsü ve bina özellikleri referans alınarak meteorolojik açıdan anlamlı 12 arazi kullanım tipi belirlenmiştir (Tablo 2.1) (Lee & Oh, 2018; Stewart, 2011b; Stewart & Oke, 2012)

Ağır sanayi alanları (I-1), ticari alanlar (C-1) ve kompakt yerleşim alanları (R-2) çevrelerindeki kırsal alanlara oranla en belirgin sıcaklık farklarının gözlemlendiği bölgelerdir. Kentsel ve kırsal alanlar arasında oluşan bu fark, insan faaliyetleri sonucunda doğal arazi örtüsünün bozulması ve geçirimsiz yüzeylerin artmasıyla ortaya çıkmaktadır. Bu durum, meteorolojik açıdan anomali değerlerinin görülmesine yol açmaktadır. Kentsel yeşil alanlar (A-1), tarım alanları (A-2) ve müstakil yerleşim alanları (R-4) kırsal alanlarla karşılaştırıldığında daha düşük sıcaklık farkları göstermektedir. Bu durum bu alanların daha fazla doğal arazi örtüsü ve geçirgen yüzeyler barındırmasından kaynaklanmaktadır (Stewart, 2011b).

Tablo 2.1 Auer'in iklime dayalı sınıflandırma bölgeleri (Stewart, 2011b)

Tip	Arazi Kullanım Tipi	Tanım	Bitki Örtüsü
I-1	Ağır Sanayi Alanı	3-5 katlı, düz çatılı yapılar (demir, çelik imalatı)	<%5'den az
I-2	Hafif-Orta Ölçekli Sanayi Alanı	1-3 katlı düz çatılı yapılar (depolama alanları, küçük sanayi siteleri, endüstri parkları)	<%5'den az
C-1	Ticaret Alanı	+10 kat düz çatılı yapılar (ofis ve apartman binaları, oteller)	<%15'den az
R-1	Tipik Yerleşim Alanları	Tek katlı eğimli çatılı yapılar (tek ailelik konutlar)	>%70'den fazla
R-2	Kompakt Yerleşim Alanları	1-2 katlı eğimli çatılı yapılar (ayrık nizam)	<%30'dan az
R-3	Kompakt Yerleşim Alanları	2 katlı düz çatılı yapılar (bitişik nizm)	<%35'den az

Tablo 2.1 Auer'in iklime dayalı sınıflandırma bölgeleri (Stewart, 2011b) (devamı)

Tip	Arazi Kullanım Tipi	Tanım	Bitki Örtüsü
R-4	Müstakil Yerleşim Alanları	Çok dönümlük arazilerde geniş aile konutları	>%80'den fazla
A-1	Kentsel Yeşil Alanlar	Kent parkları, golf sahaları, mezarlıklar	>%95'den fazla
A-2	Tarım Alanları	Yerel ürünler	>%95'den fazla
A-3	Boş Araziler, Ekilmemiş Alanlar	Yabani otlar ve seyrek ormanlık alanlar	>%90'dan fazla
A-4	Gelişmemiş Kırsal Alanlar	Yoğun ormanlık alanlar	>%95'den fazla
A-5	Su Yüzeyi	Nehirler, göller	Bitki örtüsü yok

2.2.1.3 Kentsel Arazi Bölgeleri Sınıflandırması

Ellefsen 1991 yılında bina morfolojisi, sokak düzeni ve yapı (inşaat) malzemeleri parametrelerinden yola çıkarak mahalle ölçeğinde "kentsel arazi bölgeleri (urban terrain zone-UTZ)" sınıflandırma sistemini tasarlamıştır. Boston, Denver, Seattle ve Pittsburgh gibi kentlerinde dahil olduğu bu sistem, 10 Amerikan kenti için karakterize edilmiştir (Stewart, 2011b). UTZ sınıflandırma sistemi bina yapısının (yükseklik, çatı, duvar alanı vb.) ve yapı malzemelerinin (tuğla, cam, çelik) ampirik ölçümüne dayanmaktadır (Stewart, 2011b). UTZ bu yönüyle şehrin yapısını ve malzemelerini standartlaştırma yoluna giden ilk çalışmadır. Bu ölçümler sonucunda toplamda 17 farklı arazi bölgesi geliştirilmiştir (Tablo 2.2) (Ellefsen, 1987; Stewart & Oke, 2012).

Çalışma, farklı kentsel arazi desenlerini tanımlamayı ve bu desenleri anlaşılır kılmayı amaçlamaktadır. Bu doğrultuda uzaktan algılama görüntüleri ve gerçek zemin gözlemleriyle birlikte kentsel araziler detaylı bir şekilde incelenmiş ve genellemeler yapılmıştır (Ellefsen, 1987).

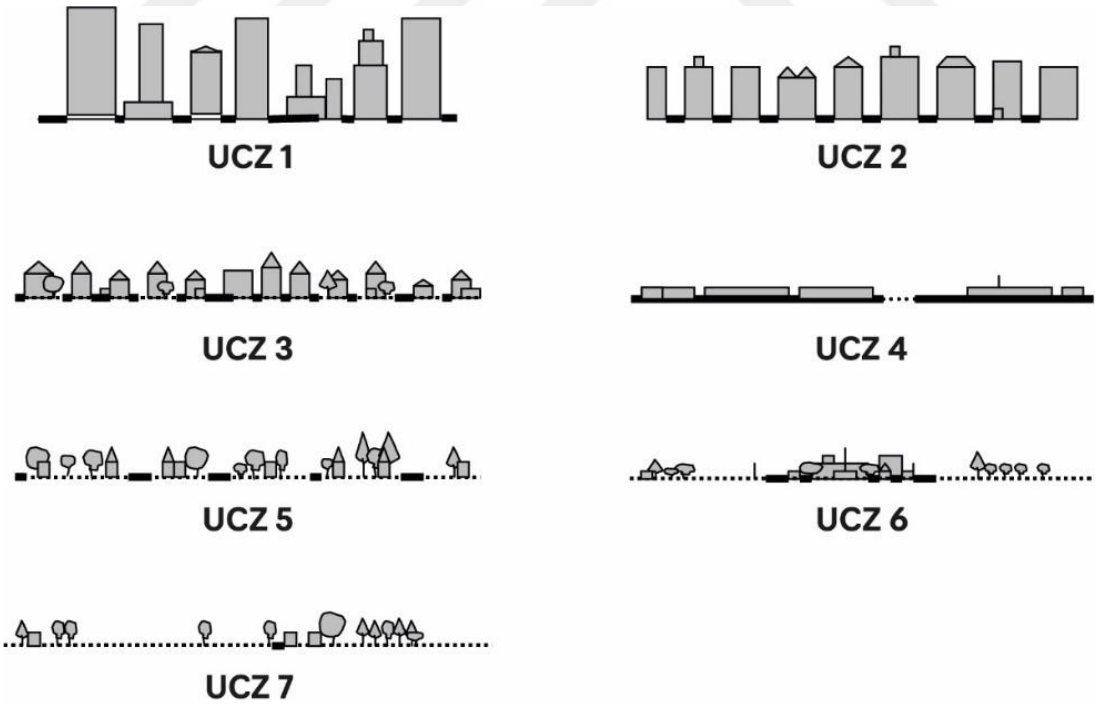
Tablo 2.2 Kentsel arazi bölgeleri sınıflandırması (Ellefsen, 1987).

Temel Sınıf Numarası	Baskın Fonksiyon	A (Bitişik Nizam)	Dc (Ayrık, Yakın Nizam)	Do (Ayrık, Açık Nizam)
1	Ticaret ve Ofis Binaları	Ticari Merkez	Ticari Merkez	Alışveriş Merkezleri
2	Konut	Merkeze Yakın Apartmanlar	Apartmanlar ve Sıra Evler	Apartmanlar
3	Konut	Az Katlı Apartmanlar	Bitişik Nizam Evler	Ayrık Nizam Evler
4	Endüstriyel/ Depolama	Sokağa Bitişik Konumlamış	Demiryolu ve Rıhtım İlişkili	Kamyonla İlişkili
5	Ticaret	Eski Ticaret Aksı	Kent Çeperinde Yapı Kümeleri	Yeni Ticaret Aksı
6	İdari/Kültürel	-	-	Açık, Planlı
7	Konut ve Ambarlar	-	Eski Köyler	-
8	Geçici Konut	-	Gecekondu Mahalleleri	-
9	Ticaret ve Konut	Eski Ticari Merkez	-	-

2.2.1.4 Kentsel İklim Bölgeleri Sınıflandırması

Oke (2004), Auer, (1978) ve Ellefsen (1991)'in tasarladıkları sistemlerin özelliklerini temel alan yeni bir sınıflandırma sistemi önermiştir. Kentsel iklim bölgeleri (urban climate zone-UCZ) olarak adlandırılan bu sistem, bina en-boy oranı, geçirimsiz yüzey fraksiyonu, yapı malzemeleri ve yüzey örtüsü parametrelerini temel alarak kentsel alanları yedi homojen bölgeye ayırmıştır (Şekil 2.4) (Stewart & Oke, 2012).

Kentsel alanların iklimsel özellikleri ve mekânsal unsurları hakkında bütünleşik bilgi sunan UCZ (Tablo 2.3), kentlerin termal açıdan iyileştirmesi konusunda önemli fırsatlar sunmaktadır (Lee & Oh, 2018). Bu bölgeleme yaklaşımı, kentlerdeki yerel iklimleri değiştirme potansiyeline sahip benzer alanları sınıflandırması bakımından önemlidir (Oke, 2007). Chandler (1965)'in Londra için yaptığı iklim bölgeleri sınıflandırmasından Oke (2004)'nin yaptığı kentsel iklim bölgelerine kadar olan iklime dayalı sınıflandırma sistemlerinden evrensel olarak en uygulanabilir olanı UCZ'dir. Ancak bu yaklaşımda genellikle gelişmiş ve modern kentlere odaklanmıştır (Y. Zheng vd., 2018).



Şekil 2.4 Oke'nin kentsel iklim bölgeleri sınıflandırma sistemi (Oke, 2004)

Tablo 2.3 Kentsel iklim bölgeleri (UCZ) sınıflandırma sistemi parametreleri (Stewart, 2011b)

UCZ)	Kentsel İklim Bölgesi	Pürüzlülük Sınıfı	En/Boy Oranı	Yapılaşma Oranı (%)
UCZ-1	Yakın mesafeli, çok katlı ve cephe kaplaması olan yapılar (iş merkezleri)	8	< 2	> 90
UCZ-2(	Yakın mesafeli, 2-5 katlı ve tuğla veya taş malzemeden yapılmış yapılar (eski kent)	7	1.2 – 2.5	> 85
UCZ-3	Yakın mesafeli ve ayrık nizamdan oluşan sıra evler (mağaza, apartman vb.)	7	0.5 – 1.5	70
UCZ-4	Az katlı büyük hacimden oluşan düşük yoğunluklu alanlar (AVM, depo vb.)	5	0.05 – 0.2	75-95
UCZ-5	1-2 katlı yapılardan oluşan düşük yoğunluklu banliyöler	6	0.2 – 0.5 (uzun ağaçlar)	35 - 65
UCZ-6	Kentsel ölçekte hizmet veren alanlar (hastane, üniversite, havaalanı vb.)	5	0.1 – 0.5 (ağaçlara bağlı)	< 40
UCZ-7	Yarı kırsal, kırsal alan yerleşimleri	4	0.05 (ağaçlara bağlı)	< 10

2.2.1.5 Yerel İklim Bölgeleri Sınıflandırma Sistemi

Kentsel alanlarda iklimsel açıdan benzer özellik gösteren bölgelerin sınıflandırılması ve bu bölgelerin sistematik bir yaklaşımla incelenmesi için pek çok çalışma yapılmıştır (Auer, 1978; Ellefsen, 1987; Stewart, 2011b, 2011a; Stewart & Oke, 2012). Ancak bu çalışmaların iklimle olan ilişkilerindeki sınırlamalar ve evrensel olarak uygulanabilirliklerinin zayıf olması yeni bir sınıflandırma yaklaşımının geliştirilmesi ihtiyacını doğurmuştur. Bu bağlamda hem kentsel ısı adası değerlendirmelerini ele alan hem de kentsel ve kırsal alanlar arasındaki karmaşıklığı çözümlemeyi amaçlayan "Yerel İklim Bölgeleri (Local Climate Zones – LCZs)" sınıflandırma sistemi geliştirilmiştir. LCZ yaklaşımı farklı

iklimsel özelliklere sahip arazi bölgelerini tanımlaması, kapsamlı bir sınıflandırma sistemi ortaya koyması, disiplinler arası iklim araştırmalarını kolaylaştırması ve mekânsal veri tabanı oluşturması bakımından önemlidir (Y. Zheng vd., 2018).

Bu yaklaşım, gökyüzü görünürlüğü (SVF), en boy oranı (h/w), bina yüzey alanı oranı (BSF), geçirimli yüzey alanı oranı (PSF), geçirimsiz yüzey alanı oranı (ISF), pürüzlülük elemanlarının yüksekliği (h), yüzey pürüzlülüğü, antropojenik etkiler ve yüzey örtüsü gibi parametrelerin standartlaştırılmasıyla gerçekleştirilmektedir (Stewart & Oke, 2012). Bu parametreler mikro ve yerel ölçekteki kent iklimleri üzerinde etkili olan faktörler olarak tanımlanmaktadır (Oke vd., 2017).

Kentsel ve kırsal alanlarda toplamda 17 farklı LCZ tipolojisi tanımlanmıştır. LCZ 1-10 arasındaki sınıflandırmalar kentsel morfolojiyi temsil ederken LCZ A-G arasındaki sınıflar ise yüzey örtüsü ile ilgili sınıflandırmaları temsil etmektedir (Şekil 2.5) (Stewart & Oke, 2012). Her bir bölge, pürüzlülük elemanlarının yüksekliği, yoğunluk/açıklık özellikleri ve yüzey örtüsü gibi ayırt edici özelliklere göre adlandırılmaktadır (Tablo 2.4) (Tablo 2.5) (Stewart, 2011b).

LCZ 1, yoğun yapılaşmanın bulunduğu kompakt ve çok katlı (>9) bölgeleri tanımlamaktadır. Bu alanlarda yapı yüksekliğinin fazla olmasından dolayı gökyüzü görünürlüğü (0.2-0.4) önemli ölçüde azalmaktadır. Arazi örtüsünün %90'ından fazlası yapılaşmış durumda olup ağaçlar veya doğal yüzeyler az ya da hiç bulunmamaktadır. Genellikle beton, çelik, taş veya cam gibi inşaat malzemeleri yoğun olarak kullanılmaktadır. Pürüzlü yüzeylerin yoğun olarak bulunmasından dolayı yansıtıcılığı (0.1-0.2) düşüktür. Tipik arazi kullanımı, yüksek yoğunluklu ticari birimler ve konutlardan oluşmaktadır. Kentsel alanlarda şehir merkezi veya yüksek yoğunluklu alt merkezler şeklinde karakterize edilmiştir. Yüksek ısınma/soğutma talebi, yüksek insan aktiviteleri ve yoğun trafik akışından dolayı yıllık ortalama atmosfere salınan ısı miktarı 50-300 W m²'dir.

LCZ 2, yoğun yapılaşmanın bulunduğu kompakt ve orta katlı bölgeleri tanımlamaktadır. Bu bölgeler; bina yoğunluğu ve kullanılan inşaat malzemeleri (tuğla, kiremit, taş, beton) bakımından LCZ 1 ile benzerlik göstermesine rağmen LCZ 2'de ortalama bina yüksekliği 3-9 m arasında değişmektedir. Yapılaşmış yüzey oranı %80'den fazladır. Bu nedenle bitki örtüsü az ya da hiç bulunmamaktadır. Bu bölgeler, yüksek yoğunluklu konut alanları, ticari birimler

veya fabrika/endüstriyel depolama alanları olarak işlev görmektedir. Kent veya ilçelerin çekirdek bölgeleri LCZ 2 ile örtüşmektedir.

LCZ 3, Az katlı (1-3) ve müstakil binaların bulunduğu yoğun yapılaşmış alanlardır. Genellikle dar sokaklardan oluşan bir kent geometrisine sahiptir. Gökyüzü görünürlüğü 0.2-0.6 aralığındadır. LCZ 1 ve LCZ 2 ile benzer inşaat malzemeleri kullanılmaktadır. Arazi örtüsünün %70'inden fazlası yapılaşmış alanlardan oluşmaktadır. Genellikle yüksek yoğunluklu konut ve ticari kullanımlarıyla ilişkilendirilmektedir. Eski veya yoğun nüfuslu kentlerin/kasabaların merkezi bölgelerini tanımlamaktadır. Orta düzey ısınma/soğutma talebi ve trafik akışından dolayı yıllık ortalama atmosfere salınan ısı miktarı 75 W m²'nin altındadır.

LCZ 4, çok katlı (>9), binalar arası açıklıkların bulunduğu, geometrik düzene sahip ve tekdüze malzemelerin (beton, tuğla, taş) kullanıldığı kentsel dokularla karakterize edilmiştir. Yüksek binalarla tanımlanan LCZ 1'e göre daha düşük en/boy oranına (0.75-1.25) ve yapılaşmış alana (%50-80) sahiptir. Yapılaşmış alanların kompakt düzene göre az olmasından dolayı geçirgen yüzey oranı (%30-40) daha fazladır. Yapılar arasında alçak bitkiler ve seyrek ağaçlar bulunmaktadır. LCZ 4'ün olası işlevi yüksek yoğunluklu konut alanlarından (apartman blokları, çok katlı konut siteleri, çok katlı apartmanlar vb.) oluşmaktadır. Yoğun nüfuslu veya sosyalist anlayışla inşa edilmiş kentler LCZ 4'e örnek olarak gösterilmektedir.

LCZ 5, orta katlı (3-9) ve geniş aralıklı binalar ile doğal yüzey örtüsü oranın (%20-40) yüksek olduğu alanlardır. Yapılar arası mesafenin artmasından dolayı en/boy oranı (0.3-0.75) azalırken gökyüzü görünürlüğü oranı (0.5 – 0.8) artmaktadır. Genellikle düşük yoğunluklu konut alanları (çok katlı apartmanlar, apartman blokları), kurumsal alanlar (araştırma/iş parkları, kampüsler) veya ticari alanlar (ofis binaları, oteller) ile ilişkilendirilmektedir. Isınma/soğutma talebinin az olması ve düşük trafik yoğunluğu nedeniyle yıllık ortalama atmosfere salınan ısı miktarı 25 W m²'nin altındadır.

LCZ 6, az katlı (1-3), ayrık nizam ve düzenlenmiş müstakil binalardan oluşmaktadır. Alçak bitkiler ve seyrek ağaçlardan oluşan geçirgen yüzey oranı %30-60' tır. Genellikle ahşap, tuğla, taş ve kiremitten oluşan inşaat malzemeleri kullanılmaktadır. Konut alanları (tek veya çok aileli konutlar) veya ticari

birimlerden (küçük ölçekli perakende mağazaları) oluşan fonksiyona sahiptir. Kentlerdeki banliyöler ve kırsal kasabalar LCZ 6'ya örnek olarak gösterilmektedir.

LCZ 7, hafif strüktüre sahip tek katlı ve yoğun yapılaşmış binalardan oluşmaktadır. Genellikle yüksek albedoya (0.15-0.35) sahip ahşap, bambu, sac, saz vb. doğal ve hafif strüktüre sahip inşaat malzemeleri kullanılmaktadır. Arazi örtüsünün yaklaşık %70'i yapılaşmış durumdadır. Dar sokaklar ve yoğun yapılaşmalardan dolayı en/boy oranı (1–2) artış göstermektedir. Zemin yapısı bitki örtüsünden arındırılmış ve sertleştirilmiş yüzeylerden oluşmaktadır. Yüksek nüfus yoğunluğuna sahip bu alanlarda altyapı genellikle gelişmemiştir. Yüksek yoğunluklu konut işlevine sahip bu bölgeler, kentlerdeki gecekondu mahallelerini tanımlamaktadır.

LCZ 8, az katlı (1–3) ve geniş taban oturumuna sahip yapılardan oluşmaktadır. Yapılar arası mesafelerin fazla olması ve alçak kat profili nedeniyle en/boy oranı (0.1–0.3) artmaktadır. Bu durumda gökyüzü görünürlüğünü de (>0.7) arttırmaktadır. Arazi örtüsünün %80'inden fazlası sert ve geçirimsiz yüzeylerden oluşmaktadır. Genellikle çelik, beton, metal ve taş gibi ağır malzemelerin kullanıldığı bu alanlar, alışveriş merkezleri, aktarma merkezleri (ulaşım) veya hafif endüstriyel depolama alanı olarak işlev görmektedir.

LCZ 9, az katlı (1-3) ve açık aralıklarla konumlandırılmış binalardan oluşmaktadır. Kentsel ve kırsal alanlar arasında geçiş özelliği gösteren bu bölgelerde seyrek yapılaşma düzeninden dolayı ortalama gökyüzü görünürlüğü >0.8 ve en/boy oranı 0.1-0.25 aralığındadır. Alanın yaklaşık %60-80 arasında geçirgen yüzeylerden oluşmaktadır. Düşük bitki örtüsü ve dağınık ağaçların hâkim olduğu bir peyzaj desenine sahiptir. İnsan aktivitelerinin az olması ve düşük trafik yoğunluğu nedeniyle yıllık ortalama atmosfere salınan ısı miktarı 10 W m²'nin altındadır. Bu alanlar konut, ticaret veya tarımsal kullanımın hâkim olduğu işlevler söz konusudur. Düşük yoğunluklu banliyö alanları ve yarı kırsal yerleşim alanları LCZ 9'a örnek olarak gösterilmektedir.

LCZ 10, fabrikalar, rafineriler vb. büyük endüstriyel tesislerin bulunduğu alanlarla karakterize edilmiştir. Kimyasal işlemlerden kaynaklanan kirleticiler ve atıklardan dolayı atmosfere salınan ısı miktarı 300 W m²'nin üzerindedir. Binalar yükseklik, hacim ve dağılım açısından çeşitlilik göstermektedir. Arazi örtüsünün %50-60'ı yapılaşmış alanlardan oluşmaktadır. Genellikle çelik, beton veya metal gibi

malzemelerin kullanıldığı alanda albedo değeri 0.12-0.20 aralığındadır. Bu bölgeler kentlerin dış mahallelerinde veya limanların ve ulaşım açısından önemli merkezlerin yakınında bulunmaktadır.

LCZ A, yaprak döken veya her dem yeşil kalan yoğun ağaçlık alanları tanımlamaktadır. Ağaçların taç bölümleri birbirine kenetlenmiş ve/veya hafif aralıklı bir şekilde konumlanabilmektedir. Bu durum gökyüzü görünürlüğünü <0,4'e düşürmektedir. Yoğun ağaç gölgeliğinin altındaki zemin örtüsü çoğunlukla alçak bitkilerden oluşmaktadır. Arazi örtüsünün %90'ından fazlası doğal ve geçirgen yüzeylerden oluşmaktadır. Bu bölgeler genellikle ormanlık alanlar, ağaç yetiştiriciliği ve kentsel park olarak tanımlanmaktadır.

LCZ B, yaprak döken ve/veya her dem yeşil kalan dağınık ağaçlardan oluşmaktadır. Ağaçlar 0.25-0.75 en/boy oranında geniş aralıklarla konumlandırılmıştır. Gölgelik bölgenin altındaki zemin örtüsü genellikle alçak bitkilerinden oluşmakta ve %90'dan fazla geçirgen yüzeylerle kaplıdır. Meyve bahçeleri, korular, doğal ormanlık alanlar veya kentsel rekreasyon alanları olarak işlev görmektedir.

LCZ C, çalılık veya kısa odunsu ağaçların açık düzende konumlanması ile karakterize edilmiştir. Çalılık örtünün zemini çıplak toprak yüzey ile kaplıdır ve arazi örtüsünün %90'ından fazlası geçirgen yüzeylerden oluşmaktadır. Bitki örtüsü yüksekliği <2 m'nin altındadır. Seyrek ve kısa boylu bitki profilinden dolayı gökyüzü görünürlük düzeyi (0.7-.0.9) artış göstermektedir. Bölge işlevi, meralık alanlar, doğal makilik alanlar veya tarım alanları olarak tanımlanmaktadır.

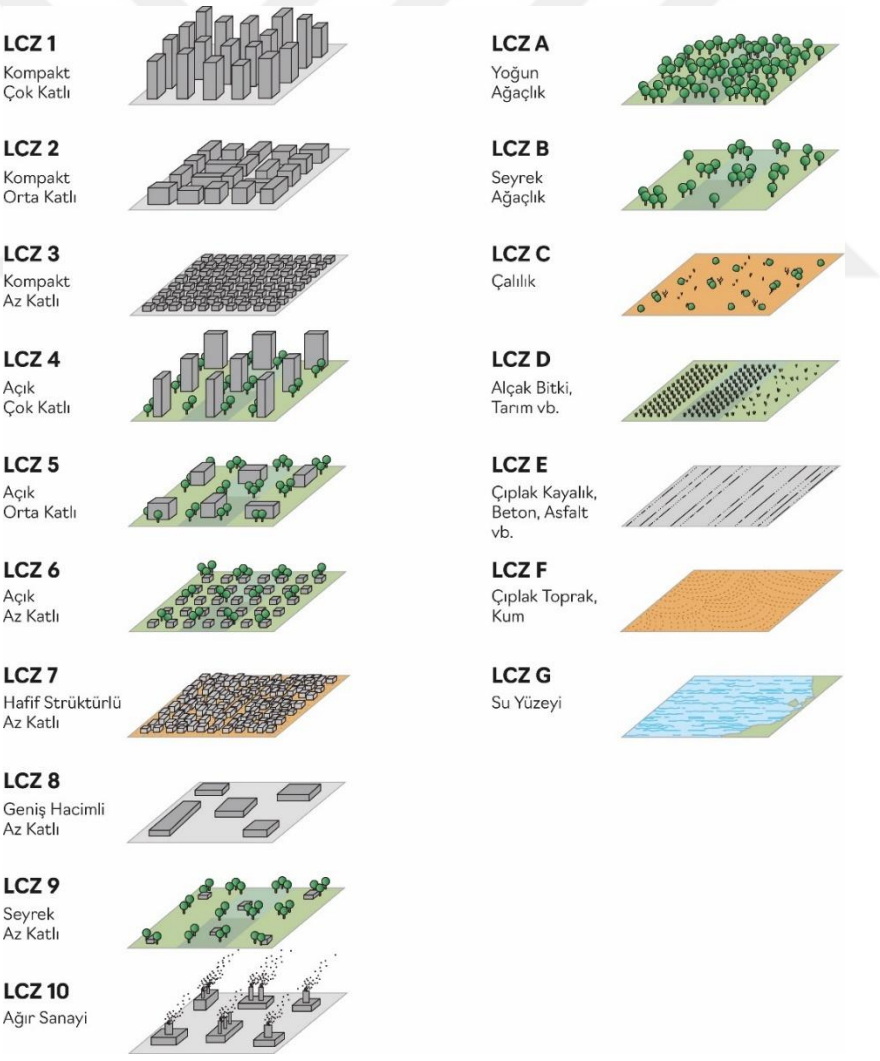
LCZ D, bitki örtüsü yüksekliğinin 1 m'nin altında olduğu çimenlik veya otsu bitkili alanlardan oluşmaktadır. Bu gölgelerdeki arazi yapısı %90'ın üzerinde geçirgen yüzeylerden oluşmaktadır. Az sayıda veya hiç ağacın bulunmamasından dolayı tam gökyüzü görünürlüğü (>0.9) sunmaktadır. Aynı zamanda aerodinamik olarak pürüzsüz yüzeylere sahiptir. Bu bölgeler genellikle tarım alanları, ekilebilir alanlar, kentsel rekreasyon alanları (çimenli parklar) ve doğal çayırlar olarak işlev görmektedir.

LCZ E, çıplak kayalık, çakıl, laterit, beton, asfalt vb. geçirgen olmayan yüzeylerle kaplanmış bölgeleri tanımlamaktadır. Bitki örtüsünün bulunmadığı bu alanlarda arazi örtüsünün %90'ından fazlası sert ve geçirimsiz yüzeylerden oluşmaktadır. Bu bölgelerde kentsel pürüzlülük elemanlarının yüksekliğinin 0,25 m'nin altında

olması geniş gökyüzü görünürlüğü (>0.9) sunmaktadır. Bölge yüzeyi yüksek ısı tutma kapasitesine (1,200-2,500 J m^{-2} $s^{-1/2}$ K^{-1}) sahiptir. Bu alanlar büyük otoparklar, konteyner limanları, havaalanı veya diğer kentsel ulaşım alanları vb. işlevlere hizmet etmektedir.

LCZ F, bitki örtüsünün bulunmadığı çıplak toprak veya kumdan oluşan arazileri ifade etmektedir. Bu tür arazilerde yüzeyin %90'ından fazlası geçirgen yapıdadır. Yüzey örtüsü nedeniyle pürüzsüz ve yansıtıcı (0.20-0.35) bir yapıya sahiptir. Ayrıca engelsiz bir gökyüzü manzarası sunmaktadır. Sürülen veya nadasa bırakılan tarım alanları, doğal çöller veya çorak arazilerden oluşan bir kullanıma sahiptir.

LCZ G, denizler, göller, rezervuarlar, lagünler ve akarsular gibi büyük veya küçük su kütleleri ile karakterize edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü bulunmayan bu bölgeler düşük albedo değerine (0.02-0.10) sahiptir (Stewart, 2011b; Stewart & Oke, 2012).



Şekil 2.5 Yerel iklim bölgeleri (LCZ) (Oke vd., 2017)

Tablo 2.4 Yerel iklim bölgeleri (LCZ) sınıflandırma sistemi parametreleri (Stewart & Oke, 2012)

LCZ	SVF	AR	BSF (%)	ISF (%)	PSF (%)	HRE (m)	TRC
LCZ 1	0.2 - 0.4	> 2	40 - 60	40 - 60	< 10	> 25	8
LCZ 2	0.3 - 0.6	0.75 – 2	40 - 70	30 - 50	< 20	10 – 25	6 - 7
LCZ 3	0.2 - 0.6	0.75 – 1.5	40 - 70	20 - 50	< 30	3 – 10	6
LCZ 4	0.5 - 0.7	0.75 – 1.25	20 - 40	30 - 40	30 - 40	> 25	7 - 8
LCZ 5	0.5 - 0.8	0.3 – 0.75	20 - 40	30 - 50	20 - 40	10 – 25	5 – 6
LCZ 6	0.6 - 0.9	0.3 – 0.75	20 - 40	20 - 50	30 - 60	3 - 10	5 – 6
LCZ 7	0.2 - 0.5	1 – 2	60 - 90	< 20	< 30	2 – 4	4 - 5
LCZ 8	> 0.7	0.1 - 0.3	30 -50	40 - 50	< 20	3 - 10	5
LCZ 9	> 0.8	0.1 – 0.25	10 – 20	< 20	60 - 80	3 - 10	5 – 6
LCZ 10	0.6 - 0.9	0.2 – 0.5	20 – 30	20 - 40	40 - 50	5 - 15	5 – 6
LCZ A	< 0.4	> 1	< 10	< 10	< 90	3 - 30	8
LCZ B	0.5 - 0.8	0.25 -0.75	< 10	< 10	< 90	3 – 15	5 – 6
LCZ C	0.7 - 0.9	0.25 – 1.0	< 10	< 10	< 90	< 2	4 - 5
LCZ D	> 0.9	< 0.1	< 10	< 10	< 90	< 1	3 - 4
LCZ E	> 0.9	< 0.1	< 10	< 10	< 10	< 0.25	1 - 2
LCZ F	> 0.9	< 0.1	< 10	< 10	< 90	< 0.25	1 - 2
LCZ G	> 0.9	< 0.1	< 10	< 10	< 90	-	1

(SVF (Sky View Factor): Gökyüzü görünürlük faktörü, AR (Aspect Ratio): En/Boy oranı, BSF (Building Surface Fraction): Bina yüzey oranı, ISF (Impervious Surface Fraciton): Geçirimsiz yüzey oranı, PSF (Pervious Surface Fraction): Geçirimli yüzey oranı, HRE (Height of Roughness Elements): Pürüzlülük elemanlarının yüksekliği, TRC (Terrain Roughness Class): Arazi pürüzlülük sınıfı.)

Tablo 2.5 Yerel iklim bölgelerine (LCZ) ait ısıl, ışınımsal ve metabolik özellik değerleri (Stewart & Oke, 2012)

LCZ	**Isıl Geçirgenlik** **(J m^{-2} $s^{-1/2}$ K^{-1})**	**Albedo**	**Antropojenik Isı Salımı** **(W m^2)**
LCZ 1	1,500 – 1,800	0.10 – 0.20	50 -300
LCZ 2	1,500 – 2,200	0.10 – 0.20	<75
LCZ 3	1,200 – 1,800	0.10 – 0.20	<75
LCZ 4	1,400 – 1,800	0.12 – 0.25	<50
LCZ 5	1,400 – 2,000	0.12 – 0.25	<25
LCZ 6	1,200 – 1,800	0.12 – 0.25	<25
LCZ 7	800 – 1,500	0.15 – 0.35	<35
LCZ 8	1,200 – 1,800	0.15 – 0.25	<50
LCZ 9	1,000 – 1,800	0.12 – 0.25	<10
LCZ 10	1,000 – 2,500	0.12 – 0.20	>300
LCZ A	Bilinmiyor	0.10 – 0.20	0
LCZ B	1,000 – 1,800	0.15 – 0.25	0
LCZ C	700 – 1,500	0.15 – 0.30	0
LCZ D	1,200 – 1,600	0.15 – 0.25	0
LCZ E	1,200 – 2,500	0.15 – 0.30	0
LCZ F	600 – 1,400	0.20 – 0.35	0
LCZ G	1,500	0.02 – 0.10	0

Yerel iklim bölgelerinin haritalanmasında, kullanılan veri kaynakları ve analiz yöntemlerine bağlı olarak 3 ana yaklaşım bulunmaktadır. Bunlar; manuel örnekleme, uzaktan algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS)'dir (Ünal Çilek, 2021; Y. Zheng vd., 2018). Manuel örnekleme yöntemi, zaman alıcı bir süreç olması ve farklı kullanıcıların farklı sonuçlar üretme olasılığı nedeniyle özellikle il ölçeğindeki LCZ haritalarının üretilmesinde yaygın olarak tercih edilmemektedir (Ünal Çilek, 2021; Y. Zheng vd., 2018).

Uzaktan algılama yöntemi, uydu görüntüleri kullanılarak LCZ haritalarının üretilmesini sağlamaktadır. Bu süreçte, nesne tabanlı görüntü analizi ve denetimli piksel tabanlı sınıflandırma olmak üzere iki temel teknik kullanılmaktadır (Bechtel & Daneke, 2012). Bu tekniklerden piksel tabanlı sınıflandırma, segmentasyona gerek duymadan daha az ayrıntı ve bağlam bilgisi gerektirdiği için daha basit ve uygulanabilir bir yöntemdir (Bechtel & Daneke, 2012). Dünya Kentsel Veri Tabanı ve Erişim Portalı Araçları (WUDAPT) LCZ tipolojilerini tanımlamak için sıklıkla kullanılan bir yaklaşımdır. Bu yöntem denetimli piksel tabanlı sınıflandırma tekniğine entegre edilerek kullanılır ve Google Earth programında mevcut olan uzaktan algılama verilerine ve SAGA GIS yazılımına ihtiyaç duymaktadır (Chen vd., 2020; Y. Zheng vd., 2018). WUDAPT yönteminde haritalar otomatik olarak işlenerek vektörel sonuçlar elde edilmektedir (Chen vd., 2020). Ayrıca NASA tarafından sunulan LANDSAT uydu görüntüleri de uzaktan algılama yöntemiyle LCZ haritalarının hızlı bir şekilde üretilmesini olanak tanımaktadır (Ünal Çilek, 2021).

CBS yöntemi, uzaktan algılama ve manuel örnekleme yöntemlerine göre daha geniş bir veri altyapısına ihtiyaç duymaktadır. Aynı zamanda LCZ'lerin sınıflandırılmasında kullanılan her bir parametreyi hesaplamasından dolayı uygulanması diğer yöntemlere göre oldukça karmaşık ve zordur (Y. Zheng vd., 2018). Bu yöntem vektör tabanlı ve raster tabanlı olmak üzere iki farklı teknikle uygulanabilmektedir. Vektör tabanlı teknik, arazi örtüsünün sınırlarını algılaması bakımından avantaj sağlamaktadır. Raster tabanlı teknik ise kentsel ısı adası gözlemlerini standartlaştırarak veri dokümantasyonuna ve istatiksel analizlere uygun bir altyapı sunmaktadır. Ayrıca raster tabanlı teknik, arazi yüzey özelliklerini sınıflandırarak mekânsal analizlerin yapılmasına olanak tanımakta ve bu tür analizler için sıklıkla kullanılmaktadır (Ünal Çilek, 2021).

2.2.2 Kentsel Isı Adası Formasyonu

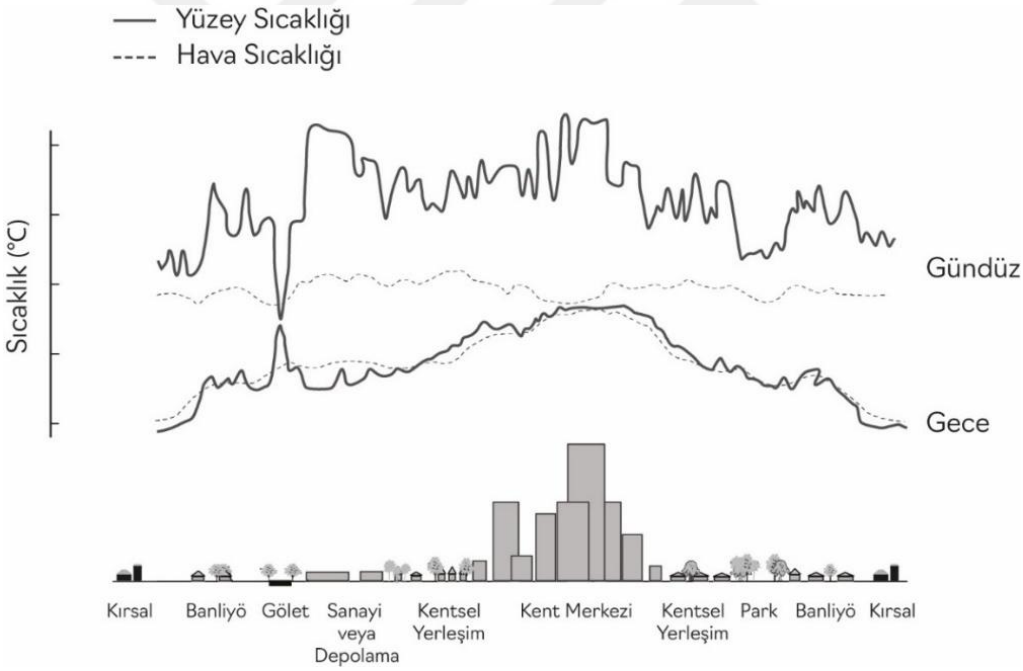
Kentsel ısı adası (Urhan Heat Islands-UHI), şehirlerin büyüklüklerine, iklim tipine, yüzölçümlerine veya boyutlarına bakılmaksızın hemen hemen her kentsel alanda görülebilen bir olgudur (EPA, 2008a; Oke, 1995). Kentleşmenin atmosferik yapıda neden olduğu en belirgin klimatolojik değişikliklerden biri olan ısı adası olgusu (Oke & Maxwell, 1975), insan faaliyetleri sonucunda meydana gelen yerel ölçekli iklim değişikliğine örnek olarak gösterilmektedir (Oke, 1995; Oke vd., 2017) Kentsel ısı adasından kaynaklanan yerel iklim değişikliğinin, kaynaktan uzaklaştıkça azalması ve yerel ölçekte sınırlı kalması, küresel iklim değişikliğinden farklılaşmasını sağlamaktadır. Çünkü küresel iklim değişikliği, geniş ölçekte ve uzun bir zaman dilimi boyunca sürerek iklim ölçümlerindeki önemli değişiklikleri ifade ederken kentsel ısı adası kaynaklı yerel iklim değişikliği ise yerel ölçekte sınırlı kalmakta ve mevsimsel hatta günlük olarak değişim göstermektedir (EPA, 2008a).

Kentsel ısı adası fenomeni ilk kez 1800'lü yıllarda Luke Howard tarafından Londra'da yapılan çalışmalarda ortaya koyulmuştur. Londra için; sıcaklık, nem, yağış, buharlaşma ve basınç gibi iklimsel verileri 1806-1830 yılları arasında günlük olarak ölçmüş ve Londra'nın merkezinin kırsala oranla daha sıcak olduğunu tespit etmiştir (Mills, 2008). Bu tespitten hareketle kentsel ısı adası fenomeni temel olarak kentsel alanların çevrelerindeki kırsal alanlara oranla daha yüksek sıcaklık değerleri göstermesi olarak tanımlanmaktadır (Şekil 2.6) (EPA, 2008a). Bu olgunun ısı adası olarak tanımlanmasının temel nedeni, yüzeye yakın bölgelerdeki hava sıcaklığının izoterm kalıplarının "adayı", çevresindeki daha serin olan kırsal alanların ise "denizi" anımsatması olarak açıklanmaktadır (Oke, 1995). Kentleşmenin artmasıyla birlikte doğal/nemli yüzeylerin azalarak yerini geçirimsiz yüzeylere bırakması, antropojenik ısı salımı, kentsel dokuda artan yatay ve düşey yoğunluk, büyük pürüzlülük elemanları nedeniyle hava akışının durağanlaşması ve ısının hapsolması, yapı malzemelerinin yüksek ısı tutma kapasitesi, evapotranspirasyon yapan yüzeylerin azalması, uzun dalga boylu boylu radyasyonun çatı seviyesi altında hapsolması veya hava kirliliği nedeniyle artan karşı radyasyon gibi nedenler, kentsel mikro iklimleri değiştirerek kentsel ısı adası oluşumlarına neden olmaktadır (Oke & Maxwell, 1975).

Kentsel (T_U) ve kırsal (T_R) alanlardaki ortalama sıcaklık farkı (2.1) ise kentsel ısı adası yoğunluğu (Urhan Heat Island Intensıty-UHII) olarak ifade edilmektedir (Oke vd., 2017).

$$UHI_{tür} = \Delta T_{U-R} = T_U - T_R \tag{2.1}$$

Kentsel ısı adası yoğunluğu özellikle yaz mevsiminde; gece saatlerinde, açık gökyüzü ve hafif rüzgârlı koşullarda en yüksek etkisini gösterdiği bilinmektedir. Bu koşullarda farklı yüzey tiplerinin farklı enerji yayılımına sahip olmasından dolayı kendilerine özgü mikro iklimler oluşturmaktadır (Oke vd., 2017; Oke & Maxwell, 1975). Bu koşulların tersi gerçekleştiği takdirde yoğun bulut örtüsü güneş radyasyonunun yeryüzüne ulaşmasını engelleyerek kentsel alanların gündüzleri ısınmasını azaltmaktadır. Benzer şekilde güçlü rüzgâr akışı ise atmosferdeki durağanlığı bozarak sirkülasyonu artırmakta ve kentsel-kırsal sıcaklık farkını düşürmektedir (EPA, 2008a).



Şekil 2.6 Atmosferik ve yüzey sıcaklığının kentsel ve kırsal alanlardaki gece ve gündüz vakitlerindeki değişimi (EPA, 2008a)

Oke (1995) Montrel, Quebec ve Vancouver kentlerinde yaptığı bir çalışmada, kentsel ısı adası etkisinin gün batımından itibaren başlayarak gece saatlerinde en büyük etkilerinin gözlemlendiğini tespit etmiştir. Kırsal alanlardaki soğuma oranı gün batımından itibaren hızlı bir şekilde artarken kentlerde bu oranın çok az veya nerdeyse hiç olmadığını saptamıştır. Bu durumu ise kentsel ve kırsal alanlardaki

farklı yüzey tiplerinin farklı ısı salım düzeylerine sahip olması kentlerdeki farklı mikro iklimlerin gelişmesini sağlayarak enerji değişim süreçlerinin farklılaştırması olarak açıklamıştır (Oke & Maxwell, 1975).

2.2.3 Kentsel Isı Adasının Çok Ölçekli Yapısı ve Türleri

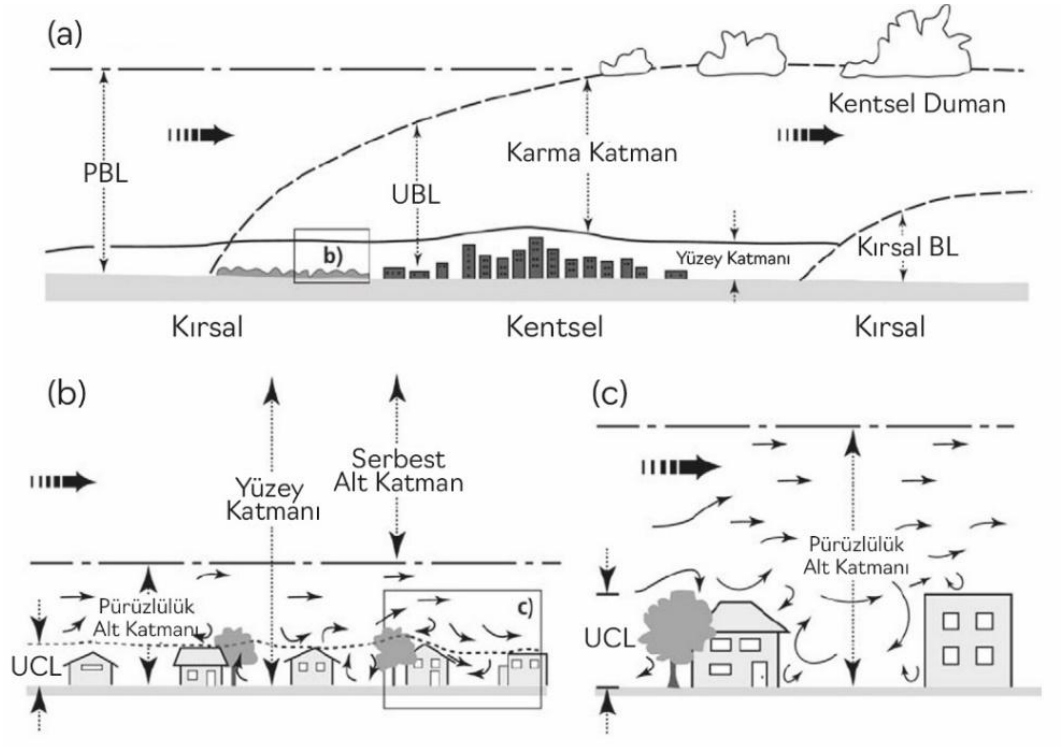
Kentsel ısı adası, atmosfer ve kentsel yüzeyler arasındaki karşılıklı enerji akışının sağlanması üzerine farklı katmanlarda incelenmektedir. Bunlar; atmosferik ısı adası, yüzey ısı adası ve yüzey altı ısı adası olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Her bir ısı adası temelde kentsel ve kırsal alandaki sıcaklık farklılıklarından kaynaklansa da bu ısı adası türlerinin oluşumunda yer alan süreçler, yoğunlukları, zamansal dinamikleri ve ölçekleri birbirinden farklılaşmaktadır (Oke, 1995). Kentsel ısı adası türleri genellikle üç ölçekte gözlemlenmektedir. Bunlar; mezo/bölgesel ölçek, yerel ölçek ve mikro ölçektir (Bourikas, 2016; Shi vd., 2016). Bu ölçek birimlerinin boyutu ilgili fiziksel fenomenin etkileşimde bulunduğu yatay ve dikey atmosferik ölçeğin kapsamına göre değişmektedir (Şekil 2.7) (Bourikas, 2016).

Mezo ölçek, kentsel ve antropojenik süreçlerin etkisinin en çok görüldüğü iklim ölçeğidir. Ölçeğin büyüklüğünden dolayı bireysel ve kentsel özelliklerin iklime etkisini ayırt etmek oldukça zordur. Dikey ilişkiler bakımından: karma katman (mixing layer), sınır katmanı (urban boundry layer) ve kentsel yüzey katmanını (urban surface layer) içermektedir. Günümüz hava tahminlerinde kullanılan çoğu sayısal modeller bu ölçekteki hava akışlarından elde edilmektedir (Bourikas, 2016).

Yerel ölçek, birkaç yüz metre ve birkaç kilometrelik (10^2-10^4) (Grimmond & Oke, 2002) yatay mesafedeki iklimsel süreçleri tanımlamaktadır. Bu ölçekteki kentsel doku, mahalle biriminden kasaba birimine kadar ulaşabilmektedir. Yüzey katmanı (urban surface layer) ve serbest alt katmanı (intertial sublayer) kapsamaktadır. Mezo ölçeğin aksine bireysel ve kentsel ögelerin atmosferik süreçlere etkisi açıkça görülmektedir. Kentsel parametreler temel alınarak hava tahmin modelleri için alt sınır koşullarını sağlamak amacıyla geliştirilen bir ölçektir (Bourikas, 2016).

Mikro ölçek, en yüksek yatay çözünürlüğe sahip ölçektir. Tek bir bina biriminden birkaç bina bloğuna kadar değişen bir kentsel dokuya sahiptir. Dikey ilişkiler bakımından yeryüzünden ortalama bina yüksekliğinin 2-3 katına kadar uzanan bir mesafedeki iklimsel değişimleri tanımlamaktadır. Kentsel örtü katmanı (urban canopy layer) ve pürüzlülük alt katmanını (roughness sublayer) içeren mikro ölçek,

detaylı inceleme gerektiren araştırmalarda (dış mekân termal konforu, insan sağlığı, bina enerji tüketimi vb.) sıklıkla kullanılmaktadır (Bourikas, 2016; Shi vd., 2016). Kentsel mikro iklim olarak da adlandırılan bu ölçekteki mikroklima, çevresindeki alanlarla veya kentin hâkim olduğu iklimsel koşullarla farklılık gösterebilmektedir (Shi vd., 2016).



Şekil 2.7 Kentsel ısı adası ölçekleri: mezo ölçek (a), yerel ölçek (b), mikro ölçek(c) (Mills, 2014)

Bu ölçekler kapsamında kentsel alanlarda görülen ısı adası türleri üç gruba ayrılmaktadır. Bunlar: yüzey ısı adası, atmosferik ısı adası ve yüzey altı ısı adasıdır. Atmosferik ısı adası ise kendi içinde: kentsel örtü katmanı ısı adası ve kentsel sınır katmanı ısı adası olarak iki alt gruba ayrılmaktadır.

Yüzey ısı adası, kentsel yüzeylerin kırsal yüzeylere oranla daha yüksek yüzey sıcaklığı göstermesi olarak tanımlanmaktadır. Yüzey ısı adası yoğunluğu ise kentsel ve kırsal alanlardaki ortalama yüzey sıcaklığı farkı ile ifade edilmektedir (Klok vd., 2012). Yüzey ısı adaları temel olarak kentsel ve kırsal alanlardaki radyatif yüzey ısınmasındaki farklılıklardan kaynaklanmaktadır (Choi vd., 2014). Bu tür ısı adaları uzaktan algılama sensörleriyle elde edilen termal uydu görüntüleriyle hesaplanmaktadır (Jabbar vd., 2023; Klok vd., 2012; Oke vd., 2017). Termal uydu görüntülerinden elde edilen SUHI tahminlerinin neredeyse tamamı bulutsuz ve

düşük rüzgâr hızının olduğu gökyüzü koşullarında gerçekleşmektedir. Bu durumun temel nedenlerinden ilki, bulutların yüzeyden yayılan uzun dalga boylu radyasyonun sensöre ulaşmasını engellemesidir. İkinci neden ise yüksek rüzgâr hızının atmosferdeki karışımı arttırmasıdır. Bu iki neden de kırsal ve kentsel alanlardaki yüzeylerin radyatif soğuma farkını etkileyerek SUHI'nin yoğunluğunu azaltmaktadır (Oke vd., 2017)

SUHI, kentsel yüzeylerin özelliklerine ve koşullarına bağlı olarak değişmektedir. Kuru, koyu renkli, sert ve geçirimsiz yüzeyler; açık renkli, gölgeli ve nemli yüzeylere oranla güneş radyasyonunu daha kolay absorbe ederek daha sıcak hale gelmektedir (Klok vd., 2012).

SUHI olgusu zamansal gelişim açısından günün her saatinde meydana gelebilmektedir. Ancak etkisini yaz aylarında ve güneş ışığının en güçlü olduğu gündüz saatlerinde göstermektedir (EPA, 2008a; Jabbar vd., 2023; Oke vd., 2017). SUHI yoğunluğu; güneş radyasyonun şiddetine, yüzey örtüsüne ve hava durumundaki değişikliklere göre mevsimler olarak farklılaşmaktadır (EPA, 2008a).

Kentsel alanlarda artan SUHI yoğunluğu, yüzeylerin radyasyon dengesini olumsuz yönde etkilemekte ve enerji tüketimini arttırmaktadır. Bu durum antropojenik ısı salımını tetikleyerek ekolojik dengenin bozulmasına neden olmaktadır (Mohammad & Goswami, 2021).

Yüzey sıcaklıkları, özellikle örtü tabakasındaki hava sıcaklıkları üzerinde dolaylı ama önemli bir etkiye sahiptir. Örneğin parklar, su ögeleri, bitki örtüsü gibi doğal yüzeye sahip alanlarda nispeten daha soğuk yüzey sıcaklığı gözlemlenirken bu alanlar aynı zamanda hava sıcaklığının yüksek olduğu yoğun kentsel yerleşmelerde havanın soğumasına etki etmektedirler. Yüzey sıcaklığı ve hava sıcaklığı arasında dinamik bir ilişki bulunmakta olup, hava sıcaklıkları, yüzey sıcaklıklarına oranla daha az değişim göstermektedir (EPA, 2008; Klok vd., 2012).

Kentsel örtü katmanı, zemin seviyesinden başlayarak kentsel pürüzlülük elemanları olarak tanımlanan: ağaç, bina vb. 3 boyutlu ögelerin en üst noktasına kadar olan mesafeyi ifade etmektedir (EPA, 2008; Oke, 2004). Yoğun kentsel alanlarda kentsel örtü tabakasının üst sınırı yapıların çatıları olarak tanımlanırken açık alanlarda ise bir üst sınırın tamamen bulunamayabileceği belirtilmektedir (Oke, 1976). UCL'nin mikro iklimsel etkileri kaynaktan, dikeyde birkaç metre, yatayda ise birkaç yüz

metre uzaklıkta devam etmektedir. Ancak hava akışı, rüzgâr hızı veya oluşan türbülans girdapları bu etkinin zayıflamasına ve katmanın derinliğinin değişmesine neden olmaktadır (Oke, 1976; Oke, 2004). Kentsel ısı adası türleri arasında en çok atıfta bulunulan ve mikro ölçekte tanımlanan UCL, kentsel yüzeylerin ve hacimlerin (3 boyutlu ögeler) arasındaki enerji dengesiyle ve hava akışlarıyla oluşmaktadır (Mills, 1997; Oke, 1976).

Kentsel sınır katmanı, ağaç veya yapı gibi kentsel pürüzlülük elemanlarının en üst seviyesinden başlayarak kentsel peyzajın atmosfer üzerindeki etkisinin sona erdiği noktaya kadar olan mesafeyi tanımlamaktadır (EPA, 2008a). Kentsel yüzeylerdeki enerji dengesi, atmosferik koşullar ve termal sirkülasyonların etkisiyle oluşan bu tabaka, kentsel yüzeylerden ortalama 1,5-2 km kadar mesafeyi kapsamaktadır (Barlow, 2014). Kentsel sınır katmanı ısı adası kavramı ise kentsel alandaki sınır katmanı (UBL) ile kırsal alandaki sınır katmanı (RBL) arasındaki sıcaklık farkı olarak tanımlanmaktadır (Oke vd., 2017). Mezo ölçek ve yerel ölçekte görülen bu ısı adası türü, mobil (uçak, balon vb.) veya sabit (kule) noktalardaki sıcaklık sensörleriyle ölçülmektedir (Oke vd., 2017).

Çeşitli kaynaklardan salınan su buharı, ısı veya kirletici gazlar kentsel sınır katmanında birleşerek kentsel duman (urban plume) olarak adlandırılan bir karışım katmanı (mixed layer) oluşturmaktadır (Oke, 1995). Bu katmanda gündüzleri sıcak, kuru ve kirletici maddelerin yoğunlaşmasıyla kubbeleşme meydana gelmektedir. Meydana gelen bu yoğun ve kubbeleşmiş tabakadaki sıcak hava kentin hâkim rüzgâr yönü boyunca taşınarak sıcaklığın uzun mesafelerde gözlemlenmesine neden olmaktadır (Oke, 1995). Zamansal gelişim açısından farklılık gösteren UHIUCL gündüzleri nadir veya hiç gözlemlenmezken en yüksek etkisini gece veya şafak zamanı göstermektedir (EPA, 2008a).

Yüzey altı ısı adası, aynı derinliğe sahip kentsel zeminin kırsal zemine oranla daha yüksek sıcaklık değerlerinin gözlemlenmesi olarak açıklanmaktadır. Yerel ölçekte ele alınan yüzey altı ısı adası, yeraltına yerleştirilen sıcaklık sensörleri ile ölçülmektedir (Oke vd., 2017). Bu ısı adası türü genel olarak toprağın termal özellikleri, jeotermal ısı akışı veya kentsel altyapı kaynaklı ısı salımlarının uzun bir dönem boyunca zeminde birikmesi sonucu oluşmaktadır (Luo & Asproudi, 2015). Kentsel alanlardaki zemin altı ortamın sıcaklık profili doğal yüzeylerin hâkim olduğu kırsal alanlarınkinden daha karmaşık bir yapıdadır. Bu karmaşıklığın temel

nedeni ise kentsel alanlarda farklı arazi kullanımların bulunması ve yoğun altyapıdan kaynaklanmaktadır (Menberg vd., 2013).

Zemin altında biriken sıcaklık dalgalarının zemine doğru yayılma hızı zeminin dikeydeki sıcaklık gradyanına ve termal özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Zemine yakın bölgelerdeki sıcaklık gradyanı daha keskin olduğu için ısı transferi derin bölgelere oranla daha hızlı gerçekleşmektedir. Bu durum yer altındaki enerji dengesini değiştirerek kentsel alanlarda aylık, yıllık veya daha uzun zamansal ölçeklerde iklimsel tepkilerin görülmesine neden olmaktadır (Oke vd., 2017).

2.2.4 Kentsel Isı Adası Yoğunluğu Ölçme Yöntemleri

Kentsel ısı adası türleri, zamansal, ölçeksel ve oluşum süreçleri özelliklerine göre farklı şekillerde ölçüm ve hesaplama yöntemleri gerektirmektedir. Genellikle kentsel yüzeyler, atmosferik koşullar ve kentsel katmanlar (örtü katmanı, sınır katmanı) arasındaki enerji dengesinin değişimi ısı adası tiplerinin doğrudan ölçümlerini etkilemektedir. Bu kapsamda yerinde ölçüm (sabit istasyon ölçümleri, mobil ölçümler) ve uzaktan algılama yöntemleri olmak üzere iki farklı yöntem bulunmaktadır.

Yerinde ölçüm yöntemleri sabit ve mobil ölçümler olmak üzere 2 şekilde ele alınmaktadır. Bu tür ölçümler fiziksel değişkenlerin (hava sıcaklığı, nem, rüzgâr hızı ve yönü) anlık değerlerini yansıtması, detaylı zamansal ve mekânsal bilgiler sunması bakımından avantajlara sahiptir (Bahi vd., 2020).

Sabit istasyon ölçümleri kentsel ısı adasının tespit edilmesinde kullanılan yaygın yöntemlerden biridir. Mezo ve mikro ölçekteki fenomenlerin incelenmesinde sıklıkla kullanılan bu yaklaşım, yalnızca kentsel örtü katmanındaki hava sıcaklıklarının değil aynı zamanda kentsel sınır katmanındaki dikey sıcaklık profillerinin ve hava kirleticilerinin yayılımının da ölçülmesine odaklanmaktadır (Bahi vd., 2020). Sabit İstasyonlarda ölçüm için kullanılacak termal sensörler zemin seviyesinden yaklaşık olarak 1,25-2 m yüksekliğinde yerleştirilmesi uygundur. Ancak bazı durumlarda daha yüksek ölçüm seviyelerine de izin verilmektedir (Oke, 2007).

Sabit ölçümler, kırsal ve kentsel alanlarda kullanılmak üzere iki veya daha fazla ölçüm istasyonuna ihtiyaç duymaktadır. Bu istasyonların hem kentsel (bina morfoloji ve yoğunluğu, arazi kullanım fonksiyonları ya da antropojenik ısı

emisyonları) hem de kırsal (kent çeperi) alan özelliklerini iyi yansıtan noktalarda yer alması ve benzer yüksekliklerde konumlandırılması gerekmektedir (Oke, 2007). Bu istasyonlardan; günlük, haftalık, mevsimlik veya yıllık periyotlarda gelen veriler doğrultusunda kentsel ısı adası fenomeninin gelişim desenlerinin incelenmesine, hava sıcaklığının mekânsal dağılımının analiz edilmesine ve kentsel-kırsal sıcaklık değerlerinin karşılaştırılmasına olanak sunmaktadır (Bahi vd., 2020).

Mobil istasyon ölçüm yöntemi, sabit istasyonlara göre kurulması daha kolay ve daha düşük maliyetlidir. Bu nedenle ölçüm istasyonlarının kurulmasının veya ekonomik koşulların uygun olmadığı noktalarda bir alternatif sunmaktadır. Bu ölçüm yaklaşımı kentsel alanda belirli rotayı takip ederek ölçümleri gerçekleşmektedir. Mobil istasyonlar ile yapılan ölçümler günün herhangi bir zaman diliminde yapılabilmektedir. Ölçümlerde motorlu araçların kullanıldığı takdirde sıcaklık sensörlerinin ısı kaynaklarından (egzoz vb.) uzakta yerleştirilmesi gerekmektedir. Böylelikle daha doğru değerlerin tespit edilmesi sağlanmaktadır (Bahi vd., 2020).

Mobil ölçüm yöntemi yalnızca erişilebilir alanlarda kullanılabildiği için hem kentsel mekânı tam olarak temsil edememekte hem de sıcaklık değerlerinin mekânsal dağılımı konusunda net bir sonuca ulaştırmayı kısıtlamaktadır (Bahi vd., 2020).

Uzaktan algılamayla yapılan ölçümler, geniş bir kentsel alanı kapsaması nedeniyle yüzey ısı adalarının hesaplanması için kullanılan bir yöntemdir. Teknik olarak uzaktan algılama sensörleri yukarı yönlü ısıl radyansın mekânsal desenlerine odaklanarak SUHI gözlemleri yapmaktadır (Voogt & Oke, 2003). Bu yöntemde uydu, uçak, balon vb. yüksek irtifadaki araçların sensörlerinden elde edilen termal görüntülerinin işlenmesi sonucunda arazi yüzey sıcaklık (LST) değerlerinin çıkarılması mümkün hale gelmiştir (Weng, 2009). Kullanılan sensörler, zeminden yansıyan kısa (01-3 μm) ve uzun dalga boyuna (3-100 μm) sahip radyasyon enerjisini yakalayabilen özelliklere sahiptir ve genellikle 0,1 μm ile 100 μm arasında değişen spektral bantları incelemektedir (Bahi vd., 2020).

Uydu görüntüleri sabit veya mobil ölçüm istasyonlarında olduğu gibi günün tüm zaman dilimlerinde sürekli veri kaydetmesi söz konusu değildir. Çünkü uydu

yörüngesi dünya çevresinde dönmektedir. Uyduların hareketinden kaynaklı olarak genellikle bir bölgenin üzerinden gündüz ve gece olmak üzere iki kez geçmektedir. Ancak özel uçuşlarla günün herhangi bir saatinde de yüzey sıcaklığının ölçülmesi mümkündür. Uzaktan algılama sensörleri doğrudan yerinde yapılan ölçümler ile karşılaştırıldığında (sabit ve mobil istasyonlar) sensörler tarafından algılanan spektral dalga boylarında radyasyon enerjisinin yayılmasını ve yansımasını etkileyen kentsel yüzeylerin radyatif özelliklerini dikkate alması gerektirdiği için dolaylı bir ölçümdür (Voogt & Oke, 2003).

Kentsel alanlardaki ısı adası desenlerinin incelenmesinde Landsat, HCMM, ASTER, MODIS, AVHRR, ENVISAT, TIMS gibi her birinin kendine özgü mekânsal, spektral ve zamansal özelliklere sahip uydu görüntüleri kullanılmaktadır (Bahi vd., 2020; Weng, 2009). Yüksek mekânsal çözünürlüğe sahip termal uydu görüntüleri, kentsel yüzeylerin termal özellikleri ile gökyüzü görünürlük faktörü (SVF), kanyon geometrisi, yüzey materyalleri veya NDVI gibi bileşenler arasındaki ilişkiyi incelemek için kullanılmaktadır (Voogt & Oke, 2003).

2.3 Mekânsal Morfolojik Yapı ve Kentsel Sıcaklık Etkileşimleri

Kentsel ısı adasının oluşumunu ve şiddetini etkileyen pek çok fiziksel ve çevresel parametre bulunmaktadır. Bu bölümde, kentsel alanlarda farklı mikro iklimsel koşullar yaratarak kentsel ısı adasının oluşumuna neden olan temel parametreler ele alınmıştır.

2.3.1 Kentsel Yoğunluk

Kentsel büyümenin bir etkisi olarak meydana gelen yoğunluk artışı, UHI etkisini artıran önemli parametrelerden biri olarak öne çıkmaktadır. Kentsel yoğunluğun artmasına bağlı olarak gelişen; bina yüksekliğinin artması, sokak kanyon etkisi ile tutulan güneş radyasyon oranının artması, bina yüzey özellikleri nedeniyle yaşanan albedo değişimi ve bitki örtüsü oranının azalmasına bağlı olarak evapotranspirasyonun azalması gibi etkiler kentsel ısı adası etkisinin yoğunlaşmasına neden olmaktadır (Chapman vd., 2018; Oke, 1982).

Kentsel makroformun gelişmesiyle birlikte artan kentsel yüzeyler, UHI etkisinin mekânsal yayılımını artırırken kentsel dokudaki artan bina yoğunluğu ise UHI etkisinin şiddetini artırmaktadır (Adachi vd., 2014; Chapman vd., 2017, 2018;

Coutts vd., 2008). Bu doğrultuda kentlerdeki görece daha yüksek yoğunluğa sahip olan kent merkezleri daha yüksek ısı stresine maruz kalmaktadır (Chapman vd., 2018).

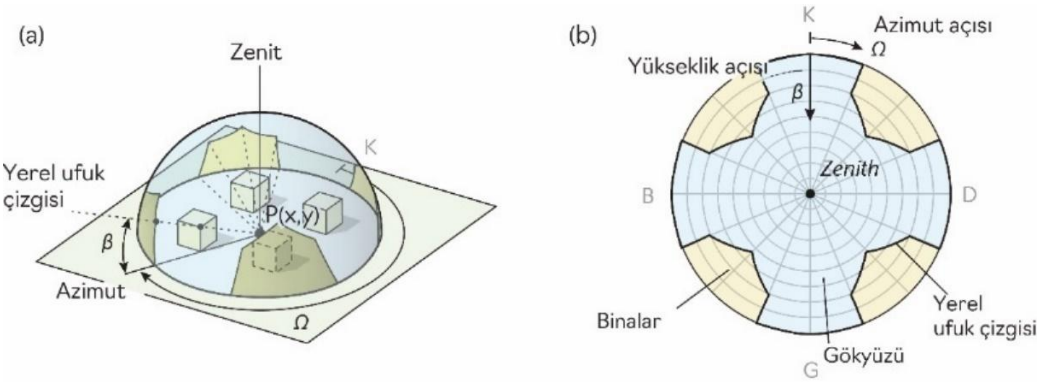
Kentsel yoğunluk senaryolarına dayalı olarak yapılan iklimsel modelleme çalışmalarında UHI etkisinin artış gösterdiği ortaya koyulmuştur. Özellikle düşük rüzgâr hızı ve bulutsuz hava koşullarında UHI şiddetinin 8°C'ye kadar ulaşabildiği tespit edilmiştir (Chang vd., 2007; Gedzelman vd., 2003; Sharifi & Lehmann, 2014; Wilby, 2008). Kentsel yoğunluk ve yüzey özelliklerinin Tokyo, Pekin, Şangay, Seul, Pyongyang, Bangkok, Manila ve Ho Chi Min kentlerindeki yüzey ısı adasına olan etkilerini inceleyen farklı bir çalışmada ise kentsel büyümeye bağlı olarak artan yapı yoğunluğunun, değişen yüzey özelliklerinin ve azalan bitki örtüsünün UHI etkisinin mekânsal dağılımını ve şiddetini artırdığı tespit edilmiştir. Özellikle SUHI'nin şiddetinin ve mekânsal dağılımının kentsel büyüklüğe ve morfolojik yapıya bağlı olarak değiştiği ve nüfus büyüklüğü ile de güçlü korelasyona sahip olduğu vurgulanmıştır. (Tran vd., 2006).

2.3.2 Kent Geometrisi

Kent geometrisi, yapı hacimleri ve açık alanlar arasındaki nicel ilişki ile bunların mekânsal konfigürasyonu olarak tanımlamaktadır. Kentsel mikro iklimi önemli ölçüde etkileyen bu parametre, kentten kente farklılık gösterebileceği gibi, aynı kent içindeki farklı mekânsal birimler arasında da farklılık gösterebilmektedir (Chatzipoulka vd., 2015). Kentsel mekandaki 3 boyutlu (3D) geometrik yapı kentsel dokudaki güneş radyasyonlarının erişimini, rüzgârlanma durumunu ve ısı salım düzeyini etkileyerek kentsel mikro iklimin değişmesine neden olmaktadır (Chatzipoulka vd., 2015).

Kent geometrisinin önemli bileşenlerinden biri olan gökyüzü görünürlüğü (SVF), sokak geometrisi ve bina yoğunluğunun bir göstergesi olarak ifade edilmektedir (Şekil 2.8) (Dirksen vd., 2019). Kavramsal olarak zemindeki herhangi bir noktadan gökyüzüne bakıldığında gökyüzünün görünen kısmı ya da gökyüzü açıklığı olarak tanımlanmaktadır. SVF boyutsuz bir parametre olup 0 ile 1 değerleri arasında değişiklik göstermektedir (Oke, 1988; Svensson, 2004). Bu değer yüzeyin pozisyonuna, yönüne ve gökyüzü görünümünü kısıtlayan engellerin miktarına bağlı olarak değişmektedir (Oke et al., 2017). SVF değeri 1'e yaklaştıkça gökyüzünün

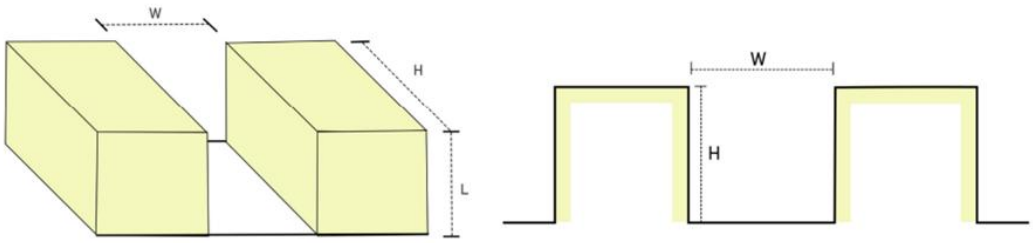
tamamen görülebildiği (düz arazi), 0'a yaklaştıkça ise gökyüzü görünümünün ağaç, bina vb. doğal veya yapay engeller tarafından kısıtlandığı anlaşılmaktadır (Oke, 1988).



Şekil 2.8 Gökyüzü görünürlük faktörü (SVF) (Oke vd., 2017)

SVF kentsel alanda radyasyon dengesinin sağlanması, güneş ışığı erişimi ve sokak kanyonlarındaki soğuma etkisinde önemli rol oynamaktadır (Oke vd., 2017). Sınırlı bir gökyüzü görünürlüğü kentsel alanlardaki yüzeylerin ısı kaybetme kapasitesini azaltarak ısının depolanmasına neden olmaktadır (Dirksen vd., 2019). Gökyüzü görünürlüğünün düşük olması özellikle açık ve sakin gecelerde yüzeylerin soğumasını geciktirerek UHI etkisinin artmasına yol açmakta ve kentsel mikro iklimlerdeki enerji dengesinin değiştirmektedir (Svensson, 2004).

Kent geometrisinin önemli bir diğer bileşeni olan kentsel kanyon geometrisi, her iki yanında sürekli olarak yapıların sıralandığı nispeten dar bir sokağı/caddeyi ifade etmektedir (Nicholsos, 1975). Bir başka ifadeyle yüksek yapıların ve yolların bir araya gelmesiyle oluşan ve yapıların enine kesiti üzerinden tanımlanan bir geometrik birimdir (Oke, 1988). Kanyon geometrisi temel olarak; yapı yüksekliği (h), yapılar arası mesafe/sokak genişliği (w) ve sokağın kesintisiz uzunluğu (l) olmak üzere 3 parametre üzerinden tanımlanmaktadır (Şekil 2.9). Bu parametrelerin birbirinden farklılaşması kanyon geometrisinin; kanyon derinliği, kanyon uzunluğu ve kanyonu çevreleyen yapıların simetrisi olmak üzere üç ayrı boyutta değerlendirilmesini sağlamaktadır (Ahmad vd., 2005; Hu vd., 2020; Vardoulakis vd., 2003).



Şekil 2.9 Kanyon geometrisi (Oke vd., 2017)

Kanyon derinliği (h/w), yapı yüksekliğinin (h), sokak/cadde genişliğine (w) oranlanmasıyla hesaplanmaktadır. Bu durum literatürde "aspect ratio" veya "en/boy oranı" olarak da ifade edilmektedir. Kanyon derinliğinin (h/w) 0.5 değerinin altında olduğu durumlar sığ sokak kanyonu (shallow street canyon), 1'e eşit olduğu durumlar düzenli sokak kanyonu (uniform street canyon), 2 ve üzerinde bir değere sahip olduğu durumlar ise derin sokak kanyonu (deep canyon) olarak tanımlanmaktadır (Ahmad vd., 2005).

Kanyon uzunluğu (l/h), iki ana kavşak arasındaki sokak uzunluğu olarak tanımlanmaktadır. Kanyonu oluşturan yapıların kesintisiz uzunluğunun (l), yapı yüksekliğine (h) bölünmesiyle elde edilmektedir. l/h oranı 3'e eşit olan değerler kısa sokak kanyonu (short street canyon), l/h oranı 5'e eşit olan değerler orta sokak kanyonu (medium street canyon) ve l/h oranı 7'ye eşit olan değerler ise uzun sokak kanyonu (long street canyon) olarak tanımlanmaktadır (Ahmad vd., 2005).

Kanyonu çevreleyen yapıların simetrik durumuna göre sınıflandırılmasına bakıldığında ise yaklaşık olarak eşit yükseklikte (h1=h2) ise simetrik kanyon, önemli yükseklik farkları (h1>h2 veya h1<h2) var ise asimetrik kanyon olarak adlandırılmaktadır. Asimetrik kanyonlar kendi içinde yükseklik farkı olan yapı grubunun rüzgâr yönüne göre konumu bakımından iki alt gruba ayrılmaktadır (Ahmad vd., 2005; Hu vd., 2020; Vardoulakis vd., 2003). İlk grup hızlandıran kanyonlardır (step-up). Bu kanyonların genel özellikleri, rüzgâr yönündeki binaların, rüzgârın geldiği taraftaki binalara kıyasla daha yüksek olmasıdır. Bu morfolojik yapı hem rüzgâr sirkülasyonu hem de kirletici maddelerin dağılımı üzerinde etkili olmaktadır. Hızlandıran kanyonlarda oluşan rüzgâr girdapları simetrik kanyonlara oranla daha küçüktür. Bu durum, oluşan girdapların düşeyde yer değiştirme kapasitesinin daha az olduğunu ve yaya seviyesindeki hava sirkülasyonunun zayıfladığını göstermektedir. Söz konusu zayıf sirkülasyon,

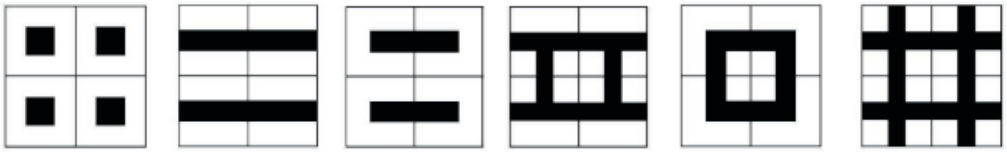
kirletici maddelerin ortamdan uzaklaşmasını engelleyerek kentsel ısı adasına ve hava kirliliğine neden olmaktadır (Ahmad vd., 2005). İkinci grup ise yavaşlatan kanyonlardır (step-down). Bu kanyonların genel özellikleri, rüzgâr yönündeki binaların, rüzgârın geldiği taraftaki binalara kıyasla daha alçak olmasıdır. Bu tip kanyonlardaki hava sirkülasyonu, hızlandıran kanyonlara oranla daha elverişli olduğundan kirletici maddelerin daha etkin dağılarak ortamdan uzaklaşması söz konusudur (Ahmad vd., 2005).

Kanyon derinliğinin güneş radyasyonunun absorbe edilme ve yansıtılma miktarı üzerinde doğrudan bir etkiye sahip olduğu saptanmıştır. Kanyon derinliği oranı arttıkça sokak kanyonlarına erişen güneş radyasyon miktarı azalmakta ve atmosfere bırakılması zorlaşmaktadır (Shishegar, 2013). Bu durumun temel sebebi, sokak kanyonlarında meydana gelen çoklu yansımalar olarak gösterilmektedir. Derin kanyonlara erişen güneş radyasyonları kanyon yüzeyleri tarafından çoklu yansımalara uğramakta ve bu durum sonsuz döngüye neden olarak enerji değiş-tokuşunu azaltmaktadır. Yansımaya neden olan her bir yüzey, güneş radyasyonunun bir kısmını absorbe etmekte bir kısmını ise yansıtmaktadır (Şekil 2.10). Bu durum ise sokak kanyonlarında ısının artmasına neden olmaktadır (Oke vd., 2017). Bir sokak kanyonunda güneş radyasyonu her bir yüzeye eşit miktarda dağılmamaktadır. Sokak kanyonunun zemini, yapı duvarlarına kıyasla daha fazla güneş radyasyonuna maruz kalmaktadır. Bu durumda h/w oranı kanyon zeminini duvarlardan daha çok etkilemektedir (Shishegar, 2013).



Şekil 2.10 Sokak kanyonlarında meydana gelen enerji dengesi (Pijpers-van Esch, 2015)

Kentsel ısı adası ve kentsel mikro iklim üzerinde etkili olan bir diğer kent geometrisi bileşeni ise kent formudur. Bu kavram, tek bir parsel üzerinde konumlandırılan binaların bir araya gelerek oluşturduğu doku olarak tanımlanmaktadır (Şekil 2.11) (Huang vd., 2011). Kent formunu oluşturan binaların; toplam taban alanının parsel alanına oranı (BSF), toplam inşaat alanının parsel alanına oranı (FAR), toplam yüzey alanın bina hacmine oranı (FVR) veya gökyüzü görünürlük faktörü (SVF) gibi morfolojik özellikleri; binaların enerji tüketim düzeyi, güneş radyasyonlarının kentsel mekana erişimi ve doğal havalandırma koşullarını etkileyerek kentsel ısı adası formasyonuna neden olmaktadır (Huang vd., 2011).



Şekil 2.11 Ratti vd., (2003) tarafından incelenen 6 kentsel form (Pijpers-van Esch, 2015)

2.3.3 Kentsel Vejetasyon

Bitki örtüsü, kentsel ısı adası etkisinin azaltılması ve kentsel mikro iklimin iyileştirilmesinde kritik bir role sahiptir (Ali Toudert, 2005). Kentsel iklim ve enerji kullanımı üzerinde etkili olan bitki örtüsünün üç ana işlevi bulunmaktadır: gölgeleme, evapotranspirasyon (buharlaşma) ve rüzgâr kırmadır (Akbari, 2009; McPherson vd., 1994). Bu özellikleriyle binalardaki enerji kullanımı, termal konfor ve hava kalitesi üzerinde etkilidir (McPherson vd., 1994). Gölgeleme ve rüzgâr kırma doğrudan etki mekanizmalarıyla çalışırken evapotranspirasyon kentsel çevre koşullarını değiştirdiği için dolaylı etkiye sahiptir (Akbari, 2009).

Özellikle geniş yapraklı ağaçlar güneş radyasyonunu engellemede önemli rol oynamaktadır. Bu durum her ne kadar ağacın türüne bağlı olsa da doğru form ve yoğunlukta seçilen bitki örtüsü güneş radyasyonunun yaklaşık %95'ini engelleme potansiyeline sahiptir. Bunun yanı sıra kışın yaprak döken (yapraksız) ağaçlar bile güneş radyasyonunun %50'den fazlasını engelleyebilmektedir (Akbari, 2009). Bitkiler güneş radyasyonunun yaklaşık %10 ila %30'unun zemine ulaşmasını sağlayarak yüzey sıcaklıklarının düşmesinde etkili olmaktadır. Bu durum aynı

zamanda yüzeyler tarafından yansıtılan ısı miktarını da azaltmaktadır (EPA, 2008b). Kış aylarında soğuk ve ılıman iklimlerde ısıtma ihtiyacını arttırarak enerji verimliliğini olumsuz etkileyen gölgelendirme, yaz aylarında ise serinletici etkisi sayesinde enerji tüketimini azaltarak avantaj sağlamaktadır.

Bitki örtüsünün gölgeleme özelliğinin yanı sıra rüzgâr hızını kesme/azaltma konusunda da önemli etkilere sahiptir. ABD Ormancılık Servisi'nin yaptığı bir çalışmada konut yoğunluğuna bağlı olarak bir yerleşim bölgesindeki ağaç yoğunluğunun %10 arttırılması durumunda rüzgâr hızının %10-20 oranında, %30 arttırılması durumunda ise %15-35 oranında azaltabildiği saptanmıştır (Akbari, 2009). Chicago'da yaz döneminde yapılan başka bir çalışmada ise kentsel morfolojiye de bağlı olarak bitki örtüsünün rüzgâr hızını ortalama %46-85 oranında azalttığı saptanmıştır (McPherson vd., 1994).

Bitkilerin buharlaşma yoluyla nemi serbest bırakma süreci güneş enerjisi kapsamında gerçekleşmektedir. Güneş enerjisinin havayı ısıtmak için harcadığı enerjinin büyük bir bölümü bitkiler tarafından absorbe edilerek buharlaşma süreci için harcanmaktadır (Akbari, 2009; EPA, 2008b). Bu durum gün içindeki sıcaklık artışını azaltarak termal konforu iyileştirmede yardımcı olmaktadır. Öyle ki ağaçlar günde 100 galona (378,54 lt) kadar su terletebilmektedir. Bu oran sıcak ve kuru iklimlerde 5 klimanın 20 saat boyunca çalışırak verdiği soğutma etkisine benzerdir (Akbari, 2009). Environmental Protection Agency (EPA) yaptığı bir çalışmada bitkilerin gölgeleme ve buharlaşma yolıyla hava sıcaklıklarını 5°C'ye kadar düşürebildikleri tespit etmiştir (EPA, 2008b)

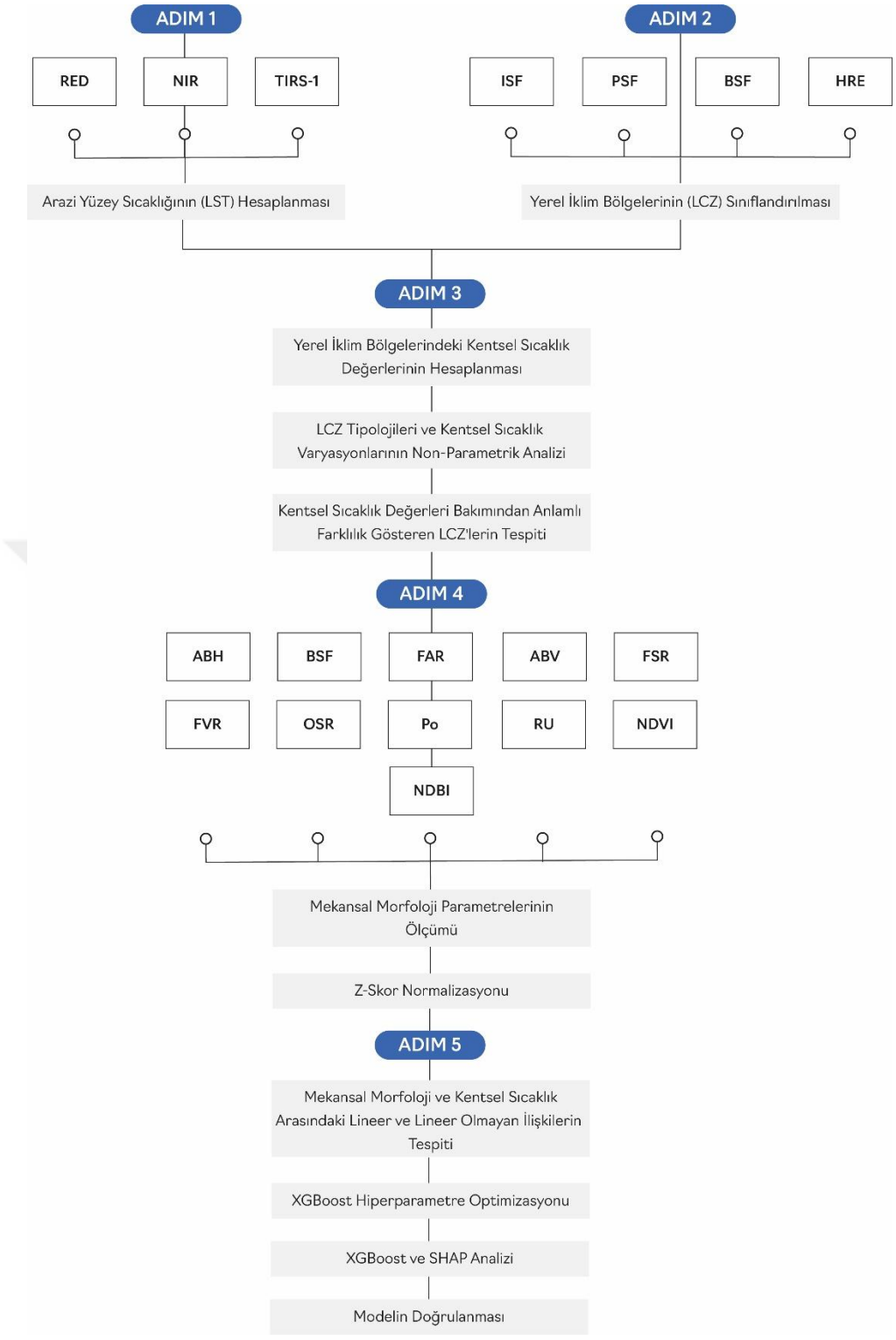
Çeşitli form, boyut ve yoğunluğa sahip bitki örtüsü kentsel çevrenin serinletilmesinde önemli katkılara sahiptir (EPA, 2008b). Örneğin büyük parkların serinletici etkininin çevresindeki birkaç yüz metrelik alana kadar yaydığı tespit edilmiştir (Ali Toudert, 2005). Ayrıca büyük şehir parklarındaki sıcaklıkların kentsel çevrelerine oranla yaklaşık 4°C'ye kadar daha düşük olabileceği vurgulanmaktadır (Akbari, 2009). Dış mekan termal konfor üzerinde önemli etkilere sahip olan bitki örtüsünün kentsel mikroiklimi iyileştirmedeki etkisinin arttırılması için gereksinimlere uygun şekilde planlanması gerekmektedir.

3
YEREL İKLİM BÖLGELERİNDE MEKÂNSAL MORFOLOJİ VE KENTSEL SICAKLIK ETKİLEŞİMİNİN YAPAY ZEKÂ DESTEKLİ ANALİZ MODELİ

Tez çalışmasının bu bölümünde, yerel iklim bölgelerindeki mekânsal morfoloji parametreleri ile kentsel sıcaklık arasındaki kantitatif ilişkiyi ortaya koymak amacıyla tasarlanan yapay zekâ destekli analiz modeli detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

3.1 Metodolojik Çerçeve

Bu çalışma, yerel iklim bölgelerindeki mekânsal morfoloji ile kentsel sıcaklık arasındaki lineer ve lineer olmayan ilişkilerin tespitine yönelik yapay zekâ destekli bir model ortaya koymayı amaçlamaktadır. Söz konusu model 5 temel aşamadan oluşmaktadır (Şekil 3.1). (1) kentsel sıcaklık değerlerini temsilen arazi yüzey sıcaklığının (LST) hesaplanması, (2) yerel iklim bölgelerinin (LCZ) sınıflandırılması, (3) yerel iklim bölgelerindeki kentsel sıcaklık değerlerinin hesaplanması ve sıcaklık değerleri bakımından anlamlı farklılık gösteren LCZ tipolojilerinin belirlenmesi, (4) En yüksek anlamlılık düzeyine sahip LCZ tipolojilerinde mekânsal morfoloji parametrelerinin ölçülmesi ve elde edilen sonuçların normalize edilmesi, (5) XGBoost ve SHAP analizleri ile mekânsal morfolojik yapı ile kentsel sıcaklık değerleri arasındaki lineer ve lineer olmayan ilişkilerin ortaya koyulması ve modelin doğrulanmasıdır.



Şekil 3.1 Yerel iklim bölgelerinde mekânsal morfoloji ve kentsel sıcaklık etkileşiminin yapay zeka destekli analiz modeli (ISF: Geçirimsiz yüzey oranı, PSF: Geçirimli yüzey oranı, BSF: Bina yüzey/taban alanı oranı, HRE: Pürüzlülük elemanlarının yüksekliği, ABH: Ortalama bina yüksekliği, FAR: Kat Alanı Katsayısı Oranı, ABV: Ortalama bina hacmi, FSR: Bina cephe alanı oranı, FVR: Bina cephe hacim oranı, OSR: Açık alan oranı, Po: Gözeneklilik oranı, RU: Mutlak pürüzlülük oranı, NDVI: Normalize edilmiş bitki örtüsü indeksi, NDBI: Normalize edilmiş yapılaşma indeki)

3.2 Arazi Yüzey Sıcaklığı Ölçümü

Tez çalışması kapsamında, kentsel sıcaklık değerlerini temsilen Landsat-8 uydu görüntüsüne ait termal bantların işlenmesiyle elde edilen arazi yüzey sıcaklığı değerleri kullanılmıştır. Arazi yüzey sıcaklığı, kentsel yüzeylere temas edildiğinde hissedilen sıcaklık olarak tanımlanmaktadır (Latif, 2014). Kentsel yüzeylerin, havadan daha hızlı ısınıp soğuması nedeniyle de hava sıcaklığından farklılaşmaktadır (NASA Earth Observations (NEO), 2024). Arazi yüzey sıcaklığı, yerel iklim bölgeleri ve kentsel ısı adası arasındaki ilişkinin incelenmesinde sıklıkla kullanılan bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Kentsel alanların örtü tabakası ve yüzey materyalleri hakkında önemli bilgiler veren bu yöntem, kentsel termal çevreninin heterojen yapısını karakterize etme özelliğine sahiptir (Yunita vd., 2022). Arazi yüzey sıcaklığının hesaplanabilmesi için Amerika Birleşik Devletleri Jeoloji Araştırmaları Kurumu (USGS) tarafından yayınlanan ve 30 m'lik çözünürlüğe sahip olan Landsat-8 termal uydu görüntüleri kullanılmaktadır. Söz konusu uydu görüntülerinin elde edilebilmesi için Operasyonel Arazi Görüntüleyici (OLI) ve Termal Kızılötesi (TIRS) sensörleri kullanılmaktadır (Roy vd., 2014; USGS, 2025). Landsat-8 uydusunda, OLI sensörüne ait 9 bant (Bant 1–9), TIRS sensörüne ait ise 2 bant (Bant 10-11) türü olmak üzere toplamda 11 bant bulunmaktadır. Bu bantlar, çeşitli genişliklere ve çözünürlüklere sahiptir (Tablo 3.1) (USGS, 2025).

Tablo 3.1 Landsat-8 uydu görüntüsüne ait bantların özellikleri (USGS, 2025)

Bant Türleri	Açıklama	Bant Genişliği (µm)	Bant Çözünürlüğü
Bant-1	Coastal Aerosol (Kıyı Aerosolü)	0.43-0.45	30
Bant-2	Blue (Mavi)	0.45-0.51	30
Bant-3	Green (Yeşil)	0.53-0.59	30
Bant-4	Red (Kırmızı)	0.64-0.67	30
Bant-5	NIR (Yakın Kızıl Ötesi)	0.85-0.88	30
Bant-6	SWIR-1 (Kısa Dalga Boylu Kızılötesi)	1.57-1.65	30
Bant-7	SWIR-2 (Kısa Dalga Boylu Kızıötesi)	2.11-2.29	30
Bant-8	PAN (Pankromatik-Siyah/Beyaz)	0.50-0.68	15

Tablo 3.1 Landsat-8 uydu görüntüsüne ait bantların özellikleri (USGS, 2025) (devamı)

Bant Türleri	Açıklama	Bant Genişliği (µm)	Bant Çözünürlüğü
Bant-9	CIRRUS (İnce Bulutların Giderilmesi)	1.36-1.38	30
Bant-10	TIRS-1 (Uzun Dalga Boylu Kızılötesi)	10.6-11.19	100
Bant-11	TIRS-2 (Uzun Dalga Boylu Kızılötesi)	11.5-12.51	100

Arazi yüzey sıcaklığının hesaplanmasında; Split Window, Dual Angle, Single Channel ve Improved Mono Window gibi pek çok algoritma kullanılmaktadır (Latif, 2014). Ancak bu çalışma, USGS tarafından yayınlanan kalibrasyon bildirimlerinde Bant-11'den alınan verilerin belirsizliğe sahip olması nedeniyle sadece Bant-10 ve Improved Mono Window Algoritması üzerinden yürütülmüştür (F. Wang vd., 2015). Çalışma kapsamında termal uydu görüntülerinden arazi yüzey sıcaklığının hesaplanabilmesi için üç bant türü kullanılmıştır. Bunlar; sıcaklık değerlerinin belirlenebilmesi için TIRS-1 (Bant-10), normalize edilmiş bitki örtüsü indeksinin (NDVI) hesaplanabilmesi için ise Red (Bant-4) ve NIR (Bant-5)'dır.

Sıcak/Nemli Akdeniz iklim tipine sahip kentlerde sıcaklık düzeyinin en yüksek olduğu aylar yaz aylarıdır. Bu iklim tipine sahip kentlerde yazları; düşük rüzgâr hızı, düşük bulut örtüsü yoğunluğu ve açık gökyüzü gibi kontrol edilemeyen değişkenlerin olması kentsel ısı adasının da yaz aylarında en yüksek düzeye ulaşmasına neden olmaktadır (Martinelli vd., 2020). Bu nedenle arazi yüzey sıcaklığının hesaplanması için yaz aylarına ait Landsat-8 termal uydu görüntülerinin kullanılması gerekmektedir. Arazi yüzey sıcaklığının hesaplanmasındaki önemli bir diğer nokta ise bulutluluk düzeyidir (Kaçmaz & Gürbüz, 2022). Tespit edilen arazi yüzey sıcaklık değerlerinin doğruluğu yansıtması ve hata payının en aza indirgenmesi için en düşük bulutluluk oranına sahip uydu görüntülerinin tercih edilmesi gerekmektedir (Erdem Okumuş, 2022).

Landsat-8 termal uydu görüntülerinden arazi yüzey sıcaklığının hesaplanabilmesi için coğrafi bilgi sistemleri kullanılmış ve bu işlem altı adımda gerçekleştirilmiştir. Bu adımlar;

İlk adım, termal bant (Band-10) girişinin yapılarak spektral radyans değerinin atmosfer üstü (TOA) spektral radyans değerine dönüştürülmesidir (3.1). Bunun için

termal bantlara ait veri dosyalarındaki yeniden ölçeklendirme faktör değerleri kullanılmaktadır (Khorrami & Gunduz, 2019).

$$L_{\lambda} = M_L * Q_{cal} + A_L \quad (3.1)$$

L_{λ} *= TOA spektral radyans değeri (Watts/mm2*srad*µm).*

M_L *= Banda özgü çarpımsal yeniden ölçeklendirme faktörü.*

Q_{cal} *= Termal banda tekabül eden ışıma değeri.*

A_L *= Banda özgü ilave yeniden ölçeklendirme/boyutlandırma faktörü.*

İkinci adım, atmosfer üstü spektral radyans değerinin atmosferik parlaklık sıcaklık değerine dönüştürülmesidir. Bu işlem için meta veri dosyasından elde edilen banda özgü K1 ve K2 termal dönüşüm sabitleri kullanılmaktadır. İşlem sonucunda elde edilen sıcaklık değerinin Santigrat (°C) cinsinden ifade edilebilmesi için -273.15 değerinden çıkarılmaktadır (3.2) (Yamak vd., 2019). Böylelikle Kelvin (K) cinsinden elde edilen sonuçlar Santigrat (°C) cinsine çevrilmektedir.

$$\mathrm{BT} = \frac{\mathrm{K2}}{\left(\ln\left(\frac{\mathrm{K1}}{\mathrm{L}_{\lambda}}\right) + 1\right)} - 273.15 \quad (3.2)$$

BT= Atmosferik parlaklık sıcaklık değeri (K).

L_{λ} *=TOA spektral radyans değeri (Watts/mm2*srad*µm).*

K1 ve K2= Banda özgü termal dönüşüm sabitleri.

Üçüncü adım, normalleştirilmiş/normalize edilmiş bitki örtüsü indeksinin hesaplanmasıdır (3.3). Bu indeks, bitki örtüsünün yoğunluğu ve sağlığı hakkında bilgi vermektedir. Red ve NIR bantlarındaki yansıtma değerlerini kullanarak hesaplanan NDVI, -1 ve +1 değer aralığında yer almaktadır (Hidalgo-García & Arco-Díaz, 2022). Değerler +1'e yaklaştıkça bitki örtüsü yoğunluğunun artığı, -1'e yaklaştıkça ise azaldığı ifade edilmektedir (Cetin vd., 2024). NDVI değerleri; NDVI<0 ise su yüzeyi, 0<NDVI<2 ise toprak kaplı alanlar, 0.2<NDVI<0.5 ise toprak ve bitki örtüsü karışımına sahip alanlar ve NDVI>0.5 ise yoğun bitki örtüsü ile kaplı alanlar olarak sınıflandırılmaktadır (Avdan & Jovanovska, 2016).

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

NIR= Yakın kızılötesi bant (Band-5).

RED= Kırmızı bant (Band-4).

Dördüncü adım, bitki örtüsü oranının hesaplanmasıdır (3.4). Bu oran NDVI değerlerinden elde edilen minimum ve maksimum değerler kullanılarak hesaplanmaktadır (Dissanayake vd., 2019; Khorrami & Gunduz, 2019; Yamak vd., 2019).

$$Pv = \left(\frac{(NDVI - NDVI\ min)}{(NDVI\ max - NDVI\ min)}\right)^2 \quad (3.4)$$

Pv= Bitki örtüsü oranı.

NDVI= Normalize edilmiş bitki örtüsü indeksi.

$NDVI_{min}$ *= Minimum NDVI değeri.*

$NDVI_{max}$ *= Maksimum NDVI değeri.*

Beşinci adım, arazi yüzey emisyon oranının hesaplanmasıdır (3.5). LSE, Planck Yasası'na göre bir kara cismin (blackbody) yaydığı radyasyon miktarını ölçeklendiren orantı faktörü olup, yüzeyin termal enerjiyi atmosfere yayma verimliliği olarak ifade edilmektedir (Avdan & Jovanovska, 2016). Bir başka deyişle herhangi bir materyalin yaydığı enerjinin aynı sıcaklıktaki kara cismin yaydığı enerjiye oranı olarak da tanımlanmaktadır (Yamak vd., 2019). LSE'nin hesaplanabilmesi için bitki örtüsü oranı kullanılmaktadır (de Almeida vd., 2021; Khorrami & Gunduz, 2019).

$$\varepsilon = 0.004 * Pv + 0.986 \quad (3.5)$$

$\varepsilon =$ *Emisyon oranı.*

Pv= Bitki örtüsü oranı.

Altıncı ve son adım ise arazi yüzey sıcaklığının hesaplanmasıdır (3.6). Bu işlemde parlaklık sıcaklık değerinde (BT) emisyon düzeltmesi (eʎ) yapılarak yüzey sıcaklığı değerine (Ts) dönüştürülmektedir (Kaçmaz & Gürbüz, 2022).

$$Ts = \frac{BT}{(1 + (ʎ * \left(\frac{BT}{p}\right)) * ln(eʎ))} \quad (3.6)$$

$$\rho = h * \frac{c}{\sigma} = 1.438 \times 10^{-2}\ m\ K$$

σ = *Boltzmann sabiti (1.38 × 10^{-23} J/K).*

h = Planck sabiti (6.626 × 10^{-34}Js) .

c= Işık hızı (2.998 × 10^{8} m/s).

Ts= Arazi yüzey sıcaklığı.

BT=Atmosferik parlaklık sıcaklık değeri.

λ = *Yayılan ışının dalga boyu.*

$e\lambda$ = *Emisyon oranı.*

Tez çalışmasında, sıcaklık anomalisi gösteren bölgeler, yüzey ısı adası yoğunluğu (SUHI) üzerinden değerlendirilmektedir. Yüzey ısı adası, kentsel ve kırsal yüzeyler arasındaki ortalama sıcaklık farkı olarak tanımlanmaktadır. Bu bağlamda, çalışma alanındaki SUHI etkisi, kentsel alanların ortalama LST değerinden kırsal alanların ortalama LST değeri çıkarılarak hesaplanmaktadır (3.7) (Hidalgo-García & Arco-Díaz, 2022; W. Zhang vd., 2023). Elde edilen bu fark, kent geneline ait SUHI oranını ifade etmektedir.

$$SUHI = LSTU - LSTR \quad (3.7)$$

SUHI= Yüzey ısı adası etkisi.

LST_U= Kentsel ortalama arazi yüzey sıcaklığı.

LST_R= Kırsal ortalama arazi yüzey sıcaklığı.

Kentlerdeki sıcaklık anomalisi gösteren bölgelerin belirlenebilmesi için kent bütününe ait LST değerinden kentsel alana ait ortalama LST değeri (LST_{ort}) çıkarılmıştır (3.8). Bu doğrultuda, kentsel ortalama LST değerinin üzerinde yer alan sıcaklıklar pozitif anomali, altında yer alan sıcaklıklar ise negatif anomali değerlerini temsil etmektedir. Pozitif değerler aynı zamanda farklı seviyelerdeki sıcaklık anomalisinin de bir göstergesi olarak kabul edilmektedir (Erdem Okumus & Terzi, 2022; Erdem Okumuş, 2022).

$$LSTa = LST - LSTort \quad (3.8)$$

LSTa= Arazi yüzey sıcaklığı anomalisi.

LST= Arazi yüzey sıcaklığı

LSTort= Kentsel ortalama arazi yüzey sıcaklığı.

3.3 Yerel İklim Bölgelerinin Sınıflandırması

Yerel iklim bölgeleri sınıflandırması (LCZ), Oke ve Stewart (2012) tarafından tanımlanan; bina yüzey/taban alanı oranı (BSF), geçirimli yüzey oranı (PSF), geçirimsiz yüzey oranı (ISF) ve pürüzlülük elemanlarının yüksekliği (HRE) olmak üzere 4 temel mekânsal morfoloji parametresi doğrultusunda gerçekleştirilmiştir (Tablo 3.2) (Geletič vd., 2016).

Tablo 3.2 Yerel iklim bölgelerinin sınıflandırma parametrelerinin ölçümü (Stewart & Oke, 2012)

LCZ Parametreleri	Formül	Açıklama
Bina Yüzey/Taban Alanı Oranı (BSF)	$\mathrm{BSF} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \mathrm{BAi}}{\mathrm{Agrid}} * 100$	BAi= Bina ayak izi. Agrid= Grid hücresi alanı.
Geçirimli Yüzey Alanı Oranı (PSF)	$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED}$	NIR= Yakın kızılötesi bant. RED= Kırmızı bant.
Geçirimsiz Yüzey Alanı Oranı (ISF)	*ISF= (1-(BSF+PSF))*100*	ISF= Geçirimsiz yüzey oranı. BSF= Bina taban alanı oranı. PSF= Geçirimli yüzey alanı oranı.
Pürüzlülük Elemanlarının Yüksekliği (HRE)	$\boldsymbol{BH = \frac{\sum_{i=1}^{n} BHi}{n}}$	BH= Bina yüksekliği. BHi= Bina yükseklikleri toplamı n= Bina sayısı

Yerel iklim bölgelerinin sistematik bir şekilde sınıflandırılması ve tanımlanması için kent bütünü, 90x90 m boyutlarında gridlere bölünmüş ve yerel iklim bölgeleri sınıflandırması bu örneklem büyüklüğü üzerinden yürütülmüştür. Landsat-8 termal uydu görüntülerinden elde edilen arazi yüzey sıcaklığı haritasının çözünürlüğünün de 30x30 m düzeyinde olması, araştırmada 90x90 m çözünürlüğün kullanılmasını olanaklı kılmıştır. Böylelikle sonraki aşamalarda gerçekleştirilecek olan mekânsal entegrasyon işlemlerinde veri bütünlüğünün korunması amaçlanmıştır. Her bir gride LCZ parametreleri nokta verisine dönüştürülerek yazdırılmıştır. Söz konusu

gridlere karşılık gelen LCZ tipolojilerinin tanımlanmasında ise Oke ve Stewart (2012) tarafından belirlenen eşik değerler temel alınmıştır. Bu eşik değerler referans alınarak LCZ sınıflandırma süreci 5 adımda gerçekleştirilmiştir.

İlk adımda, gridler BSF değerlerine göre iki ana sınıfa ayrılmıştır. BSF değeri %10'dan küçük olan gridler arazi örtüsü tipolojileri, %10'dan büyük olan gridler ise mekânsal morfoloji tipolojilerine ait yerel iklim bölgeleri olarak kabul edilmiştir (Geletič vd., 2016; Unal Cilek & Cilek, 2021). BSF değeri kullanılarak yapılan bu sınıflandırma, mekânsal morfoloji ve arazi örtüsü tipolojilerine ait LCZ'lerin daha ayrıntılı bir şekilde ele alınmasının temelini oluşturmaktadır.

İkinci adımda, HRE parametresi kullanılarak her bir grid ilgili yükseklik sınıfına dahil edilmiştir. Gridlerdeki ortalama bina yüksekliği; 25 m'den fazlaysa (9 kat ve üzeri) "çok katlı", 10-25 m aralığında ise (3-9 kat) "orta katlı" ve son olarak 10 m'den daha az ise (1-3 kat) "düşük katlı" olmak üzere üç gruba ayrılmıştır (Stewart & Oke, 2012; Unal Cilek & Cilek, 2021).

Üçüncü adımda, BSF değerleri doğrultusunda mekânsal morfoloji tipolojilerine ait LCZ'lerin yoğunluk/açıklık özellikleri belirlenmiştir. BSF değeri %40 ve üzerinde ise "kompakt alan", %20-40 aralığında ise "açık alan" (yoğunluk olarak) ve son olarak ise %10-20 aralığında ise "seyrek alan" olarak tanımlanmıştır. LCZ tipolojilerinin belirlenmesindeki ilk üç adım temel aşamalar olarak nitelendirilmektedir. Bu adımlar özellikle mekansal morfoloji tipolojilerine ait yerel iklim bölgeleri için ayırt edici özellikleri ortaya koymaktadır (Unal Cilek & Cilek, 2021). Bu kapsamda ilk üç adım doğrultusunda; LCZ 1-2-4-5-9 tipolojileri tanımlanmaktadır.

Dördüncü adımda, alçak katlı binalara ait LCZ tipolojileri tanımlanmıştır. Bu binaların sahip olduğu mekânsal morfoloji özellikleri nedeniyle ilk üç adımda büyük ölçüde benzerlik göstermektedir. Bu aşamada ayırt edici özellik sağlamak amacıyla ISF ve PSF parametreleri kullanılmıştır. Bu parametrelerin eşik değerleri doğrultusunda LCZ 3-6-7-8 tipolojileri tanımlanmıştır (Quan, 2019).

Beşinci adımda, BSF değeri %10'dan küçük olan alanlar Corine Arazi Örtüsü verisine göre detaylı olarak sınıflandırılmıştır. Bu kapsamda; ormanlık alanlar LCZ A, bitki değişim alanları LCZ B, seyrek bitki alanları LCZ C, tarım alanları ve çayırlıklar LCZ D, maden alanları, ulaşım birimleri ve çıplak kayalıklar LCZ E,

sahiller, kumsallar ve kumlu bölgeler LCZ F ve son olarak ise su yüzeyleri LCZ G olarak sınıflandırılmıştır.

Oke ve Stewart (2012), kentsel alanların mekânsal morfoloji özelliklerine göre kullanıcıların standart LCZ tipolojilerinden önemli ölçüde ayrışan bölgeler için yeni alt tipolojiler (subclass) oluşturulabileceğini vurgulamaktadır. Yeni oluşturulan alt tipolojiler, temel olarak mekânsal morfolojik yapının ve arazi örtüsünün farklı kombinasyonlarını temsil etmekte ve yerel iklim bölgesi sınıflandırma sistemine esneklik sağlamaktadır. Yeni alt tipolojilerin gösterimi "LCZ X_{Ai}" şeklindedir. Bu gösterimdeki, X değeri baskın olan LCZ tipolojisini, A değeri alt ana LCZ tipolojisini (varsa), İ değeri ise geçici veya değişken arazi örtüsünü (varsa) temsil etmektedir (Stewart & Oke, 2012).

3.4 LCZ Tipolojilerinde Kentsel Sıcaklık Varyasyonlarının Non-Parametrik Analizi

Bu bölümde, farklı yerel iklim bölgelerinin kentsel sıcaklık üretme potansiyelleri açısından anlamlı farklılıklar yaratıp yaratmadığını belirlemek ve anlamlı farklılık yaratan yerel iklim bölgelerini tespit etmek amacıyla yapılan istatistiksel analizlerin uygulama yöntemleri ele alınmıştır.

3.4.1 Kolmogorov-Smirnov Normallik Testi

Yerel iklim bölgeleri arasındaki sıcaklık varyasyonlarını tespit edebilmek ve tez çalışması kapsamında kullanılan veri setinin istatistiksel olarak geçerliliğini sağlayabilmek amacıyla normallik testleri kullanılmaktadır. Bu doğrultuda bağımlı değişkene ait veri setinin normallik varsayımının değerlendirilebilmesi için Kolmogorov-Smirnov (K-S) Normallik Testi uygulanmıştır. K-S testi, iki grup arasındaki veri seti dağılımlarının istatistiksel olarak önemli ölçüde farklı olup olmadığını değerlendiren non-parametrik (parametrik olmayan) bir testtir. Sürekli ve tek boyutlu veri seti gerektiren bu test, veri setlerindeki ampirik dağılımı incelemek için iklimsel çalışmalarda sıklıkta kullanılmaktadır (Geletič vd., 2016; Orlowsky vd., 2008; Y. Zheng vd., 2018).

K-S testinin H_0 ve H_1 olmak üzere iki adet normallik varsayımı bulunmaktadır;

- H_0 hipotezi (Sıfır/Null Hipotezi) veri setinin normal dağılıma uygun olduğunu varsaymaktadır.

$$H_0 : F(x) = F_0(x)$$

- H_1 hipotezi (Alternatif Hipotez) ise veri setinin normal dağılıma uygun olmadığını varsaymaktadır.

$$H_1 : F(x) \neq F_0(x)$$

F_0 : Belirlenen dağılım fonksiyonu.

F : Rastgele örneklemin geldiği dağılım fonksiyonu.

Test sonucunda anlamlılık düzeyinin 0.001'den küçük olması halinde, H_0 hipotezi reddedilerek veri setinin normal dağılıma uygun olmadığı sonucuna ulaşılmaktadır.

3.4.2 Kruskal Wallis H Anlamlılık Testi

Normallik testi sonuçlarına göre veri setinin normal dağılıma uygun olmadığının saptanması üzerine parametrik testler yerine non-parametrik testlerin kullanılması tercih edilmektedir. Bu doğrultuda, non-parametrik Kruskal Wallis H Anlamlılık Testi uygulanmıştır. Bu test, üç ya da daha fazla grup arasında istatistiksel açıdan anlamlı farklılıkların varlığını değerlendirmek amacıyla kullanılmaktadır (Chan & Walmslqr, 1997; MacFarland & Yates, 2016). Genellikle verilerin normal dağılımdan önemli ölçüde sapma gösterdiği ve karşılaştırılan gruplar arasındaki örneklem büyüklüğünün farklı olması durumlarında uygulanmaktadır (MacFarland & Yates, 2016). Wilcoxon-Mann-Whitney testinin genişletilmiş versiyonu olarak kabul Kruskal Wallis H Anlamlılık Testi, veri setindeki örneklemlerin rastgele ve bağımsız olduğu varsayımına dayanmaktadır (Ostertagová vd., 2014).

Kruskal Wallis H Anlamlılık Testi, bağımsız değişkenin bağımlı değişken açısından anlamlı farklılık gösterip göstermediğinin test edilmesi amacıyla iki temel hipotezi test etmektedir. Bunlar:

- H_0 hipotezi (Sıfır/Null Hipotezi): LCZ tipolojileri arasında kentsel sıcaklık değerleri bakımından anlamlı bir fark yoktur, yani LCZ tipolojileri benzer sıcaklık dağılımına sahiptir.
- H_1 hipotezi (Alternatif Hipotez): En az bir LCZ tipolojisi kentsel sıcaklık değerleri bakımından diğer tipolojilerden farklılık göstermektedir.

Bu hipotezlerin test edilmesi için gerekli olan test istatistiği ise aşağıdaki formül (3.9) kullanılarak hesaplanmıştır:

$$H = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{i=1}^{c} \frac{R_i^2}{n_i} - 3(N+1) \quad (3.9)$$

H=İstatistik değeri.

N= Toplam gözlem sayısı (LCZ tipolojilerine ait kentsel sıcaklık değeri sayısı).

C= LCZ tipoloji sayısı.

ni= Her bir LCZ tipolojisinin gözlem sayısı.

Ri= Her bir LCZ tipolojisine ait kentsel sıcaklık değerlerinin sıralamalarının toplamı.

Elde edilen test istatistiği (H) ve buna karşılık gelen anlamlılık düzeyi (p değeri) kapsamında LCZ tipolojilerinin kentsel sıcaklık değerleri bakımından istatistiksel olarak anlamlılık gösterip göstermediği değerlendirilmiştir.

3.4.3 Çoklu Karşılaştırma: Post Hoc Bonferroni Testi

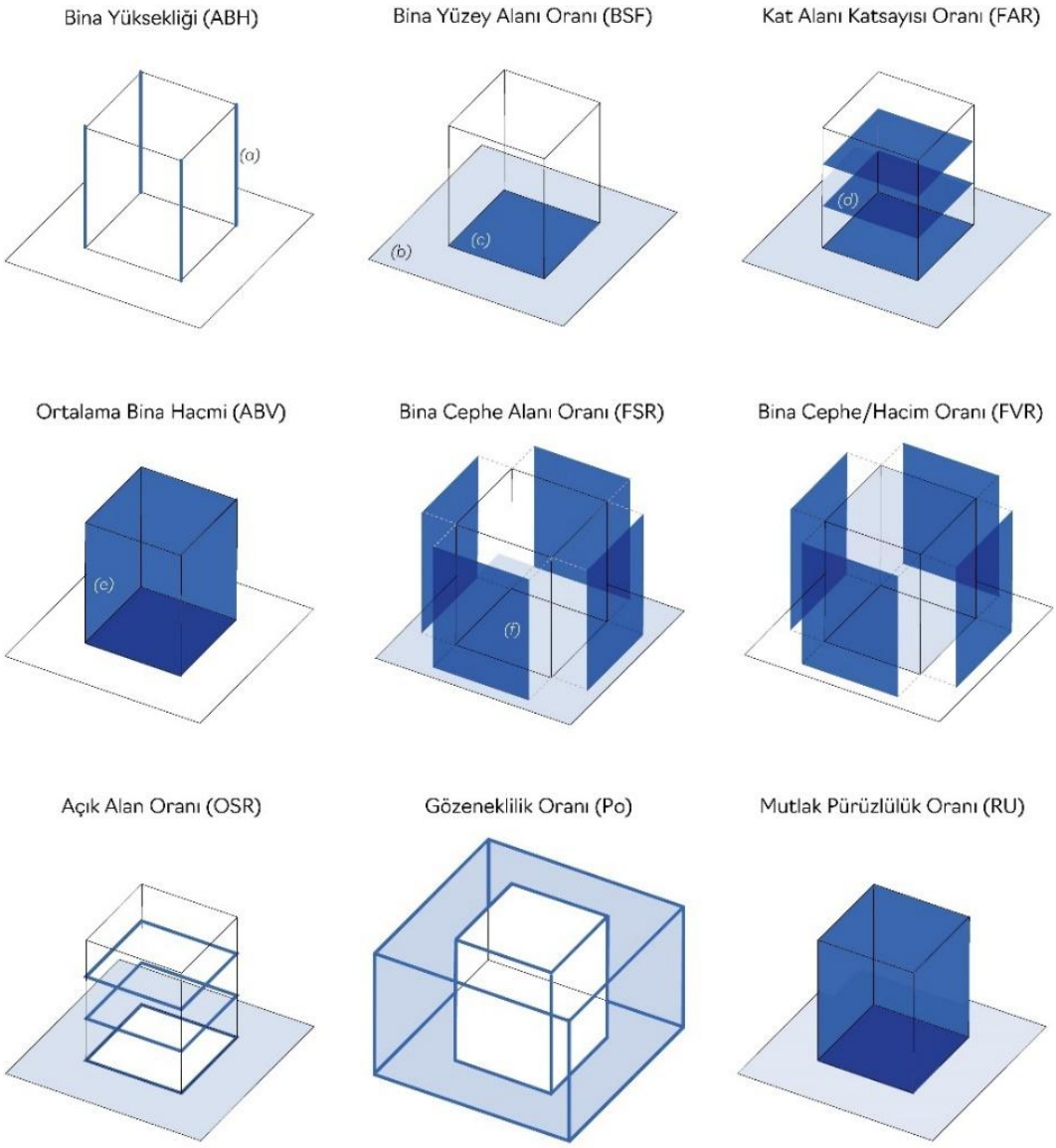
Kruskal-Wallis H Anlamlılık Testi, genel olarak üç ya da daha fazla grup arasında istatistiksel açıdan anlamlı fark olup olmadığını belirlemeye yarayan non-parametrik bir analiz yöntemi olmakla birlikte, bu test, farkın hangi gruplar arasında ortaya çıktığını belirtmemektedir. Bu nedenle, Kruskal-Wallis H Anlamlılık Testi ile elde edilen bulgularda, anlamlı bir fark tespit edilmesi halinde, farkın yönünü ve hangi gruplar arasında gerçekleştiğini belirlemek amacıyla post hoc testlerine başvurulmaktadır. Post hoc testleri, özellikle farklı tipolojiler ya da grup kombinasyonları arasındaki istatistiksel anlamlılıkları detaylı biçimde ortaya koyarak, bulguların yorumlanabilirliğini arttırmaktadır. Bu kapsamda, tez çalışmasında LCZ tipolojilerinden hangilerinin kentsel sıcaklık varyasyonları açısından anlamlı farklılık gösterdiğini tespit etmek amacıyla Post Hoc testlerinden biri olan Bonferroni testi uygulanmıştır. Bu test, karşılaştırılan gruplar arasındaki anlamlı farklılıkları değerlendirebilmek amacıyla hata olasılığını (Tip-I) kontrol altına almak için düzeltme yöntemi (Bonferroni Düzeltmesi) kullanmaktadır. Bonferroni düzeltmesinin uygulanmasıyla birlikte hata olasılığının kontrol edildiği düzeltilmiş p değeri (Adj. Sig.) hesaplanmakta ve anlamlılık düzeyi bu değere göre değerlendirilmektedir.

Bonferroni prosedürü kullanılarak yapılan ikili karşılaştırma testinde, her bir LCZ çifti arasında ikili karşılaştırmalar yapılarak ham anlamlılık düzeyi, düzeltilmiş

anlamlılık düzeyi, test istatistiği, standartlaştırılmış test istatistiği ve standart hata değerleri elde edilmektedir. Bu değerler incelenerek karşılaştırılan gruplar arasında hangi bağımsız değişkenin bağımlı değişken varyasyonları açısından anlamlı farklılık gösterdiği ortaya koyulmaktadır.

3.5 Yerel İklim Bölgelerinde Mekânsal Morfolojik Parametrelerinin Ölçümü

Kentsel sıcaklık varyasyonları açısından istatistiksel olarak anlamlı farklılık olduğu tespit edilen yerel iklim bölgelerinde kentsel sıcaklık değerleri ve mekânsal morfolojik özellikler arasındaki lineer ve lineer olmayan ilişkilerin tespit edilmesi amacıyla gerçekleştirilen analizde morfolojik özellikler 11 bağımsız değişken ile temsil edilmektedir. Bu değişkenlerden 9 tanesi fiziksel yapıya ilişkin ölçümlerle elde edilmiş olup, 2 tanesi ise uzaktan algılama yöntemiyle elde edilen uydu görüntülerine uygulanan görüntü işleme tekniği ile ölçülmüştür (Şekil 3.2). Kentsel dokunun fiziksel formunu yansıtan bu parametreler, yalnızca kentsel sıcaklık değerleri bakımından en yüksek anlamlı farklılık düzeyine sahip LCZ tipolojileri üzerinden hesaplanmıştır.



Şekil 3.2 Mekânsal morfoloji parametreler (NDVI ve NDBI uzaktan algılma indeksi olup yukarıda şema üzerinde gösterilmemiştir)

3.5.1 Ortalama Bina Yüksekliği

Ortalama bina yüksekliği (average building height-ABH), belirli bir kentsel alandaki binaların yüksekliğinin aritmetik ortalaması olarak tanımlanmaktadır. Kentsel alandaki dikey yoğunluğun bir göstergesi olan ortalama bina yüksekliği, rüzgâr sirkülasyonu, güneş radyasyonlarının erişimi, gölgeleme etkisi gibi kentsel mikro iklimler üzerinde etkilidir. ABH değeri, grid içindeki bina yükseklikleri toplamının grid içinde yer alan toplam bina sayısına bölünmesiyle hesaplanmaktadır (3.10) (C. Wang vd., 2024).

$$BH = \frac{\sum_{i=1}^{n} BHi}{n} \quad (3.10)$$

BH= Bina yüksekliği.

BHi= Bina yükseklikleri toplamı (ortalama kat yüksekliği 3 m olarak kabul edilmiştir).

n= Bina sayısı

3.5.2 Bina Yüzey Alanı Oranı

Bina yüzey alanı oranı (building surface fraction-BSF), her bir griddeki bina taban alanları toplamının grid alanına oranı şeklinde tanımlanmaktadır (3.11) (Estacio vd., 2019; Unal Cilek & Cilek, 2021; Y. Zheng vd., 2018; Zhou vd., 2020). BSF değerlerinin hesaplanmasında kullanılan bina verileri, her bir grid ile kesiştirilerek gridlerin içinde kalan bina alanları üzerinden hesaplamalar yapılmıştır. Böylelikle birden fazla gridin kapsadığı bina verilerinde, her bir grid yalnızca kendi sınırları içinde kalan bina alanı üzerinden değerlendirilmiştir (Estacio vd., 2019).

$$BSF = \frac{\sum_{i=1}^{n} BSi}{Sgrid} x100 \quad (3.11)$$

BSi= Bina ayak izi.

Sgrid= Grid hücresi alanı (90x90 m).

Kentsel mikro iklim değişikliğini etkileyen önemli parametrelerden biri olan BSF, özellikle UHI etkisinin en belirgin şekilde görüldüğü yaz aylarında sıcaklıklar ile yüksek korelasyona sahiptir (Park vd., 2024). BSF değeri sıcaklıkların yanı sıra yerel rüzgâr hızını da etkilemektedir. Yapılan araştırmada BSF değeri ile rüzgâr hızı arasında ters orantının olduğu tespit edilmiştir. BSF değerinin arttıkça rüzgâr hızının azaldığı otaya konmuştur (Xu vd., 2017).

3.5.3 Kat Alanı Katsayısı Oranı

Kat alanı katsayısı oranı (floor area ratio-FAR), her bir griddeki binaların toplam kat alanının grid alanına bölünmesiyle hesaplanmaktadır (3.12) (C. Wang vd., 2024; S. Yang vd., 2023). FAR değerinin hesaplanabilmesi için bina taban alanı ve kat sayısı bilgilerinin bilinmesi gerekmektedir. FAR, kentsel mekandaki yapılaşma yoğunluğunu tanımlayan temel morfolojik parametrelerinden biri olup, arazi

kullanım etkinliğini değerlendirmek için kullanılmaktadır (Azhdari vd., 2018; Shehata, 2023; J. Yang vd., 2021).

$$FAR = \frac{\sum_{i=1}^{n}(BSi * BFi)}{Sgrid} \quad (3.12)$$

FAR= Kat alanı katsayısı oranı.

BSi= Bina taban alanı.

BFi= Bina kat adedi.

Sgrid= Grid alanı.

3.5.4 Ortalama Bina Hacmi

Ortalama bina hacmi (average building volüme-ABV), kentsel alandaki binaların morfolojik çeşitliğini yansıtmakta ve bina formlarının genel özellikleri hakkında bilgi vermektedir (Shen vd., 2024). Bu parametre, her bir griddeki toplam bina hacminin griddeki bina sayısına bölünmesiyle hesaplanmaktadır (3.13) (Peng vd., 2024). Bina hacmi, kentsel dokudaki dikey yüzeylerin miktarıyla doğru orantılı olup, bu miktar bina formuna ve yüksekliğine bağlı olarak değişim göstermektedir (Morganti vd., 2017).

$$AVb = \frac{\sum_{i=1}^{n}(Vi)}{n} \quad (3.13)$$

$$Vi = Si * Hi \quad (3.14)$$

AVb= Ortalama bina hacmi.

Vi= Bina hacmi.

n= Bina sayısı.

Si= Bina taban alanı.

Hi= Bina yüksekliği.

3.5.5 Bina Cephe Alanı Oranı

Bina cephe alanı oranı (façades to site ratio-FSR), kentsel dokudaki dikey yoğunluğun bir göstergesidir (Palusci vd., 2022). Bu parametre, her bir griddeki binaların toplam cephe alanının grid alanına bölünmesiyle hesaplanmaktadır (3.15) (Morganti vd., 2017). FSR oranının hesaplanabilmesi için bina çevresi ve bina

yüksekliği bilgilerinin bilinmesi gerekmektedir. Elde edilen FSR oranı, binalardaki cephe alanlarının kentsel alan içindeki dikey yoğunluğunu ifade etmektedir (Morganti vd., 2017).

$$FSR = \frac{\sum_{i=1}^{n}(Si)}{Sgrid} \tag{3.15}$$

$$Si = Pi * Hi \tag{3.16}$$

FSR= Bina cephe alanı oranı.

Si= Bina cephe alanı.

Sgrid= Grid alanı.

Pi= Bina çevresi.

Hi= Bina yüksekliği.

3.5.6 Bina Cephe/Hacim Oranı

Bina cephe/hacim oranı (façades to volume ratio-FVR), bina zarfları ile çevresel koşullar arasındaki termal etkileşimin bir gösteri olup, gerçekleşen ısı transferinin büyüklüğünü ifade etmektedir. Binalardaki kompaktlığın bir ölçütü olan FVR, aynı zamanda binalardaki enerji performansı hesaplamalarında kullanılan bir parametredir (Hajtmanek vd., 2023). Bu parametre, her bir griddeki toplam bina cephe alanının, toplam bina hacmine bölünmesiyle hesaplanmaktadır (3.17). Elde edilen değerler binaların kompaktlık derecesini belirleyerek ısı transferi, enerji kaybı veya havalandırma potansiyeli gibi faktörler üzerindeki etkisinin değerlendirmesinde kullanılmaktadır.

$$FVR = \sum_{i=1}^{n} \frac{S_i}{V_i} \tag{3.17}$$

FVR= Bina cephe/hacim alanı oranı.

Si= Toplam bina cephe alanı.

Vi= Toplam bina hacmi alanı.

3.5.7 Açık Alan Oranı

Açık alan oranı (open space ratio-OSR), yapılaşmamış alan yoğunluğunu tanımlayan morfolojik bir parametre olup, belirli bir kentsel alan içindeki açık alan oranını değerlendirmek için kullanılmaktadır. OSR, her bir griddeki bina taban alanları dışında kalan toplam açık alan miktarının toplam inşaat alanına oranlanmasıyla hesaplanmaktadır (3.18) (Wei vd., 2016).

$$OSR = \frac{(S\ Grid)\ -\ (\sum_{i=1}^{n} BSi)}{\sum_{i=1}^{n}(BSi\ *\ BFi)} \tag{3.18}$$

OSR= Açık alan oranı.

Sgrid= Grid hücresi alanı (90x90 m).

BSi= Bina taban alanı.

BFi= Bina kat adedi.

3.5.8 Gözeneklilik Oranı

Kentsel gözeneklilik oranı (porosity-Po), belirli bir kentsel alandaki açık alan hacminin toplam hacme oranı olarak tanımlanmaktadır (Elzeni vd., 2021). Kentsel doku içindeki geçirgenliğin bir ölçütü olan bu parametre, rüzgâr hızı, hava sirkülasyonu, ısı dağılımı ve kirletici maddelerin yayılımı gibi kentsel mikro iklimi etkileyen faktörler üzerinde etkilidir (Silva vd., 2018). Bu parametre, toplam grid hacminden toplam bina hacminin çıkarılmasıyla elde edilen açık alan hacminin gridin toplam hacmine bölünmesiyle hesaplanmaktadır (3.19).

$$Po = \frac{(Sgrid\ *\ Hi)\ -\ (\sum_{i=1}^{n} Vi)}{\sum açık\ alan\ Vo + \sum bina\ Vi} \tag{3.19}$$

Po= Kentsel gözeneklilik oranı.

Sgrid= Grid hücresi alanı (90x90 m).

Hi= Ortalama bina yüksekliği.

Vi= Bina hacmi.

Vo= Açık alan hacmi.

3.5.9 Mutlak Pürüzlülük Oranı

Mutlak pürüzlülük oranı (absolute rugosity-RU), kentsel örtü katmanının ortalama yüksekliğini ifade eden morfolojik bir parametredir (Elzeni vd., 2021). Kentsel alandaki belirli bir bölgenin genel yapısal yüksekliğinin değerlendirilmesinde kullanılan bu parametre, her bir griddeki toplam bina hacminin grid alanına bölünmesiyle hesaplanmaktadır (3.20).

$$RU = \frac{\sum bina\ Si * Hi}{Sgrid} \tag{3.20}$$

RU=Mutlak pürüzlülük oranı.

Si= Bina taban alanı.

Hi= Ortalama bina yüksekliği.

Sgrid= Grid hücresi alanı (90x90 m).

3.5.10 Normalize Edilmiş Yapılaşma İndeksi

Normalize edilmiş yapılaşma indeksi (normalized difference built-up ındex-NDBI), kentsel alanlardaki geçirimsiz yüzeyleri ve yapılaşmış alanları belirlemek için kullanılan bir spektral indekstir. NIR ve SWIR bantlardan üretilen bu indeks, yapılaşmış alan yoğunluğunu hassas bir şekilde ölçmeye olanak tanımaktadır (Azhdari vd., 2018; Hidalgo-García & Arco-Díaz, 2022). Bu indeksin hesaplanmasında Landsat-8 uydu görüntülerine ait Bant-5 ve Bant-6 verileri kullanılmaktadır. Bu bantlar farklı yüzey malzemelerine sahip olmasından dolayı farklı yansıma özellikleri göstermektedir. Bu özellikler kullanılarak bantlar CBS ortamında işlenmiş ve indeks hesaplaması gerçekleştirilmiştir (3.21).

$$NDVI = \frac{SWIR - NIR}{SWIR + NIR} \tag{3.21}$$

NIR= Yakın kızılötesi bant (Band-5).

SWIR= Kısa dalga boylu kızılötesi (Band-6).

3.5.11 Normalize Edilmiş Bitki Örtüsü İndeksi

Normalize edilmiş bitki örtüsü indeksi (normalized difference vegetation index-NDVI), yapılan detaylı morfolojik analizlerde, seçili LCZ tipolojilerindeki bitki örtüsü yoğunluğunun ve geçirimli yüzey oranlarının değerlendirilmesine olanak

sağlamaktadır. Bu indeks, Landsat-8 uydu görüntülerine ait Bant-4 ve Bant-5 verileri kullanılarak CBS ortamında hesaplanmıştır. NDVI hesaplama sürecine ilişkin yöntem açıklamaları Bölüm 3.2 ’de ayrıntılı bir şekilde aktarılmıştır.

3.6 Z-Skor Normalizasyonu

Z-Skor normalizasyonu, farklı veri setlerindeki değerleri karşılaştırabilir hale getirmek için kullanılan istatistiksel bir yöntemdir. Bu yöntemde, veri setindeki her bir değer, ortalama ve standart sapmaya göre yeniden ölçeklendirilmektedir (3.22). Bu ölçeklendirmede her bir verinin ortalamasını 0, standart sapmasını ise 1 olacak şekilde ayarlayarak normalize etmektedir. Bu işlem sonucunda verilerin karşılaştırılabilir haldeki z-puanları elde edilmektedir.

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma} \tag{3.22}$$

Z= Z-Score standardizasyonu.

X= Orijinal değer.

μ= Ortalama.

σ= Standart sapma.

Tez çalışması kapsamında mekânsal morfolojik yapıya ait parametreler farklı aralıklarda sayısal değerlere sahiptir. Bu durum hem verilerin karşılaştırılmasını hem de istatistiksel modellerde sağlıklı sonuçların elde edilmesini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle morfolojik parametrelere ait veri setindeki değerlere coğrafi bilgi sistemlerinde z-skor normalizasyonu uygulanmıştır. Bu durum, verileri aynı ölçeğe getirerek daha doğru ve güvenilir bir istatiksel model elde edilmesini sağlamıştır.

3.7 Extreme Gradient Boosting Regresyon Modeli

Extreme Gradient Boosting (XGBoost) regresyon modeli, karar ağacı tabanlı bir makine öğrenme algoritması olup, değişkenler arasındaki lineer ve lineer olmayan ilişkilerin belirlenmesinde kullanılan güncel bir istatistiksel analiz yöntemidir (Liu vd., 2023) Bu modelin, yüksek tahmin gücü elde etmesi, aşırı öğrenmenin (overfitting) önüne geçmesi ve büyük veri setlerinde etkin bir şekilde çalışması

bakımından diğer analiz modellerine göre avantajlar sağlamaktadır (Bushenkova vd., 2024). Modelin temel çalışma formülasyonu şu şekildedir (3.23):

$$F\ (y) = \ \varphi\ (Xi) = \sum_{k=1}^{k} fk\ (Xi) \qquad (3.23)$$

F (y)= Modelin tahmin edilen çıktısı.

Xi= Giriş değişkeni.

fk= k'ncı zayıf değerlendirme fonksiyonu.

İ= Ortalama örneklem değeri.

Kullanılan bu matematiksel algoritma, XGBoost modelinin lineer olmayan ve çok değişkenli ilişkileri makine öğrenmesi metoduyla etkin bir şekilde öğrenerek genellenebilir sonuçlar üretmesini sağlamaktadır (He vd., 2024). XGBoost modelinin yüksek doğruluk ve verimliliğe sahip olması nedeniyle son yıllarda mekânsal morfoloji parametreleri ve kentsel sıcaklık arasındaki lineer ve lineer olmayan ilişkilerin tespitinde kullanılmaktadır (Bushenkova vd., 2024; Erdem Okumus & Akay, 2025; A. Lin vd., 2024; Liu vd., 2023; Peng vd., 2024).

Tez çalışması kapsamında XGBoost algoritması, Bonferroni prosedürü kullanılarak yapılan çoklu karşılaştırma (pairwise comparisens) testlerinde anlamlı farklılık düzeyi en yüksek olan ilk on karşılaştırma içerisinde yer alan LCZ tipolojilerindeki kentsel sıcaklık varyasyonlarına etki eden mekânsal morfoloji parametrelerinin etki düzeyinin tahmin edilmesi için uygulanmıştır. Söz konusu XGBoost regresyon modeli doğrultusunda, bağımlı değişken olarak kentsel sıcaklık değerleri, bağımsız değişkenler ise mekânsal morfoloji parametreleri (NDVI, NDBI, ABV, BSF, FVR, FAR, OSR, ABH, Po, FSR ve Ru) belirlenmiş ve modele dahil edilmiştir.

Modelin eğitimi sırasında aşırı öğrenme riskini önlemek, model performansını ve genelleme yeteneğini arttırmak amacıyla Randomized Search Cross Validation hiperparametre optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bunun için ağaç sayısı (number of trees), ağaç derinliği (maximum tree depth), öğrenme oranı (learning rate-eta), kullanılan değişken oranı (column subsampling ratio), L1 düzenlileştirme katsayısı (L1 regularization-alpha), L2 düzenlileştirme katsayısı (L2 regularization-lambda) ve minimum kayıp azalması değeri (minimum loss reduction for splits-gamma) gibi

hiperparametre göstergeleri yapay zeka algoritmaları ile hesaplanmıştır. Modelin eğitilmesi sonucunda gerçekleşen model performansı, kök ortalama kare hata (RMSE), ortalama mutlak hata (MAE) ve determinasyon katsayısı (R^2) gibi istatistiksel ölçütler kullanılarak değerlendirilmiştir. Model sonucunda elde edilen çıktılar, mekânsal morfolojik parametrelerin kentsel sıcaklık değerleri üzerindeki önem düzeylerini göstermektedir.

3.8 SHAP Analizi

SHAP (Shapley Additive Explanations) analizi "kara kutu (black box)" olarak nitelendirilen yani anlaşılması ve yorumlanması zor olan makine öğrenmesi tabanlı XGBoost regresyon modelinin elde ettiği çıktıların okunabilirliğini artırmak amacıyla kullanılan bir yöntemdir (Liu vd., 2023). Bu yöntemde, her bir bağımsız değişkenin model çıktısı üzerindeki görece etkisi Shapley değerleri hesaplanarak ortaya koyulmaktadır (Erdem Okumus & Akay, 2025; Tang vd., 2025). Hesaplanan Shapley değerleri, hangi değişkenin modele ne ölçüde katkı sağladığını nicel yöntemlerle hesaplayarak değişkenler arasında önem düzeyine göre hiyerarşik bir sıralama yapma imkânı tanımaktadır. Bu sayede modelin işleyişinin daha anlaşılır olması sağlanmaktadır (Liu vd., 2023). SHAP değerlerinin hesaplanması aşağıdaki formül (3.24) aracılığıyla gerçekleştirilmektedir:

$$\varphi i = \sum \quad S \subseteq N\backslash\{i\} \frac{|S|!\,(|M| - |S| - 1)!}{S|M|!\,WIR + NIR} \,[fx(S \cup\{i\}) - fx(S)] \qquad (3.24)$$

φi = i'nci özelliğin katkısı.

S= tüm olası değişken alt kümeleri

N= tüm değişkenler kümesi.

f(S) = S alt kümesine ait model tahmini.

f(S $\cup\{i\}$) – F (S) = i değişkeninin modele katkısı.

SHAP analizi sonucunda elde edilen bulguların yorumlanabilmesi amacıyla değişkenlerin model çıktısı üzerindeki etkisini gösteren ve ortalama mutlak SHAP değerlerin büyüklüğüne göre sıralanan global değerler (çubuk grafik) ve yerel değerlerden (beeswarm grafik) yararlanılmaktadır. Global değerler, her bir bağımsız değişkenin model çıktısı üzerindeki ortalama etkisini göstermektedir. Bu

değerlerde, bir değişkenin ortalama SHAP değeri ne kadar büyükse model çıktısı üzerinde o kadar etkili olduğu anlaşılmaktadır (Cooper, 2021). Ancak söz konusu değerlerde yalnızca değişkenin önem düzeyi ortaya koyulmakta olup model çıktısı üzerindeki etki yönü hakkında bilgi verilmemektedir.

Yerel değerler ise her bir gözleme ait SHAP değerini kullanarak değişkenlerin model çıktısı üzerindeki etki yönünü (pozitif-negatif) ve şiddetini detaylı bir şekilde göstermektedir. Bu değere ait grafiklerin, x ekseninde ortalama SHAP değerleri, y ekseninde ise değişkenler (morfolojik) yer almaktadır. Kırmızıdan maviye doğru belirli bir renk skalasına sahip olan grafikte, kırmızı renkler ilgili değişkene ait ham değerlerin yüksek değerlerini, mavi renkler ise düşük değerlerini temsil etmektedir (A. Lin vd., 2024). Grafikte kırmızı noktaların pozitif SHAP değerlerinde yoğunlaşması, ilgili değişkenin yüksek değerlerinin model çıktısını artırıcı etkide; kırmızı noktaların negatif SHAP değerlerinde yoğunlaşması ise ilgili değişkenin yüksek değerlerinin model çıktısını azaltıcı etkide bulunduğunu ifade etmektedir (Cooper, 2021).

3.9 Model Doğrulaması

Model doğruluğunu değerlendirmek amacıyla, XGBoost modelinin farklı yerel iklim bölgeleri üzerindeki hata dağılımları analiz edilmiştir. MAE, MAPE ve RMSE gibi hata metriklerinin mekânsal dağılımlarının incelenmesi, modelin farklı morfolojik ve çevresel koşullardaki performans varyasyonlarını ortaya koyarak, genellenebilirlik düzeyinin değerlendirilmesini sağlamaktadır. Bu doğrultuda, modelin çıktılarına ait tahmin edilen sıcaklık değerleri ile gerçek sıcaklık değerleri arasındaki farklar her bir LCZ tipolojisi için ayrı ayrı hesaplanarak MAE, MAPE ve RMSE değerleri elde edilmiş ve coğrafi bilgi sistemlerinde mekansallaştırılmıştır.

Her bir LCZ tipolojisi için hesaplanan hata terimlerinin dağılımlarının incelenmesiyle, modelin hangi yerel iklim bölgelerinde daha güvenilir sonuçlar ürettiği, hangi bölgelerde ise hata oranlarının yükseldiği sistematik bir biçimde ortaya koyulmuştur. Bu yaklaşım, modelin genellenebilirlik düzeyinin eleştirel bir değerlendirmesini sağlamakta ve mekânsal hata heterojenliğini göz önünde bulundurarak, model çıktılarının planlama ve tasarım uygulamalarındaki kullanılabilirliğini güçlendirmektedir. Bu doğrultuda yapılan hata analizi,

literatürde sıklıkla göz ardı edilen mekânsal hata heterojenliğini dikkate alarak, modelin güçlü ve zayıf yönlerini belirlemede kritik bir doğrulama aşaması işlevi görmekte; model çıktılarının güvenilirliğini ve karar destek kapasitesini arttırmaktadır. Aynı zamanda, modelin sınırlı performans gösterdiği yani hata değerlerinin yüksek olduğu mekânsal birimler tanımlanarak, sıcaklıkların azaltımı yönünde kent iklimi iyileştirme çalışmaları için etkin stratejilerin geliştirilmesini sağlamaktadır. Dolayısıyla, bu metodolojik adım sayesinde, önerilen yapay zekâ tabanlı modelin bilimsel güvenilirliği ve uygulamaya aktarılabilirliği arttırılmıştır.

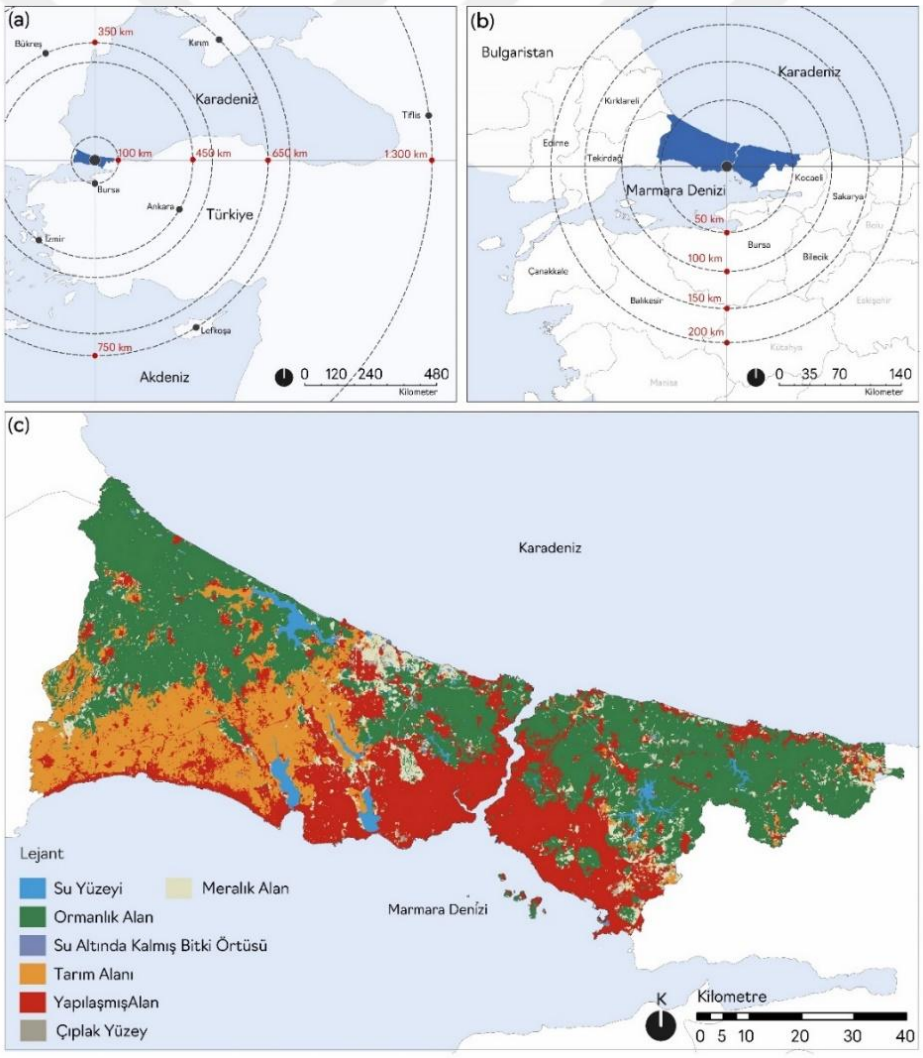
4
İSTANBUL YEREL İKLİM BÖLGELERİNDE MEKÂNSAL MORFOLOJİ VE KENTSEL SICAKLIK ETKİLEŞİMİ

Tez çalışmasının bu bölümünde, İstanbul il genelinde sınıflandırılan yerel iklim bölgeleri kapsamında, mekânsal morfolojik yapı ile kentsel sıcaklık varyasyonları arasındaki niceliksel ilişki analiz edilerek değerlendirilmiştir. Çalışmada ilk olarak kentsel sıcaklık ile temsil edilen arazi yüzey sıcaklığı hesaplanmıştır. Bunu takiben il genelinde yerel iklim bölgeleri sınıflandırması yapılarak kentin iklimsel açıdan farklılaşan bölgeleri ortaya koyulmuştur. Ardından, her bir yerel iklim bölgesine karşılık gelen kentsel sıcaklık değerleri analiz edilmiş ve istatistiksel olarak anlamlı farklılık gösteren LCZ tipolojilerinin ortaya koyulması için non-parametrik testler yapılmıştır. Son olarak ise kentsel sıcaklık değerleri açısından anlamlı farklılık gösteren yerel iklim bölgelerindeki mekânsal morfolojik parametreler ile kentsel sıcaklık değerleri arasındaki lineer ve lineer olmayan ilişkileri belirlemek amacıyla yapay zekâ tabanlı XGBoost regresyon modeli ve SHAP analizi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra ise model doğruluğu kontrol edilerek hata değerlerinin mekânsal dağılımı detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir.

4.1 İstanbul'un Mekânsal Özellikleri ve İklimsel Yapısı

İstanbul, 15,701,602 kişilik nüfusu ve 2,934 kişi/km²'lik nüfus yoğunluğuyla Avrupa Kıtası'ndaki en kalabalık ve en yoğun nüfuslu kent konumundadır (TÜİK, 2024). Türkiye'nin kuzeybatısında yer alan kent, kuzeyde Karadeniz, güneyde Marmara Denizi, doğuda Kocaeli ve batıda ise Tekirdağ illeri ile çevrelenmiştir. İstanbul ayrıca Marmara Denizi'ni ve Karadeniz'e bağlayan ve kenti Avrupa ve Asya olmak üzere iki kıtaya ayıran doğal bir boğaza sahiptir. İstanbul il sınırları referans alındığında toplam yüzölçümü 5,461 km²dir. Yüzölçümünün %65.1 Avrupa, %34.9'u Asya kıtasında yer almaktadır.

Kentin doğal ve fiziksel özellikleri incelendiğinde mekânsal olarak belirgin farklılıklar bulunmaktadır. Kentin kuzeyinde ormanlık alanlar, tarım alanları, meralık alanlar ve su havzaları gibi doğal arazi örtüsü desenleri yoğunlaşırken güneyinde ise Marmara Deniz'i kıyıları ve boğaz hattı boyunca yapılaşmış alanlar yoğunlaşmaktadır. İstanbul'un 2024 yılına ait arazi örtüsü verileri incelendiğinde; %27.7'si kentsel alanlardan, %44.9'u ormanlık alanlardan, %17.6'sı tarım alanlarından, %6.5'i meralık alanlardan, %2.6'sı su yüzeylerinden ve %0.7'si diğer yüzeylerden oluşmaktadır (Şekil 4.1) (Esri, 2024). Kentin topografik yapısına bakıldığında 0 m ile 537 m arasında değişim göstermekte ve büyük ölçüde hareketli bir topografyadan oluşmaktadır. Kentteki en yüksek nokta 537 m ile Kartal, Pendik, Sultanbeyli ve Sancaktepe ilçeleri sınırları içinde bulunan Aydos Tepesi'dir (Ögçe & Erdem Kaya, 2024).



Şekil 4.1 İstanbul'un Türkiye'deki konumu (a), Marmara Bölgesi'ndeki konumu (b) ve 2024 yılına ait arazi örtüsü (c)

İstanbul'un kentsel gelişim süreci incelendiğinde kentin çekirdeği olan Tarihi Yarımada'dan başlayarak Marmara Denizi ve İstanbul Boğazı kıyıları boyunca doğrusal bir gelişme eğilimi gösterdiği görülmektedir. Cumhuriyet'in ilk yıllarında planlama temelinde başlayan kentleşme politikaları, 1950'li yıllarda sanayileşme sürecinin başlaması ve kırdan kente yoğun göç hareketlerinin yaşanmasıyla birlikte değişmiş ve bu dönemde artan konut ihtiyacını karşılamak üzere gecekondulaşma kültürü doğmuştur (Özker, 2020). 1960'lı yıllarda kat mülkiyeti yasası uygulamalarıyla birlikte apartmanlaşma süreci başlamış ve bu gelişme kentsel alanlardaki dikey yoğunluğun artmasına neden olarak kentin morfolojik yapısını dönüştürmüştür. 1970'li yıllarda sanayi alanlarının kent çeperine taşınması ve çok merkezli kentsel yapının oluşması İstanbul'un metropol büyüklüğüne ulaşmasını sağlamıştır. Aynı zamanda bu dönemde başlayan büyük ölçekli ulaşım projeleriyle (Boğaziçi/15Temmuz Şehitler Köprüsü, FSM Köprüsü, TEM Otoyolu) birlikte kentin mekânsal olarak kuzeye yayılma süreci başlamıştır (Kubat & Hazar, 2018). 1980'li yıllarla başlayan neoliberal politikalar ve küreselleşme adımları İstanbul'a sermaye akışını hızlandırmış ve bu durum merkezi iş alanlarının oluşması, organize sanayi bölgelerinin kurulması ve ulaşım altyapısının gelişmesi şeklinde kendini göstermiştir (Kanbak, 2013). 2000'li yıllarla birlikte artan kentsel dönüşüm projeleri ve kent merkezinden çeperlere doğru yayılan lüks konutlar kentsel mekânın yeniden üretilmesini gündeme getirmiş ve kentsel gelişimin saçaklanmasına neden olmuştur (Özker, 2020). Son yıllarda Kuzey Marmara Otoyolu, İstanbul Yeni Havalimanı ve Yavuz Sultan Selim Köprüsü gibi büyük ölçekli ulaşım projeleri kentin kuzey yönlü gelişme eğilimini hızlandırmıştır. Bu durum kentin kuzeyindeki doğal arazi örtüsü desenlerini değiştirerek kentsel yüzeylerin artmasına neden olmuştur.

Genel olarak İstanbul'un kentleşme süreci değerlendirildiğinde geçmişten günümüze kadar olan hızlı ve plansız kentleşme dinamikleri kentsel dokuda belirgin değişikliklere neden olarak morfolojik çeşitliliği artırmış ve bunula birlikte farklı yapılaşma biçimlerine neden olmuştur. Söz konusu bu çeşitlilik kentin mekânsal heterojenliğini artırarak farklı mikro iklimsel yapıların oluşmasını sağlamıştır.

İstanbul, Karadeniz ve Akdeniz iklim tipleri arasında geçiş özelliği göstermekte ve çeşitli mikroklimatik varyasyonları içermektedir (Güneralp vd., 2013; Ünal vd.,

2020). Kent, Köppen iklim sınıflandırma sistemine göre "Csa" yani kışları ılık, yazları ise sıcak ve kurak Akdeniz iklimine sahiptir (T.C. Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2024a). Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından 1950-2024 yılları arasında yapılan ölçümlerde ortalama en yüksek sıcaklık değerleri 24.6°C ile temmuz ve ağustos aylarında, ortalama en düşük sıcaklıklar ise 6.7°C ile ocak ayında görülmektedir (T.C. Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2024b). İstanbul'un 1980 yılından itibaren yıllık sıcaklık değişimleri incelendiğinde ortalama sıcaklığın artış trendinde olduğu dikkat çekmektedir. 1980 yılında 14,7°C olan ortalama sıcaklık değeri, 2024 yılında +1.6 °C'lik artışla 16.3°C'ye yükselmiştir. Ortalama sıcaklığın artış eğiliminde olduğu bu periyotta aynı zamanda anomali sıcaklık değerleri de artış göstermektedir. 1980 yılında 0.2°C olan sıcaklık anomalisi, 2024 yılında 1.9°C'ye çıkmıştır (Meteoblue, 2024).

İklim değişikliği ve küresel ısınmanın etkileri göz önünde bulundurulduğunda Akdeniz Bölgesi, Avrupa kıtasında iklim değişikliğinden en fazla etkilenecek bölgelerden biri olarak öne çıkmaktadır. IPCC raporlarına göre Türkiye ve çevre ülkelerde; sel ve taşkın olaylarının artması, kullanılabilir su kaynaklarının azalması ve aşırı sıcaklıklara bağlı hava olaylarının artacağına vurgu yapılmaktadır (IPCC, 2023). Bu bağlamda İstanbul'da da hava sıcaklığı ve yağış rejimlerinin değişmesi gibi iklim değişikliği etkilerinin görüleceği tahmin edilmektedir. RCP'nin 2096 yılı için öngördüğü yıllık sıcaklık projeksiyonları (RCP 2.6, 4.5, 6.0 ve 8.5) incelendiğinde, tüm senaryolarda İstanbul'un 1°C ile 4.5°C arasında sıcaklık anomalisi göstereceği ve yüksek ortalama sıcaklıkların görüleceği beklenmektedir (İBB, 2021).

4.2 İstanbul'da Arazi Yüzey Sıcaklığı Dağılımı

İstanbul'da arazi yüzey sıcaklığı (LST), 23 Temmuz 2022 tarihli Landsat-8 uydu görüntülerinin CBS ortamında işlenmesiyle ortaya koyulmuştur. İstanbul gibi sıcak/nemli Akdeniz iklim tipine sahip kentlerde, sıcaklık düzeyinin en yüksek olduğu aylar yaz aylarıdır (Martinelli vd., 2020). Bu nedenle, kentsel sıcaklık değerlerinin hesaplanabilmesi için yaz aylarına ait uydu görüntüleri tercih edilmiştir. Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün 1950-2022 yılı uzun dönemli verileri incelendiğinde, yıllık ortalama sıcaklık değerinin en yüksek olduğu ay 24.6°C ile temmuz ayı olduğu görülmektedir (T.C. Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2024b). Bu

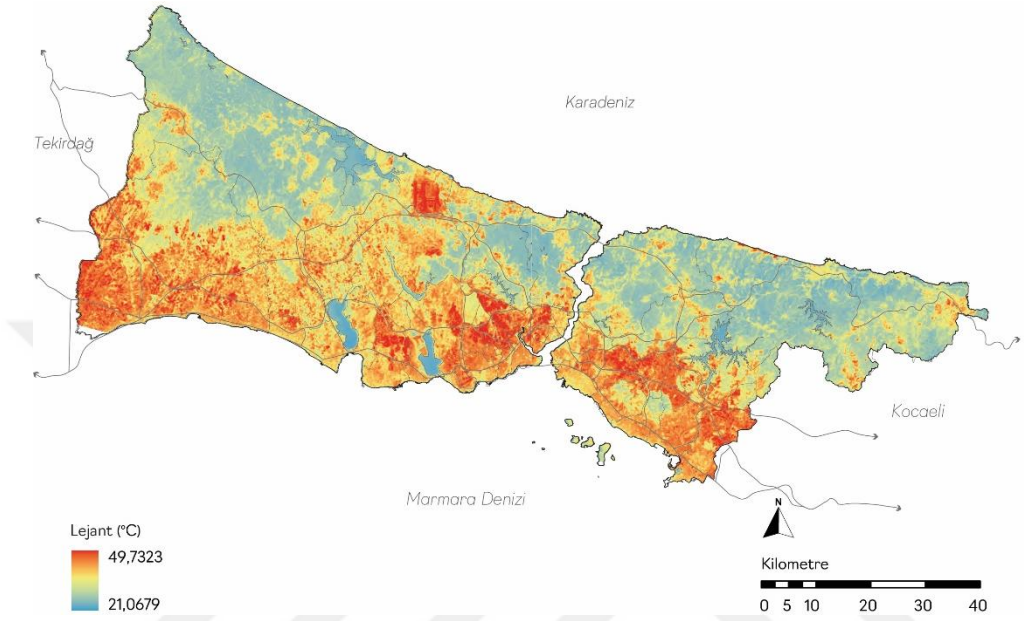
nedenle arazi yüzey sıcaklığının hesaplanması için temmuz ayına ait Landsat-8 uydu görüntüsü tercih edilmiştir. Tespit edilen arazi yüzey sıcaklığına ait değerlerin doğruluğu yansıtması için uydu görüntülerindeki bulutluluk oranı %0.02 ile en düşük tarih olan 23 Temmuz 2022 tarihine ait Landsat-8 uydu görüntüsü kullanılmıştır (Tablo 4.1).

Tablo 4.1 23 Temmuz 2022 tarihine ait Landsat-8 uydu görüntüsü bilgileri (USGS, 2025)

Özellikler	Değerler
Landsat Ürün Kimliği	LC08_L1TP_180031_20220723_20220802_02_T1
Görüntü Kimliği	LC81800312022204LGN00
Alım Tarihi	23/07/2022
Toplanma Kategorisi	T1
Başlangıç Zamanı	2022-07-23 08:45:27
Bitiş Zamanı	2022-07-23 08:45:59
Bulutluluk Oranı	0.02
Güneş Yüksekliği	61.89176779°
Güneş Azimutu	134.14256306°
Veri Türü	OLI_TIRS_L1TP
Sensör Tanımlayıcı	OLI_TIRS
Harita Projeksiyonu ve UTM Bölgesi	UTM - 35
Harita Çözünürlüğü	30

Tez çalışması kapsamında yapılan analizler sonucunda, İstanbul genelindeki kentsel sıcaklık değerleri incelendiğinde (Şekil 4.2), minimum değer 21.06°C, maksimum değer 49.73°C ve ortalama değer ise 30.48°C olarak hesaplanmıştır. Maksimum ve minimum kentsel sıcaklık değerleri arasındaki fark ise 28.67°C olup bu değer, kentteki yüksek sıcaklık değişkenliğini yani yüksek termal heterojenliği ifade etmektedir. Kırsal ve kentsel alanlardaki ortalama sıcaklık değişimine bakıldığında, kentsel alanlardaki ortalama sıcaklık değeri 34.05°C, kırsal alanlardaki ortalama sıcaklık değeri ise 29.56 °C olarak hesaplanmıştır. Kentsel ve kırsal alanlardaki sıcaklık farkı ise 4.48°C olarak tespit edilmiş olup, İstanbul'daki sıcaklık anomali etkisini doğrulamaktadır. Kent genelindeki sıcaklıkların medyan

değeri 30.34°C olarak belirlenmiştir. Bu değer, ortalama kentsel sıcaklık değerinden düşük olup pozitif çarpıklığın göstergesi olarak nitelendirilmektedir. Bu durum, kent genelindeki sıcaklık değerlerinin genel olarak ortalamanın altında seyrettiği, ancak kentin bazı bölgelerinde kent ortalamasına kıyasla aşırı yüksek sıcaklık değerlerinin görüldüğünü ifade etmektedir.

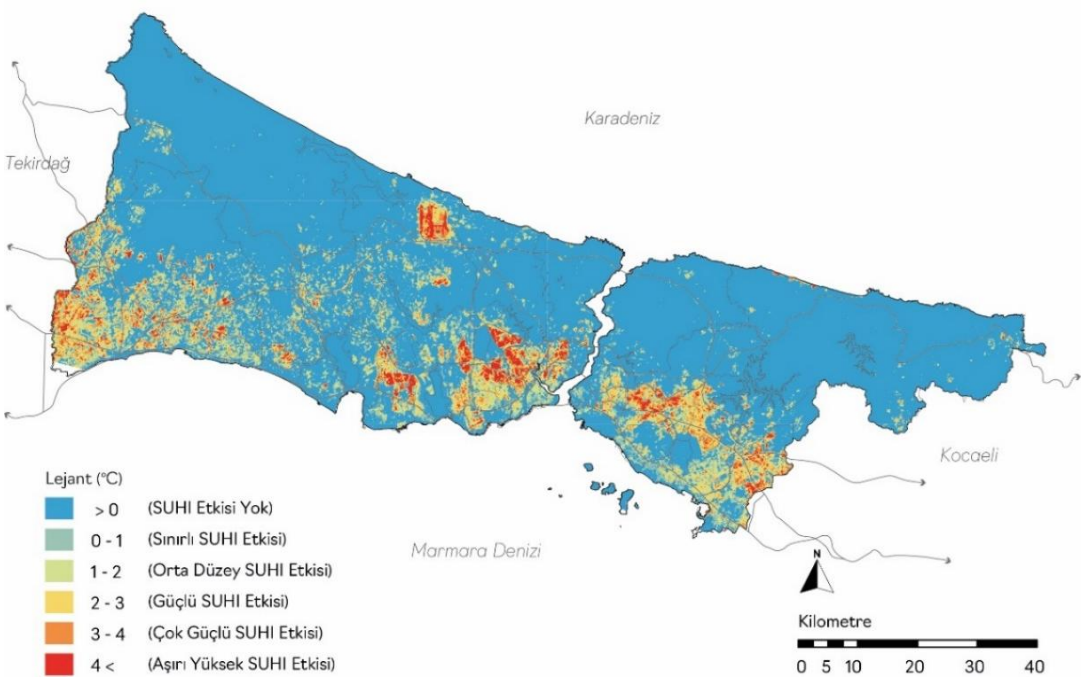


Şekil 4.2 23 Temmuz 2022 tarihine ait İstanbul arazi yüzey sıcaklığı haritası

Kentsel sıcaklık değerlerinin mekânsal dağılımı incelendiğinde, İstanbul'un güney bölgelerinin kuzey bölgelere kıyasla daha yüksek sıcaklık değerlerine sahip olduğu saptanmıştır. Bu durum, kentin Marmara Denizi kıyısı boyunca doğrusal kentsel gelişme eğilimi ile de örtüşmektedir. Düşük sıcaklık değerlerinin görüldüğü kentin kuzey bölgeleri, genellikle ormanlık alanlar, tarım alanları ve su havzaları gibi doğal arazi örtüsü desenleriyle karakterize edilmiştir. Bu alanlar hem gölgeleme etkisi hem de buharlaşma sayesinde sıcaklıkların çevresindeki alanlara göre daha düşük değerlerde olmasını sağlamıştır. Ancak, son dönemlerde yapılan; İstanbul Yeni Havalimanı, Kuzey Marmara Otoyolu ve Yavuz Sultan Selim Köprüsü gibi büyük ölçekli kentsel projelerin kentin kuzeyindeki sıcaklık değerlerini arttırma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. Yüksek sıcaklık değerlerine sahip güney bölgeler ise genellikle yoğun yapılaşmış alanlar, sanayi bölgeleri ve merkezi iş alanlarından oluşmaktadır. Bu alanlar, güneş radyasyonunu absorbe eden beton veya asfalt gibi geçirimsiz yüzeylerin fazlalığı, yeşil alan oranın düşüklüğü ve yüksek yapı yoğunluğu gibi morfolojik özelliklerle karakterize edilmiştir. Genel

itibariyle İstanbul'daki kentsel sıcaklık değerlerinin mekânsal dağılımı kentleşme modeli ve arazi kullanım farklılıklarıyla doğrudan ilişkili bir şekilde dağılım gösterdiği ortaya koyulmuştur.

Kentin bazı bölgelerinde, kent ortalamasının üzerine çıkan aşırı yüksek sıcaklık varyasyonlarının tespit edilmesine bağlı olarak, bir sonraki adımda, İstanbul'daki kent dokularında görülen sıcaklık anomali değerleri hesaplanmış; bu hesaplamada kentsel ortalama sıcaklık (34°C) eşik değer olarak kabul edilmiştir. Söz konusu eşik değerin altındaki sıcaklık değerlerinde anomali etkisi gözlemlenmezken, üzerindeki sıcaklık değerlerinde ise farklı düzeylerde anomali etkisi görülmektedir. Tez kapsamında sıcaklık anomali etkisi 6 farklı düzeyde sınıflandırılmıştır. Bunlar; <0°C değerler anomali etkisi yok, 0-1°C sınırlı anomali etkisi, 1-2°C orta derece anomali etkisi, 2-3°C güçlü anomali etkisi, 3-4°C çok güçlü anomali etkisi ve son olarak 4°C ve üstü ise aşırı yüksek anomali etkisini tanımlamaktadır (Erdem Okumuş, 2022). Elde edilen bulgulara göre, kentin %23.4'ünde farklı seviyelerde sıcaklık anomalisinin görüldüğü tespit edilmiştir. Bu doğrultuda, İstanbul'un %7.3'ünde sınırlı, %6.4'ünde orta dereceli, %4.8'inde güçlü, %2.9'unda çok güçlü ve %2'sinde ise aşırı yüksek sıcaklık anomalisi görüldüğü ortaya koyulmuştur (Şekil 4.3).



Şekil 4.3 23 Temmuz 2022 tarihine ait İstanbul sıcaklık anomali haritası

İstanbul'un kentsel alanı üzerindeki sıcaklık anomalisi incelendiğinde ise toplam kentsel alanın %52.7'sinde farklı seviyelerde sıcaklık anomalisi tespit edilmiştir. Bu durum, sıcaklık anomalisinin kentsel alanın büyük bir kısmında etkisini gösterdiğini ortaya koymaktadır. Elde edilen bulgulara göre kentsel alanın %15.4'ü sınırlı, %14.2'si orta dereceli, %10.9'u güçlü, %6.7'si çok güçlü ve son olarak ise %5.5'i aşırı yüksek sıcaklık anomalisine maruz kalmaktadır (Tablo 4.2).

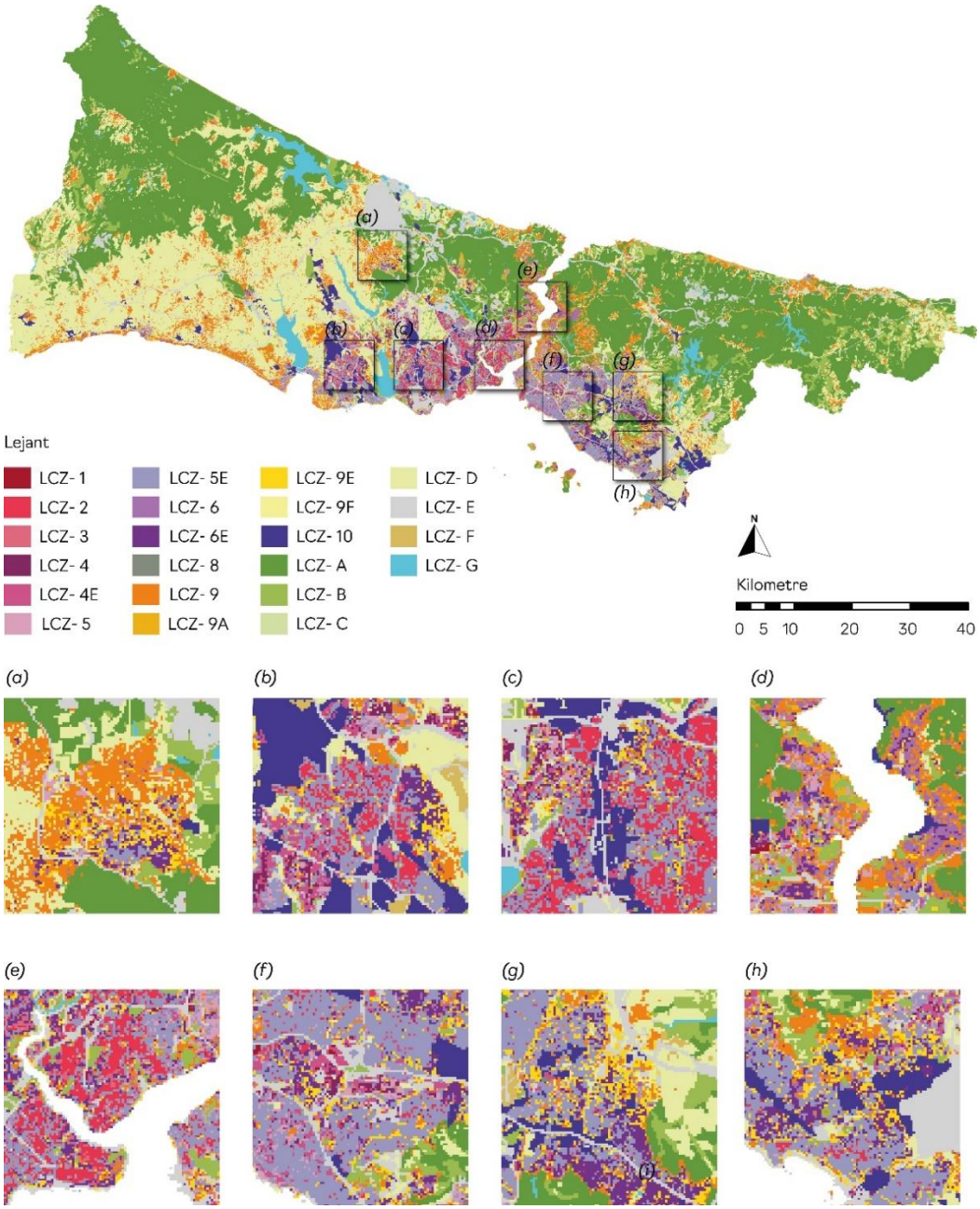
Tablo 4.2 İstanbul'da sıcaklık anomalisinin etki düzeylerine göre dağılımı (°C)

Çalışma Alanı	Sıcaklık Anomali Etkisi Yok	Sınırlı Sıcaklık Anomali Etkisi	Orta Derece Sıcaklık Anomali Etkisi	Güçlü Sıcaklık Anomali Etkisi	Çok Güçlü Sıcaklık Anomali Etkisi	Aşırı Yüksek Sıcaklık Anomali Etkisi
İstanbul Geneli	76.6	7.3	6.4	4.8	2.9	2.0
Kentsel Alan	47.3	15.4	14.2	10.9	6.7	5.5

4.3 İstanbul Yerel İklim Bölgeleri

İstanbul'un yerel iklim bölgelerinin sınıflandırılması sonucunda elde edilen bulgulara göre toplam 22 farklı LCZ tipolojisi tespit edilmiştir (Şekil 4.4). Tanımlanan LCZ tipolojilerinin 16 tanesi standart sınıflama sistemine (LCZ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, A, B, C, D, E, F, G), 6 tanesi ise alt sınıflandırma sistemine (4E, 5E, 6E, 9A, 9E, 9F) aittir. Yerel iklim bölgelerinin kent genelindeki dağılımı incelendiğinde %21.27'si mekânsal morfoloji tipolojilerinden, %78.73'ü ise arazi örtüsü tipolojilerinden oluşmaktadır.

İstanbul genelindeki yerel iklim bölgelerinin oransal dağılımına bakıldığında en baskın türlerin sırasıyla; %38.24 ile LCZ A (yoğun ağaçlık alanlar), %24,68 ile LCZ D (alçak bitki örtüsü) ve %7.85 ile LCZ 9 (seyrek yapılaşmış alanlar) tipolojileri olduğu görülmektedir (Tablo 4.3). Bu bulgular, İstanbul'un geniş doğal alanlarının bulunduğuna ve bu alanların kentsel mikro iklim konusunda belirleyici bir role sahip olduğunu göstermektedir. Diğer yandan en az bulunan yerel iklim bölgeleri incelendiğinde ise sırasıyla; LCZ 9F (seyrek yapılaşmış alanlar-toprak veya kum zemin), LCZ C (çalılık alanlar) ve son olarak ise LCZ 8 (geniş alçak katlı yapılar) tipolojileri olduğu dikkat çekmektedir.

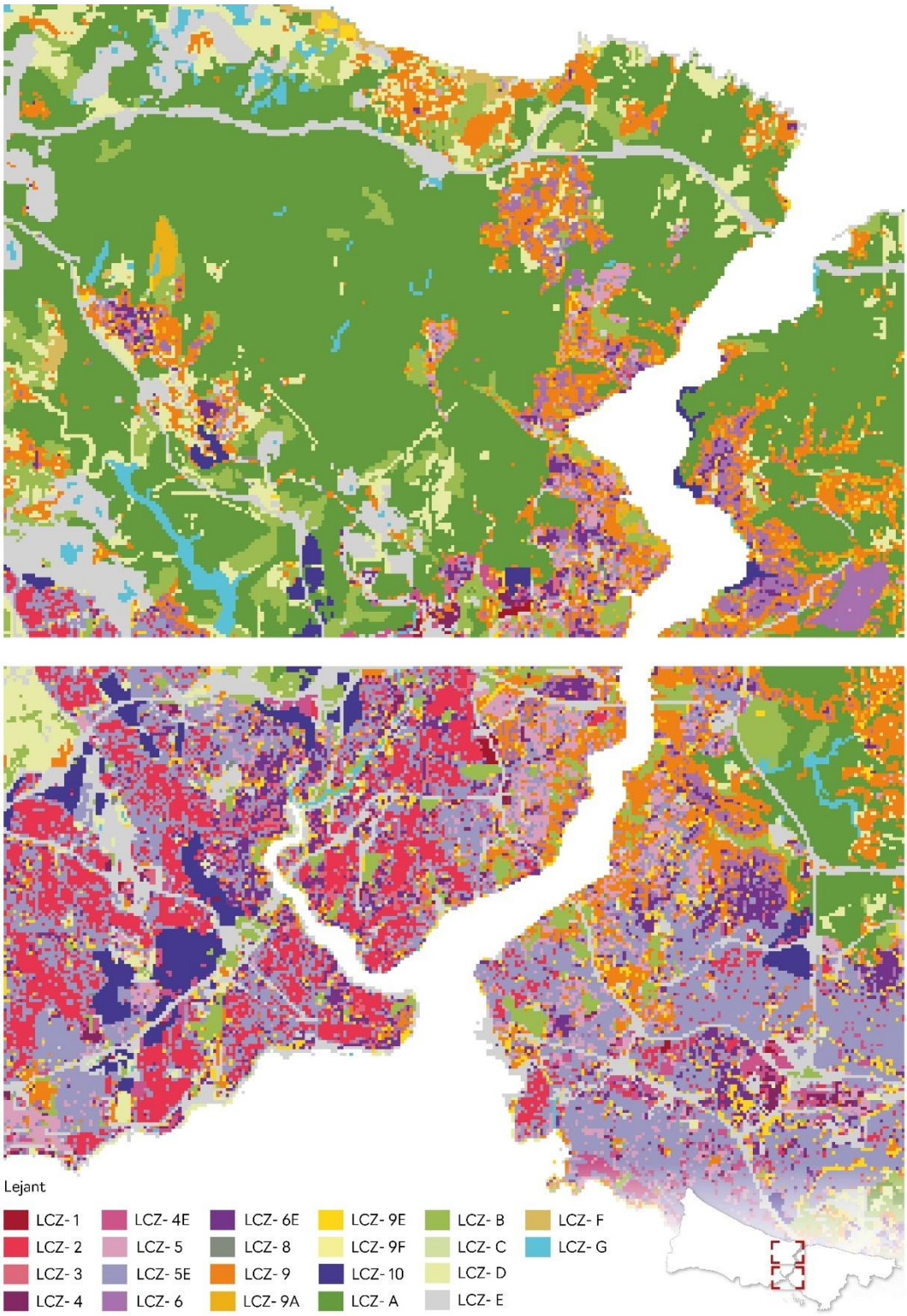


Şekil 4.4 İstanbul'da yerel iklim bölgeleri mekansal dağılımı, Arnavutköy (a), Beylikdüzü (b), Bağcılar-Bahçelievler (c), Fatih-Beyoğlu (d), Sarıyer-Beykoz Boğaz Hattı (e), Ataşehir (f), Sancaktepe (g), Pendik (h)

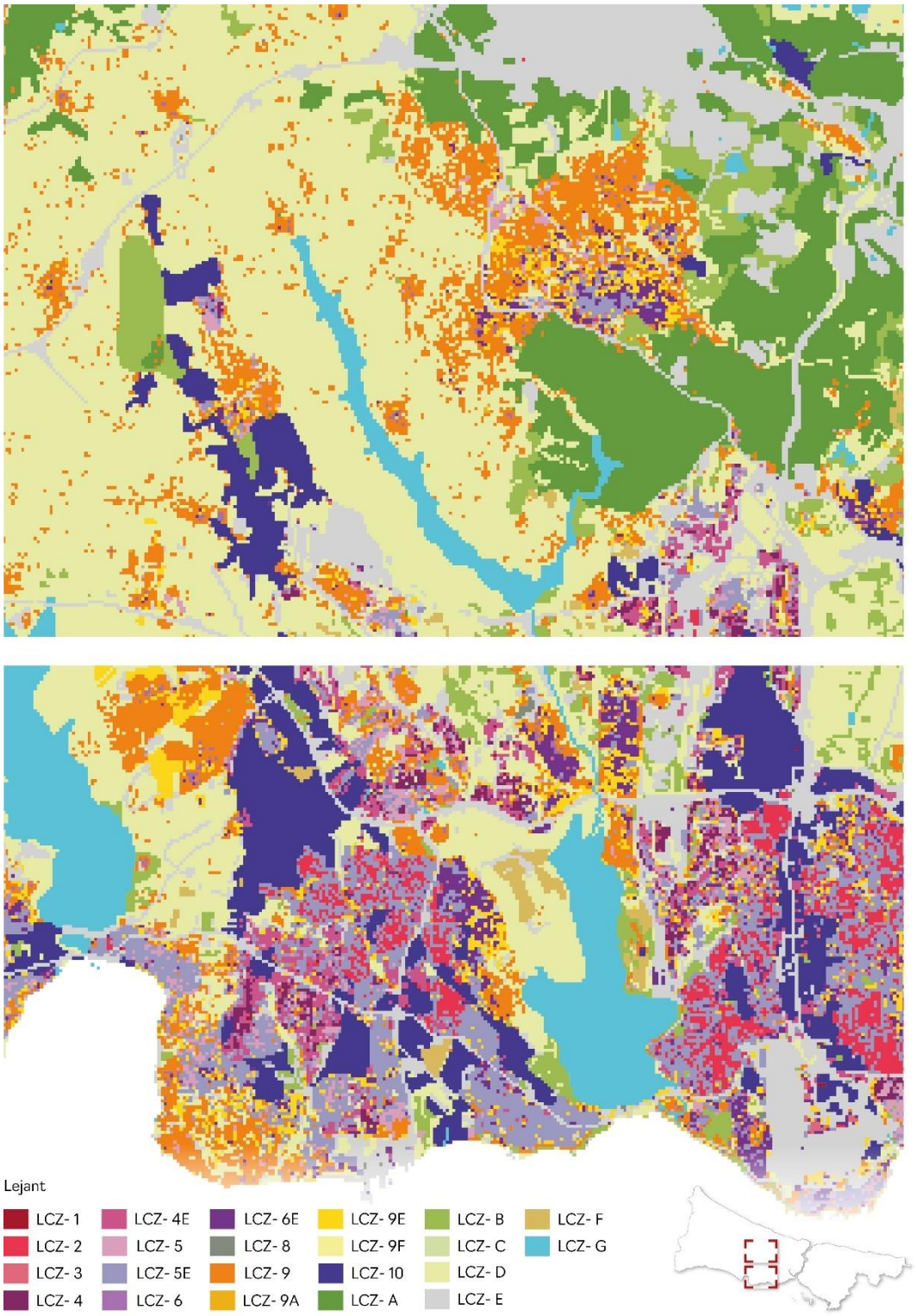
Tablo 4.3 İstanbul'da yerel iklim bölgelerinin alansal dağılımı

LCZ Tipolojileri	**Toplam Karolaj Sayısı** ***(adet)***	**Alan Büyüklüğü** ***(ha)***	**Oransal Dağılımı** ***(%)***
LCZ 1	206	167	0.03
LCZ 2	7,475	6,055	1.11
LCZ 3	953	772	0.14
LCZ 4	1,491	1,208	0.22
LCZ 4E	3,841	3,111	0.57
LCZ 5	5,934	4,807	0.88
LCZ 5E	26,986	21,859	4.01
LCZ 6	4,541	3,678	0.67
LCZ 6E	9,423	7,633	1.40
LCZ 8	192	156	0.03
LCZ 9	52,817	42,782	7.85
LCZ 9A	2,216	1,795	0.33
LCZ 9E	10,302	8,345	1.53
LCZ 9F	27	22	0.00*
LCZ 10	16,697	13,525	2.48
LCZ A	257,289	208,404	38.24
LCZ B	41,624	33,715	6.19
LCZ C	173	140	0.03
LCZ D	166,086	134,530	24.68
LCZ E	43,849	35,518	6.52
LCZ F	3,348	2,712	0.50
LCZ G	17,441	14,127	2.59
TOPLAM	**672,911**	**545,058**	**100.00**

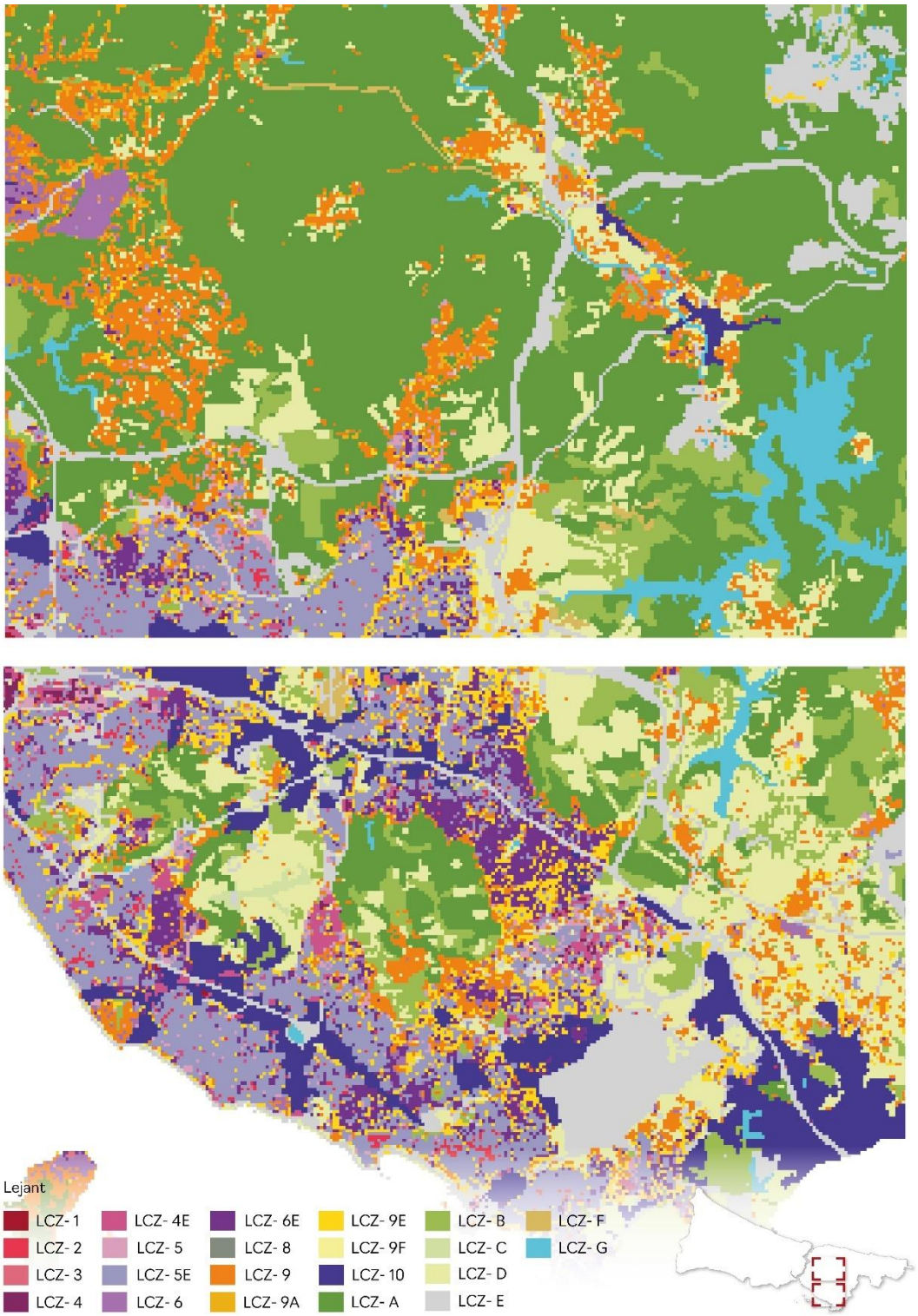
**%0,004 oranında bulunmaktadır.*



Şekil 4.5 İstanbul kent merkezi ve boğaz hattı yerel iklim bölgeleri



Şekil 4.6 İstanbul Avrupa Yakası Küçükçekmece Gölü ve Sazlıdere Barajı yerel iklim bölgeleri



Şekil 4.7 İstanbul Anadolu Yakası Ömerli Barajı ve Çevresi yerel iklim bölgeleri

İstanbul'da kentsel dokunun yoğunlaştığı güney bölgelerde LCZ tipolojilerinin dağılımı bakımından daha heterojen bir mekânsal yapı ortaya çıkmıştır (Şekil 4.4 4.5). Özellikle merkezi iş alanlarının ve yüksek yapı yoğunluğunun bulunduğu Maslak (Sarıyer), Esentepe (Şişli), Levent, Gayrettepe (Beşiktaş), Ünalan (Üsküdar), Site, Finanskent (Ümraniye) mahallelerinde LCZ 1 tipolojisinin yoğunlaştığı dikkat çekmektedir. Bu bölgeler, çok katlı ofis kulelerinin, rezidansların ve ticaret merkezlerinin bir arada bulunduğu, dar sokak aralıkları ve yüksek yapı bloklarıyla karakterize olmuş alanlardır (Şekil 4.5) (Şekil 4.8).

Kompakt ve orta katlı binaların egemen olduğu LCZ 2 tipolojisi, kent genelinde %1.11'lik bir alan kaplamaktadır. Bu alanlar, yüksek yapı yoğunluğu, düşük yeşil alan oranı ve yüksek geçirimsiz yüzey oranı ile karakterize edilmektedir (Şekil 4.8). Genellikle merkezi iş alanları ile bu alanlara erişimin kolay olduğu yüksek yoğunluklu konut bölgelerinde kümelendiği söylenebilmektedir. Avrupa Yakası'nda Kağıthane ilçesinden Yeşilçe, Sultan Selim, Çağlayan, Şirintepe, Harmantepe, Telsizler, Hürriyet Gültepe, Çeliktepe, Emniyetevler, Ortabayır; Şişli ilçesinden Gülbahar, Mecidiyeköy, Merkez, Meşrutiyet, Halaskargazi, Bozkurt, Eskişehir, Feriköy, Duatepe Mahmut Şevket Paşa; Beşiktaş ilçesinden Muradiye, Türkali; Beyoğlu ilçesinden Emekyemez, Asmalımescit, Piyalepaşa, Fetihtepe, Kadı Mehmet Efendi, Küçük Piyale, Çukur, Kalyoncu Kulluğu, Yahya Kahya, Hüseyinağa, Şehit Muhtar, Cihangir, Katipmustafa Çelebi, Kuloğlu, Kemankeş Karamustafapaşa; Gaziosmanpaşa ilçesinden Merkez, Şemsipaşa, Hürriyet, Barbaros Hayrettin Paşa, Karadeniz; Sultangazi ilçesinden Malkoçoğlu, İsmetpaşa, Sultançiftliği, 50.Yıl; Bayrampaşa ilçesinden Kartaltepe, Muratpaşa, Ortahamahalle, Vatan, Terazidere, Altıntepsi; Güngören ilçesinden Mareşal Çakmak, Akıncılar, Haznedar; Bahçelievler ilçesinden Soğanlı, Siyavuspaşa, Şirinevler, Hürriyet, Zafer, Fevzi Çakmak; Bağcılar ilçesinden Yüzüncü Yıl, Fatih, Kemalpaşa, Çınar, Yıldıztepe; Küçükçekmece ilçesinden Mehmet Akif, Atatürk, Söğütlü Çeşme, Kanarya, Fevzi Çakmak, Sultan Murat, Yeni Mahalle, Yeşilova, Gültepe Kemalpaşa; Esenyurt ilçesinden Saadetdere, Namık Kemal, İncirtepe, Yenikent, Üçevler, Fatih, Şehitler, Talatpaşa, Osmangazi; Bakırköy ilçesinden Cevizlik, Zeytinlik, Yenimahalle; Zeytinburnu ilçesinden Sümer, Nuripaşa, Yenidoğan, Gökalp, Yeşiltepe, Veliefendi, Çırpıcı, Telsiz, Beştelsiz mahalleleri; Anadolu Yakası'nda ise Kadıköy'e bağlı Caferağa, Osmanağa ve Rasimpaşa

mahalleleri öne çıkmaktadır. Buna ek olarak Fatih ve Esenler ilçe genelinde de LCZ 2 tipolojisi yoğun olarak görülmektedir.

LCZ 3 tipolojisi, kompakt ve az katlı yapılaşma düzenine sahip olup, İstanbul genelinde tanımlanan yerel iklim bölgelerinin yalnızca %0.14'ünü oluşturmaktadır. Bu tipoloji, kentin erken sanayileşme sürecine paralel olarak gelişim göstermiş, organik kent dokusunun hâkim olduğu yerleşim alanlarında yoğunlaşmaktadır (Şekil 4.8). Özellikle Kuştepe (Şişli); Bülbül, Yenişehir, Keçecipiri (Beyoğlu) ve Silahtarağa (Eyüpsultan) mahallerinde bu tipolojinin belirgin örnekleri yoğun olarak gözlemlenmektedir. Söz konusu bu mahalleler, dar sokak geometrisi, yetersiz açık ve yeşil alan oranı ve yüksek bina yoğunluğu gibi mekânsal özellikler bakımından öncelikli müdahale alanı olarak değerlendirilebilmektedir.

LCZ 4 ve LCZ 4E tipolojileri, açık ve çok katlı yapılaşma düzeninin görüldüğü kentsel dokulara karşılık gelmektedir. Her iki tipolojide de binalar arasında belirli düzeyde açıklıkların bulunması benzer olsa da LCZ 4E tipolojisi yüksek oranda sert ve geçirimsiz yüzey oranına sahip olması bakımından LCZ 4'ten ayrışmaktadır. LCZ 4 ve LCZ 4E, tipolojileri sırasıyla İstanbul genelinin %0.22'sini ve %0.57'sini oluşturmaktadır. Bu tipolojiler, özellikle planlı konut alanları, kentsel gelişme alanları ve kentsel dönüşüm sürecinden geçmiş toplu konut uygulamaları ile karakterize edilen bölgelerde yoğunlaşmaktadır. Genellikle kapalı site yerleşmeleri ve çok katlı apartman blokları bu alanların morfolojik yapısını oluşturmaktadır (Şekil 4.8). Bu tipolojilere ait en belirgin örnekler Avrupa Yakası'nda, Sarıyer ilçesine bağlı Maslak ve Huzur; Kağıthane ilçesine bağlı Hamidiye; Küçükçekmece ilçesine bağlı Atakent ve İstasyon; Başakşehir ilçesine bağlı Başak, Kayabaşı, Başakşehir, Bahçeşehir 2.Kısım; Eyüpsultan ilçesine bağlı Güzeltepe; Avcılar ilçesine bağlı Tahtakale; Beylikdüzü ilçesine bağlı Adnan Kahveci, Cumhuriyet, Büyükşehir, Barış; Esenyurt ilçesine bağlı Mevlana, Cumhuriyet, Gökevler, Barbaros Hayrettin Paşa, Zafer, Koza; Anadolu Yakası'nda ise Ümraniye ilçesine bağlı Site; Ataşehir ilçesine bağlı Barbaros, Atatürk; Kadıköy ilçesine bağlı Fenerbahçe, Caddebostan; Maltepe ilçesine bağlı Altayçeşme, Girne, Zümrütevler; Kartal ilçesine bağlı Uğur Mumcu ve Pendik ilçesine bağlı Yenişehir mahallelerinde görülmektedir.

LCZ 5 ve LCZ 5E tipolojileri, açık orta katlı yapılaşmanın hâkim olduğu kentsel dokulara karşılık gelmektedir. Her iki tipoloji de benzer yapılaşma düzenine sahip

olmakla birlikte, LCZ 5E tipolojisi, sert ve geçirimsiz yüzey oranının daha yüksek olması bakımından ayrışmaktadır. LCZ 5 ve LCZ 5E tipolojileri sırasıyla kent genelinin %0.88 ve %4.01'ini oluşturmaktadır. LCZ 5 tipolojisi, genellikle planlı kentleşme sürecinin gerçekleştiği ve yüksek gelir gruplarına hitap eden konut alanları içerisinde gözlemlenmektedir (Şekil 4.9). Bu doğrultuda, söz konusu tipoloji genel olarak Beşiktaş ilçesine bağlı, Etiler, Konaklar, Nisbetiye, Levazım; Sarıyer ilçesine bağlı Darüşşafaka ve Zekeriyaköy; Güngören ilçesine bağlı Tozkoparan; Bakırköy ilçesine bağlı Ataköy (tüm etaplar) ve Üsküdar ilçesine bağlı Küçüksu ve Bahçelievler mahallelerinde belirgin bir şekilde gözlemlenmektedir.

Öte yandan LCZ 5E tipolojisi ise çok aileli apartmanların yoğun olarak bulunduğu, kısmen planlı gelişim gösteren ve kısıtlı açık yeşil alan oranına sahip yerleşim alanlarında gözlemlenmektedir. Bu tipolojiye ait örnekler, Anadolu Yakası'nda Beykoz ilçesine bağlı Kavacık; Üsküdar ilçesine bağlı Ferah, Küplüce, Cumhuriyet, Bulgurlu, Küplüce, Acıbadem, İcadiye, Selam Ali, Muratreis, Ahmediye, Mimar Sinan, Aziz Mahmut Hüdayi; Tuzla ilçesine bağlı Evliya Çelebi, Aydınlı, Yayla; Pendik ilçesine bağlı Fatih Orhangazi, Güzelyalı, Kavakpınar, Çamçeşme, Kaynarca, Doğu, Batı, Esenler, Çınardere; Kartal ilçesine bağlı Atalar, Petrol İş, Karlıktepe, Yukarı, Hürriyet, Cumhuriyet, Yalı, Çavuşoğlu, Orhantepe; Maltepe ilçesine bağlı Altıntepe, Küçükyalı Merkez, Çınar, İdealtepe, Feyzullah, Altayçeşme, Bağlarbaşı, Zümrütevler, Fındıklı; Ataşehir ilçesine bağlı İnönü, Kayışdağı, İçerenköy, Küçükbakkalköy, Mevlana, Örnek; Ümraniye ilçesine bağlı Atatürk, Namık Kemal, Esenevler, İstiklal, Atakent, Armağanevler, Çakmak, Çamlık, Tatlısu, Tepeüstü, Altınşehir, Mehmet Akif, Şerifali, Yukarı Dudullu, Parseller, Huzur, Necip Fazıl, Madenler; Sancaktepe ilçesine bağlı Meclis, İnönü, Atatürk, Sarıgazi, Kemal Türkler, Yenidoğan, Safa, Yunus Emre; Çekmeköy ilçesine bağlı Mimar Sinan, Mehmet Akif, Hamidiye, Çamlık, Kirazlıdere, Aydınlar, Soğukpınar, Cumhuriyet, Güngören, Sultançiftliği; Sultanbeyli ilçesine bağlı Adil, Turgut Reis; Avrupa Yakası'nda ise Beşiktaş ilçesine bağlı Gayrettepe, Dikilitaş, Abbasağa, Cihannüma; Şişli ilçesine bağlı Mecidiyeköy, Gülbahar, Fulya, Halide Edip Adıvar; Düğmeciler, Yeşilpınar, Eyüpsultan ilçesine bağlı Akşemsettin, Çırçır; Sultangazi ilçesine bağlı Gazi, Yunus Emre, 75. Yıl; Uğur Mumcu; Gaziosmanpaşa ilçesine bağlı Mevlana, Karayolları, Kazım Karabekir; Bayrampaşa ilçesine bağlı Yıldırım, Kartaltepe, Kocatepe; Fatih; Bakırköy ilçesine

bağlı Osmaniye, Zuhurutbaba, Kartaltepe; Güngören ilçesine bağlı Abdurrahman Nafiz Gürman, Güneştepe, Gençosman; Bahçelievler ilçesine bağlı Bahçelievler, Koca Sinan; Küçükçekmece ilçesine bağlı Halkalı, İnönü, Tevfikbey, Cennet, Cumhuriyet; Avcılar ilçesine bağlı Mustafa Kemalpaşa, Cihangir, Ambarlı, Merkez, Denizköşkler, Gümüşpala; Beylikdüzü ilçesine bağlı Yakuplu, Kavaklı, Adnan Kahveci; Büyükçekmece ilçesine bağlı Atatürk, Fatih, Dizdariye, Ekinoba; Arnavutköy ilçesine bağlı Anadolu mahallelerinde ve ayrıca Esenyurt, Bağcılar ve Kadıköy ilçeleri genelinde yoğun biçimde yer almaktadır.

LCZ 6 ve LCZ 6E tipolojileri, İstanbul'un düşük yoğunluklu konut alanlarını temsil etmektedir. Açık ve az katlı yapılaşma düzenine sahip olan bu tipolojiler, çoğunlukla ayrık nizamda yerleşmiş müstakil yapılardan oluşmaktadır (Şekil 4.9). Tanımlanan yerel iklim bölgeleri içerisinde, LCZ 6 tipolojisi İstanbul genelinin %0.67'sini, LCZ 6E tipolojisi ise %1.40'ını oluşturmaktadır. LCZ 6 tipolojisine ait özgün örnekler; Beykoz ilçesine bağlı Acarlar, Gümüşsuyu, Yeni Mahalle, Çubuklu, Çiğdem, İncirköy, Soğuksu, Ortaçeşme ve Tokatköy; Ümraniye ilçesine bağlı Topağacı ve Dumlupınar; Beşiktaş ilçesine bağlı Levent; Sarıyer ilçesine bağlı Kazım Karabekir, Kocataş, Zekeriyaköy, Uskumruköy ve Çamlıtepe mahalleleri ile Adalar ilçesinde gözlemlenmektedir.

LCZ 6E tipolojisi ise İstanbul'da plansız ve düzensiz kentleşme dinamiklerinin hâkim olduğu ve çoğunlukla gecekondu tipi yerleşim dokularının görüldüğü bölgelerde yoğun olarak gözlemlenmektedir. Bu bölgelerde yer alan yapılar, genellikle az katlı ve dağınık yapılaşma düzenine sahip olup, mühendislik hizmetinden yoksundur. LCZ 6E tipolojisine ait özgün örnekler; Sarıyer ilçesine bağlı Cumhuriyet, Ferahevler, Fatih Sultan Mehmet, Pınar, Reşitpaşa, Ayazağa; Eyüpsultan ilçesine bağlı Göktürk, Nişancı, İslambey, Sakarya, Karadolap, Esentepe; Bakırköy ilçesine bağlı Şenlikköy; Avcılar ilçesine bağlı Yeşilkent; Başakşehir ilçesine bağı Şahintepe, Güvercintepe, Altınşehir; Arnavutköy ilçesine bağlı Yunus Emre, Atatürk; Sultangazi ilçesine bağlı Eski Habipler; Fatih ilçesine bağlı Molla Hüsrev, Sultan Ahmet, Küçük Ayasofya, Hoca Gıyasettin, Cibali, Ayvansaray, Aksaray; Üsküdar ilçesine bağlı Yavuztürk; Ümraniye ilçesine bağlı Elmalıkent, Kazım Karabekir, Cemil Meriç, Adem Yavuz; Ataşehir ilçesine bağlı Yenisahra, Yeni Çamlıca, Esatpaşa; Maltepe ilçesine bağlı Gülensu, Gülsuyu, Esenkent; Çekmeköy ilçesine bağlı Ekşioğlu; Sultanbeyli ilçesine bağlı Hamidiye,

Yavuzselim, Fatih, Mehmet Akif, Abdurrahmangazi, Hasanpaşa, Ahmet Yesevi, Mecidiye Turgut Reis; Pendik ilçesine bağlı Sapan Bağları, Yeni, Bahçelievler, Orta, Kavakpınar, Ertuğrul Gazi, Sülüntepe ve Tuzla ilçesine bağlı Mimar Sinan ve Şifa mahallelerinde yer almaktadır.

LCZ 9 ve buna bağlı alt tipolojiler (LCZ 9A, LCZ 9E ve LCZ 9F), İstanbul'un yarı kırsal karaktere sahip olan yerleşim bölgelerini temsil etmektedir. Bu bölgeler, az katlı ve seyrek yapılaşma dokusuna sahip olup kentsel ve kırsal alanlar arasında geçiş özelliği taşımaktadır. Kentleşme baskının henüz yoğunlaşmadığı bu bölgeler, doğal örtünün korunabildiği ve düşük yoğunluklu yerleşim bölgeleri olarak öne çıkmaktadır (Şekil 4.10). İstanbul genelinde tanımlanan LCZ tipolojileri arasından en yüksek orana sahip olan LCZ 9 tipolojisi, İstanbul'un yüzey alanının yaklaşık %7.85'ini oluşturmaktadır. Bu tipoloji, başta Silivri, Çatalca, Arnavutköy, Büyükçekmece, Şile, Adalar olmak üzere; Beylikdüzü'nün güneydoğusu, Eyüpsultan'ın kuzeyi, Sarıyer'in kuzeyi, Beykoz'un kuzeyi ile Pendik, Tuzla, Çekmeköy ve Sultangazi ilçelerinin kuzey kesimlerinde yayılım göstermektedir. LCZ 9A tipolojisi yoğun ağaçlık alanlarla birlikte bulunan yerleşim alanlarını temsil etmekte olup, kent genelinin %0.33'ünü oluşturmaktadır. Genel olarak, Eyüpsultan ilçesine bağlı Göktürk ve Beykoz ilçesine bağlı Elmalı ve Örnekköy mahallelerinde yoğunlaşmaktadır. Sert ve geçirimsiz yüzeylerin baskın olduğu LCZ 9E tipolojisi, kent genelinin %1.53'ünü kapsamakta ve özellikle Başakşehir ilçesine bağlı Altınşehir; Büyükçekmece ilçesine bağlı Alkent 2000 ve Karaağaç; Sultanbeyli ilçesine bağlı Necip Fazıl, Orhan Gazi ve Mimar Sinan mahallelerinde ve ayrıca Arnavutköy ilçe genelinde gözlemlenmektedir. Kumlu yüzeylerin baskın olduğu LCZ 9F tipolojisi ise kentin Karadeniz'e kıyısı olan sahil kesimlerinde sınırlı bir yayılım göstermektedir.

LCZ 10 tipolojisi, kentin ekonomik yapısında önemli bir yere sahip olan endüstriyel alanları temsil etmektedir. Bu tipoloji, kent genelindeki dağılımın %2.48'ini oluşturmaktadır. Genel olarak az katlı, geniş hacimli ve yüksek geçirimsiz yüzey oranıyla karakterize edilen bu alanlar (Şekil 4.11), üretim ve lojistik faaliyetlerinin yoğunlaştığı, D-100 Karayolu, Anadolu Otoyolu, Ankara Caddesi, Büyükdere Caddesi (Maslak), Hasdal-Kemerburgaz Yolu, Rami Kışla Caddesi, Avrupa Otoyolu, Mahmutbey-Atatürk Havalimanı Bağlantı Yolu, Kuzey Çevre Otoyolu, Hadımköy Yolu ve İstanbul Çevre Yolu gibi ana ulaşım aksları ve çevresinde

kümelenmiştir. LCZ 10 tipolojisine ait örnekler; Arnavutköy ilçesine bağlı Ömerli, Hadımköy, Hastane; Esenyurt ilçesne bağlı Akçaburgaz, Orhangazi, Osmangazi, Atatürk, Zafer; Başakşehir ilçesine bağlı Ziyagökalp, Kayabaşı; Beylikdüzü ilçesine bağlı Yakuplu; Avcılar ilçesine bağlı Cihangir, Üniversite; Esenler ilçesine bağlı Oruçreis; Bağcılar ilçesine bağlı Mahmutbey, Evren, Bağlar; Bahçelievler ilçesine bağlı Yenibosna, Çobançeşme; Güngören ilçesine bağlı Mehmet Nesih Özmen, Sanayi; Zeytinburnu ilçesine bağlı Maltepe, Seyit Nizam; Eyüpsultan ilçesine bağlı Topçular; Ümraniye ilçesine bağlı Saray, Yamanevler, Esenkent, Esenşehir; Sancaktepe ilçesine bağlı Eyüpsultan; Kartal ilçesine bağlı Cevizli, Esentepe, Orta, Soğanlık Yeni, Çavuşoğlu, Yunus, Cumhuriyet; Pendik ilçesine bağlı Ramazanoğlu ve Tuzla ilçesine bağlı Fatih, Orhanlı, Orta, Aydınlı, Tepeören, Anadolu, İstasyon, Yayla, Postane ve Şifa mahallelerinde yoğun olarak gözlemlenmektedir.

Kentin kuzeyindeki LCZ tipolojilerinin mekânsal dağılımı incelendiğinde, ormanlık alanlar, su havzaları, tarım alanları ve Karadeniz kıyısı boyunca uzanan kumul alanlar gibi doğal arazi örtüsünün bulunması, bu bölgelerde LCZ A, LCZ B, LCZ D, LCZ G ve LCZ F tipolojilerinin ağırlıklı olarak görülmesine yol açmıştır (Şekil 4.12). Aynı zamanda, Karadeniz kıyısı boyunca bulunan maden sahaları, İstanbul Havalimanı ve Kuzey Marmara Otoyolu gibi uygulanmış büyük ölçekli kentsel projeler LCZ E tipolojisinin kentin kuzey kesiminde belirgin bir şekilde yoğunlaşmasına neden olmuştur.

LCZ 1 (Kompakt Çok Katlı)



LCZ 2 (Kompakt Orta Katlı)



LCZ 3 (Kompakt Az Katlı)



LCZ 4 (Açık Çok Katlı)



Şekil 4.8 LCZ 1, LCZ 2, LCZ 3, ve LCZ 4 tipolojileri örnek kent dokusu

LCZ 4E (Açık Çok Katlı-Sert Yüzey)



LCZ 5 (Açık Orta Katlı)



LCZ 5E (Açık Orta Katlı-Sert Yüzey)



LCZ 6 (Açık Az Katlı)



Şekil 4.9 LCZ 4E, LCZ 5, LCZ 5E, ve LCZ 6 tipolojileri örnek kent dokusu

LCZ 6E (Açık Az Katlı-Sert Yüzey)



LCZ 8 (Geniş Hacimli Az Katlı)



LCZ 9 (Seyrek Az Katlı)



LCZ 9A (Seyrek Az Katlı-Yoğun Ağaçlık)



Şekil 4.10 LCZ 6E, LCZ 8, LCZ 9, ve LCZ 9A tipolojileri örnek kent dokusu

LCZ 9E (Seyrek Az Katlı-Sert Yüzey)



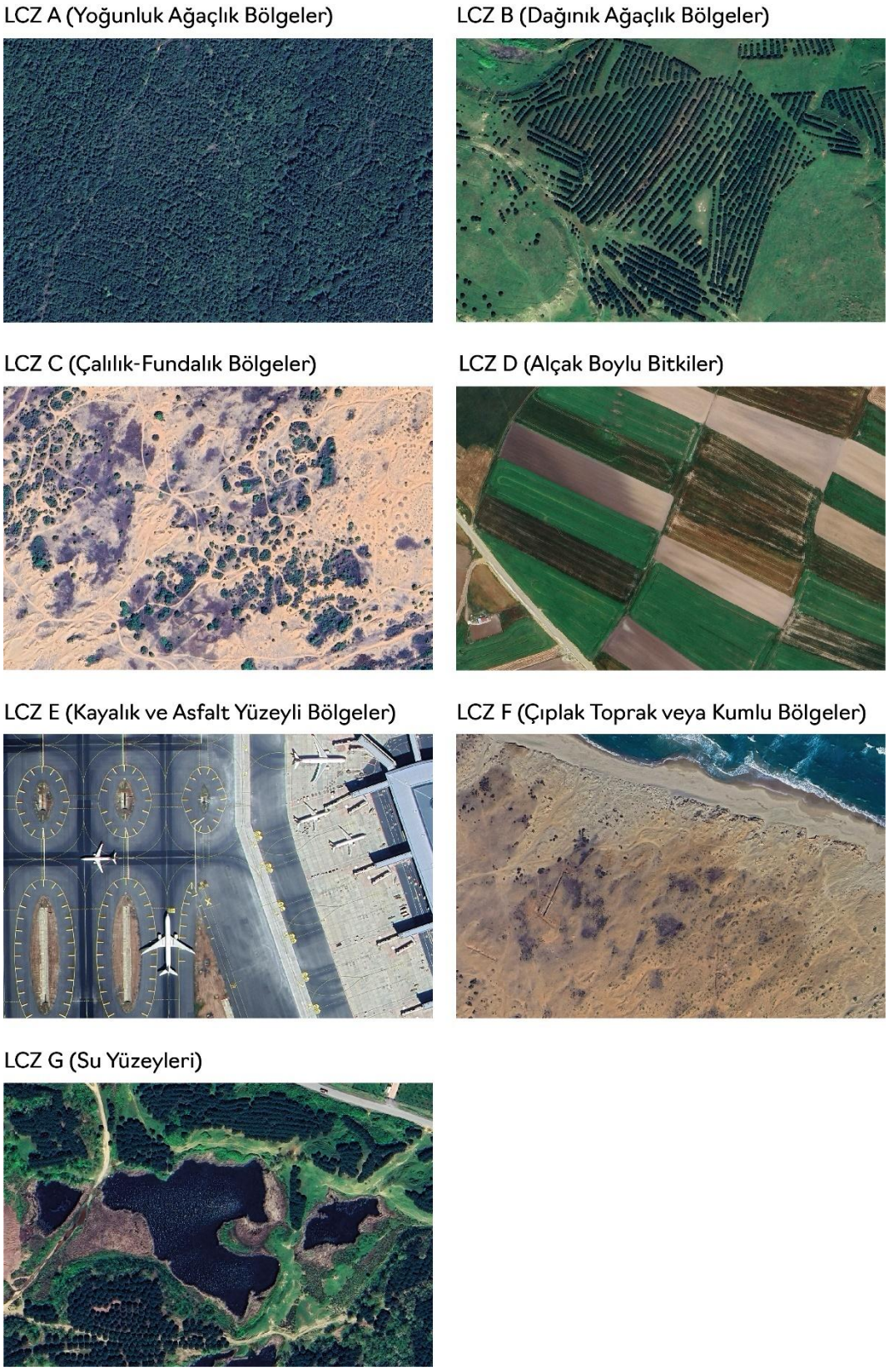
LCZ 9F (Seyrek Az Katlı-Toprak/Kum Yüzey)



LCZ 10 (Endüstriyel Bölgeler)



Şekil 4.11 LCZ 9E, LCZ 9F ve LCZ 10 tipolojileri örnek kent dokusu

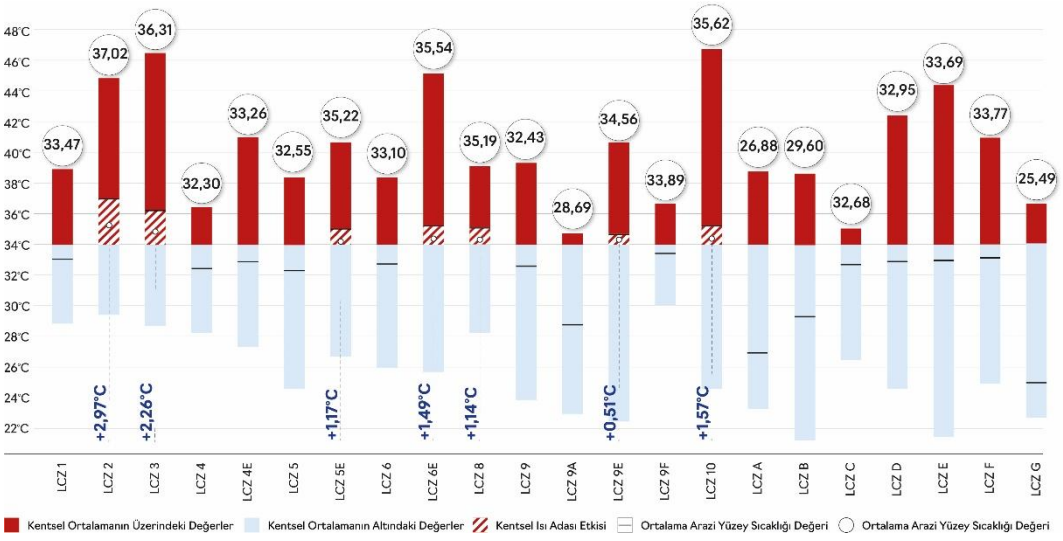


Şekil 4.12 Arazi örtüsü tipolojilerine ait örnek dokular

4.4 İstanbul Yerel İklim Bölgelerindeki Isı Adası Yoğunluğu

İstanbul yerel iklim bölgelerine ait kentsel sıcaklık değerleri incelendiğinde, mekânsal morfoloji tipolojilerine bağlı yerel iklim bölgelerinin ortalaması 33.93°C iken arazi örtüsüne tipolojilerine bağlı yerel iklim bölgelerinin ortalaması ise 30.72°C'dir. En yüksek ortalama kentsel sıcaklıklar 35.6°C ile kompakt kent formuna sahip LCZ tipolojilerinde görülürken, bu değer açık kent formuna sahip LCZ tipolojilerinde 33.6°C, seyrek kent formuna sahip LCZ tipolojilerinde ise 32.4°C'dir.

Elde edilen bulgularda, tespit edilen 22 farklı LCZ tipolojisinden yalnızca 7 tanesinde sıcaklık anomalisinin gözlemlendiği ortaya koyulmuştur. Söz konusu bu tipolojiler: LCZ 2, LCZ 3, LCZ 5E, LCZ 6E, LCZ 8, LCZ 9E ve LCZ 10'dur. Bu tipolojilere ait sıcaklık anomalisi değerleri (+2.97°C) ile (-8.56°C) aralığında değişim göstermektedir. En yüksek sıcaklık anomali etkisi +2.97 °C (güçlü etki) ile kompakt ve orta katlı mekânsal morfoloji özelliğine sahip LCZ 2 tipolojisinde kaydedilmiş olup bu bölgedeki maksimum kentsel sıcaklık değeri 44.59°C'ye ulaşmıştır. En düşük sıcaklık anomalisi ise +1.14°C (sınırlı etki) ile geniş hacimli ve alçak katlı mekânsal morfolojik yapıya sahip LCZ 8 tipolojisinde görülürken bu bölgedeki maksimum kentsel sıcaklık değeri ise 36.69°C'ye kadar ulaşmıştır (Şekil 4.13) (Tablo 4.4).



Şekil 4.13 Yerel iklim bölgelerindeki kentsel ısı adası yoğunluğu

Yerel iklim bölgelerindeki kentsel sıcaklık değerlerinin, yapılaşmanın yoğunlaştığı alanlarda belirgin bir şekilde yükseldiği, buna karşılık su yüzeyi veya ormanlık alan

gibi doğal alanların yoğunlaştığı bölgelerde ise ısı yutağı etkisi sebebiyle sıcaklıkların önemli ölçüde düştüğü ortaya koyulmuştur.

Tablo 4.4 İstanbul yerel iklim bölgelerine ait kentsel sıcaklık değerleri

LCZ Tipolojileri	**Ortalama Kentsel Sıcaklık Değeri (°C)**	**Maksimum Kentsel Sıcaklık Değeri (°C)**	**Minimum Kentsel Sıcaklık Değeri (°C)**	**Kentsel Sıcaklık Anomalisi (°C)**
LCZ 1	33.47	39.38	28.95	-0.57
LCZ 2	37.02	44.59	29.59	+2.97
LCZ 3	36.31	46.63	28.33	+2.26
LCZ 4	32.30	36.44	28.15	-1.75
LCZ 4E	33.26	41.68	27.72	-0.79
LCZ 5	32.55	38.44	24.37	-1.50
LCZ 5E	35.22	41.00	26.71	+1.17
LCZ 6	33.10	38.54	25.95	-0.95
LCZ 6E	35.54	44.88	25.89	+1.49
LCZ 8	35.19	39.51	28.13	+1.14
LCZ 9	32.43	39.87	23.61	-1.62
LCZ 9A	28.69	34.71	22.88	-5.36
LCZ 9E	34.56	41.48	22.35	+0.51
LCZ 9F	33.89	36.59	30.06	-0.19
LCZ 10	35.62	46.78	24.29	+1.57
LCZ A	26.88	39.25	22.97	-7.17
LCZ B	29.60	38.78	21.53	-4.45
LCZ C	32.68	34.93	26.54	-1.37
LCZ D	32.95	42.55	24.40	-1.10
LCZ E	33.69	44.30	21.73	-0.36
LCZ F	33.77	41.38	24.92	-0.28
LCZ G	25.49	36.69	22.63	-8.56

İstanbul genelinde belirlenen yerel iklim bölgeleri incelendiğinde, mekânsal morfoloji tipolojilerine ait yerel iklim bölgelerinin (LCZ 1-10) arazi örtüsü tipolojilerine ait yerel iklim bölgelerine kıyasla daha yüksek kentsel sıcaklık değerleri sergilediği ortaya koyulmuştur. Bu farklılığın temel sebebi, benzer sonuçlara rastlanan diğer çalışmalarda, mekânsal morfoloji tipolojilerine ait yerel iklim bölgelerinde beton ve asfalt gibi ısı emme kapasitesi yüksek malzemelerin, arazi örtüsü tipolojilerine ait yerel iklim bölgelerinde ise geçirgen yüzeylerin baskın olmasıyla açıklanmaktadır. Sert ve geçirimsiz yüzeylerin doğal yüzeylere oranla ısı emme ve yayma kapasitesinin yüksek olması kentsel alanlardaki ısı transferini arttırarak sıcaklıkların yükselmesine neden olmaktadır (Chen vd., 2020; C. Wang vd., 2024b; Zhao, 2018).

Mekânsal morfoloji ve arazi örtüsü tipolojilerinde görülen bu farklılaşma LCZ C, LCZ D, LCZ E ve LCZ F gruplarında değişkenlik göstermektedir. Arazi örtüsü tipolojilerine ait bu dört bölge sırasıyla; 32.68°C, 32.95°C, 33.69°C ve 33.77°C kentsel sıcaklık değerlerine sahiptir. Bu tipolojiler, kentsel ortalama sıcaklık (34.05 °C) değerinden daha düşük sıcaklıklara sahipken bazı yapılaşmış bölgelerden ise daha yüksek sıcaklıklara sahiptir. Azmi vd.,'nin (2021) yaptığı bir çalışmada yaz aylarında kırsal karaktere sahip alanlarda kentsel karaktere sahip alanlara göre daha yüksek kentsel sıcaklık değerlerinin gözlemlendiğini vurgulamıştır. Bu durumun temel nedenini ise özellikle yaz aylarında bu bölgelerdeki bitki örtüsü yoğunluğunun düşük olması nedeniyle yoğun ısı birikimleri gerçekleşmekte ve orta düzeyde bitki örtüsüne sahip kentsel dokulara kıyasla daha yüksek SUHI etkisi göstermektedir (Azmi vd., 2021). Özellikle mevsimsel değişikliklerden etkilenen LCZ D gibi bölgeler ilkbahar ile başlayan büyüme mevsimlerinde daha düşük kentsel sıcaklık değerlerine sahipken yaz ayları ile başlayan hasat mevsimi sonunda ise çıplak toprak özelliği göstermesinden dolayı güçlü radyasyon emilimi gerçekleştirmekte daha yüksek sıcaklık değerleri gözlemlenmektedir. Bu nedenle arazi örtüsüne ait LCZ tipolojilerinde mevsimsel değişiklerin sıcaklık değerlerini etkileyebileceği dikkate alınmalıdır (Geletič vd., 2016).

Mekânsal morfoloji tipolojilerine ait yerel iklim bölgeleri arasında kompakt yerleşim özelliği gösteren LCZ tipolojileri (LCZ 1-3), açık yerleşim özelliği gösteren LCZ tipolojilerine (LCZ 4-6) göre daha yüksek kentsel sıcaklık değerine sahiptir. Bu iki farklı yoğunluk düzeyine sahip kentsel dokularda farklı sıcaklık

değerlerinin görülmesinin temel nedeni, kompakt dokularda açık dokulara oranla daha fazla bina yüzey alanına sahip olmasıdır. Bu durum yüksek yoğunluklu kompakt dokularda birim alan başına yüksek ısı depolama kapasitesinin düşmesine ve daha yüksek sıcaklık değerlerinin görülmesine neden olmaktadır (C. Wang vd., 2024; X. Yang vd., 2017).

Yerel iklim bölgelerine ait kentsel sıcaklık değerleri incelendiğinde, en sıcak LCZ tipolojileri sırasıyla LCZ 2 > LCZ 3 > LCZ 10 > LCZ 6E > LCZ 5E > LCZ 8 olarak belirlenmiştir. LCZ 2, 37.02°C ile en yüksek sıcaklık değerine sahip tipoloji olarak öne çıkmaktadır. Pozitif sıcaklık anomalisi gösteren LCZ 2, ortalama kentsel sıcaklık (34.05°C) değerinden +2.95°C sapma göstererek güçlü SUHI etkisi sergilemekte ve bu durum, kentsel dokuların sıcaklığının artmasına neden olmaktadır. Buna karşın, en düşük kentsel sıcaklık değerine sahip LCZ tipolojileri ise sırasıyla LCZ G < LCZ A < LCZ 9A < LCZ B şeklindedir. LCZ G, 25.49 °C ile en düşük sıcaklık değerine sahip tipolojidir Su yüzeylerinden oluşan bu bölgeler, ortalama kentsel sıcaklık değerinden -8.55°C daha düşük bir değere sahiptir. Bu durum, su yüzeylerinin kentlerdeki yutak alanları oluşturarak kentsel dokularda soğumayı sağlamakta ve SUHI etkisini azaltmaktadır.

LCZ 8 (az katlı geniş yapılı bölgeler) ve LCZ 10 (sanayi alanları) gibi büyük kütleli yapıların olduğu bölgeler, yapısal özelliklerinden dolayı yüksek sıcaklık değerlerine sahiptir. LCZ 8 35.19°C, LCZ 10 ise 35.62°C ile ortalama kentsel sıcaklık değerinin üzerine çıkarak pozitif yönde sıcaklık anomalisi göstermekte ve orta düzeyde SUHI etkisi sergilemektedir. Bu bölgelerde yoğun antropojenik faaliyetlerden dolayı sert ve geçirimsiz yüzey alanları ve yüksek albedoya sahip geniş çatı yüzeyleri baskın olarak bulunmaktadır. Söz konusu bu özellikler, LCZ 8 ve LCZ 10 tipolojilerinde daha fazla güneş radyasyonunun absorbe edilmesine ve daha uzun dalga boyuna sahip güneş radyasyonu yayılımına neden olarak yüksek sıcaklık değerlerinin görülmesine yol açmaktadır (Bartesaghi Koc vd., 2018; Chen vd., 2020; Geletič vd., 2016; Unal Cilek & Cilek, 2021).

Çalışmanın dikkat çekici sonuçlarından biri çok katlı binalarla karakterize edilmiş LCZ 1 ve LCZ 4 tipolojilerinin sıcaklık değerleri, ortalama kentsel sıcaklık değerinden daha düşüktür. Bu bölgelerde, 25 m'yi aşan çok katlı yapıların yoğunlaşmasına rağmen negatif sıcaklık anomalisi göstermekte ve SUHI etkisine rastlanmamaktadır. Yapılan diğer çalışmalarda bu duruma ilişkin benzer sonuçlara

rastlanmış ve bu durumu şöyle açıklamışlardır. Çok katlı binalardan oluşan bu bölgelerde bina yüksekliğine bağlı olarak geniş bir alana yayılan gölgeleme etkisi mevcuttur. Bu etki güneş radyasyonlarının yeryüzü ile olan etkileşimini engellemekte kentsel yüzeylerin ısınmasının önüne geçmektedir (Bartesaghi Koc vd., 2018; Quan, 2019; Quanz vd., 2018; Unal Cilek & Cilek, 2021).

İstanbul genelinde standart LCZ tipolojilerinin yanı sıra alt sınıf LCZ tipolojileri de tespit edilmiştir. Yeni oluşturulan bu alt tipolojiler hem mekânsal morfoloji hem de arazi örtüsü özelliklerinin farklı kombinasyonlarıyla karakterize edilmiştir. Farklı yerel iklim bölgeleri arasında sıcaklık farkı görüldüğü gibi aynı yerel iklim bölgesine ait standart tipolojiler ve yerelleştirilmiş tipolojiler arasında da belirgin sıcaklık farkları görülmektedir (Tablo 4.5). Bu farklara, genellikle açık bitki örtüsüne sahip alanlar ile sert ve geçirimsiz yüzeylerin yoğunlaştığı alanlar arasında rastlanmaktadır. Chen vd.,'nin (2020) yaptığı bir çalışmada da standart tipolojiler ile yerelleştirilmiş tipolojiler arasında anlamlı sıcaklık farklılıklarının görüldüğü tespit edilmiş ve bu durumu şöyle açıklamıştır; bitki örtüsüne sahip alanlarda gölgeleme etkisi nedeniyle gün boyu toprak nemi korunurken geçirimsiz yüzeylerin yoğunlaştığı alanlarda binaların oluşturduğu gölgeleme etkisi yetersiz kalmakta ve daha fazla güneş radyasyonu emilmesine neden olarak daha yüksek sıcaklık değerlerinin görülmesine sebep olmaktadır.

Tablo 4.5 Standart LCZ tipolojileri ve alt LCZ tipolojileri arasındaki sıcaklık farklılıkları

Standart LCZ Tipolojileri	**Ortalama Kentsel Sıcaklık Değeri (°C)**	**Alt LCZ Tipolojileri (°C)**	**Ortalama Kentsel Sıcaklık Değeri (°C)**	**Sıcaklık Farkı (°C)**
LCZ 4	32.30	LCZ 4E	33.26	+0.96
LCZ 5	32.55	LCZ 5E	35.22	+2.67
LCZ 6	33.10	LCZ 6E	35.54	+2.44
LCZ 9	32.43	LCZ 9A	28.69	-3.74
LCZ 9	32.43	LCZ 9E	34.56	+2.13
LCZ 9	32.43	LCZ 9F	33.89	+1.46

4.4.1 Kolmogorov-Smirnov Normallik Testi Sonuçları

Kolmogorov-Smirnov Normallik Testi sonuçlarına göre test istatistiği 0.096 olarak bulunmuş ve bu değer 672,911 serbestlik derecesi (df) ile değerlendirilmiştir. Testin anlamlı farklılık düzeyi 0.001'den daha düşük ($p<0.001$) bir değere sahiptir. Bu durum, LCZ tipolojilerinde kentsel sıcaklık varyasyonlarına ait veri setinin %95 güven aralığında normal dağılım göstermediğini ortaya koymaktadır (Tablo 4.6). Bu durum, LCZ tipoloji çiftlerine ait kentsel sıcaklık varyasyonları arasındaki anlamlı farklılığı yakalayabilmek için Kruskal Wallis H Anlamlılık Testini gerekli hale getirmiştir.

Tablo 4.6 Kolmogorov-Smirnov Normallik Testi sonuçları

Serbestlik Derecesi (df)	Test İstatistiği (Statistic)	Standart Sapma (Std. Dev.)	Anlamlılık Düzeyi (p-değeri)
672,911	0.096	3.986	<.001

Testin betimleyici özellikleri incelendiğinde (Tablo 4.7) en düşük kentsel sıcaklık değeri 21.53°C, en yüksek kentsel sıcaklık değeri ise 46.77°C ve bu iki değer arasındaki fark ise 25.24°C olarak hesaplanmıştır. Minimum ve maksimum değerler arasındaki farkın yüksek olması veri setinin geniş bir dağılım aralığına sahip olduğunu göstermektedir. Veri setindeki genel kentsel sıcaklık değeri ortalaması (mean) 30.48°C'dir. En yüksek ve en düşük %5'lik dilimdeki (uç değerler) değerlerin çıkarılarak hesaplandığı ayıklanmış (trimmed mean) ortalama kentsel sıcaklık değeri ise 30.40°C'dir. Uç değerlerin ayıklanarak hesaplandığı ortalama değer ile genel ortalama değer arasında büyük bir farkın gözlemlenmemesi (0.08°C'lik fark) veri setindeki uç değerlerin etkisinin sınırlı olduğunu ifade etmektedir. Veri setindeki medyan değeri incelendiğinde 30.35°C'dir. Medyan değerinin genel ortalama değerinin altında olması (Skewness değeri 0.207) veri setinde pozitif çarpıklığın göstergesi olarak kabul edilmektedir. Veri setinin dağılımındaki uç değerlerin ne kadar kapsadığını gösteren Kurtosis değeri -1.135'tir. Bu değerin negatif olması, veri seti dağılımının normal dağılıma göre daha basık olduğunu ve daha az uç değerlere sahip olduğunu göstermektedir.

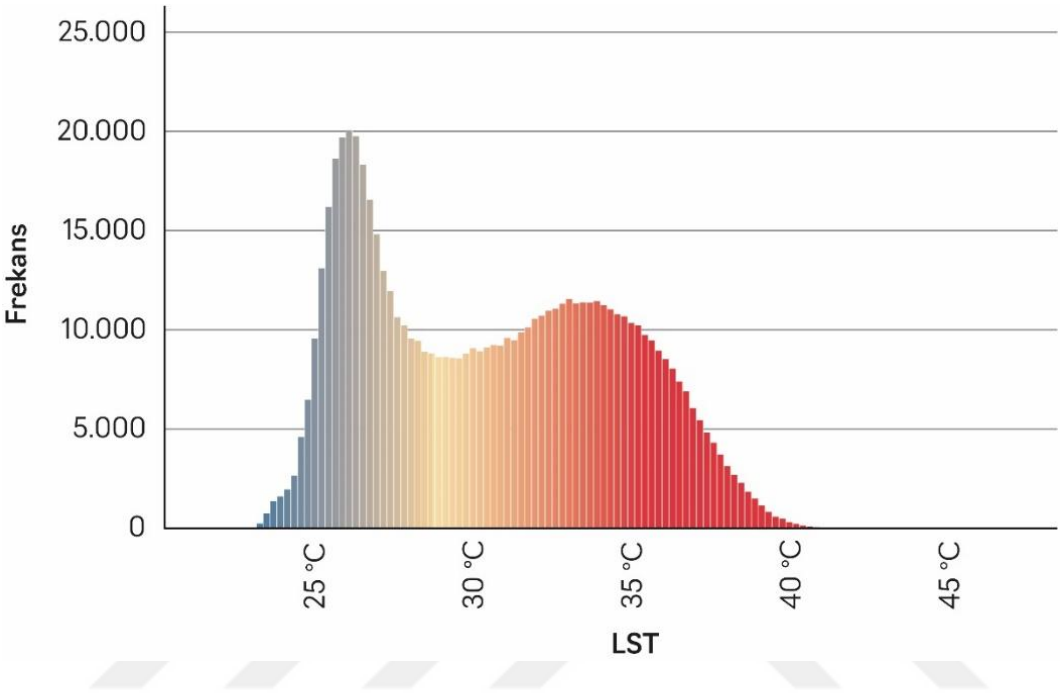
Tablo 4.7 Kolmogorov-Smirnov Normallik Testi istatistik değerleri

Göstergeler	İstatistik Değeri	Standart Hata
Genel Ortalama	30.4885	0.004
%95 Güven Aralığındaki Üst Sınır	30.4789	-
%95 Güven Aralığındaki Alt Sınır	30.4980	-
Ayıklanmış Ortalama (%5'lik Dilimdeki Uç Değerler Dışında)	30.4030	-
Medyan	30.3556	-
Varyans	15.890	-
Standart Sapma	3.986	-
Minimum Kentsel Sıcaklık	21.5348	-
Maksimum Kentsel Sıcaklık	46.7780	-
Aralık	25.2432	-
Çeyrekler Arası Aralık	7.1355	-
Çarpıklık	0.207	0.003
Basıklık	-1.135	0.006

Şekil 4.14'te sunulan histogram grafiği, İstanbul genelinde Landsat-8 uydu görüntüsüne dayalı olarak hesaplanan kentsel sıcaklık değerlerinin frekans dağılımını göstermektedir. Grafik incelendiğinde, kentsel sıcaklık değerleri dağılımının bimodal bir yapı sergilediği, yani simetrik olmayan bir eğilim gösterdiği görülmektedir. Bu durum, verinin normal dağılım varsayımını karşılamadığını açıkça ortaya koymaktadır.

Histogram grafiğinde iki belirgin tepe noktasının varlığı dikkat çekmektedir. Bu durum, İstanbul genelinde farklı termal karakteristikteki alanların bulunduğuna işaret etmektedir. Grafikteki ilk tepe noktası, daha yüksek frekans dağılımına sahip olan 25-27°C aralığından oluşurken, ikinci tepe noktası ise görece daha düşük frekans dağılımına sahip olan 32-34°C sıcaklık aralığından oluşmaktadır. İstanbul'a ait kentsel sıcaklık değerlerinin standart sapması yaklaşık 4°C'dir. Bu durum sıcaklıkların 26.4-34.4°C (±4°C) aralığında yoğunlaştığını ifade etmektedir. Grafikte 39°C'nin üzerindeki ve 24°C'nin altındaki sıcaklık değerleri daha düşük

frekansla temsil edildiği yani kent genelinde daha az sayıda gözlemlendiği anlaşılmaktadır. Grafikteki sağ kuyruk etkisi (posisitve skewness), yani kentsel sıcaklık değerleri dağılımının sağa doğru asimetrik bir eğilim göstermesi, daha az frekansla temsil edilen ekstrem sıcaklık değerlerinin bulunduğuna işaret etmektedir.



Şekil 4.14 Kentsel sıcaklık değerlerine ait histogram grafiği

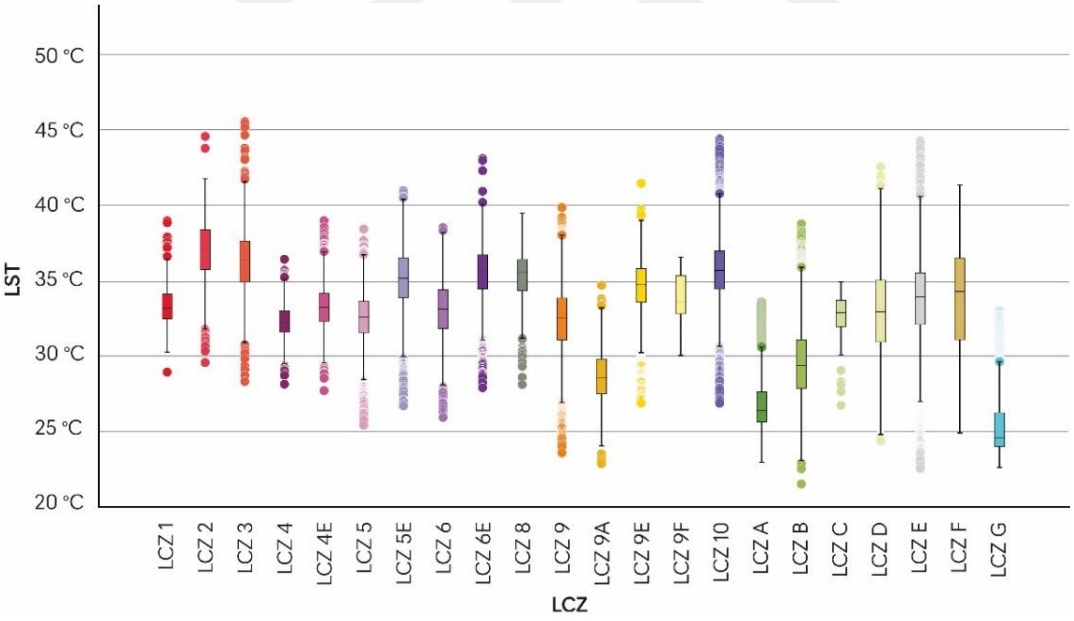
4.4.2 Kruskal Wallis H Anlamlılık Testi Sonuçları

Kolmogorov-Smirnov testi sonucunda kentsel sıcaklık verilerinin her bir LCZ tipolojisi için normal dağılıma uygun olmadığı ($p<0.001$) tespit edilmiş; bu nedenle LCZ tipolojileri sıcaklık varyasyonları arasındaki istatistiksel açıdan anlamlı farklılıkları değerlendirmek için non-parametrik bir yöntem olan Kruskal-Wallis H Anlamlılık Testi uygulanmıştır. Kruskal-Wallis H Anlamlılık Testi kapsamında toplam 22 farklı LCZ tipolojisi (serbestlik derecesi-df) ve 672,911 adet örneklem veri (total N) değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre (Tablo 4.8) testin anlamlılık düzeyi (p değeri) 0.001'den daha küçük bir değere sahiptir. Bu durumda, farklı LCZ tipolojilerindeki kentsel sıcaklık değerlerinin dağılımında %95 güven aralığında istatistiksel olarak anlamlı farklılıkların görüldüğü saptanmıştır.

Tablo 4.8 Kruskal Wallis Anlamlılık Testi sonuçları

Gözlem Sayısı (Total N)	Test İstatistiği (H Değeri)	Serbestlik Derecesi (df)	Anlamlılık Düzeyi (p-değeri)
672,911	466,322.279	22	<.001

LCZ tipolojilerindeki kentsel sıcaklık değerlerinin dağılımı kutu grafiği şeklinde Şekil 4.15'te verilmiştir. Grafiğin yatay ekseninde yerel iklim bölgeleri, dikey ekseninde ise kentsel sıcaklık değerleri bulunmaktadır. Bu grafik kapsamında, her bir LCZ tipolojisine ait medyan değer, birinci çeyrek (Q1), üçüncü çeyrek (Q3), çeyrekler arası aralık (IQR), aykırı üst sınır (Q3 + 1.5 x IQR), aykırı alt sınır (Q1 – 1.5 x IQR) ve aykırı değerlere ait bilgiler elde edilmektedir. İstanbul'a ait değerler incelendiğinde, kentin farklılaşan morfolojik yapısı ve değişen arazi örtüsü yapısı nedeniyle LCZ tipolojilerinin termal özellikleri de belirgin bir şekilde farklılaşmaktadır.



Şekil 4.15 LCZ tipolojilerindeki kentsel sıcaklık değerlerinin dağılımına ait kutu grafiği

Kompakt kent formuna sahip (LCZ 1-3) yerel iklim bölgelerine ait veriler incelendiğinde, kompakt ve alçak katlı bölgelerin (LCZ 3) 2.72°C ile en yüksek IQR değerine sahip LCZ tipolojisi olduğu dikkat çekmektedir. Bu durum, LCZ 3 tipolojisine ait kentsel sıcaklık dağılımının geniş bir aralıkta yer aldığını ve yüksek termal heterojenliğe sahip olduğunu ifade etmektedir. Kompakt kent formuna sahip

LCZ tipolojileri arasında Q1 (35.77°C), Q3 (38.39°C), aykırı üst sınır (42.32°C) ve aykırı alt sınır (31.84°C) göstergelerine ait en yüksek değerler ise kompakt orta katlı yerel iklim bölgesinde (LCZ 2) gözlemlenmektedir. Yüksek Q1 ve Q3 değerleri, söz konusu LCZ tipolojisinde kentsel sıcaklık değerlerinin yüksek seyrettiğini ve sıcaklık değişkenliğinin arttığını göstermektedir. Aykırı üst sınırın ise 42°C'yi aşması, LCZ 2 tipolojisine ait bazı bölgelerin güneş radyasyonunu yüksek oranda absorbe ederek aşırı ısınmaya maruz kaldığını ortaya koymaktadır.

Açık kent formuna sahip (LCZ 4-6) yerel iklim bölgeleri incelendiğinde, en yüksek Q1 (34.48°C) ve Q3 (36.74°C) değerinin açık az katlı ve geçirimsiz yüzeylerin yoğun olduğu bölgelerde (LCZ 6E) görüldüğü tespit edilmiştir. Dolayısıyla LCZ 6E tipolojisine ait sıcaklık değerlerinin daha yüksek düzeyde seyrettiği söylenebilmektedir. En yüksek IQR değeri ise 2.63°C ile açık orta katlı ve geçirimsiz yüzeylerin yoğun olduğu bölgelerde (LCZ 5E), en düşük IQR değeri ise 1.45°C ile açık çok katlı bölgelerde (LCZ 4) görülmektedir. Yüksek IQR değeri LCZ 5E tipolojisine ait sıcaklık değerlerinin daha heterojen bir yapıda dağıldığını ve bu nedenle sıcaklık dalgalanmalarının yoğun olduğunu; düşük IQR değeri ise LCZ 4 tipolojisine ait sıcaklık değerlerinin daha dar bir aralıkta yoğunlaştığını ve bu nedenle termal dengenin stabil olduğunu ortaya koymaktadır. En yüksek aykırı üst sınır 40.49°C ile LCZ 5E, en düşük aykırı alt sınır ise 28.01°C ile LCZ 6 tipolojilerinde tespit edilmiştir. Düşük aykırı alt sınırı, söz konusu LCZ tipolojisinde kentsel sıcaklığı düşüren etkilerin yoğunlaştığını, yüksek aykırı üst sınırı ise artan kentsel sıcaklıklara bağlı olarak sıcaklık anomalisi gösteren bölgeleri varlığını ifade etmektedir.

Seyrek kent formuna sahip (LCZ 9) yerel iklim bölgeleri incelendiğinde, en yüksek Q1 (33.59°C) ve Q3 (35.82°C) değerlerinin LCZ 9E tipolojisinde görüldüğü tespit edilmiştir. Bu tipolojideki dokularda, az katlı binalar ve geçirimsiz yüzeylerin yoğun olarak bulunması yüksek ısı birikimine neden olarak kentsel sıcaklıklarda artış meydana gelmesine neden olmuştur. LCZ 9E tipolojisindeki Q1 ve Q3 değerlerinin birbirine yakın olması aynı zamanda en düşük IQR değerinin de bu tipolojide görülmesini sağlamıştır. En düşük aykırı alt sınır 34.05°C ile LCZ 9A tipolojinde görülmektedir. Bu durum, doğal yüzeylerin ve yeşil alanların serinletici etkisini vurgulamaktadır. En yüksek aykırı üst sınır ise 39.18°C ile LCZ 9F tipolojisinde görülmektedir. Bu tipolojide düşük katlı ve toprak/kumlu zeminlerin

yoğunlukta olması yüksek ısı birikimine neden olarak belirgin sıcaklık artışları göstermektedir.

Arazi örtüsü tipolojilerine bağlı yerel iklim bölgeleri (LCZ A-G) incelendiğinde, en düşük Q1 (24.01°C) ve Q3 (26.26°C) değerlerinin LCZ G tipolojisinde görüldüğü saptanmıştır. Söz konusu tipolojide yoğunlaşan su yüzeylerinin buharlaşma yoluyla çevrelerindeki sıcaklıkları düşürme eğiliminde olduğu söylenebilmektedir. En yüksek Q1 değerinin 31.12°C ile LCZ E ve en yüksek Q3 değerinin ise 36.52°C ile LCZ F tipolojilerinde görüldüğü tespit edilmiştir. Bu durum, sert ve geçirimsiz yüzeyler ile çıplak toprak yüzeylerin düşük albedo değerlerine sahip olmasından dolayı güneş radyasyonunun önemli bir kısmını absorbe ettiğini göstermektedir. En yüksek IQR değerinin 5.40°C ile yine LCZ F tipolojisinde görülmesi toprak/kumul bölgelerin yüksek termal heterojenliğe sahip olduğunu ortaya koymaktadır. En düşük aykırı alt sınır değerleri 20.63°C ile LCZ G ve 25.66°C ile LCZ A tipolojilerinde hesaplanmıştır. Bu durum, su yüzeylerinin v yoğun bitki örtüsünün kentsel sıcaklıklar üzerindeki serinletici etkisini doğrulamaktadır.

4.4.3 Çoklu Karşılaştırma: Post Hoc Bonferroni Testi Sonuçları

Bonferroni prosedürü kullanılarak yapılan bu testte 22 farklı LCZ tipolojisinin ikili karşılaştırmalarına ait; anlamlılık düzeyi (p), anlamlılık farkının büyüklüğü (test istatistiği), tahmin edilen farkın güvenilirliği (standart hata) ve anlamlılık farkının gücüne (standartlaştırılmış test istatistiği) ait değerler elde edilmiştir. Karşılaştırmaların istatistiksel olarak anlamlılığı p değeri ile ölçülmektedir. Düzeltilmiş anlamlılık düzeyinin 0.001'den düşük olması, karşılaştırmaların istatistiksel açıdan anlamlı olduğunu göstermektedir. Toplamda 105 farklı çiftin bulunduğu ikili karşılaştırma testinde karşılaştırmaların 84'ünde, %95 güven aralığında istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar bulunmaktadır. Anlamlı farklar bulunan LCZ tipolojilerinin 51'inde pozitif değerler görülürken 33'ünde ise negatif değerler görülmektedir. Negatif test istatistiği gösteren ikili karşılaştırmalarda (örneğin LCZ 9 – LCZ 9E) negatif değer, karşılaştırmaların anlamlılık düzeyinin gücünü etkilememektedir. Sadece ikinci grubun kentsel sıcaklık değerinin daha yüksek olduğunu ifade etmektedir. Gruplar arasındaki farkın gücü standartlaştırılmış test istatistiği ile ölçülmektedir. Bu değer ne kadar büyükse gruplar arasındaki anlamlı farkıklılık da o kadar güçlüdür. Standart hata ise hesaplanan test istatistiğinin ne kadar güvenilir olduğunun bir göstergesidir. Bu

kapsamda elde edilen analiz sonuçlarına göre kentsel sıcaklık değerleri bakımından anlamlı farklılıklarının en belirgin gözlemlendiği LCZ tipolojileri: LCZ 2, LCZ 5, LCZ 5E, LCZ 6, LCZ 6E, LCZ 9, LCZ 9A ve LCZ 9E'dir (Tablo 4.9). Söz konusu LCZ tipolojileri, mekânsal morfolojik özelliklerin kentsel sıcaklık varyasyonları üzerindeki etkilerini anlamak amacıyla, XGBoost regresyon modelinde örneklem olarak kullanılmış; ilgili veri seti bu tipolojilerden toplanan değerler ile oluşturulmuştur.

Tablo 4.9 Çoklu Karşılaştırma Post Hoc Bonferroni Testi sonuçları (anlamlılık düzeyi en yüksek ilk 10 grup verilmiştir)

Karşılaştırma Grupları	Test İstatistiği	Std. Hata	Std. Test İstatistiği	Anlamlılık Düzeyi (p)	Düzeltilmiş Anlamlılık Düzeyi
LCZ 9 – LCZ 5E	47118.549	308.752	152.610	<.001	.000
LCZ 9 – LCZ 10	53438.168	366.200	145.926	<.001	.000
LCZ 9 – LCZ 2	74100.269	509.591	145.411	<.001	.000
LCZ 9 – LCZ 6E	54022.881	461.441	117.074	<.001	.000
LCZ 9A – LCZ 2	113066.244	997.164	113.388	<.001	.000
LCZ 5 – LCZ 2	74515.205	716.789	103.957	<.001	.000
LCZ 9A – LCZ 10	92404.143	932.070	99.139	<.001	.000
LCZ 9A – LCZ 6E	92988.856	973.437	95.526	<.001	.000
LCZ 9A – LCZ 5E	86084.524	911.033	94.491	<.001	.000
LCZ 5 – LCZ 10	53853.103	623.062	86.433	<.001	.000
LCZ 9 – LCZ 9E	-37265.084	444.715	-83.795	<.001	.000
LCZ 6 – LCZ 2	64306.319	776.245	82.843	<.001	.000
LCZ 5 - LCZ 5E	-47533.485	591.128	-80.412	<.001	.000
LCZ 5 – LCZ 6E	-54437.817	683.397	-79.658	<.001	.000
LCZ 9A – LCZ 9E	-76231.059	965.621	-78.945	<.001	.000

4.5 İstanbul Yerel İklim Bölgeleri'nde Mekânsal Morfolojik Yapı

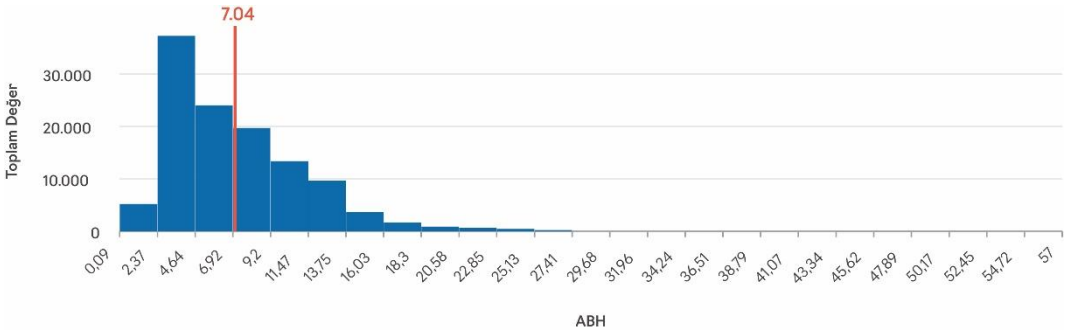
Bu bölümde, LCZ 2, LCZ 5, LCZ 5E, LCZ 6, LCZ 6E, LCZ 9, LCZ 9A ve LCZ 9E olmak üzere toplamda 8 farklı LCZ tipolojisine ilişkin ortalama bina yüksekliği (ABH), bina yüzey alanı oranı (BSF), kat alanı kat sayısı oranı (FAR), ortalama bina hacmi (ABV), bina cephe alanı oranı (FSR), bina cephe/hacim oranı (FVR), açık alan oranı (OSR), gözeneklilik oranı (Po), mutlak pürüzlülük oranı (RU), normalize edilmiş yapılaşma indeksi (NDBI) ve normalize edilmiş bitki örtüsü indeksi (NDVI) olmak üzere 11 farklı mekânsal morfoloji analizine (Şekil 4.27) dair elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

4.5.1 Ortalama Bina Yüksekliği

Ortalama bina yüksekliği (ABH) analizi, her bir gridin içerisinde bulunan binaların yüksekliklerinin ortalaması alınarak ilgili gride işlenmesi ile gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, elde edilen sonuçlara göre ortalama bina yükseklikleri 3.65 m ile 28.55 m arasında değişiklik gösterdiği tespit edilmiştir. Tüm gridlerdeki ortalama bina yüksekliği değeri ise 7.04 m'dir (Şekil 4.16). Yerel iklim bölgelerindeki ortalama bina yükseklikleri incelendiğinde, %34.3'ü orta katlı (10-25m) %65.7'si ise alçak katlı (3-10 m) binalardan oluşmaktadır (Tablo 4.10).

Tablo 4.10 LCZ tipolojilerindeki ortalama bina yüksekliği değerleri

LCZ Tipolojisi	Ortalama Bina Yüksekliği (m)	Z-Skor Normalizasyonu
LCZ 2	11.27	1.00
LCZ 5	12.32	1.25
LCZ 5E	11.31	1.01
LCZ 6	5.62	-0.33
LCZ 6E	6.14	-0.21
LCZ 9	4.28	-0.65
LCZ 9E	5.34	-0.40
LCZ 9A	4.88	-0.51



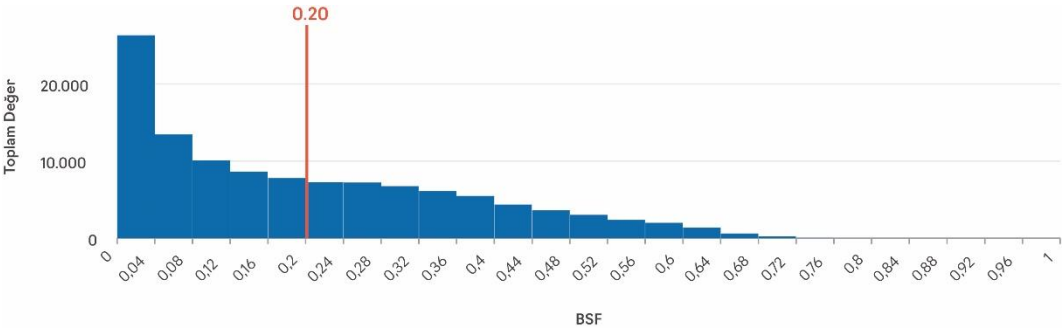
Şekil 4.16 Ortalama bina yüksekliği değerlerine ait histogram grafiği

4.5.2 Bina Yüzey Alanı Oranı

Bina yüzey alanı oranı (BSF), her bir grid içinde bulunan toplam bina taban alanının ilgili gridin alanına bölünmesiyle elde edilmektedir. 0-1 değerleri arasında değişkenlik gösteren BSF, 0'a yaklaştıkça griddeki bina yoğunluğunun düştüğünü, 1'e yaklaştıkça ise griddeki bina yoğunluğunun arttığını ifade etmektedir. Elde edilen bulgular. BSF oranının 0.0001 ile 1.00 arasında değişiklik gösterdiğini ortaya koymaktadır (Şekil 4.17). Ortalama BSF oranı 0.20 ve standart sapma değeri ise 0.17'dir. Bu durum BSF oranının 0.03 ile 0.37 değerleri arasında yoğunlaştığını göstermektedir. LCZ tipolojilerindeki ortalama BSF değerleri incelendiğinde en yüksek değerin 0.58 ile LCZ 2'de en düşük değerin ise 0.04 ile LCZ 9A'da görüldüğü saptanmıştır (Tablo 4.11).

Tablo 4.11 LCZ tipolojilerindeki ortalama bina yüzey alanı değerleri

LCZ Tipolojisi	Bina Yüzey Alanı Oranı	Z-Skor Normalizasyonu
LCZ 2	0.58	2.21
LCZ 5	0.17	-0.18
LCZ 5E	0.31	0.68
LCZ 6	0.28	0.50
LCZ 6E	0.35	0.88
LCZ 9	0.07	-0.76
LCZ 9E	0.13	-0.36
LCZ 9A	0.04	-0.90



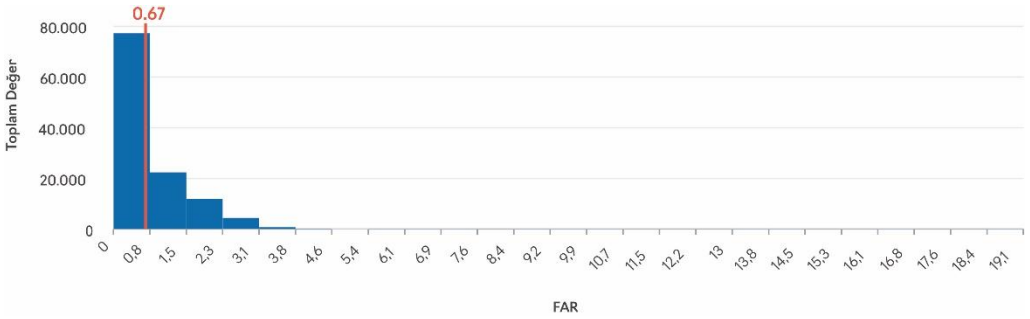
Şekil 4.17 Ortalama bina yüzey alanı değerlerine ait histogram grafiği

4.5.3 Kat Alanı Katsayısı Oranı

Kat alanı katsayısı oranı (FAR), yapılaşma yoğunluğunu gösteren bir parametredir. Her bir griddeki toplam inşaat alanının (bina taban alanı x bina kat adedi) grid alanına bölünmesiyle hesaplanmıştır. Yapılan analiz kapsamında elde edilen bulgulara göre FAR değerlerinin 0.0001 ile 19.12 arasında bir dağılıma sahip olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.18). Ortalama FAR değeri ise 0.67 olup, saptanan değerlerin %37.2'si ortalama değerin üstünde, %62.8'i ise ortalama değerin altında bir yapılaşma yoğunluğuna sahiptir. LCZ tipolojilerinin FAR değerleri incelendiğinde en yüksek değer 2.39 ile LCZ 2'de en düşük değer ise 0.08 ile LCZ 9A'da görülmektedir (Tablo 4.12). LCZ 2, LCZ 5, LCZ 5E ve LCZ 6E tipolojileri ortalama FAR değerinin üzerinde bir yapılaşma eğilimine sahiptir.

Tablo 4.12 LCZ tipolojilerindeki ortalama kat alanı kat sayısı değerleri

LCZ Tipolojisi	Kat Alanı Katsayısı Oranı	Z-Skor Normalizasyonu
LCZ 2	2.39	2.24
LCZ 5	0.76	0.12
LCZ 5E	1.32	0.84
LCZ 6	0.61	-0.08
LCZ 6E	0.88	0.27
LCZ 9	0.13	-0.70
LCZ 9E	0.32	-0.46
LCZ 9A	0.08	-0.77



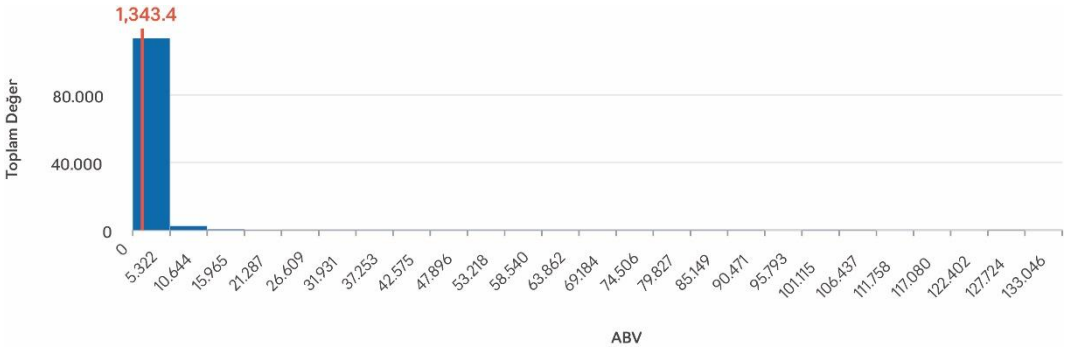
Şekil 4.18 Ortalama kat alanı katsayısı değerlerine ait histogram grafiği

4.5.4 Ortalama Bina Hacmi

Ortalama bina hacmi (ABV), her bir griddeki bina hacimleri toplamının griddeki toplam bina sayısına bölünmesiyle hesaplanmıştır. Yerel iklim bölgeleri kapsamında yapılan ABV analizi sonuçları incelendiğinde minimum değer 0.0002, maksimum değer 133,046 ve ortalama değer ise 1,343.4 olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.19). Minimum ve maksimum değerler arasında gözlemlenen yüksek fark, ABV değerlerinin geniş ve çeşitli bir dağılıma sahip olduğunu ifade etmektedir. LCZ tipolojileri kapsamında ABV değerleri incelendiğinde farklı yerel iklim bölgeleri arasında belirgin farklılıkların olduğu gözlemlenmektedir. Bu kapsamda en yüksek değerin LCZ 2'de, en düşük değerin ise LCZ 9'da görüldüğü tespit edilmiştir (Tablo 4.13). Yerel iklim bölgelerinden LCZ 2, LCZ 5 ve LCZ 5E tipolojileri ortalama ABV değerinin üzerinde bina hacmine sahiptir.

Tablo 4.13 LCZ tipolojilerindeki ortalama bina hacmi değerleri

LCZ Tipolojisi	Ortalama Bina Hacmi	Z-Skor Normalizasyonu
LCZ 2	2,980.3	0.49
LCZ 5	2,815.5	0.44
LCZ 5E	2,523.8	0.35
LCZ 6	873.4	-0.14
LCZ 6E	1,262.3	-0.02
LCZ 9	483.8	-0.26
LCZ 9E	937.7	-0.12
LCZ 9A	558.8	-0.24



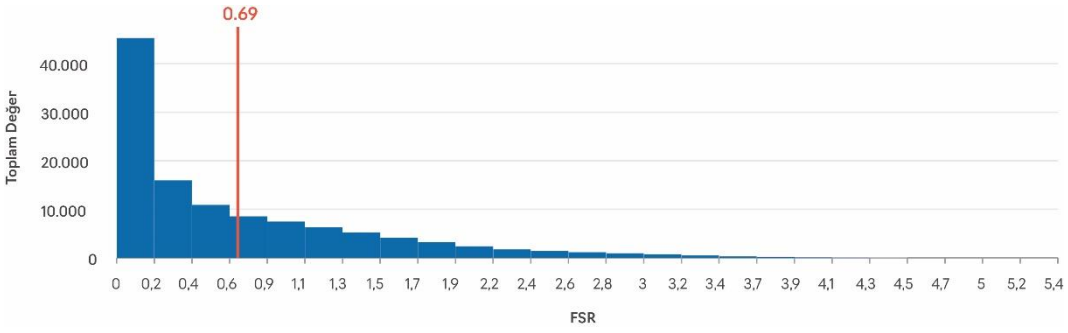
Şekil 4.19 Ortalama bina hacmi değerlerine ait histogram grafiği

4.5.5 Bina Cephe Alanı Oranı

Bina cephe alanı oranı (FSR), her bir griddeki binaların cephe alanları toplamının grid alanına bölünmesiyle hesaplanmıştır. Kentsel dokudaki dikey yoğunluğun önemli bir göstergesi olan FSR, kentsel sıcaklık değerleri ve mikro iklim koşulları üzerinde önemli etkilere sahiptir. Analiz sonucunda elde edilen bulgulara göre FSR değeri 0.0001-5.38 aralığında değişiklik göstermektedir (Şekil 4.20). Ortalama değer 0.69 olarak hesaplanmıştır; veri setindeki değerlerin %36.6'sı ortalamanın üzerinde, %63.4'ü ise ortalamanın altında değerlere sahiptir. Yerel iklim bölgelerine göre ortalama FSR değerlerinin değişimi incelendiğinde, en yüksek değerin LCZ 2'de en düşük değerin ise LCZ 9A'da görüldüğü tespit edilmiştir (Tablo 4.14). FSR değeri genellikle ABV değeri ile doğrudan ilişkilidir. ABV değeri arttıkça FSR değeri de artış göstermektedir.

Tablo 4.14 LCZ tipolojilerindeki ortalama bina cephe alanı değerleri

LCZ Tipolojisi	Bina Cephe Alanı Oranı	Z-Skor Normalizasyonu
LCZ 2	2.57	2.40
LCZ 5	0.69	0.002
LCZ 5E	1.26	0.73
LCZ 6	0.73	0.05
LCZ 6E	0.93	0.31
LCZ 9	0.16	-0.68
LCZ 9E	0.33	-0.45
LCZ 9A	0.10	-0.75



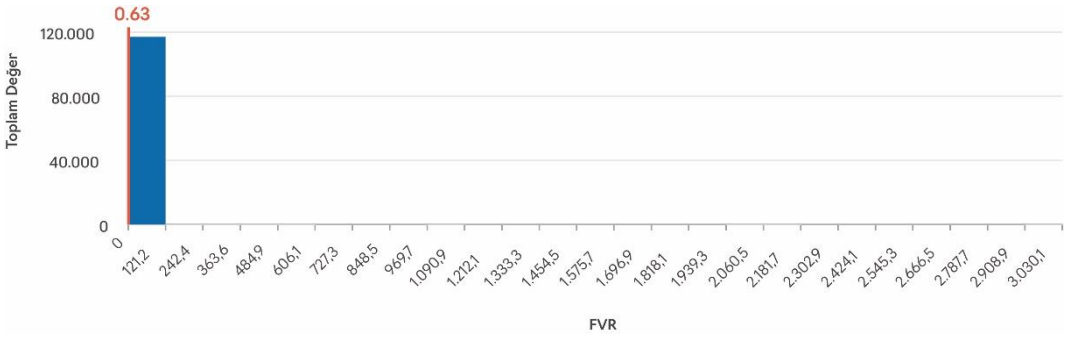
Şekil 4.20 Ortalama bina cephe alanı değerlerine ait histogram grafiği

4.5.6 Bina Cephe/Hacim Oranı

Bina cephe/hacim oranı (FVR), her bir gridde yer alan binaların, toplam cephe alanlarının toplam bina hacmine bölünmesiyle hesaplanmıştır. Yapılan analizler sonucunda FVR değerlerinin 0.044-3.030 aralığında değiştiği ve ortalama FVR değerinin ise 0.63 olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.21). Yapılan analizlerde medyan değeri 0.39 olarak hesaplanmıştır. Bu değerin ortalama değerden küçük olması, FVR değerlerinin sağa çarpık olduğunu ve uç değerler barındıran bir dağılıma sahip olduğunu göstermektedir. Yerel iklim bölgelerine ait ortalama FVR değerleri incelendiğinde en yüksek değer 0.94 ile LCZ 9'da en düşük değer ise 0.35 ile LCZ 6E'de görülmektedir (Tablo 4.15).

Tablo 4.15 LCZ tipolojilerindeki ortalama bina cephe/hacim oranı değerleri

LCZ Tipolojisi	Bina Cephe/Hacim Oranı	Z-Skor Normalizasyonu
LCZ 2	0.36	-0.02
LCZ 5	0.41	-0.01
LCZ 5E	0.36	-0.02
LCZ 6	0.40	-0.02
LCZ 6E	0.35	-0.02
LCZ 9	0.94	0.02
LCZ 9E	0.50	-0.01
LCZ 9A	0.68	0.003



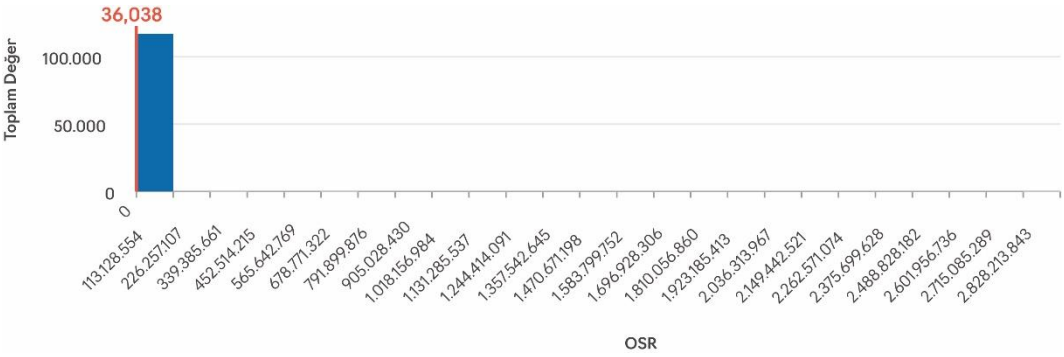
Şekil 4.21 Ortalama bina cephe/hacim oranı değerlerine ait histogram grafiği

4.5.7 Açık Alan Oranı

Açık alan oranı (OSR), her bir griddeki binaların inşaat alanları toplamının binaların kapladığı alan dışındaki toplam açık alana oranlanmasıyla ifade edilen morfolojik bir parametredir. FAR değerinin aksine açık alan yoğunluğunu tanımlamaktadır. Elde edilen sonuçlara göre OSR değerleri incelendiğinde minimum değerin 0.0004, maksimum değerin ise 2,828,213,843 olduğu hesaplanmıştır. Ortalama değerinin 36,038 ve standart sapmanın 8,496,386 olması OSR'ye ait veri setinin çok geniş bir aralıkta ve homojen olmayan bir dağılıma sahip olduğunu göstermektedir (Şekil 4.22). OSR değerleri yerel iklim bölgeleri kapsamında değerlendirildiğinde belirgin farklılıkların görüldüğü dikkat çekmektedir. En düşük ortalama OSR değeri 0.2 ile LCZ 2'de iken en yüksek ortalama OSR değeri ise 80,352 ile LCZ 9'dadır (Tablo 4.16).

Tablo 4.16 LCZ tipolojilerindeki ortalama açık alan oranı değerleri

LCZ Tipolojisi	Açık Alan Oranı	Z-Skor Normalizasyonu
LCZ 2	0.2	-0.004
LCZ 5	296.7	-0.004
LCZ 5E	116.4	-0.004
LCZ 6	4.781	-0.004
LCZ 6E	37.7	-0.004
LCZ 9	80.352	0.005
LCZ 9E	9.555	-0.003
LCZ 9A	1.819	-0.004



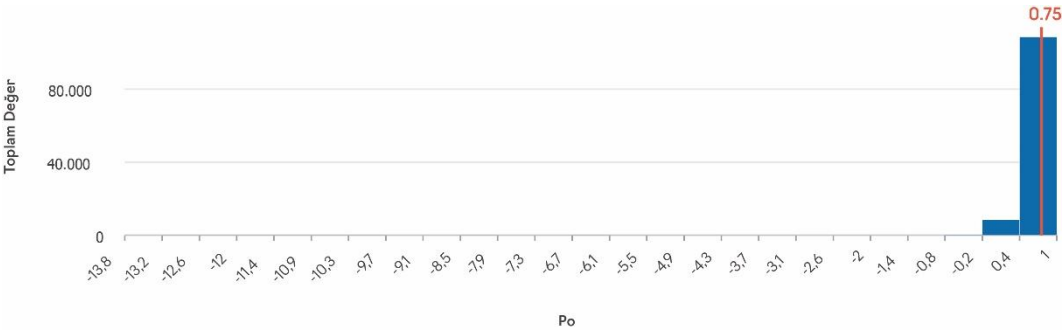
Şekil 4.22 Ortalama açık alan oranı değerlerine ait histogram grafiği

4.5.8 Gözeneklilik Oranı

Gözeneklilik oranı (Po), her bir griddeki toplam açık alan veya yapılaşmamış alan hacminin toplam hacme oranını ifade etmektedir. Yüksek gözeneklilik oranı geniş ve geçirgen kentsel dokuları, düşük gözeneklilik oranı ise kompakt ve yoğun kentsel dokuları tanımlamaktadır. Yapılan analizlere göre gözeneklilik değerlerinin 0.0018-0.99 aralığında değişiklik gösterdiği tespit edilmiştir (Şekil 4.23). Ortalama Po değeri 0.75 olup standart sapma değeri ise 0.24'tür. Bu sonuçlar LCZ tipolojilerine ait Po değerlerinin 0.51-099 aralığında yoğunlaştığını göstermektedir. Yerel iklim bölgelerindeki ortalama Po değerleri değerlendirildiğinde, en yüksek değerin 0.94 ile LCZ 9A'da (ortalama değerden +0.19 daha yüksek) en düşük değerin ise 0.35 ile LCZ 2'de (ortalama değerden -0,40 daha az) görüldüğü tespit edilmiştir (Tablo 4.17).

Tablo 4.17 LCZ tipolojilerindeki ortalama gözeneklilik oranı değerleri

LCZ Tipolojisi	Gözeneklilik Oranı	Z-Skor Normalizasyonu
LCZ 2	0.35	-1.67
LCZ 5	0.80	0.20
LCZ 5E	0.63	-0.52
LCZ 6	0.62	-0.57
LCZ 6E	0.55	-0.86
LCZ 9	0.90	0.62
LCZ 9E	0.82	0.25
LCZ 9A	0.94	0.76



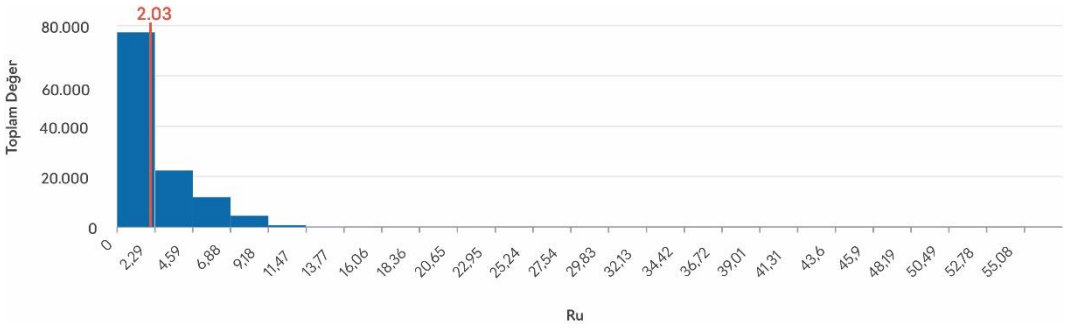
Şekil 4.23 Ortalama gözeneklilik oranı değerlerine ait histogram grafiği

4.5.9 Mutlak Pürüzlülük Oranı

Mutlak pürüzlülük oranı (RU), kentsel örtü katmanının ortalama yüksekliğini ifade eden morfolojik bir parametredir. RU değeri, her bir griddeki toplam bina hacminin grid alanına bölünmesiyle hesaplanmıştır. Yüksek RU değeri kompakt ve çok katlı dokuları, düşük RU değeri ise seyrek ve alçak katlı dokuları ifade etmektedir. Analizler kapsamında, minimum değerinin 0.0001, maksimum değerinin 57.4, ortalamanın 2.03 ve standart sapmanın ise 2.3 olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.24). Bu durum söz konusu parametreye ait veri setinde uç değerlerin bulunduğunun bir göstergesi niteliğindedir. LCZ tipolojilerindeki ortalama RU değerleri incelendiğinde, en yüksek değer 7.19 ile LCZ 2'de en düşük değer ise 0.26 ile LCZ 9A'da bulunmaktadır (Tablo 4.18). Elde edilen sonuçlara göre, kentsel dokudaki bina yoğunluğu ve yüksekliği arttıkça RU değerinin de arttığı saptanmıştır.

Tablo 4.18 LCZ tipolojilerindeki ortalama mutlak pürüzlülük oranı değerleri

LCZ Tipolojisi	Mutlak Pürüzlülük Oranı	Z-Skor Normalizasyonu
LCZ 2	7.19	2.24
LCZ 5	2.30	0.12
LCZ 5E	3.98	0.85
LCZ 6	1.85	-0.07
LCZ 6E	2.64	0.27
LCZ 9	0.40	-0.70
LCZ 9E	0.96	-0.46
LCZ 9A	0.26	-0.77



Şekil 4.24 Ortalama mutlak pürüzlülük oranı değerlerine ait histogram grafiği

4.5.10 Normalize Edilmiş Yapılaşma İndeksi

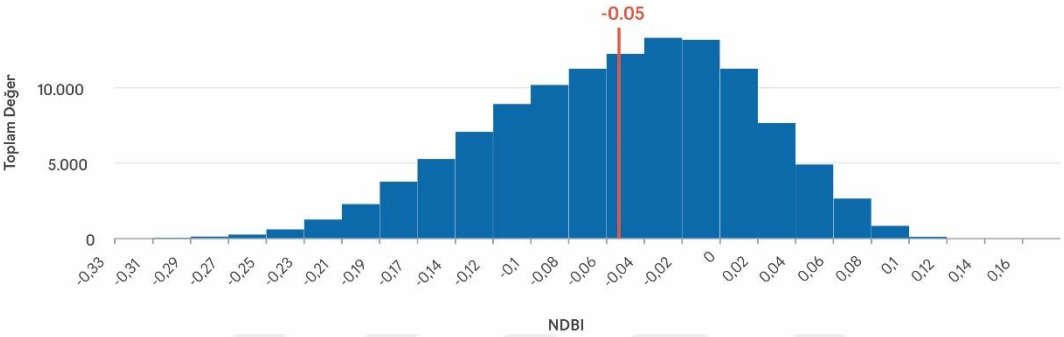
Normalize edilmiş yapılaşma indeksi (NDBI), yapılaşmış alan yoğunluğunu ifade eden bir uzaktan algılama indeksidir. NDBI değeri -1 ve +1 değer aralığında değişmektedir; değerler -1'e yaklaştıkça bitki örtüsünün yoğun olduğunu, +1'e yaklaştıkça ise yapılaşmış alanların ve geçirimsiz yüzeylerin yoğun olduğunu tanımlamaktadır. Elde edilen bulgular kapsamında NDBI değerleri incelendiğinde, minimum değerin -0.33, maksimum değerin ise 0.18 olduğu tespit edilmiştir. Veri setine ait değerler genel olarak -0.12 ile 0.01 aralığında yoğunlaşmaktadır (Şekil 4.25). Tespit edilen değerlerin %23.1'i pozitif, %76.9'u ise negatif değerler göstermektedir. Pozitif değerler çalışma alanın yaklaşık dörtte birinin yapılaşmış alanlardan oluştuğunu, negatif değerler ise alanın büyük oranda vejetasyon, açık alanlar, tarım alanları su yüzeyleri vb. yapılaşmamış alanlardan oluştuğunu ifade etmektedir. Yerel iklim bölgelerindeki ortalama NDBI değerlerine göre en yüksek değer 0.05 ile LCZ 2'de en düşük değer ise -0.21 ile LCZ 9A'da görülmektedir (Tablo 4.19). NDBI değeri, yapılaşmış alanlarla doğrudan ilişkili olduğu için yüksek bina yoğunluğuna sahip bölgelerde genellikle yüksek (pozitif) NDBI değerleri görülmektedir.

Tablo 4.19 LCZ tipolojilerindeki ortalama NDBI değerleri

LCZ Tipolojisi	Yapılaşmış Alan Oranı	Z-Skor Normalizasyonu
LCZ 2	0.05	1.50
LCZ 5	-0.09	-0.49
LCZ 5E	-0.005	0.71
LCZ 6	-0.07	-0.23

Tablo 4.19 LCZ tipolojilerindeki ortalama NDBI değerleri (devamı)

LCZ Tipolojisi	Yapılaşmış Alan Oranı	Z-Skor Normalizasyonu
LCZ 6E	-0.007	0.69
LCZ 9	-0.10	-0.62
LCZ 9E	-0.03	0.40
LCZ 9A	-0.21	-2.30



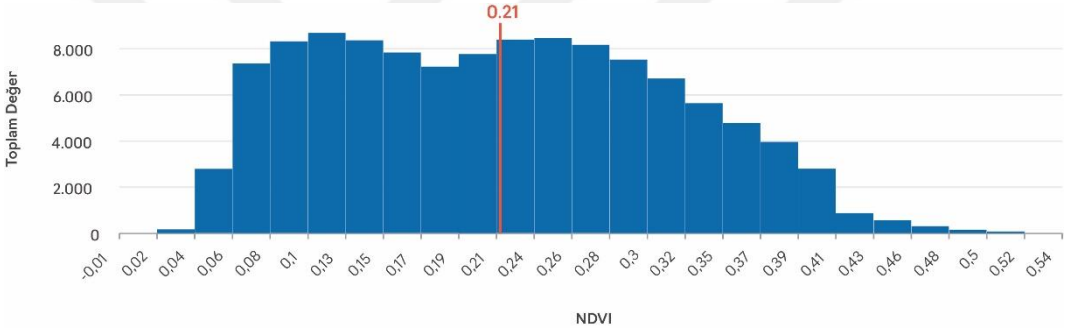
Şekil 4.25 Ortalama NDBI değerlerine ait histogram grafiği

4.5.11 Normalize Edilmiş Bitki Örtüsü İndeksi

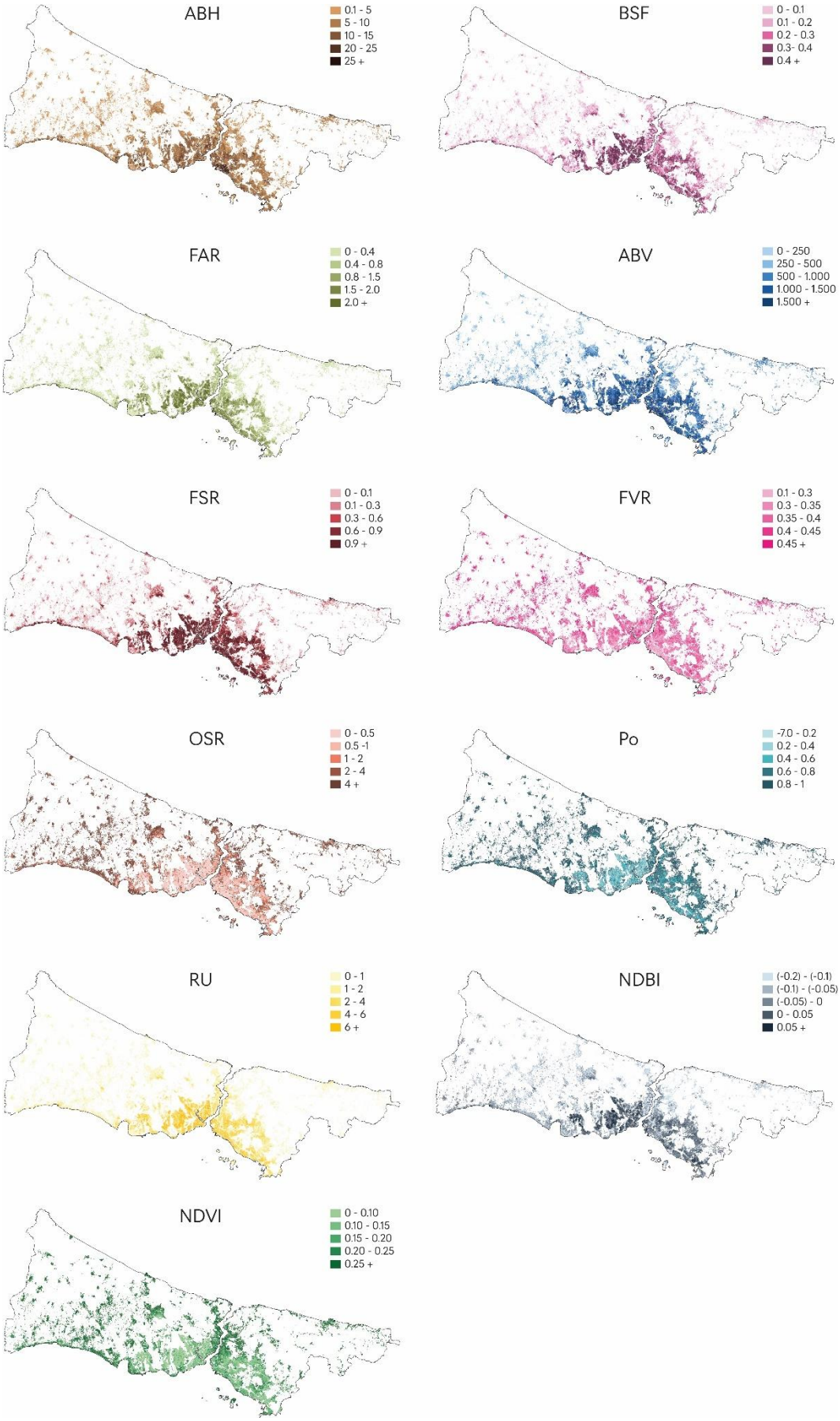
Normalize edilmiş bitki örtüsü indeksi (NDVI), bitki örtüsü yoğunluğunu gösteren bir uzaktan algılama indeksidir. Landsat 8 uydu görüntülerindeki Red ve NIR bantlarının CBS ortamında işlenmesiyle hesaplanmıştır. NDVI, -1 ve +1 değer aralığına sahiptir; değerler -1'e yaklaştıkça bitki örtüsü oranın düşük olduğunu (yapılaşmış araziler, su yüzeyleri, çıplak topraklar), +1'e yaklaştıkça ise yoğun ve sağlıklı bitki örtüsünün bulunduğunu ifade etmektedir. Elde edilen sonuçlara göre NDVI değerlerinin -0.0064 ile 0.54 aralığında değiştiği tespit edilmiştir. Ortalama NDVI değeri 0.21 olup değerler genel olarak 0.11-0.31 aralığında yoğunlaşmaktadır (Şekil 4.26). Yerel iklim bölgelerine göre ortalama NDVI değerlerine bakıldığında en düşük değerin 0.08 ile LCZ 2'de en yüksek değerin ise 0.43 ile LCZ 9A'da görüldüğü saptanmıştır (Tablo 4.20). Yerel iklim bölgelerinden LCZ 5, LCZ 6, LCZ 9 ve LCZ 9A tipolojilerindeki ortalama NDVI değerinin üzerinde bitki örtüsü oranına sahiptir.

Tablo 4.20 LCZ tipolojilerindeki ortalama NDVI değerleri

LCZ Tipolojisi	Bitki Örtüsü Oranı	Z-Skor Normalizasyonu
LCZ 2	0.08	-1.37
LCZ 5	0.25	0.35
LCZ 5E	0.12	-0.92
LCZ 6	0.25	0.32
LCZ 6E	0.14	-0.80
LCZ 9	0.29	0.80
LCZ 9E	0.15	-0.67
LCZ 9A	0.43	2.16



Şekil 4.26 Ortalama NDVI değerlerine ait histogram grafiği



Şekil 4.27 Mekânsal morfoloji parametrelerine ait analizler

4.6 İstanbul'da Mekânsal Morfoloji ile Kentsel Sıcaklık Varyasyonları Arasındaki Lineer ve Lineer Olmayan Nicel İlişki

Tez çalışmasının bu bölümünde, ilk olarak XGBoost regresyon analizi ile modelin tahmin performansı değerlendirilmiş ve mekânsal morfolojik parametrelerin kentsel sıcaklık değerleri üzerindeki etki düzeyleri incelenmiştir. Ardından, SHAP analizi ile her bir mekânsal morfoloji parametresinin kentsel sıcaklık üzerindeki etkisinin büyüklüğü ve yönü, yerel ve global SHAP değerleri ile ortaya koyulmuş; SHAP bağımlılık grafikleri aracılığıyla ise bu ilişkilerin lineer ve lineer olmayan yapıları detaylı bir şekilde incelenmiştir.

4.6.1 XGBoost Regresyon Modeli Sonuçları

Bonferroni prosedürü kullanılarak yapılan çoklu karşılaştırma testlerinde, anlamlı farklılık düzeyi en yüksek olan ilk on karşılaştırma içerisinde yer alan LCZ tipolojilerindeki (LCZ 2, LCZ 5, LCZ 5E, LCZ 6, LCZ 6E, LCZ 9, LCZ 9A, LCZ 9E) kentsel sıcaklık varyasyonlarına etki eden mekânsal morfoloji parametrelerinin etki düzeyinin tahmin edilmesi için yapay zekâ tabanlı XGBoost regresyon modeli uygulanmıştır. Bu model, 1'i bağımlı, 11'i bağımsız olmak üzere toplamda 12 adet değişken üzerinden analiz edilmiştir. Bağımlı değişken olarak her bir LCZ tipolojisindeki ortalama kentsel sıcaklık değeri, bağımsız değişken olarak ise NDVI, NDBI, ABV, BSF, FVR, FAR, OSR, ABH, Po, FSR ve Ru olmak üzere 11 adet mekânsal morfoloji parametresi kullanılmıştır.

XGBoost regresyon modeli, toplam 117,108 satır veri üzerinden gerçekleştirilmiştir. Verilerin, %44'ü LCZ 9, %23'ü LCZ 5E, %8'i LCZ 9E, %8'i LCZ 6E, %6'sı LCZ 2, %5'i LCZ 5, %4'ü LCZ 6 ve %2'si ise LCZ 9A tipolojilerinden oluşmaktadır. Modelde kullanılan veri setinin %80'i eğitim, %20'si ise doğrulama verisi için ayrılmıştır. Söz konusu veri ayrımı, belirli bir eşik değere dayanmaksızın rastgeleştirilmiş bir yöntemle gerçekleştirilmiştir. Model uygulanmadan önce Randomized Search Cross Validation optimizasyonu yapılarak modelin en iyi performans gösterdiği hiperparametre değerleri belirlenmiştir (Tablo 4.21). Bu kapsamda, modelde ardışık olarak toplam 100 karar ağacının (number of trees) oluşturulması sağlanarak lineer ve lineer olmayan ilişkilerin tespit edilebilme kapasitesinin arttırılması hedeflenmiştir. Ayrıca her bir ağacın derinliği (maximum tree depth) ise maksimum 10 olarak belirlenmiş ve böylelikle modelin öğrenme

sürecindeki aşırı uyum riskinin kontrol altında tutulması amaçlanmıştır. Modelin tutarlılığını arttırmak için öğrenme hızı (learning rate) 0.1 olarak belirlenmiştir. Ayrıca aşırı öğrenme (overfitting) riskini önlemek adına Gamma değeri 10, L2 düzenlileştirme katsayısı (Lambda) değeri 1, L1 düzenlileştirme katsayısı (alpha) değeri ise 5 olarak belirlenmiş ve böylelikle modeldeki karmaşıklık önlenerek daha doğru genellemelerin yapılması sağlanmıştır.

Tablo 4.21 XGBoost regresyon modeline ait hiperparametre değerleri

Hiperparametre Göstergeleri	**Değerler**
Ağaç Sayısı *(Number of Trees)*	100
Ağaç Derinliği *(Maximum Tree Depth)*	10
Öğrenme Hızı *(Learning Rate (Eta))*	0.1
Her Ağacın Eğitimde Kullanılan Örneklem Oranı (*Row Subsampling Ratio*)	0.6
Kullanılan Değişken Oranı (*Column Subsampling Ratio)*	1.0
Bölünmeler için Minimum Kayıp *(Minimum Loss Reduction for Splits (Gamma))*	10
L2 Düzenlileştirme Katsayısı *(L2 Regularization (Lambda))*	1
L1 Düzenlileştirme Katsayısı *(L1 Regularization (Alpha))*	5

Eğitim ve doğrulama verileri kapsamında yapılan performans değerlendirmelerinde (Tablo 4.22) R^2 değerleri sırasıyla 0.696 ve 0.659'dur. Elde edilen bu sonuçlar, mekânsal morfoloji parametrelerinin kentsel sıcaklık değerlerini açıklama gücünün %69.6, genellenebilirliğinin ise %65.9 olduğunu ifade etmektedir. Bu iki değer arasındaki 0.037'lik fark ise modelin aşırı öğrenme (overfitting) yapmadığını göstermektedir. Düzeltilmiş R^2 (Adjusted R^2) değerleri incelendiğinde eğitim verisinde 0.696, doğrulama verisinde ise 0.659 olarak hesaplanmıştır. R^2 ve düzeltmiş R^2 arasında farkın bulunmaması, modelde bağımsız değişken olarak kullanılan mekânsal morfoloji parametrelerinin kentsel sıcaklığı açıklama konusunda etkili ve anlamlı olduğunu ortaya koymaktadır. Modeldeki hata performansı; ortak mutlak hata (MAE), ortak mutlak % hata (MAPE) ve kök ortalama kare hata (RMSE) göstergeleri kullanılarak değerlendirilmektedir. MAE model tahminlerinin gerçek değerlerden ortalama kaç birim sapma gösterdiğini (hata miktarı), MAPE model tahminlerinin gerçek değere kıyasla hata yüzdesini (hata büyüklüğü), RMSE ise MAE gibi modelin gerçek değerlerden kaç birim

sapma gösterdiğini tanımlamaktadır. MAE değeri eğitim verisinde 1.09, doğrulama verisinde ise 1.15 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, modelin tahmin ettiği kentsel sıcaklık değerleri ile gerçek ölçümler arasında +1.09 ve +1.15 sapma ile hassas bir tahmin yaptığını göstermektedir. Eğitim verisi için saptanan hata miktarının doğrulama verisi için saptanan hata miktarından düşük olması beklenen bir durum olarak karşılanmaktadır. Bu durumun temel sebebi ise modelin yeni verilere tam anlamıyla uyum sağlayamaması olarak açıklanmaktadır. Modelin yüzdesel hata değerini gösteren MAPE ise eğitim verisinde %3.29 iken doğrulama verisinde ise %3.47 olarak tespit edilmiştir. Bu değerler 0'a yaklaştıkça yani düşük MAPE değerlerinde modelin genel tahmin doğruluğunun yüksek olduğunu göstermektedir. Elde edilen sonuçlar %10'un altında olması modelin kentsel sıcaklık varyasyonlarını yüksek doğrulukta tahmin ettiğini göstermektedir. RMSE değerleri incelendiğinde eğitim verisinde 1.40, doğrulama verisinde ise 1.48 olarak hesaplanmıştır. RMSE ve MAE arasındaki farkın eğitim verisinde 0.31, doğrulama verisinde 0.33 gibi düşük değerlere sahip olması modelin tutarlı tahmin yaptığını göstermektedir. Genel olarak MAE, MAPE ve RMSE hata göstergeleri incelendiğinde modelin doğru tahmin yaptığı ve genelleme yeteneğinin güvenilir olduğu anlaşılmaktadır. Hem eğitim hem de doğrulama verilerindeki p değerinin 0.000 olması ($p<0.005$) kentsel morfoloji parametrelerinin kentsel sıcaklık değerleri üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir.

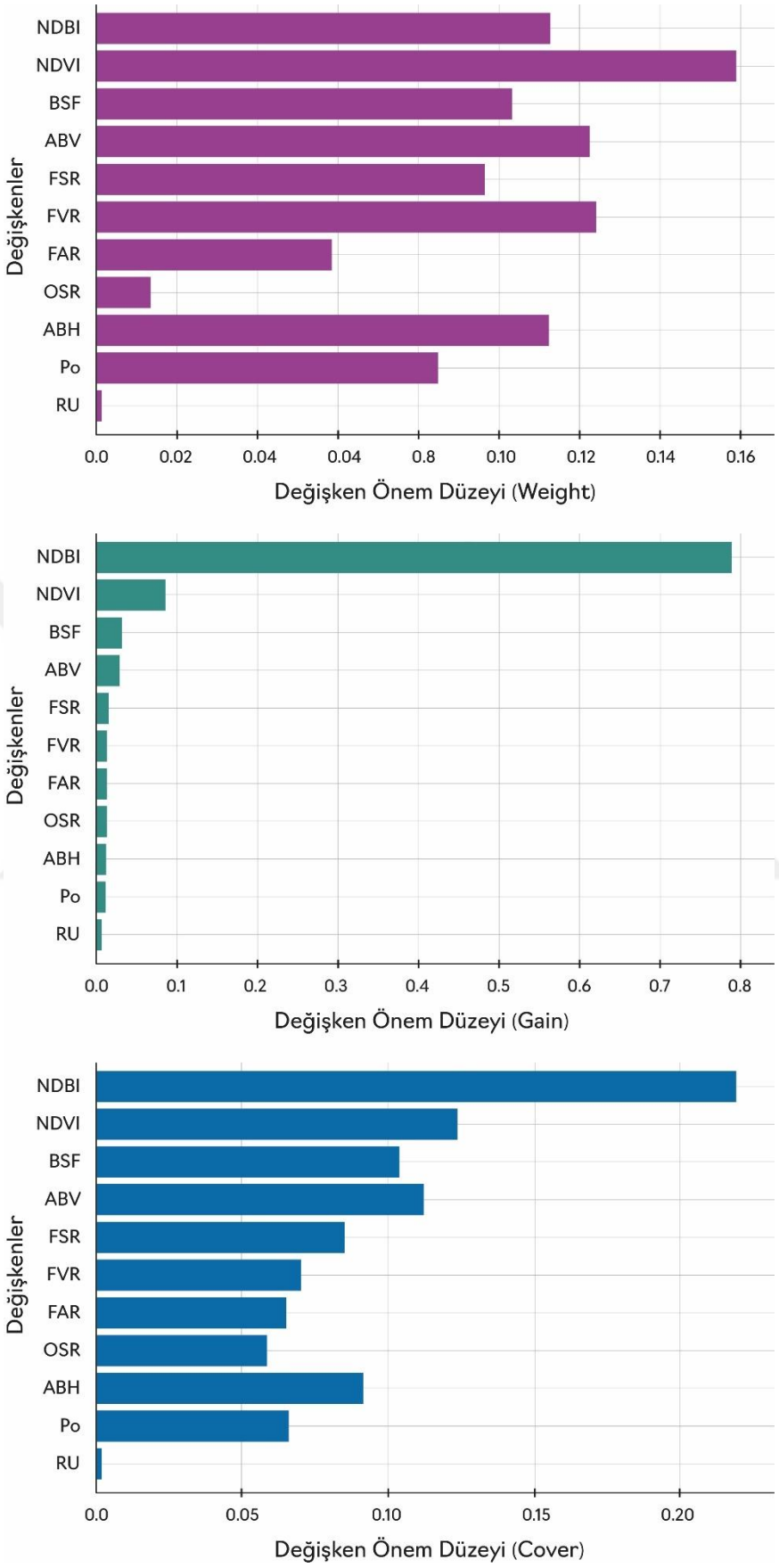
Tablo 4.22 XGBoost regresyon modeline ait performans göstergeleri

Model Performans Göstergeleri	**Eğitim Verisi Değerleri**	**Doğrulama Verisi Değerleri**
R^2 *(R-Squared)*	0.69	0.65
Düzeltilmiş R^2 (*Adhusted* R^2)	0.69	0.65
Ortalama Mutlak Hata *(Mean Absolute Error-MAE)*	1.09	1.15
Ortalama Mutlak % Hata *(Mean Absolute Percentage Error-MAPE)*	3.29	3.47
Kök Ortalama Kare Hata *(Root Mean Square Error-RMSE)*	1.40	1.48
Anlamlılık Düzeyi *(p-value)*	0.000	0.000
Standart Hata *(Standart Error)*	0.001	0.003

XGBoost regresyon modelinde, mekânsal morfolojik parametrelerin kentsel sıcaklık değerleri üzerindeki önem düzeylerinin değerlendirilmesinde gain, cover ve weight göstergeleri kullanılmaktadır (Şekil 4.28). Elde edilen bulgular incelendiğinde NDBI'ın en yüksek gain (0.768) ve cover (0.220) değerine sahip parametre olduğu görülmektedir (Tablo 4.23). Bu durum yapılaşma yoğunluğunun kentsel sıcaklık değerleri üzerindeki en baskın morfolojik parametre olduğunu ve modelin doğruluğunun arttırılmasında en yüksek katkıyı sağladığını göstermektedir. NDVI ise ikinci önemli parametre olarak dikkat çekmektedir. Gain değeri 0.085, cover değeri 0.124 ve weight değeri 0.160 olan NDVI, kentsel sıcaklık üzerindeki soğutma potansiyeli ile modele yüksek katkı sağlamaktadır. NDVI 'ın weight değerinin NDBI'dan daha yüksek olması, bitki örtüsü yoğunluğunun kentsel sıcaklıkların tahmin edilme sürecinde daha sık karar verme kriteri olarak kullanıldığını ifade etmektedir. ABV, FVR, ABH ve BSF parametrelerinin kentsel sıcaklıkların genel tahmini konusunda NDBI ve NDVI kadar katkı sağlamasalar da karar verme kriteri olarak önemli rol oynamaktadırlar. RU parametresi, tüm önem göstergelerinde en düşük değere sahiptir. Bu durum RU'nun kentsel sıcaklıkların tahmin edilmesinde etkili olmadığı anlamına gelmektedir.

Tablo 4.23 XGBoost regresyon modelinde mekânsal morfoloji parametrelerinin kentsel sıcaklık değerleri üzerindeki önem düzeyleri

Değişkenler	**Gain**	**Cover**	**Weight**
NDBI	0.768022	0.220196	0.114321
NDVI	0.085550	0.124732	0.160717
BSF	0.032788	0.103866	0.104459
ABV	0.029652	0.112863	0.124045
FSR	0.016023	0.085307	0.097791
FVR	0.014445	0.070536	0.125712
FAR	0.013742	0.065489	0.059453
OSR	0.013679	0.058491	0.013752
ABH	0.013586	0.092174	0.113766
Po	0.012512	0.066346	0.085984
RU	0.000000	0.000000	0.000000



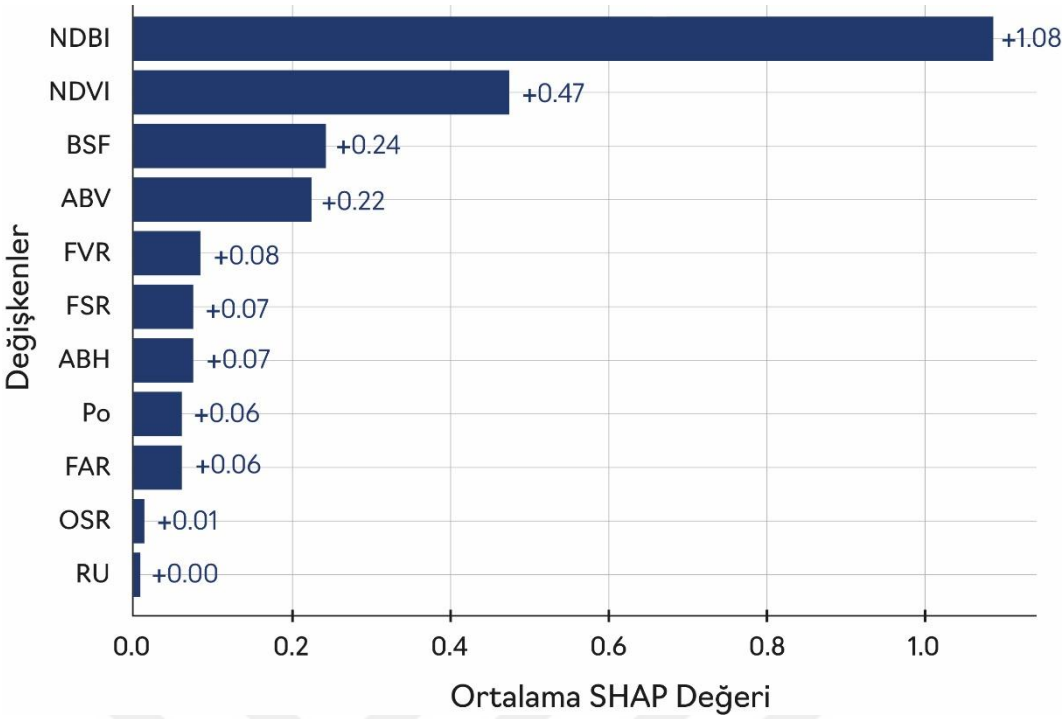
Şekil 4.28 XGBoost regresyon modelinde mekânsal morfoloji parametrelerinin kentsel sıcaklık değerleri üzerindeki önem düzeyleri

4.6.2 SHAP Analizi Sonuçları

SHAP analizi, XGBoost regresyon modeli kapsamında elde edilen sonuçların yorumlanabilmesi amacıyla uygulanmış ve her bir mekânsal morfoloji parametresinin kentsel sıcaklık varyasyonları üzerindeki etkisi Shapley değerleri hesaplanarak incelenmiştir. Bu analiz sonucunda, global ve yerel olmak üzere iki farklı SHAP değeri elde edilmiştir. Global SHAP değerleri, her bir mekânsal morfolojik parametrenin diğer parametrelere oranla kentsel sıcaklık varyasyonları üzerindeki ortalama mutlak katkısının büyüklüğünü ifade etmektedir.

Elde edilen bulgular incelendiğinde (Şekil 4.29), NDBI'ın, +1.08 değeriyle kentsel sıcaklık üzerinde en yüksek etkiye sahip parametre olduğu belirlenmiştir. Bu durum, yapılaşma yoğunluğunun kentsel sıcaklık varyasyonlarının tahmin edilmesinde baskın ve belirleyici bir rol oynadığını ifade etmektedir. NDBI'ı takiben en yüksek etkiye sahip diğer parametre ise +0.47 değeriyle NDVI'dır. Bitki örtüsü yoğunluğu da yapılaşma yoğunluğu kadar güçlü bir etkiye sahip olmasa da kentsel sıcaklık varyasyonlarının tahminlerini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu doğrultuda hem NDBI hem de NDVI modelin en kritik parametrelerini oluşturmaktadır.

BSF ve ABV ise sırasıyla +0.24 ve +0.22 değerleriyle kentsel sıcaklık tahminleri üzerinde orta düzeyli etkiye sahip parametreler olarak belirlenmiştir. Söz konusu parametreler, modelin kentsel sıcaklık tahminlerinde etkili ancak baskın değildir. FVR, FSR, ABH, Po ve FAR parametreleri ise +0.08 ve +0.06 aralığında değişen SHAP değerleriyle kentsel sıcaklık üzerinde düşük bir etkiye sahiptir. Tespit edilen değerler (+0.08 ile +0.06 aralığı), modelin tahmin sürecinde bu parametreleri kullandığı ancak kentsel sıcaklık tahmini üzerinde ortalama etkisinin sınırlı olduğunu göstermektedir. RU ve OSR parametrelerine ait değerler incelendiğinde ise her iki parametrenin de diğer parametrelere kıyasla kentsel sıcaklık tahminleri üzerinde görece düşük bir etkiye sahip oldukları anlaşılmaktadır.



Şekil 4.29 Global ortalama mutlak SHAP değerleri

Global SHAP değerleri, mekânsal morfolojik parametrelerin yalnızca ortalama mutlak değerlerini yansıttığı için bu parametrelerin tahmin edilen kentsel sıcaklık değerleri üzerindeki etki yönü anlaşılamamaktadır. Bu nedenle, söz konusu parametrelerin kentsel sıcaklık değerleri üzerindeki etkilerinin hem büyüklüğünü hem de yönünü (pozitif-negatif) kapsamlı bir şekilde değerlendirebilmek amacıyla yerel SHAP değerlerinden yararlanılmıştır. Yerel düzeyde yapılan bu analizde, mekânsal morfolojik parametrelere ait veri seti yüksek değerlerden (kırmızı) düşük değerlere (mavi) doğru renklendirilmiş ve karşılık geldiği SHAP değerine göre pozitif veya negatif etkide bulunma durumu ortaya koyulmuştur.

Yerel SHAP değerleri incelendiğinde (Şekil 4.30), tahmin edilen kentsel sıcaklık değerleri üzerinde en belirgin etkiye sahip olan mekânsal morfoloji parametresinin NDBI olduğu tespit edilmiştir. NDBI parametresine ait yüksek değerlerin büyük ölçüde pozitif SHAP bölgesinde yoğunlaştığı görülmektedir. Bu durum, yapılaşma yoğunluğunun kentsel sıcaklık üzerinde pozitif yönlü bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Söz konusu parametrenin pozitif etkisi, yoğun yapılaşmanın görüldüğü LCZ tipolojilerindeki sıcaklığın artma eğiliminde olduğunu göstermekte olup aynı zamanda NDBI'ın sıcaklık üzerindeki pozitif etkisinin de daha baskın olduğunu doğrulamaktadır. İkinci en belirgin etkiye sahip parametre ise NDVI'dır.

NDVI'a ait yüksek değerler negatif SHAP bölgesinde yoğunlaşmaktadır. Bu durum LCZ tipolojilerindeki artan bitki örtüsü yoğunluğunun evapotranspirasyon ve gölgeleme gibi etkileri nedeniyle kentsel sıcaklık üzerinde negatif bir etkiye sahip olup sıcaklığı azaltma eğiliminde olduğunu göstermektedir.

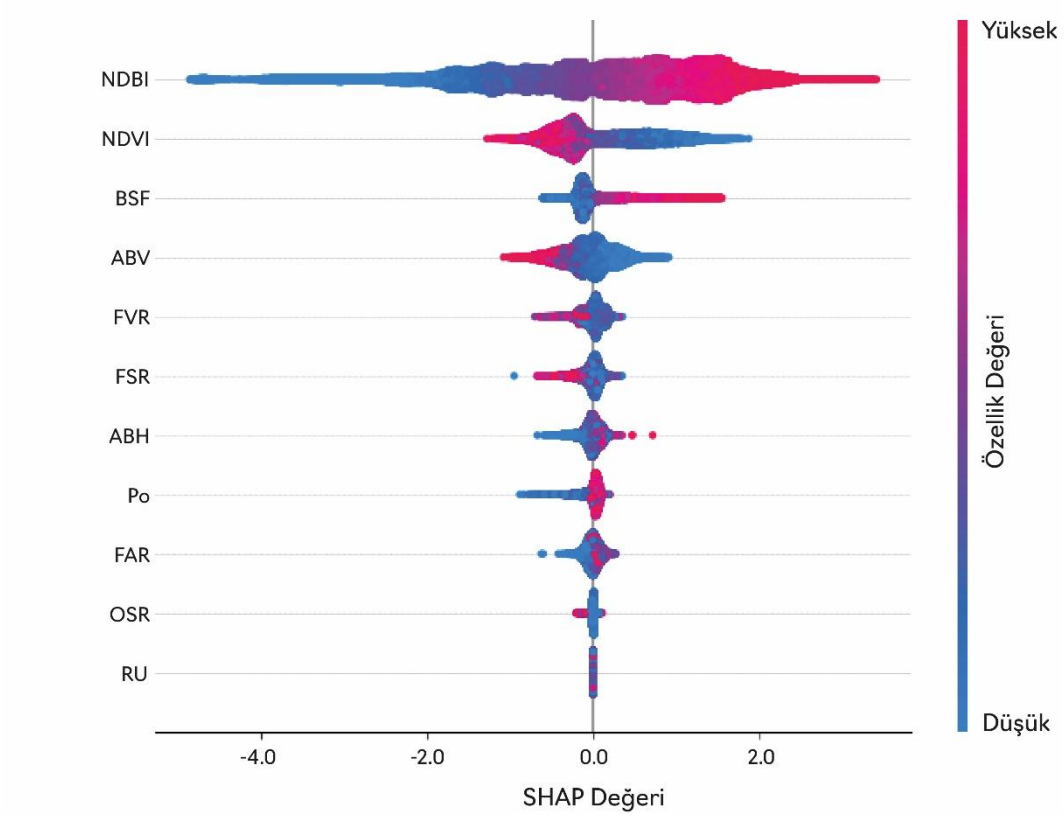
Bina yüzey alanı yoğunluğunu ifade eden BSF parametresi incelendiğinde, BSF değeri artıkça SHAP değerinin de artığı görülmektedir. Bu durum bina taban alanı yoğunluğunun kentsel sıcaklık üzerinde pozitif yönlü bir etkisinin olduğunu ifade etmektedir. Söz konusu parametreye ait düşük değerlerin özellikle negatif SHAP bölgesinde yoğunlaşması, bina yüzey alanın yoğunluğunun kentsel sıcaklık üzerindeki negatif etkisinin pozitif etkiye oranla daha baskın olduğunu ortaya koymaktadır. Ortalama bina hacmini ifade eden ABV parametresine ait yüksek ve düşük değerler incelendiğinde hem pozitif hem de negatif SHAP bölgesinde benzer yoğunlukta bir dağılım sergilediği görülmektedir. Dolayısıyla ortalama bina hacminin kentsel sıcaklık üzerindeki etkisi bağlama duyarlı olup, farklı örnek alanların mekânsal dinamiklerine bağlı olarak etki yönü değişiklik gösterebilmektedir.

FVR, FSR, ABH, FAR ve Po parametrelerine ait yüksek ve düşük değerlerin genel olarak sıfır SHAP değeri etrafında kümelendiği ve hem pozitif hem de negatif SHAP bölgesinde benzer bir yoğunlukta dağılım gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu durum, söz konusu mekânsal morfolojik parametrelerin kentsel sıcaklık üzerindeki etkisinin bağlama duyarlı olarak değişkenlik gösterdiğini ve bu bağlamda ikincil düzeyde bir etkiye sahip olduklarını ortaya koymaktadır. Söz konusu parametrelerin ikincil düzeyde etkili olması, tek başlarına kentsel sıcaklık varyasyonlarını açıklamada yeterli olmadıklarını ancak, NDBI, NDVI, BSF ve ABV gibi ana belirleyici parametrelerle birlikte etki göstererek bu etkilerin pozitif veya negatif yönde desteklenmesini sağladıklarını göstermektedir.

Özellikle bazı yüksek ABH değerlerinin negatif SHAP değerleriyle ilişkilendirilmesi, artan bina yüksekliğinin gölgeleme etkisi sayesinde kentsel sıcaklıkları düşürebileceğini vurgulanmaktadır. Kentsel dokudaki gözenekliliği ifade eden Po parametresine ait değerler incelendiğinde ise yüksek gözeneklilik oranına sahip değerlerin genel olarak sıfıra yakın pozitif SHAP bölgesinde kümelendiği tespit edilmiştir. Genel olarak bu parametrenin kentsel sıcaklık

varyasyonları üzerindeki etkisi düşük olsa da yüksek gözeneklilik oranını düşük gözeneklilik oranına göre daha güçlü bir etkiye sahiptir. Bu durum LCZ tipolojilerindeki gözenekliliği sağlayan açık alanların niteliği (su yüzeyi, geçirimli/geçirimsiz yüzey vb.) ile doğrudan ilişkilidir. Öyle ki kentsel dokulardaki gözeneklilik oranı yüksek olsa bile açık alanlarda sert ve geçirimsiz yüzeylerin yoğun olarak bulunması kentsel sıcaklıkları artırma eğilimindedir.

Son olarak, OSR ve RU parametrelerine ait SHAP değerlerinin büyük oranda sıfıra yakın bölgelerde yoğunlaştığı dikkat çekmektedir. Bu durum hem açık alan oranı hem de mutlak pürüzlülük oranı parametrelerinin tahmin edilen kentsel sıcaklık üzerinde etki yönü ve büyüklüğü açısından belirgin bir değişim göstermediğini ortaya koymaktadır. Dolayısıyla bu parametreler kentsel sıcaklık varyasyonlarını açıklama konusunda sınırlı düzeyde olup modelde ikinci düzeyde etkili veya bağlama duyarlı parametreler olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 4.30 Yerel SHAP değerleri

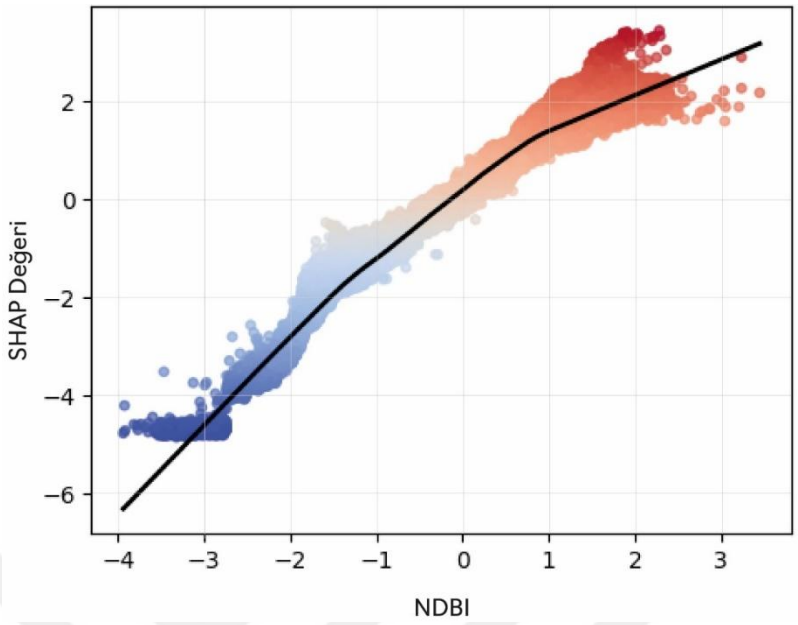
SHAP bağımlılık grafikleri (SHAP Dependence Plots), her bir mekânsal morfoloji parametresi ile bu parametreye ait SHAP değerleri arasındaki lineer ve lineer

olmayan ilişkileri ortaya koymaktadır. Söz konusu grafiklerin yatay ekseninde her bir mekânsal morfolojik parametrenin gerçek değeri, dikey ekseninde ise bu parametrenin kentsel sıcaklık üzerindeki etkisini gösteren SHAP değerleri yer almaktadır. Tez çalışması kapsamında, 11 farklı mekânsal morfoloji parametresine ait SHAP bağımlılık grafiği incelenmiş olup, sadece NDBI ve BSF parametrelerinin kentsel sıcaklık ile arasında lineer bir ilişkinin olduğu tespit edilmiştir.

NDBI parametresine ait SHAP bağımlılık grafiği incelendiğinde, kentsel sıcaklık ile yapılaşma yoğunluğu arasında pozitif yönlü ve güçlü bir lineer ilişkinin olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.31). NDBI değeri arttıkça SHAP değerleri de düzenli bir artış sergilemiştir. Bu durum, yapılaşma yoğunluğunun arttığı LCZ tipolojilerindeki sıcaklık değerlerinin de sistematik bir biçimde yükseldiğini göstermektedir. Mekânsal morfoloji parametrelerinin kentsel sıcaklık üzerindeki genel etkisini gösteren eğri çizgisi, grafik boyunca yukarı yönlü ve düz bir şekilde devam etmektedir. Bu durum, grafikte yön değişiminin gözlemlenmediğini ve artışın kararlı bir eğilimle devam ettiğini ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, yapılı çevrenin kentsel sıcaklık üzerindeki arttırıcı etkisi belirgin bir şekilde gözlemlenmektedir. BSF ve FAR gibi yoğunluğu tanımlayan mekânsal morfoloji parametreleri de NDBI değerini arttırmakta ve dolaylı olarak yapılaşma yoğunluğunun kentsel sıcaklık üzerindeki pozitif yönlü etkisine katkıda bulunmaktadır. Söz konusu bu parametreler, geçirimsiz yüzey oranını arttırarak kentsel dokuda ısı birikimini tetiklemekte ve sıcaklık üzerinde arttırıcı etki sergilemektedir.

Yapılaşma yoğunluğunun kentsel sıcaklık üzerindeki etkisini inceleyen çeşitli çalışmalar (Cetin vd., 2024; Ghosh vd., 2022; Ghouri vd., 2022; Zhu vd., 2023), tez kapsamında elde edilen bulgularla paralellik göstermektedir. Örneğin, Çin'in Xiamen Adası'nda yürütülen bir araştırmada mekânsal morfolojik yapı ile kentsel sıcaklıklar arasındaki ilişki analiz edilmiş ve yapılaşma yoğunluğu artışının kentsel sıcaklıkları anlamlı düzeyde arttırdığı ortaya koyulmuştur (Zhu vd., 2023). Benzer şekilde Pakistan'ın Vehari kentinde yapılan bir başka araştırmada ise NDBI, NDVI ve NDBaI gibi uzaktan algılama parametrelerinin yıllara göre kentsel sıcaklık üzerindeki etkileri incelenmiş ve NDBI parametresi ile kentsel sıcaklık arasında güçlü pozitif bir korelasyon tespit edilmiştir (Ghouri vd., 2022). Bu bulgular, yapılaşmış yüzeylerin arttıkça kentsel sıcaklıkların da anlamlı bir şekilde artış

gösterdiğini ve NDBI'ın sıcaklık varyasyonlarını anlamada belirleyici bir parametre olduğunu teyit etmektedir.



Şekil 4.31 NDBI SHAP bağımlılık grafiği

Yapılaşma yoğunluğu ve geçirimsiz yüzey oranı yüksek olan kentsel dokular güneş radyasyonunu daha fazla absorbe ederek kentsel sıcaklıkların artmasına neden olmaktadır. Söz konusu bu artışın kontrol altına alınabilmesi ve azaltılabilmesi için çeşitli mekânsal müdahalelere ihtiyaç duyulmaktadır. Yoğun yapılaşmış kompakt dokularda, bina çatıları kentsel mekânın büyük bir bölümünü oluştururken serbest zemin oldukça kısıtlıdır (Santamouris, 2014). Bu durum, çatıları kentsel sıcaklıkların azaltılması konusunda önemli müdahale alanlarından biri haline getirmektedir. Literatürde vurgulandığı üzere düşük albedo değerine sahip kentsel yüzeyler, absorbe edilen güneş radyasyon miktarını arttırmakta ve kentsel sıcaklıkların yükselmesine neden olmaktadır (Akbari, 2009). Bu doğrultuda, bina ve çatı yüzeylerinde albedosu yüksek serin ve yansıtıcı yüzeylerin kullanılması gerektiğini vurgulamaktadır (Santamouris, 2014). Bu öneriyi destekleyen Tokyo merkezli bir çalışmada, albedo değeri yüksek (0.8) serin çatılar ile yeşil çatıların yaz aylarında hissedilir ısı emisyonlarını sırasıyla %13 ve %15 oranında azalttığı tespit edilmiştir (Dong & Asawa, 2025). Benzer şekilde, geleneksel kaldırım materyallerinin de güneş radyasyonunu %65-%90 oranında absorbe ettiği belirtilmektedir (EPA, 2012). Bu bağlamda, geleneksel yüzey materyalleri yerine gözenekli yapısı nedeniyle sıcaklıkların düşürülmesini sağlayan serin kaldırım

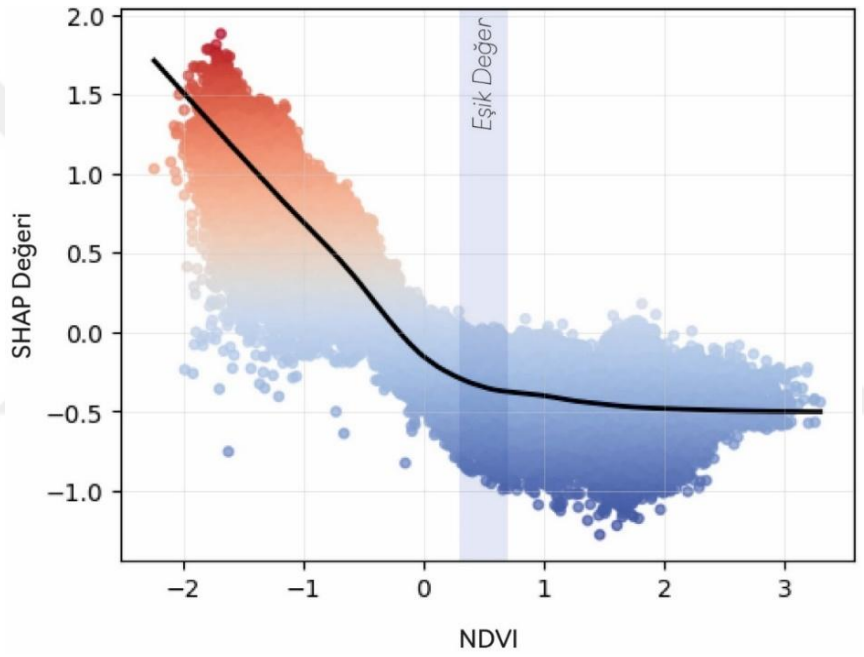
(cool pavement) uygulamalarının yapılması önerilmektedir (Dong & Asawa, 2025; EPA, 2012). Böylelikle, yüzeyler güneş radyasyonunun büyük bir kısmını yansıtarak sıcaklığın düşmesini sağlayacaktır.

Kentsel sıcaklıkların azaltılması ve termal konforun iyileştirmesi konusundaki önemli bir diğer müdahale alanı ise bitki örtüsü yoğunluğunun ve yeşil altyapı unsurlarının arttırılmasıdır. Ancak, kompakt dokulara sahip kentsel alanlarda mevcut arazi yetersizliğinden dolayı uygulama istenilen düzeyde olamamakta ve sokak kanyonu ölçeğinde mikro-mekânsal müdahalelerin geliştirilmesini gerekli kılmaktadır. Bu bağlamda sokak kanyonları ağaçlandırılarak gölgeleme ve evapotranspirasyonla sağladıkları soğuma etkisinden faydalanılmalıdır. Söz konusu bu etki, aynı zamanda binaların enerji talebinin azaltılmasına, yaya termal konforunun iyileştirilmesine ve CO_2 emisyonlarının azaltılmasına da katkı sağlamaktadır (Akbari, 2009; Lobaccaro & Acero, 2015; Zhou vd., 2020). Özellikle sıcak iklimsel koşulların etkili olduğu yaz aylarında bitki örtüsünün sağladığı mikro klimatik etkiler daha belirgin halde hissedilmektedir. Ancak, bitki örtüsü oranının arttırılmasının mümkün olmadığı dokularda, dikey bahçe ve yeşil çatı gibi alternatif yeşil altyapı uygulamaları yapılmalıdır.

NDVI'a ait SHAP bağımlılık grafikleri incelendiğinde, güçlü, negatif ve lineer olmayan bir ilişki gözlemlenmiştir. NDVI değeri arttıkça SHAP değerlerinin genel olarak azalma eğilimi sergilediği tespit edilmiştir. Bu durum, bitki örtüsü yoğunluğunun sıcaklık üzerinde belirgin bir düşürücü etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Ancak, NDVI'ın 0.5 civarındaki değerlerin üzerine çıktığı durumlarda SHAP değerlerinin sabitlenme eğilimi gösterdiği saptanmıştır (Şekil 4.32). Dolayısıyla bitki örtüsü yoğunluğunun bu değerin üzerine çıktığı durumlarda serinletici etkisinin doygunluğa ulaştığı ve ek bir soğutma etkisi sağlamadığı anlaşılmaktadır.

Elde edilen bulgular, bitki örtüsü yoğunluğunun kentsel sıcaklık üzerindeki serinletici etkisini ortaya koyan diğer çalışmalarla benzerlik göstermektedir (Al-Saadi vd., 2020; Cheng vd., 2015; Ghosh vd., 2022; Ghouri vd., 2022; Liu vd., 2023; Zhu vd., 2023). Ghouri vd., (2022) ve Cetin vd., (2024) tarafından yapılan araştırmalarda, bitki örtüsü yoğunluğu ile kentsel sıcaklıklar arasında güçlü bir negatif korelasyon tespit edilmiş ve NDVI değeri arttıkça kentsel sıcaklık

değerlerinin azaldığı vurgulanmıştır. Liu vd., (2023) tarafından yapılan bir başka araştırmada da benzer sonuçlar elde edilmiş ve bitki örtüsü yoğunluğundaki artışın kentsel sıcaklıkları azaltma eğiliminde olduğu ortaya koyulmuştur. Söz konusu bu eğilimin temel nedeni ise bitki örtüsünün güneş radyasyonunu hem fotosentez işlevi hem de terleme süreci için kullanarak doğrudan zemine ulaşan güneş radyasyon miktarını azaltması ve kentsel sıcaklığın düşürmesi olarak gösterilmiştir (Liu vd., 2023). Singapur'da yapılan farklı bir çalışmada ise gölgeleme etkisi olan ve olmayan bitki türleri ile çeşitli yapay yüzeylerin kentsel sıcaklık üzerindeki etkileri araştırılmış ve bunun sonucunda bitkilerin gölgeleme etkisi olmasa bile yapay yüzeylere oranla daha serin olduğu ortaya koyulmuştur (Tan vd., 2021).



Şekil 4.32 NDVI SHAP bağımlılık grafiği

Literatürde, bitki örtüsünün zemine ulaşan güneş radyasyonunu %95 oranında engelleyebildiği (Akbari, 2009) ve kentsel sıcaklıkları ise 5°C'ye kadar düşürebildiği (EPA, 2008b) belirtilmektedir. Bu kapsamda yüksek kentsel sıcaklık gösteren LCZ tipolojilerinde gölgeleme etkisi ve radyasyon absorbsiyonu yüksek geniş yapraklı bitkisel elemanlar kullanılmalıdır (Erdem Okumuş, 2022). Ancak yüksek bina yoğunluğu nedeniyle bitki örtüsü oranının arttırılmasının mümkün olmadığı durumlarda daha az toprak ve alana ihtiyaç duyan sarmaşık türleri tercih edilmesi önerilmektedir. Söz konusu türler binaların dış duvarlarını gölgeleyerek kentsel sıcaklıkların azaltılmasında ve binanın ısı kazancı sağlamasında etkili

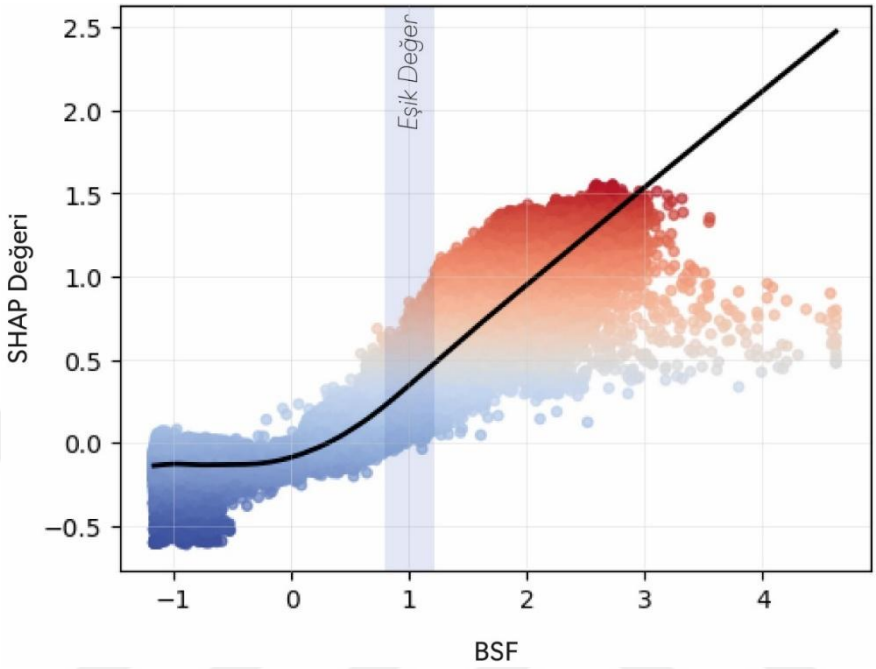
olmaktadır (EPA, 2008b). Belirli bir yeşil alan oranına sahip olan ve yine de yüksek sıcaklık eğilimine sahip LCZ tipolojilerinde ise farklı müdahalelerin uygulanması gerekmektedir. Bu tür LCZ tipolojilerinde, yeşil alanların konumlanışı çevresindeki binaların konfigürasyonuyla birlikte ele alınmalıdır. Ayrıca yalnızca çim ya da kısa boylu bitkisel elemanlar yerine, yerli ağaç türleri kullanılarak çok katmanlı bitkilendirme sistemlerinin kurgulanmalıdır.

BSF ve kentsel sıcaklık arasındaki ilişki incelendiğinde, pozitif yönlü ve kuvvetli bir lineer ilişkinin bulunduğu gözlemlenmiştir. Bina yoğunluğu arttıkça SHAP değerlerinin de artış gösterdiği ve bu artışın özellikle 1.0 değerinden itibaren belirgin şekilde devam ettiği tespit edilmiştir (Şekil 4.33). Bu durum, yüksek bina yoğunluğuna sahip kompakt kent formunun, kentsel sıcaklıklar üzerinde yükseltici bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Yüksek BSF değeri, kentsel dokulardaki gözeneklilik oranının (Po) ve bitki örtüsü yoğunluğunun (NDVI) azalmasına neden olmaktadır. Düşük gözeneklilik oranı kompakt ve yoğun yapılaşmanın bir göstergesi olup yüksek BSF değerlerine işaret etmektedir. Bu durum, kentsel dokulardaki hava sirkülasyonunu engelleyerek ısın hapsolmasına ve BSF'nin sıcaklık üzerindeki pozitif etkisinin artmasına neden olmaktadır. Aynı zamanda, BSF değerinin artmasına paralel olarak doğal bitki örtüsüne sahip yüzeylerin kentsel doku içindeki payı azalmaktadır. Bu durum, bitki örtüsünün evapotranspirasyon yoluyla sağladığı soğutma etkisini zayıflatarak kentsel sıcaklıkların artmasına yol açmaktadır.

Erdem Okumus & Akay, (2025)'ın İstanbul örnek alanında yaptığı bir çalışmada, yatay bina yoğunluğunun kentsel sıcaklık değerleri üzerinde pozitif yönlü ve lineer olmayan bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bina yoğunluğu değerlerinin arttıkça kentsel sıcaklıkların da arttığı ancak belirli bir noktadan sonra bu etkinin durağanlaştığı ve sıcaklıklar üzerinde ek bir artışa neden olmadığı tespit edilmiştir. Bina yoğunluğu varyasyonlarındaki bu artışın güneş radyasyonuna maruz kalmayı arttırdığı ve hava akımlarını engellediği gerekçesiyle kentsel sıcaklıklar üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğu vurgulanmıştır. Benzer şekilde, İstanbul'da yaptığı başka bir çalışmada da yatay bina yoğunluğu ile kentsel sıcaklık varyasyonları arasında pozitif yönlü ve anlamlı bir korelasyon olduğu tespit edilmiş ve yüksek bina yoğunluğuna sahip kentsel dokularda sıcaklıkların artma eğilimi gösterdiği belirtilmiştir (Erdem Okumus & Terzi, 2021). Çin'in Fuzhou kentinde yapılan bir

diğer çalışmada ise yatay bina yoğunluğundaki artışın gündüz saatlerinde kentsel sıcaklıklar arttırıcı yönde etkili olduğu, ancak gece saatlerinde bu etkinin tersine dönerek kentsel alanları serinletici bir etki yarattığı ifade edilmektedir (Z. Lin vd., 2024).



Şekil 4.33 BSF SHAP bağımlılık grafiği

SHAP analizinden elde edilen bulgular, BSF değerinin 1.0 ve üzerine çıktığı durumlarda kentsel sıcaklıkların belirgin bir şekilde arttığını ortaya koymaktadır. Bu doğrultuda, yüksek BSF değerine sahip LCZ tipolojilerinde kentsel sıcaklıkları azaltmaya yönelik ilk müdahale yapı yoğunluğunun düşürülmesi olmalıdır. Özellikle mevcut kentsel dokuların dönüştürülmesi veya yeni gelişme alanlarının planlanmasında düşük BSF değerinin elde edilebilmesi için yapı taban alanlarının azaltılarak kat yüksekliklerinin arttırılması gerekmektedir (Erdem Okumuş, 2022). Bu uygulama, toplam inşaat alanı oranını korurken daha geçirgen dokuların oluşmasına da katkı sağlamaktadır. Söz konusu müdahale biçimi zemine ulaşan net güneş radyasyon miktarını azaltmakta ve kentsel doku içinde geniş gölgeli alanların oluşmasını desteklemektedir (Z. Zheng vd., 2019).

Sadece bina yüksekliklerini arttırarak kentsel sıcaklıkların azaltımını sağlamak tek başına yeterli bir çözüm sunmamaktadır. Özellikle Marmara Denizi kıyısında bulunan ve yüksek BSF değerine sahip LCZ tipolojilerinde, yoğun bina dokusu denizden gelen doğal hava akımlarını kesintiye uğratmakta ve bu nedenle soğuma

etkisi kentsel dokunun iç bölgelerine nüfuz edememektedir (Erdem Okumus & Terzi, 2022; Ögçe & Erdem Kaya, 2024). Bu bağlamda yapılan çalışmalar, deniz, göl ve akarsu gibi büyük su kütlelerinin çevresinde soğuma etkisinin 30 m-9.2 km arasında değişen mesafelerde hissedilebildiğini ortaya koymuştur (F. Guo vd., 2023; Hathway & Sharples, 2012; J. Yang vd., 2022; Zhou vd., 2020). Bu nedenle yüksek BSF değerine sahip LCZ tipolojilerinin doğal soğuma etkisinden azami düzeyde yararlanabilmeleri için hava akımlarını yönlendiren ve düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip rüzgâr koridorlarının oluşturulması gerekmektedir (Zhou vd., 2020). Söz konusu bu koridorların oluşturulmasında, alandaki hâkim rüzgâr yönünün belirlenerek binaların mekânsal konfigürasyonlarının ona göre yönlendirilmesi, bitişik nizam yerine ayrık nizam yerleşim düzeni oluşturulması, binalar arası mesafelerin yeterli düzeyde tutulması, bina yüksekliklerinin kademelendirilmesi ve yüzey pürüzlülüğün azaltılması gibi özelliklere dikkat edilmesi gerekmektedir (Bing vd., 2021; EBRD, 2019).

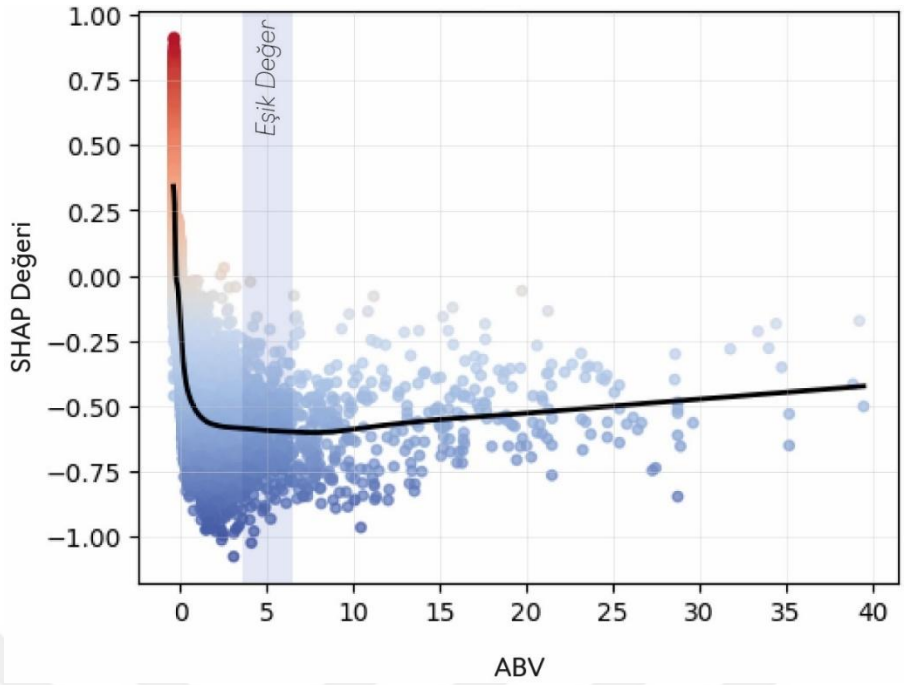
Bu alandaki bir diğer önemli müdahale alanı ise geçirimli yüzey oranının arttırılmasıdır. Nitekim, yoğun yapılaşmaya bağlı olarak artan sert ve geçirimsiz yüzeyler diğer yüzeylere oranla güneş radyasyonunu daha fazla absorbe etmekte ve daha uzun dalga boylu güneş radyasyonu yaymaktadır (Chen vd., 2020; Quanz vd., 2018). Bu bağlamda, özellikle donatı alanı bahçeleri, kamuya açık otoparklar ve geniş otoyol kenarları gibi geçirimsiz yüzeylerin baskın olduğu alanlarda yağmur suyu bahçeleri, biyolojik hendekler, geçirgen zemin kaplamaları gibi yeşil altyapı temelli uygulamalar yapılarak hem su döngüsünün doğal süreçleri desteklenmeli hem de termal konfor iyileştirilmelidir. Söz konusu müdahalelere ek olarak sokak ve yapı ölçeğinde ise hem gölge etkisi yaratacak bitki örtüsünün hem de güneş ışınımını azaltacak düşük albedo değerine sahip çatı yüzeylerinin arttırılması gibi uygulamaların yapılması kentsel sıcaklıkların azaltılmasına önemli katkılar sağlayacaktır (Unal Cilek & Cilek, 2021).

ABV parametresine ait SHAP bağımlılık grafikleri incelendiğinde, negatif yönlü ve lineer olmayan bir ilişki söz konusudur. Grafik eğrisi incelendiğinde ters logaritmik bir yapıya sahip olduğu görülmektedir (Şekil 4.34). Bu eğri doğrultusunda, ABV parametresinin yaklaşık olarak 5.0 olduğu değer eşik olarak tanımlanmakta olup, bu değere kadar artan ortalama bina hacmi kentsel sıcaklık üzerinde negatif yönlü yani serinletici bir etki yaratmaktadır. Bu eşik değerden sonra ise SHAP değeri

artarak pozitif yönlü bir etkiye dönmektedir. Dolayısıyla ortalama bina hacmi küçük olan yapılar ile tanımlı geçirgen dokuların kentsel sıcaklıkları düşürdüğü, ancak hacim arttıkça sıcaklıkların da arttığı görülmektedir.

Yüksek bina hacmine sahip kentsel dokular, yoğun yapılaşma koşulları sebebiyle açık alan bakımından oldukça sınırlı bir yapıya sahiptir. Ortalama bina hacmindeki artış genel olarak yüksek taban alanı oranı (BSF) ve ortalama bina yüksekliğinin (ABH) eş zamanlı yükselmesiyle ortaya çıkmaktadır. Bu durum, söz konusu kentsel dokularda hem yatay hem de düşeyde yoğunluğu arttırarak düşük gözeneklilik (Po) oranına neden olmaktadır. Düşük gözeneklilik ise doğal hava sirkülasyonunu engelleyerek ısının yayılımını kısıtlamakta ve bu sebeple kentsel sıcaklıkların yükselmesine neden olmaktadır. Diğer yandan, ortalama bina hacminin artması, cephe alanının da (FSR) artmasına neden olmaktadır. Artan cephe alanı ise birim başına absorbe edilen güneş radyasyon miktarını yükselterek ortalama bina hacminin kentsel sıcaklık üzerindeki arttırıcı etkisini güçlendirmektedir.

Almanya'nın Berlin kentinde yapılan bir araştırmada bina hacmi, kanyon geometrisi, bina taban alanı gibi mekânsal morfolojik parametrelerin kentsel sıcaklıklar üzerindeki etkisi incelenmiş ve bina hacmindeki artışın kentsel sıcaklıkları ve ısı adası yoğunluğunu güçlü bir şekilde arttırdığını ortaya koymuştur (Y. Li vd., 2020). Çin'in Xi'an kentinde yapılan benzer bir diğer çalışmada ise bina hacmi ile kentsel sıcaklık arasında negatif bir korelasyon bulunduğu tespit edilmiş ve bina hacmindeki artışın kentsel sıcaklıkları azaltma eğiliminde olduğu vurgulanmıştır (Yuan vd., 2024).



Şekil 4.34 ABV SHAP bağımlılık grafiği

Ortalama bina hacminin kentsel sıcaklık üzerindeki yükseltici etkisinin azaltılması için yüksek bina hacmine sahip LCZ tipolojilerinde serbest plan ve hacim kontrollü emsal planlamaları gibi uygulama araçlarının kullanılması gerekmektedir. Bu doğrultuda, yüksek hacimli bina blokları yerine daha geçirgen bina formları benimsenerek kentsel dokudaki rüzgâr sirkülasyonu arttırılmalı ve ısı birikimin önüne geçilmelidir. Aynı zamanda literatürde yapılan çalışmalarda, çok katlı ve küçük hacim kombinasyonuna sahip bina formlarının kentsel sıcaklığı azaltma konusunda etkili olabileceği vurgulanmaktadır (Yuan vd., 2024). Bu tür bina formları hem ısı yayılımı yapan yüzey alanını sınırlandırmakta hem de binanın sağladığı gölgeleme etkisini arttırmaktadır. Bir diğer etkili müdahale alanı ise cephe tasarımlarında saçak, balkon vb. pasif gölgeleme elemanları kullanılarak, doğrudan gelen veya yansıyan güneş radyasyonlarının cepheye çarpmasını önleyerek kentsel sıcaklıkların azaltılmasıdır.

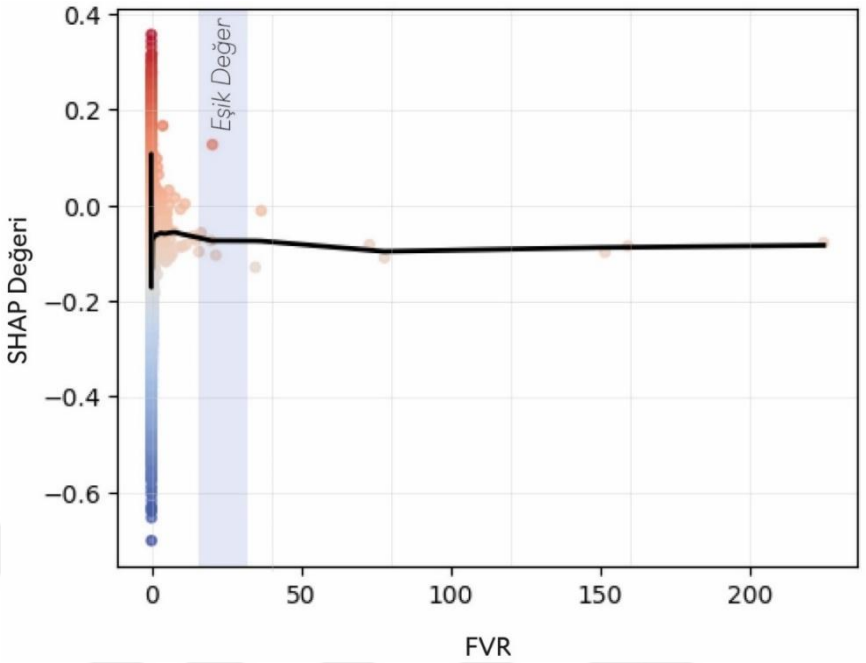
Geniş hacimli yapılar, kentsel doku içindeki rüzgâr sirkülasyonunu sınırlandırmakta ve yaya seviyesindeki hava hacmini kısıtlamaktadır. Bu durumun önüne geçmek amacıyla bina taban alan alanlarında geri çekmeler sağlanarak zemin seviyesindeki hava geçirgenliği arttırılmalı ve doğal rüzgâr sirkülasyonu teşvik edilmelidir (EBRD, 2019).

FVR parametresinin kentsel sıcaklık üzerindeki etkisine bakıldığında negatif yönlü, zayıf ve lineer olmayan bir ilişki tespit edilmiştir. FVR değerinin yaklaşık olarak 20-30 bandında olduğu durumda SHAP değerleri minimum seviyeye ulaşmakta ve negatif yönlü serinletici bir etki yaratmaktadır (Şekil 4.35). Bu değer aralığından sonra grafik eğrisi yatay bir hale gelerek kentsel sıcaklık üzerinde etkisi sabitlenmekte ve ek bir soğutma sağlamamaktadır. Bu doğrultuda, düşük FVR değerleriyle tanımlanan daha kompakt LCZ tipolojilerinin kentsel sıcaklık üzerinde sınırlı bir etki oluşturduğu, daha yüksek FVR değerlerinde ise bu etkinin stabilize olduğu söylenebilmektedir.

Düşük FVR değerleri, bina cephe alanının (FSR), bina hacme oranla (ABV) daha yavaş arttığını ve bu iki parametre arasındaki artışın, aynı oranda gerçekleşmediğini göstermektedir. Bu durum, daha kompakt bina formlarına işaret ederek binaların çevresiyle olan ısı alışverişini sınırlandırmaktadır. Nitekim, düşük FVR değerlerine sahip kentsel dokular, absorbe edilen güneş radyasyon miktarını azaltarak kentsel sıcaklıklar üzerinde düşürücü bir etki yaratabilmektedir. Öte yandan FSR değerinin artması, FVR değerini de yükselterek güneş radyasyonuna maruz kalan yüzey alanını artmasına neden olmakta; bu durum ise absorbe edilen ısı miktarını arttırarak kentsel sıcaklıkların yükselmesine katkı sağlamaktadır.

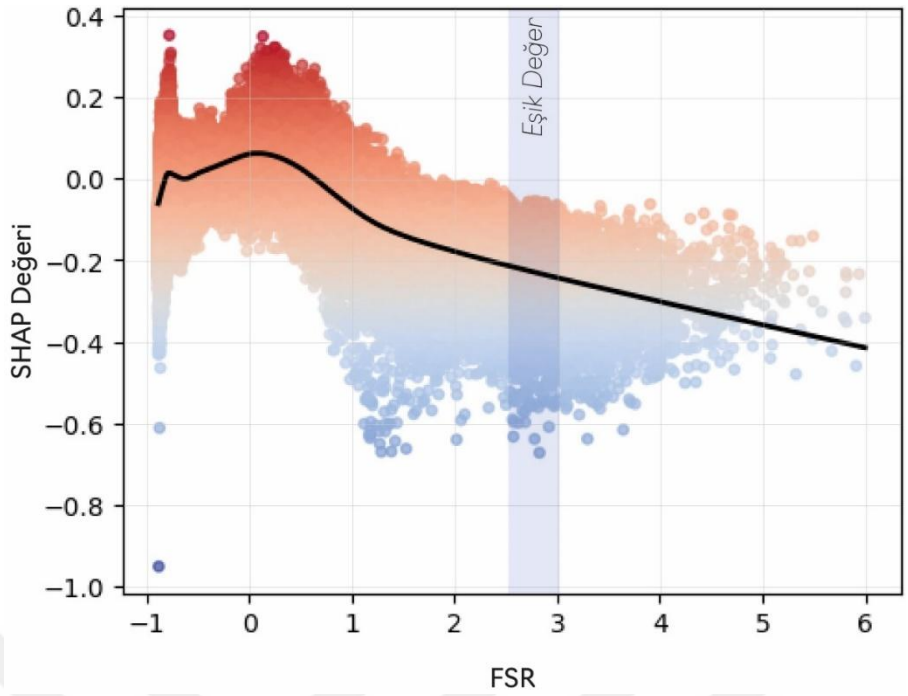
İstanbul örnek alanında gerçekleştirilen diğer çalışmalarda ise tez kapsamında elde edilen bulgulardan farklı olarak bina cephe hacim oranı ile kentsel sıcaklıklar arasında pozitif yönde bir korelasyon olduğu ve FVR değerinin artması durumunda kentsel sıcaklıkların da önemli ölçüde artış sergilediği ortaya koyulmuştur (Erdem Okumus & Terzi, 2021). Söz konusu çalışmada, bina cephe hacim oranının artması kentsel dokulardaki rüzgâr hızını azaltarak ve rüzgâr profillerini değiştirerek mikroklimatik dengenin bozulmasına ve kentsel sıcaklıkların artmasına neden olduğu vurgulanmaktadır (Erdem Okumus & Terzi, 2021; G. Guo vd., 2016; X. Yang & Li, 2015). Çin'in Pekin kentinde yapılan farklı bir çalışmada ise binaların yüzey hacim oranının arttığı daha kompleks/karmaşık yapılarda güneş radyasyonunu absorbe etme ve yansıtma potansiyeli artarak kentsel dokularda sıcaklık artışının meydana geleceği belirtilmektedir (Liu vd., 2023). Söz konusu bu artışın temel sebebi ise FVR değeri yüksek olan daha karmaşık yapıların kentsel dokularda hava akışını engelleyerek binalar arası ısı transferini arttırması ve bina

kütlesi ile çevresi arasındaki ısı alışverişini azaltmasıdır (Liu vd., 2023; Q. Wang vd., 2019).



Şekil 4.35 FVR SHAP bağımlılık grafiği

SHAP bağımlılık grafiği kapsamında FSR parametresi incelendiğinde, kentsel sıcaklık ile arasında lineer olmayan bir ilişki gözlemlenmiştir. FSR'nin 2.5-3.0 bandına kadar olduğu değerlerde SHAP değeri de artan bir eğilim göstermekte ve sıcaklığı artırıcı bir etkiye sahip olmaktadır (Şekil 4.36). Bu eşik değerin aşıldığı durumlarda ise FSR değerinin artmasına rağmen SHAP değerinin düşmeye başladığı ve sıcaklığı azaltarak serinletici bir etkiye sahip olduğu anlaşılmaktadır. Dolayısıyla ortalama cephe yüzey miktarı arttıkça kentsel sıcaklık değeri belirli bir eşik değere (2.5-3.0) kadar artma eğilimi göstermektedir. Bu kapsamda ortalama cephe yüzey miktarı yüksek ve geçirgenliği sınırlı LCZ tipolojilerinde sıcaklıkların daha yüksek olduğu söylenebilmektedir.



Şekil 4.36 FSR SHAP bağımlılık grafiği

FSR ve FVR değerindeki artışa bağlı olarak meydana gelen yüksek kentsel sıcaklıkların ve enerji tüketiminin azaltılmasına yönelik olarak belirlenen temel mekânsal stratejilerden biri, karmaşık geometrilere sahip bina formlarının yerine daha kompakt (örneğin dikdörtgen, kare vb.) yani FVR değeri düşük bina formlarının tercih edilmesidir. Binalarda artan cephe (bina kabuğu) alanı, çevresiyle daha fazla ısı alışverişinin gerçekleşmesini sağlayarak sıcaklıkların artmasına neden olmaktadır. Bu doğrultuda, cephe alanın optimum düzeyde tutulduğu kompakt bina formlarının kullanılması hem termal konfor hem de enerji tüketimi açısından avantajlar sağlamaktadır (Asadi vd., 2014).

Bina cephe alanlarındaki mimari detaylar (girinti-çıkıntı) arttıkça bina cephe alanı artmaktadır (Erdem Okumuş, 2022). Bu nedenle binalardaki cephe tasarımlarında mümkün olduğunca sade tasarımlar uygulanmalıdır. Aynı zamanda binaların doğrudan güneş radyasyonuyla temas eden cepheleri için güneş kırıcılar veya diğer pasif soğutma sistemleri kullanılarak ışıma azaltılmalı ve cephe yüzeyindeki mikro klimatik kontrol sağlanmalıdır. Bina cephelerindeki yalıtım kalınlığını arttırarak kentsel sıcaklıkların azaltılması da mümkün olmaktadır. Öyle ki bina cephelerinde 100 mm kalınlığa sahip bir yalıtımın hissedilir ısı emisyonlarını yaz aylarında %3 kış aylarında %5 oranında azalttığı tespit edilmiştir (Dong & Asawa, 2025). Yüksek cephe alanına sahip bina gruplarının rüzgâr yönüne paralel olacak şekilde ve belirli

bir yapı yaklaşma mesafesinde konumlandırılarak rüzgâr sirkülasyonu optimize edilmelidir. Bir diğer etkili müdahale alanı ise binalardaki cephe açıklıklarının arttırılmasıdır. Bu açıklıklar sayesinde hem hava akışı hem de ısı transferi kolaylaşmakta ve böylece bina cephelerinin güneş radyasyonunu absorbe etme oranı azalmaktadır.

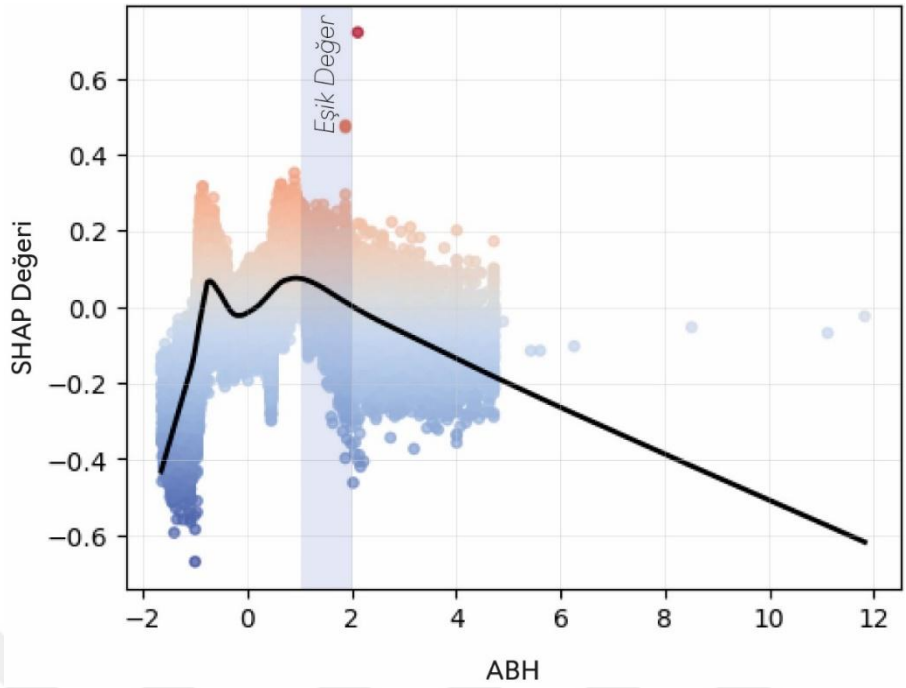
Binaların inşası sırasında kullanılan malzemeler de kentsel sıcaklıklar üzerinde önemli etkilere sahiptir. Tuğla ve beton gibi geleneksel malzemelerden inşa edilen binalarda, cepheler güneş radyasyonunu absorbe ederek uzun dalga boyuna sahip radyasyon olarak geri yaymakta ve kentsel sıcaklık artışına neden olmaktadır. Bu doğrultuda, gelişme bölgelerinde veya mevcut kentsel dokunun iyileştirilmesi sırasında albedo değeri yüksek yansıtıcı cephe kaplamaları kullanılmalıdır (Ornam vd., 2024).

ABH parametresine ait bağımlılık grafiği incelendiğinde, kentsel sıcaklık ile arasında lineer olmayan bir ilişki söz konusudur. Ortalama bina yüksekliğinin 1.5-2.0 bandına kadar olan değerlerinde ABH değeri arttıkça SHAP değeri de artmakta ve kentsel sıcaklıkları pozitif yönde etkileyerek yükselmesine neden olmaktadır (Şekil 4.37). Söz konusu eşik değerin aşılması durumunda ise SHAP değerleri azalma eğilimine girerek kentsel sıcaklık üzerinde serinletici bir etki göstermektedir. Bu bulgular kapsamında orta yükseklikteki binaların olduğu LCZ tipolojilerinde sıcaklıklar daha yüksek olma eğiliminde olduğu; daha yüksek katlı binaların olduğu LCZ tipolojilerinde ise gölgeleme etkisi ve hava sirkülasyonu gibi sebeplerle kentsel sıcaklıkların düşme eğiliminde olduğu söylenebilmektedir.

Ortalama bina yüksekliğinde meydana gelen artış genellikle ABV değerini de arttırmaktadır. Bu durum, düşeyde büyüyen bina kütlelerinin toplam cephe alanını arttırarak FSR değerlerinin de yükselmesine neden olmaktadır. Aynı zamanda bina yüksekliğine bağlı olarak kat sayısında meydana gelen artış, birim arsa alanı başına düşen toplam inşaat alanı (FAR) değerlerini de yükseltmektedir. Her ne kadar artan bina yüksekliğinin kentsel sıcaklıklar üzerinde negatif bir etki yaratabileceği sonucu çıkarılsa da yüksekliğe bağlı olarak ABV, FSR ve FAR değerlerinde gözlemlenen artışlar hem kentsel yoğunluğu hem de yüzeyler tarafından absorbe edilen radyasyon miktarını arttırarak söz konusu negatif etkiyi tersine çevirebilmektedir. Bu bağlamda, ABH'nin kentsel sıcaklıklar üzerindeki etkisi

sadece kendi doğrudan etkisiyle sınırlı kalmayıp diğer morfolojik parametrelerin ikincil etkileriyle de şekillenmekte ve pozitif yönde katkı sağlamaktadır.

Elde edilen bu bulgular, ortalama bina yüksekliğinin kentsel sıcaklıklar üzerinde lineer olmayan bir etkiye sahip olduğunu ortaya koyan önceki çalışmalarla paralellik göstererek söz konusu mekânsal morfolojik parametrenin kentsel sıcaklıklar üzerindeki belirleyici rolünü doğrulamaktadır (Berger vd., 2017; G. Guo vd., 2016; Z. Lin vd., 2024; Liu vd., 2023; X. Yang & Li, 2015; Yu vd., 2020). Örneğin Çin'in Şangay kentinde yapılan bir çalışmada 30 m'yi aşan binaların kentsel sıcaklıklar üzerinde serinletici bir etkisinin olduğunu tespit ederken (Yu vd., 2020) benzer şekilde yine Çin'in Pekin kentinde yapılan farklı bir çalışmada da 25 m'yi aşan binaların kentsel sıcaklıkları belirgin şekilde azalttığı tespit edilmiştir (Liu vd., 2023). Çin'in Fuzhou kentinde yürütülen başka bir çalışmada ise bina yüksekliğinin kentsel alanlarda önemli ölçüde soğuma etkisi yarattığı ve söz konusu bu etkinin temel sebebini ise yüksek binaların gündüzleri zemine ulaşan güneş radyasyonlarını engelleyerek gölgeleme sağlaması ve bina çevresinde rüzgâr vadileri oluşturarak yerel hava akımları aracılığıyla ısıyı uzaklaştırması olarak göstermektedir (Z. Lin vd., 2024). Ancak yine aynı çalışmada geceleri bu etkinin tersine döndüğü ve bina yüksekliğindeki artışın gökyüzü görünürlüğünü azaltarak gündüzleri depolanan ısının geceleri atmosfere salımını engellediği ve bu nedenle sıcaklıklarda meydana gelen düşüşü yavaşlattığı vurgulanmıştır (Z. Lin vd., 2024). İstanbul bağlamında yapılan benzer bir çalışmada ise bina yükseklikleri ile kentsel sıcaklıklar arasında lineer olmayan bir ilişki tespit edilmiş ve orta katlı binaların kentsel sıcaklıklar üzerinde daha etkili olduğu belirtilmiştir (Erdem Okumus & Terzi, 2022).



Şekil 4.37 ABH SHAP bağımlılık grafiği

Ortalama bina yüksekliği parametresine bağlı olarak kentsel sıcaklıkların azaltımı konusunda bina yüksekliklerinin arttırılması sıcaklıkların düşürülmesi konusunda tek başına yeterli bir çözüm sunmamaktadır. Kentlerin yerel kimliği koruyacak ve mevcut yerleşim dokusuna uygun olacak şekilde bütüncül olarak ele alınması gerekmektedir. Bu doğrultuda kademeli bina yüksekliği bölgelemesi ile ABH'nin eşik değere ulaşmadan önce planlı geçiş bölgeleri oluşturularak sıcaklık artışı minimum seviyeye düşürülmelidir. Bina yüksekliklerinin sadece emsal üzerinden değil kentsel sıcaklık azaltım senaryolarına bağlı olarak belirlenmeli ve standartlar geliştirilmelidir. Yüksek sıcaklıkların gözlemlendiği orta yükseklikteki binaların yoğun olduğu alanlarda sokakların ağaçlandırılması, pergola veya güneş kırıcılar gibi çeşitli pasif gölgeleme stratejileri uygulanmalıdır. Yapılan bir araştırmada 4 m, 8 m ve 12 m yüksekliğe sahip ağaçların kentsel sıcaklıkları önemli ölçüde azalttığı hatta hissedilir ısı emisyonlarını sırasıyla %2, %6 ve %8 oranında azalttığı tespit edilmiştir (Dong & Asawa, 2025). Bu tipolojideki alanlarda, binalar arası mesafelerin arttırılması yoluyla rüzgâr koridorlarının oluşturulması hedeflenmelidir. Özellikle bina yüksekliğinin genişliğe oranı (H/W) 0.3'ten küçük olan sokak kanyonlarında etkin hava akımlarının sağlandığı vurgulanmaktadır. Bu bağlamda, düşük H/W oranına sahip geçirgen kentsel dokuların oluşturularak ısı birikimini azaltan ve termal konforu iyileştiren mekânsal kurgular teşvik

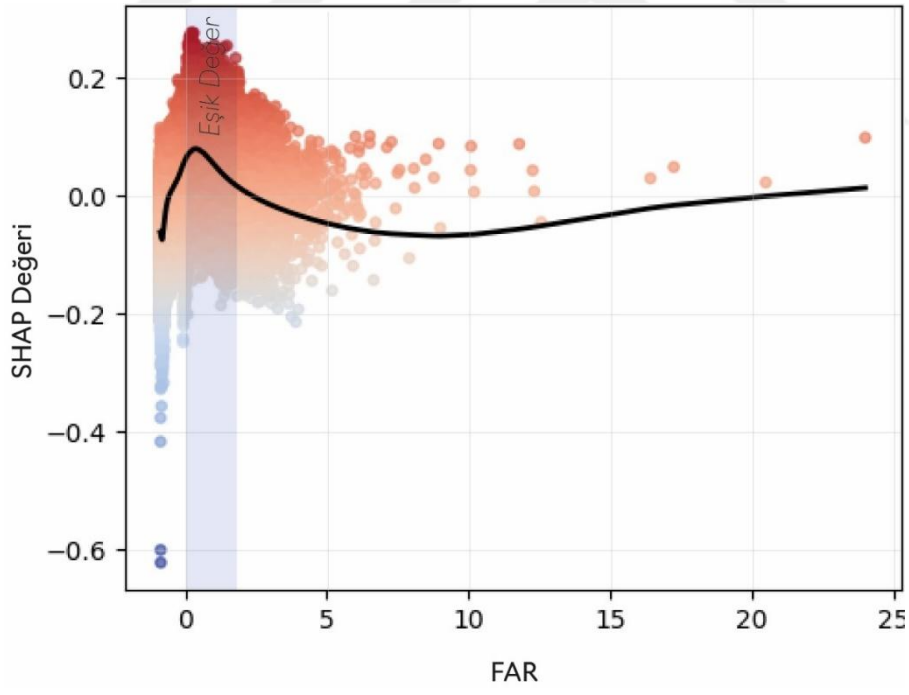
edilmelidir (Salameh vd., 2023). Aynı zamanda rüzgâr koridoru boyunca yer alan binaların yükseklikleri, hâkim rüzgâr yönüne doğru azalan bir kademede planlanarak rüzgârın kentsel doku içine daha etkin bir şekilde nüfuz etmesi sağlanmalıdır (EBRD, 2019). Farklı yükseklikteki yapıların bir arada konumlandırılması rüzgâr hızını %90 oranında arttırmakta ve hava sıcaklıklarını yaklaşık 1°C düşürmektedir. Bu nedenle yüksek binaların kentsel dokuda stratejik olarak konumlandırılması ve kademeli yükseklik geçişleri doğal havalandırmayı iyileştirerek termal yükü hafifletmektedir (Salameh vd., 2023). Ancak, bina yükseklikleri arasındaki farkın aşırı olması daha fazla radyasyon emilimine neden olabilmektedir. Bu nedenle, yükseklik farkları tutarlı bir düzeyde planlanmalıdır (Salameh vd., 2023) Yapı yüksekliği ve mevcut iklimsel koşullar ile uyumlu olacak şekilde bina yönelişlerinin güneş ışınımı ve hâkim rüzgâr yönüne doğru planlanarak mikro iklimsel koşullar iyileştirilmelidir. Literatürde, kentsel dokudaki rüzgâr sirkülasyonunun ve serinletici etkinin arttırılması için ana caddelerin veya sokakların hâkim rüzgâr yönüne paralel veya maksimum 30°'lik bir sapma olacak şekilde kurgulanması gerektiği belirtilmektedir (EBRD, 2019).

FAR parametresinin kentsel sıcaklık üzerindeki etkisi incelendiğinde, pozitif yönlü ve lineer olmayan bir ilişki tespit edilmiştir. FAR'ın 2.0 seviyesine kadar olan değer aralığında, kat alanı katsayısı değerinin artması SHAP değerlerinde de belirgin bir artış sergilemekte ve kentsel sıcaklık üzerinde pozitif yönlü yani sıcaklığı arttırıcı bir etkiye neden olmaktadır (Şekil 4.38). Eşik değerin aşıldığı durumlarda ise grafik eğrisi yataylaşmakta ve söz konusu pozitif etki sabitlenmektedir. Bu kapsamda, belirli bir seviyeye kadar FAR değerlerindeki artışın kentsel sıcaklığı arttırdığı fakat belirli bir seviyeden sonra sıcaklıklar üzerinde ek bir arttırma sağlamadığı söylenebilmektedir.

FAR değerinde meydana gelen bu etkinin anlamlandırılmasında yüksek FAR değerlerinin (2.0<) nasıl elde edildiği kritik bir rol oynamaktadır. Bilindiği üzere FAR değeri, yapıların kat sayısı ve yapı taban alanının çarpımıyla elde edilmektedir. Eğer yüksek FAR değeri yüksek ABH değeri ile sağlanmışsa binalardaki dikey büyüme sonucu oluşan gölgeleme etkisi ve hava akışında dolayı sıcaklık artışı sınırlanabilmekte hatta azaltıcı etki yaratabilmektedir. Buna karşılık, yüksek FAR değeri düşük kat sayısı ve yüksek BSF yoluyla sağlanmışsa yani yatayda genişleyen kompakt kentsel dokular söz konusuysa güneş radyasyonunun

daha fazla yüzeye temas etmesi ve geçirimsiz yüzey oranının artması gibi nedenlerle sıcaklık artışının belirgin olması beklenmektedir.

Çin'in Xi'an kentinde yürütülen bir çalışmada, FAR ile ortalama bina yüksekliği ve FAR ile ortalama bina hacmi arasında anlamlı ilişkilerin olduğu tespit edilmiştir. Bu bağlamda, yüksek FAR değerinin küçük hacimli çok katlı bina konfigürasyonu doğrultusunda elde edilmesi, kentsel sıcaklıklarda soğutma etkisi yarattığı vurgulanmıştır (Yuan vd., 2024). Pekin örneğinde yapılan farklı bir çalışmada ise FAR değerinin kentsel sıcaklıklarla pozitif yönde bir korelasyona sahip olduğu ve FAR değerindeki artışın kentsel sıcaklıkları artırarak belirli bir eşik değerden sonra söz konusu artışın sabitlendiği ortaya koyulmuştur (Liu vd., 2023). İstanbul bağlamında gerçekleştirilen bir çalışmada ise kentsel sıcaklık ile FAR arasında negatif yönlü ve lineer olmayan bir ilişki olduğu belirlenmiştir. Bu doğrultuda, çok düşük ve çok yüksek FAR değerlerinin kentsel sıcaklıklar üzerinde düşürücü bir etki yarattığı, buna karşılık orta düzeydeki FAR değerlerin ise sıcaklık artışına neden olduğu belirtilmiştir (Erdem Okumus & Akay, 2025).



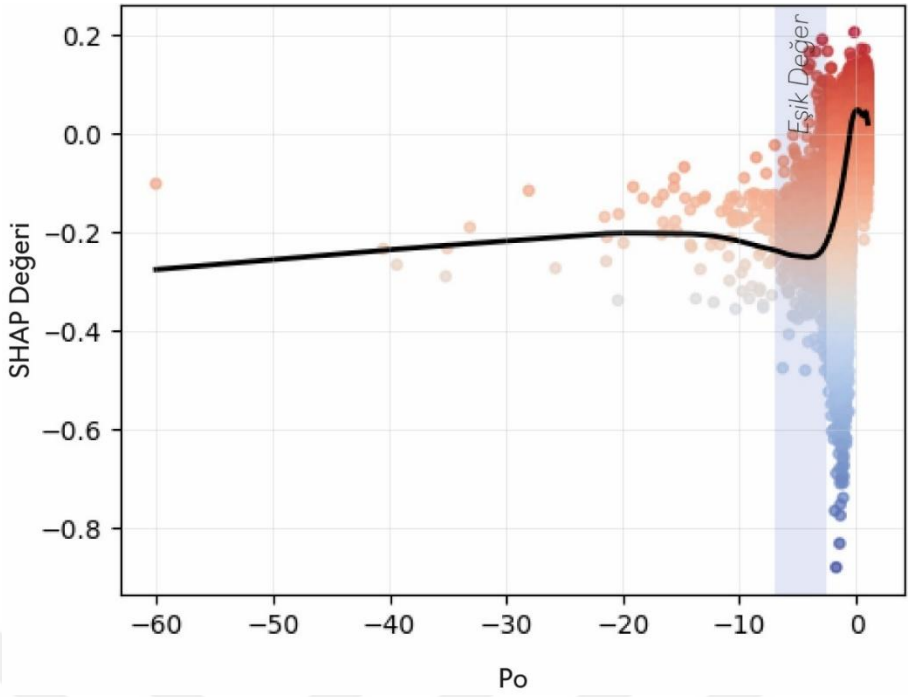
Şekil 4.38 FAR SHAP bağımlılık grafiği

FAR değerinin kentsel sıcaklık üzerindeki azaltım stratejilerine odaklanıldığında sadece emsal değeri üzerinden değil bu değerin dikeyde ve yataydaki yapılaşma dengesi ile değerlendirilerek mekânsal organizasyonunun da düşünülmesi gerekmektedir. Literatürde belirtildiği üzere yüksek FAR değerleri uygun bina

yerleşimi ile desteklenmediğinde, kentsel dokudaki hava akımlarını azaltarak ısı birikimine yol açmakta ve bu durumda yüksek sıcaklıkların görülmesine neden olmaktadır. Bu sorunun önüne geçebilmek amacıyla binalar arası mesafelerin arttırılması, oluşturulan rüzgâr koridorundaki binaların yer yer yükseltilerek rüzgârın zemin seviyesine yönlendirilmesi ve sokakların hâkim rüzgâr yönüne paralel olarak planlanması önerilmektedir (L. Li vd., 2018).

FAR parametresi, sokakların en/boy (H/W) oranı üzerinden tanımlanan kanyon geometrisini doğrudan etkilemekte ve bu durum kentsel dokunun termal koşullarını önemli ölçüde şekillendirmektedir (Attia vd., 2025; Zhu vd., 2023). Literatürde yapılan çalışmalar, sıcak ve nemli iklime sahip kentlerde, H/W oranının yaklaşık 2.5 seviyesinde olduğu ve sokak yöneliminin ise kuzey-güney aksına yakın konumlandığı kentsel dokuların, absorbe edilen güneş radyasyon miktarını sınırlandırarak gölgelemeyi arttırdığı ve bu nedenle en uygun dış mekân termal koşulları oluşturduğunu ortaya koymaktadır (Abd Elraouf vd., 2022; Abdelhafez vd., 2022; Attia vd., 2025). Bu doğrultuda yüksek FAR değerine sahip LCZ tipolojilerinde H/W oranının 2-2.5 düzeyinde tutulması kentsel sıcaklıkların azaltılması konusunda önem arz etmektedir. Ancak, yüksek H/W oranının her durumda uygun bir tipoloji olduğu yönünde genel bir sonuca varmak yanıltıcıdır. Çünkü uygun mekânsal düzenlemenin yapılmadığı koşullarda yetersiz hava sirkülasyonuna yol açarak ısı birikimine neden olmaktadır. Bu nedenle, yüksek H/W oranının planlandığı kentsel dokularda rüzgâr koridorlarının oluşturulması, yeşil altyapı sistemlerinin kurgulanması ve albedo değeri yüksek yüzey materyallerinin kullanımı gibi ilave mekânsal müdahalelerin de uygulanması gerekmektedir.

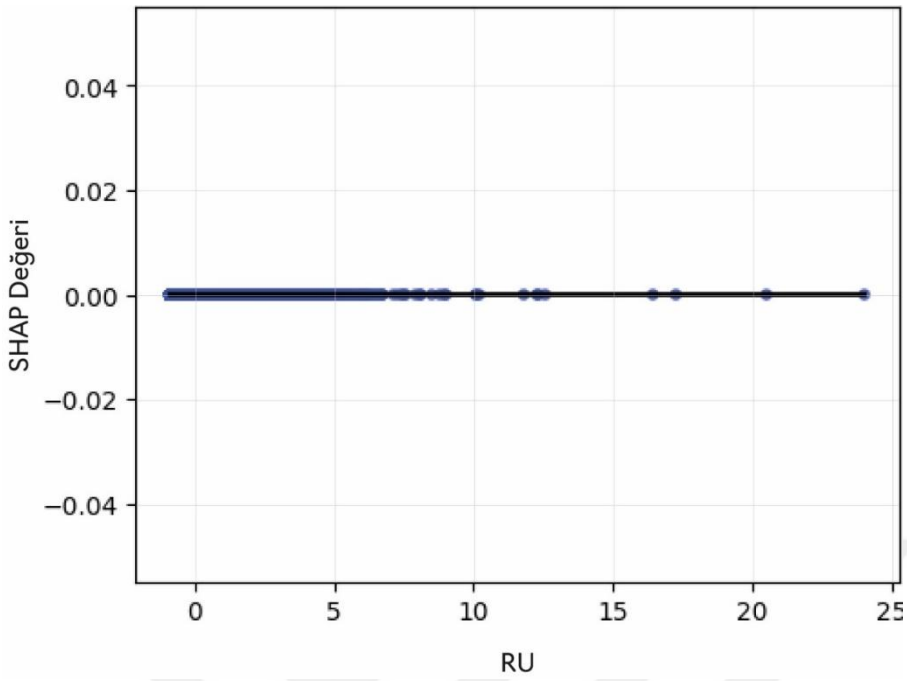
Kentsel gözeneklilik ile sıcaklık değerleri arasında lineer olmayan bir ilişki tespit edilmiştir. Po parametresinin -5.0 seviyesine kadar olan değerlerinde SHAP değerleri azalarak negatif yönlü bir etki göstermekte ve kentsel sıcaklık üzerinde serinletici bir etki yaratmaktadır (Şekil 4.39). Ancak, bu eşik değerden daha yüksek Po değerlerinde ise SHAP değerleri artarak pozitif yönlü bir etki göstermekte ve kentsel sıcaklıkları yükseltmektedir. Elde edilen bulgular, kentsel gözenekliliğin sıcaklık varyasyonları üzerindeki termal etkisinin çift yönlü olduğu ve bağlama duyarlı olarak değişim gösterdiğini ortaya koymaktadır.



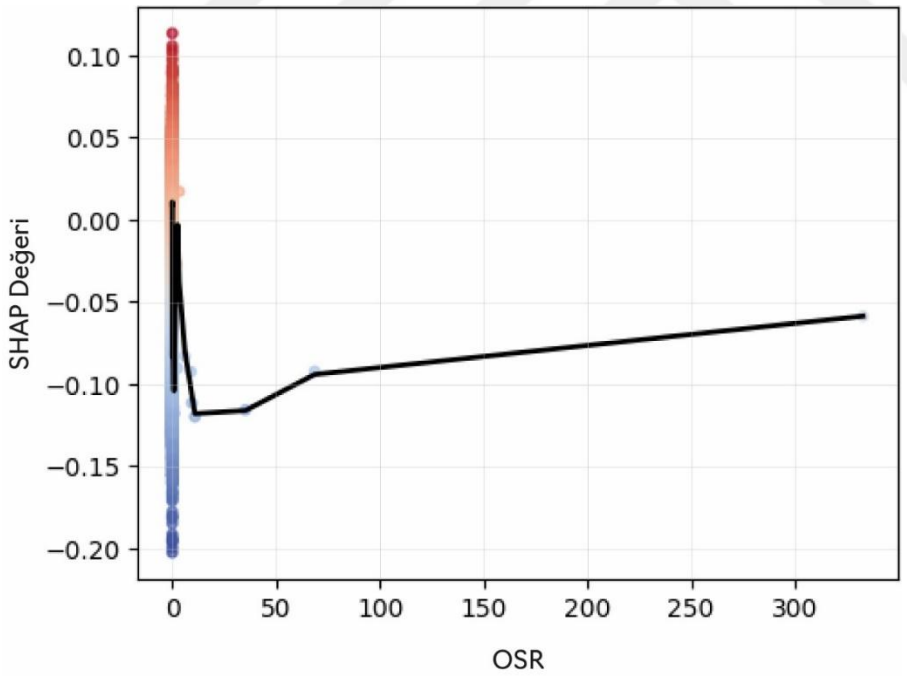
Şekil 4.39 Po SHAP bağımlılık grafiği

Elde edilen bulgular, yüksek geçirgenliğin/gözenekliliğin doğrudan güneş radyasyonuna maruz kalan yüzey alanlarını arttırarak istenmeyen ısınma etkileri yaratabildiğini ortaya koymaktadır. Yüksek yoğunluğa sahip morfolojik dokular genel olarak düşük geçirgenliğe sahiptir. Bu doku özelliklerine sahip LCZ tipolojilerinde kentsel yoğunluğun düşürülmesinin mümkün olmadığı durumlarda yapılar arası mesafeler, ulaşım aksları ve yapı yönelişleri kullanılarak rüzgâr koridorları oluşturulmalıdır. Düşük yoğunluğa sahip morfolojik dokular ise genel olarak yüksek geçirgenliğe sahiptir. Bu doku özelliklerine sahip LCZ tipolojilerinde ise yüzeyler fazla güneş radyasyonuna maruz kalacağı için albedosu yüksek malzemeler tercih edilmeli, geçirimli yüzeyler arttırılmalı ve gölgelik alanlar oluşturulmalıdır. Bu alanlarda aynı zamanda mavi ve yeşil altyapı alanları oluşturarak radyasyon kontrolü sağlanmalıdır.

OSR ve RU parametrelerine ait SHAP bağımlılık grafikleri incelendiğinde her iki parametrenin de kentsel sıcaklık değerleri üzerinde lineer olmayan bir etki gösterdiği tespit edilmiştir (Şekil 4.40) (Şekil 4.41). Hem OSR hem de RU parametresinin kentsel sıcaklık varyasyonları üzerindeki açıklanabilirliğinin sınırlı olması, söz konusu parametrelerin yorumlanmasını zorlaştırmaktadır.



Şekil 4.40 RU SHAP bağımlılık grafiği



Şekil 4.41 OSR SHAP bağımlılık grafiği

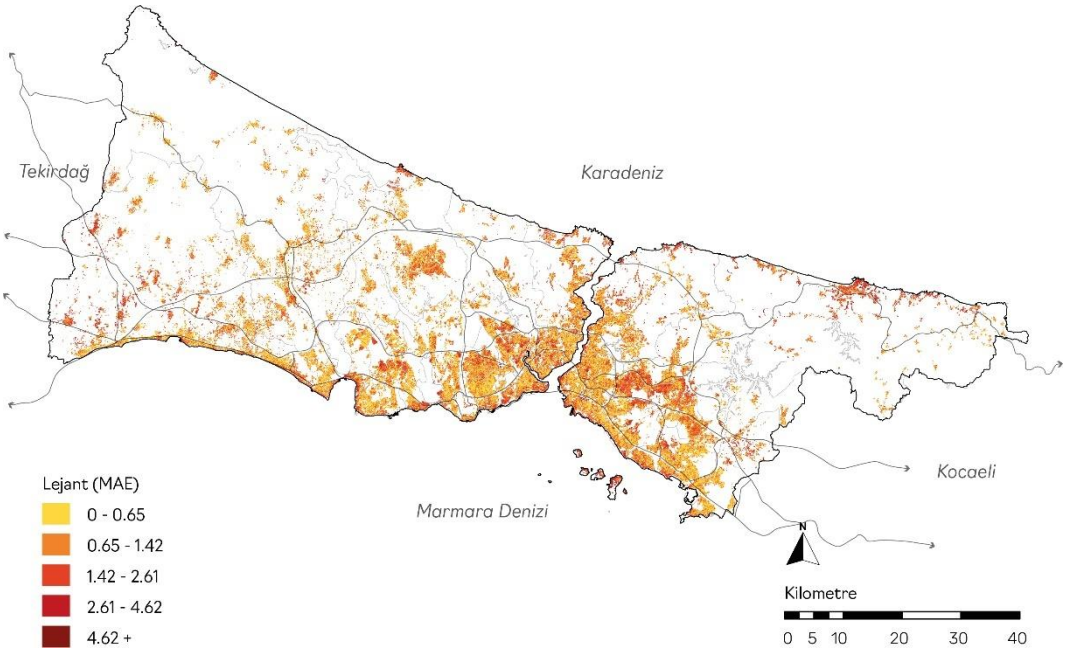
4.6.3 Model Doğrulama Sonuçları: Hata Metriklerinin Mekânsal Dağılımı

XGBoost regresyon modeli ile tahmin edilen kentsel sıcaklık değerlerinin doğruluk düzeyi, MAE, MAPE ve RMSE gibi hata göstergeleri aracılığıyla değerlendirilmiş ve bu göstergelerin her bir LCZ tipolojisi özelindeki mekânsal dağılımları ayrıntılı biçimde analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda, genel olarak modelin farklı yerel iklim bölgeleri üzerinde oldukça tatmin edici bir performans sergilediği görülmektedir.

Ortalama mutlak hata (MAE) değerlerinin LCZ tipolojileri bazındaki ortalamaları incelendiğinde, hata değerlerinin büyük ölçüde 1.0-1.3°C aralığında yoğunlaştığı görülmektedir. Bu durum, modelin sıcaklık tahminlerinde düşük hata payıyla istikrarlı bir performans sergilediğine işaret etmektedir. Modelin genel MAE ortalaması 1.09°C olup, hata değerleri genel olarak 0.10-2.30°C aralığında dağılım göstermektedir. Yerel iklim bölgeleri bazında değerlendirildiğinde, LCZ 9E (1.14), LCZ 9 (1.19) ve LCZ 9A (1.27) tipolojileri, ortalama MAE değerinin üzerinde; LCZ 5E (0.99), LCZ 2 (1.01), LCZ 5 (1.04), LCZ 6 (1.04) ve LCZ 6E (1.05) tipolojileri ise ortalama MAE değerinin altında değerlere sahiptir (Şekil 4.45). Bu bulgu, seyrek ve az katlı mekânsal morfolojik özelliklere sahip kentsel dokularda model doğruluğunun kompakt veya açık orta katlı kentsel dokulara oranla görece daha düşük seyrettiği anlaşılmaktadır. LCZ 9 ve buna bağlı alt tipolojiler, kentsel ve kırsal alanlar arasında geçiş özelliği taşımaktadır. Bu tür geçiş bölgelerindeki doğal ve yarı doğal alanların kentsel sıcaklık üzerindeki etkisi mekânsal morfolojik özelliklere oranla daha etkili olabilmektedir. Söz konusu doğal ve yarı doğal alanlara ilişkin parametrelerin model girdilerinde yeterince temsil edilememesi, bu alanlardaki hata oranlarında görece artış gösterebilmektedir. Aynı zamanda LCZ 9 ve buna bağlı alt tipolojilerin İstanbul genelinde geniş bir mekânsal dağılıma sahip olması, yüksek mekânsal heterojenliğe neden olarak model performansında varyasyonlara yol açabilmektedir.

MAE değerlerinin mekânsal dağılımı incelendiğinde (Şekil 4.42), İstanbul genelinde nispeten homojen bir dağılım sergilediği, ancak kentin bazı bölgelerinde belirgin hata artışlarının görüldüğü tespit edilmiştir. Özellikle, Adalar ilçesi, Karadeniz kıyı bandı, İstanbul Boğazı hattı ve Marmara Denizi kıyıları ile Zeytinburnu'nun güneyi, Silivri'nin batısı, Ümraniye'nin doğusu ve Sancaktepe'nin batı kesimleri modelin daha yüksek MAE değerleri ürettiği alanlar

olarak öne çıkmaktadır. Bu alanlarda gözlemlenen hata artışları, büyük ölçüde LCZ 9, LCZ 9A ve LCZ 9E tipolojileri ile örtüşmektedir. Özellikle kıyı bölgelerinde hata değerlerinin görece daha yüksek seyretmesi, bu bölgelerdeki denizel etkiler, rüzgâr rejimi farklılıkları veya diğer mikroklimatik değişkenlerin model tarafından yeterince temsil edilememesi ve kıyı alanlarının iç bölgelere kıyasla farklı termal özellikler sergilemesi modelin genellenebilirliğini sınırlandırarak tahmin doğruluğunu düşürebilmektedir.

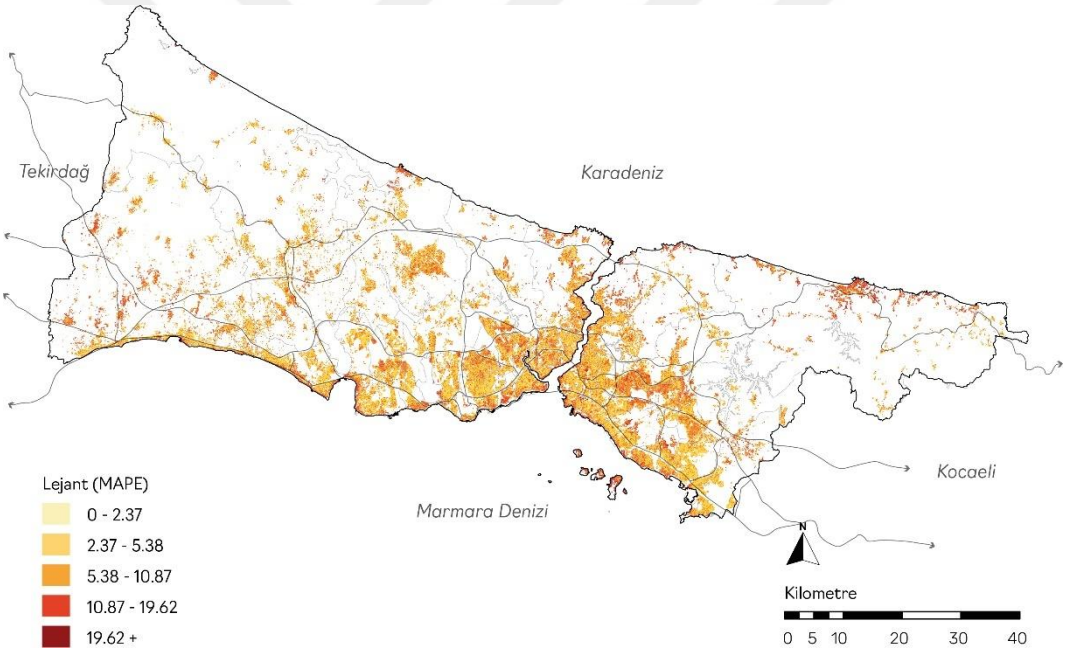


Şekil 4.42 MAE hata değerlerinin mekânsal dağılımı

Ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) değerleri incelendiğinde, genel MAPE değerinin %3.29 olduğu ve LCZ tipolojileri bazında ise %3-4 seviyelerinde değişim gösterdiği tespit edilmiştir. Bu oran, modelin yüzde cinsinden hatalarının oldukça sınırlı olduğunu ortaya koymaktadır. MAPE değerleri, LCZ tipolojileri bazında incelendiğinde, LCZ 9E (3.37), LCZ 9 (3.73), LCZ 9A (4.44) tipolojilerinin ortalama MAPE değerinin üzerinde; LCZ 2 (2.73), LCZ 5E (2.82), LCZ 6E (2.98), LCZ 6 (3.18) ve LCZ 5 (3.22) tipolojilerinin ise ortalama MAPE değerinin altında değerlere sahip olduğu saptanmıştır (Şekil 4.46). Bu durum, seyrek ve az katlı yapılaşma düzenine sahip kentsel dokularda modelin daha yüksek sapma değerlerine sahip olduğu ve bu nedenle, diğer bölgelere kıyasla daha düşük performans gösterdiği söylenebilmektedir. LCZ 2, LCZ 5, LCZ 5E, LCZ 6 ve LCZ 6E gibi yoğun ve düzenli yapılaşma düzenine sahip kentsel dokularda ise hata

değerlerinin daha homojen bir dağılım sergilediği ve standart sapma değerlerinin daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, XGBoost regresyon modelinin bu bölgelerde daha kararlı ve güvenilir sonuçlar ürettiğini göstermektedir.

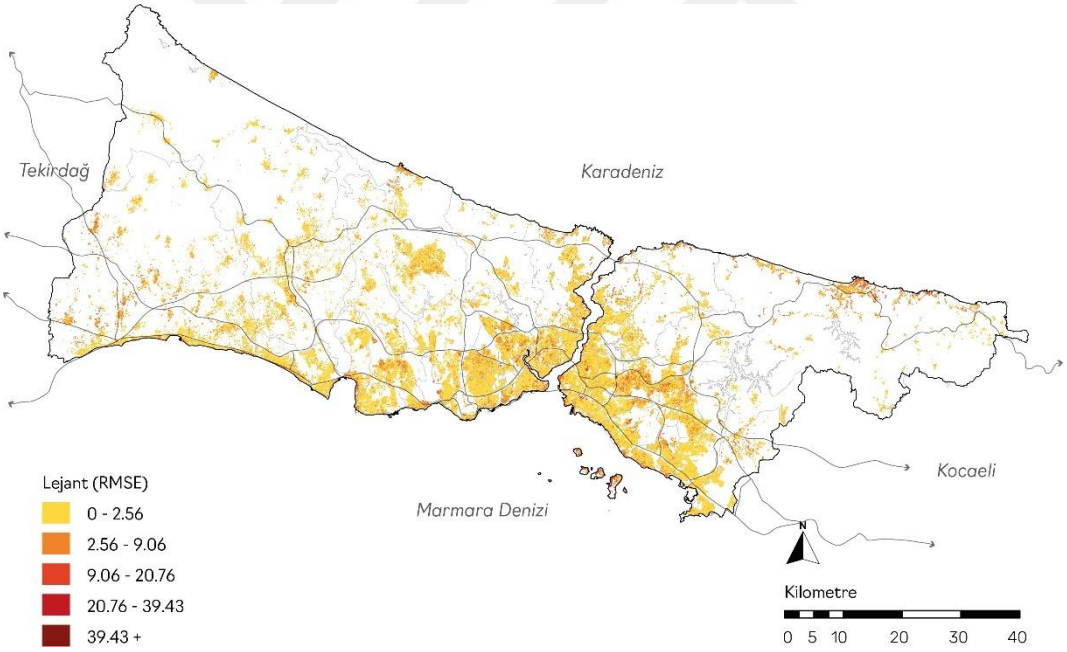
MAPE değerlerinin mekânsal dağılımı incelendiğinde (Şekil 4.43), İstanbul genelinde büyük ölçüde düşük değerlerle temsil edildiği görülmektedir. Ancak, özellikle Adalar ilçesi, Karadeniz kıyı bandı, İstanbul Boğaz hattı ve Marmara Denizi kıyıları boyunca belirgin yüzdelik hata artışların meydana geldiği dikkat çekmektedir. Bu alanlarda gözlemlenen hata artışları, daha geniş bir mekânsal yayılım sergilemesinden dolayı büyük oranda LCZ 9 tipolojisi ile örtüşmektedir. Bu durum, daha düşük kentsel sıcaklıkların görüldüğü seyrek ve az katlı yapılaşma düzenine sahip kentsel dokularda, hata oranlarının görece büyük sapmalar gösterdiğini ortaya koymaktadır.



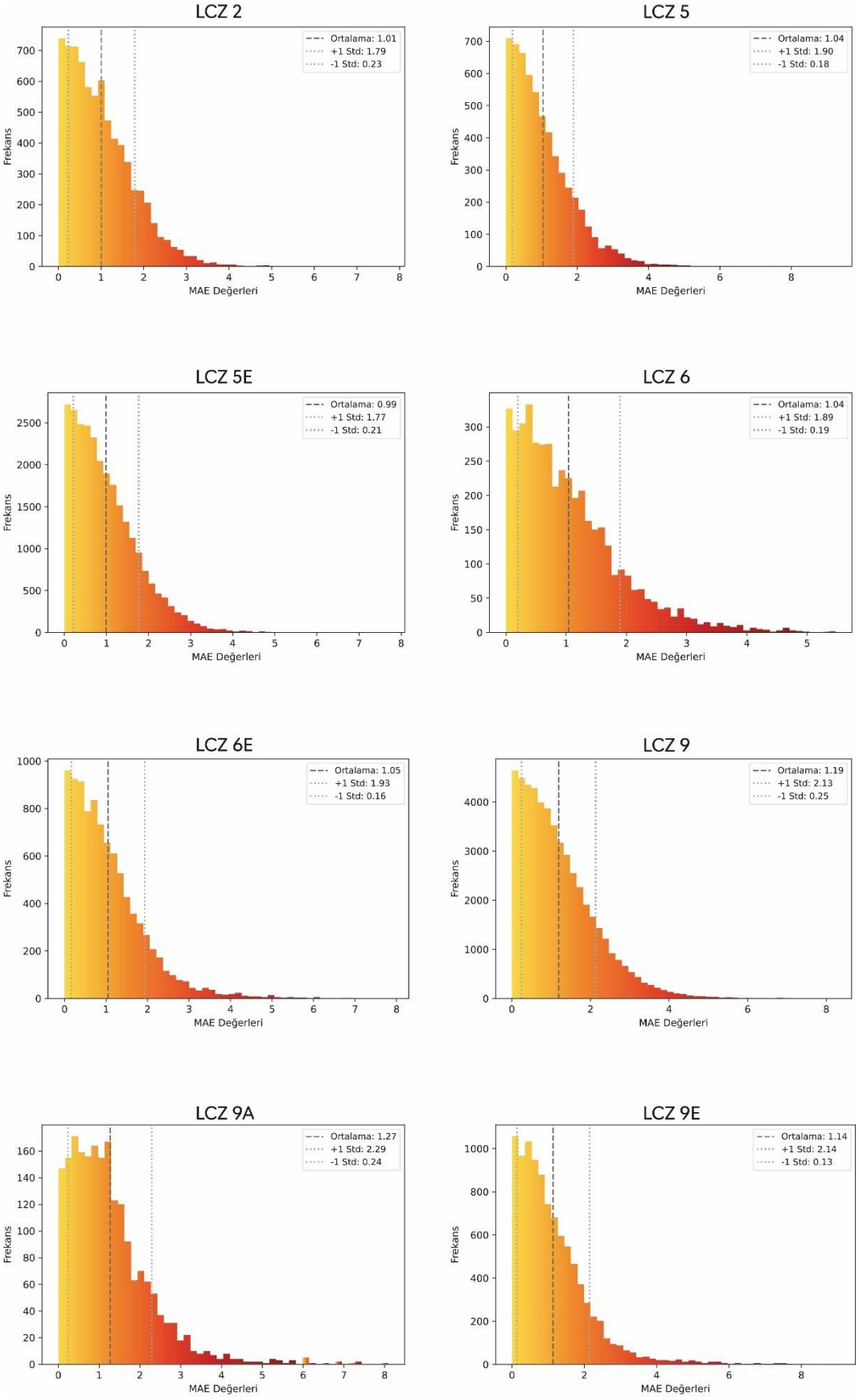
Şekil 4.43 MAPE hata değerlerinin mekânsal dağılımı

Kök ortalama kare hata (RMSE) değerleri incelendiğinde, modelin genel RMSE değerinin 1.40°C olarak hesaplandığı ve bu değerin LCZ tipolojileri bazında 1.50-2.50°C aralığında değişim gösterdiği tespit edilmiştir. RMSE dağılımlarının büyük ölçüde 3°C altında yoğunlaşmasına rağmen, standart sapma değerlerinin görece daha yüksek olması, modelin zaman zaman daha yüksek hatalar üretme eğiliminde olduğunu göstermektedir. RMSE değerleri, yerel iklim bölgeleri bazında incelendiğinde, LCZ 9E (2.30), LCZ 9 (2.30) ve LCZ 9A (2.66) tipolojilerinin

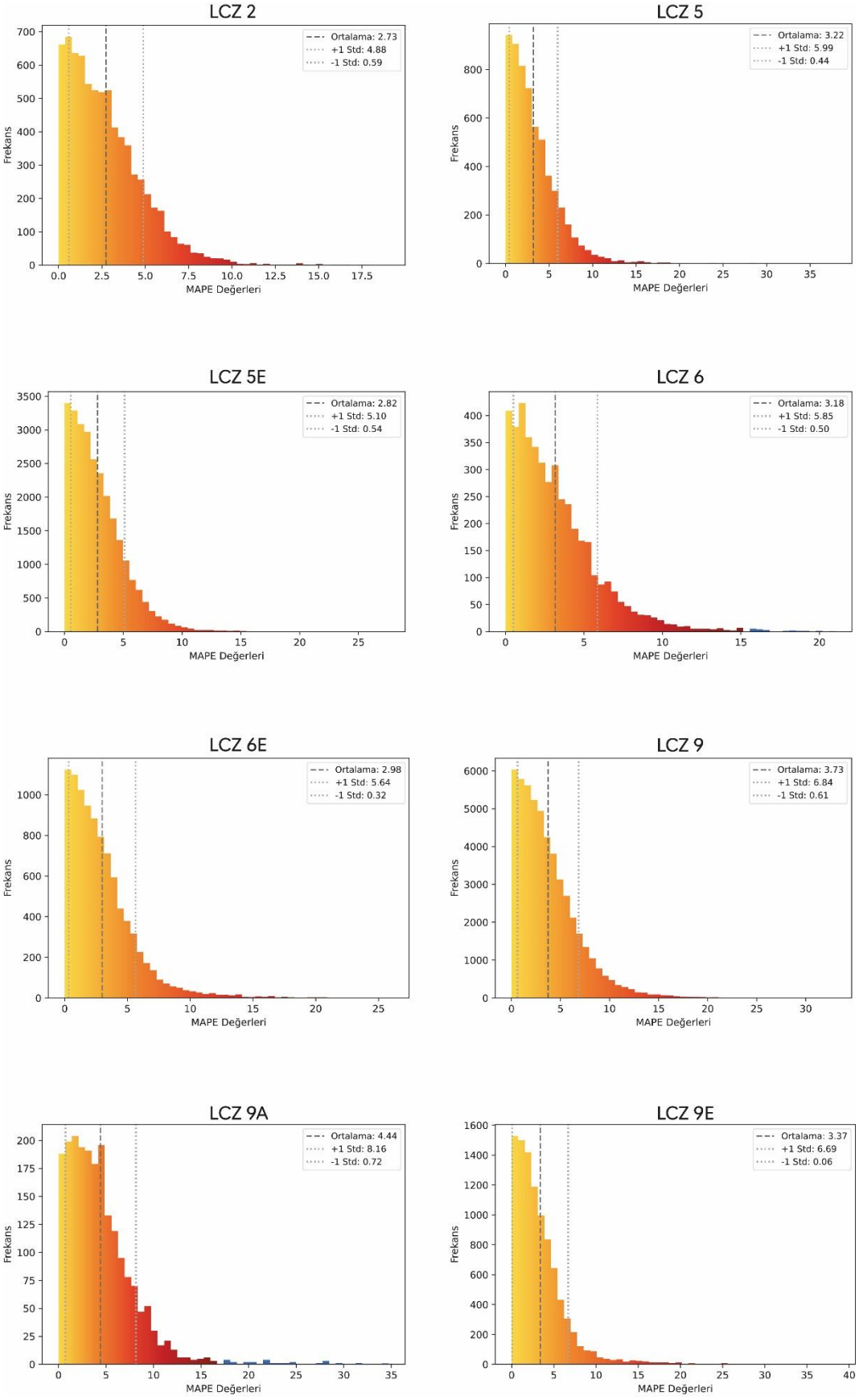
ortalama RMSE değerinin üzerinde; LCZ 5E (1.58), LCZ 2 (1.62), LCZ 6 (1.81), LCZ 5 (1.81) ve LCZ 6E (1.87) tipolojilerinin ise ortalama RMSE değerinin altında değerlere sahip olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.47). Elde edilen bu bulgular, seyrek ve az katlı yapılaşma düzenine sahip kentsel dokulardaki morfolojik heterojenliğin ve karmaşık arazi örtüsü yapısının modelin tahmin gücünü zorladığını göstermektedir. Söz konusu LCZ tipolojilerinde, MAE değerleri diğer bölgelerle benzer seviyelerde olsa da RMSE dağılımlarında gözlenen sağ kuyruk etkisi, zaman zaman yüksek hata değerlerinin üretildiğini ortaya koymaktadır. RMSE değerlerinin mekânsal dağılımı incelendiğinde (Şekil 4.44), İstanbul genelinde düşük değerlerle birlikte homojen bir dağılım sergilediği dikkat çekmektedir. MAE ve MAPE hata göstergelerine benzer şekilde özellikle Adalar ilçesinin batısında belirgin hata artışlarının meydana geldiği gözlemlenmektedir. Bu durum, modelin söz konusu bölgelerde daha uç değerler ürettiğini ve kentsel sıcaklık tahminlerinde zaman zaman ciddi sapmalar meydana geldiğini ortaya koymaktadır.



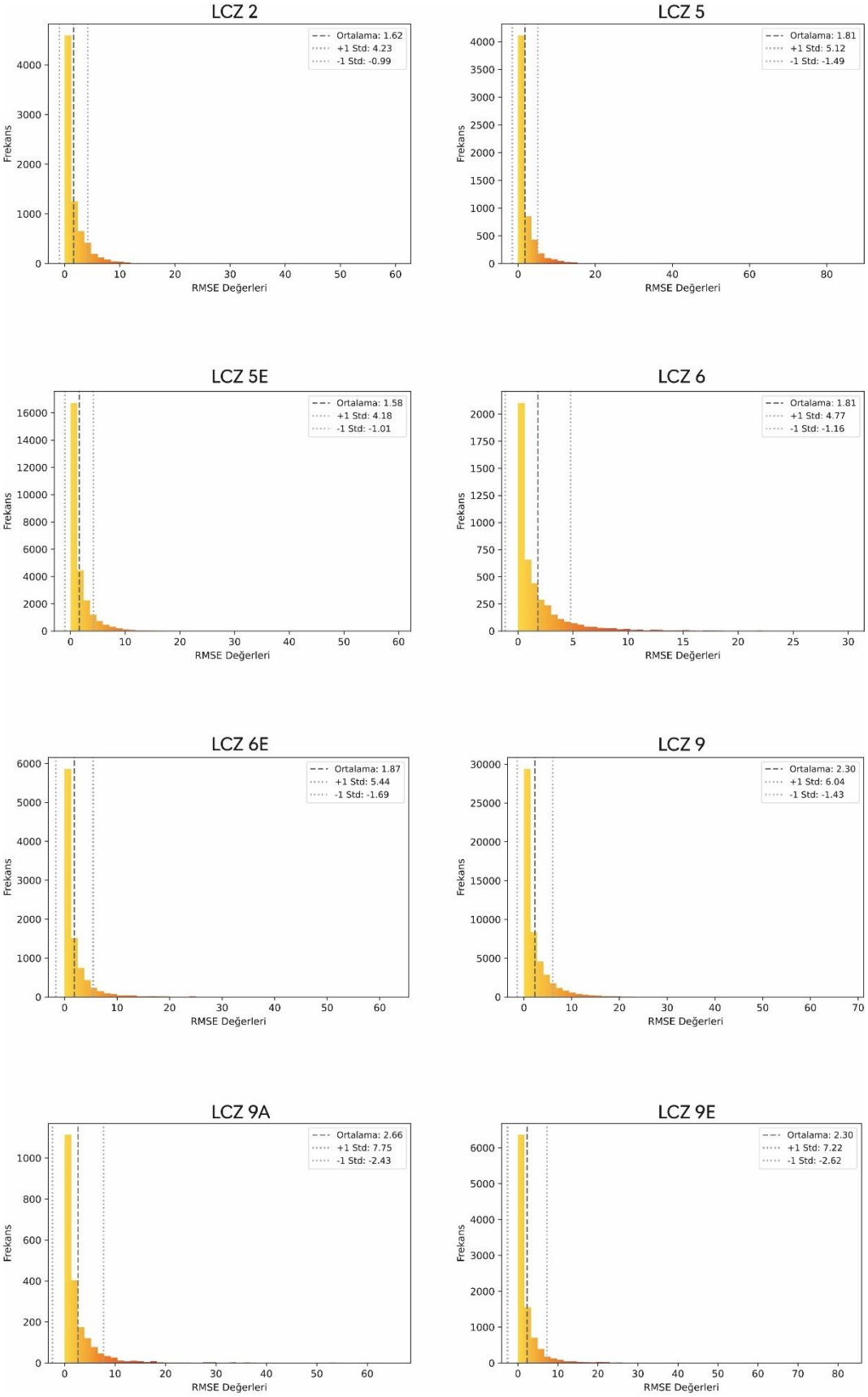
Şekil 4.44 RMSE hata değerlerinin mekânsal dağılımı



Şekil 4.45 LCZ tipolojilerine ait MAE histogram grafikleri



Şekil 4.46 LCZ tipolojilerine ait MAPE histogram grafikleri



Şekil 4.47 LCZ tipolojilerine ait RMSE histogram grafikleri

Tablo 4.24 LCZ tipolojilerine ait MAE, MAPE ve RMSE hata değerleri

LCZ Tipolojileri	MAE	MAPE	RMSE
Genel Ort.	1.09	3.29	1.40
LCZ 2	1.01	2.73	1.62
LCZ 5	1.04	3.22	1.81
LCZ 5E	0.99	2.82	1.58
LCZ 6	1.04	3.18	1.81
LCZ 6E	1.05	2.98	1.87
LCZ 9	1.19	3.73	2.30
LCZ 9A	1.27	4.44	2.66
LCZ 9E	1.14	3.37	2.30

Genel olarak değerlendirildiğinde, LCZ 2, LCZ 5, LCZ 5E, LCZ 6 ve LCZ 6E gibi kompakt orta katlı, açık orta katlı ve az katlı yapılaşma düzenine sahip kentsel dokularda, MAE, MAPE ve RMSE hata göstergelerinin daha homojen dağılım gösterdiği ve buna bağlı olarak standart sapma değerlerinin görece düşük düzeylerde seyrettiği gözlemlenmiştir. Bu durum, XGBoost regresyon modelinin söz konusu LCZ tipolojilerinde daha yüksek doğrulukta ve daha düşük hata oranıyla çalışan bir tahmin performansı sergilediğine işaret etmektedir. Buna karşılık, LCZ 9, LCZ 9A ve LCZ 9E gibi seyrek ve az katlı yapılaşma örüntüsüne sahip kentsel dokularda ise düzensiz yapılaşma karakteristikleri ve heterojen arazi örtüsü nedeniyle hata dağılımlarının daha geniş bir varyasyon gösterdiği, dolayısıyla modelin bu alanlarda daha yüksek tahmin hataları üretmesine yol açtığı tespit edilmiştir (Tablo 4.24).

5
SONUÇ

İklim değişikliğinin kentler üzerindeki artan etkisi her geçen yıl hızlanarak devam etmektedir. Dünya genelinde 520 büyük kenti kapsayan bir çalışmaya göre, 2050 yılına kadar söz konusu büyük kentlerin yaklaşık %77'sinde iklim rejimlerinde önemli değişikliklerin yaşanacağı, yaklaşık %22'sinde şu anda mevcut olmayan iklim rejimlerinin görülmeye başlayacağı ve yaklaşık %23'ünde ise mevcut iklimsel rejimlerin devam edeceği tahmin edilmektedir (Bastin vd., 2019; Short & Farmer, 2021). Küresel ortalama sıcaklığın 1.5°C olan kritik eşik değeri aştığı bu günlerde yapılan araştırmalar, iklim değişikliğine bağlı olarak kentsel alanlarda şiddetli yağışların, kuraklıkların ve aşırı sıcak hava olaylarının görülme sıklığının artacağını vurgulamaktadır (UN HABITAT, 2024). Özellikle kentsel alanlarda meydana gelen hızlı kentleşme süreci ve insan faaliyetleri sonucunda, doğal yüzeylerin yerini sert ve geçirimsiz yüzeylere bırakması, kent içi yeşil alanların azalması, yapılaşma yoğunluğunun artması gibi faktörler kentlerin morfolojik yapılarında belirgin değişikliklere neden olmaktadır. Bu durum, kentsel alanların yalnızca fiziksel yapısını değil aynı zamanda mikro iklimsel koşullarını da etkileyerek termal dengenin bozulmasına neden olmaktadır. Kentlerin termal yapısında meydana gelen değişimler ise kentsel ısı adası etkisinin görülmesine ve buna bağlı olarak kentsel aşırı ısınma eğilimine yol açmaktadır (Feng vd., 2023). Sonuç olarak kentlerin yerel koşullarına bağlı olarak meydana gelen aşırı kentsel sıcaklıklar, özellikle değişen morfolojik yapıyla birlikte değerlendirildiğinde kentlerin karşı karşıya kaldığı en kritik sorunlardan biri haline gelmiştir. Bu durum kentsel tasarım ve planlama disiplinlerinde sürdürülebilir, dirençli ve iklime uyumlu stratejilerin geliştirilmesini ve yerel ölçekteki mekânsal morfolojik yapının kent iklimi üzerindeki etkisinin bütüncül olarak değerlendirilmesini gerekli kılmıştır.

Tez çalışması kapsamında yerel iklim bölgelerindeki mekânsal morfolojik yapının kentsel sıcaklık varyasyonlarını üzerindeki lineer ve lineer olmayan etkilerini yapay zekâ tabanlı bir model geliştirerek ortaya koymak amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, kentsel sıcaklık varyasyonlarının mekânsal dağılımını anlamak, mekânsal morfolojik özelliklere bağlı olarak farklılaşan LCZ tipolojilerini tespit etmek, her bir LCZ tipolojisinin termal davranışını belirlemek, LCZ tipolojilerindeki mekânsal morfolojik parametreler ile kentsel sıcaklık arasındaki nicel ilişkiyi ortaya koymak ve son olarak ise mekânsal morfolojik özelliklere bağlı olarak artan kentsel sıcaklıkların azaltımına yönelik tasarım kodları tanımlamak şeklinde hedefler belirlenmiştir.

Bu amaç ve hedef doğrultusunda geliştirilen yapay zekâ tabanlı model, İstanbul örnek alanında uygulanarak çeşitli bulgular elde edilmiştir. Bu bağlamda, tez çalışması kapsamında ortaya koyulan temel bulgular şu şekildedir,

- İstanbul genelinin %23.4'ünde, kentsel alanın (yerleşim alanı) ise %52.7'sinde farklı seviyelerde sıcaklık anomalileri gözlemlenmektedir. Bu durum, özellikle SUHI etkisinin yerleşim alanlarında oldukça yaygın ve mekânsal olarak belirgin bir biçimde ortaya çıktığını göstermektedir.
- İstanbul'da tanımlanan farklı yerel iklim bölgeleri, kentsel sıcaklık değerleri bakımından anlamlı varyasyonlar sergilemektedir. Özellikle kompakt orta katlı, kompakt az katlı, açık orta katlı ve açık az katlı yapılaşma karakterine sahip tipolojilerde bu varyasyonların daha belirgin olduğu gözlemlenmiştir.
- Yerel iklim bölgelerinde, mikro ölçekte farklılaşan mekânsal morfolojik özelliklerin, kentsel sıcaklıkların mekânsal varyasyonları üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu bağlamda, özellikle yapılaşma yoğunluğu ve bitki örtüsü yoğunluğu söz konusu etkide önemli bir rol oynamaktadır.
- Mekânsal morfoloji parametreleri ile kentsel sıcaklıklar arasındaki ilişkinin genel olarak lineer olmayan bir yapıda seyrettiği; ancak yalnızca, yapılaşma yoğunluğu ile bina yüzey/taban alanı yoğunluğu arasında lineer ilişkilerin bulunduğu saptanmıştır. Bu durum, söz konusu parametrelerin kentsel sıcaklıklar üzerinde doğrudan ve öngörülebilir bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

- Mekânsal morfolojik yapının planlama ve tasarım süreçlerinde stratejik bir araç olarak ele alınması, mikro iklim koşullarının %69 oranında iyileştirilebileceğini ortaya koymaktadır.
- Yapay zekanın planlama süreçlerine entegre edilmesi; kentteki karmaşık ve lineer olmayan mekânsal ilişkilerin doğru şekilde ortaya koyulması ve aksiyon alınabilmesi için eşik değerlerin tespit edilmesini gerekli kılmaktadır.
- Kentsel iklimin iyileştirilmesine yönelik olarak elde edilen kantitatif bulgular, yalnızca yeni gelişim alanlarında değil; mevcut kentsel dokuların yenilenmesi ve dönüşüm süreçlerinde de iklimsel iyileşmeyi hedefleyen bir yaklaşıma zemin oluşturmaktadır.

Bu bulgular doğrultusunda, tez kapsamında belirlenen üç farklı hipotez değerlendirilmiştir. Birinci hipotez "İstanbul yerel iklim bölgelerinin kentsel sıcaklık değerleri arasında anlamlı farklılıklar bulunmaktadır." şeklindedir. Bu hipotez, İstanbul kent bütününde belirlenen LCZ tipolojileri ve bu tipolojilere karşılık gelen kentsel sıcaklık değerlerinin istatistiksel olarak analiz edilmesi ile cevaplanmıştır. Bu kapsamda, kentsel sıcaklık değerlerine ait veri setinin normal dağılıma uygun olup olmadığı Kolmogorov-Smirnov Normallik Testi, anlamlılık durumu ise Kruskal Wallis H Anlamlılık Testi ile değerlendirilmiştir Anlamlılık testi sonucunda, p değerinin 0.001'den daha küçük ($p<0.001$) bir değere sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu bulgu, İstanbul yerel iklim bölgelerine ait ortalama kentsel sıcaklık değerleri arasında %95 güven aralığında istatistiksel olarak anlamlı farklılıkların bulunduğunu ortaya koymuş ve hipotez doğrulanmıştır.

Yerel iklim bölgeleri, kentsel sıcaklık varyasyonlarının mekânsal dağılımında belirleyici bir rol oynamaktadır. Elde edilen bulgular, LCZ tipolojilerinin sadece mekânsal morfolojik özellikleriyle değil aynı zamanda termal karakteristikleri açısından da birbirinden farklılaştığını ortaya koymaktadır. Bu farklılaşmanın temel nedeni, LCZ tipolojilerinin sahip olduğu morfolojik özellikler nedeniyle farklı ısı depolama ve yayma nitelikleri göstermesidir. Yoğun kent formuna sahip LCZ tipolojileri, yüksek yapı yoğunluğu, yüksek geçirimsiz yüzey oranı, sınırlı yeşil alan varlığı, dar sokak kanyonları ve düşük albedo değerine sahip yüzeylerin bulunması gibi fiziksel ve mekânsal özelliklerden dolayı, güneş radyasyonunun uzun süreler boyunca absorbe edilmesine ve depolanmasına neden olarak ısı birikimini

arttırmakta ve yüksek kentsel sıcaklıklar sergilemektedir. Buna karşılık açık kent formuna sahip LCZ tipolojilerinde, artan binalar arası mesafeler ve geçirgen yüzeyler hava koridorlarının oluşmasını mümkün kılmaktadır. Açık kent formunun sağladığı bu mekânsal geçirgenlik, gün içinde depolanan güneş radyasyonunun daha kolay yayılımını sağlamaktadır. Bu durum, söz konusu LCZ tipolojilerinin kompakt kent formuna sahip LCZ tipolojilerine kıyasla ısıyı tutma kapasitelerinin daha düşük olduğunu ortaya koyarak daha dengeli bir sıcaklık dağılımı sergilemesini sağlamaktadır. Seyrek kent formuna sahip LCZ tipolojileri ise düşük bina yoğunluğu, düşük bina yüksekliği, binalar arası geniş mesafeler ve yaygın geçirgen yüzeyler serbest hava dolaşımına olanak sağlayarak ısı birikiminin önüne geçmekte ve daha düşük kentsel sıcaklıkların görülmesine neden olmaktadır.

İkinci hipotez, "İstanbul yerel iklim bölgelerindeki mekânsal morfolojik yapı özellikleri kentsel sıcaklık varyasyonları üzerinde yüksek etkiye sahiptir." şeklindedir. Bu hipotez, yüksek anlamlı farklılık düzeyine sahip olan LCZ tipolojilerine uygulanan mekânsal morfoloji analizleri doğrultusunda cevaplanmış ve hipotez doğrulanmıştır. Bu kapsamda, mekânsal morfolojik parametrelerin kentsel sıcaklık varyasyonları üzerindeki etkisinin belirlenebilmesi için makine öğrenimi tabanlı XGBoost Regresyon Modeli ve SHAP Analizi uygulanmıştır. Bu analizler sonucunda, modelin performans göstergeleri olan R^2 (0.69), Adj. R^2 (0.69), MAE (1.09), MAPE (3.29) ve RMSE (1.40) değerlerinin bağımsız değişkenler olarak kullanılan mekânsal morfoloji parametrelerinin bağımlı değişken olarak kullanılan ortalama kentsel sıcaklık değerlerini %69 oranında açıklayabildiği ve güvenilir sonuçlar elde ettiği ortaya koymaktadır.

Elde edilen bulgular, İstanbul yerel iklim bölgelerindeki mekânsal morfolojik yapının, kentsel mikro iklim üzerinde belirgin değişikliklere neden olarak sıcaklık varyasyonlarını önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymaktadır. SHAP değerleri kapsamında söz konusu parametrelerin etki düzeyleri incelendiğinde, özellikle NDBI ve NDVI parametrelerinin kentsel sıcaklık üzerinde yüksek düzeyli etkiye sahip olduğu saptanmıştır. Buna karşılık, BSF ve ABV parametreleri orta düzey; FVR, FSR, ABH, Po ve FAR parametreleri düşük düzey; RU ve OSR parametreleri ise sınırlı düzeyde bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Üçüncü hipotez, "Mekânsal morfolojik değişkenler kentsel sıcaklık varyasyonları üzerinde lineer ve lineer olmayan bağımsız etkiler yaratır." şeklindedir. Bu hipotez,

her bir mekânsal morfoloji parametresi için üretilen SHAP bağımlılık grafikleri doğrultusunda analiz edilmiş ve bu analiz sonucunda, söz konusu parametrelerin kentsel sıcaklık üzerindeki etkilerinin hem lineer hem de lineer olmayan biçimlerde ortaya çıktığını açıkça göstererek hipotez doğrulanmıştır.

Grafikler kapsamında elde edilen bulgular, yapılaşma yoğunluğu ve geçirimsiz yüzey oranını temsil eden NDBI, BSF ve FAR parametrelerinin kentsel sıcaklık üzerinde pozitif yönlü ve güçlü bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Söz konusu parametrelerden yalnızca NDBI ve BSF kentsel sıcaklıklar üzerinde lineer bir etki sergilemiş ve bu parametrelerin değerlerindeki artış kentsel sıcaklıkların da artmasına neden olmuştur. FAR parametresi ise belirli bir eşik değere kadar kentsel sıcaklığı arttırma eğilimde bulunmuş, ancak bu eşik değer sonrasında sıcaklıklar üzerinde ek bir arttırma sağlamadığı gözlemlenmiştir. Bu bulgular, kompakt kent formuna ve yüksek geçirimsiz yüzey oranına sahip LCZ tipolojilerinde güneş radyasyonunun yüksek oranda absorbe edilmesine neden olarak kentsel çevrenin termal yükünü arttırdığını ve buna bağlı olarak kentsel sıcaklıkların yükselmesine neden olduğunu ortaya koymuştur.

Yeşil alan yoğunluğunu ifade eden NDVI parametresi, kentsel sıcaklık üzerinde negatif yönlü ve lineer olmayan bir ilişki sergilemiştir. Yeşil alan yoğunluğundaki artış, belirli bir eşik değere kadar kentsel sıcaklıkları azaltma yönünde etkili olurken söz konusu eşik değerin aşılması durumunda ek bir serinletme etkisi sağlamadığı gözlemlenmiştir. Bu bulgular, yeşil alan oranı düşük olan LCZ tipolojilerinde kentsel sıcaklıkların azaltılması ve serinletici etkinin sürdürülebilirliği için yalnızca yeşil alan oranının arttırılmasının yeterli olamayabileceğini ve bu nedenle farklı morfolojik müdahalelere de ihtiyaç duyulabileceğini göstermiştir.

Ortalama bina yüksekliğini ifade eden ABH parametresi, kentsel sıcaklık ile lineer olmayan çift yönlü bir ilişki ortaya koymuştur. Orta yükseklikteki binaların yoğun olduğu LCZ tipolojilerinde sıcaklık artışı gözlemlenirken daha yüksek yapılaşmaya sahip LCZ tipolojilerinde ise bu etkinin yön değiştirdiği ve kentsel sıcaklık değerlerinde azalma eğiliminin oluştuğu belirlenmiştir. Ortalama bina hacmini temsil eden ABV parametresi, düşük hacimli kent formuna sahip LCZ tipolojilerinde geçirgen kentsel dokuların oluşmasından dolayı sıcaklıkları azaltıcı bir etki üretirken bina hacmindeki artışla birlikte kentsel sıcaklık değerlerinde de artış gözlemlenmiştir. Cephe yüzey oranını tanımlayan FSR parametresi ile kentsel

sıcaklıklar arasında lineer olmayan ve çift yönlü bir ilişki gözlemlenmiştir. Cephe yüzey oranı artışı, belirli bir eşik değere kadar kentsel sıcaklıkların artmasına neden olurken söz konusu eşik değerin aşılması durumunda ise bu etki yön değiştirerek sıcaklıkların azalmasına neden olmuştur. Cephe hacim oranını ifade eden FVR parametresi ise kentsel sıcaklıklar üzerinde zayıf ve lineer olmayan bir ilişki ortaya koymuştur. FVR değerlerinin belirli bir seviyeye kadar olan artışı kentsel sıcaklıklarda düşüşe neden olurken bu seviyeden sonra ek bir serinletme etkisi sağlamadığı saptanmıştır. Kentsel dokulardaki gözenekliliği tanımlayan Po parametresi ise kentsel sıcaklıkla lineer olmayan ve çiftli yönlü bir ilişki sergilemiştir. Söz konusu parametreye ait düşük değerler kentsel sıcaklıklar üzerinde serinletici bir etki yaratırken, gözenekliliğin artmasıyla birlikte doğrudan güneş radyasyonuna maruz kalan yüzey alanlarının da artması nedeniyle kentsel sıcaklıklarda yükselme eğilimi gözlemlenmiştir. Açık alan oranını ifade eden OSR ve mutlak pürüzlülük oranını ifade eden RU parametreleri, kentsel sıcaklık üzerindeki en düşük etkiye sahip parametreler olarak öne çıkmaktadır. Bu parametrelerin model üzerindeki açıklayıcılığının sınırlı olmasından dolayı kentsel sıcaklıklar üzerindeki etkisi hakkında anlamlı çıkarımlar yapılamamaktadır.

Elde edilen bulgular, kentsel sıcaklıkların azaltımına yönelik olarak mekânsal morfoloji parametreleri kapsamında geliştirilen tasarım müdahalelerinin bütüncül bir yaklaşımla ele alınması gerektiğini ortaya koymuştur. Bu bağlamda, absorbe edilen radyasyon miktarını azaltmak için bina ve çatı yüzeylerinde albedo değeri yüksek yansıtıcı malzemelerin kullanılması (Santamouris, 2014), gölgeleme etkisi ve radyasyon absorbsiyonu yüksek olan vejetatif elemanlar kullanılarak bitki örtüsü ve yeşil altyapı elemanlarının arttırılması (EPA, 2008b; Erdem Okumuş, 2022), doğal kaynakların (bitki örtüsü, su yüzeyleri, rüzgâr vb.) sağladığı serinletici etkinin kentsel dokunun iç kısımlarına kadar nüfuz etmesini sağlamak ve söz konusu etkiden azami düzeyde faydalanmak için havalandırma koridorlarının oluşturulması (Zhou vd., 2020), binaların mekânsal konfigürasyonlarında hakim rüzgar yönü referans alınarak binalar arası optimum çekme mesafesinin bırakılması ve bina yüksekliklerinde kademelendirme yapılması (Bing vd., 2021; EBRD, 2019), absorbe edilen ve yansıtılan radyasyon miktarını azaltmak için geçirimli yüzey oranının arttırılması (Chen vd., 2020; Quanz vd., 2018), rüzgar sirkülasyonunu ve ısı transferini kolaylaştırmak için daha geçirgen ve yüksek cephe

açıklığına sahip bina formlarının tasarlanması, düşük yoğunluklu ve geçirgen dokularda aşırı güneş radyasyonunu engellemek amacıyla gölgelik alanların oluşturulması, binaların çevresiyle olan ısı alışverişini dengelemek için kompakt ve düşük cephe-yüzey oranına sahip bina formlarının kurgulanması (Asadi vd., 2014), doğrudan güneş radyasyonuyla temas eden bina cepheleri başta olmak üzere pasif soğutma sistemlerinin kullanılması, ani sıcaklık artışlarının engellenmesi için yerleşimin dokusuna uygun olacak şekilde kademeli bina yüksekliği bölgelemesi yapılarak geçiş zonları oluşturulması (Salameh vd., 2023) ve sokak yönelimlerinin hakim rüzgar yönüne paralel olarak planlanması gibi mekânsal tasarım müdahaleleri ön plana çıkmaktadır.

Bu tez çalışması, İstanbul örnek alanında kentsel sıcaklık varyasyonlarını etkileyen mekânsal morfolojik parametrelerin nicel olarak analiz edilmesini amaçlamakta ve elde edilen yapay zekâ tabanlı model çıktıları doğrultusunda kentsel sıcaklıkların azaltımına yönelik mekânsal tasarım stratejileri geliştirmektedir. Bu kapsamda, mekânsal morfolojik parametrelerin kentsel sıcaklıklar üzerinde etkileri yalnızca lineer varsayımlar çerçevesinde ele alınmamış aynı zamanda lineer olmayan etkileri de detaylı bir şekilde ortaya koyulmuştur. Bu kapsamda geliştirilen tahmin modeli, kentsel sıcaklıkların azaltılmasına katkı sağlayacak morfolojik eşik değerleri ve kritik yapılaşma koşullarını tanımlamaktadır. Bu yönüyle tez çalışması, kentsel sıcaklık değerleri bakımından yüksek duyarlılığa sahip kentsel dokularda uygulanacak olan mekânsal müdahaleleri hem tasarım hem de planlama ölçeğinde ölçülebilir kılarak veri temelli mekânsal kararlar için altyapı oluşturmaktadır. Ayrıca yapay zekâ temelli algoritmaların kentsel planlama ve tasarım süreçlerine entegre edilmesini yönelik önemli bir vizyon sunan bu çalışma, kentsel sıcaklıkları minimize edecek biçimde mekânsal morfolojik yapının yeniden kurgulanmasına olanak sağlayan üretken tasarım modellerinin geliştirilmesine zemin hazırlamaktadır. Gelecek çalışmalarda, bu modelin çok amaçlı optimizasyon süreçlerine entegre edilerek hem çevresel hem de mekânsal bağlamda yüksek performansa sahip kentsel form senaryolarının üretilmesi hedeflenmektedir.

Bu tez çalışması, belirli metodolojik ve veri kaynaklı kısıtlar çerçevesinde yürütülmüştür. Öncelikle, Landsat-8 uydu görüntüsünden elde edilen termal bant verileri kullanılarak hesaplanan kentsel sıcaklık (arazi yüzey sıcaklığı) ölçümlerinde anizotropi etkisi önemli bir kısıt oluşturmaktadır. Kent içindeki 3B

elemanların (ağaç, bina vb.) gölge etkisi, güneşin konumu ve uyduya ait termal sensörün görüntüleme açısı gibi faktörler, uydu tarafından kentsel yüzeyin tamamının eşit bir biçimde algılanamamasına neden olmakta ve bu durum, yüzey sıcaklıklarının doğru biçimde temsil edilmesini sınırlandırmaktadır. Bir diğer önemli kısıt ise Landsat-8 uydusunun İstanbul üzerindeki geçiş saatinin yalnızca sabah 08:45:27-08:45:59 aralığında olması, kentsel ısı adası etkisinin en belirgin hissedildiği akşam saatlerinde sıcaklık dağılımın modellenmesine olanak vermemektedir. Bu durum, gündüz-gece meydana gelen sıcaklık varyasyonlarının irdelenmesi açısından önemli bir metodolojik eksiklik doğurmaktadır. Son olarak ise topografik özellikler, hâkim rüzgâr yönü ve denizel etkiler gibi doğal çevresel faktörlerin standart yerel iklim bölgesi sınıflandırma sisteminde yer almaması ve söz konusu faktörlerin niceliksel ölçümlerinin standart LCZ formatına getirilmesinde yaşanan zorluklar nedeniyle modele bütüncül bir şekilde dahil edilememiştir. Bu durum özellikle, kırsal ya da yarı kırsal özellik taşıyan seyrek az katlı yapılaşma düzenine sahip LCZ tipolojilerinde, hata oranlarının yükselmesine yol açmıştır. Dolayısıyla modelin tahmin gücü, bu gibi morfolojik çeşitliği yüksek ve doğal etkilere açık alanlarda sınırlı düzeyde kalabilmiştir.

KAYNAKÇA

Abd Elraouf, R., Elmokadem, A., Megahed, N., Abo Eleinen, O., & Eltarabily, S. (2022). The impact of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot-humid climate. *Building and Environment*, *225*. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109632

Abdelhafez, M. H. H., Altaf, F., Alshenaifi, M., Hamdy, O., & Ragab, A. (2022). Achieving Effective Thermal Performance of Street Canyons in Various Climatic Zones. *Sustainability (Switzerland)*, *14*(17). https://doi.org/10.3390/su141710780

Adachi, S. A., Kimura, F., Kusaka, H., Duda, M. G., Yamagata, Y., Seya, H., Nakamichi, K., & Aoyagi, T. (2014). Moderation of summertime heat island phenomena via modification of the Urban form in the Tokyo metropolitan area. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, *53*(8), 1886-1900. https://doi.org/10.1175/JAMC-D-13-0194.1

Ahmad, K., Khare, M., & Chaudhry, K. K. (2005). Wind tunnel simulation studies on dispersion at urban street canyons and intersections - A review. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, *93*(9), 697-717. https://doi.org/10.1016/j.jweia.2005.04.002

Akbari, H. (2009). *Title Cooling our Communities. A Guidebook on Tree Planting and Light-Colored Surfacing*. https://escholarship.org/uc/item/98z8p10x

Akpodiogaga-a, P., & Odjugo, O. (2010). General Overview of Climate Change Impacts in Nigeria. *Journal of Human Ecology*, *29*(1), 47-55. https://doi.org/10.1080/09709274.2010.11906248

Ali Toudert, F. (2005). *Berichte des Meteorologischen Institutes der Universität Freiburg Dependence of Outdoor Thermal Comfort on Street Design in Hot and Dry Climate*.

Al-Saadi, L. M., Jaber, S. H., & Al-Jiboori, M. H. (2020). Variation of urban vegetation cover and its impact on minimum and maximum heat islands. *Urban Climate*, *34*, 100707. https://doi.org/10.1016/J.UCLIM.2020.100707

Asadi, S., Amiri, S. S., & Mottahedi, M. (2014). On the development of multi-linear regression analysis to assess energy consumption in the early stages of building design. *Energy and Buildings*, *85*, 246-255. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.096

Attia, A., El-Husseini, A., Ghonimi, I., & Elhinnawy, T. S. (2025). Floor Area Ratio (FAR) and thermal environment: An Integrative Review. Içinde *ENGINEERING RESEARCH JOURNAL (ERJ)* (Sayı 54). https://erjsh.journals.ekb.eg

Auer, A. H. (1978). *auer1978*.

Avdan, U., & Jovanovska, G. (2016). Algorithm for automated mapping of land surface temperature using LANDSAT 8 satellite data. *Journal of Sensors, 2016*. https://doi.org/10.1155/2016/1480307

Azhdari, A., Soltani, A., & Alidadi, M. (2018). Urban morphology and landscape structure effect on land surface temperature: Evidence from Shiraz, a semi-arid city. *Sustainable Cities and Society, 41*, 853-864. https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.06.034

Azmi, R., Tekouabou Koumetio, C. S., Diop, E. B., & Chenal, J. (2021). Exploring the relationship between urban form and land surface temperature (LST) in a semi-arid region case study of Ben Guerir city - Morocco. *Environmental Challenges, 5*. https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100229

Bahi, H., Mastouri, H., & Radoine, H. (2020). Review of methods for retrieving urban heat islands. *Materials Today: Proceedings, 27*, 3004-3009. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.272

Barlow, J. F. (2014). Progress in observing and modelling the urban boundary layer. *Urban Climate, 10*(P2), 216-240. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.03.011

Bartesaghi Koc, C., Osmond, P., Peters, A., & Irger, M. (2018). Understanding Land Surface Temperature Differences of Local Climate Zones Based on Airborne Remote Sensing Data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 11*(8), 2724-2730. https://doi.org/10.1109/JSTARS.2018.2815004

Bastin, J. F., Clark, E., Elliott, T., Hart, S., van den Hoogen, J., Hordijki, I., Ma, H., Majumder, S., Manoli, G., Maschler, J., Mo, L., Routh, D., Yu, K., Zohner, C. M., & Crowther, T. W. (2019). Understanding climate change from a global analysis of city analogues. *journals.plos.orgJF Bastin, E Clark, T Elliott, S Hart, J Van Den Hoogen, I Hordijk, H Ma, S MajumderPloS one, 2019•journals.plos.org*, *14*(7). https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0217592

Bechtel, B., & Daneke, C. (2012). Classification of local climate zones based on multiple earth observation data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 5*(4), 1191-1202. https://doi.org/10.1109/JSTARS.2012.2189873

Berger, C., Rosentreter, J., Voltersen, M., Baumgart, C., Schmullius, C., & Hese, S. (2017). Spatio-temporal analysis of the relationship between 2D/3D urban site characteristics and land surface temperature. *Remote Sensing of Environment, 193*, 225-243. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.02.020

Berkeley Earth. (2025, Ocak 10). *Global Temperature Report for 2024* . https://berkeleyearth.org/global-temperature-report-for-2024/

Bhowmick, D., Mukherjee, K., Dash, P., & Mondal, R. (2023). Use of "local Climate Zones" for Detecting Urban Heat Island: A Case Study of Kolkata Metropolitan Area, India. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1164*(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/1164/1/012007

Bing, D., Zhaoyin, Y., Wupeng, D., Xiaoyi, F., Yonghong, L., Chen, C., & Yan, L. (2021). Cooling the city with "natural wind": Construction strategy of Urban

Ventilation Corridors in China. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 657*(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/657/1/012009

Bourikas, L. (2016). *Microclimate adapted localised weather data generation: implications for urban modelling and the energy consumption of buildings*. https://www.researchgate.net/publication/319035564

Bushenkova, A., Soares, P. M. M., Johannsen, F., & Lima, D. C. A. (2024). Towards an improved representation of the urban heat island effect : A multi-scale application of XGBoost for madrid. *Urban Climate, 55*. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.101982

Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P. W., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Barret, K., Blanco, G., Cheung, W. W. L., Connors, S. L., Denton, F., Diongue-Niang, A., Dodman, D., Garschagen, M., Geden, O., Hayward, B., Jones, C., … Ha, M. (2023). *IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report, Summary for Policymakers. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]*. *IPCC, Geneva, Switzerland.* (P. Arias, M. Bustamante, I. Elgizouli, G. Flato, M. Howden, C. Méndez-Vallejo, J. J. Pereira, R. Pichs-Madruga, S. K. Rose, Y. Saheb, R. Sánchez Rodríguez, D. Ürge-Vorsatz, C. Xiao, N. Yassaa, J. Romero, J. Kim, E. F. Haites, Y. Jung, R. Stavins, … Y. Park, Ed.). https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001

Cetin, M., Ozenen Kavlak, M., Senyel Kurkcuoglu, M. A., Bilge Ozturk, G., Cabuk, S. N., & Cabuk, A. (2024). Determination of land surface temperature and urban heat island effects with remote sensing capabilities: the case of Kayseri, Türkiye. *Natural Hazards*, *120*(6), 5509-5536. https://doi.org/10.1007/s11069-024-06431-5

Chan, Y., & Walmslqr, R. P. (1997). Learning and Understanding the Kruskal-Wallis One-Way Analysis-of-Variance-by-Ranks Test for Differences Among Three or More Independent Groups. Içinde *Physical Therapy* (C. 77, Sayı 1). https://academic.oup.com/ptj/article-abstract/77/12/1755/2633123

Chang, C. R., Li, M. H., & Chang, S. D. (2007). A preliminary study on the local cool-island intensity of Taipei city parks. *Landscape and Urban Planning*, *80*(4), 386-395. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2006.09.005

Chapman, S., Thatcher, M., Salazar, A., Watson, J. E. M., & McAlpine, C. A. (2018). The effect of urban density and vegetation cover on the heat island of a subtropical city. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, *57*(11), 2531-2550. https://doi.org/10.1175/JAMC-D-17-0316.1

Chapman, S., Watson, J. E. M., Salazar, A., Thatcher, M., & McAlpine, C. A. (2017). The impact of urbanization and climate change on urban temperatures: a systematic review. Içinde *Landscape Ecology* (C. 32, Sayı 10, ss. 1921-1935). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/s10980-017-0561-4

Chatzipoulka, C., Nikolopoulou, M., & Watkins, R. (2015). *The impact of urban geometry on the radiant environment in outdoor spaces*. http://www.meteo.fr/icuc9/

Chen, Y., Zheng, B., & Hu, Y. (2020). Mapping local climate zones using arcGIS-based method and exploring land surface temperature characteristics in Chenzhou, China. *Sustainability (Switzerland)*, *12*(7). https://doi.org/10.3390/su12072974

Cheng, X., Wei, B., Chen, G., Li, J., & Song, C. (2015). Influence of Park Size and Its Surrounding Urban Landscape Patterns on the Park Cooling Effect. *Journal of Urban Planning and Development*, *141*(3). https://doi.org/10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000256

Choi, Y. Y., Suh, M. S., & Park, K. H. (2014). Assessment of surface urban heat islands over three megacities in east asia using land surface temperature data retrieved from COMS. *Remote Sensing*, *6*(6), 5852-5867. https://doi.org/10.3390/rs6065852

Cooper, A. (2021, Kasım 1). *Explaining Machine Learning Models: A Non-Technical Guide to Interpreting SHAP Analyses*. https://www.aidancooper.co.uk/a-non-technical-guide-to-interpreting-shap-analyses/

Copernicus Climate Change Service. (2025, Ocak 10). *Global Climate Highlights 2024*. https://climate.copernicus.eu/copernicus-2024-first-year-exceed-15degc-above-pre-industrial-level

Coutts, A. M., Beringer, J., & Tapper, N. J. (2008). Investigating the climatic impact of urban planning strategies through the use of regional climate modelling: A case study for Melbourne, Australia. *International Journal of Climatology*, *28*(14), 1943-1957. https://doi.org/10.1002/joc.1680

de Almeida, C. R., Teodoro, A. C., & Gonçalves, A. (2021). Study of the urban heat island (Uhi) using remote sensing data/techniques: A systematic review. Içinde *Environments - MDPI* (C. 8, Sayı 10). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). https://doi.org/10.3390/environments8100105

Dirksen, M., Ronda, R. J., Theeuwes, N. E., & Pagani, G. A. (2019). Sky view factor calculations and its application in urban heat island studies. *Urban Climate*, *30*. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100498

Dissanayake, D. M. S. L. B., Morimoto, T., Ranagalage, M., & Murayama, Y. (2019). Land-use/land-cover changes and their impact on surface urban heat islands: Case study of Kandy City, Sri Lanka. *Climate*, *7*(8). https://doi.org/10.3390/cli7080099

Dong, F., & Asawa, T. (2025). A simulation study on building-scale strategies for urban heat island mitigation and building energy consumption: Case study in Japan. *Building and Environment*, *268*. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112311

Duckworth, F. S., & Sandberg, J. S. (1954). The Effect of Cities upon Horizontal and Vertical Temperature Gradients. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *35*(5), 198-207. https://doi.org/10.1175/1520-0477-35.5.198

Ellefsen, R. A. (1987). *Urban Terrain Zone Characteristics*.

Elzeni, M., Elmokadem, A., & Badawy, N. (2021). Genetic Algorithms Application in Urban Morphology Generation. *Port-Said Engineering Research Journal*, *0*(0), 0-0. https://doi.org/10.21608/pserj.2021.87367.1129

Encyclopedia Britannica. (2021, Ağustos 26). *Kentsel İklim*. https://www.britannica.com/science/urban-climate

EPA. (2008a). *Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies - Urban Heat Island Basics*.

EPA. (2008b). *Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies: Trees and Vegetation*. https://www.epa.gov/heat-islands/heat-island-compendium.

EPA. (2012). *Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies, Cool Pavements*. https://www.epa.gov/heat-islands/heat-island-compendium.

Erdem Okumus, D., & Akay, M. (2025). Quantitative assessment of non-stationary relationship between multi-scale urban morphology and urban heat. *Building and Environment, 272*. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.112669

Erdem Okumus, D., & Terzi, F. (2021). Evaluating the role of urban fabric on surface urban heat island: The case of Istanbul. *Sustainable Cities and Society, 73*, 103128. https://doi.org/10.1016/J.SCS.2021.103128

Erdem Okumus, D., & Terzi, F. (2022). Reconsidering Urban Densification for Microclimatic Improvement: Planning and Design Strategies for Istanbul. *Iconarp International J. of Architecture and Planning*. https://doi.org/10.15320/iconarp.2022.220

Erdem Okumuş, D. (2022). Kentsel Mikro İklimin İyileştirilmesine Yönelik Kent Dokularında Isı Adası Etki Değerlendirme Ve Azaltım Stratejileri Geliştirme Modeli: İstanbul Örneği.

Esri. (2024). *Sentinel-2 Land Cover Explorer*. https://livingatlas.arcgis.com/landcoverexplorer/#mapCenter=28.49800%2C41.06900%2C8&mode=step&timeExtent=2017%2C2022&year=2018&animation=true

Estacio, I., Babaan, J., Pecson, N. J., Blanco, A. C., Escoto, J. E., & Alcantara, C. K. (2019). GIS-BASED MAPPING of LOCAL CLIMATE ZONES USING FUZZY LOGIC and CELLULAR AUTOMATA. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, *42*(4/W19), 199-206. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W19-199-2019

European Bank for Reconstruction and Development (EBRD). (2019). *Green Cantonal Action Plan for Sarajevo*.

Feng, J., Gao, K., Khan, H., Ulpiani, G., Vasilakopoulou, K., Young Yun, G., & Santamouris, M. (2023). Overheating of Cities: Magnitude, Characteristics, Impact, Mitigation and Adaptation, and Future Challenges. *Annual Review of Environment and Resources*, *48*(Volume 48, 2023), 651-679. https://doi.org/10.1146/ANNUREV-ENVIRON-112321-093021/1

Feng, J., Gao, K., Khan, H., Ulpiani, G., Vasilakopoulou, K., Young Yun, G., & Santamouris, M. (2024). *Overheating of Cities: Magnitude, Characteristics, Impact, Mitigation and Adaptation, and Future Challenges*. *45*. https://doi.org/10.1146/annurev-environ-112321

Gedzelman, S. D., Austin, S., Cermak, R., Stefano, N., Partridge, S., Quesenberry, S., & Robinson, D. A. (2003). Mesoscale aspects of the Urban Heat Island

around New York City. *Theoretical and Applied Climatology*, *75*(1-2), 29-42. https://doi.org/10.1007/s00704-002-0724-2

Geletič, J., Lehnert, M., & Dobrovolný, P. (2016). Land surface temperature differences within local climate zones, Based on two central European cities. *Remote Sensing*, *8*(10). https://doi.org/10.3390/rs8100788

Ghosh, S., Kumar, D., & Kumari, R. (2022). Assessing spatiotemporal dynamics of land surface temperature and satellite-derived indices for new town development and suburbanization planning. *Urban Governance*, *2*(1), 144-156. https://doi.org/10.1016/j.ugj.2022.05.001

Ghouri, A. Y., Rasheed, F., Baig, R., & Tabassum, S. (2022). *Analytical Study of Land Surface Temperature with NDVI, NDBI, and NDBaI of Vehari District and Detect the UHI in Vehari City, Pakistan*. www.matjournals.com

Grimmond, C. S. B., & Oke, T. R. (2002). Turbulent heat fluxes in urban areas: Observations and a local-scale urban meteorological parameterization scheme (LUMPS). *Journal of Applied Meteorology*, *41*(7), 792-810. https://doi.org/10.1175/1520-0450(2002)041<0792:THFIUA>2.0.CO;2

Guo, F., Zhao, J., Zhang, H., Dong, J., Zhu, P., & Lau, S. S. Y. (2023). Effects of urban form on sea cooling capacity under the heatwave. *Sustainable Cities and Society*, *88*. https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104271

Guo, G., Zhou, X., Wu, Z., Xiao, R., & Chen, Y. (2016). Characterizing the impact of urban morphology heterogeneity on land surface temperature in Guangzhou, China. *Environmental Modelling and Software*, *84*, 427-439. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.06.021

Güller, C., & Toy, S. (2024). The Impacts of Urban Morphology on Urban Heat Islands in Housing Areas: The Case of Erzurum, Turkey. *Sustainability 2024, Vol. 16, Page 791*, *16*(2), 791. https://doi.org/10.3390/SU16020791

Güneralp, B., Tezer, A., & Albayrak, İ. (2013). Local assessment of İstanbul: Biodiversity and ecosystem services. *Urbanization, Biodiversity and Ecosystem Services: Challenges and Opportunities: A Global Assessment*, 291-311. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7088-1_16

Hajtmanek, R., Morgenstein, P., Hubinský, T., Legény, J., & Špaček, R. (2023). Determination of Solar-Surface-Area-to-Volume Ratio: Early Design Stage Solar Performance Assessment of Buildings. *Buildings*, *13*(2). https://doi.org/10.3390/buildings13020296

Hathway, E. A., & Sharples, S. (2012). The interaction of rivers and urban form in mitigating the Urban Heat Island effect: A UK case study. *Building and Environment*, *58*, 14-22. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.06.013

He, J., Shi, Y., Xu, L., Lu, Z., Feng, M., Tang, J., & Guo, X. (2024). Exploring the scale effect of urban thermal environment through XGBoost model. *Sustainable Cities and Society*, *114*, 105763. https://doi.org/10.1016/J.SCS.2024.105763

Hidalgo-García, D., & Arco-Díaz, J. (2022). Modeling the Surface Urban Heat Island (SUHI) to study of its relationship with variations in the thermal field and with the indices of land use in the metropolitan area of Granada (Spain). *Sustainable Cities and Society*, *87*. https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104166

Hong, T., Xu, Y., Sun, K., Zhang, W., Luo, X., & Hooper, B. (2021). Urban microclimate and its impact on building performance: A case study of San Francisco. *Urban Climate, 38*. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100871

Hu, C. B., Zhang, F., Gong, F. Y., Ratti, C., & Li, X. (2020). Classification and mapping of urban canyon geometry using Google Street View images and deep multitask learning. *Building and Environment, 167*. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106424

Huang, Y., Bouyer, J., Musy, M., & Athamena, K. (2011). *Khaled Athamena École Polytechnique d'architecture et d'urbanisme (EPAU) Mitigating Urban Heat Island Effect by Urban Design: Forms and Materials*. https://www.researchgate.net/publication/266390217

İBB, İ. B. B. (2021). *İstanbul İklim Değişikliği Eylem Planı*.

Jabbar, H. K., Hamoodi, M. N., & Al-Hameedawi, A. N. (2023). Urban heat islands: a review of contributing factors, effects and data. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1129*(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/1129/1/012038

Kaçmaz, G., & Gürbüz, E. (2022). *Arazi Örtüsü Değişiminin Arazi Yüzey Sıcaklığına Etkisinin Uzaktan Algılama ve CBS Entegrasyonu ile Belirlenmesi: Aksaray İli Örneği (Determination of the Effect of Land Cover Change on Land Surface Temperature through Remote Sensing and GIS Integration: Case of Aksaray Province)*.

Kakaki, S. (2013). Climate Change: Its Causes, Effects and Control. *Journal of Educational and Social Research*. https://doi.org/10.5901/jesr.2013.v3n10p73

Kanbak, A. (2013). *İstanbul ve Kentsel Saçaklanma*. https://doi.org/10.4305/Metu.Jfa.2012.1.15

Karaman, S., Gökalp, Z., Üniversitesi, G., Fakültesi, Z., Yapılar, T., & Bölümü, S. (2010). *Küresel Isınma ve İklim Değişikliğinin Su Kaynakları Üzerine Etkileri*. www.nobel.gen.tr

Karimimoshaver, M., Khalvandi, R., & Khalvandi, M. (2021). The effect of urban morphology on heat accumulation in urban street canyons and mitigation approach. *Sustainable Cities and Society, 73*, 103127. https://doi.org/10.1016/J.SCS.2021.103127

Khorrami, B., & Gunduz, O. (2019). *Uzaktan Algılama ve CBS'nin Yüzey Sıcaklığı ve Kentsel Isı Adası Tespit ve Analizinde Uygulanması*. https://www.researchgate.net/publication/337275043

Klok, L., Zwart, S., Verhagen, H., & Mauri, E. (2012). The surface heat island of Rotterdam and its relationship with urban surface characteristics. *Resources, Conservation and Recycling, 64*, 23-29. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.01.009

Kubat, A. S., & Hazar, D. (2018). İstanbul'un Çeper Kuşak Gelişim Süreci. *Türkiye Kentsel Morfoloji Ağı, II. Kentsel Morfoloji Sempozyumu Bildiriler Kitabı, İstanbul*, 693-711. https://www.tnum.org.tr/index.php/tnum/article/view/135

Kubilay, A., Allegrini, J., Strebel, D., Zhao, Y., Derome, D., & Carmeliet, J. (2020). Advancement in urban climate modelling at local scale: Urban heat island

mitigation and building cooling demand. *Atmosphere*, *11*(12), 1-20. https://doi.org/10.3390/atmos11121313

Kuttler, W. (2008). *The Urban Climate – Basic and Applied Aspects*. Scholars Portal.

Latif, S. (2014). *Land Surface Temperature Retrival of Landsat-8 Data Using Split Window Algorithm- A Case Study of Ranchi District*. *2*. www.ijedr.org

Lee, D., & Oh, K. (2018). Classifying urban climate zones (UCZs) based on statistical analyses. *Urban Climate*, *24*, 503-516. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.06.005

Li, L., Yang, X., & Qian, Y. (2018). CFD simulation analysis of the influence of floor area ratio on the wind environment in residential districts. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, *11*(5), 185-192. https://doi.org/10.25103/jestr.115.24

Li, Y., Schubert, S., Kropp, J. P., & Rybski, D. (2020). On the influence of density and morphology on the Urban Heat Island intensity. *Nature Communications*, *11*(1). https://doi.org/10.1038/s41467-020-16461-9

Lin, A., Wu, H., Luo, W., Fan, K., & Liu, H. (2024). How does urban heat island differ across urban functional zones? Insights from 2D/3D urban morphology using geospatial big data. *Urban Climate*, *53*. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101787

Lin, Z., Xu, H., Han, L., Zhang, H., Peng, J., & Yao, X. (2024). Day and night: Impact of 2D/3D urban features on land surface temperature and their spatiotemporal non-stationary relationships in urban building spaces. *Sustainable Cities and Society*, *108*, 105507. https://doi.org/10.1016/J.SCS.2024.105507

Liu, B., Guo, X., & Jiang, J. (2023). How Urban Morphology Relates to the Urban Heat Island Effect: A Multi-Indicator Study. *Sustainability (Switzerland)*, *15*(14). https://doi.org/10.3390/su151410787

Lobaccaro, G., & Acero, J. A. (2015). Comparative analysis of green actions to improve outdoor thermal comfort inside typical urban street canyons. *Urban Climate*, *14*, 251-267. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.10.002

Luo, Z., & Asproudi, C. (2015). Subsurface urban heat island and its effects on horizontal ground-source heat pump potential under climate change. *Applied Thermal Engineering*, *90*, 530-537. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.07.025

MacFarland, T. W., & Yates, J. M. (2016). *Kruskal–Wallis H-Test for Oneway Analysis of Variance (ANOVA) by Ranks*. 177-211. https://doi.org/I10.1007/978-3-319-30634-6_6

Martinelli, A., Kolokotsa, D. D., & Fiorito, F. (2020). Urban heat island in Mediterranean coastal cities: The case of Bari (Italy). *Climate*, *8*(6). https://doi.org/10.3390/CLI8060079

McPherson, E. G., Nowak, D. J., & Rowntree, R. A. (1994). *Chicago's Urban Forest Ecosystem: Results of the Chicago Urban Forest Climate Project*.

Menberg, K., Bayer, P., Zosseder, K., Rumohr, S., & Blum, P. (2013). Subsurface urban heat islands in German cities. *Science of the Total Environment*, *442*, 123-133. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.10.043

Meteoblue. (2024). *İklim değişikliği İstanbul- meteoblue*. https://www.meteoblue.com/tr/climate-change/%C4%B0stanbul_t%C3%BCrkiye-cumhuriyeti_745044

Mills, G. (1997). Theoretical An Urban Canopy-Layer Climate Model. Içinde *Theor. Appl. Climatol* (C. 57).

Mills, G. (2008). Luke Howard and The Climate of London. *Weather*, *63*(6), 153-157. https://doi.org/10.1002/wea.195

Mills, G. (2014). Urban climatology: History, status and prospects. *Urban Climate*, *10*(P3), 479-489. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.06.004

Mohammad, P., & Goswami, A. (2021). Quantifying diurnal and seasonal variation of surface urban heat island intensity and its associated determinants across different climatic zones over Indian cities. *GIScience and Remote Sensing*, *58*(7), 955-981. https://doi.org/10.1080/15481603.2021.1940739

Morganti, M., Salvati, A., Coch, H., & Cecere, C. (2017). Urban morphology indicators for solar energy analysis. *Energy Procedia*, *134*, 807-814. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.533

NASA Earth Observations (NEO). (2024, Şubat 10). *Vegetation & Land Surface Temperature*. NASA Earth Observatory.

Nazarian, N., Krayenhoff, E. S., Bechtel, B., Hondula, D. M., Paolini, R., Vanos, J., Cheung, T., Chow, W. T. L., de Dear, R., Jay, O., Lee, J. K. W., Martilli, A., Middel, A., Norford, L. K., Sadeghi, M., Schiavon, S., & Santamouris, M. (2022). Integrated Assessment of Urban Overheating Impacts on Human Life. Içinde *Earth's Future* (C. 10, Sayı 8). John Wiley and Sons Inc. https://doi.org/10.1029/2022EF002682

Nicholsos, S. E. (1975). *A Pollutıon Model For Street-Level Aır**.

Oke, T. R. (1973). *Atmospheric Environment Pergamon Press* (C. 7).

Oke, T. R. (1976). The distinction between canopy and boundary-layer urban heat Islands. *Atmosphere*, *14*(4), 268-277. https://doi.org/10.1080/00046973.1976.9648422

Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *108*(455), 1-24. https://doi.org/10.1002/qj.49710845502

Oke, T. R. (1988). Street Design and Urban Canopy Layer Climate. Içinde *Energy and Buildings* (C. 11).

Oke, T. R. (1995). *The Heat Island Of The Urban Boundary Layer: Characterıstıcs, Causes And Effects.*

Oke, T. R. (2004). *Inıtıal Guıdance To Obtaın Representatıve Meteorologıcal Observatıons At Urban Sıtes*.

Oke, T. R. (2007). Siting and Exposure of Meteorological Instruments at Urban Sites. Içinde *Air Pollution Modeling and Its Application XVII* (ss. 615-631). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-0-387-68854-1_66

Oke, T. R., & Maxwell, G. B. (1975). *URBAN HEAT ISLAND DYNAMICS IN MONTREAL AND VANCOUVER*.

Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2017). *Urban Climates*.

Orlowsky, B., Gerstengarbe, F. W., & Werner, P. C. (2008). A resampling scheme for regional climate simulations and its performance compared to a dynamical RCM. *Theoretical and Applied Climatology*, *92*(3-4), 209-223. https://doi.org/10.1007/s00704-007-0352-y

Ornam, K., Wonorahardjo, S., & Triyadi, S. (2024). Several façade types for mitigating urban heat island intensity. *Building and Environment*, *248*. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.111031

Ostertagová, E., Ostertag, O., & Kováč, J. (2014). Methodology and application of the Kruskal-Wallis test. *Applied Mechanics and Materials*, *611*, 115-120. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.611.115

Ögçe, H., & Erdem Kaya, M. (2024). Urban heat island phenomenon in Istanbul: A comprehensive analysis of land use/land cover and local climate zone effect. *Indoor and Built Environment*. https://doi.org/10.1177/1420326X241244724

Özker, S. (2020). İstanbul'da Kentsel Mekânın Değişimi. *IBAD Sosyal Bilimler Dergisi / IBAD Journal of Social Sciences*, 618-638. https://doi.org/10.21733/ibad.795703

Palusci, O., Monti, P., Cecere, C., Montazeri, H., & Blocken, B. (2022). Impact of morphological parameters on urban ventilation in compact cities: The case of the Tuscolano-Don Bosco district in Rome. *Science of the Total Environment*, *807*. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150490

Park, S., Lee, S., & Oh, K. (2024). Defining and Verifying New Local Climate Zones with Three-Dimensional Built Environments and Urban Metabolism. *Land*, *13*(9), 1461. https://doi.org/10.3390/land13091461

Peng, F., Cao, Y., Sun, X., & Zou, B. (2024). Study on the contributions of 2D and 3D urban morphologies to the thermal environment under local climate zones. *Building and Environment*, *263*, 111883. https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2024.111883

Pijpers-van Esch, M. (2015). *Designing the Urban Microclimate*.

Punia, M., & Singh, L. (2012). Entropy Approach for Assessment of Urban Growth: A Case Study of Jaipur, INDIA. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, *40*(2), 231-244. https://doi.org/10.1007/S12524-011-0141-Z

Quan, J. L. (2019). Enhanced geographic information system-based mapping of local climate zones in Beijing, China. *Science China Technological Sciences*, *62*(12), 2243-2260. https://doi.org/10.1007/s11431-018-9417-6

Quanz, J. A., Ulrich, S., Fenner, D., Holtmann, A., & Eimermacher, J. (2018). Micro-scale variability of air temperature within a local climate zone in Berlin, Germany, during summer. *Climate*, *6*(1). https://doi.org/10.3390/cli6010005

Reinwald, F., Thiel, S., Kainz, A., & Hahn, C. (2024). Components of urban climate analyses for the development of planning recommendation maps. *Urban Climate, 57*. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.102090

Roy, D. P., Wulder, M. A., Loveland, T. R., C.E., W., Allen, R. G., Anderson, M. C., Helder, D., Irons, J. R., Johnson, D. M., Kennedy, R., Scambos, T. A., Schaaf, C. B., Schott, J. R., Sheng, Y., Vermote, E. F., Belward, A. S., Bindschadler, R., Cohen, W. B., Gao, F., … Zhu, Z. (2014). Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment, 145*, 154-172. https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.001

Salameh, M., Elkhazindar, A., & Touqan, B. (2023). The effect of building height on thermal properties and comfort of a housing project in the hot arid climate of the UAE. *Frontiers in Built Environment, 9*. https://doi.org/10.3389/fbuil.2023.1174147

Santamouris, M. (2014). Cooling the cities - A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy, 103*, 682-703. https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.003

Santamouris, M. (2020). Recent progress on urban overheating and heat island research. Integrated assessment of the energy, environmental, vulnerability and health impact. Synergies with the global climate change. Içinde *Energy and Buildings* (C. 207). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109482

Santamouris, M., Cartalis, C., Synnefa, A., & Kolokotsa, D. (2015). On the impact of urban heat island and global warming on the power demand and electricity consumption of buildings - A review. *Energy and Buildings, 98*, 119-124. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.052

Sharifi, E., & Lehmann, S. (2014). Comparative analysis of surface urban heat island effect in central sydney. *Journal of Sustainable Development, 7*(3), 23-34. https://doi.org/10.5539/jsd.v7n3p23

Shehata, A. M. (2023). Sustainable-Oriented Development for Urban Interface of Historic Centers. *Sustainability (Switzerland), 15*(3). https://doi.org/10.3390/su15032792

Shen, T., Wu, J., Yuan, S., Kong, F., & Liu, Y. (2024). Analysis of Urban Spatial Morphology in Harbin: A Study Based on Building Characteristics and Driving Factors. *Sustainability (Switzerland), 16*(20). https://doi.org/10.3390/su16209072

Shi, Y., Ren, C., Zheng, Y., & Ng, E. (2016). Mapping the urban microclimatic spatial distribution in a sub-tropical high-density urban environment. *Architectural Science Review, 59*(5), 370-384. https://doi.org/10.1080/00038628.2015.1105195

Shishegar, N. (2013). Street Design and Urban Microclimate: Analyzing the Effects of Street Geometry and Orientation on Airflowand Solar Access in Urban Canyons. *Journal of Clean Energy Technologies*, 52-56. https://doi.org/10.7763/jocet.2013.v1.13

Short, J. R., & Farmer, A. (2021). Cities and Climate Change. *Earth (Switzerland)*, *2*(4), 1038-1045. https://doi.org/10.3390/EARTH2040061/S1

Silva, I., Santos, R., Lopes, A., & Araújo, V. (2018). Morphological indices as urban planning tools in northeastern Brazil. *Sustainability (Switzerland)*, *10*(12). https://doi.org/10.3390/su10124358

Speelman, E. N., Van Kempen, M. M. L., Barke, J., Brinkhuis, H., Reichart, G. J., Smolders, A. J. P., Roelofs, J. G. M., Sangiorgi, F., De Leeuw, J. W., Lotter, A. F., & Sinninghe DamstÉ, J. S. (2009). The Eocene Arctic Azolla bloom: Environmental conditions, productivity and carbon drawdown. *Geobiology*, *7*(2), 155-170. https://doi.org/10.1111/j.1472-4669.2009.00195.x

Stewart, I. D. (2011a). A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature. Içinde *International Journal of Climatology* (C. 31, Sayı 2, ss. 200-217). https://doi.org/10.1002/joc.2141

Stewart, I. D. (2011b). *Redefınıng The Urban Heat Island*.

Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *93*(12), 1879-1900. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1

Svensson, M. K. (2004). Sky view factor analysis - Implications for urban air temperature differences. *Meteorological Applications*, *11*(3), 201-211. https://doi.org/10.1017/S1350482704001288

Tan, J. K. N., Belcher, R. N., Tan, H. T. W., Menz, S., & Schroepfer, T. (2021). The urban heat island mitigation potential of vegetation depends on local surface type and shade. *Urban Forestry and Urban Greening*, *62*. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127128

Tang, N., Farhan, M., Mohammad, P., Abdullah-Al-Wadud, M., Hussain, S., Hamza, U., Zulqarnain, R. M., & Rebouh, N. Y. (2025). Enhancing Urban Heat Island Analysis Through Multi-Sensor Data Fusion and GRU-Based Deep Learning Approaches for Climate Modeling. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. https://doi.org/10.1109/JSTARS.2025.3554529

T.C. Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (2024a). *İklim Sınıflandırması* . https://mgm.gov.tr/iklim/iklim-siniflandirmalari.aspx?m=ISTANBUL

T.C. Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (2024b). *Meteoroloji Genel Müdürlüğü Resmi İklim İstatistikleri*. https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=A&m=ISTANBUL

Tran, H., Uchihama, D., Ochi, S., & Yasuoka, Y. (2006). Assessment with satellite data of the urban heat island effects in Asian mega cities. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *8*(1), 34-48. https://doi.org/10.1016/j.jag.2005.05.003

TÜİK, T. İ. K. (2024). *Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi Sonuçları*. https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?locale=tr

UN HABITAT. (2024). *Cities and Climate Action - World Cities Report 2024*.

Unal Cilek, M., & Cilek, A. (2021). Analyses of land surface temperature (LST) variability among local climate zones (LCZs) comparing Landsat-8 and ENVI-

met model data. *Sustainable Cities and Society*, *69*. https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102877

USGS. (2025). *Landsat 8 | U.S. Geological Survey*. https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8

Ünal Çilek, M. (2021). *A Vector-Based Mapping in GIS Environment to Classify Local Climate Zone*.

Ünal, Y. S., Sonuç, C. Y., Incecik, S., Topcu, H. S., Diren-Üstün, D. H., & Temizöz, H. P. (2020). Investigating urban heat island intensity in Istanbul. *Theoretical and Applied Climatology*, *139*(1-2), 175-190. https://doi.org/10.1007/s00704-019-02953-2

Vardoulakis, S., Fisher, B. E. A., Pericleous, K., & Gonzalez-Flesca, N. (2003). Modelling air quality in street canyons: a review. Içinde *Atmospheric Environment* (C. 37).

Voogt, J. A., & Oke, T. R. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, *86*(3), 370-384. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8

Wang, C., Zhang, H., Ma, Z., Yang, H., & Jia, W. (2024). Urban Morphology Influencing the Urban Heat Island in the High-Density City of Xi'an Based on the Local Climate Zone. *Sustainability (Switzerland)* , *16*(10). https://doi.org/10.3390/su16103946

Wang, F., Qin, Z., Song, C., Tu, L., Karnieli, A., & Zhao, S. (2015). An improved mono-window algorithm for land surface temperature retrieval from landsat 8 thermal infrared sensor data. *Remote Sensing*, *7*(4), 4268-4289. https://doi.org/10.3390/rs70404268

Wang, Q., Fan, Y., Hang, J., & Li, Y. (2019). Interacting urban heat island circulations as affected by weak background wind. *Building and Environment*, *160*, 106224. https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2019.106224

Wei, R., Song, D., Wong, N. H., & Martin, M. (2016). Impact of Urban Morphology Parameters on Microclimate. *Procedia Engineering*, *169*, 142-149. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.10.017

Weng, Q. (2009). Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends. Içinde *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* (C. 64, Sayı 4, ss. 335-344). https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.03.007

Wilby, R. L. (2008). Constructing climate change scenarios of urban heat island intensity and air quality. *Environment and Planning B: Planning and Design*, *35*(5), 902-919. https://doi.org/10.1068/b33066t

World Bank. (2024). *Urban Overheatıng & Adaptatıon Measures*.

World Meteorological Organization (WMO). (2023). *State of the Global Climate 2023*.

Xu, Y., Ren, C., Ma, P., Ho, J., Wang, W., Lau, K. K. L., Lin, H., & Ng, E. (2017). Urban morphology detection and computation for urban climate research. *Landscape and Urban Planning*, *167*, 212-224. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.06.018

Yamak, B., Yağcı, Z., & Bilgilioğlu, B. (2019). *KENTLEŞMENİN ARAZİ YÜZEY SICAKLIĞINA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI BURSA İLİ ÖRNEĞİ*. https://www.researchgate.net/publication/333758700

Yang, J., Xin, J., Zhang, Y., Xiao, X., & Xia, J. C. (2022). Contributions of sea–land breeze and local climate zones to daytime and nighttime heat island intensity. *npj Urban Sustainability*, *2*(1). https://doi.org/10.1038/s42949-022-00055-z

Yang, J., Yang, Y., Sun, D., Jin, C., & Xiao, X. (2021). Influence of urban morphological characteristics on thermal environment. *Sustainable Cities and Society*, *72*. https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103045

Yang, S., Wang, L. (Leon), Stathopoulos, T., & Marey, A. M. (2023). Urban microclimate and its impact on built environment – A review. *Building and Environment*, *238*. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110334

Yang, X., & Li, Y. (2015). The impact of building density and building height heterogeneity on average urban albedo and street surface temperature. *Building and Environment*, *90*, 146-156. https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2015.03.037

Yang, X., Li, Y., Luo, Z., & Chan, P. W. (2017). The urban cool island phenomenon in a high-rise high-density city and its mechanisms. *International Journal of Climatology*, *37*(2), 890-904. https://doi.org/10.1002/joc.4747

Yu, S., Chen, Z., Yu, B., Wang, L., Wu, B., Wu, J., & Zhao, F. (2020). Exploring the relationship between 2D/3D landscape pattern and land surface temperature based on explainable eXtreme Gradient Boosting tree: A case study of Shanghai, China. *Science of the Total Environment*, *725*. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138229

Yuan, B., Zhou, L., Hu, F., & Wei, C. (2024). Effects of 2D/3D urban morphology on land surface temperature: Contribution, response, and interaction. *Urban Climate*, *53*, 101791. https://doi.org/10.1016/J.UCLIM.2023.101791

Yunita, R., Wibowo, A., Supriatna, & Rais, A. F. (2022). Urban Heat Island Mitigation Strategy based on Local Climate Zone Classification using Landsat 8 satellite imagery. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *1039*(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/1039/1/012013

Zhang, W., Li, Y., Zheng, C., & Zhu, Y. (2023). Surface urban heat island effect and its driving factors for all the cities in China: Based on a new batch processing method. *Ecological Indicators*, *146*. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109818

Zhang, Y., Zhang, J., Zhang, X., Zhou, D., & Gu, Z. (2021). Analyzing the characteristics of UHI (Urban heat island) in summer daytime based on observations on 50 sites in 11 LCZ (local climate zone) types in Xi'an, China. *Sustainability (Switzerland)*, *13*(1), 1-14. https://doi.org/10.3390/su13010083

Zhao, C. (2018). LINKING the Local Clımate Zones And Land Surface Temperature To Investıgate The Surface Urban Heat Island, A Case Study Of San Antonıo, Texas, U.S. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *4*(3), 277-283. https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-3-277-2018

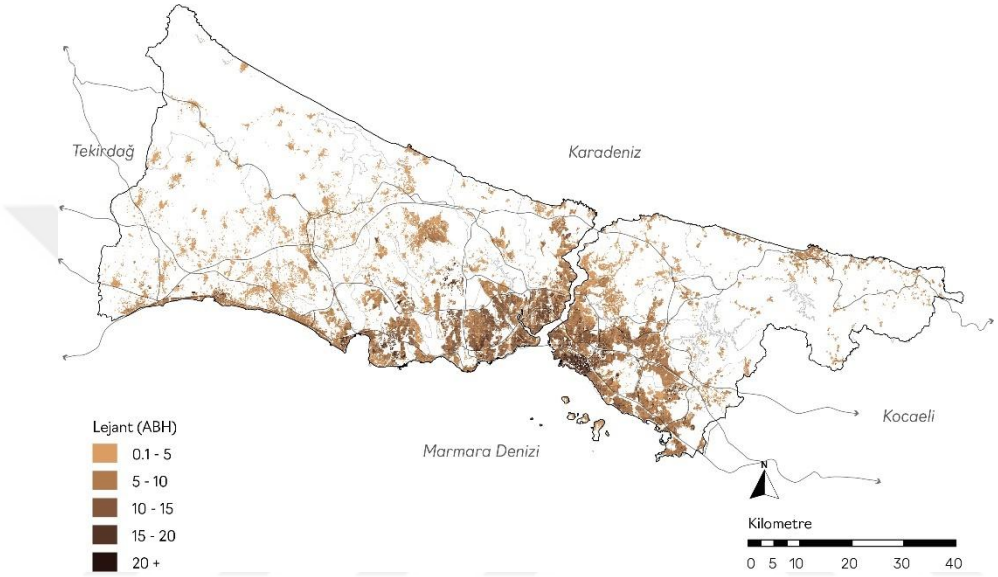
Zheng, Y., Ren, C., Xu, Y., Wang, R., Ho, J., Lau, K., & Ng, E. (2018). GIS-based mapping of Local Climate Zone in the high-density city of Hong Kong. *Urban Climate*, *24*, 419-448. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.05.008

Zheng, Z., Zhou, W., Yan, J., Qian, Y., Wang, J., & Li, W. (2019). The higher, the cooler? Effects of building height on land surface temperatures in residential areas of Beijing. *Physics and Chemistry of the Earth*, *110*, 149-156. https://doi.org/10.1016/j.pce.2019.01.008

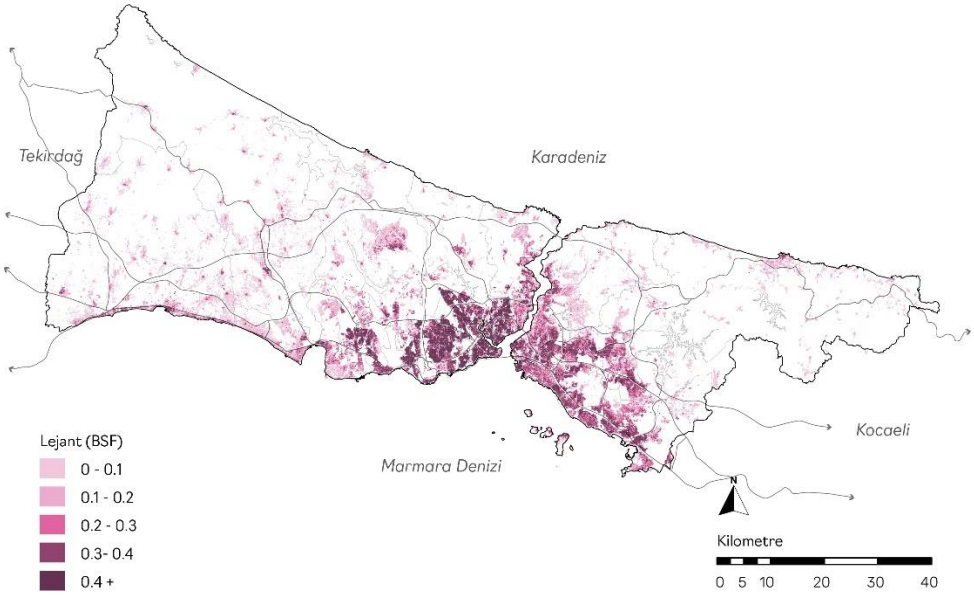
Zhou, X., Okaze, T., Ren, C., Cai, M., Ishida, Y., Watanabe, H., & Mochida, A. (2020). Evaluation of urban heat islands using local climate zones and the influence of sea-land breeze. *Sustainable Cities and Society*, *55*. https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102060

Zhu, Z., Shen, Y., Fu, W., Zheng, D., Huang, P., Li, J., Lan, Y., Chen, Z., Liu, Q., Xu, X., & Yao, X. (2023). How does 2D and 3D of urban morphology affect the seasonal land surface temperature in Island City? A block-scale perspective. *Ecological Indicators*, *150*. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110221

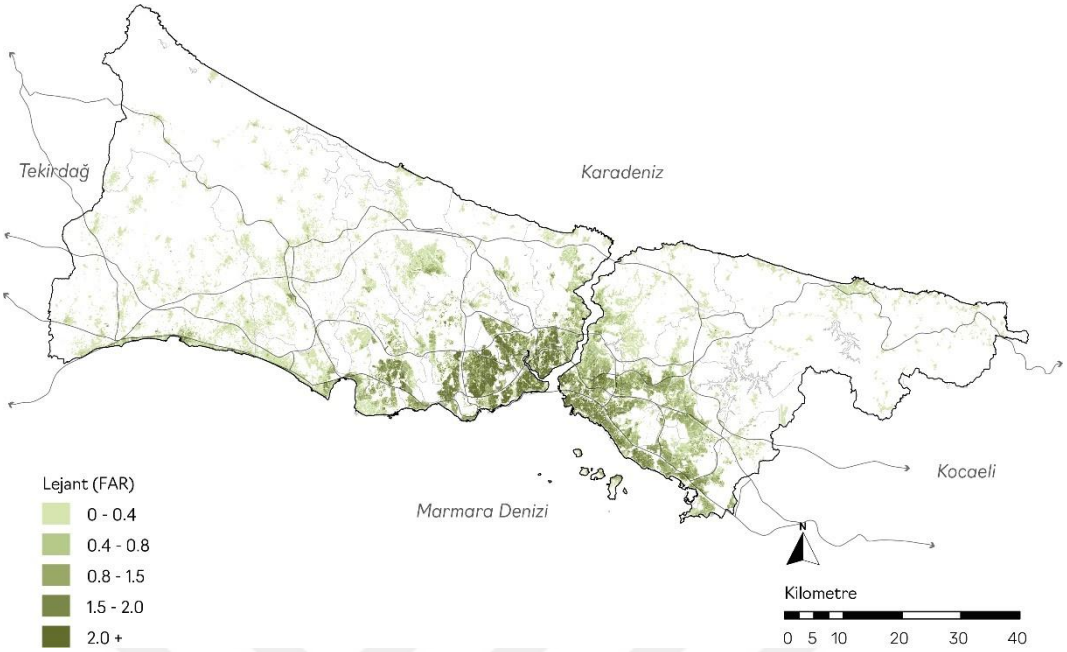
A
MEKÂNSAL MORFOLOJİ ANALİZLERİ



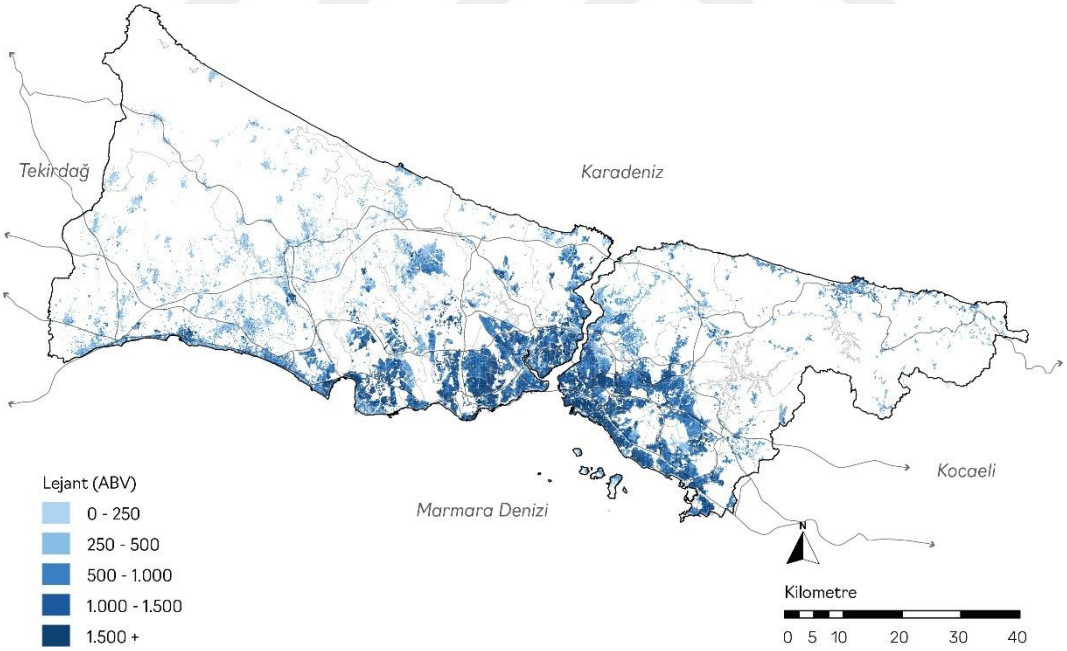
Şekil A.1 Ortalama bina yüksekliği oranı (BSF)



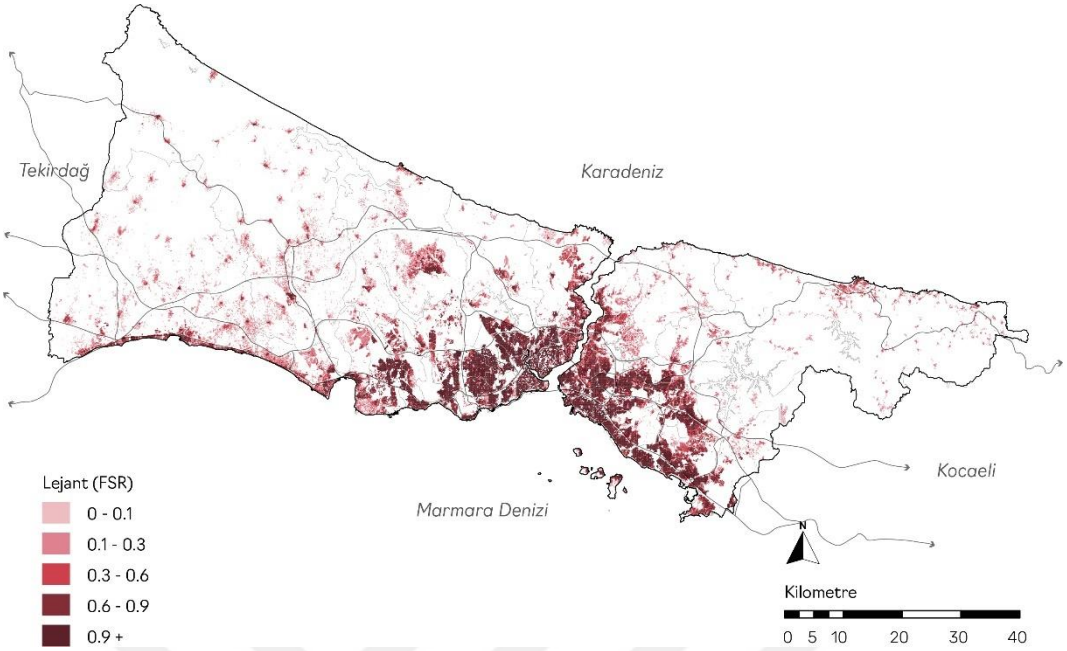
Şekil A.2 Bina yüzey alanı oranı (BSF)



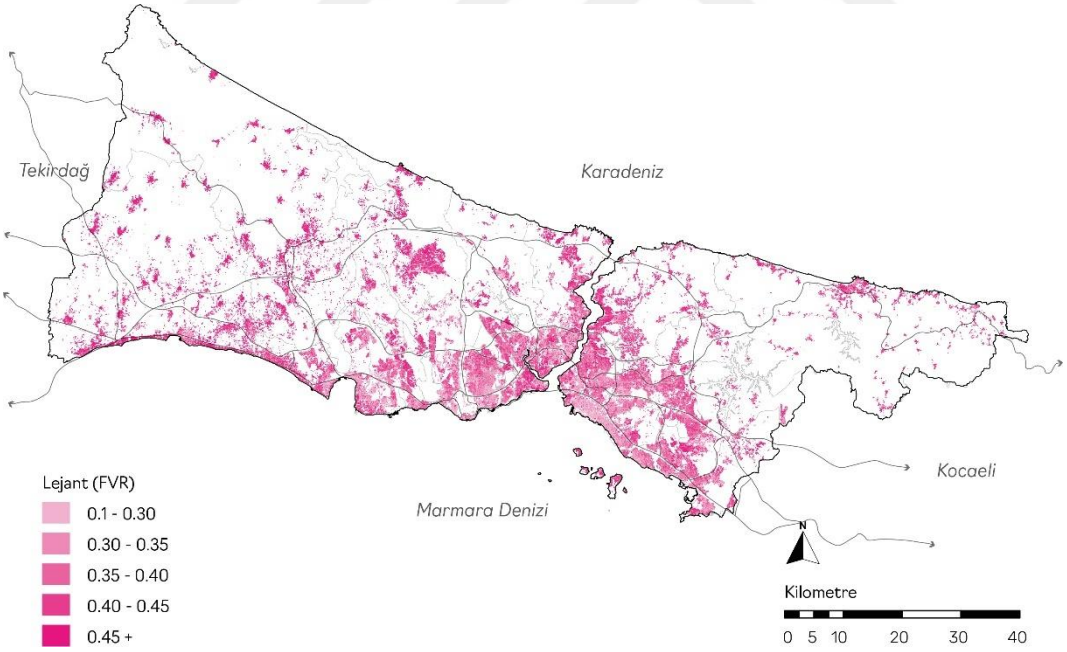
Şekil A.3 Kat alanı katsayısı oranı (FAR)



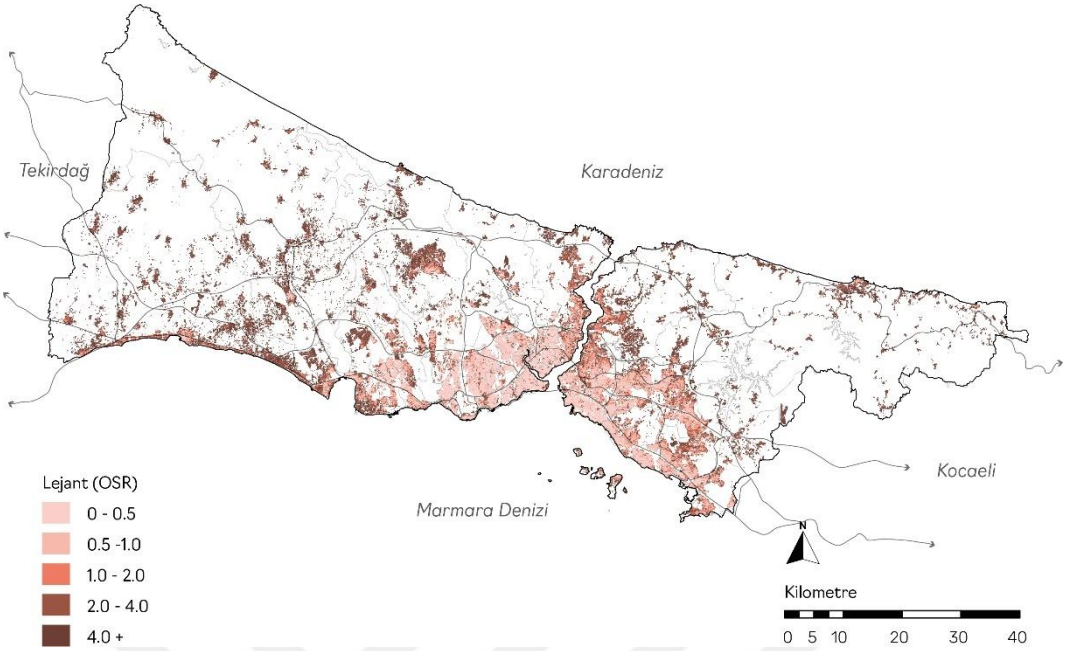
Şekil A.4 Ortalama bina hacmi oranı (ABV)



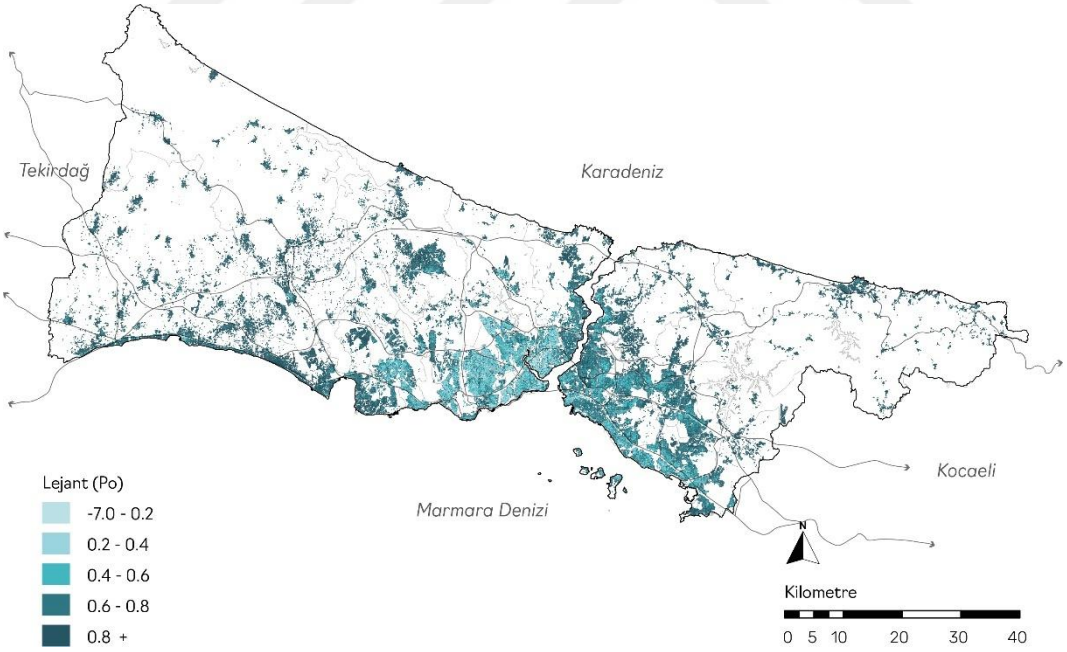
Şekil A.5 Bina cephe alanı oranı (FSR)



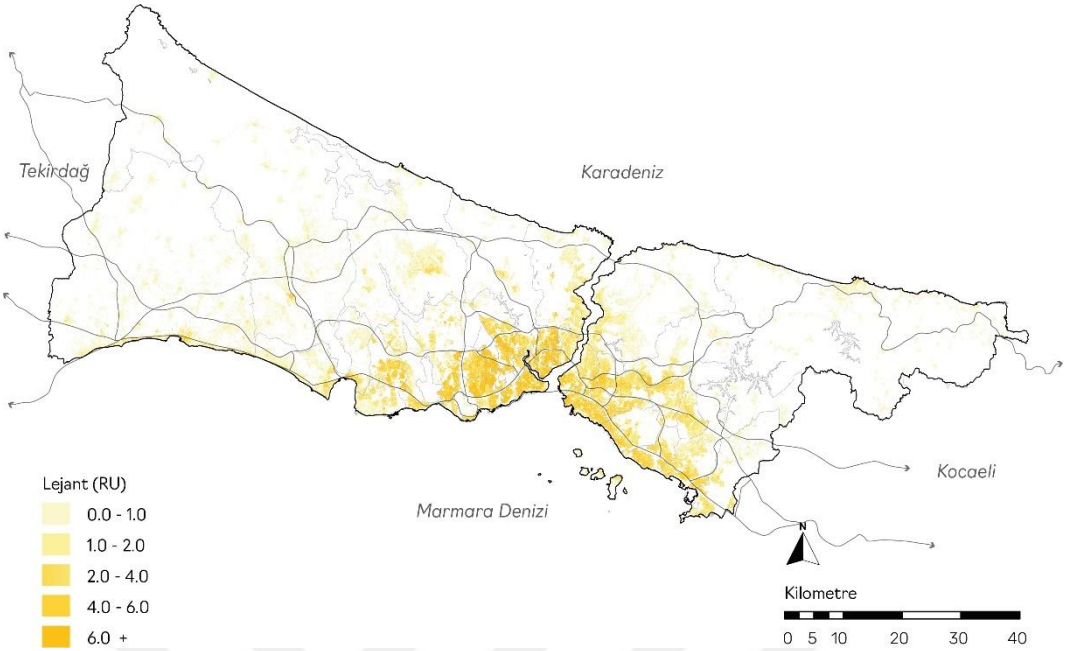
Şekil A.6 Bina cephe hacim oranı (FVR)



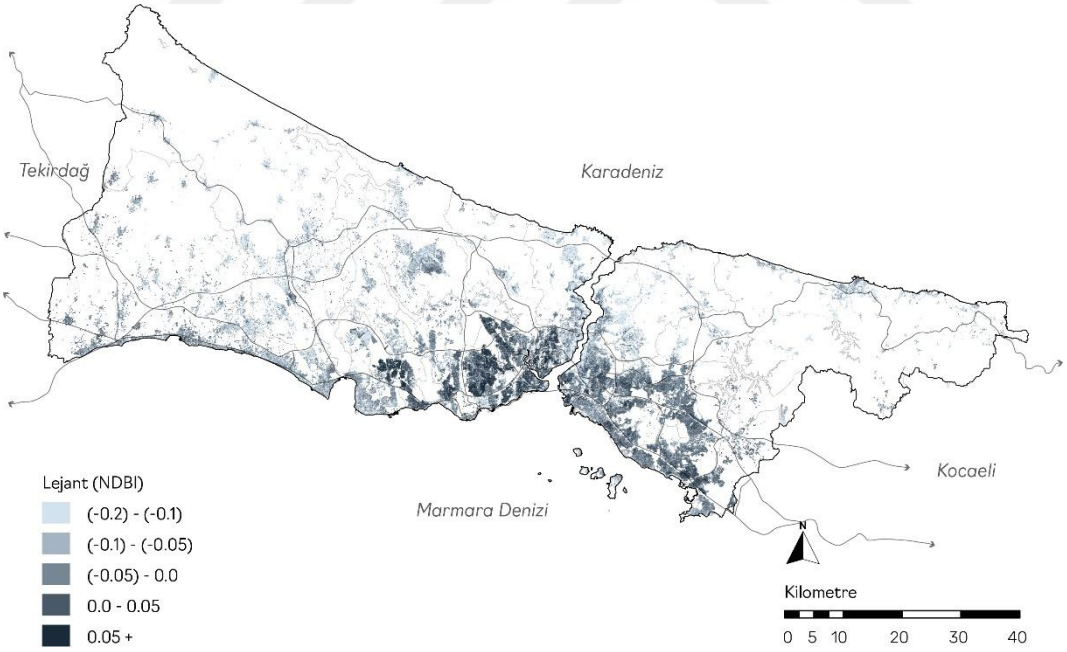
Şekil A.7 Açık alan oranı (OSR)



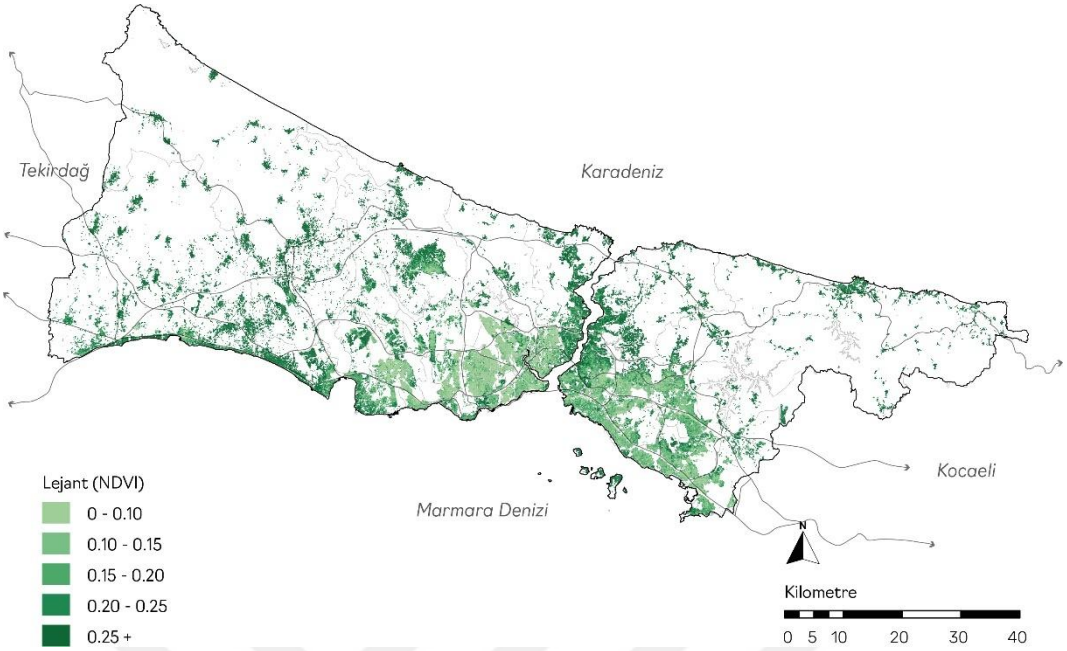
Şekil A.8 Gözeneklilik oranı (Po)



Şekil A.9 Mutlak pürüzlülük oranı (RU)



Şekil A.10 Normalize edilmiş yapılaşma indeksi (NDBI)



Şekil A.11 Normalize edilmiş bitki örtüsü indeksi (NDVI)

B
ÇOKLU KARŞILAŞTIRMA: POST HOC BONFERRONİ TESTİ SONUÇLARI

Tablo B.1 Çoklu Karşılaştırma Bonferroni Testi Sonuçları

Karşılaştırma Grupları	Test İstatistiği	Std. Hata	Std. Test İstatistiği	Anlamlılık Düzeyi (p)	Düzeltilmiş Anlamlılık Düzeyi
LCZ G - LCZ A	76793.516	1517.842	50.594	<.001	.000
LCZ G – LCZ 9A	181169.852	4374.649	41.414	<.001	.000
LCZ G – LCZ B	221188.247	1749.894	126.401	<.001	.000
LCZ G – LCZ 4	344554.874	5233.937	65.831	<.001	.000
LCZ G – LCZ 9	352995.217	1694.969	208.261	<.001	.000
LCZ G – LCZ 5	357749.259	2915.233	122.717	<.001	.000
LCZ G – LCZ C	364438.294	14820.885	24.590	<.001	.000
LCZ G – LCZ D	375516.882	1544.276	243.167	<.001	.000
LCZ G – LCZ 6	384472.429	3234.793	118.855	<.001	.000
LCZ G – LCZ 4E	392128.252	3457.438	113.416	<.001	.000
LCZ G – LCZ 1	399220.542	13594.713	29.366	<.001	.000
LCZ G – LCZ F	407260.664	3661.028	111.242	<.001	.000
LCZ G – LCZ E	409767.009	1736.839	235.927	<.001	.000

LCZ G - LCZ 9F	421562.000	37360.081	11.284	<.001	.000
LCZ G - LCZ 9E	453596.204	2412.609	188.011	<.001	.000
LCZ G - LCZ 5E	478749.394	1884.852	253.998	<.001	.000
LCZ G - LCZ 8	479017.159	14076.047	34.031	<.001	.000
LCZ G - LCZ 10	492143.904	2100.264	234.325	<.001	.000
LCZ G - LCZ 6E	494696.874	2481.178	199.380	<.001	.000
LCZ G - LCZ 3	514890.703	6462.634	79.672	<.001	.000
LCZ G - LCZ 2	540705.611	2681.670	201.630	<.001	.000
LCZ A - LCZ 9A	104376.336	4138.393	25.221	<.001	.000
LCZ A - LCZ B	-144394.73	1025.120	-140.856	<.001	.000
LCZ A - LCZ 4	267761.357	5038.138	53.147	<.001	.000
LCZ A - LCZ 9	276201.701	928.258	297.548	<.001	.000
LCZ A - LCZ 5	280955.743	2547.023	110.307	<.001	.000
LCZ A - LCZ C	-287644.77	14752.877	-19.498	<.001	.000
LCZ A - LCZ D	-298723.36	611.172	-488.771	<.001	.000
LCZ A - LCZ 6	307678.913	2907.340	105.828	<.001	.000
LCZ A - LCZ 4E	315334.736	3153.192	100.005	<.001	.000
LCZ A - LCZ 1	322427.026	13520.539	23.847	<.001	.000
LCZ A - LCZ F	-330467.14	3375.184	-97.911	<.001	.000
LCZ A - LCZ E	-332973.49	1002.674	-332.086	<.001	.000
LCZ A - LCZ 9F	344768.484	37333.154	9.235	<.001	.000
LCZ A - LCZ 9E	376802.688	1951.775	193.056	<.001	.000
LCZ A - LCZ 5E	401955.877	1241.536	323.757	<.001	.000

LCZ A – LCZ 8	402223.643	14004.422	28.721	<.001	.000
LCZ A – LCZ 10	415350.388	1549.146	268.116	<.001	.000
LCZ A – LCZ 6E	417903.358	2035.924	205.265	<.001	.000
LCZ A – LCZ 3	438097.187	6305.108	69.483	<.001	.000
LCZ A – LCZ 2	463912.095	2275.983	203.829	<.001	.000
LCZ 9A – LCZ B	-40018.394	4229.017	-9.463	<.001	.000
LCZ 9A – LCZ 4	163385.021	6497.426	25.146	<.001	.000
LCZ 9A – LCZ 9	171825.365	4206.587	40.847	<.001	.000
LCZ 9A – LCZ 5	176579.407	4829.186	36.565	<.001	.000
LCZ 9A – LCZ C	-183268.442	15312.775	-11.968	<.001	.000
LCZ 9A – LCZ D	-194347.029	4148.161	-46.851	<.001	.000
LCZ 9A – LCZ 6	203302.577	5028.552	40.430	<.001	.000
LCZ 9A – LCZ 4E	210958.400	5174.585	40.768	<.001	.000
LCZ 9A – LCZ 1	218050.689	14129.355	15.432	<.001	.000
LCZ 9A – LCZ F	-226090.812	5312.775	-42.556	<.001	.000
LCZ 9A – LCZ E	-228597.156	4223.632	-54.123	<.001	.000
LCZ 9A – LCZ 9F	-240392.148	37557.930	-6.401	<.001	.000
LCZ 9A – LCZ 9E	-272426.351	4543.472	-59.960	<.001	.000
LCZ 9A – LCZ 5E	297579.541	4286.621	69.421	<.001	.000
LCZ 9A – LCZ 8	297847.307	14593.065	20.410	<.001	.000
LCZ 9A - LCZ 10	310974.052	4385.609	70.908	<.001	.000
LCZ 9A – LCZ 6E	313527.022	4580.251	68.452	<.001	.000
LCZ 9A – LCZ 3	333720.851	7522.506	44.363	<.001	.000

LCZ 9A – LCZ 2	359535.759	4691.887	76.629	<.001	.000
LCZ B – LCZ 4	123366.627	5112.839	24.129	<.001	.000
LCZ B – LCZ 9	131806.970	1272.771	103.559	<.001	.000
LCZ B – LCZ 5	136561.012	2691.767	50.733	<.001	.000
LCZ B – LCZ C	-143250.047	14778.554	-9.693	<.001	.000
LCZ B - LCZ-D	-154328.635	1063.867	-145.064	<.001	.000
LCZ B – LCZ 6	163284.183	3034.948	53.801	<.001	.000
LCZ B – LCZ 4E	170940.005	3271.223	52.256	<.001	.000
LCZ B – LCZ 1	178032.295	13548.552	13.140	<.001	.000
LCZ B – LCZ F	-186072.417	3485.707	-53.382	<.001	.000
LCZ B – LCZ E	-188578.762	1328.020	-142.000	<.001	.000
LCZ B – LCZ 9F	200373.753	37343.308	5.366	<.001	.000
LCZ B – LCZ 9E	232407.957	2137.220	108.743	<.001	.000
LCZ B – LCZ 5E	257561.147	1516.474	169.842	<.001	.000
LCZ B – LCZ 8	257828.913	14031.469	18.375	<.001	.000
LCZ B – LCZ 10	270955.657	1777.115	152.469	<.001	.000
LCZ B – LCZ 6E	273508.627	2214.333	123.517	<.001	.000
LCZ B – LCZ 3	293702.456	6364.956	46.144	<.001	.000
LCZ B – LCZ 2	319517.364	2436.879	131.117	<.001	.000
LCZ 4 – LCZ 9	-8440.344	5094.302	-1.657	.098	1.000
LCZ 4 – LCZ 5	-13194.385	5619.393	-2.348	.019	1.000
LCZ 4 – LCZ C	-19883.421	15580.040	-1.276	.202	1.000
LCZ 4 – LCZ D	-30962.008	5046.165	-6.136	<.001	.000

LCZ 4 – LCZ 6	-39917.556	5791.621	-6.892	<.001	.000
LCZ 4 – LCZ 4E	-47573.378	5918.857	-8.038	<.001	.000
LCZ 4 – LCZ 1	54665.668	14418.572	3.791	<.001	.035
LCZ 4 – LCZ F	-62705.790	6040.043	-10.382	<.001	.000
LCZ 4 – LCZ E	-65212.135	5108.386	-12.766	<.001	.000
LCZ 4 – LCZ 9F	-77007.126	37667.687	-2.044	.041	1.000
LCZ 4 – LCZ 9E	-109041.330	5375.842	-20.284	<.001	.000
LCZ 4 – LCZ 5E	-134194.520	5160.587	-26.004	<.001	.000
LCZ 4 – LCZ 8	-134462.286	14873.268	-9.041	<.001	.000
LCZ 4 – LCZ 10	147589.031	5243.101	28.149	<.001	.000
LCZ 4 – LCZ 6E	-150142.001	5406.962	-27.768	<.001	.000
LCZ 4 – LCZ 3	170335.830	8052.617	21.153	<.001	.000
LCZ 4 – LCZ 2	196150.737	5501.850	35.652	<.001	.000
LCZ 9 – LCZ 5	4754.042	2656.389	1.790	.074	1.000
LCZ 9 – LCZ C	-11443.077	14772.151	-.775	.439	1.000
LCZ 9 – LCZ D	-22521.665	970.879	-23.197	<.001	.000
LCZ 9 – LCZ 6	31477.212	3003.615	10.480	<.001	.000
LCZ 9 – LCZ 4E	39133.035	3242.174	12.070	<.001	.000
LCZ 9 – LCZ 1	46225.325	13541.567	3.414	<.001	.148
LCZ 9 – LCZ F	-54265.447	3458.460	-15.691	<.001	.000
LCZ 9 - LCZ E	-56771.792	1254.762	-45.245	<.001	.000
LCZ 9 – LCZ 9F	-68566.783	37340.775	-1.836	.066	1.000
LCZ 9 – LCZ 9E	-100600.987	2092.487	-48.077	<.001	.000

LCZ 9 – LCZ 5E	125754.176	1452.751	86.563	<.001	.000
LCZ 9 – LCZ 8	126021.942	14024.725	8.986	<.001	.000
LCZ 9 – LCZ 10	139148.687	1723.058	80.757	<.001	.000
LCZ 9 – LCZ 6E	141701.657	2171.189	65.265	<.001	.000
LCZ 9 – LCZ 3	161895.486	6350.076	25.495	<.001	.000
LCZ 9 – LCZ 2	187710.394	2397.743	78.286	<.001	.000
LCZ 5 – LCZ C	-6689.035	14961.354	-.447	.655	1.000
LCZ 5 – LCZ D	-17767.623	2562.864	-6.933	<.001	.000
LCZ 5 – LCZ 6	-26723.170	3827.188	-6.982	<.001	.000
LCZ 5 – LCZ 4E	34378.993	4017.133	8.558	<.001	.000
LCZ 5 – LCZ 1	41471.283	13747.717	3.017	.003	.591
LCZ 5 – LCZ F	-49511.405	4193.639	-11.806	<.001	.000
LCZ 5 – LCZ E	-52017.750	2683.299	-19.386	<.001	.000
LCZ 5 – LCZ 9F	-63812.741	37416.027	-1.705	.088	1.000
LCZ 5 – LCZ 9E	-95846.945	3162.936	-30.303	<.001	.000
LCZ 5 – LCZ 5E	-121000.135	2781.393	-43.503	<.001	.000
LCZ 5 – LCZ 8	-121267.900	14223.873	-8.526	<.001	.000
LCZ 5 – LCZ 10	134394.645	2931.654	45.843	<.001	.000
LCZ 5 – LCZ 6E	-136947.615	3215.544	-42.589	<.001	.000
LCZ 5 - LCZ-3	157141.444	6778.578	23.182	<.001	.000
LCZ 5 – LCZ 2	182956.352	3372.660	54.247	<.001	.000
LCZ C – LCZ D	-11078.588	14755.620	-.751	.453	1.000
LCZ C – LCZ 6	20034.135	15026.890	1.333	.182	1.000

LCZ C – LCZ 4E	27689.958	15076.386	1.837	.066	1.000
LCZ C – LCZ 1	34782.248	20003.994	1.739	.082	1.000
LCZ C – LCZ F	-42822.370	15124.373	-2.831	.005	1.000
LCZ C – LCZ E	-45328.715	14777.014	-3.068	.002	.499
LCZ C – LCZ 9F	57123.706	40138.749	1.423	.155	1.000
LCZ C – LCZ 9E	89157.910	14871.591	5.995	<.001	.000
LCZ C – LCZ 5E	114311.099	14795.141	7.726	<.001	.000
LCZ C – LCZ 8	114578.865	20334.174	5.635	<.001	.000
LCZ C – LCZ 10	127705.610	14824.124	8.615	<.001	.000
LCZ C – LCZ 6E	130258.580	14882.869	8.752	<.001	.000
LCZ C – LCZ 3	150452.409	16034.624	9.383	<.001	.000
LCZ C – LCZ 2	176267.317	14917.603	11.816	<.001	.000
LCZ D – LCZ 6	8955.548	2921.227	3.066	.002	.502
LCZ D – LCZ 4E	16611.370	3166.001	5.247	<.001	.000
LCZ D – LCZ 1	23703.660	13523.532	1.753	.080	1.000
LCZ D – LCZ F	-31743.782	3387.154	-9.372	<.001	.000
LCZ D – LCZ E	-34250.127	1042.256	-32.862	<.001	.000
LCZ D – LCZ 9F	46045.118	37334.238	1.233	.217	1.000
LCZ D – LCZ 9E	78079.322	1972.402	39.586	<.001	.000
LCZ D – LCZ 5E	103232.512	1273.716	81.048	<.001	.000
LCZ D – LCZ 8	103500.278	14007.312	7.389	<.001	.000
LCZ D – LCZ 10	116627.023	1575.054	74.046	<.001	.000
LCZ D – LCZ 6E	119179.992	2055.706	57.975	<.001	.000

LCZ D – LCZ 3	139373.822	6311.524	22.082	<.001	.000
LCZ D – LCZ 2	165188.729	2293.696	72.019	<.001	.000
LCZ 6 – LCZ 4E	7655.823	4254.722	1.799	.072	1.000
LCZ 6 – LCZ 1	14748.112	13819.009	1.067	.286	1.000
LCZ 6 – LCZ F	-22788.235	4421.754	-5.154	<.001	.000
LCZ 6 – LCZ E	-25294.580	3027.440	-8.355	<.001	.000
LCZ 6 – LCZ 9F	-37089.571	37442.281	-.991	.322	1.000
LCZ 6 – LCZ 9E	-69123.774	3459.691	-19.980	<.001	.000
LCZ 6 – LCZ 5E	94276.964	3114.715	30.268	<.001	.000
LCZ 6 – LCZ 8	-94544.730	14292.791	-6.615	<.001	.000
LCZ 6 – LCZ 10	107671.475	3249.599	33.134	<.001	.000
LCZ 6 – LCZ 6E	-110224.445	3507.852	-31.422	<.001	.000
LCZ 6 – LCZ 3	130418.274	6922.025	18.841	<.001	.000
LCZ 6 – LCZ 2	156233.182	3652.415	42.775	<.001	.000
LCZ 4E – LCZ 1	7092.290	13872.815	.511	.609	1.000
LCZ 4E – LCZ F	-15132.412	4587.145	-3.299	<.001	.224
LCZ 4E – LCZ E	-17638.757	3264.259	-5.404	<.001	.000
LCZ 4E – LCZ 9F	-29433.748	37462.173	-.786	.432	1.000
LCZ 4E – LCZ 9E	-61467.952	3668.713	-16.755	<.001	.000
LCZ 4E - LCZ 5E	-86621.141	3345.361	-25.893	<.001	.000
LCZ 4E – LCZ 8	-86888.907	14344.820	-6.057	<.001	.000
LCZ 4E – LCZ 10	100015.652	3471.295	28.812	<.001	.000
LCZ 4E – LCZ 6E	-102568.622	3714.164	-27.616	<.001	.000

LCZ 4E – LCZ 3	122762.451	7028.828	17.466	<.001	.000
LCZ 4E – LCZ 2	148577.359	3850.991	38.582	<.001	.000
LCZ 1 – LCZ F	-8040.122	13924.951	-.577	.564	1.000
LCZ 1 – LCZ E	-10546.467	13546.872	-.779	.436	1.000
LCZ 1 – LCZ 9F	-22341.458	39702.352	-.563	.574	1.000
LCZ 1 – LCZ 9E	-54375.662	13649.975	-3.984	<.001	.016
LCZ 1 – LCZ 5E	-79528.852	13566.643	-5.862	<.001	.000
LCZ 1 – LCZ 8	-79796.618	19458.577	-4.101	<.001	.010
LCZ 1 – LCZ 10	-92923.362	13598.244	-6.833	<.001	.000
LCZ 1 – LCZ 6E	-95476.332	13662.261	-6.988	<.001	.000
LCZ 1 – LCZ 3	-115670.161	14908.614	-7.759	<.001	.000
LCZ 1 – LCZ 2	-141485.069	13700.091	-10.327	<.001	.000
LCZ F – LCZ E	2506.345	3479.171	.720	.471	1.000
LCZ F – LCZ 9F	14301.336	37481.511	.382	.703	1.000
LCZ F – LCZ 9E	46335.540	3861.179	12.000	<.001	.000
LCZ F – LCZ 5E	71488.730	3555.375	20.107	<.001	.000
LCZ F – LCZ 8	71756.495	14395.246	4.985	<.001	.000
LCZ F – LCZ 10	84883.240	3674.117	23.103	<.001	.000
LCZ F – LCZ 6E	87436.210	3904.390	22.394	<.001	.000
LCZ F – LCZ 3	107630.039	7131.176	15.093	<.001	.000
LCZ F – LCZ 2	133444.947	4034.771	33.074	<.001	.000
LCZ E – LCZ 9F	11794.991	37342.699	.316	.752	1.000
LCZ E – LCZ 9E	43829.195	2126.545	20.611	<.001	.000

LCZ E – LCZ 5E	68982.385	1501.392	45.946	<.001	.000
LCZ E – LCZ 8	69250.150	14029.847	4.936	<.001	.000
LCZ E – LCZ 10	82376.895	1764.262	46.692	<.001	.000
LCZ E – LCZ 6E	84929.865	2204.031	38.534	<.001	.000
LCZ E – LCZ 3	105123.694	6361.380	16.525	<.001	.000
LCZ E – LCZ 2	130938.602	2427.522	53.939	<.001	.000
LCZ 9F – LCZ 9E	32034.204	37380.225	.857	.391	1.000
LCZ 9F – LCZ 5E	57187.394	37349.875	1.531	.126	1.000
LCZ 9F - LCZ-8	57455.159	39869.733	1.441	.150	1.000
LCZ 9F – LCZ 10	70581.904	37361.366	1.889	.059	1.000
LCZ 9F – LCZ 6E	73134.874	37384.713	1.956	.050	1.000
LCZ 9F – LCZ 3	93328.703	37857.974	2.465	.014	1.000
LCZ 9F – LCZ 2	119143.611	37398.555	3.186	.001	.333
LCZ 9E – LCZ 5E	25153.190	2249.055	11.184	<.001	.000
LCZ 9E – LCZ 8	25420.956	14129.426	1.799	.072	1.000
LCZ 9E – LCZ 10	38547.701	2432.425	15.847	<.001	.000
LCZ 9E – LCZ 6E	41100.670	2768.000	14.849	<.001	.000
LCZ 9E – LCZ 3	61294.500	6578.087	9.318	<.001	.000
LCZ 9E – LCZ 2	87109.407	2949.057	29.538	<.001	.000
LCZ 5E – LCZ 8	-267.766	14048.938	-.019	.985	1.000
LCZ 5E – LCZ 10	13394.511	1910.151	7.012	<.001	.000
LCZ 5E – LCZ 6E	-15947.481	2322.457	-6.867	<.001	.000
LCZ 5E – LCZ 3	36141.310	6403.375	5.644	<.001	.000

LCZ 5E – LCZ 2	61956.218	2535.532	24.435	<.001	.000
LCZ 8 – LCZ 10	13126.745	14079.457	.932	.351	1.000
LCZ 8 – LCZ 6E	15679.715	14141.295	1.109	.268	1.000
LCZ 8 – LCZ 3	35873.544	15348.799	2.337	.019	1.000
LCZ 8 – LCZ 2	61688.452	14177.847	4.351	<.001	.003
LCZ 10 – LCZ 6E	-2552.970	2500.450	-1.021	.307	1.000
LCZ 10 – LCZ 3	-22746.799	6470.058	-3.516	<.001	.101
LCZ 10 – LCZ 2	-48561.707	2699.512	-17.989	<.001	.000
LCZ 6E – LCZ 3	20193.829	6603.543	3.058	.002	.515
LCZ 6E - LCZ 2	46008.737	3005.411	15.309	<.001	.000
LCZ 3 – LCZ 2	25814.908	6681.459	3.864	<.001	.026

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Koçak, A. ve Erdem Okumuş, D. (2025).Yerel İklim Bölgelerindeki Yüzey Sıcaklıklarının Değişkenliğinde Mekânsal Morfolojik Özelliklerin Etkisi: İstanbul Örneği. *Türkiye V. Kentsel Morfoloji Sempozyumu: Bildiri Özetleri Kitapçığı*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, ss.134-135.