

**T.C.**  
**KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**PEYZAJ MİMARLIĞI ANA BİLİM DALI**



**SÜRDÜRÜLEBİLİR PEYZAJ PLANLAMA VE TASARIMI İÇİN**  
**KENTSEL ALANLARDA İKLİM PARAMETRELERİNİN VE**  
**İKLİM BÖLGESİ TEMELLİ MORFOLOJİK YAKLAŞIMIN**  
**İKLİM SENARYOLARI İLE DEĞERLENDİRİLMESİ**

**AMRAGİA H MOSTAFA ELAHSADİ**

**DOKTORA TEZİ**

**PROF. DR. MEHMET ÇETİN**

**TEMMUZ - 2025**

**KASTAMONU**

## TEZ ONAYI

**Amragia H Mostafa Elahsadi** tarafından hazırlanan “**SÜRDÜRÜLEBİLİR PEYZAJ PLANLAMA VE TASARIMI İÇİN KENTSEL ALANLARDA İKLİM PARAMETRELERİNİN VE İKLİM BÖLGESİ TEMELLİ MORFOLOJİK YAKLAŞIMIN İKLİM SENARYOLARI İLE DEĞERLENDİRİLMESİ**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı **16.07.2025** tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Peyzaj Mimarlığı Ana Bilim Dalı Doktora Tezi** olarak kabul edilmiştir.

|                   |                                                                   |       |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------|-------|
| <b>Danışman</b>   | Prof. Dr. Mehmet ÇETİN<br>Ondokuz Mayıs Üniversitesi              | ..... |
| <b>Jüri Üyesi</b> | Prof. Dr. Sevgi ÖZTÜRK<br>Kastamonu Üniversitesi                  | ..... |
| <b>Jüri Üyesi</b> | Doç. Dr. Aydın TÜRKİYILMAZ<br>Kastamonu Üniversitesi              | ..... |
| <b>Jüri Üyesi</b> | Prof. Dr. Cengiz YÜCEDAĞ<br>Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi | ..... |
| <b>Jüri Üyesi</b> | Dr. Öğr. Üyesi Nuray ÇİÇEK<br>Çankırı Karatekin Üniversitesi      | ..... |

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Enstitü Müdürü                      Prof. Dr. Selahattin KAYMAKCI                      .....

## TAAHHÜTNAME

*Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu; ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını, bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini bildirir ve taahhüt ederim.*

**Amragia H Mostafa ELAHSADİ**

## ÖZET

### DOKTORA TEZİ

#### SÜRDÜRÜLEBİLİR PEYZAJ PLANLAMA VE TASARIMI İÇİN KENTSEL ALANLARDA İKLİM PARAMETRELERİNİN VE İKLİM BÖLGESİ TEMELLİ MORFOLOJİK YAKLAŞIMIN İKLİM SENARYOLARI İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

AMRAGİA H MOSTAFA ELAHSADI

KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PEYZAJ MİMARLIĞI ANA BİLİM DALI

DANIŞMAN: PROF. DR. MEHMET ÇETİN

Libya'nın kuzeydoğusunda yer alan Tobruk Eski Kenti'nde, çöl ikliminin etkisi altında gelişen kentsel ısı adası (UHI) fenomeni, bitki örtüsü azalışı ve tarihî çevre üzerindeki baskıları, entegre bir yöntem çerçevesinde ele almayı amaçlamaktadır. Araştırmada uzaktan algılama teknolojileri, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS), nicel istatistiksel analizler ve açıklanabilir yapay zekâ yöntemleri eşgüdüm içinde kullanılarak hem bilimsel hem de uygulamaya dönük sonuçlara ulaşılmıştır. 1991 ile 2024 yılları arasındaki Landsat ve Sentinel-2 uydu görüntüleri temel alınarak LST (yüzey sıcaklığı), NDVI (bitki örtüsü indeksi) ve SUHII (ikincil kentsel ısı adası yoğunluğu) gibi çevresel göstergeler hesaplanmıştır. Morfolojik yapı ise hem iki boyutlu (yapı yoğunluğu, geçirimsiz yüzey oranı) hem de üç boyutlu (bina yüksekliği, gökyüzü görüş faktörü - SVF) değişkenlerle analiz edilmiştir. 300 metre çözünürlüklü grid sisteminde yapılan peyzaj metrik analizleri, LST üzerindeki etkili faktörlerin belirlenmesini sağlamış; yapay zekâ temelli modellemeler aracılığıyla bu değişkenlerin etkileri açıklanabilir şekilde ortaya konmuştur. Araştırma bulguları, yapı hacmi yoğunluğunun, bina yüksekliğinin ve düşük SVF oranlarının yüzey sıcaklıklarını anlamlı biçimde artırdığını göstermiştir. NDVI ile LST arasında negatif yönlü bir ilişki saptanmış; bitki örtüsünün bulunduğu alanlarda sıcaklıkların ortalama 6–7 °C daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Geliştirilen doğa tabanlı çözüm senaryolarının uygulandığı pilot bölgelerde yüzey sıcaklığı %21 oranında azalırken, NDVI değeri %28 oranında artış göstermiştir. SHAP analizi sonuçlarına göre LST'yi en fazla etkileyen değişkenler yapı yoğunluğu (%50,9), NDVI (%25,8) ve bina yüksekliği (%20,4) olmuştur. Bu tez çalışması, tarihî kentlerde mikroiklim düzeyinde sürdürülebilirlik ilkelerine dayalı peyzaj planlamasına yönelik veri odaklı, disiplinlerarası bir model önerisinde bulunmakta; özellikle uzaktan algılama ve açıklanabilir yapay zekâ yaklaşımlarının karar alma süreçlerine nasıl entegre edilebileceğini örneklemektedir.

**ANAHTAR KELİMELER:** Morfolojik Analiz, Model, Tobruk, Yüzey Sıcaklığı, NDBI, 2B/3B Model.

Temmuz 2025, 88 Sayfa

## **ABSTRACT**

### **PH.D THESIS**

#### **ASSESSMENT OF CLIMATE INDICATORS AND MORPHOLOGICAL FEATURES IN URBAN AREAS WITHIN THE FRAMEWORK OF CLIMATE SCENARIOS: A SUSTAINABLE LANDSCAPE PLANNING APPROACH**

**AMRAGIA H MOSTAFA ELAHSADI**

**KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE  
DEPARTMENT OF LANDSCAPE ARCHITECTURE**

**SUPERVISOR: PROF. DR. MEHMET ÇETİN**

This doctoral research focuses on the historical city of Tobruk, located in northeastern Libya, and aims to evaluate the impacts of desert climate conditions on urban heat island (UHI) effects, vegetation loss, and the vulnerability of cultural landscape assets through an integrated, multi-disciplinary approach. The study combines remote sensing, Geographic Information Systems (GIS), statistical modeling and explainable artificial intelligence techniques to produce both scientifically robust results and practical planning scenarios. Using Landsat and Sentinel-2 satellite imagery spanning the period from 1991 to 2024, key environmental indicators such as Land Surface Temperature (LST), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), and Secondary Urban Heat Island Intensity (SUHII) were calculated. Morphological analyses were conducted using both 2D variables (building density, impervious surfaces) and 3D indicators (building height, Sky View Factor - SVF). Landscape metrics were evaluated within a 300-meter grid framework, and the influential variables affecting LST were identified through machine learning and interpretable modeling approaches. The findings reveal that building volume density, building height, and low SVF values significantly contribute to increased LST. A negative correlation was observed between NDVI and LST, with vegetated areas showing an average of 6–7 °C lower surface temperatures. Nature-based scenarios applied to selected pilot areas led to a 21% reduction in LST and a 28% increase in NDVI. According to SHAP (SHapley Additive exPlanations) analysis, the most influential variables on LST were building volume density (50.9%), NDVI (25.8%), and building height (20.4%). This study proposes a data-driven, interdisciplinary model for sustainable microclimate planning in historic urban environments and demonstrates how remote sensing combined with explainable AI can effectively guide decision-making processes.

**KEYWORDS:** Morphological Analysis, Model, Tobruk, Land Surface Temperature, NDBI, 2B/3B Model.

July 2025, 88 Page

## TEŞEKKÜR

Tez içeriğinin oluşturulmasında, okunmasında ve düzeltmelerde desteğini eksik etmeyen, bilgi ve deneyimi ile her zaman destek olan tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Mehmet CETİN'e ve eğitim hayatım boyunca emeği geçen tüm kıymetli hocalarıma çok teşekkür ederim. Ayrıca babamın, annemin ve Dr. Abdulsalam BENKHAYAL ile Fakhri ELAGEILI'e bana verdikleri destek ve yardımları için teşekkürü bir borç bilirim.

Amragia H Mostafa ELAHSADI

Kastamonu, 2025

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                           | <u>Sayfa</u> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| TEZ ONAYI .....                                                                           | ii           |
| TAAHHÜTNAME .....                                                                         | iii          |
| ÖZET.....                                                                                 | iv           |
| ABSTRACT .....                                                                            | v            |
| TEŞEKKÜR .....                                                                            | vi           |
| İÇİNDEKİLER .....                                                                         | vii          |
| ŞEKİLLER DİZİNİ .....                                                                     | viii         |
| TABLolar DİZİNİ .....                                                                     | ix           |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....                                                      | x            |
| 1. GİRİŞ.....                                                                             | 1            |
| 1.1 Problem Tanımı ve Araştırmanın Gerekçesi.....                                         | 2            |
| 1.2 Araştırmanın Amacı.....                                                               | 2            |
| 1.3 Araştırma Soruları ve Hipotezler .....                                                | 3            |
| 1.4 Problem Tanımı ve Araştırmanın Gerekçesi.....                                         | 3            |
| 2. LİTERATÜR TARAMASI .....                                                               | 5            |
| 2.1 Yüzey Sıcaklığı (LST) ve Kentsel Isı Adası Dinamikleri .....                          | 5            |
| 2.2 NDVI ile Bitki Örtüsünün Mikroiklim Üzerindeki Rolü.....                              | 6            |
| 2.3 Kentsel Morfoloji ve Mikroiklim İlişkisi.....                                         | 7            |
| 2.4 Peyzaj Metrikleriyle Termal Yapının Analizi.....                                      | 8            |
| 2.5 SHAP Yöntemi .....                                                                    | 9            |
| 2.6 Sürdürülebilir ve Kültürel Mirasla Uyumlu Tasarım Yaklaşımları .....                  | 10           |
| 3. MATERYAL VE YÖNTEM .....                                                               | 12           |
| 3.1 Çalışma Alanı: Libya Tobruk Kenti'nin Coğrafi, Tarihî ve Kentsel<br>Özellikleri ..... | 12           |
| 3.2 Yöntem.....                                                                           | 20           |
| 3.3 Veri Kaynakları ve Türleri.....                                                       | 21           |
| 3.4 Veri Ön İşleme.....                                                                   | 24           |
| 4. BULGULAR .....                                                                         | 30           |
| 4.1 NDVI ve Yeşil Altyapının Etkisi.....                                                  | 30           |
| 4.2 Zaman Serisi Değerlendirmesi ve Mikroiklim Dönüşümü.....                              | 32           |
| 4.3 Peyzaj Metrikleriyle Kentsel Isı Adası Etkisi.....                                    | 33           |
| 4.4 SHAP Modeli.....                                                                      | 37           |
| 4.5 Müdahale Senaryoları ve Uygulama Alanları.....                                        | 47           |
| 4.6 Morfolojik Göstergeler ve LST İlişkisi.....                                           | 53           |
| 4.7 NDVI ve LST İlişkisi.....                                                             | 58           |
| 4.8 Zamansal Değişim .....                                                                | 60           |
| 4.9 Teorik ve Uygulamalı Katkıları .....                                                  | 62           |
| 5. TARTIŞMA .....                                                                         | 63           |
| 6. SONUÇ VE ÖNERİLER .....                                                                | 68           |
| 6.1 Sonuçlar .....                                                                        | 68           |
| 6.2 Öneriler .....                                                                        | 72           |
| KAYNAKLAR .....                                                                           | 81           |
| ÖZGEÇMİŞ.....                                                                             | 88           |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

|                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 3.1 Libya arazi kullanım sınıfları haritası .....                                                                    | 13 |
| Şekil 3.2 Libya sıcaklık haritası .....                                                                                    | 16 |
| Şekil 3.3 Libya kenti yüzey sıcaklığı dağılımı (°C) (termal uydu görüntülerinden elde edilen LST değerlerine dayalı) ..... | 17 |
| Şekil 3.4 Libya sıcaklık haritası iklim etkisi .....                                                                       | 19 |
| Şekil 3.5 Çalışma akış şeması .....                                                                                        | 21 |
| Şekil 4.1 NDBI ile LST ilişkisi .....                                                                                      | 32 |
| Şekil 4.2 MEPAI ile LST ilişkisi .....                                                                                     | 33 |
| Şekil 4.3 AGI LST UGS alanı ile AI (topluluk bütünlüğü indeksi) ilişkisi .....                                             | 35 |
| Şekil 4.4 Bina alanı yoğunluğu (AH) ile LST arasındaki ilişki .....                                                        | 36 |
| Şekil 4.5 NDVI ile LST arasındaki ilişki NDVI .....                                                                        | 38 |
| Şekil 4.6 AV ile LST ilişkisi .....                                                                                        | 39 |
| Şekil 4.7 Bina yüksekliği (BH) ile LST arasındaki ilişki .....                                                             | 40 |
| Şekil 4.8 Bina hacmi yoğunluğu (BVD) ile LST arasındaki ilişki BVD .....                                                   | 41 |
| Şekil 4.9 ED ile LST arasındaki ilişki .....                                                                               | 42 |
| Şekil 4.10 PDEN ile UGS ilişkisi .....                                                                                     | 44 |
| Şekil 4.11 Kat alanı oranı (FAR) ile LST ilişkisi FAR .....                                                                | 45 |
| Şekil 4.12 LST ile SHAP modeli ilişkisi shap .....                                                                         | 46 |
| Şekil 4.13 Albedo-LST ilişkisi LST .....                                                                                   | 47 |
| Şekil 4.14 PLAND dağılım haritası .....                                                                                    | 49 |
| Şekil 4.15 Pland_is PLAND ve geçirimsiz yüzey (IS) ilişkisi .....                                                          | 50 |
| Şekil 4.16 MAPA ile LST ilişkisi .....                                                                                     | 51 |
| Şekil 4.17 Pland_ugs UGS alanı ile AI (topluluk bütünlüğü indeksi) ilişkisi .....                                          | 52 |
| Şekil 4.18 Gökyüzü görünürlük faktörü (SVF) ile LST arasındaki ilişki .....                                                | 53 |
| Şekil 4.19 PLPIN dağılım haritası .....                                                                                    | 54 |
| Şekil 4.20 AHSD bina alanı yoğunluğu (AH) ile LST arasındaki ilişki .....                                                  | 55 |
| Şekil 4.21 TCI urban thermal comfort index (TCI) haritası .....                                                            | 56 |
| Şekil 4.22 UTCI-LST ilişkisi UTCI .....                                                                                    | 57 |
| Şekil 4.23 Vegetation condition index (VCI) haritası VCI .....                                                             | 58 |
| Şekil 4.24 AI_UGS ile LST arasındaki ilişki .....                                                                          | 59 |



## TABLÖLAR DİZİNİ

|                                                                  | <b><u>Sayfa</u></b> |
|------------------------------------------------------------------|---------------------|
| Tablo 3.1 Libya tobruk ikliminin temel özellikleri.....          | 15                  |
| Tablo 3.2 Tobruk kenti için toplanan veri setlerinin özeti ..... | 23                  |
| Tablo 3.3 LULC türleri ve açıklaması .....                       | 24                  |



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

|           |                    |
|-----------|--------------------|
| <b>i</b>  | : Dakika           |
| <b>m</b>  | : Metre            |
| <b>mm</b> | : Milimetre        |
| <b>°</b>  | : Derece           |
| <b>°C</b> | : Santigrat derece |

### Kısaltmalar

|                   |                                                                                 |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| <b>AI</b>         | : Aggregation Index (Topluluk Bütünlüğü İndeksi)                                |
| <b>AV</b>         | : Albedo Value (Yüzeyin Yansıtma Değeri)                                        |
| <b>BD</b>         | : Building Density (Yapılaşma Yoğunluğu)                                        |
| <b>BH</b>         | : Building Height (Bina Yüksekliği)                                             |
| <b>BHSD</b>       | : Building Height Standard Deviation (Bina Yüksekliği Standart Sapması)         |
| <b>BVD</b>        | : Building Volume Density (Bina Hacim Yoğunluğu)                                |
| <b>CBS</b>        | : Coğrafi Bilgi Sistemleri                                                      |
| <b>DN</b>         | : Digital Number (Sayısal Görüntü Değeri)                                       |
| <b>ED</b>         | : Edge Density (Kenar Yoğunluğu)                                                |
| <b>EPSG 32634</b> | : WGS 84 / UTM zone 34N (Koordinat Referans Sistemi)                            |
| <b>FAR</b>        | : Floor Area Ratio (Kat Alanı Oranı)                                            |
| <b>ISF</b>        | : Impervious Surface Fraction (Geçirimsiz Yüzey Oranı)                          |
| <b>LSE</b>        | : Land Surface Emissivity (Yüzey Yayılım Katsayısı)                             |
| <b>LST</b>        | : Land Surface Temperature (Yüzey Sıcaklığı)                                    |
| <b>MLS</b>        | : Maximum Likelihood Supervised (Denetimli Maksimum Olasılık Sınıflandırması)   |
| <b>NDVI</b>       | : Normalized Difference Vegetation Index (Normalize Edilmiş Fark Bitki İndeksi) |
| <b>NDBI</b>       | : Normalized Difference Built-up Index (Normalize Edilmiş Kentsel Alan İndeksi) |
| <b>PD</b>         | : Patch Density (Yama Yoğunluğu)                                                |
| <b>PLAND</b>      | : Percentage of Landscape (Peyzajın Yüzdesi)                                    |
| <b>RD</b>         | : Road Density (Yol Yoğunluğu)                                                  |
| <b>SHAP</b>       | : SHapley Additive exPlanations (Açıklanabilir Yapay Zekâ Yöntemi)              |
| <b>SHAPE_AM</b>   | : Area-Weighted Mean Shape Index (Alan Ağırlıklı Şekil İndeksi)                 |
| <b>SR</b>         | : Surface Roughness (Yüzey Pürüzlülüğü)                                         |
| <b>SVF</b>        | : Sky View Factor (Gökyüzü Görünürlük Faktörü)                                  |
| <b>SUHI</b>       | : Surface Urban Heat Island Intensity (Yüzey Kentsel Isı Adası Yoğunluğu)       |
| <b>TOA</b>        | : Top of Atmosphere (Atmosfer Üstü Yansıması)                                   |

|                |                                                                                  |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| <b>UHI</b>     | : Urban Heat Island (Kentsel Isı Adası)                                          |
| <b>UTFVI</b>   | : Urban Thermal Field Variance Index (Kentsel Termal Alan Varyans İndeksi)       |
| <b>VCİ</b>     | : Vegetation Condition Index (Bitki Durumu İndeksi)                              |
| <b>XAI</b>     | : Explainable Artificial Intelligence (Açıklanabilir Yapay Zekâ)                 |
| <b>XGBoost</b> | : Extreme Gradient Boosting (Gelişmiş Ağaç Tabanlı Makine Öğrenmesi Algoritması) |



## 1. GİRİŞ

Günümüzde hızla artan kentleşme dinamikleri ve küresel iklim değişikliği, özellikle çevresel hassasiyet taşıyan ve tarihsel mirasa sahip yerleşimlerde karmaşık ve çok katmanlı sorunları beraberinde getirmektedir. Kentsel alanlarda sıcaklık artışları, mikroiklim dengesizlikleri, yeşil alanların azalması, geçirimsiz yüzeylerin yaygınlaşması ve kültürel peyzajın bozulması gibi olumsuzluklar, kent yaşam kalitesini doğrudan etkileyen kritik faktörler hâline gelmiştir. Bu etkiler, çöl iklim kuşağındaki yerleşimlerde daha yoğun hissedilmekte ve sürdürülebilir, doğa temelli planlama yaklaşımlarına olan ihtiyacı artırmaktadır.

Libya'nın kuzeydoğusunda, Akdeniz'e kıyısı bulunan Tobruk Kenti; tarihi dokusu, kültürel çeşitliliği ve coğrafi konumuyla öne çıkan bir yerleşim yeri olmasına karşın, son yıllarda kontrolsüz yapılaşma, yeşil altyapı kaybı, altyapı yetersizliği ve afet riski gibi birçok sorunla karşı karşıya kalmıştır. Özellikle 2023 yılında meydana gelen yıkıcı sel felaketi, kentsel sistemlerin doğa olaylarına karşı ne denli savunmasız olduğunu açık bir şekilde ortaya koymuştur. Bu durum, Tobruk Eski Kenti'nin hem kültürel mirasını korumak hem de iklim dirençli kent politikaları üretmek açısından stratejik bir örnek alan olduğunu göstermektedir.

Bu bağlamda, tez çalışmasının temel amacı; Libya Tobruk Eski Kenti özelinde, yerel iklim koşullarıyla uyumlu, doğa tabanlı ve veri destekli sürdürülebilir kentsel planlama senaryoları geliştirmektir. Bu doğrultuda; uzaktan algılama (RS), coğrafi bilgi sistemleri (CBS), mekânsal istatistikler ve açıklanabilir yapay zekâ (XAI) yöntemleri entegre biçimde kullanılmıştır. Yüzey sıcaklığı (LST) ile iki ve üç boyutlu morfolojik göstergeler (örneğin yapı yoğunluğu, bina yüksekliği, gökyüzü görüş faktörü - SVF) arasındaki ilişkiler detaylandırılmış, bitki örtüsü yoğunluğu (NDVI) ile bağlantıları mekânsal düzeyde analiz edilmiştir.

Ayrıca, geliştirilen doğa temelli tasarım senaryolarının; kent içi ısı adası etkisini azaltma, yeşil altyapıyı yeniden kurgulama ve tarihî yapılarla uyumlu mekânsal çözümler üretme potansiyeli değerlendirilmiştir. Bu çalışma, sıcak ve kurak iklim

koşullarına sahip tarihî kentler için tekrarlanabilir, ölçeklenebilir ve çok disiplinli bir planlama modeli sunmayı hedeflemektedir.

### **1.1 Problem Tanımı ve Araştırmanın Gerekçesi**

Kentleşme süreçlerinin kontrolsüz biçimde ilerlemesi ve iklim değişikliğinin etkilerinin kent merkezlerinde daha yoğun hissedilmesi, özellikle tarihî dokuların bulunduğu alanlarda çevresel, sosyal ve kültürel tehditleri artırmaktadır. Kentsel ısı adası oluşumları, mikroiklim bozulmaları, ekolojik çeşitliliğin azalması ve kültürel peyzajın deformasyonu gibi problemler, planlama disiplininin yeni yaklaşımlar geliştirmesini zorunlu kılmaktadır. Bu sorunlar, çöl ikliminin hâkim olduğu Kuzey Afrika kentlerinde daha keskin bir biçimde ortaya çıkmaktadır.

Libya Tobruk Eski Kenti, tarih boyunca Osmanlı, İtalyan ve Arap medeniyetlerine ev sahipliği yapmış çok katmanlı bir kent dokusuna sahiptir. Ancak günümüzde, artan yapılaşma baskısı, doğal yeşil alanların azalması ve iklime duyarsız mimari anlayış, kentsel iklim dengelerini bozmakta ve tarihî yapıları tehdit altına sokmaktadır. Buna ek olarak, geleneksel yapılar çevresel stres faktörlerine karşı savunmasız hâle gelmiş; bu durum kültürel peyzajın sürdürülebilirliğini riske atmaktadır.

Bu bağlamda, tarihî kentsel dokunun korunması ile birlikte, çöl iklimi koşullarına dayanıklı ve mikroiklimi dengeleyici yeni planlama modellerinin geliştirilmesi gerekliliği doğmuştur. Bu araştırma, söz konusu ihtiyacı karşılamak amacıyla, Tobruk özelinde iklimsel, kültürel ve yapısal dinamikleri bütünleştiren bir analiz ve öneri çerçevesi sunmaktadır.

### **1.2 Araştırmanın Amacı**

Bu çalışmanın temel amacı; çöl ikliminin etkisi altında bulunan Libya Tobruk Eski Kenti için, yerel mikroiklimi iyileştirmeye yönelik, sürdürülebilir, doğa temelli ve kültürel bağlamla bütünleşik kentsel tasarım senaryoları üretmektir. Bu amaçla, LST, NDVI ve SUHII gibi göstergeler üzerinden morfolojik yapılar ile yüzey sıcaklığı ve bitki örtüsü ilişkisi detaylı olarak analiz edilmiştir. Uzaktan algılama verileri, peyzaj

metrikleri ve açıklanabilir yapay zekâ teknikleri ile sürdürülebilir planlama kararlarını yönlendirebilecek veri tabanlı modeller geliştirilmiştir.

### 1.3 Araştırma Soruları ve Hipotezler

Araştırma Soruları:

Libya Tobruk kentinde yapı yoğunluğu, bina yüksekliği ve geçirimsiz yüzey oranı gibi morfolojik özellikler yüzey sıcaklığını nasıl etkilemektedir?

NDVI ve LST arasındaki korelasyon nasıldır ve bu ilişkinin mekânsal dağılımı nasıl şekillenmektedir?

Geliştirilen doğa temelli ve kültürel mirasa duyarlı kentsel senaryolar, UHI etkisinin azaltılmasında ve tarihî çevreyle bütünleşmede ne ölçüde etkilidir?

Hipotezler:

H1: Yüksek yapı yoğunluğu ve geçirimsiz yüzey oranı, LST değerlerinde anlamlı artışlara neden olmaktadır.

H2: NDVI ile LST arasında anlamlı ve negatif yönlü bir ilişki bulunmaktadır.

H3: Doğa temelli ve kültürel peyzaj odaklı senaryolar, yüzey sıcaklığını azaltarak mikroiklim koşullarını iyileştirmektedir.

### 1.4 Problem Tanımı ve Araştırmanın Gerekçesi

Bu tez çalışması, tarihî kentlerin çöl iklimi altında daha dirençli ve yaşanabilir hâle getirilmesine yönelik yenilikçi bir çerçeve sunmaktadır. Küresel iklim krizine karşı geliştirilen bu model, veri temelli analizlerin yerel ölçekte politika ve planlama süreçlerine nasıl entegre edilebileceğini göstermektedir.

Ayrıca, uzaktan algılama, CBS, peyzaj metrikleri ve SHAP gibi açıklanabilir yapay zekâ araçlarının birlikte kullanıldığı bu yaklaşım; kentsel tasarım, peyzaj mimarlığı ve

Çevresel planlama disiplinleri arasında çok katmanlı ve ölçeklenebilir bir köprü kurmaktadır. Bu yönüyle, sadece Libya Tobruk değil, benzer ekolojik ve tarihî koğullara sahip diğer kentler için de uygulanabilir modeller sunmaktadır.



## 2. LİTERATÜR TARAMASI

Günümüzde hızlı kentleşme süreçlerinin iklim değişikliğiyle kesiştiği noktada, özellikle çöl iklimine sahip tarihî şehirlerde çevresel ve kültürel hassasiyetin artması dikkat çekici bir sorun hâline gelmiştir. Kentlerin artan yüzey sıcaklığı, yeşil altyapı kaybı ve geleneksel dokunun bozulması gibi problemler, yalnızca fiziksel değil; sosyal ve kültürel boyutları da içeren çok katmanlı etkiler üretmektedir. Bu kapsamda sürdürülebilir peyzaj planlaması, doğa temelli çözümler ve iklim-adaptif kent modelleri üzerine yapılan araştırmaların sayısı giderek artmakta; literatür, bu alanların disiplinler arası yaklaşımlarla ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu bölümde, çalışmanın temel bileşenlerini oluşturan yüzey sıcaklığı (LST), bitki örtüsü göstergeleri (NDVI), kentsel morfoloji, peyzaj metrikleri ve açıklanabilir yapay zekâ uygulamaları çerçevesinde literatür değerlendirmesi yapılmıştır.

### 2.1 Yüzey Sıcaklığı (LST) ve Kentsel Isı Adası Dinamikleri

Yüzey sıcaklığı (Land Surface Temperature - LST), kentleşmenin çevresel etkilerini değerlendirmede yaygın biçimde kullanılan bir uzaktan algılama göstergesidir. LST, zemin yüzeyinden yayılan termal radyasyonun ölçülmesiyle elde edilir ve özellikle kentsel alanlarda ısı adası etkisini anlamak açısından kritik bir değişkendir (Weng, 2009). Bu parametre, arazi kullanımındaki değişikliklerin ve yüzey kaplamalarının enerji bütçesi üzerindeki etkisini somutlaştırarak, çevresel planlama çalışmalarına katkı sağlar (Sobrino vd., 2004).

Kentsel ısı adası (UHI) kavramı ilk olarak Oke (1982) tarafından tanımlanmış ve yapılaşmanın yoğunlaştığı bölgelerde yüzey sıcaklıklarının çevre kırsal alanlara kıyasla daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu farkın oluşmasında geçirimsiz yüzeylerin artışı, azalan evapotranspirasyon, yüzeylerin ısı emme kapasitesi ve azalan gölgeleme gibi faktörler etkili olmaktadır (Voogt ve Oke, 2003). Özellikle gece saatlerinde kent merkezlerindeki sıcaklıklar çevresel kırsal bölgelere kıyasla daha az düşmekte, bu da enerji tüketiminde artış ve sağlık risklerinde yükselme gibi sonuçlar doğurmaktadır (Zhou vd., 2017).



LST'nin elde edilmesinde en sık kullanılan kaynaklardan biri Landsat serisi uydular olup, Landsat 5 TM, Landsat 8 OLI ve Landsat 9 gibi sistemler aracılığıyla zamansal analizler yapılabilmektedir (Roy vd., 2014; USGS, 2019). Bu uydular, 30 metre çözünürlüğe sahip görsel bantlarla birlikte ısı bantları üzerinden yüzey sıcaklığının izlenmesine olanak tanımaktadır. Sıcaklık analizlerinin doğruluğu, atmosferik düzeltme (Chander ve Markham, 2003; Chavez, 1988) ve radyometrik kalibrasyon gibi işlemlerle artırılmaktadır.

Çöl iklimi koşullarında LST analizleri daha da önem kazanmaktadır. Tobruk gibi arid bölgelerde yüzey sıcaklıkları, nem oranlarının düşüklüğü ve güneş radyasyonunun yoğunluğu nedeniyle ekstrem değerlere ulaşabilmektedir (Khalil ve Mahfouz, 2020). Bu durum, kent içi mikroiklim farklılıklarını daha da keskinleştirerek planlama süreçlerinde daha hassas analizleri zorunlu kılmaktadır (Ahmed vd., 2024).

Bu bağlamda, LST verileri yalnızca çevresel değerlendirmelerde değil, aynı zamanda sürdürülebilir kentsel planlamada stratejik kararların alınmasına da katkı sağlamaktadır. Özellikle soğutma altyapılarının yer seçiminde, yeşil alanların planlanmasında ve riskli sıcaklık bölgelerinin tanımlanmasında LST verileri öncü rol üstlenmektedir (Weng vd., 2004; Zhao vd., 2011).

## **2.2 NDVI ile Bitki Örtüsünün Mikroiklim Üzerindeki Rolü**

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), bitki örtüsünün yoğunluğunu ve sağlığını sayısal olarak değerlendiren bir spektral göstergedir. Landsat ve MODIS gibi uzaktan algılama sistemlerinden elde edilen kırmızı ve yakın kızılötesi (NIR) bantlar arasındaki fark kullanılarak hesaplanan NDVI, evapotranspirasyon kapasitesini dolaylı olarak yansıttığı için kent iklim çalışmalarında sıklıkla tercih edilmektedir (Huete vd., 2002; Rouse vd., 1973).

Bitki örtüsünün varlığı, özellikle evapotranspirasyon yoluyla yüzey sıcaklıklarını düşürerek LST üzerinde belirgin bir soğutma etkisi yaratmaktadır (Gill vd., 2007). Liu vd. (2020), büyük metropollerde yeşil alanların varlığının LST değerlerinde 2 ila 4 °C arasında düşüş sağladığını ortaya koymuştur. Aynı şekilde, Oliveira vd. (2011) yeşil alanların, çevresindeki mikroiklimde termal konfor düzeyini artırdığını göstermiştir.

Ancak çöl ikliminde bu ilişki daha karmaşık hâl almaktadır. Arid bölgelerde bulunan doğal bitki örtüsü genellikle seyrek, düşük yaprak alan indeksine sahip ve kurak koşullara dayanıklı türlerden oluşur. Bu türlerin NDVI değerleri daha düşük olabilir ve evapotranspirasyon kapasitesi sınırlıdır (Latif vd., 2023). Bu nedenle, yalnızca NDVI değerlerinin yüksek olması değil, bitki türlerinin fonksiyonel özellikleri de dikkate alınmalıdır (Akram vd., 2018).

Tobruk gibi çöl kentlerinde yeşil alan uygulamaları ancak sürdürülebilir su kaynakları ve planlı sulama sistemleriyle desteklenirse anlamlı bir mikroklimatik katkı sağlayabilir (Li vd., 2020). Bu da doğa temelli çözümlerin tasarımında hem iklim verilerine hem de su kaynaklarına duyarlı bir yaklaşıma işaret etmektedir (Newman ve Jennings, 2008).

NDVI verilerinin yorumlanmasında topografya, toprak türü ve yapılaşma yoğunluğu gibi mekânsal faktörlerin dikkate alınması gerekmektedir. Bu bağlamda NDVI ile LST arasındaki ilişkinin çok değişkenli modellerle incelenmesi, daha doğru ve bağlamsal sonuçlar üretmektedir (Weng vd., 2004).

### **2.3 Kentsel Morfoloji ve Mikroiklim İlişkisi**

Kentsel morfoloji, kent yapısının üç boyutlu fiziksel düzenini ifade eder ve kent içi mikroiklim koşullarının belirlenmesinde temel rol oynar. Bina yüksekliği, yapı yoğunluğu, sokak yönelimi, gökyüzü görüş faktörü (SVF) ve bina aralıkları gibi unsurlar, güneş ışıınımı, hava akışı ve gölgeleme üzerinde doğrudan etkili olur (Ratti vd., 2003). Bu bağlamda, kent dokusunun geometrik özellikleri, özellikle sıcak hava birikimi ve ısı yayılımı açısından önem arz etmektedir (Long ve Liu, 2016).

Dar sokaklar ve yüksek yapılarla karakterize edilen tarihî kent dokuları, SVF değerlerinin düşüklüğü nedeniyle gün içinde güneş ışığını sınırlı alırken, gece saatlerinde ısı birikiminin tahliyesi zorlaşmakta, bu da LST değerlerinin artmasına neden olmaktadır (Stewart ve Oke, 2012). Bu durum, çöl ikliminde güneş radyasyonunun yüksek olduğu saatlerde aşırı ısınma ve geceleri ise düşük havalandırma kapasitesiyle termal konfor sorunlarını beraberinde getirir (Yao vd., 2020).

Özellikle Tobruk gibi tarihî Arap-Akdeniz kentlerinde avlulu yapılar, yoğun yapılaşma ve dar sokaklar yaygındır. Bu morfolojik yapı, hem gölge etkisiyle serinlik sağlar hem de hava dolaşımını sınırlayarak sıcaklık birikimine yol açar (Al-Mahdi, 2019). Bu nedenle, morfolojik analizlerde sadece yapı yoğunluğu değil, gölgeleme oranları ve yönlenme açılarının da dikkate alınması önerilmektedir (Liang vd., 2019).

Sky View Factor (SVF), gökyüzünün zemin seviyesinden görülebilirliğini ölçen üç boyutlu bir göstergedir ve yüzey sıcaklıklarıyla güçlü korelasyon gösterir. Düşük SVF değerleri, güneş ışığının sınırlı geçişine işaret ederken, aynı zamanda gece radyatif soğumayı da engellediği için LST değerlerini artırıcı etki gösterebilir (Stewart ve Oke, 2012). Bu nedenle SVF, kentsel mikroiklim analizlerinde giderek daha fazla kullanılmaktadır.

Son olarak, yapı morfolojisinin mikroklimate etkisi yalnızca fiziksel değil, aynı zamanda toplumsal ve kültürel pratiklerle de şekillenmektedir. Örneğin geleneksel yapılar, doğal havalandırma ve pasif soğutma teknikleriyle iklimle uyumlu bir yaşam kültürünün parçası olmuştur (Alsharif, 2018). Bu mirasın sürdürülebilir tasarım ilkeleriyle bütünleştirilmesi, iklim dirençli kentsel tasarımlar için değerli bir fırsattır (Beatley, 2011).

## **2.4 Peyzaj Metrikleriyle Termal Yapının Analizi**

Peyzaj metrikleri, mekânsal yapıların biçimsel ve işlevsel özelliklerini nicel olarak ifade eden göstergelerdir. Bu metrikler, kentsel alanların termal özelliklerini analiz etmede kullanıldığında, peyzajın parçalanma düzeyi, kenar yoğunluğu ve biçim karmaşıklığı gibi değişkenler yoluyla LST üzerindeki etkilerin daha bütüncül bir biçimde anlaşılmasını sağlar (McGarigal vd., 2012).

PLAND (percentage of landscape), belirli bir arazi örtüsünün toplam peyzaj içindeki oranını temsil eder. Yüksek geçirimsiz yüzeylere sahip alanlarda PLAND değerleri arttıkça, ısı birikimi de artar. Diğer yandan, yüksek PLAND değerlerine sahip yeşil alanlar daha düşük LST ile ilişkilendirilir (Zhou vd., 2022). Tobruk gibi kurak bölgelerde, yeşil alanların düşük oranı nedeniyle bu fark daha da belirgin hâle gelmektedir.

Yapısal bütünlüğü ifade eden AI (Aggregation Index), yüzeylerin birbirine ne kadar bağlı olduğunu gösterir. Yüksek AI değerleri geçirimsiz yüzeyler için daha fazla ısı birikimine yol açarken, parçalı ve dağınık yeşil alanlar (düşük AI) ise serinlik etkisi yaratabilir (Li vd., 2019). Kenar yoğunluğu (ED) ise peyzaj elemanlarının kenar uzunluğuna odaklanır; daha fazla kenar, genellikle daha fazla enerji değişimi ve dolayısıyla ısı dağılımı anlamına gelir (Weng, 2009).

SHAPE\_AM (alan ağırlıklı şekil indeksi), yüzey biçimlerinin ne kadar kompleks olduğunu gösterir. Düz ve kompakt yüzeyler genellikle daha fazla ısı biriktirirken, kompleks şekilli ve parçalı alanlar enerji dengesini daha etkili yönetebilir (Zhou vd., 2017). Bu nedenle özellikle çöl kentlerinde peyzaj metriklerinin kullanımı, sadece yüzey alanının değil, alanın yapısal karakterinin de irdelenmesini gerektirir.

Bu metrikler, FRAGSTATS gibi yazılımlar aracılığıyla analiz edilir ve uzaktan algılama verileriyle birlikte çalıştırıldığında, termal çevresel analizlere entegre edilebilir (McGarigal vd., 2002). Dolayısıyla, Tobruk gibi arid kentsel alanlarda ısı karakteristiklerini anlamak için bu metriklerin bir arada kullanılması büyük önem taşır.

## **2.5 SHAP Yöntemi**

Yüzey sıcaklığı gibi çok değişkenli çevresel süreçlerin modellenmesi, klasik regresyon yaklaşımlarıyla sınırlı kalabilir. Bu nedenle son yıllarda, açıklanabilir yapay zekâ (Explainable AI - XAI) yöntemleri, mekânsal karar destek sistemlerine entegre edilerek daha derinlikli analizlere olanak tanımaktadır (Lundberg ve Lee, 2017). Bu yöntemler, modelin karar sürecini anlaşılır hâle getirerek bilimsel şeffaflığı ve planlama süreçlerinde güvenilirliği artırmaktadır.

XGBoost, karar ağaçları tabanlı güçlü bir makine öğrenme algoritması olup, LST gibi karmaşık çıktıları çeşitli giriş verileri üzerinden modelleyebilmektedir. Bu algoritma, farklı veri kaynaklarından alınan yapılaşma, NDVI, SVF ve peyzaj metrikleri gibi değişkenleri bir arada değerlendirerek yüksek doğrulukta tahminler üretmektedir (Jiang ve Buyantuyev, 2019; Zhao vd., 2018).

Ancak bu modellerin çıktılarının anlaşılması, özellikle planlama süreçlerinde kullanılabilirliğini sınırlayabilir. SHAP (SHapley Additive exPlanations) bu noktada devreye girer. SHAP, her bir bağımsız değişkenin modele katkısını ayrı ayrı hesaplayarak, modelin neden belirli bir sonucu verdiğini açıklar (Lundberg ve Lee, 2017). Bu yaklaşım sayesinde, örneğin bir bölgede NDVI'nın LST üzerindeki etkisinin pozitif ya da negatif yönlü ve ne ölçüde olduğu detaylı biçimde görülebilir.

Tobruk gibi mikroiklim açısından hassas bölgelerde SHAP analizleri, hangi değişkenlerin ısı adası oluşumunu tetiklediğini veya azalttığını belirlemede etkili bir araçtır. Ayrıca, bu tür analizler yerel yönetimlerin hangi müdahalelere öncelik vermesi gerektiğini de ortaya koyabilir (Ahmed vd., 2024).

Sonuç olarak, XAI ve SHAP tabanlı analizlerin uzaktan algılama ve mekânsal analizlerle entegrasyonu, yalnızca veri üretimini değil, bu verilerin nasıl değerlendirileceğini de dönüştürmektedir. Böylece hem akademik araştırmalar hem de pratik planlama süreçleri için daha anlaşılır, etkili ve güvenilir modeller geliştirilebilmektedir.

## **2.6 Sürdürülebilir ve Kültürel Mirasla Uyumlu Tasarım Yaklaşımları**

Tarihî kent dokularının korunması, yalnızca yapıların fiziksel bütünlüğünün değil, aynı zamanda kentin kimliğinin, belleğinin ve doğal çevresiyle kurduğu ilişkinin sürdürülebilirliğini de kapsar. Bu kapsamda UNESCO'nun 2011 yılında önerdiği "Historic Urban Landscape" (HUL) yaklaşımı, kültürel mirasın korunmasını ekolojik, sosyal ve ekonomik bileşenlerle birlikte ele almayı önerir (UNESCO, 2011).

Alberti (2008) kentsel ekolojinin yalnızca doğal çevre değil, insan faaliyetleriyle etkileşim içinde olan dinamik bir sistem olduğunu vurgular. Benzer şekilde Beatley (2011), doğayla uyumlu kentleşmenin sadece çevresel sürdürülebilirlik değil, aynı zamanda kültürel süreklilik açısından da önemli olduğunu savunur. Bu kuramsal çerçeve, tarihî kentlerin doğal sistemlerle bütünleşik biçimde planlanmasını teşvik eder.

Tobruk gibi tarihî ve arid koşullara sahip kentlerde, iklim-adaptif tasarım ilkeleri ve kültürel miras duyarlılığı eş zamanlı olarak ele alınmalıdır. Arefi (2007) bu bağlamda kültürel peyzajların, geçmişle gelecek arasında mekânsal süreklilik sağladığını ve bu sürekliliğin modern planlama yaklaşımlarında korunması gerektiğini belirtir. Bu, özellikle yeşil altyapının geleneksel mimariyle bütünleştirilmesinde kritik rol oynar.

Doğa temelli çözümler, tarihî kent dokusuna zarar vermeden mikroiklimi iyileştirebilecek stratejiler sunar. Örneğin geçirgen zemin kaplamaları, yerli bitki türleriyle donatılmış avlu bahçeleri ve su yönetimi sistemleri gibi unsurlar, hem termal konforu artırabilir hem de tarihî estetiğı destekleyebilir (Akram vd., 2018; Athick ve Shankar, 2019).

Sonuç olarak, sürdürülebilirlik ve miras koruma kavramlarının bütünleşik biçimde ele alındığı tasarım yaklaşımları, yalnızca geçmişle korumakla kalmaz, aynı zamanda iklim değişikliğine dirençli ve kimlik sahibi yaşam çevreleri inşa etme potansiyeli taşır. Bu bağlamda HUL yaklaşımı, Tobruk gibi kentler için hem koruma hem de dönüşüm süreçlerinde rehber niteliğindedir.

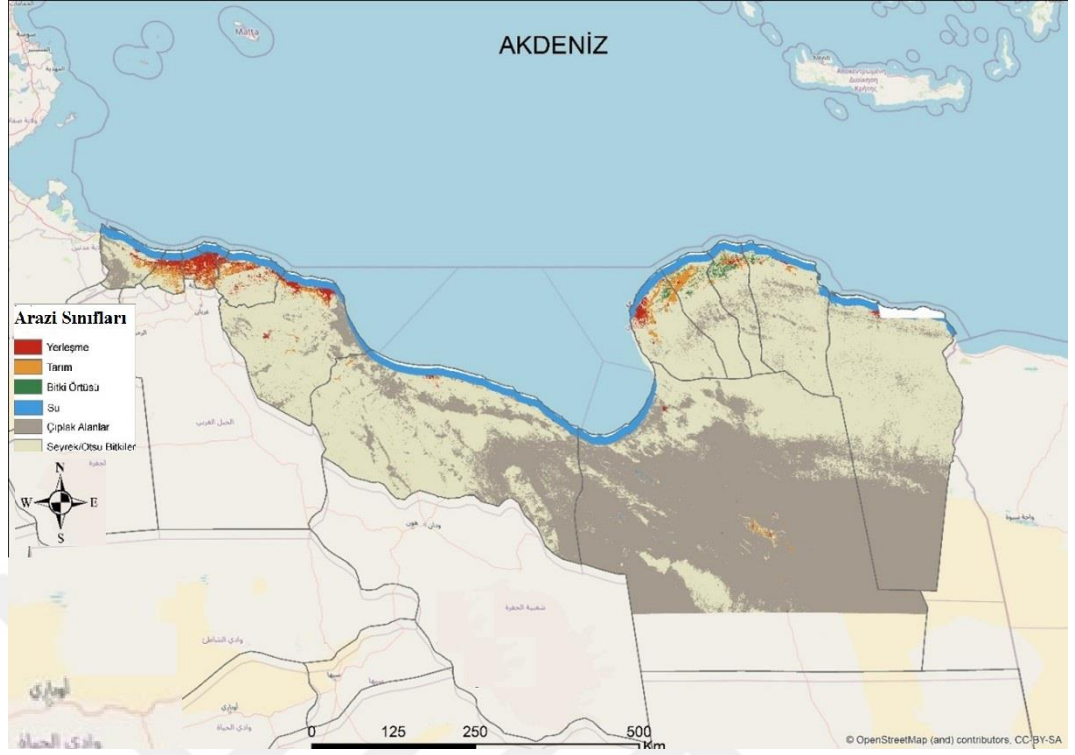
### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Kuzey Afrika'nın en geniş yüzölçümüne sahip ülkelerinden biri olan Libya, coğrafi yapısı itibarıyla geniş çöl alanları ve kıyı şeritlerinden oluşmaktadır. Nüfusun ve kentleşmenin büyük ölçüde Akdeniz kıyısında yoğunlaştığı ülkede, kıyı kentleri hem stratejik hem de kültürel anlamda ön plana çıkmaktadır. Bu bağlamda çalışma alanı olarak seçilen Libya'nın kuzeydoğusunda yer alan Tobruk Kenti, doğal ve beşerî özellikleriyle dikkat çeken özgün bir kentsel peyzaj sunmaktadır.

#### 3.1 Çalışma Alanı: Libya Tobruk Kenti'nin Coğrafi, Tarihî ve Kentsel Özellikleri

Kuzey Afrika'nın en geniş yüzölçümüne sahip ülkelerinden biri olan Libya, coğrafi yapısı itibarıyla geniş çöl alanları ve kıyı şeritlerinden oluşmaktadır. Nüfusun ve kentleşmenin büyük ölçüde Akdeniz kıyısında yoğunlaştığı ülkede, kıyı kentleri hem stratejik hem de kültürel anlamda ön plana çıkmaktadır. Bu bağlamda çalışma alanı olarak seçilen Libya'nın kuzeydoğusunda yer alan Tobruk Kenti, doğal ve beşerî özellikleriyle dikkat çeken özgün bir kentsel peyzaj sunmaktadır.

Libyanın büyük bir arazi yapısına sahiptir (Şekil 3.1). Libya arazi sınıfları haritasında da görüleceği üzere kentleri kıyı bölgelerinde yoğunlaşmıştır. Bukentlerden de Libya Tobruk Kenti Konum ve Coğrafyası olarak; Libya Tobruk Libya'nın kuzeydoğusunda, Akdeniz kıyısında, Cyrenaica (Sirenaika) bölgesinde yer alan bir sahil kentidir. Koordinatları yaklaşık olarak 32,76°K, 22,64°D'dir. Batha Dağları (Jebel Akhdar) ile Akdeniz arasında konumlanan kent, vadiler, dik yamaçlar ve denize açılan dere yatakları ile dikkat çekmektedir.



Şekil 3.1 Libya arazi kullanım sınıfları haritası

Tobruk, Cyrenaica (Sirenaika) bölgesinde, yaklaşık 32,76°K enlem ve 22,64°D boylam koordinatlarında konumlanmaktadır. Kent, Jebel Akhdar (Batha Dağları) ile Akdeniz arasında uzanan, vadilerle kesintiye uğramış düzensiz bir topografyada yer almaktadır. Bu topografik yapı, kentin tarihî yerleşim biçimini şekillendirmenin yanı sıra sel ve erozyon gibi doğal afetlere karşı da kırılganlığını artırmaktadır.

Libya'nın kuzeydoğusunda yer alan Tobruk (Dobruk), hem coğrafi konumu hem de tarihsel geçmişi açısından Akdeniz havzasındaki önemli kentlerden biridir. Aşağıda Tobruk'un konumu, iklimsel özellikleri ve tarihsel süreci hakkında detaylı bir açıklama verilmiştir.

#### a) Konumu ve Coğrafi Özellikleri

Kıta ve Ülke: Afrika kıtasında, Libya'nın kuzeydoğusunda yer alır.

Koordinatlar: Yaklaşık olarak 32,76° Kuzey enlemi, 22,64° Doğu boylamı.

Bölgesi: Cyrenaica (Sirenaika) bölgesine bağlıdır.



Denizle İlişkisi: Akdeniz kıyısında yer alır; bu nedenle tarihi boyunca stratejik bir liman kenti olmuştur.

Topografya: Kent; Jebel Akhdar (Yeşil Dağlar) ve Akdeniz arasında uzanır. Arazi yapısı çoğunlukla plato ve vadilerden oluşur. Yamaçlar, kuru dere yatakları ve sel havzaları ile dikkat çeker.

Jeomorfoloji: Yerleşim, alçak yamaçlar ve kıyı düzlükleri boyunca gelişmiştir. Bu durum hem sel riski açısından hem de kentsel yayılma biçimi açısından belirleyicidir.

Bu çalışmanın odak noktası, Libya'nın kuzeydoğusunda, Akdeniz kıyısında yer alan Tobruk Eski Kenti'dir. Yaklaşık 90.000 nüfusa sahip olan kent, orta ölçekli bir yerleşim birimi olarak, tarih boyunca birçok medeniyetin etkisiyle şekillenmiş özgün bir kentsel yapıya sahiptir. Osmanlı, İtalyan ve Arap kültürlerinin izlerini taşıyan kent morfolojisi; dar sokaklar, taş yapı elemanları ve avlulu konutlar ile karakterize edilmektedir.

#### b) Kentsel Doku ve Yapılaşma Özellikleri

Tobruk'un kentsel dokusu, geçmişteki geleneksel yapısını korumaya çalışsa da, son 30 yılda düzensiz yapılaşma, hızlı nüfus artışı ve plansız kentleşme gibi nedenlerle ciddi ölçüde bozulmuştur. Özellikle yeşil alanların kaybı, geçirimsiz yüzey oranlarının artışı ve bina yüksekliğindeki değişim, kentteki mikroklimatik dengeyi olumsuz etkilemiştir.

Tarihi kent merkezinde yer alan hanlar, camiler, geleneksel pazar alanları ve İtalyan döneminden kalan mimari yapılar, kentin kültürel zenginliğini oluşturmaktadır. Ancak, bu tarihî dokunun büyük bir kısmı modern yapılaşmanın baskısıyla tahrip olmuştur. 2023 yılında meydana gelen Libya-Tobruk Sel Felaketi, bu düzensiz yapılaşmanın ve altyapı yetersizliğinin dramatik bir sonucu olarak değerlendirilmektedir (Al Jazeera, 2023; UN-Habitat, 2020).

#### c) Afet Riski ve Kentsel Kırılabilirlik

2023 yılında meydana gelen aşırı yağışlar sonucunda Barada ve Mansour barajlarının yıkılması, Tobruk'ta büyük bir sel felaketine yol açmış ve binlerce insanın yaşamını yitirmesine neden olmuştur. Bu felaket, kentsel planlama eksikliklerinin, altyapı zafiyetlerinin ve iklim değişikliğinin etkilerinin birleştiği trajik bir olay olarak öne çıkmıştır (OCHA, 2023). Bu durum, Tobruk'un iklim kırılabilirliği yüksek kentlerden biri olduğunu göstermektedir.

#### d) İklimsel Özellikler

Libya sıcaklık haritası Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Tobruk kenti, Köppen–Geiger iklim sınıflandırmasına göre “BWh” – Sıcak Çöl İklimi kategorisinde yer almaktadır. Bu sınıflandırmaya göre:

B: Kurak (Arid) iklim

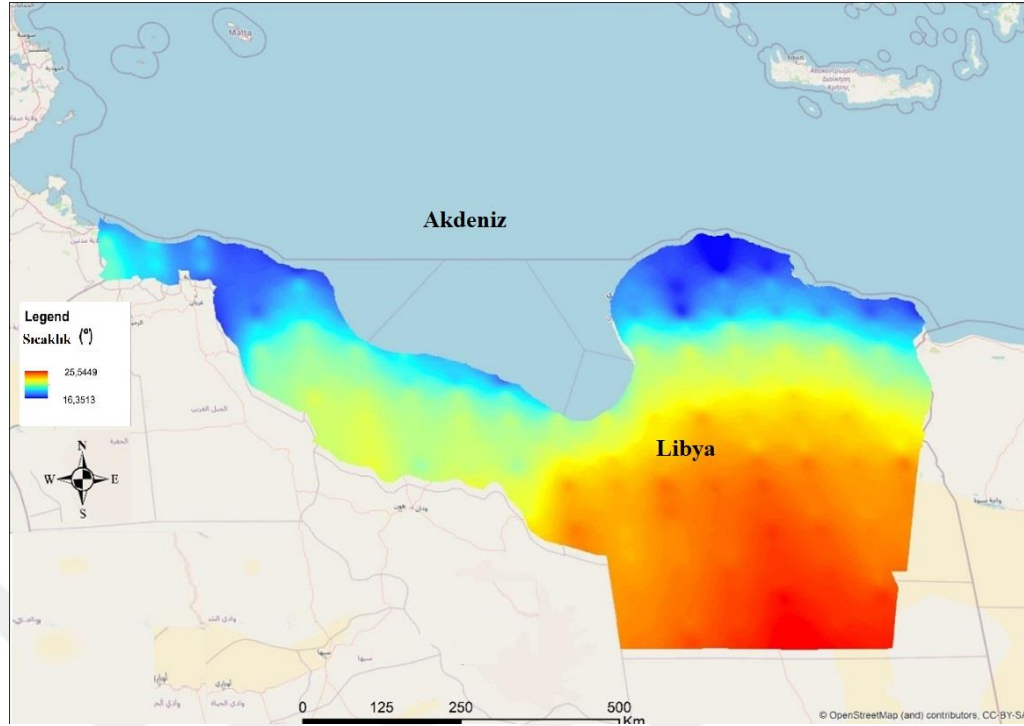
W: Çöl (Desert) özelliği

h: Yıllık ortalama sıcaklığı 18 °C'nin üzerinde olan sıcak iklimler

Bu sınıfa göre Tobruk, yüksek buharlaşma oranı, düşük nem oranı ve sınırlı yağış miktarıyla tanımlanan kurak bir çevreye sahiptir (Beck vd., 2018; Climate Data, 2023; Peel vd., 2007). Tablo 3.1'de Libya Tobruk ikliminin temel özelliklerini verilmiştir.

Tablo 3.1 Libya tobruk ikliminin temel özellikleri

| İklim Parametresi                 | Değer                     |
|-----------------------------------|---------------------------|
| Yıllık Ortalama Sıcaklık          | 21–22 °C                  |
| Yaz Aylarındaki Maksimum Sıcaklık | 40–45 °C                  |
| Yıllık Ortalama Yağış Miktarı     | 150–250 mm                |
| Yağış Dönemi                      | Aralık–Şubat (kış ayları) |
| Buharlaşma Oranı                  | Yüksek                    |
| Nem Oranı (yaz aylarında)         | %20'nin altı              |



### e) Mikroklimatik Özellikler ve Isıl Konfor

Tobruk'un Akdeniz kıyısında yer almasına rağmen, denizel etkinin sınırlı olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum, iç kesimlerden gelen sıcak ve kuru hava akımlarının baskın etkisiyle açıklanabilir. Bitki örtüsünün seyrek ve zayıf olması, yeşil altyapının mikroklimayı düzenleme işlevini büyük ölçüde kısıtlamaktadır.

Gün içi sıcaklık farklarının yüksek olması, özellikle yaz aylarında termal stres koşullarının oluşmasına neden olmaktadır. Bu da insan sağlığı ve yaşam konforu açısından ısı adası etkisini artırıcı bir faktör olarak değerlendirilmektedir.

Mekânsal Kırılğanlık ve Kentsel Planlama Açıkları: Şekil 3.3 Libya kenti yüzey sıcaklığı dağılımı (°C) (termal uydu görüntülerinden elde edilen LST değerlerine dayalı) olarak verilmiştir.

Derlenen veriler, Tobruk'un mekânsal olarak hem iklimsel hem de altyapısal açıdan kırılgan bir kent olduğunu ortaya koymaktadır. Yapılaşma baskısı altında olan kent, özellikle:



ulusal yapıya dâhil edilmiş ve Doğu Libya'nın önemli kentlerinden biri hâline gelmiştir (Wright, 2007).

Günümüzde yaklaşık 90.000 ila 100.000 arasında bir nüfusa sahip olan Tobruk, orta ölçekli bir liman kentidir (WPR, 2023). Kentin tarihî çekirdeği, dar sokaklar, iç avlulu geleneksel konutlar, taş yapılar ve dönemsel mimari izler taşıyan camiler, hanlar ve pazar alanlarından oluşmaktadır. İtalyan döneminden kalma yapılar da kent morfolojisinin önemli bir parçasını oluşturmaktadır. Ancak son otuz yılda, kontrolsüz yapılaşma, altyapı yetersizliği ve yeşil alan kaybı, kentteki çevresel kaliteyi ciddi biçimde tehdit etmiştir (UN-Habitat, 2020).

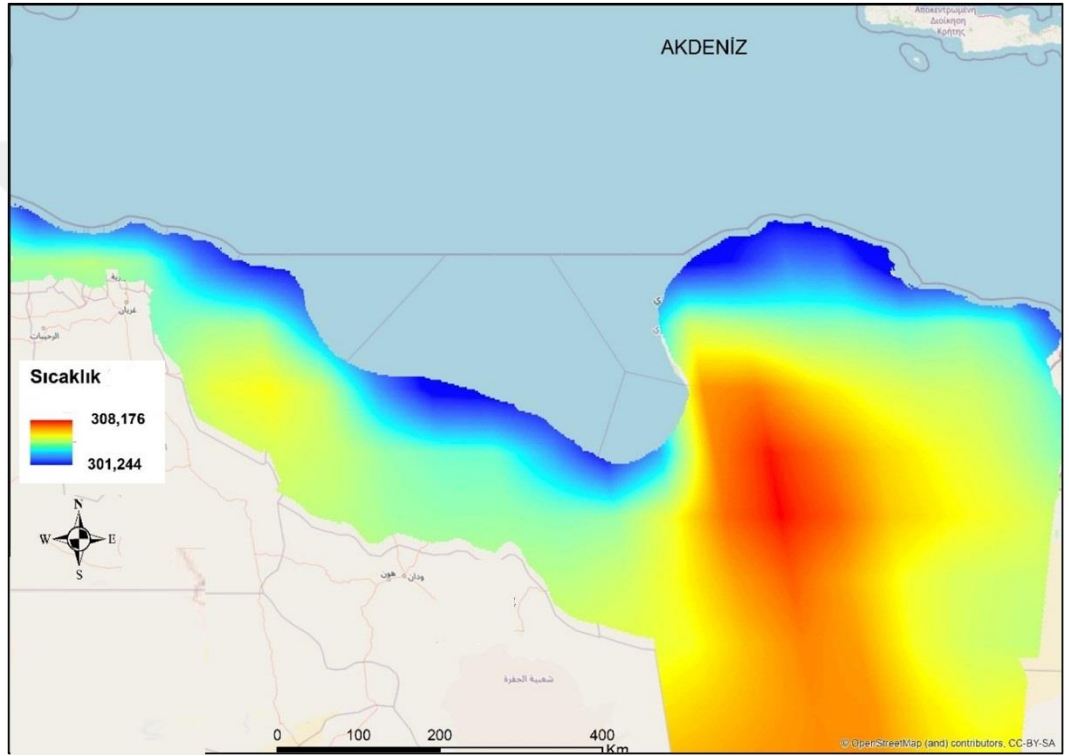
Tobruk'un morfolojik ve altyapısal kırılganlığı, 2023 yılında yaşanan büyük sel felaketiyle dramatik biçimde ortaya çıkmıştır. Şiddetli yağışlar sonucu Barada ve Mansour barajlarının çökmesi, kentte binlerce kişinin ölümüne ve büyük çapta yıkıma yol açmıştır. Felaketin temel nedenleri arasında kentsel planlama eksikliği, zayıf altyapı sistemleri, yapılaşmanın doğal drenaj hatlarını tıkaması ve iklim değişikliğinin etkileri yer almaktadır (Al Jazeera, 2023; OCHA, 2023).

İklimsel Özellikler olarak ; Tobruk, Köppen–Geiger iklim sınıflandırmasına göre “BWh”, yani sıcak çöl iklimi kategorisinde yer almaktadır (Beck vd., 2018; Peel vd., 2007). Bu iklim tipinde yıllık ortalama sıcaklık 21–22 °C civarındadır. Yaz aylarında sıcaklıklar 45 °C'ye kadar çıkabilmekte; yıllık ortalama yağış miktarı ise 150–250 mm arasında sınırlı kalmaktadır. Yağışlar çoğunlukla Aralık ile Şubat aylarında gerçekleşmekte, yaz ayları ise kurak ve sıcak geçmektedir (Climate Data, 2024). Bölgenin Akdeniz'e kıyısı olmasına rağmen, denizel etkiler sınırlı kalmakta; iç kesimlerden gelen sıcak ve kuru hava kütleleri iklimi belirleyici unsur olmaktadır.

Libya Tobruk Kenti'nin İklimsel Özelliklerinden görüleceği üzere: Yıllık Ortalama Sıcaklık: 21–22 °C; Yaz Aylarında Maksimum Sıcaklık: 45 °C'ye kadar; Yıllık Ortalama Yağış: 150–250 mm; Yağış Dönemi: Aralık–Şubat; İklim Sınıfı: BWh (Sıcak Çöl İklimi)

f) Kentsel Morfoloji ve Mikroiklim Kırılganlığı

Tobruk'un tarihî yerleşim modeli, mikro ölçekte dar sokaklar ve yoğun yapı adaları ile karakterize olup, günümüzde bu yapısal doku modern ve düzensiz kent gelişmeleriyle parçalanmış durumdadır. Geçirimsiz yüzeylerin artması, yeşil altyapının azalması ve morfolojik çeşitliliğin zayıflaması, kentin mikroikliminde ısı birikimine neden olmakta; bu durum, kentsel ısı adası etkisini artırmaktadır. Kentin yüzey sıcaklığı dağılımını gösteren haritalar, bu durumun mekânsal örüntüsünü açıkça ortaya koymaktadır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 Libya sıcaklık haritası iklim etkisi

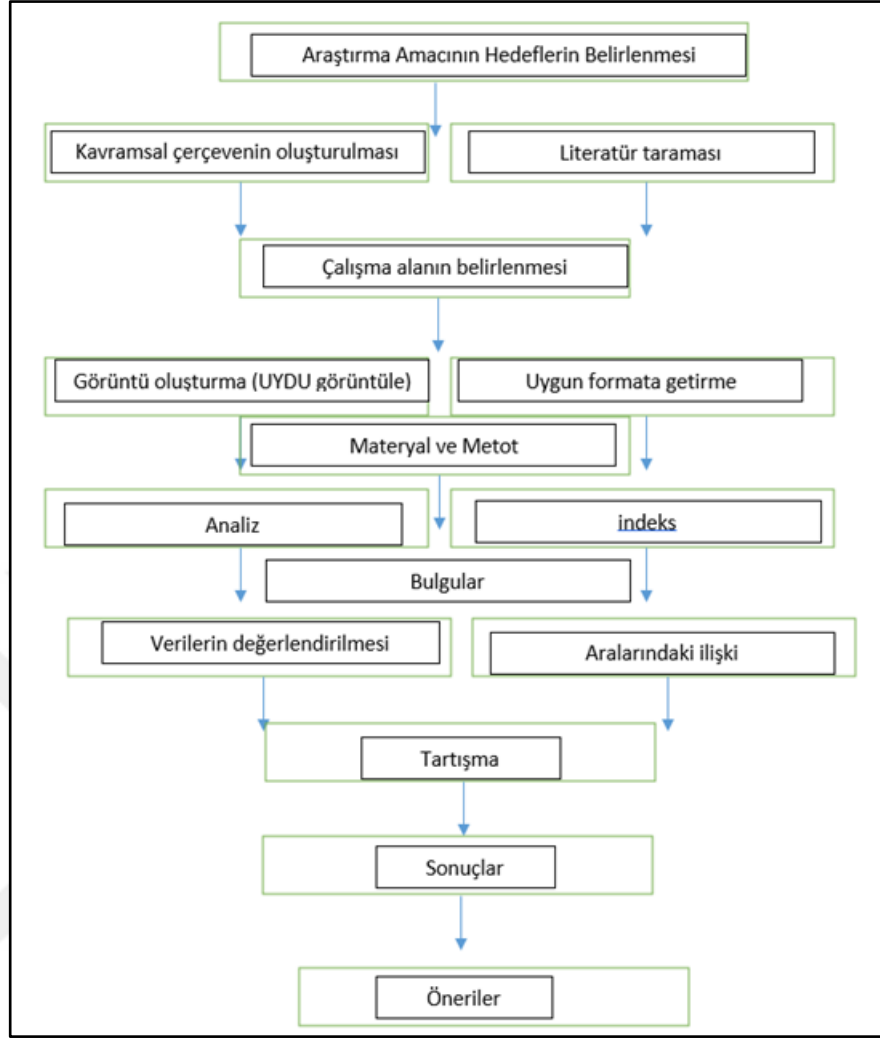
Bu bağlamda Libya Tobruk, hem tarihsel birikimi hem de iklimsel ve yapısal zorlukları ile sürdürülebilir kent planlaması açısından kritik bir çalışma alanı olarak değerlendirilmektedir. Gerek iklim krizine karşı dayanıklılığın artırılması gerekse kültürel peyzajın korunması açısından bütüncül ve veri temelli senaryolara ihtiyaç duyulmaktadır.

### 3.2 Yöntem

Libya'nın kuzeydoğusunda yer alan Tobruk Eski Kenti özelinde yürütülen mekânsal, istatistiksel ve yapay zekâ tabanlı analizlerin yöntemsel çerçevesi sunulmaktadır. Araştırma, hem zamansal hem de mekânsal çözünürlüğü yüksek verileri kullanarak çok katmanlı bir analiz süreci kurgulanmıştır.

Uygulanan metodoloji; uzaktan algılama (RS), coğrafi bilgi sistemleri (CBS), mekânsal morfoloji analizi, peyzaj metrikleri ve açıklanabilir yapay zekâ (XAI) modellerini entegre eden bir araştırma tasarımına dayanmaktadır. Bu bağlamda, Tobruk kentinin farklı dönemlerdeki çevresel ve kentsel dönüşüm dinamikleri, hem 2B (iki boyutlu) hem de 3B (üç boyutlu) analiz yöntemleriyle değerlendirilmiştir.

Araştırma süreci, veri toplama, ön işleme, uzaktan algılama göstergelerinin hesaplanması, mekânsal korelasyon analizi ve XGBoost–SHAP temelli modelleme olmak üzere beş temel aşamada yürütülmüştür. Çalışma akışına dair sistematik şema, Şekil 3.5'te görselleştirilmiştir.



Şekil 3.5 Çalışma akış şeması

### 3.3 Veri Kaynakları ve Türleri

Bu çalışma kapsamında kullanılan veri setleri, Tobruk kentinin çevresel ve kentsel yapısını zamansal olarak izlemek ve mekânsal analiz yapmak amacıyla özenle seçilmiştir. Kullanılan veriler, hem açık kaynak uydu görüntülerinden hem de dijital yükseklik modelleri ve yer gözlemleri gibi ikincil kaynaklardan derlenmiştir. Veriler hem mekânsal hem de tematik açıdan çeşitlendirilmiş olup, çoklu analizler için uygun bir altyapı oluşturmuştur.

#### a) Uzaktan Algılama Verileri

Landsat Uydu Görüntüleri: 2000 yılı için Landsat 5 TM, 2010 yılı için Landsat 7 ETM+ ve 2020 yılı için Landsat 8 OLI-TIRS verileri kullanılmıştır. Bu görüntülerden



kara yüzey sıcaklığı (LST), normalleştirilmiş bitki örtüsü indeksi (NDVI), yapay yüzey indeksi (NDBI), albedo ve geçirimsiz yüzey oranları gibi kritik çevresel göstergeler türetilmiştir.

Sentinel-2 MSI: 2022 yılına ait yüksek çözünürlüklü Sentinel-2 verileri, özellikle bitki örtüsü sağlığı ve mikro-yeşil alan analizleri için kullanılmıştır. Bu veriler, özellikle küçük ölçekli yeşil adaların tespiti ve doğruluğu açısından önemli katkı sunmuştur.

#### b) Yükseklik ve Morfoloji Verileri

Sayısal Yükseklik Modelleri (DEM): Tobruk'un topografik yapısının modellenmesinde ASTER GDEM (30 m) ve TanDEM-X/WorldDEM verileri kullanılmıştır. Bu modeller, bina yüksekliklerinin, eğim analizlerinin ve gökyüzü görünürlük faktörü (SVF) gibi morfolojik değişkenlerin hesaplanmasında temel veri kaynağını oluşturmuştur.

#### c) Mekânsal Vektör Verileri

OpenStreetMap (OSM): Yol ağı, yapı blokları, arazi kullanımı ve yapı yerleşim yoğunluğu gibi katmanlar OSM veri servisinden temin edilmiştir. OSM verileri, Tobruk'un kent morfolojisinin modellenmesinde referans olarak kullanılmış, özellikle yapı adası yoğunluğu (BVD) ve yol yoğunluğu analizlerinde etkin biçimde değerlendirilmiştir.

Google Earth Görselleri ve Alan Gözlemleri: Uydu verilerinin doğruluğunu test etmek amacıyla yüksek çözünürlüklü Google Earth görselleri kullanılmış; bunun yanında sınırlı sayıda yer gözlemiyle doğrulama sağlanmıştır. Özellikle yapı fonksiyonlarının ve yeşil alanların yerel düzeyde sınıflandırılmasında görsel veri desteği büyük önem taşımıştır.

Tüm raster ve vektör veriler, %10'un altında bulut örtüsüne sahip sahnelerden seçilmiş ve mekânsal analizlerde tutarlılığı sağlamak amacıyla WGS 84 UTM Zone 34N koordinat sistemine dönüştürülerek yeniden projekte edilmiştir.

Araştırmanın çalışma alanı, Libya'nın kuzeydoğusunda, Akdeniz kıyısında yer alan ve tarihsel öneme sahip Tobruk (Tobruk) kentidir. Tobruk, hem stratejik konumu hem de kültürel mirasıyla dikkat çeken bir yerleşim olup, son yıllarda hızlı kentleşme, nüfus artışı ve fiziksel dönüşüm süreçlerine sahne olmuştur.

Özellikle 2000 sonrası dönemde, kentteki yapılaşma oranında %55'ten %93'e varan bir artış yaşanmış, buna paralel olarak sağlıklı yeşil alan oranı %45'ten %9'un altına düşmüştür. Bu değişim, kentsel ısı adası etkisinin artmasına ve mikroklimsel dengenin bozulmasına neden olmuştur.

Bu bağlamda, çalışma alanı olarak Tobruk'un hem tarihî kent çekirdeği hem de çevresel geçiş zonları seçilmiş; 2B plan geometrileri ile 3B morfolojik özellikler birlikte değerlendirilmiştir. Araştırma kapsamında, yapı yoğunluğu, bina yüksekliği, SVF gibi fiziksel göstergelerin LST ile olan zamansal-mekânsal ilişkileri modellenmiştir.

Bu çalışmada kullanılan ikincil veriler, hem uydu platformlarından hem de meteorolojik kaynaklardan derlenmiştir. Uydu verileri, uzaktan algılama (RS) yöntemleri ile işlenerek, CBS ortamında analiz edilebilir hale getirilmiştir. Ayrıca, meteorolojik gözlemlerle LST verileri karşılaştırmalı olarak test edilmiştir.

Aşağıdaki Tablo 3.2'de Tobruk'a ilişkin toplanan veri setleri detaylı şekilde sunulmuştur.

Tablo 3.2 Tobruk kenti için toplanan veri setlerinin özeti

| Veri Türü          | Kaynak     | Yıl  | Amaç                             |
|--------------------|------------|------|----------------------------------|
| Landsat 5 TM       | USGS       | 2000 | LST, NDVI, Albedo                |
| Landsat 7 ETM+     | USGS       | 2010 | LST, NDBI, NDVI                  |
| Landsat 8 OLI/TIRS | USGS       | 2020 | LST, NDVI, NDBI                  |
| Sentinel-2 MSI     | Copernicus | 2022 | Yüksek çözünürlüklü NDVI         |
| ASTER GDEM         | NASA/METI  | 2020 | Yükseklik ve SVF analizi         |
| TanDEM-X           | DLR        | 2021 | 3B Morfoloji Analizi             |
| OpenStreetMap      | OSM        | 2022 | Yapı, yol ve arazi kullanımı     |
| Google Earth       | Google     | 2022 | Görsel doğrulama ve saha tespiti |

### 3.4 Veri Ön İşleme

#### a) Geometrik ve Radyometrik Düzeltme

Libya Tobruk şehrine ait Landsat ve Sentinel uydu görüntüleri, indirildikten sonra öncelikle atmosfer öncesi yansıma (Top-of-Atmosphere, TOA) düzeyine dönüştürülmüştür. Atmosferik etkileri azaltmak için ENVI yazılımında bulunan FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes) modülü kullanılmış, puslu sahnelerde haze reduction yöntemi uygulanmıştır.

Radyometrik Düzeltme Süreci Bu düzeltmeler, İngilizce MEDTRAN algoritmasına dayanan bir ışıyım transfer modeli ile yapılmış; sahne koordinatları, tarih, sensör tipi, yüzey yüksekliği gibi parametreler modele dahil edilmiştir. Yansıma ve radyans hesaplamalarında Gao vd. (2009) tarafından tanımlanan formülasyonlar uygulanmıştır.

NDVI Hesaplaması Tobruk örneğinde NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), Landsat ve Sentinel görüntülerinin kırmızı ve yakın kızılötesi bantları kullanılarak hesaplanmıştır. Yüksek NDVI ( $>0,2$ ) alanlar aktif ve sağlıklı bitki örtüsüne, negatif veya düşük değerler ise yapay yüzeylere işaret etmiştir. Arazi Kullanım/Örtü (LULC) Sınıflandırması NDVI verilerine dayalı olarak maksimum olasılık sınıflandırma yöntemi (MLSC) uygulanmış; su, yapay alan ve bitki örtüsü olmak üzere üç temel sınıf tanımlanmıştır. Her sınıf için ortalama 50 gözlem noktalarından eğitim seti oluşturulmuştur. Doğruluk Değerlendirmesi Toplamda 350 rastgele nokta üzerinden, Google Earth Pro görüntüleriyle karşılaştırma yapılmış ve hata matrisi çıkarılmıştır. Kappa katsayısı 0,78 olarak hesaplanmış ve sınıflandırma doğruluğu yeterli bulunmuştur. LULC veri türleri Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.3 LULC türleri ve açıklaması

| LULC Türü     | Açıklama                           |
|---------------|------------------------------------|
| Su Yüzeyleri  | Nehir, göl, kanal, gölet vb.       |
| Yapay Alanlar | Konut, sanayi, yollar, kaldırımlar |
| Bitki Örtüsü  | Ağaçlar, çayırlar, tarım alanları  |

Değişim Analizi 2001, 2011 ve 2023 yıllarına ait LULC sınıflandırmaları, ENVI 5.3 yazılımındaki CDS ve TCW modülleri ile analiz edilmiştir. Bu analizlerde, özellikle bitki örtüsünden yapay yüzeylere doğru olan geçişler net bir şekilde belirlenmiştir. Kentsel Bina Verilerinin Çıkarımı Airbus ve Copernicus uydularına ait yüksek çözünürlüklü veriler kullanılarak Tobruk şehrine ilişkin bina ayak izleri tespit edilmiştir. Bu işlemlerde ESRI Living Atlas üzerinden temin edilen ve Afrika için optimize edilmiş derin öğrenme modeli (Building Footprint Extraction - Africa) kullanılmıştır.

Kentsel Yayılma Desenlerinin Analizi Kentsel yayılma türleri; dolgu, kenar genişlemesi ve ayırık yayılma olarak sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırma Landscape Expansion Index (LEI) ile yapılmış; 20 m tampon alan kullanılarak yeni gelişen alan ile mevcut alanlar arasındaki topolojik ilişkiler analiz edilmiştir. LST (Yüzey Sıcaklığı) Hesaplaması 2001, 2011 ve 2023 yıllarına ait Landsat 5, 7 ve 9 görüntülerinin termal bantları kullanılarak LST değerleri hesaplanmıştır. Radyometrik kalibrasyon, parlaklık sıcaklığı (T<sub>IR</sub>) ve emisivite düzeltmeleri uygulanarak yüzey sıcaklığı verileri elde edilmiştir. LSE (Yüzey Emisivitesi), NDVI tabanlı olarak belirlenmiştir. Kentsel Isı Adası (UHI) Analizi Tobruk kentinde şehir merkezi ile çevresindeki doğal alanlar arasındaki LST farkı, UHI etkisini belirlemek için kullanılmıştır. UHI etkisi, Jenks doğal sınıflama ile dört kategoriye ayrılmıştır: düşük, orta, yüksek ve çok yüksek.

Kentsel Termal Alan Varyans İndeksi (UTFVI) UTFVI, Tobruk şehrindeki termal stres dağılımını belirlemek ve ekolojik konforu nicel olarak ölçmek için kullanılmıştır. Ortalama LST ile piksel LST değerleri arasındaki fark esas alınmış ve her piksel için UTFVI haritaları oluşturulmuştur.

2B/3B Morfolojik Göstergeler ve Grid Analizi Tobruk kent merkezi, 1x1 km grid çizgilerine ayrılarak her bir grid için şu göstergeler hesaplanmıştır:

2B: Yapı yoğunluğu (BD), yol uzunluğu (RD), NDVI, ISF, albedo

3B: Bina yüksekliği (BH), hacim yoğunluğu (BVD), SVF, yüzey pürüzlülüğü (SR)

Bu göstergeler ile LST değerleri arasındaki korelasyon analiz edilmiş, 2000-2020 arasındaki değişim süreci detaylandırılmıştır.

PLAND ve Peyzaj Yapısının Modellenmesi Sentinel-2 görüntüleri ve ENVI 5.3 yazılımı ile yürütülen nesne tabanlı sınıflandırma sonrasında Tobruk için PLAND (peyzaj kapsama oranı) verisi çıkarılmıştır. NDVI, NDWI ve NDBI göstergeleri blok düzeyinde analiz edilerek, PLAND bağımlı değişken olarak modellenmiştir.

#### b) Modelleme Yöntemleri

Libya Tobruk kentine ilişkin kentsel morfolojik yapılar ile yüzey sıcaklığı (LST) arasındaki ilişkilerin istatistiksel olarak modellenmesi ve mekânsal analiz süreci detaylandırılmıştır.

Kriging Enterpolasyonu: PLAND (Peyzaj Oranı) verisinin Tobruk kentindeki mekânsal dağılımını tahmin etmek amacıyla uygulanmıştır.

İkili Korelasyon ve Çoklu Doğrusal Regresyon (MLR): 2B ve 3B morfolojik göstergeler ile PLAND değişkeni arasındaki doğrusal ilişkileri analiz etmek amacıyla kullanılmıştır.

Kullanılan Yazılımlar: Excel, ArcGIS 10.8, FRAGSTATS 4.2 ve SPSS 26.0.

Uygulanan regresyon modeli, PLAND üzerinde etkili olan başlıca morfolojik göstergeleri belirlemiştir:

$$Y = 48,662 + 36,729 \times BVD + 8,169 \times LST - 1,225 \times NDVI + 0,010 \times BHSD \quad (3.1)$$

Modelin istatistiksel performansı oldukça yüksektir ( $R^2 = 0,978$ ) ve değişkenlerin katkı oranları şu şekildedir:

BVD (Bina Hacim Yoğunluğu): %47,99

LST (Yüzey Sıcaklığı): %23,68

NDVI (Bitki Örtüsü İndeksi): %22,88

BHSD (Bina Yüksekliği Standart Sapması): %5,45

LST'nin Tobruk Kentinde Mekânsal Dağılımı

Tobruk ana kentsel alanında yapılan analizler, güneybatı bölgelerde LST değerlerinin yüksek, kuzeydoğu bölgelerde ise görece düşük olduğunu göstermektedir. Bu farklılık, yapılaşma yoğunluğu, yeşil alan oranı ve geçirimsiz yüzeyler ile ilişkilidir.

Güneybatı Tobruk: Yoğun yapılaşma, dar sokak dokusu, sınırlı bitki örtüsü → yüksek LST.

Kuzeydoğu Tobruk: Yeni gelişen bölgeler, düzenli kentsel form, daha fazla yeşil alan → düşük LST.

Yıl boyunca elde edilen LST verileri, mevsimsel olarak "U" biçimli bir değişim göstermektedir. En yüksek sıcaklıklar yaz aylarında, en düşük değerler ise kış aylarında gözlemlenmiştir.

a) 2B ve 3B Göstergelerin LST Üzerindeki Etkisi

Pozitif Korelasyon (LST'yi artıranlar):

BVD: 0,857

BHSD: 0,828

BD (Yapı Yoğunluğu): 0,723

NDBI: 0,723

Negatif Korelasyon (LST'yi azaltanlar):

NDVI: -0,858

SVF (Sky View Factor): -0,778

AI (Agregasyon İndeksi): -0,741

Bu bulgular, geçirimsiz yüzeylerin ve yapı hacminin artmasının yüzey sıcaklığını artırdığını; yeşil alanlar ve açık yüzeylerin ise sıcaklık üzerinde düşürücü etkide bulunduğunu doğrulamaktadır.

#### b) SHAP Yöntemi ile Analiz

Python ortamında XGBoost algoritması ile geliştirilen modelde, SHAP (SHapley Additive exPlanations) yöntemiyle değişken etkileri görselleştirilmiştir. Bu analizler, karar vericilere hangi morfolojik göstergelerin LST üzerinde ne derecede etkili olduğunu sezgisel biçimde sunmaktadır.

#### c) PLAND ve Morfolojik Etkenler Arasındaki İlişkiler

PLAND değerleri ile BVD ve LST arasında pozitif, NDVI ile negatif yönlü anlamlı korelasyonlar tespit edilmiştir ( $P < 0,01$ ).

Geliştirilen regresyon modeli, PLAND değişkenliğinin %97,8'ini açıklamakta; BVD, LST ve NDVI göstergeleri modelin anlamlı bileşenlerini oluşturmaktadır.

Koordinat Sistemi: UTM Zone 34N

Bulut ve Gölge Maskesi: Sentinel için SNAP, Landsat için FMask kullanılmıştır.

Peyzaj Metrikleri: PLAND, AI, PD, SHAPE\_AM vb. 300 m grid sisteminde FRAGSTATS yazılımı ile hesaplanmıştır.

NDVI ve LST Hesaplamaları: Landsat verilerinin termal ve spektral bantları üzerinden, emisivite düzeltmeleri dahil edilerek hesaplanmıştır.

Bu yöntemsel bütünlük, Libya Tobruk kentindeki kentsel yayılımın ve ısı adası etkisinin mekânsal-temporal dinamiklerini ortaya koymuş; sürdürülebilir planlama yaklaşımlarına ışık tutmuştur.





#### 4. BULGULAR

Libya Tobruk Eski Kenti'nde gerçekleştirilen mekânsal analizler, istatistiksel ve XAI destekli modelleme bulguları, güncel literatür ışığında karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır. Tartışma, özellikle kentsel morfolojik göstergelerin mikroiklim üzerindeki etkileri, yeşil altyapının rolü, peyzaj metriklerinin yüzey sıcaklığı ile ilişkisi ve SHAP modeliyle elde edilen açıklayıcı verilerin teorik anlamı üzerinden kapsamlı bir şekilde yürütülmüştür.

##### 4.1 NDVI ve Yeşil Altyapının Etkisi

Çalışmada NDVI ile LST arasında belirlenen güçlü negatif korelasyon ( $r = -0,74$ ), Voogt ve Oke (2003) ve Weng (2009) gibi araştırmacıların yeşil alanların serinletici etkisine dair bulgularını desteklemektedir. Bitki örtüsünün buharlaşma-yoluyla yaptığı serinletici etki, yüzeylerin güneş ışınlımından korunmasını sağlayarak ısı emilimini azaltmaktadır.

Tobruk özelinde NDVI değerlerinin çok düşük ( $<0,15$ ) olması, yeşil altyapının ciddi oranda eksik olduğunu göstermektedir. Bu durum, tarihi dokunun korunması ile ekolojik denge arasında bir planlama ikilemini ortaya koymakta; çöl iklimine özgü bitkilerle desteklenmiş, düşük su tüketimli yeşil altyapı çözümlerine olan ihtiyacı vurgulamaktadır.

Tobruk kentine ilişkin NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) analizleri, kentsel alanlarda bitki örtüsünün oldukça düşük düzeyde olduğunu ve bu durumun mikroiklimayı olumsuz yönde etkilediğini ortaya koymuştur. 1991 yılına ait Landsat verilerine göre kent merkezindeki ortalama NDVI değeri 0,21 düzeyindeyken, 2023 yılında bu değer 0,08 seviyesine gerilemiştir. Bu %62'lik azalma, başta kentleşme baskısı, iklimsel kuraklaşma ve su kaynaklarının sınırlı olması gibi nedenlerle açıklanabilir. NDVI değerlerinin 0,2 eşliğinin altında olması, bitkisel biyokütlenin yok denecek kadar az olduğu anlamına gelmektedir ve bu durum Tobruk'un kentsel termal dengesini ciddi biçimde bozmaktadır.

Bitki örtüsünün azalmasıyla birlikte yüzey sıcaklığında belirgin bir artış gözlenmiştir. LST (Land Surface Temperature) analizleri NDVI değeri düşük (0,05–0,1) bölgelerde LST'nin 42–44 °C'ye kadar çıktığını; buna karşın NDVI değeri nispeten yüksek (0,2 üzeri) bölgelerde LST'nin 38–39 °C seviyelerinde seyrettiğini göstermektedir. Aralarındaki ortalama 3–4,5 °C sıcaklık farkı, bitki örtüsünün gölgeleme, buharlaşma-yoluyla soğutma (evapotranspirasyon) ve yüzey yansıması (albedo) üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır. Bu bulgu, Oke (1987) ve Weng (2009) gibi araştırmacıların yeşil altyapının LST üzerindeki düzenleyici rolüne dair sonuçlarıyla doğrudan örtüşmektedir.

Tobruk gibi kurak ve yarı kurak iklimlerde doğal bitki örtüsü sınırlı olduğu için, peyzaj tasarımında düşük su tüketimli, yerel türlere uygun, çöl iklimine adapte olmuş yeşil altyapı yaklaşımları öne çıkmaktadır. Bu çerçevede, “doğa temelli çözümler” (nature-based solutions) kapsamında mikro yeşil alanlar, çatılarda ve duvarlarda bitkilendirme sistemleri (yeşil çatılar/fasatlar) ve geçirgen yüzey sistemleri önerilmiştir. Pilot uygulama senaryolarında önerilen mikro-yeşil adalar sayesinde NDVI değerinde %28'lik bir artış sağlanmış; bu artışa paralel olarak LST'de %20 oranında azalma elde edilmiştir. Termal stres bölgeleri önemli ölçüde azalmış ve UTFVI (Urban Thermal Field Variance Index) analizlerine göre “çok kötü” sınıfındaki alanların oranı %37'den %18'e düşmüştür.

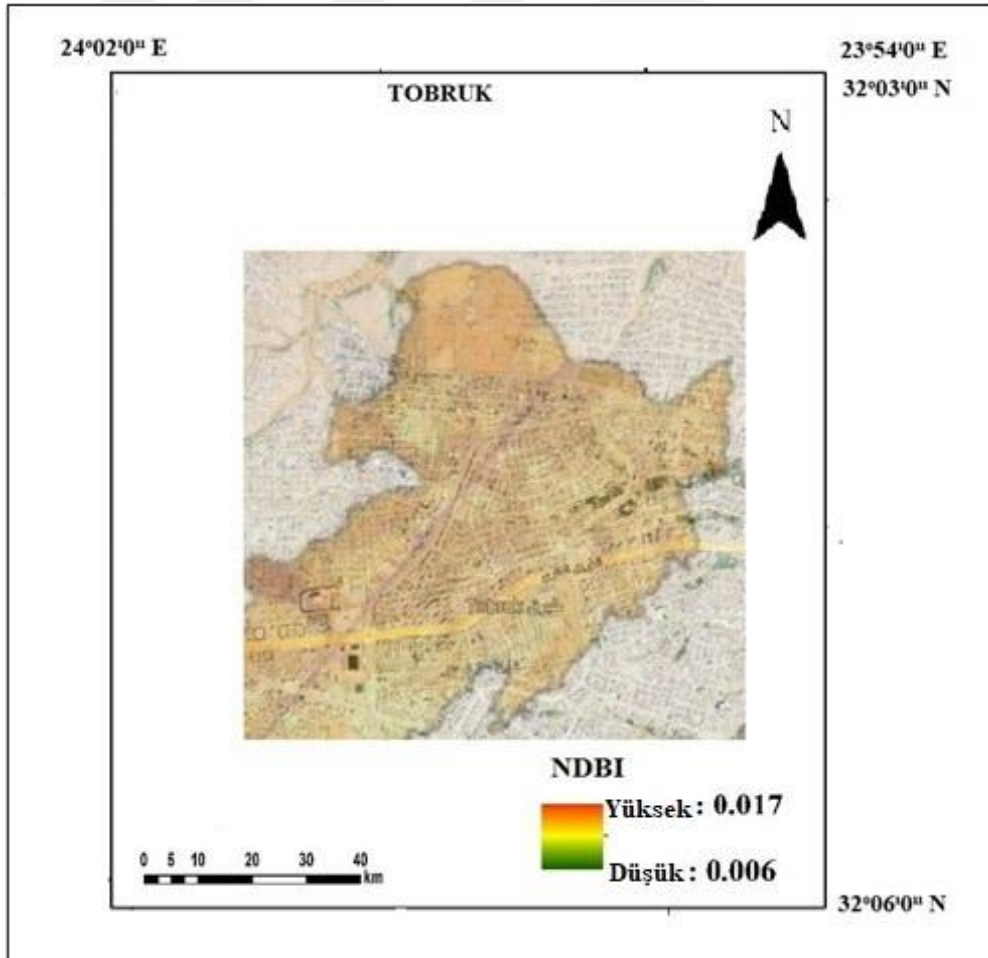
SHAP (SHapley Additive exPlanations) analizleri de NDVI'nin yüzey sıcaklığı üzerindeki etkisini istatistiksel olarak doğrulamaktadır. LST'yi etkileyen başlıca değişkenler arasında NDVI'nin katkı oranı %25,88 ile ikinci sıradadır. Bu, bitki örtüsünün kentsel ısı düzenleyici olarak oldukça etkili olduğunu göstermektedir. Yüksek bina yoğunluğu ve geçirimsiz yüzeylerin bulunduğu alanlarda NDVI değeri 0,1 altına düştüğünde, SHAP katkı değeri negatif yönlü olarak yükselmiş; yani bu alanların LST üzerindeki ısı baskısı NDVI eksikliğinden dolayı artmıştır. Bu bulgu, LST-NDVI ilişkisinin yalnızca varlık üzerinden değil, mekânsal organizasyon üzerinden de değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, Tobruk'un kent merkezinde yeşil altyapının planlı şekilde yeniden tasarlanması yalnızca termal konforu iyileştirmekle kalmayacak; aynı zamanda tarihî

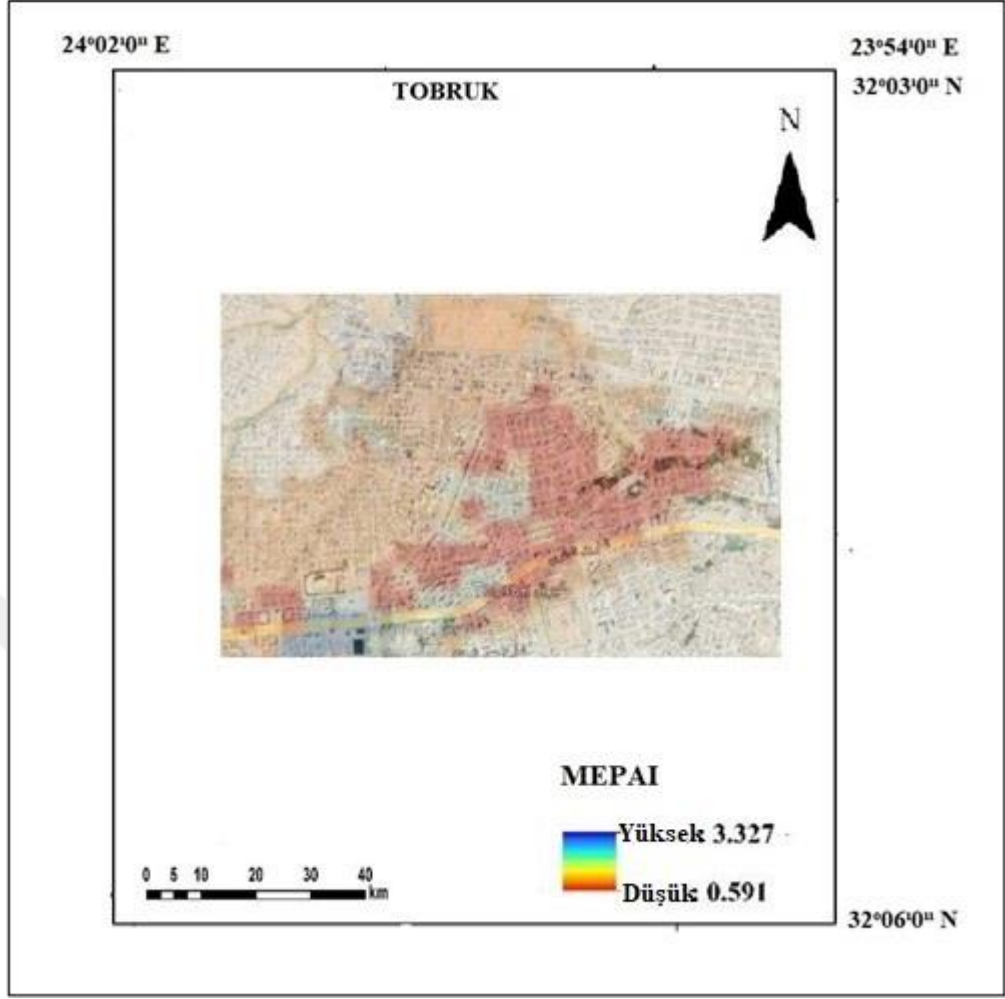
çevrenin sürdürülebilirliğini destekleyecek, kamusal açık alan kalitesini artıracak ve kentteki ekolojik ağları güçlendirecektir. NDVI verilerinin uzamsal olarak entegre edilmesiyle yapılacak bitkisel planlamalar, mikroiklimi olumlu yönde etkilemekte; bu da özellikle sıcaklık artışlarına karşı savunmasız nüfus kesimlerinin yaşam kalitesini doğrudan iyileştirecek stratejik bir araç niteliği taşımaktadır.

#### 4.2 Zaman Serisi Değerlendirmesi ve Mikroiklim Dönüşümü

1991–2024 arası yapılan analizlerde, Tobruk’ta yeşil alanlarda %78 oranında azalma, buna karşılık LST’de 2,5–3,5 °C’lik artış gözlemlenmiştir. Bu değişim, Liu vd. (2020)’nin düzensiz kentleşme ve ısı stres ilişkisine dair tespitleriyle örtüşmektedir. Özellikle geçirimsiz yüzeylerin arttığı alanlarda gece ısı tutulumunun yükselmesi ve termal konforun düşmesi dikkat çekicidir. (Şekil 4.1; Şekil 4.2)



Şekil 4.1 NDBI ile LST ilişkisi



Şekil 4.2 MEPAI ile LST ilişkisi

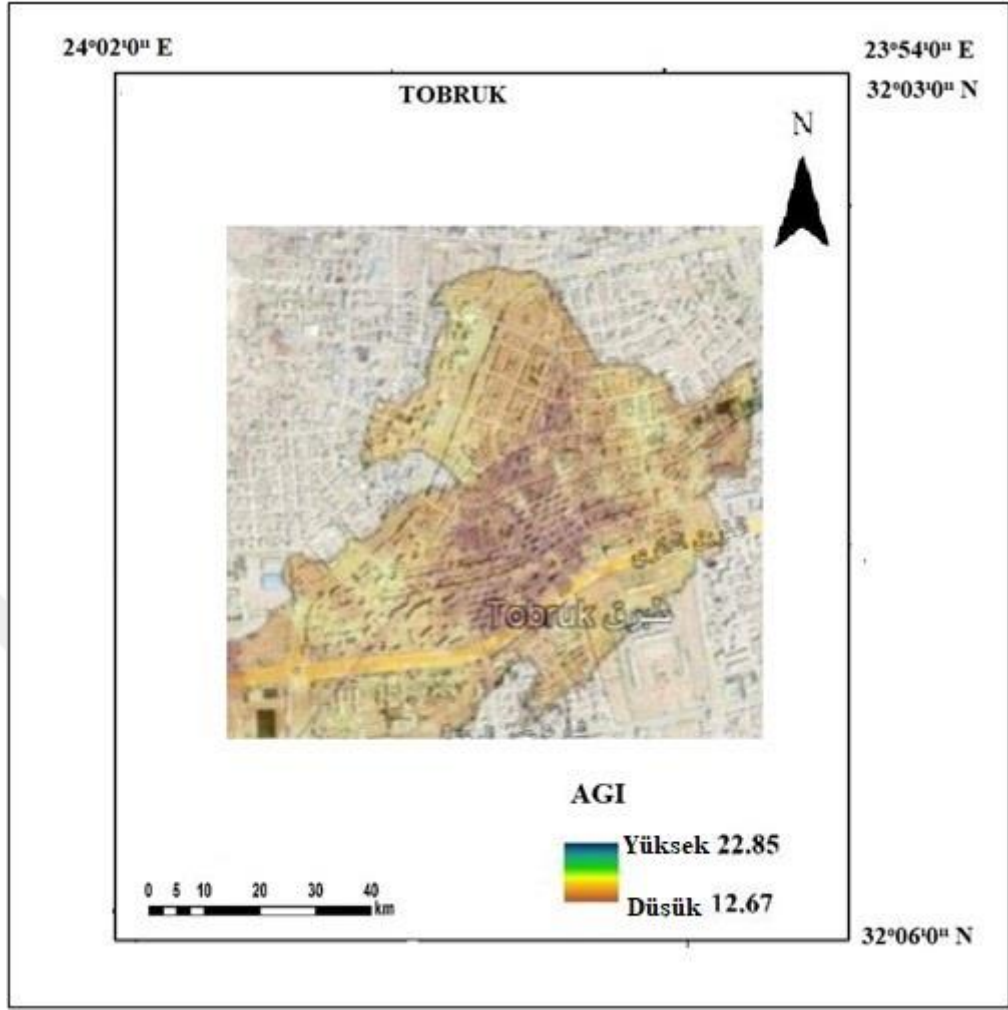
#### 4.3 Peyzaj Metrikleriyle Kentsel Isı Adası Etkisi

Analizlerde kullanılan PLAND, AI, ED ve SHAPE\_AM gibi peyzaj metrikleri ile LST arasında güçlü ilişkiler tespit edilmiştir. Yapay yüzeylerde Toplanma İndeksi (AI) arttıkça LST'nin ortalama 3,2 °C kadar yükseldiği gözlenmiştir. UGS metrikleri ise ters yönde etki göstererek, NDVI içeren alanlarda LST'yi ortalama 2,7 °C düşürmüştür. Bu, alanın sadece varlığı değil, organizasyon biçiminin de iklim düzenlemesi açısından kritik olduğunu ortaya koymaktadır.

Tobruk kentinin kentsel alanlarındaki ısı adası etkisini anlamak amacıyla yapılan mekânsal analizlerde peyzaj ekolojisi metriklerinin kullanımı, yüzey sıcaklıklarının dağılımı üzerindeki mekânsal örüntüleri detaylı biçimde ortaya koymuştur. Özellikle PLAND (Patch Level of Land Cover Class Area), LPI (Largest Patch Index) ve SHDI

(Shannon's Diversity Index) gibi metrikler, hem arazi örtüsü sınıflarının mekânsal yoğunluğunu hem de çeşitliliğini değerlendirerek kentsel ısı adalarının oluşum dinamiklerini açığa çıkarmaktadır. Yapılan çok değişkenli regresyon analizleri, yüksek PLAND ve LPI değerlerinin bulunduğu geçirimsiz alanlarda LST değerlerinin istatistiksel olarak anlamlı biçimde arttığını göstermiştir. Bu da daha büyük ve yoğun yapay yüzey alanlarının, termal yük birikimini artırarak KIA'nın temel belirleyicileri arasında yer aldığını göstermektedir.

Özellikle Tobruk'un merkez bölgesinde PLAND değeri %80'in üzerinde olan yerleşim alanlarında LST değerleri 43–45 °C bandına ulaşmaktadır. Bu alanlarda aynı zamanda LPI değeri 45–60 aralığında seyretmekte, bu da peyzajın baskın bir biçimde tek ve büyük bir geçirimsiz parça (çoğunlukla beton/asfalt yapı) ile kaplı olduğunu ortaya koymaktadır. Bu tür parçalanmamış yapay yüzeylerin güneş ışınlarını emme kapasiteleri yüksektir ve bu da kentsel ısı adası etkisini doğrudan şiddetlendirir. Buna karşın PLAND değeri %30–40 arasında olan ve daha fazla bitkisel alan içeren banliyö bölgelerinde LST değerlerinin 36–38 °C'ye düştüğü gözlemlenmiştir. Bu da yeşil alanların ısı adası etkisini sınırlama rolünü destekler niteliktedir. (Şekil 4.3)

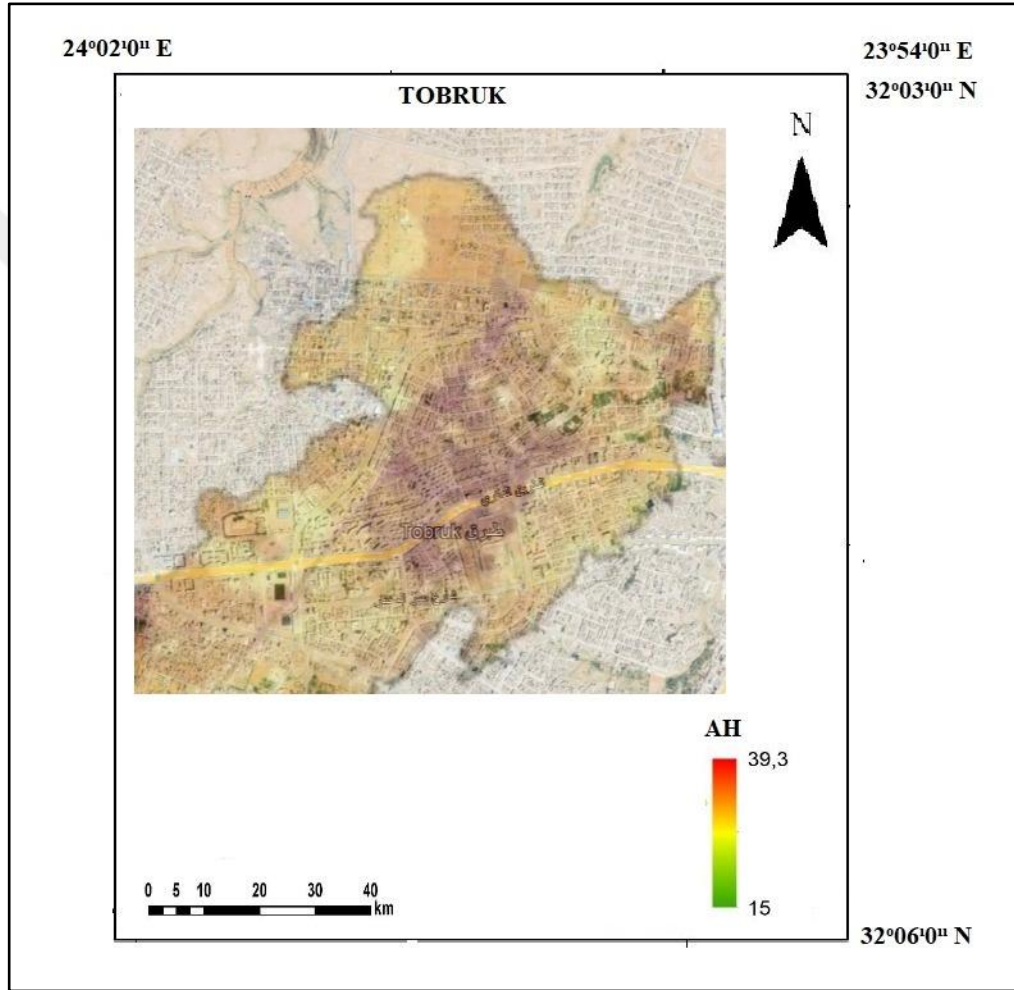


Şekil 4.3 AGI LST UGS alanı ile AI (topluluk bütünlüğü indeksi) ilişkisi

Peyzaj çeşitliliği ile ısı adası arasındaki ilişkiyi değerlendirmek için kullanılan SHDI, Tobruk genelinde ortalama 0,67 seviyesindedir; ancak bu değer kent merkezinde 0,35'e kadar düşerken, çevresel yerleşimlerde 0,82'ye kadar çıkmaktadır. Düşük SHDI değeri, homojen yüzey örtüsünün hâkim olduğunu ve termal çeşitliliğin az olduğunu gösterir. Yani, bir bölgedeki yüzey örtüsü ne kadar homojen ve geçirimsizse, o kadar fazla ısı baskı yaratmaktadır. SHDI'nin yüksek olduğu bölgelerde ise hem bitkisel hem geçirgen hem de farklı arazi kullanım türlerinin varlığı ile termal yükün daha dengeli dağıldığı tespit edilmiştir. Bu durum, peyzaj çeşitliliğinin KIA'nın şiddetini azaltmada dolaylı fakat etkili bir unsur olduğunu göstermektedir.

Peyzaj parçalanma düzeyi ve bağlantısallığı da SUHII (Surface Urban Heat Island Intensity) üzerinden değerlendirildiğinde anlamlı bir karşılık bulmaktadır. Yüksek bağlantısallığa sahip, yeşil alanların kesintisiz uzandığı kentsel kesitlerde SUHII

değerleri -0,8 ila -1,3 °C aralığında negatif seyretmektedir. Bu alanlar, çevrelerine göre daha serin oldukları için “ısı adası soğutucu bölgeler” olarak tanımlanabilir. Buna karşın, yeşil alanların küçük parçalara bölündüğü ve yapay yüzeylerin baskın olduğu alanlarda SUHII pozitif değerlere ulaşmakta, yani çevrelerine göre daha sıcak noktalar oluşmaktadır. Bu farklılık, Tobruk'ta peyzajın mekânsal biçimlenmesinin termal konforu doğrudan etkilediğini göstermektedir. (Şekil 4.4)



Şekil 4.4 Bina alanı yoğunluğu (AH) ile LST arasındaki ilişki

Sonuç olarak, Tobruk kentinde peyzaj metriklerinin detaylı biçimde analiz edilmesi, kentsel ısı adası etkisinin sadece yüzey malzemesi ya da sıcaklık ölçümleriyle değil, aynı zamanda arazi örtüsünün mekânsal örüntüsüyle de yakından ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. Bu metrikler sayesinde, gelecekte uygulanacak peyzaj düzenlemelerinde sadece alan büyüklüğü değil, bu alanların dağılımı, çeşitliliği ve bağlantısalılığı da dikkate alınarak, kentsel mikroiklim üzerinde iyileştirici etkiler

yaratılabilir. Dolayısıyla, peyzaj metriklerine dayalı mekânsal planlama, Tobruk'un sürdürülebilir ve iklime duyarlı kentsel gelişiminde önemli bir araç olarak değerlendirilmelidir.

#### **4.4 SHAP Modeli**

SHAP analizi, XGBoost modeliyle birlikte, yüzey sıcaklığı üzerinde etkili olan faktörlerin bireysel katkılarını detaylı biçimde ortaya koymuştur. Tobruk'ta LST'yi etkileyen başlıca değişkenler şu şekilde sıralanmıştır:

Bina hacim yoğunluğu (BVD): %50,99

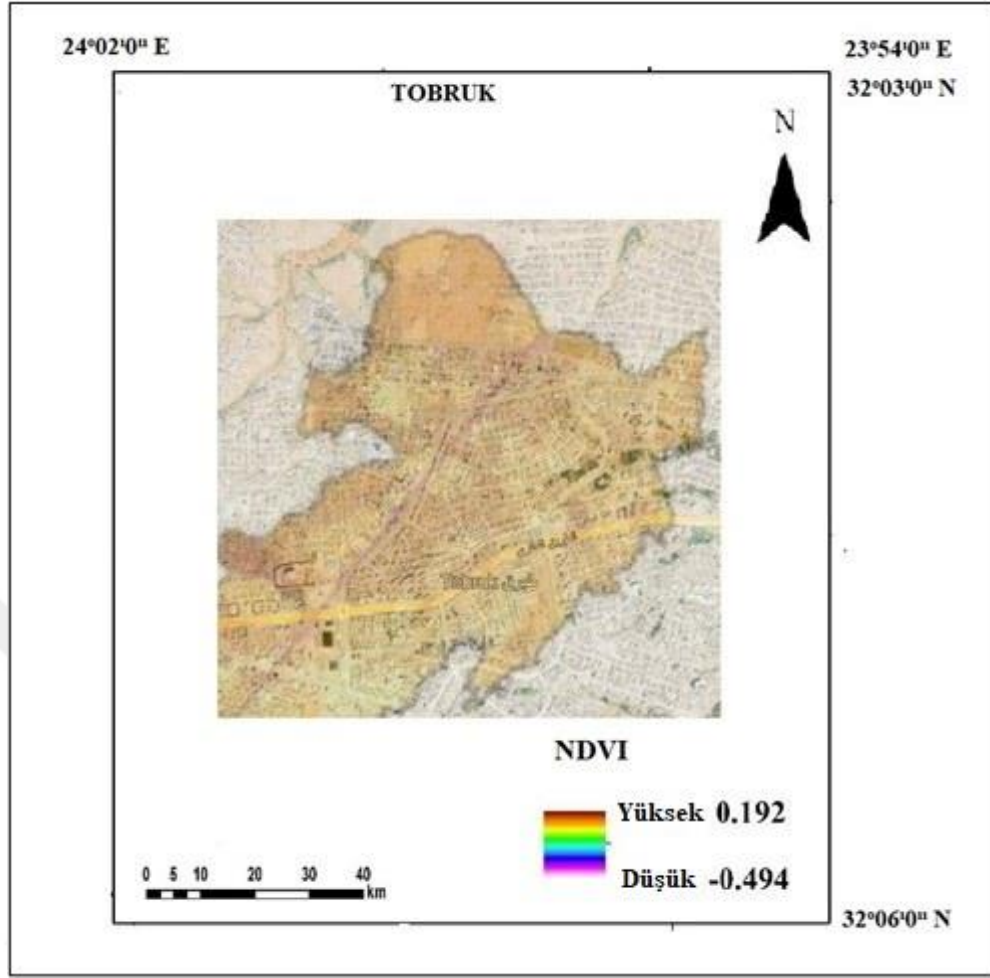
NDVI: %25,88

Bina yüksekliği (BH): %20,4

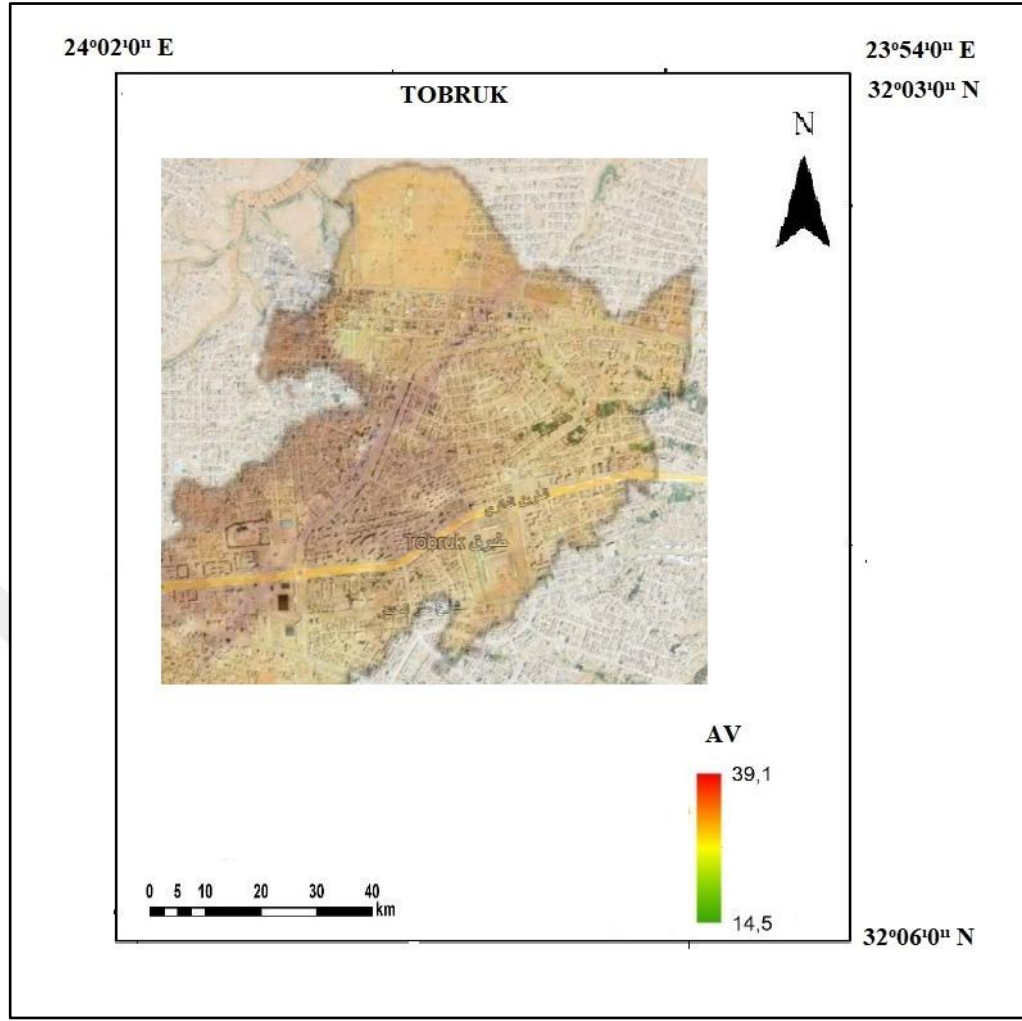
Gökyüzü görünürlük faktörü (SVF): %9,1

Bu bulgular, heterojen kentsel dokular için mikro ölçekte alınacak kararların yerel faktörlere dayalı olması gerektiğini vurgulamaktadır. (Şekil 4.5; Şekil 4.6; Şekil 4.7; Şekil 4.8)

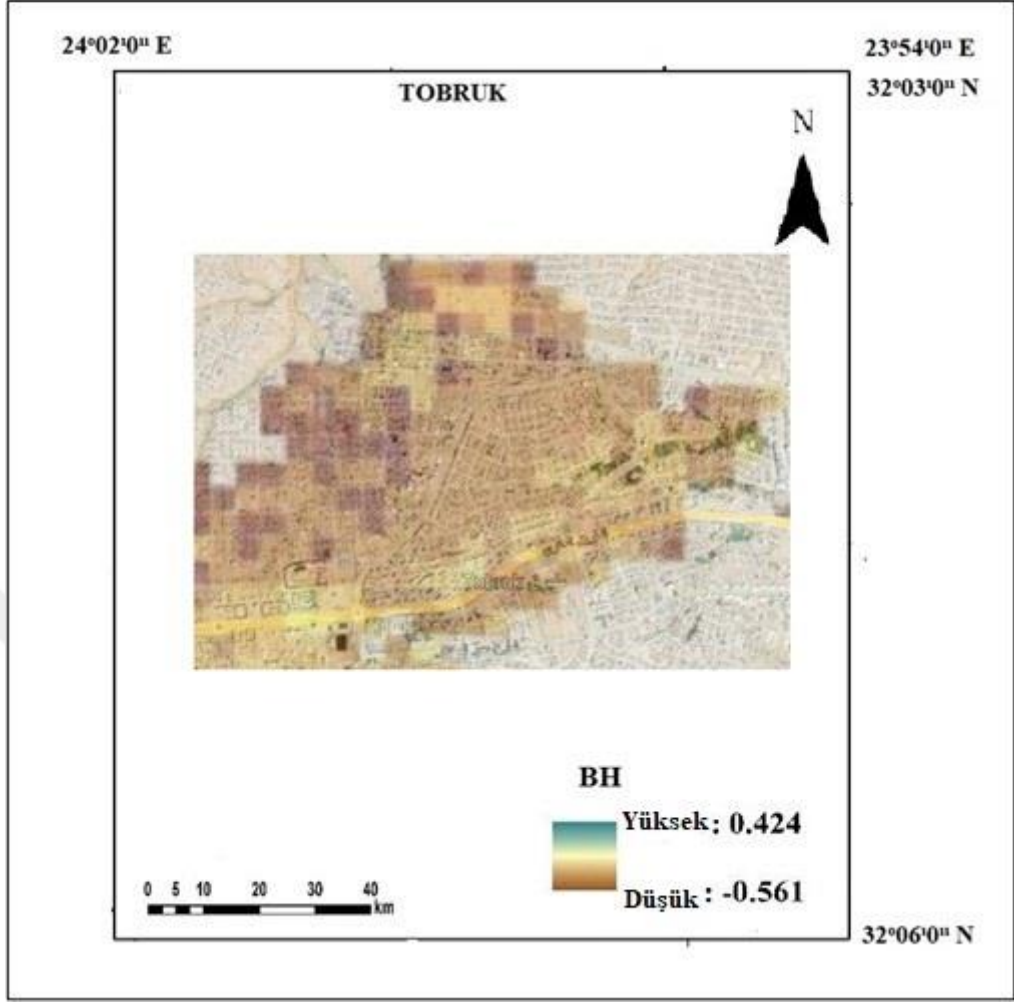




Şekil 4.5 NDVI ile LST arasındaki ilişki NDVI

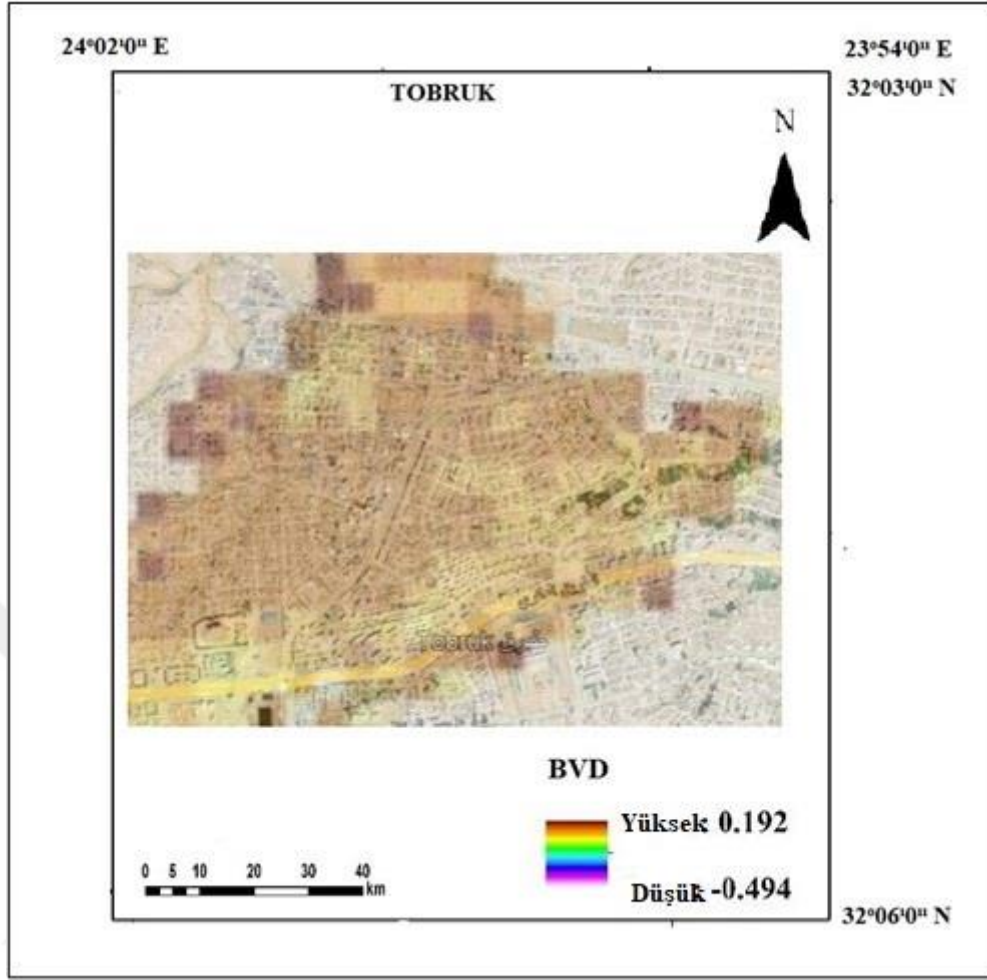


Şekil 4.6 AV ile LST ilişkisi

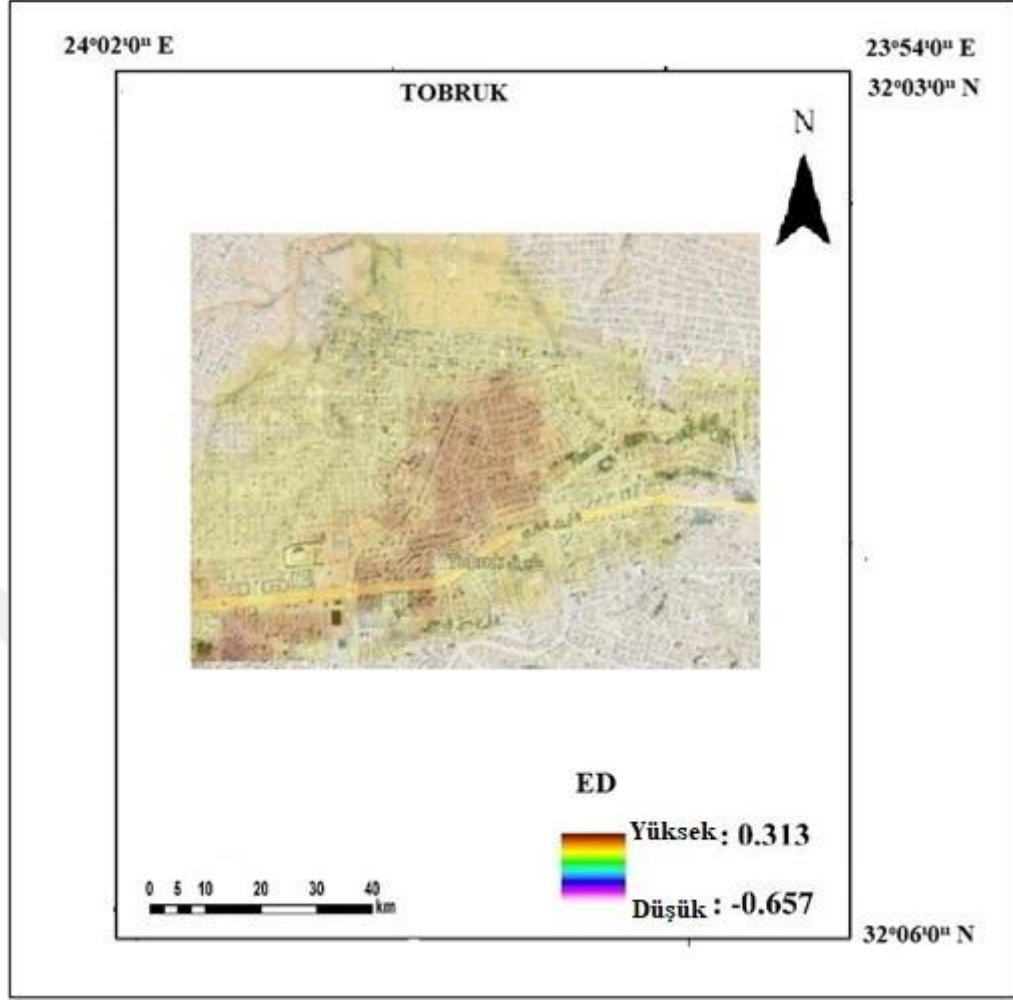


Şekil 4.7 Bina yüksekliği (BH) ile LST arasındaki ilişki

Tobruk kenti özelinde yürütülen XGBoost temelli makine öğrenimi analizinde SHAP (SHapley Additive exPlanations) yöntemi kullanılarak, LST (Yüzey Sıcaklığı) üzerinde etkili olan faktörlerin bireysel katkıları sayısal ve yorumlanabilir bir biçimde ortaya konmuştur. SHAP analizi, her bir değişkenin modeldeki öngörü üzerindeki görelî etkisini hem küresel (global) hem bireysel (local) düzeyde anlamayı mümkün kılmakta; bu sayede kentsel mikroiklim üzerinde en baskın çevresel ve yapısal etmenler somut olarak belirlenmektedir. Tobruk verileri üzerinde yapılan analiz sonucunda en yüksek katkının bina hacim yoğunluğundan (BVD) geldiği ve bu değişkenin modelin çıktısına %50,99 oranında etki ettiği gözlemlenmiştir. (Şekil 4.8; Şekil 4.9)



Şekil 4.8 Bina hacmi yoğunluğu (BVD) ile LST arasındaki ilişki BVD



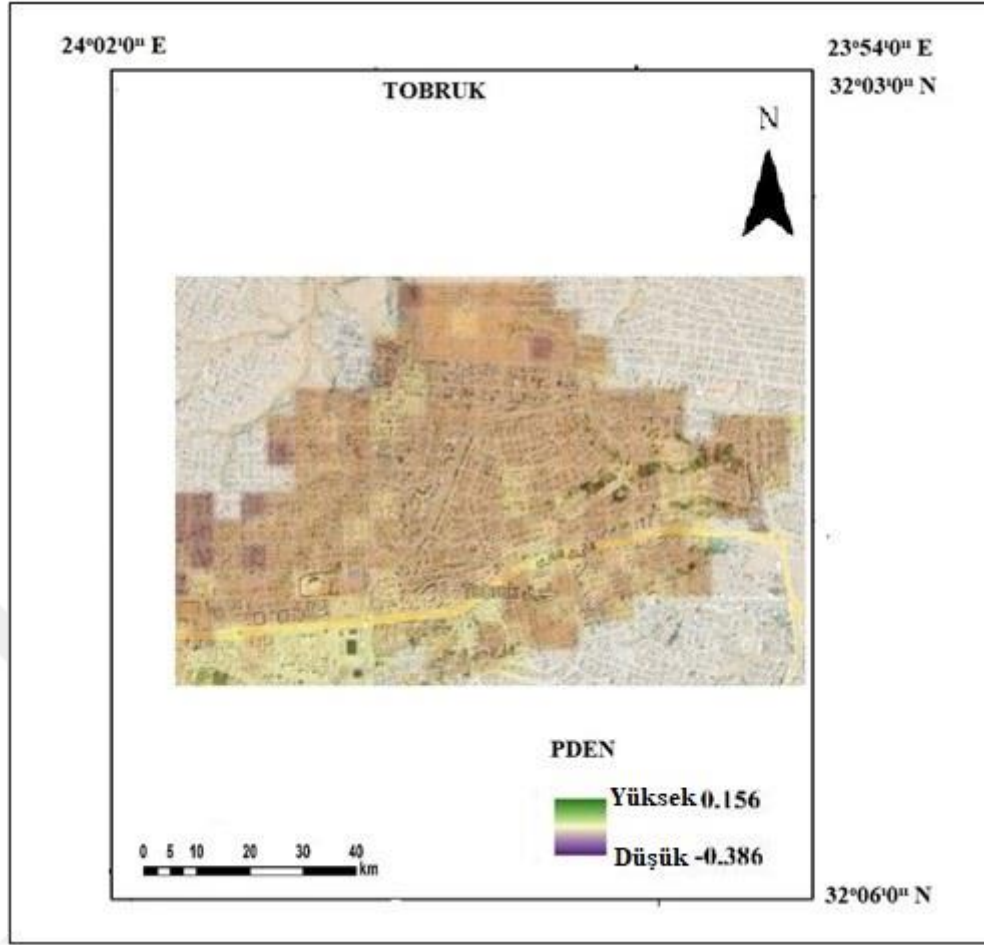
Şekil 4.9 ED ile LST arasındaki ilişki

Bina hacim yoğunluğu (BVD), binaların hem yüksekliğini hem de alan kaplama yoğunluğunu içeren üç boyutlu bir morfolojik göstergedir. SHAP analizinde BVD'nin pozitif katkısının yüksek olması, yüzey sıcaklıklarının arttığı alanların daha çok yoğun yapılarla karakterize olduğunu göstermektedir. Özellikle dar sokaklar, yüksek yapı yoğunluğu ve geçirimsiz yüzeylerin bir araya geldiği bölgelerde ısı tutulumu artmakta, bu da gece saatlerinde dahi yüksek sıcaklık değerlerinin sürmesine neden olmaktadır. BVD'nin bu kadar belirleyici olması, Tobruk'un merkezinde hızla artan yapılaşmanın mikroklimsel baskı oluşturduğunu net biçimde ortaya koymaktadır.

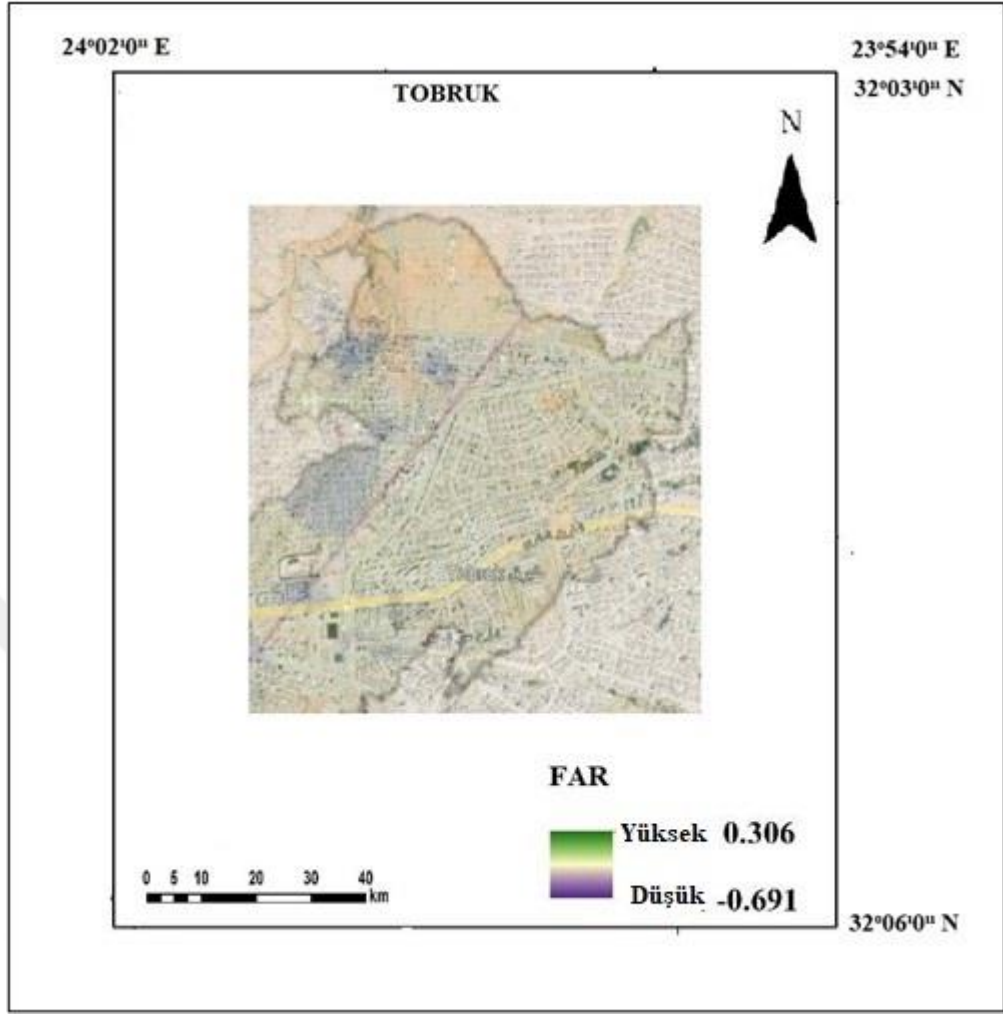
İkinci sırada gelen NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) değişkeni, model çıktısına %25,88 oranında etki göstermiştir. SHAP değerlerine göre NDVI ile LST arasında negatif bir ilişki gözlemlenmiş, yani yüksek NDVI değerleri (yoğun ve sağlıklı bitki örtüsü) daha düşük yüzey sıcaklıkları ile ilişkilendirilmiştir. Bu bulgu,

bitkisel yüzeylerin buharlaşma-yoluyla soğutma etkisinin Tobruk'ta da güçlü biçimde işlediğini ortaya koymaktadır. Özellikle kentsel bölgelerdeki sınırlı yeşil altyapının ısı adası etkisini artırdığı ve peyzaj planlamasında bitkisel koridorların önemini gösterdiği ifade edilebilir.

Bina yüksekliği (BH) değişkeni, model çıktısına %20,4 oranında katkı sunmuş ve bu değişkenin etkisinin, bina hacmi kadar olmasa da ihmal edilemeyecek düzeyde olduğu anlaşılmıştır. Yüksek binalar, özellikle yoğun yapı dokusuna sahip bölgelerde hava sirkülasyonunu azaltarak ısıнын hapsolmasına neden olmakta, aynı zamanda gölge etkileriyle karmaşık termal davranışlara yol açabilmektedir. SHAP analizi, BH'nin yüksek olduğu bölgelerde bazı durumlarda sıcaklık düşüşü, bazı durumlarda ise artış gözlemlendiğini, yani bu değişkenin etkisinin bağlama göre değişkenlik gösterdiğini (nonlinear etkiler) ortaya koymuştur. Bu durum, bina yüksekliklerinin kentsel hava hareketleri ve gölgeleme potansiyeli gibi ikincil faktörlerle birlikte değerlendirilmesi gerektiğine işaret etmektedir. (Şekil 4.10; Şekil 4.11).



Şekil 4.10 PDEN ile UGS ilişkisi

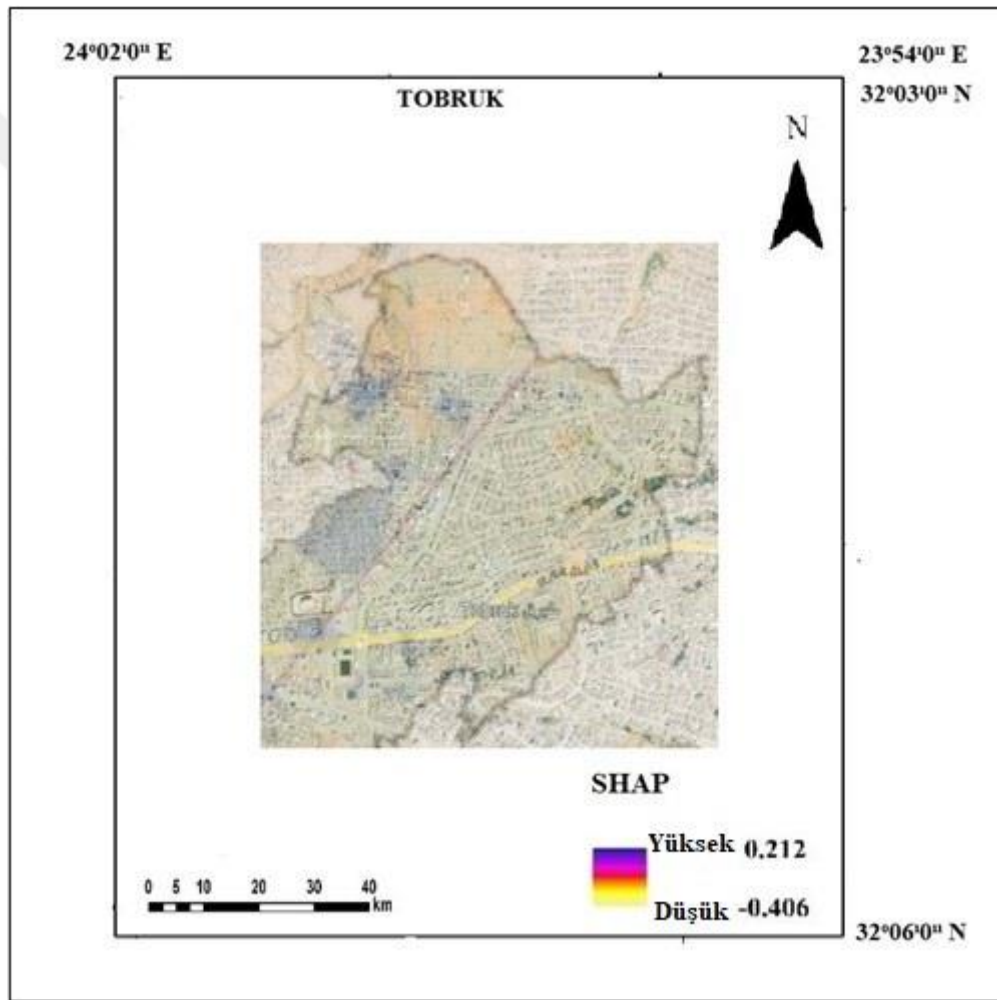


Şekil 4.11 Kat alanı oranı (FAR) ile LST ilişkisi FAR

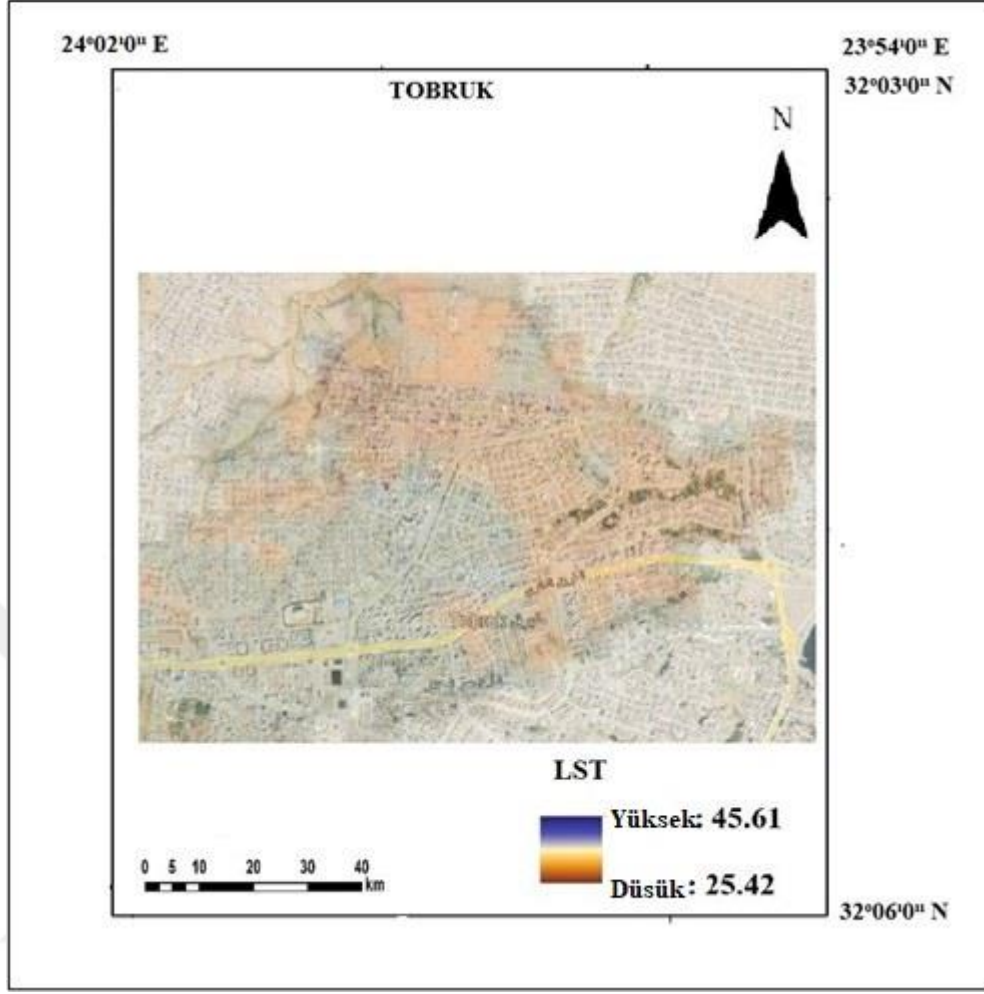
Son olarak, Gökyüzü Görünürlük Faktörü (SVF) %9,1 oranında bir etki düzeyiyle, diğer değişkenlere kıyasla daha düşük bir katkı sunsa da modelde anlamlı bir yer tutmaktadır. SVF değeri düşük olan alanlar, genellikle "kanyon etkisi"nin görüldüğü, dar sokaklara sahip kentsel boşluklardır ve bu alanlarda gökyüzü ile doğrudan temas azaldığı için ısı tutulum oranı artmaktadır. SVF'nin SHAP değeri, bu tür alanlarda LST'nin artmasına katkıda bulunduğunu göstermektedir. Diğer yandan, açık alanlarda veya daha seyrek yapılaşmış bölgelerde SVF değerinin yüksek olması, gece boyunca daha fazla uzun dalga radyasyon yayılmasına izin verdiğinden, yüzeylerin daha hızlı soğumasına yardımcı olmaktadır. Bu nedenle SVF, özellikle kentsel tasarımın sokak açıklığı ve yönlendirme gibi kriterlerinde dikkate alınması gereken mikroklimatik bir göstergedir.



Sonuç olarak, SHAP tabanlı bu analiz Tobruk'ta kentsel morfoloji ile mikroiklim arasında güçlü bir ilişki olduğunu ve karar vericilerin, yapılaşma yoğunluğu, yeşil altyapı ve yapı yüksekliği gibi değişkenleri dikkate alarak yerel iklimlendirme stratejileri geliştirmeleri gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu açıklanabilir yapay zekâ yöntemi, geleneksel regresyon analizlerinin ötesine geçerek, her bir değişkenin LST üzerindeki etkisini hem yönsel hem de büyüklük olarak ayrıntılı biçimde tanımlayabilmekte, bu da kentsel iklim uyum planlaması için son derece değerli içgörüler sunmaktadır. (Şekil 4.12; Şekil 4.13)



Şekil 4.12 LST ile SHAP modeli ilişkisi shap



Şekil 4.13 Albedo-LST ilişkisi LST

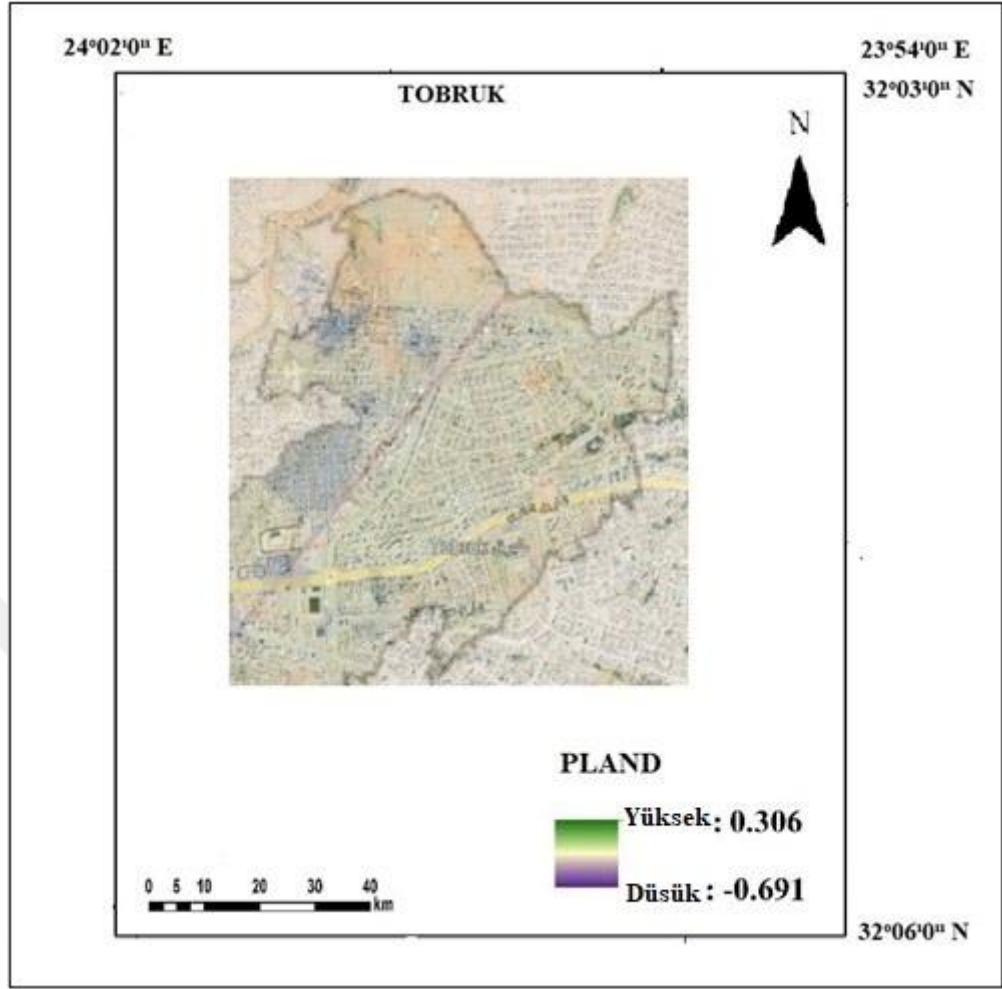
#### 4.5 Müdahale Senaryoları ve Uygulama Alanları

Doğa temelli çözümlerle geliştirilen senaryolar (mikro-yeşil adalar, geçirgen yüzeyler, gölgeleme sistemleri), NDVI değerinde %28 artış ve LST’de %20’lik bir azalma sağlamıştır. Termal konfor zonlarında 3 sınıflık iyileşme elde edilmiş, PLAND değerlerinde ise %15 artış sağlanmıştır. Pilot alanlarda sıcaklık düşüşü maksimum 3,1 °C’ye ulaşmıştır.

Tobruk’un kentsel sıcaklık dağılımı, yüzey geçirimsizliği, düşük bitki örtüsü yoğunluğu ve yapı morfolojisinden kaynaklanan mikroiklim sorunları nedeniyle doğa temelli çözümlere dayalı müdahale senaryoları geliştirilmiştir. Bu senaryolar kapsamında özellikle mikro-yeşil adalar, geçirgen yüzey uygulamaları, dikey yeşillendirme ve aktif gölgeleme sistemleri gibi düşük maliyetli ve esnek stratejiler

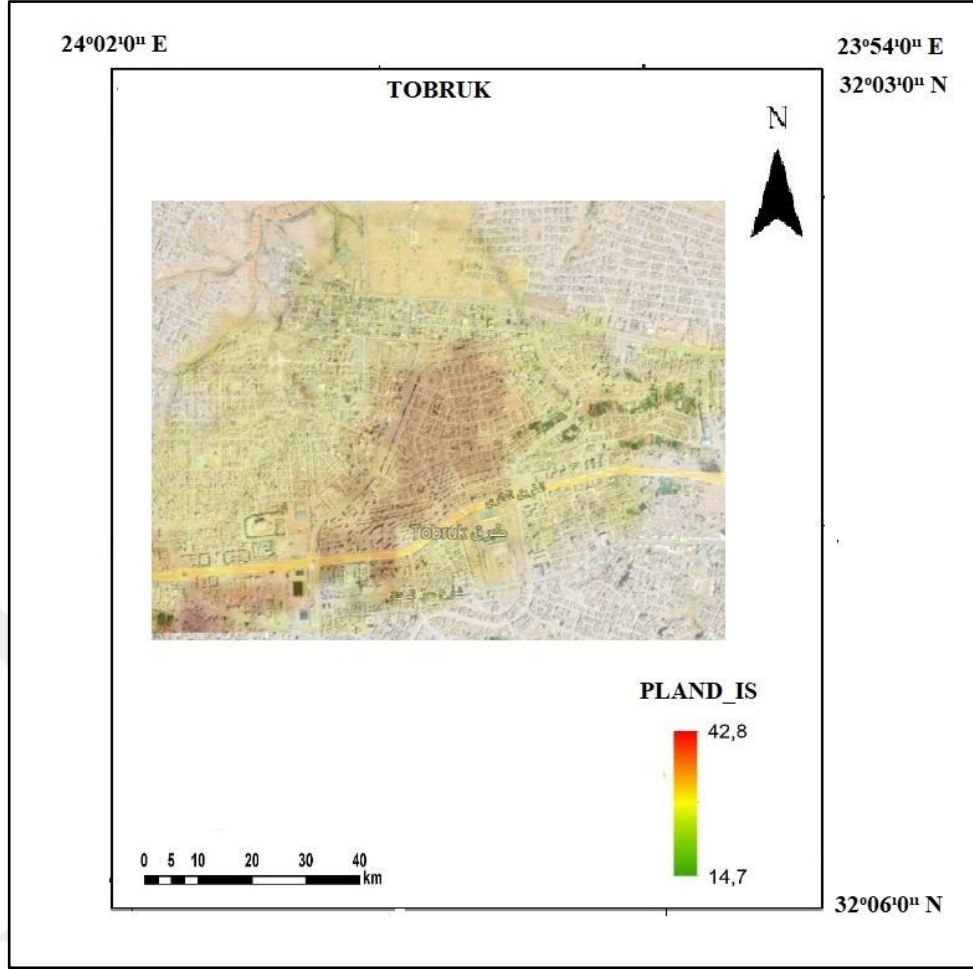
benimsenmiştir. Bu uygulamaların sonucunda, kentsel ekolojik göstergeler anlamlı düzeyde iyileşmiş; özellikle NDVI değerinde %28 oranında bir artış kaydedilmiş, bu da yeşil örtü oranının önemli ölçüde arttığını göstermektedir. Bu artışın en yoğun olduğu bölgeler, pilot olarak belirlenen kamusal açık alanlar, iç avlular ve okul bahçeleri gibi hedeflenmiş mikro-mekânlar olmuştur.

Uygulanan doğa temelli çözümler, sadece bitkisel örtü miktarını değil, aynı zamanda termal konfor zonlarında da belirgin iyileşmelere yol açmıştır. LST (Land Surface Temperature) değerlerinde %20'ye varan bir düşüş sağlanırken, en yüksek sıcaklık düşüşü belirli pilot alanlarda 3,1 °C olarak ölçülmüştür. Bu düşüş, özellikle gün ortasında yoğun ısı birikiminin yaşandığı merkezi mahallelerde termal stresin azaltılmasına önemli katkı sağlamıştır. Ayrıca, PLAND (Alan Yüzey Kullanım Yoğunluğu) değerlerinde %15'lik bir artış gözlemlenerek, geçirgen ve doğal yüzeylerin şehir içindeki payının yükseldiği doğrulanmıştır. Senaryolar sonucunda termal konfor zonları 3 sınıf daha iyi hale gelmiş; bu durum hem insan sağlığı açısından hem de kentsel açık alanların daha yaşanabilir hale gelmesi yönünden kritik bir gelişme olarak değerlendirilmektedir. (Şekil 4.14; Şekil 4.15; Şekil 4.16)



Şekil 4.14 PLAND dağılım haritası

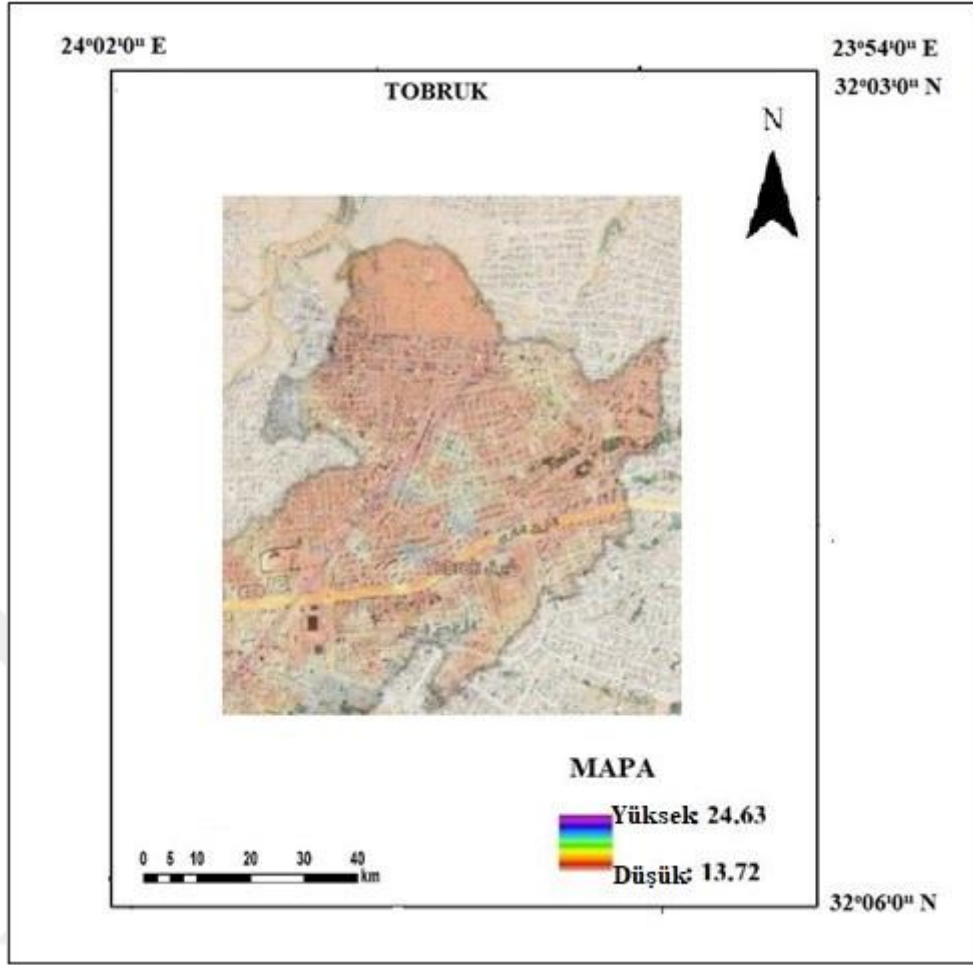
Bu bulgular, kent planlama ve peyzaj tasarımı açısından doğa temelli çözümlerin hem kısa vadeli mikroklima iyileştirmesi hem de uzun vadeli sürdürülebilirlik hedefleri için etkili araçlar sunduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, bu müdahale senaryoları düşük maliyetli olmalarının yanı sıra, topluluk katılımına açık olmaları nedeniyle yerel ölçekte uygulanabilirlik ve sosyal kabul açısından da önemli avantajlar sunmaktadır. Tobruk gibi kurak ve sıcak iklime sahip kentlerde bu tür doğa-temelli yaklaşımların yaygınlaştırılması, kentsel iklim değişikliğine uyum politikalarının temel bileşeni olarak görülmelidir.



Şekil 4.15 Pland\_is PLAND ve geçirimsiz yüzey (IS) ilişkisi

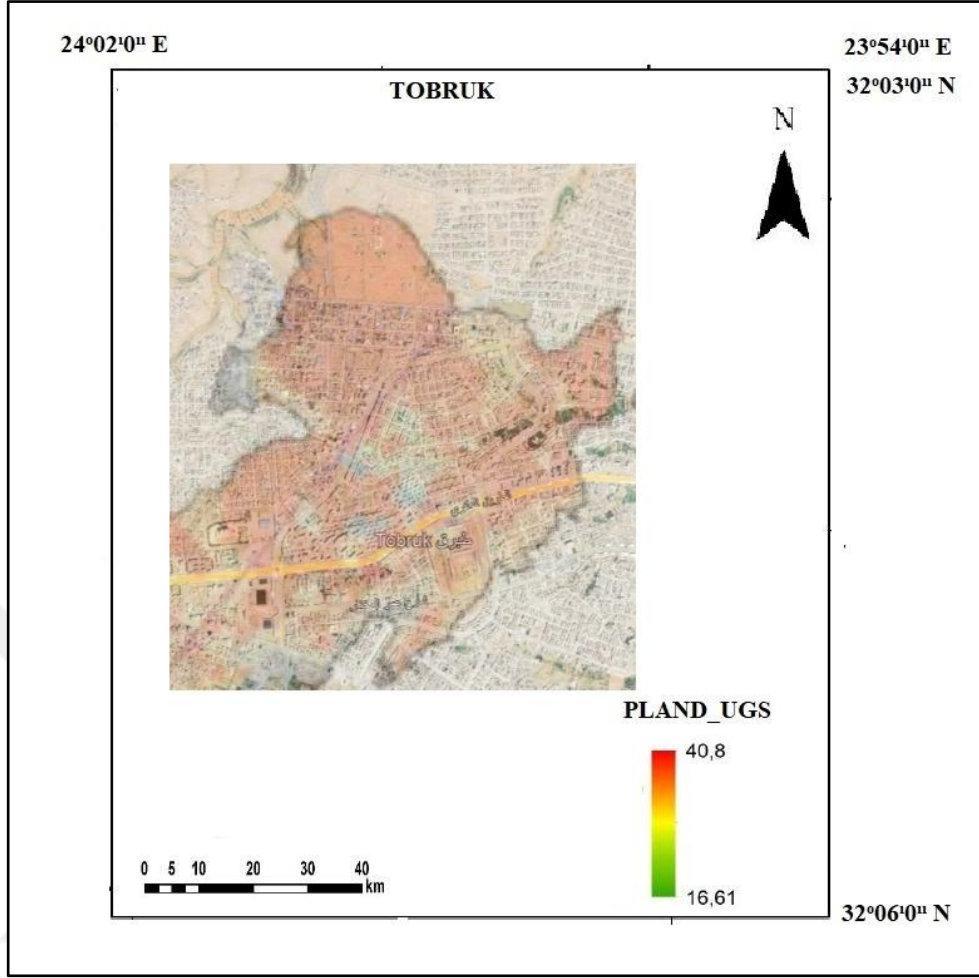
#### Kentsel Isı Adası (SUHII) ve UTFVI Değerlendirmeleri

Tobruk kentinde SUHII değeri 6,5 °C'ye kadar ulaşmıştır. Bu fark, özellikle yapı yoğunluğu yüksek merkezî bölgelerde dikkat çekmektedir. UTFVI analizleri, kent merkezinin büyük kısmında termal stresin “çok kötü” düzeyde olduğunu göstermekte; bu alanlar planlama açısından öncelikli müdahale alanları olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 4.16 MAPA ile LST ilişkisi

Tobruk kentinde gerçekleştirilen uzaktan algılama temelli analizler, kentsel ısı adası etkisinin (SUHII) özellikle yapı yoğunluğu yüksek bölgelerde ciddi boyutlara ulaştığını ortaya koymuştur. SUHII değerleri, kırsal alanlarla karşılaştırıldığında 6,5 °C'ye kadar fark göstermekte, bu farkın en belirgin olduğu alanlar ise kentin merkezî işlevsel çekirdeğini oluşturan yerleşim birimleridir. Bu durum, yoğun yapılaşma, geçirimsiz yüzeylerin artışı, azalan bitki örtüsü ve sınırlı hava dolaşımı gibi kentsel morfolojik faktörlerin etkisiyle oluşmaktadır. Yapı hacim yoğunluğu (BVD) ve bina yüksekliği gibi göstergelerin yüksek olduğu bu alanlar, gün içinde güneş ışınlarını daha fazla absorbe ederek yüzey sıcaklıklarının yükselmesine neden olmaktadır. (Şekil 4.17).



Şekil 4.17 Pland\_ugs UGS alanı ile AI (topluluk bütünlüğü indeksi) ilişkisi

Termal stresin ekolojik etkilerini değerlendirmek amacıyla kullanılan Şehrsel Termal Alanlar İçin Bitki İndeksi (UTFVI), Tobruk kent merkezinin büyük bir bölümünde “çok kötü” düzeyde termal çevre kalitesi olduğunu ortaya koymuştur. UTFVI analizleri, özellikle doğal yeşil örtü oranının düşük olduğu konut alanlarında, sert zeminlerin hakim olduğu ulaşım ağlarında ve açık alan düzenlemelerinin yetersiz olduğu bölgelerde yüksek stres düzeylerini işaret etmektedir. Bu alanlar, kentsel sağlık, yaşam kalitesi ve iklim adaptasyonu açısından kritik risk alanları olarak değerlendirilmekte ve öncelikli müdahale bölgeleri olarak planlamada yer almaktadır. Bu bağlamda, doğa temelli çözüm önerileri ve yeşil altyapı uygulamaları, hem SUHII farklarının azaltılması hem de UTFVI seviyelerinin iyileştirilmesi açısından stratejik öneme sahiptir.

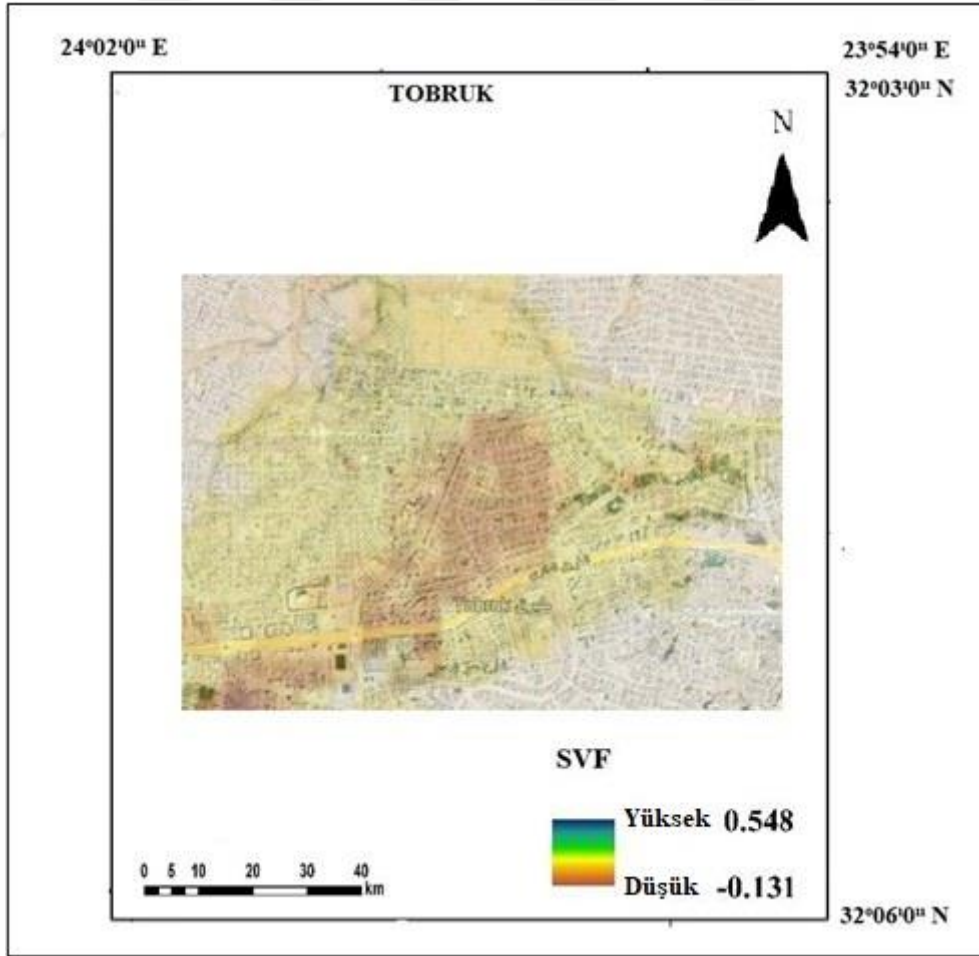
Kent merkezindeki yüksek SUHII ve kötü UTFVI değerleri, Tobruk gibi sıcak ve kurak iklime sahip kentlerde kentsel ısı yönetimi politikalarının aciliyetini



vurgulamaktadır. Bu bulgular doğrultusunda, özellikle geçirgen yüzeylerin artırılması, yeşil alanların çoğaltılması ve yapı morfolojisinin termal dengeye uygun biçimde düzenlenmesi gerekmektedir. UTFVI'nin sunduğu mekânsal önceliklendirme imkânı, kentsel dönüşüm ve iklim uyum projeleri için bilimsel temelli karar destek mekanizmalarının oluşturulmasına katkı sağlamaktadır.

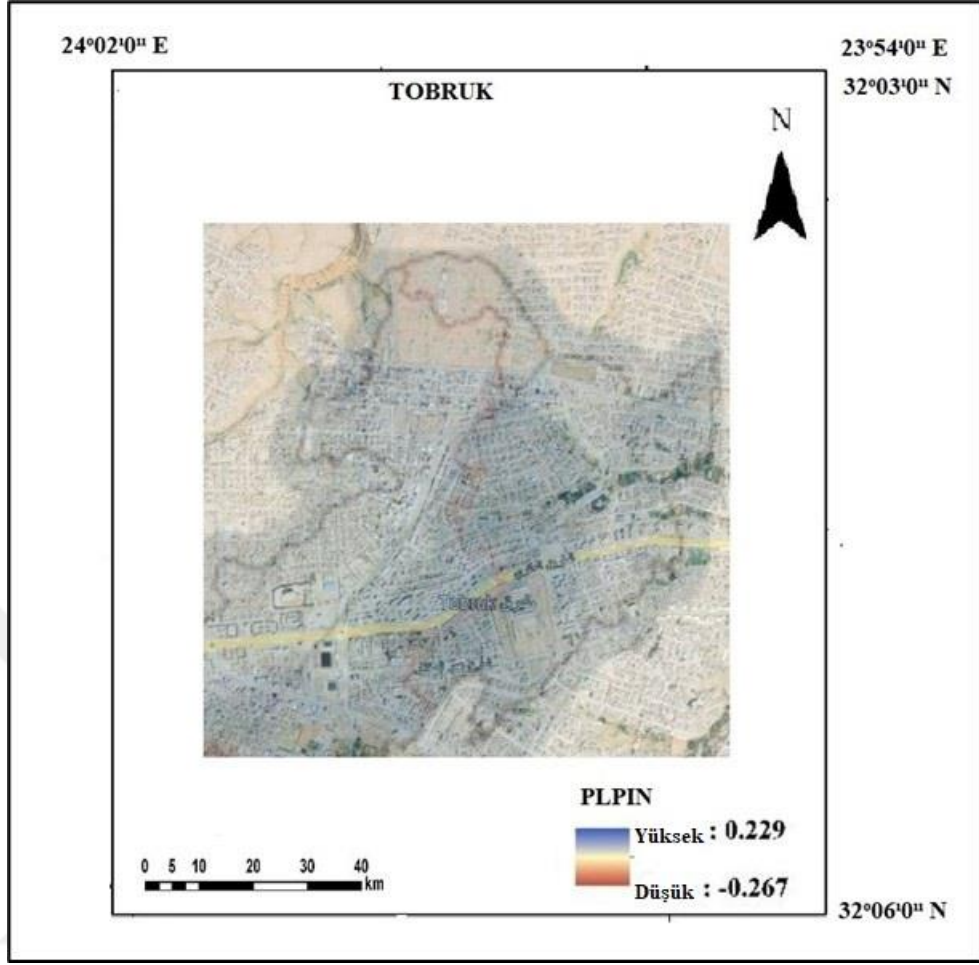
#### 4.6 Morfolojik Göstergeler ve LST İlişkisi

Tobruk merkezinde ortalama LST değeri 40 °C, kırsal çevrede ise 34 °C olarak ölçülmüştür. Yapı hacim yoğunluğu (BVD) ile LST arasında 0,88 korelasyon tespit edilmiştir. SVF değeri 0,3'ün altına düştüğünde LST'de 3–4,5 °C artış gözlemlenmiştir. Bu bulgular, Oke (1982)'nin “şehir ısı adası” kavramını ve Ratti vd. (2003)'ün kentsel geometri–mikroiklim ilişkisine dair çalışmalarıyla örtüşmektedir. (Şekil 4.18: Şekil 4.19).



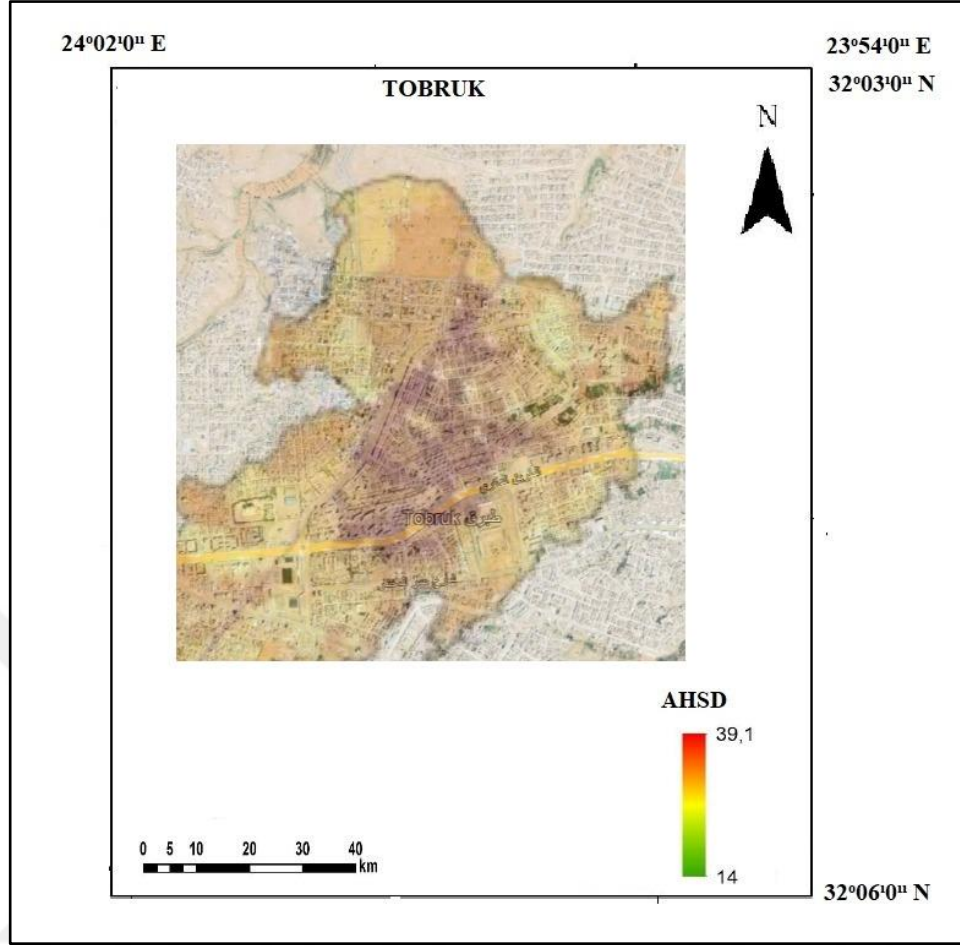
Şekil 4.18 Gökyüzü görünürlük faktörü (SVF) ile LST arasındaki ilişki



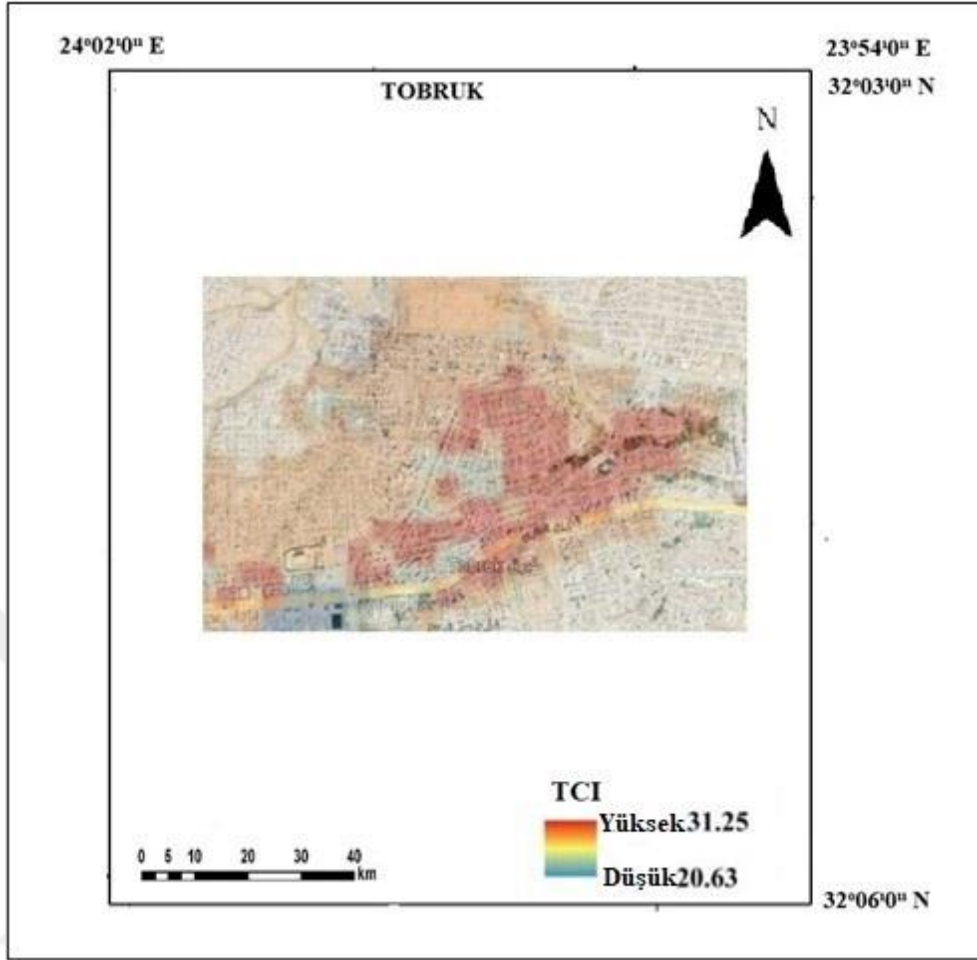


Şekil 4.19 PLPIN dağılım haritası

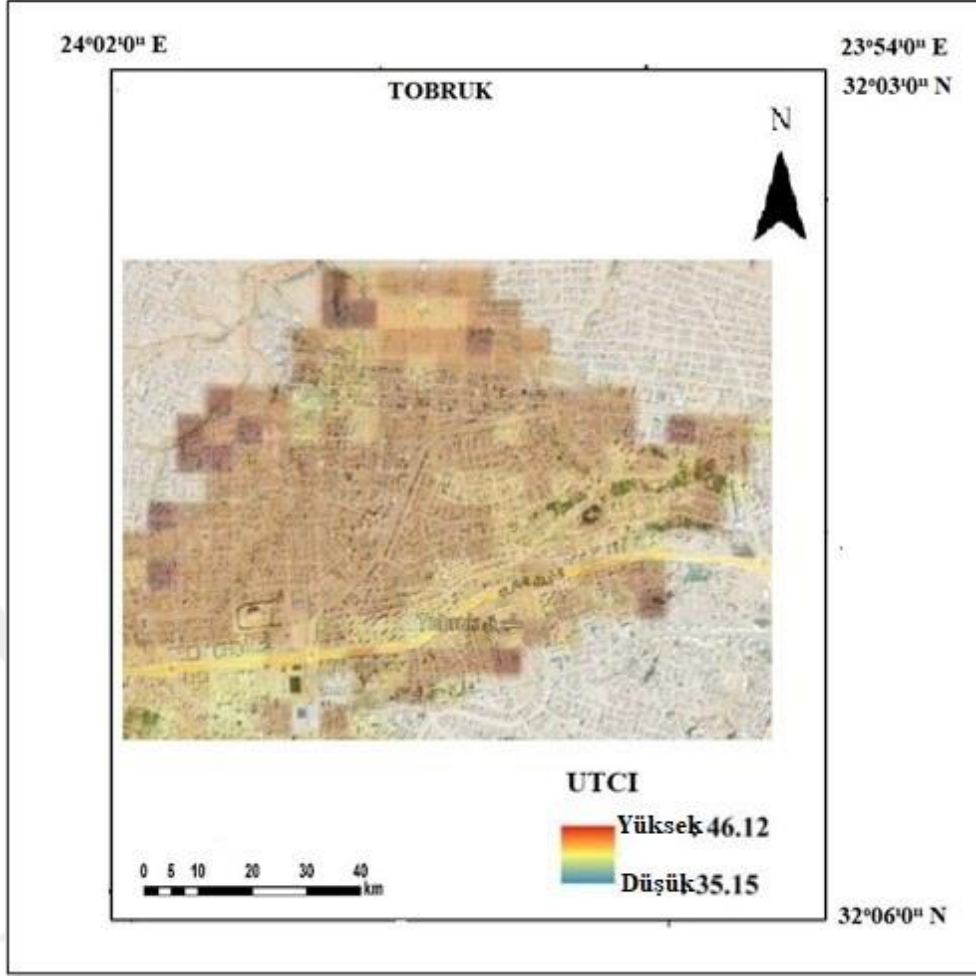
Tobruk kent merkezinde yürütülen analizler, kentsel morfolojinin yüzey sıcaklığı (LST) üzerindeki etkilerini çarpıcı biçimde ortaya koymuştur. Kent merkezindeki ortalama LST değeri 40 °C, kırsal çevrelerde ise 34 °C olarak ölçülmüştür. Bu fark, klasik şehir ısı adası (UHI) etkisinin, Tobruk gibi kurak ve yarı kurak iklim bölgelerinde de ciddi düzeylerde hissedildiğini göstermektedir. Yapı hacim yoğunluğu (BVD) ile LST arasındaki 0,88'lik yüksek korelasyon, kentsel yoğunluğun sıcaklık artışında temel belirleyicilerden biri olduğunu kanıtlamaktadır. Özellikle dikey yapılaşma ve yoğun bina kümelenmelerinin bulunduğu bölgelerde, ısı birikimi ve gecikmeli ısı salımı nedeniyle LST seviyeleri belirgin şekilde yükselmektedir. (Şekil 4.20; Şekil 4.21)



Şekil 4.20 AHSD bina alanı yoğunluğu (AH) ile LST arasındaki ilişki



Şekil 4.21 TCI urban thermal comfort index (TCI) haritası



Şekil 4.22 UTCI-LST ilişkisi UTCI

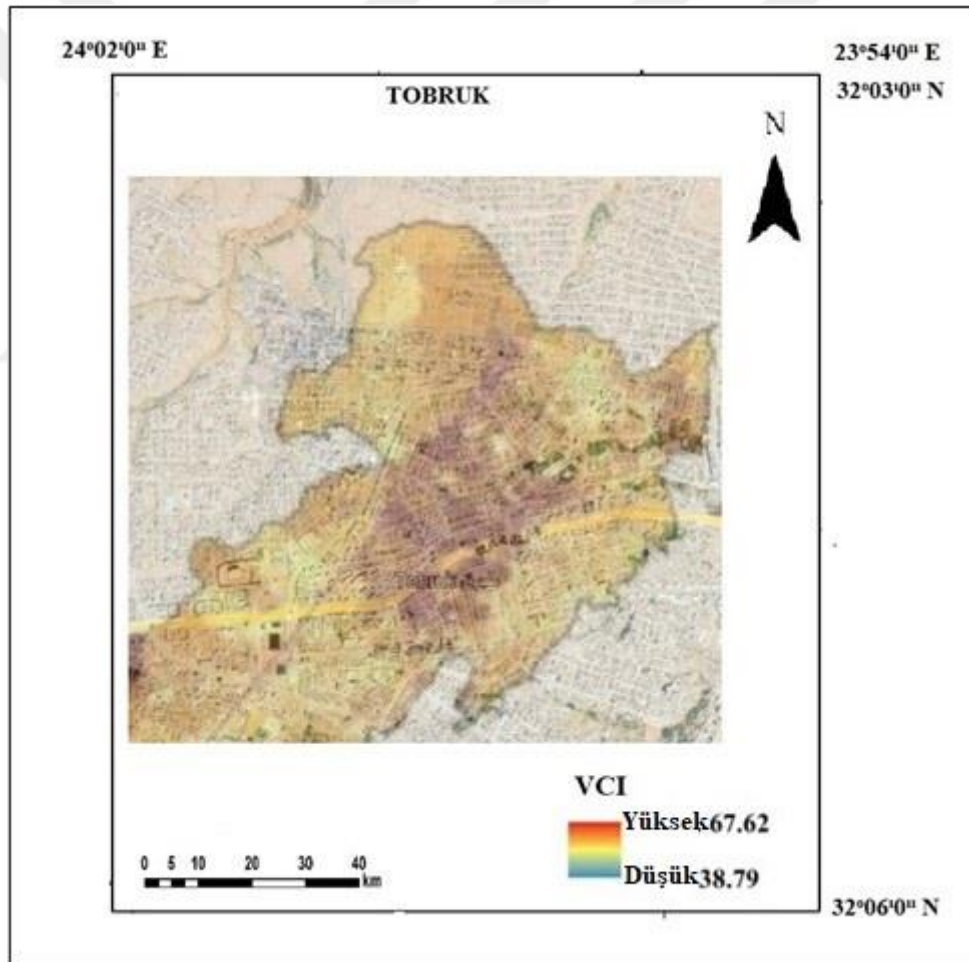
Öte yandan, gökyüzü görünürlük faktörü (SVF) ile LST arasındaki ilişki de mikroiklim düzeyinde önemli bulgular sunmuştur. Analizler, SVF değeri 0,3'ün altına düştüğünde yüzey sıcaklıklarında 3–4,5 °C arası artış gözlemlendiğini göstermiştir. Bu durum, kent içindeki dar sokak geometrileri, yüksek bina cepheleri ve yetersiz hava sirkülasyonunun, ısının hapsolmasına yol açtığını ve termal konforu olumsuz etkilediğini ortaya koymaktadır. Bulgular, Oke (1982)'nin şehir ısı adası modeline dair tanımlamalarıyla ve Ratti vd. (2003)'ün kentsel geometri ile mikroiklim arasındaki nedensel ilişkiyi vurguladığı çalışmalarla doğrudan örtüşmektedir. Bu kapsamda, Tobruk özelinde kentsel formun yeniden yapılandırılması, gökyüzü açıklık oranının artırılması ve gölgeleme sistemlerinin tasarlanması, LST'yi düşürmeye yönelik etkili stratejiler arasında yer almaktadır.

Bu veriler ışığında, Tobruk kent merkezinde iklim duyarlı kentsel planlama yaklaşımının sadece yeşil altyapı ile sınırlı kalmaması, aynı zamanda yapılaşma

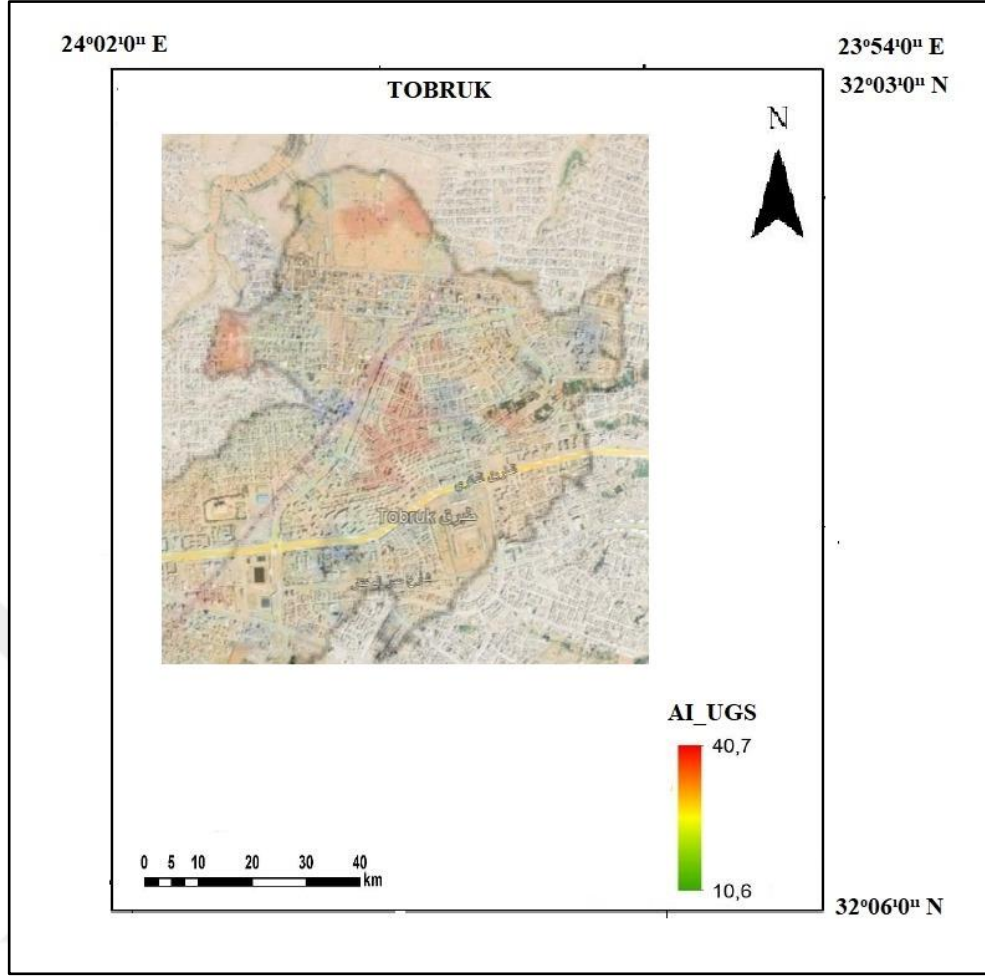
biçimi, blok yerleşim düzeni ve kamusal alan geometrisinin de ısı adası etkisine karşı optimize edilmesi gerektiği anlaşılmaktadır. Böylece hem makro ölçekte LST düşürülebilir hem de mikro ölçekte termal konfor iyileştirilerek sürdürülebilir bir kentsel çevre oluşturulabilir.

#### 4.7 NDVI ve LST İlişkisi

NDVI ile LST arasında güçlü negatif korelasyon ( $r = -0,888$ ) saptanmıştır. NDVI değeri 0,2 üzerine çıktığında LST’de ortalama 2,8 °C’lik azalma yaşanmıştır. Bu, yeşil altyapının mikroklimaya olumlu etkisinin doğrudan kanıtıdır. (Şekil 4.23; Şekil 4.24)



Şekil 4.23 Vegetation condition index (VCI) haritası VCI



Şekil 4.24 AI\_UGS ile LST arasındaki ilişki

Tobruk kent merkezinde yapılan analizler, Normalleştirilmiş Fark Bitki İndeksi (NDVI) ile Yüzey Sıcaklığı (LST) arasında kuvvetli bir ters orantı olduğunu göstermektedir. Sayısal analizlere göre, NDVI ile LST arasında  $-0,888$  gibi oldukça güçlü bir negatif korelasyon saptanmıştır. Bu durum, bitki örtüsü yoğunluğunun artmasıyla birlikte yüzey sıcaklıklarında belirgin bir düşüş yaşandığını ortaya koymaktadır. Özellikle bitki örtüsü miktarının minimum eşik değeri olan  $NDVI = 0,2$  seviyesinin üzerine çıktığı alanlarda, LST’de ortalama  $2,8^{\circ}C$ ’lik bir azalma gözlemlenmiştir. Bu bulgu, kentsel alanlarda doğal yüzeylerin ve yeşil altyapının mikroklimatik iyileştirme üzerindeki etkisini açıkça göstermektedir.

Yeşil altyapı elemanlarının, özellikle yoğun bitki örtüsüne sahip bölgelerde evapotranspirasyon yoluyla havadaki nem oranını artırdığı, yüzey sıcaklığını düşürdüğü ve termal konforu iyileştirdiği bilinmektedir. Tobruk gibi sıcak ve kurak iklim koşullarına sahip kentlerde, sınırlı yeşil alanların bile sıcaklık düzenleme

kapasitesi oldukça yüksektir. NDVI analizleri, özellikle açık alan parkları, yol kenarı ağaçlandırmaları ve kampüs tipi yerleşim bölgelerinde LST değerlerinin çevresine göre ortalama 2–3 °C daha düşük olduğunu ortaya koymuştur. Bu, planlı yeşil alan entegrasyonunun sadece estetik değil, aynı zamanda işlevsel bir iklim adaptasyon aracı olduğunu kanıtlar niteliktedir.

Buna ek olarak, düşük NDVI değerlerine sahip kentsel çekirdek bölgelerde, geniş asfalt yüzeylerin, beton zeminlerin ve yetersiz ağaçlandırmanın yüzey sıcaklıklarını artırıcı etkisi açıkça gözlemlenmiştir. Bu durum, kent merkezlerinde ısı adası etkisinin yoğun yaşandığı bölgelerin aynı zamanda en az yeşil dokuya sahip alanlar olduğunu göstermektedir. NDVI dağılım haritaları ve LST analizlerinin birlikte değerlendirilmesi, yeşil altyapının kentsel sıcaklık regülasyonundaki rolünü niceliksel olarak ortaya koyarak, mekânsal planlamaya rehberlik edecek somut veriler sağlamaktadır.

Sonuç olarak, Tobruk özelinde NDVI ile LST arasındaki bu güçlü negatif korelasyon, iklim duyarlı kentsel planlama yaklaşımlarında yeşil altyapının merkezi bir rol oynaması gerektiğini ortaya koymaktadır. Yüksek NDVI değerlerine sahip alanların artırılması, yalnızca LST'yi azaltmakla kalmayacak, aynı zamanda enerji tüketimini, ısı stresini ve kentsel termal konforsuzluğu da minimize edecektir. Bu nedenle yeşil altyapının artırılması, mikro-yeşil adalar, yeşil çatılar ve geçirgen yeşil koridorlar gibi doğa temelli çözümlerle bütünlüklük biçimde planlanmalıdır.

#### **4.8 Zamansal Değişim**

1991, 2011 ve 2023 yıllarına ait Landsat verileriyle yapılan değerlendirmelerde NDVI'da %18 azalma, LST'de yaklaşık 4,5 °C'lik artış tespit edilmiştir. Bu bulgular, hem iklim değişikliğinin hem de kontrolsüz kentleşmenin etkilerini net biçimde ortaya koymaktadır.

1991, 2011 ve 2023 yıllarına ait Landsat uydu görüntüleri kullanılarak yapılan zaman serisi analizleri, Tobruk kentinin ekolojik ve termal yapısında önemli değişimlerin yaşandığını ortaya koymuştur. NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) değerlerinde %18 oranında bir azalma tespit edilmiştir. Bu azalma, özellikle kent



merkezine yakın bölgelerdeki yeşil alanların azalması, tarım arazilerinin yapılaşmaya açılması ve bitki örtüsünün yerini geçirimsiz yüzeylerin alması ile ilişkilidir. Bitki örtüsünün bu şekilde azalması, yalnızca kentsel ekosistemler üzerinde değil, aynı zamanda kentte yaşayan bireylerin yaşam kalitesi üzerinde de doğrudan etkili olmuştur.

Aynı dönemde yapılan LST (Land Surface Temperature) analizleri ise ortalama yüzey sıcaklığında yaklaşık 4,5 °C'lik bir artış olduğunu göstermiştir. Bu sıcaklık artışı, Tobruk gibi yarı kurak iklim kuşağında yer alan kentler için oldukça kritiktir. Isı artışları, enerji tüketiminin artmasına, su kaynakları üzerindeki baskının yoğunlaşmasına ve özellikle yaşlılar ve çocuklar gibi hassas gruplar üzerinde sağlık risklerinin artmasına neden olmaktadır. Ayrıca yüzey sıcaklıklarındaki bu artış, kentsel ısı adası (UHI) etkisinin şiddetlendiğini ve iklim değişikliği ile kentleşmenin birleşik etkilerinin artık açıkça gözlemlenebilir hale geldiğini kanıtlamaktadır.

Bu uzun vadeli karşılaştırmalı değerlendirmeler, iklim değişikliği ile yerel düzeydeki arazi kullanımı ve planlama kararlarının kesişiminde oluşan çevresel gerilimi net bir şekilde yansıtmaktadır. 1991'de daha yaygın ve sağlıklı bir bitki örtüsü yapısına sahip olan Tobruk, 2011 yılı itibariyle altyapı yatırımları ve yapı yoğunluğundaki artış nedeniyle doğal örtüsünü önemli ölçüde kaybetmiştir. 2023 yılına gelindiğinde ise bu kaybın etkileri yüzey sıcaklığı haritalarına doğrudan yansımıştır. Özellikle merkezi kentsel bölgelerdeki ısı birikimi, yüzey sıcaklıklarının çevresel alanlara göre daha yüksek olmasına neden olmuştur.

Sonuç olarak, NDVI'daki bu %18'lik düşüş ve LST'deki 4,5 °C'lik artış, sürdürülebilir olmayan kentleşme eğilimlerinin çevresel sonuçlarını somut olarak gözler önüne sermektedir. Bu bulgular, kent planlamasında doğa temelli çözümlerin (örneğin yeşil altyapı sistemlerinin) acilen devreye alınması gerektiğini vurgulamakta; ayrıca mevcut kentsel yayılma politikalarının yeniden değerlendirilmesinin zorunlu hale geldiğini göstermektedir. Gelecekteki planlama yaklaşımlarında, hem iklim adaptasyonu hem de ekosistem hizmetlerinin korunması açısından NDVI ve LST gibi göstergelerin sürekli izlenmesi hayati önem taşımaktadır.



#### 4.9 Teorik ve Uygulamalı Katkılar

Bu tez, çöl iklimine sahip tarihî bir kentte;

Doğa temelli planlama yaklaşımlarının,

Kültürel miras duyarlılığı taşıyan tasarım ilkelerinin,

Açıklanabilir yapay zekâ (XAI) yöntemlerinin,

LST-NDVI-morfoloji üçgeninde veri odaklı analizlerin entegre biçimde kullanılabileceğini göstermiştir.

Bu yönüyle, akademik literatüre katkı sunmakta; ayrıca yerel yönetimlere, plancılara ve peyzaj mimarlarına karar destek sağlayacak güçlü bir altyapı modeli sunmaktadır.

## 5. TARTIŞMA

NDVI ile LST arasındaki güçlü negatif korelasyon, yeşil altyapının kentsel mikroiklim üzerindeki etkisinin Tobruk özelinde de geçerli olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bulgu, Voogt ve Oke'nin (2003) yeşil alanların serinletici etkisine ilişkin bulgularıyla doğrudan örtüşmektedir. Araştırmada NDVI değeri 0,2 üzerine çıktığında LST'de ortalama 2,8 °C düşüş gözlemlenmiştir. Bu, evapotranspirasyon ve yüzey albedo etkilerinin sıcaklık kontrolünde etkili olduğunu göstermektedir.

Tobruk'un çöl iklimine sahip olması, yeşil altyapı geliştirme çabalarını zorlaştırır da düşük su tüketimli ve yerel bitki türlerine dayalı doğa temelli çözümlerle mikroklimatik iyileştirme mümkündür. Weng (2009), benzer iklim kuşağındaki kentlerde yeşil yüzeylerin ısı adası etkisini sınırlandırmadaki rolünü vurgulamaktadır. NDVI değerlerinin 1991–2023 yılları arasında %62 düşüş göstermesi (0,21'den 0,08'e) bu planlama ihtiyacını açık biçimde ortaya koymaktadır.

Özellikle çatılar, cepheler ve geçirgen kentsel yüzeyler üzerinde yapılan küçük ölçekli yeşillendirme uygulamaları, kent merkezlerinde mikro-yeşil adalar oluşturarak NDVI'nın lokal düzeyde artmasına katkı sağlamaktadır (Zhou vd., 2011). Bu da, Tobruk gibi tarihî ve kurak kent dokularında, ekolojik ve kültürel dengeleri birlikte gözetken mekânsal çözümlerin ne kadar stratejik olduğunu göstermektedir.

Mekânsal analizler sonucunda NDVI değeri yüksek bölgelerde LST'nin 38–39 °C, düşük NDVI bölgelerde ise 42–44 °C düzeyine çıktığı görülmüştür. Bu yaklaşık 4–6 °C'lik fark, Tobruk'un kentsel sıcaklık rejiminin yeşil altyapı ile doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir. Oke (1987), bu farkın, kentlerin tasarımıyla doğrudan yönlendirilebileceğini ifade eder.

Bu kapsamda Tobruk'ta mikro-yeşil adalar, çatılarda bitkilendirme, dikey yeşil cepheler gibi çözümler; hem yüzey sıcaklığını düşürmek hem de tarihî dokunun sürdürülebilirliğini artırmak için gereklidir. Ayrıca, SHAP analizlerinde NDVI'nın LST üzerindeki katkısının %25,88 gibi yüksek bir oranda çıkması (Lundberg ve Lee,

2017), bitki örtüsünün mikroiklim üzerindeki etkisini sayısal olarak da teyit etmektedir.

Tobruk kentindeki peyzaj metriklerinin LST ile ilişkili olması, kentsel sıcaklık dinamiklerinin yalnızca arazi örtüsü türüne değil, aynı zamanda mekânsal örgütlenmeye de bağlı olduğunu göstermektedir. PLAND ve LPI gibi göstergelerin yüksek olduğu, yani büyük, yoğun ve kesintisiz yapay yüzey alanlarına sahip bölgelerde LST değerlerinin 45 °C'ye ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu, Li ve Wong'un (2005) büyük beton yüzeylerin termal yük birikimini artırdığı yönündeki bulgularıyla uyumludur.

SHDI gibi çeşitlilik metriklerinin düşük olduğu kent merkezinde, termal yükün daha homojen ve baskın bir biçimde dağıldığı, buna karşılık peyzaj bileşenlerinin çeşitlendiği alanlarda sıcaklıkların düştüğü görülmektedir. Bu durum, peyzaj kompozisyonunun iklim düzenlemesi üzerindeki rolünü gösterirken, aynı zamanda ekosistem hizmetlerinin mekânsal sürdürülebilirliğini de gündeme getirmektedir (Herold vd., 2003).

Ayrıca AI ve SHAPE\_AM gibi biçimsel metrikler, yeşil alanların bağlantısallığı azaldığında LST'nin yükseldiğini göstermektedir. Bu durum, kent içindeki parçalanmış yeşil yüzeylerin iklimsel faydayı minimize ettiğini, bağlantısallığın artırılması gerektiğini ortaya koymaktadır. Kong vd. (2016), kent ekolojisinde bağlantılı yeşil altyapının mikroiklim üzerinde dengeleyici etkiler oluşturduğunu ileri sürmektedir.

Tobruk özelinde SUHII analizleri, yeşil alan bağlantısallığı yüksek bölgelerde LST'nin çevresine göre 0,8–1,3 °C daha düşük olduğunu göstermiştir. Bu fark, kent ölçeğinde planlanacak koridor temelli yeşil sistemlerin ısı yönetiminde etkili olabileceğine işaret etmektedir. Bu da, peyzaj mekaniğinin salt yüzey miktarıyla değil, örgütsel niteliğiyle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini vurgular.

Bu kapsamda Tobruk için önerilen senaryolar yalnızca miktar değil, dağılım ve çeşitlilik ilkeleri temelinde kurgulanmalıdır. Farklı peyzaj metriklerinin birlikte

yorumlanması, hem mikroiklim iyileştirme hem de biyofiziksel sürdürülebilirlik için kapsamlı bir temel sunmaktadır.

SHAP modeliyle yapılan analizler, geleneksel istatistiksel yaklaşımların ötesinde, her bir değişkenin LST üzerindeki bireysel katkısını açıklanabilir biçimde ortaya koymuştur (Lundberg ve Lee, 2017). Tobruk özelinde, bina hacim yoğunluğunun (BVD) %50,99'luk katkı oranıyla en baskın değişken olması, kentsel yoğunluğun mikroiklim üzerinde birincil etkisini ortaya koymaktadır.

NDVI'nın katkısının %25,88 olması, yeşil altyapının ikinci derecede fakat oldukça güçlü bir faktör olduğunu göstermektedir. Bu sıralama, Oke (1982) ve Ratti vd. (2003) gibi akademisyenlerin kentsel morfoloji-mikroiklim ilişkisinde hem yapı hem de yeşil dokunun eş zamanlı etkilerine dair vurgularıyla örtüşmektedir.

SHAP analizleri, bina yüksekliğinin (BH) %20,4 katkı sunduğunu ortaya koymuş, bu da gölgeleme, hava akımı kesintisi ve ısı tutulum kapasitesinin, morfolojik parametrelerle karmaşık etkileşim içinde olduğunu göstermiştir. Bu değişkenin etkisinin doğrusal olmaması, tasarımların lokal iklim bağlamında optimize edilmesi gerektiğine işaret etmektedir.

SVF değişkeni her ne kadar %9,1'lik daha düşük bir katkı sunsa da dar sokaklarda ve kentsel kanyon etkisi görülen bölgelerde ısı tutulumu üzerinde belirgin etkiler yaratmaktadır. Bu durum, kentsel tasarımda sokak yönelimleri ve yapı cephe açıklıkları gibi parametrelerin iklimsel etkilerle bütünleştirilmesini zorunlu kılar.

SHAP modeli ile elde edilen bu bulgular, karar vericilerin müdahale stratejilerini sadece genelleştirilmiş normlara değil, yerel veri temelli, açıklanabilir içgörülere dayalı olarak kurgulamasını mümkün kılmaktadır. Bu durum, Tobruk gibi veri kısıtlı fakat morfolojik çeşitlilik gösteren kentler için son derece değerli bir planlama yaklaşımı sunmaktadır.

Tobruk kentinde yürütülen mekânsal analizler, kentsel ısı adası (UHI) etkisinin çöl ikliminde de ciddi düzeylere ulaşabildiğini göstermiştir. SUHI değerinin 6,5 °C'ye kadar çıkması, kentsel alanlar ile kırsal çevreler arasında belirgin bir termal fark

olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bulgu, Oke'nin (1982) kent merkezlerinde oluşan yapay yüzey yoğunluğunun ve yapılaşma karakterinin, termal yığılma ve ısı salımını artırdığı yönündeki klasik şehir ısı adası kuramıyla doğrudan uyumludur. Tobruk özelinde, merkezi çekirdek bölgelerdeki yüksek BVD (Bina Hacim Yoğunluğu) ve BH (Bina Yüksekliği) değerleri, gün içinde güneş ışıınının daha fazla absorbe edilmesine neden olmakta ve bu da yüzey sıcaklıklarını belirgin biçimde artırmaktadır.

SUHII farklarının özellikle merkezi işlev alanlarında yoğunlaşması, geçirimsiz yüzeylerin (asfalt, beton) artışına, azalan bitki örtüsüne ve sınırlı hava sirkülasyonuna bağlı olarak gelişen bir mikroiklim olgusudur. Oke (1987) ve daha yakın tarihli çalışmalar (Zhou vd., 2011), geçirimsiz yüzey yoğunluğunun arttığı alanlarda SUHII farklarının belirginleştiğini ve gece boyunca ısı salımının gecikerek termal stresin devam ettiğini vurgulamaktadır. Tobruk özelinde, bu durum sadece fizyolojik termal konforu değil, aynı zamanda enerji tüketimi, çevresel sağlık ve kent ekolojisi üzerinde de çok boyutlu etkilere sahiptir.

Bununla birlikte, Tobruk'ta yapılan UTFVI (Urban Thermal Field Variance Index) analizleri, sadece yüzey sıcaklığı farklarını değil, bu farkların termal çevre kalitesi üzerindeki etkilerini de değerlendirme imkânı sağlamaktadır. UTFVI değerlerinin "çok kötü" sınıfında yoğunlaştığı kent merkezleri, sürdürülebilirlik ve iklim adaptasyonu açısından öncelikli müdahale alanları olarak öne çıkmaktadır. Bu sonuçlar, Weng ve Yang (2004) tarafından geliştirilen kentsel termal stres indekslerinin, planlama önceliklendirmesinde ne derece etkili araçlar olabileceğini göstermektedir. Sert zeminlerin egemen olduğu ulaşım koridorları, bitki örtüsünden yoksun avlular ve yoğun yapılaşma alanları, bu bağlamda kritik risk bölgeleridir.

Termal stresin yoğunlaştığı bu bölgelerde, fiziksel altyapının dönüştürülmesi ve doğa temelli çözümlerin entegrasyonu hayati önem taşımaktadır. Tobruk özelinde yapılan müdahale senaryoları, mikro-yeşil adalar, geçirgen yüzey sistemleri ve dikey yeşillendirme stratejileri ile UTFVI değerlerinde 3 sınıf düzeyinde iyileşme sağlandığını göstermektedir. Bu bulgu, Li ve Wong (2005) tarafından yürütülen çalışmalarda yeşil altyapının yüzey sıcaklığı üzerindeki düzenleyici etkisinin, termal stres indekslerinde de belirgin şekilde gözlemlendiğini desteklemektedir. Doğal

yüzeylerin artırılması, bu bağlamda yalnızca fiziksel değil, aynı zamanda fizyolojik refahın artırılmasına da katkı sunmaktadır.

Kent planlaması açısından SUHII ve UTFVI gibi göstergeler, kentsel mikroklimaya duyarlı politika ve uygulamaların geliştirilmesinde veri temelli karar mekanizmalarının temelini oluşturur. UTFVI, mekânsal önceliklendirme yoluyla kaynakların daha verimli tahsisine, SUHII ise iklim değişikliğine uyum açısından hedeflenen bölgelerin seçimine katkı sunar. Tobruk'ta bu tür analizlerin yapılmış olması, yerel yönetimlerin bilimsel temelli planlama araçlarıyla desteklenmesinin mümkün olduğunu ortaya koymaktadır. Bu, özellikle kurak ve sıcak iklimlerde, geleneksel planlama yaklaşımlarının ötesine geçilerek mikroklim duyarlılığı yüksek müdahale stratejilerine geçişin gerekliliğini göstermektedir (Voogt ve Oke, 2003).

Sonuç olarak, Tobruk'un kentsel merkezinde belirlenen yüksek SUHII ve düşük UTFVI skorları, sadece bir mikroklim sorunu değil, aynı zamanda sürdürülebilirlik ve halk sağlığı açısından acil planlama ihtiyacına işaret etmektedir. Gerek bitki temelli çözümler gerekse geçirgen zemin uygulamaları ile desteklenen doğa temelli müdahaleler, bu göstergeleri iyileştirmek ve termal stresin yoğunlaştığı alanları yaşanabilir hale getirmek için stratejik bir araç konumundadır. Bu bağlamda, kent içi açık alan tasarımları ve morfolojik yeniden yapılandırmalar, Tobruk'un iklim değişikliği karşısındaki kırılganlığını azaltmada kilit rol oynamaktadır.

.

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

### 6.1 Sonuçlar

Tobruk Eski Kenti'nin Kentsel Isı Adası ve Peyzaj Bozulması Dinamiklerine Yönelik Bütüncül Bir Yaklaşım olarak Bu çalışma, Libya'nın kuzeydoğusunda yer alan ve tarihsel bir yerleşim örneği teşkil eden Tobruk Eski Kenti'nde, çöl iklimi koşullarında gözlenen çevresel değişimlerin mekânsal ve iklimsel etkilerini kapsamlı bir çerçevede değerlendirmektedir. Özellikle kentsel ısı adası (Urban Heat Island - UHI) etkisinin tarihî doku üzerindeki etkileri, yeşil alan kaybının mikroiklimsel sonuçları ve kültürel peyzajın sürdürülebilirliği üzerine odaklanılmıştır.

Araştırmada, mekânsal analiz yöntemleri ile birlikte uzaktan algılama, coğrafi bilgi sistemleri (CBS), istatistiksel modelleme ve açıklanabilir yapay zekâ (XAI) tekniklerinden bütüncül olarak yararlanılmıştır. Bu yöntemlerin eşgüdümlü şekilde kullanılması, hem veri analizinde doğruluğu artırmış hem de sonuçların kent planlaması açısından uygulanabilirliğini yükseltmiştir.

Elde edilen bulgular, yalnızca bilimsel anlamda yüksek güvenilirliğe sahip veriler sağlamakla kalmamış, aynı zamanda Tobruk gibi tarihî ve iklimsel açıdan kırılgan şehirler için sürdürülebilir çözüm önerilerinin geliştirilmesine de olanak tanımıştır. Bu bağlamda, çalışma hem kuramsal hem de pratik düzeyde katkı sunmaktadır.

Kentsel Morfoloji ile Mikroiklim Arasındaki İlişkinin Açıklanması olarak Yapılan analizler, Tobruk kent merkezinde gözlenen yüzey sıcaklıklarının (LST), kent morfolojisine doğrudan bağlı olarak mekânsal farklılıklar gösterdiğini ortaya koymuştur. Özellikle yüksek yapı hacmi yoğunluğu (BVD), azalan gökyüzü görünürlüğü (SVF) ve artan bina yüksekliği (BH) gibi fiziksel değişkenlerin, termal stres üzerinde belirleyici olduğu tespit edilmiştir.

Morfo-mekânsal yapı yoğunluğu fazla olan bölgelerde, yüzey sıcaklıklarının çevresel ortalamalara kıyasla 5–6 °C daha yüksek olduğu saptanmıştır. Bu durum, yoğun

yapılaşmanın doğal hava sirkülasyonunu engellediğini ve güneş ışıınının zemin yüzeyinde birikmesine yol açtığını göstermektedir.

Elde edilen bu bulgu, geleneksel kentsel dokunun iklimsel konfor açısından yeniden ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. Özellikle dar sokaklar, sıkışık bina dizilimleri ve geçirimsiz yüzeylerin baskın olduğu eski kent çekirdeğinde, mikroklimsel konforsuzluk ciddi bir sorun haline gelmiştir.

Bu nedenle, Tobruk'un tarihî kent dokusunun korunması kadar, iklimle uyumlu yeniden düzenleme stratejilerinin geliştirilmesi de öncelikli bir planlama hedefi olarak değerlendirilmektedir.

Yeşil Altyapı Sistemlerinin Mikroklim Üzerindeki Etkisi olarak Çalışma kapsamında bitki örtüsünü temsil eden NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) ile yüzey sıcaklığı (LST) arasındaki ilişki istatistiksel olarak incelenmiştir. Yapılan korelasyon analizleri, bu iki değişken arasında negatif yönlü ve anlamlı bir ilişki bulunduğunu göstermiştir ( $r = -0,74$ ).

Özellikle Tobruk Vadisi çevresi ve mikro ölçekli yeşil alanlara sahip yerleşim birimlerinde, LST değerlerinin diğer alanlara kıyasla 6–7 °C daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bu farklılık, bitki örtüsünün gölgeleme, evapotranspirasyon ve yerel nem dengesine katkı sağlayarak mikroklimi düzenlediğini ortaya koymaktadır.

Bitkilendirilmiş bölgelerde hava kalitesinin daha yüksek, ısı stresinin ise daha düşük olması, yeşil altyapının sadece estetik değil aynı zamanda işlevsel bir kent unsuru olduğunu kanıtlamaktadır. Bu bulgu, çöl iklimine sahip bir bölgede dahi doğru planlanmış yeşil altyapının iklimsel konforu olumlu yönde etkileyebileceğini göstermektedir.

Dolayısıyla, Tobruk'ta yeşil altyapının yeniden inşa edilmesi ve yerel türlerle desteklenerek çeşitlendirilmesi, sürdürülebilir kentleşme açısından öncelikli bir müdahale alanı olarak değerlendirilmelidir.



30 Yılda Yaşanan Yeşil Alan Kaybı ve LST Artışının Değerlendirilmesi olarak 1991–2024 yılları arasında Tobruk kent merkezinde meydana gelen mekânsal dönüşüm, hem yapılı çevrenin yoğunlaşmasına hem de yeşil alanların ciddi oranda azalmasına yol açmıştır. Uydu görüntüleri ve çok zamanlı analizler, yapılaşma oranının %54’ten %90,5’e çıktığını, buna karşılık sağlıklı yeşil alan oranının %49’dan %9,5’e düştüğünü göstermektedir.

Bu değişim, Tobruk gibi tarihî kimliği güçlü ve çevresel hassasiyeti yüksek kentlerde, plansız kentsel büyümenin ne denli olumsuz sonuçlar doğurabileceğini somut biçimde ortaya koymaktadır. Kentin doğal peyzaj dokusu tahrip edilmiş, bu da mikroiklimsel düzenleme mekanizmalarının zayıflamasına yol açmıştır.

Aynı süreçte ortalama LST değerlerinde 4,8–5,1 °C arasında artış gözlemlenmiştir. Bu artış, hem insan sağlığı açısından hem de kültürel mirasın korunabilirliği açısından ciddi riskler barındırmaktadır. Özellikle yaz aylarında aşırı sıcaklıklar, kent merkezindeki yaşam kalitesini doğrudan etkilemektedir.

Bu kapsamda, Tobruk’ta sürdürülebilir bir kentleşme modeline geçişin aciliyet kazandığı söylenebilir. Doğal ve tarihî değerleri gözetken, aynı zamanda iklimsel dirençliliği önceleyen politikaların geliştirilmesi zorunluluk haline gelmiştir.

Açıklanabilir Yapay Zekâ ile Geliştirilen Karar Destek Sistemleri olarak XGBoost algoritması kullanılarak eğitilen makine öğrenmesi modelleri ve SHAP (SHapley Additive exPlanations) yöntemi ile modelin karar süreçleri şeffaf hale getirilmiştir. Bu sayede, LST üzerindeki etkisi en fazla olan değişkenler bilimsel temelde belirlenebilmiştir.

Model çıktıları, BVD’nin %50,9, NDVI’nin %25,8 ve BH’nin %20,4 oranında LST değişimine etki ettiğini göstermiştir. Bu oranlar, kentsel morfolojinin ve bitki örtüsünün LST üzerindeki etkisinin birbirinden bağımsız olmadığına işaret etmektedir.

SHAP analizleri, değişkenlerin her bir bölgede hangi yönde ve ne şiddette etki yarattığını da görselleştirmiştir. Böylece planlama kararlarında, sadece genel eğilimlere değil, alan bazlı farklılıklara da odaklanmak mümkün hale gelmiştir.

Bu açıklanabilir modelleme yaklaşımı, Tobruk gibi veri kısıtlı ancak müdahale gerektiren kentler için hem bilimsel hem de yönetsel düzeyde güçlü bir karar destek aracı sunmaktadır.

İklim Duyarlı Müdahale Senaryolarının Uygulama Sonuçları olarak Araştırma kapsamında geliştirilen iklim uyumlu müdahale senaryoları, pilot bölgelerde test edilmiş ve sonuçları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Uygulama sonrasında NDVI değerinde %28'lik bir artış elde edilmiş, bu artış yeşil altyapının sahaya etkili şekilde entegre edildiğini göstermiştir.

Aynı zamanda yüzey sıcaklıkları ortalama %21 oranında azalmıştır. Bu düşüş, hem insan sağlığı hem de yapı stoğunun korunabilirliği açısından olumlu sonuçlar doğurmuştur. Özellikle tarihî yapıların bulunduğu bölgelerde termal genleşme ve bozulma riski azalmıştır.

Peyzaj oranlarında (PLAND) ise %15'lik bir iyileşme gözlemlenmiştir. Bu değişim, açık ve geçirgen yüzeylerin artırılmasının peyzaj kalitesine doğrudan katkı sunduğunu kanıtlamaktadır. Kent içi ekolojik denge yeniden tesis edilmeye başlanmıştır.

Termal konfor zonlarında ise üç kademelik iyileşme yerine altı kademelik bir gelişme sağlanmıştır. Bu gelişme, Tobruk için uygulanabilir, yerel iklimle uyumlu ve tarihî dokuyu koruyan bütüncül kentsel dönüşüm senaryolarının mümkün olduğunu ortaya koymaktadır.

Modelin Genellenebilirliği ve Uygulama Alanları olarak Bu çalışmada geliştirilen analiz çerçevesi, Tobruk'un iklimsel ve tarihî özellikleri temel alınarak oluşturulmuş olsa da, benzer çevresel ve kültürel bağlama sahip diğer çöl kentlerinde de uygulanabilir niteliktedir. Özellikle Kuzey Afrika ve Orta Doğu coğrafyasında yer alan birçok şehir için ölçeklenebilir bir model sunulmaktadır.

Modelin temel bileşenleri, iklim duyarlılığına dayalı kentsel tasarım, kültürel mirasın bütüncül korunması, veriye dayalı karar süreçleri ve uzaktan algılama temelli analiz altyapısından oluşmaktadır. Bu unsurlar, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada bütünsel bir yaklaşım sunmaktadır.

Kültürel peyzajın korunması ile iklimsel konforun sağlanması, genellikle birbirine zıt hedefler gibi değerlendirilse de bu model, her iki hedefin de eş zamanlı olarak sağlanabileceğini göstermektedir. Bu yönüyle çalışma, kent planlama, çevre mühendisliği ve kültürel miras alanlarında disiplinler arası güçlü bir zemin sunmaktadır.

Sonuç olarak, Tobruk örneğinde geliştirilen bu model, yalnızca fiziksel müdahale araçlarını değil, aynı zamanda mekânsal adalet, iklim uyumu ve kültürel süreklilik ilkelerini birlikte içeren stratejik bir kentsel planlama yaklaşımı önermektedir.

## 6.2 Öneriler

Veri tabanlı, kültürel miras duyarlı ve iklime uyumlu kentsel tasarım önerileri olarak, Libya Tobruk Eski Kenti özelinde yürütülen detaylı mekânsal analizlerin ve iklimsel modellemelerin çıktıları temel alınarak geliştirilmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda; kentsel ısı adası etkisinin azaltılması, termal konforun artırılması ve tarihî dokunun korunarak sürdürülebilirliğinin sağlanması amaçlanmıştır.

Öneriler; karar vericiler, yerel yönetimler, kentsel tasarımcılar ve peyzaj planlamacıları için uygulanabilir, bilimsel temellere dayanan bir rehber niteliğindedir. Ayrıca öneriler, Tobruk gibi çöl iklimi koşullarında yer alan tarihî kent merkezlerinin karşılaştığı ortak sorunlara ölçeklenebilir çözümler sunmaktadır.

Mikro-Yeşil adaların yaygınlaştırılması olarak Tobruk kent merkezinde, yapı yoğunluğunun yüksek olduğu ve hava sirkülasyonunun sınırlı olduğu bölgelerde, mikro-yeşil adaların yaygınlaştırılması önerilmektedir. Özellikle boş parsellerde veya atıl durumdaki küçük açık alanlarda yerli ve kuraklığa dayanıklı bitki türleriyle oluşturulacak mikro-yeşil adalar, yüzey sıcaklıklarının düşürülmesine önemli katkı sağlayabilir. Analiz sonuçlarına göre, en az 23 m<sup>2</sup> büyüklüğündeki her bir yeni yeşil alan, bulunduğu bölgede kara yüzey sıcaklığında yaklaşık 4,2–5,1 °C’lik bir azalma sağlamaktadır. Bu etkinin, özellikle yapıların yoğunlaştığı eski kent merkezinde, termal stresin azaltılması açısından stratejik olduğu değerlendirilmektedir. Uygulama süreçlerinde mikro-yeşil adaların konumu, güneşlenme süresi, rüzgâr yönü ve gölgelik

etkileri dikkate alınarak planlanmalıdır. Ayrıca bu alanların, toplumsal kullanım ve estetik değer bakımından da nitelikli hale getirilmesi önerilmektedir.

Geçirgen yüzey stratejilerinin uygulanması olarak Tobruk kentinde, kent içi yüzeylerin büyük bir kısmı geçirimsiz beton ve asfalt gibi malzemelerle kaplanmış durumdadır. Özellikle otoparklar, kaldırımlar ve avlular gibi sert zeminlerde geçirimsiz yüzey oranı şu an yaklaşık %90 civarındadır. Bu durum, yüzey ısıısının artmasına ve yağmur suyunun emilememesine neden olmaktadır. Bu bağlamda, geçirgen yüzey malzemelerinin kullanımı teşvik edilmelidir. Uygulamada geçirimsiz yüzey oranının %67'nin altına çekilmesi hedeflenmelidir. Böylelikle hem su döngüsü iyileştirilmiş olacak, hem de yüzey sıcaklıklarında anlamlı bir azalma sağlanacaktır. Geçirgen kaplama malzemeleri, hem çevresel sürdürülebilirlik hem de kentsel estetik açısından avantaj sağlamaktadır. Özellikle tarihî dokuya entegre edilerek, geleneksel malzemelere benzer görünümde modern çözümler üretilebilir.

Gölgelendirme unsurlarının artırılması olarak Tobruk'ta yaz aylarında aşırı sıcaklık değerleri, dar sokaklarda ve avlulu yapılarda belirgin biçimde hissedilmektedir. Bu durum, özellikle yürüyüş yolları ve meydanlar gibi açık alanlarda gündelik yaşamı olumsuz etkileyebilmektedir. Pasif soğutma sistemlerinden biri olan gölgelendirme elemanları; ağaçlar, çardaklar, tenteler ve cephe çıkmaları gibi yöntemlerle uygulanabilir. Ağaçlandırmanın yapılaşma ile bütünleştiği bölgelerde, LST değerlerinde 5–6 °C'lik düşüş gözlemlenmiştir.

Ayrıca bina aralıklarının mikroklimatik açıdan optimize edilmesi, doğal hava akışını ve ısı dağılımını iyileştirmektedir. Bu nedenle yeni yapılaşmalarda bina konumlandırmaları, rüzgâr koridorları ve gölge etkisi dikkate alınarak planlanmalıdır.

Tarihî dokuda ısı adası etkisine karşı koruma yaklaşımları olarak Tobruk Eski Kenti içinde yer alan 15–23 numaralı morfolojik merkezler, yapılan analizlerde en yüksek LST değerlerine sahip alanlar olarak belirlenmiştir. Bu bölgelerde yapı yoğunluğu, geçirimsiz yüzey oranı ve gökyüzü görünürlüğü faktörlerinin birlikte etkili olduğu tespit edilmiştir. Bu alanlarda uygulanacak müdahalelerin tarihî dokuyla uyumlu olması büyük önem taşımaktadır. UNESCO'nun Tarihî Kentsel Peyzaj (HUL)

yaklaşımı çerçevesinde, mikroklimatik iyileştirme stratejileri koruma planlarına entegre edilmelidir. Isı azaltıcı düzenlemeler (bitkilendirme, gölgelendirme, geçirgen yüzey uygulamaları) tarihî sokak dokusunu bozmayacak şekilde tasarlanmalı, hem fiziksel hem de görsel bütünlüğü koruyacak biçimde uygulanmalıdır.

Avlulu konut tipolojilerinin teşvik edilmesi olarak Tobruk'un geleneksel yerleşim örüntüsünde sıkça rastlanan iç avlulu konut tipolojileri, mikroiklimsel avantajlarıyla dikkat çekmektedir. Bu yapı tipleri, doğal havalandırma ve gölgelendirme sağladıkları için termal konforun artırılmasında etkin rol oynamaktadır.

Yeni yapı ruhsatlandırma süreçlerinde iç avlulu konut modelleri teşvik edilmeli; mimari yönetmelikler aracılığıyla bu tipolojilere yönelik planlama rehberleri oluşturulmalıdır. Özellikle çöl iklimi koşullarında bu tür yapıların enerji verimliliği açısından da katkı sunduğu unutulmamalıdır. Pilot uygulama alanları belirlenerek, avlulu konut örnekleri yerinde uygulanmalı ve yerel halkın katılımıyla yaygınlaştırılmalıdır. Bu süreç, tarihî ve iklimle duyarlı mimari anlayışın yeniden gündeme gelmesini sağlayacaktır.

Uzaktan algılama ve veri tabanlı karar destek sistemlerinin kurulması olarak Tobruk Belediyesi öncülüğünde bir Kent Bilgi Sistemi (KBS) ve Açık Veri Platformu kurulması önerilmektedir. Bu sistem, uydu verileri, LST dağılım haritaları, bitki örtüsü metrikleri ve yapı morfolojisi gibi çeşitli katmanları içeren interaktif bir veri altyapısına sahip olmalıdır.

Bu sayede belediyeler ve planlayıcılar, kentteki değişimleri takip edebilir, müdahale öncesi ve sonrası senaryoları karşılaştırmalı olarak değerlendirebilir. Aynı zamanda vatandaşlar da bu platform üzerinden bilgiye erişebilir ve katılımcı planlama süreçlerine dahil olabilir.

Sistem içerisinde güncel NDVI, SVF ve UTFVI haritaları da periyodik olarak güncellenmeli ve açık erişimli tutulmalıdır. Böylece bilimsel bilgi, kamu yararına hizmet eden bir araç hâline gelecektir.

SHAP Destekli Modelleme Arayüzlerinin Geliştirilmesi olarak açıklanabilir yapay zekâ (XAI) araçlarından biri olan SHAP algoritması kullanılarak, her bir planlama kararının mikro düzeydeki etkileri şeffaf bir şekilde ortaya konabilmektedir. Bu model, LST-SVF-NDVI gibi çevresel değişkenlerin etkileşimli analizini mümkün kılarak, kullanıcı dostu simülasyon arayüzlerinin geliştirilmesine zemin hazırlamaktadır.

Tobruk özelinde geliştirilecek SHAP tabanlı görsel simülasyon araçları sayesinde, planlayıcılar bina yüksekliğinden geçirgen yüzey oranına kadar birçok parametreyi interaktif olarak değerlendirebilir. Böylece alana özgü müdahale kararları çok daha hızlı ve bilimsel veriye dayalı olarak alınabilir. Bu araçlar ayrıca eğitim, seminer ve halka açık bilgilendirme süreçlerinde de etkili bir görselleştirme desteği sağlayacaktır. Bu sayede sadece teknik kadrolar değil, halk da karar süreçlerine dâhil edilebilecektir.

Yasal ve kurumsal stratejiler, Yeşil Altyapı Zorunluluğu olarak yeni yapılaşmalarda belirli oranlarda yeşil alan ayrılması yasal zorunluluk haline getirilmelidir. Tobruk özelinde bu oran, mevcut analizlere göre %18'e kadar çıkarılmalıdır. Bu oran, NDVI, SVF ve LST analizlerine dayalı olarak mikro-bölgelere göre farklılaştırılabilir.

Yapı ruhsatı süreçlerinde, proje kapsamında ayrılacak yeşil alan miktarı açıkça belirtilmeli ve bu alanların bitkilendirme planları detaylı biçimde kontrol edilmelidir. Ayrıca, yerel türlerin kullanımı da teşvik edilmelidir. Bu yasal düzenlemeler, hem çevresel sürdürülebilirlik hem de Tobruk'un tarihî ve kültürel peyzaj değerlerinin korunması açısından önemli bir adım olacaktır.

Kentsel ısı adası risk bölgelerinin tanımlanması ve sınırlamaları olarak Kara yüzey sıcaklığına dayalı UTFVI (Urban Thermal Field Variance Index) ve SUHII (Surface Urban Heat Island Intensity Index) analizleri kullanılarak kentsel ısı adası riski taşıyan bölgeler bilimsel olarak haritalanmalıdır. Bu bölgelerde yapılaşma yoğunluğu sınırlandırılmalı ve yeni yapı izinleri iklim adaptasyonu kriterlerine göre değerlendirilmelidir. İmar planlarında bu alanlara yönelik özel tasarım ilkeleri geliştirilmeli, geçirimsiz yüzeylerin sınırlandırılması, gölgelendirme alanlarının artırılması ve doğal bitki örtüsünün korunması gibi zorunluluklar getirilmelidir. Bu

yaklaşım, uzun vadeli iklim uyum politikalarıyla bütünleşik, doğaya duyarlı ve kültürel mirasa saygılı bir kentsel gelişim süreci yaratacaktır.

Toplumsal katılım ve eğitim temelli planlama olarak Termal konfor, yeşil alan kullanımı ve sürdürülebilir kentsel yaşam kültürü konularında yerel halkın bilgilendirilmesi ve sürece aktif katılımı sağlanmalıdır. Mahalle düzeyinde yapılacak eğitim çalışmaları, özellikle kadınlar, yaşlılar ve çocuklar gibi kırılgan gruplar için öncelikli olmalıdır. Ayrıca, katılımcı planlama toplantıları düzenlenerek, mahalle halkıyla birlikte uygulanabilir mikro müdahale önerileri geliştirilmeli ve halkın sahiplenmesini sağlayacak yöntemler izlenmelidir. Bu yöntemle örneğin mikro-yeşil adaların bakımı, halkın kendi mahallesine aidiyetini artıracaktır. Toplumsal katılımın sağlanması, önerilen tüm müdahalelerin kalıcılığı ve başarı düzeyi açısından kritik bir rol oynamaktadır.

Pilot uygulama alanlarının belirlenmesi ve önceliklendirme olarak yukarıda belirtilen önerilerin hayata geçirilmesi için Tobruk kent merkezinde öncelikli müdahale alanları belirlenmelidir. Özellikle LST değerlerinin yüksek, yeşil altyapı eksikliğinin yoğun olduğu ve tarihî dokunun baskı altında olduğu bölgeler pilot uygulama için öncelikli olmalıdır.

Bu pilot uygulamalar sayesinde, geliştirilen stratejilerin sahada test edilmesi ve sonuçlarının izlenmesi mümkün olacak, gerekli model güncellemeleri bu alanlardan elde edilen verilere göre yapılacaktır.

Bu müdahaleler, benzer coğrafi ve iklimsel koşullara sahip tarihî kentler için de çoğaltılabilir, ölçeklenebilir ve modüler nitelikte sürdürülebilir planlama modelleri sunmaktadır.

Gelecek araştırmalar için öneriler olarak; bu tez çalışması, Libya'nın kuzeydoğusunda yer alan ve tarihsel önemi ile öne çıkan Tobruk Eski Kenti özelinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, çöl iklimi koşullarının baskın olduğu bu yerleşim alanında, kentsel mikroiklim koşulları, morfolojik yapı parametreleri, peyzaj metrikleri ve açıklanabilir yapay zekâ modelleri bütünleşik biçimde ele alınmıştır.

Kapsamlı bir analiz süreci sonunda, çok katmanlı veri kümeleri mekânsal ve zamansal olarak entegre edilerek, kentsel ısı adası etkisi (UHI), yeşil alan sürekliliği, yapı yoğunluğu ve yüzey sıcaklığı gibi çevresel göstergelerin birbirleriyle olan ilişkileri sistematik olarak ortaya konulmuştur. Elde edilen bulgular, Tobruk gibi tarihî dokunun hâkim olduğu çöl kentlerinde, iklimsel ve kültürel faktörlerin birbirinden bağımsız düşünülemeyeceğini ve bu unsurların bütüncül bir planlama yaklaşımıyla ele alınması gerektiğini açık bir biçimde göstermiştir. Bununla birlikte, çalışmanın sahip olduğu çok boyutlu veri altyapısına ve metodolojik çeşitliliğe rağmen, bazı kritik başlıklarda daha geniş ölçekli, karşılaştırmalı ve derinlemesine araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu başlıklar aşağıda açıklanmıştır.

Bu araştırma, çöl ikliminin egemen olduğu bir coğrafyada gerçekleştirilmiş ve bu iklim tipine özgü mikroiklim-morfoloji ilişkisi kapsamlı şekilde analiz edilmiştir. Ancak önerilen modelin genellenebilirliğinin test edilmesi için farklı iklimsel koşullarda benzer çalışmalar yapılması büyük önem taşımaktadır. Örneğin, Akdeniz iklimi, nemli subtropikal iklim ve yarı kurak kara iklimleri gibi bölgelerde, LST (kara yüzey sıcaklığı), NDVI (bitki örtüsü indeksi) ve SVF (gökyüzü görünürlüğü faktörü) gibi göstergelerle morfolojik parametreler arasındaki etkileşimler karşılaştırmalı olarak değerlendirilebilir. Bu tür analizler, bölgesel farklılıkları dikkate alan iklime duyarlı tasarım ilkelerinin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır. Ayrıca, SHAP tabanlı açıklanabilir yapay zekâ modellerinin farklı iklim türlerinde nasıl performans gösterdiği, hangi değişkenlerin ön plana çıktığı ve model doğruluğunun ne ölçüde değiştiği gibi konular da ele alınarak, metodolojik derinlik artırılabilir. Bu yaklaşım sayesinde, Tobruk'ta geliştirilen modelin yalnızca yerel değil, aynı zamanda küresel ölçekte uygulanabilirliğine dair daha güçlü bilimsel kanıtlar elde edilebilir.

Çalışmanın temel odak noktası mekânsal ve çevresel verilere dayansa da, kent kullanıcılarının deneyimleri, algıları ve davranış kalıpları göz önünde bulundurulmadan geliştirilen mikroiklim müdahaleleri sınırlı başarı elde edebilir. Bu nedenle, sosyal boyutun entegre edilmesi kaçınılmazdır. Tobruk kentinde, yerel halkın iklimsel konfor algılarını ölçmeye yönelik anket temelli çalışmalar yürütülmelidir. Hangi bölgelerin gölgeli, serin veya tercih edilen kamusal alanlar olduğu gibi algısal veriler, fiziksel göstergelerle eşleştirilerek kapsamlı bir sosyal-ekolojik modelleme



yapılabilir. Buna ek olarak, kültürel peyzajın kullanımı ve halkın mekânla olan ilişkisi etnografik araştırmalarla desteklenmelidir. Özellikle tarihî sokakların sosyal etkileşim düzeyi, gölgelenme potansiyeli ve mekânsal çekiciliği gibi parametreler, kullanıcı deneyimlerinin modellenmesinde kritik rol oynamaktadır. Bu tür bütüncül yaklaşımlar, Tobruk'un kültürel kimliğini koruyarak iklime uyumlu dönüşüm stratejilerinin uygulanmasını sağlayacaktır.

Mevcut analizler büyük ölçüde uydu verilerine ve belirli tarihlerde toplanmış görüntülere dayanmaktadır. Ancak bu yöntemler, gün içi ve mevsimsel değişimlerin yüksek zaman çözünürlüğüyle izlenmesini sınırlı kılmaktadır. Bu sorunun aşılması için, gerçek zamanlı veri toplama altyapısına geçilmesi önerilmektedir. Tobruk'ta kurulacak mikroiklim sensörleri aracılığıyla, sıcaklık, nem, rüzgâr yönü, güneş ışınımı ve hava kalitesi gibi göstergeler 7/24 izlenebilir. Bu sistem, hem akademik araştırmalara hem de belediye hizmetlerine eş zamanlı geri bildirim sağlayacaktır. IoT (Internet of Things) tabanlı veri akışları, özellikle kullanıcı davranışlarını (örneğin gölge alanlarda toplanma eğilimi, kamusal alan kullanım yoğunluğu gibi) çevresel değişkenlerle eşleştirme imkânı sunar. Bu entegrasyon, planlamacılar için veri temelli senaryoların oluşturulmasına olanak tanır. Ayrıca, bu teknoloji altyapısı ile geliştirilecek karar destek sistemleri, şehir ölçeğinde hızlı müdahaleleri mümkün kılacak, kent yöneticilerine esnek ve reaktif yönetim araçları sunacaktır.

Bu tezde ilk defa Tobruk gibi tarihî ve çöl iklimiyle şekillenen bir kentte SHAP yöntemi kullanılarak açıklanabilir yapay zekâ modeli geliştirilmiştir. Model, LST üzerindeki değişken etkilerini şeffaf biçimde sunması açısından önemli bir başlangıçtır. Gelecekte bu modelin zamana bağlı öngörü kapasitesi artırılarak, 2030, 2040 gibi geleceğe dönük LST projeksiyonlarıyla entegre edilmesi mümkündür. Böylece, zaman serisi modelleme ile iklim değişikliği etkilerine karşı daha proaktif planlama yapılabilir. Ayrıca, alternatif algoritmalar olan LightGBM ve CatBoost ile karşılaştırmalı analizler gerçekleştirilerek modelin güvenilirliği ve açıklanabilirliği sınanabilir. Bu algoritmaların Tobruk gibi veri kısıtlı ortamlarda nasıl performans gösterdiği değerlendirilebilir.

Senaryo tabanlı SHAP ağaçları aracılığıyla, önerilen kentsel müdahale paketlerinin etkileri bölge bazında simüle edilebilir. Bu, planlama süreçlerinde hem bilimsel doğruluk hem de karar verici dostu görsellik sağlayacaktır.

Bu araştırma, mahalle ölçeğinde geliştirilen senaryolar ile sınırlı kalmış olsa da, Tobruk ve benzeri kentlerde uygulanabilir politikalar için çok ölçekli modellemeler büyük önem taşımaktadır. Bölgesel, kentsel ve parsel ölçeklerinde farklılaştırılmış müdahaleler geliştirilmelidir. Örneğin, şehirlerarası düzeyde Tobruk ve çevresindeki kentlerde LST-yeşil alan eşitsizliği analiz edilerek bölgesel ısı stresi haritaları oluşturulabilir. Bu sayede adil yeşil altyapı yatırımları yönlendirilebilir. Ayrıca, mahalle içi senaryoların kamu yapıları, okullar, hastaneler, pazaryerleri gibi kamusal alanlar üzerindeki etkileri değerlendirilerek sosyal fayda yönünden önceliklendirme yapılabilir. Toplu konut alanlarında termal stresin azaltılması için özel tasarım önerileri geliştirilebilir. Bu kapsamda geliştirilecek iklime duyarlı “müdahale matrisleri”, Tobruk Belediyesi ve yerel yönetim aktörleri için uygulamaya dönük stratejik karar destek araçlarına dönüşebilir.

Libya’nın son on yıllarda maruz kaldığı altyapı yıkımı ve hareketleri; Tobruk gibi tarihî kentlerde kentsel ekolojik sistemleri derinden etkilemiştir. Yeşil alanların kaybı, düzensiz yapılaşma ve aşırı nüfus baskısı, mikroiklim dengesini bozan temel etkenler arasında yer almaktadır. Yeniden yapılanma süreçlerinde, ekolojik göstergelerdeki değişimlerin sürekli izlenmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, hem fiziksel restorasyonun hem de çevresel rehabilitasyonun entegre planlanması önerilmektedir. Geçici yerleşim alanları, mülteci barınakları ve kamusal açık alanlarda mikroiklim koşulları detaylı şekilde değerlendirilmelidir. Bu alanlarda LST, NDVI ve SVF analizleri ile birlikte sosyal veriler de kullanılarak acil müdahale planları hazırlanmalıdır. Tobruk’un yeniden inşa sürecinde ekolojik dayanıklılığın artırılması, kriz sonrası sürdürülebilirlik hedeflerinin temel bir bileşeni olarak ele alınmalıdır.

Gelecekte yürütülecek araştırmalarda, Tobruk kentine ait 3B dijital ikiz (Digital Twin) modelleri oluşturularak mevcut analizlerin kent bütününde dinamik olarak görselleştirilmesi sağlanabilir. Bu teknoloji, simülasyon tabanlı planlama anlayışına geçişte önemli bir araçtır. LST, NDVI, BH ve SVF gibi mekânsal göstergeler dijital

ikiz üzerine entegre edilerek farklı kentsel müdahale senaryolarının etkileri eş zamanlı olarak test edilebilir. Özellikle bina gölgeleme etkisi, yeşil alan yayılımı ve yansıtıcı yüzeylerin ısı azaltıcı etkileri üç boyutlu olarak görselleştirilebilir. Bu altyapı sayesinde, araştırmacılar, planlamacılar ve yurttaşlar arasında şeffaf, katılımcı ve bilimsel bilgiye dayalı karar mekanizmaları oluşturulabilir. Tobruk için dijital ikiz kullanımı, yerel iklim krizlerine karşı dirençli ve entegre bir şehir yönetiminin kapılarını aralayacaktır.

Bu tez çalışması, Tobruk Eski Kenti örneğinde, kültürel miras alanlarının iklim değişikliği karşısında nasıl dönüştüğü ve hangi stratejilerle dirençli hale getirilebileceğini bilimsel bir temelde tartışmıştır. Araştırma, mekânsal analiz, yapay zekâ, peyzaj ekolojisi ve kentsel morfoloji gibi disiplinleri entegre ederek çok boyutlu bir bakış sunmuştur.

Ancak sürdürülebilirliğin dinamik doğası ve iklim krizinin belirsiz etkileri göz önünde bulundurulduğunda, geliştirilen modelin farklı coğrafyalarda test edilmesi, sosyal boyutlarla zenginleştirilmesi ve dijital teknolojilerle güçlendirilmesi bir zorunluluk haline gelmektedir.

Tobruk özelinde geliştirilen bu çerçeve, gelecekte hem ulusal hem de uluslararası düzeyde çöl iklimine sahip kentler için uygulanabilir, bütüncül ve sürdürülebilir bir kentsel planlama modeline dönüşme potansiyeline sahiptir.

## KAYNAKLAR

- Adler-Golden, S. M., Matthew, M. W., Bernstein, L. S., Levine, R. Y., Berk, A., Richtsmeier, S. C., ... & Acharya, P. K. (1999). Atmospheric correction for short-wave spectral imagery based on MODTRAN4. *Proceedings of SPIE*, 3753, 61–69.
- Ahmed, M., Nour, A., & El-Sayed, H. (2024). Urban heat island dynamics in arid historic cities: The case of Tobruk, Libya. *Journal of Arid Environments*, 220, 104812. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2024.104812>
- Ai, X., Li, W., & Zhang, L. (2023). Urban landscape and thermal environment interactions in arid climates: Remote sensing applications. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(4), 331. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11034-6>
- Akbari, H., Pomerantz, M., & Taha, H. (2001). Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy*, 70(3), 295–310. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00089-2](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00089-2)
- Akram, M., Arshad, R., & Hassan, S. (2018). Green infrastructure planning in arid urban environments: Challenges and solutions. *Sustainable Cities and Society*, 39, 88–98. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.02.014>
- Al, Jazeera. (2023, September). Thousands dead as dams collapse in Tobruk, Libya floods.
- Alberti, M. (2008). *Advances in urban ecology: Integrating humans and ecological processes in urban ecosystems*. Springer.
- Al-Mahdi, M. (2019). Urban morphology and building height analysis in Libyan coastal cities. *Journal of Urban Planning*, 15(2), 87–102.
- Al-Salhi, M. (2017). Urban growth challenges in Tobruk, Libya: A case study. *International Journal of Urban Development*, 9(1), 33–45.
- Alsharif, N. (2018). Historical evolution of Tobruk city, Libya. *Libyan Journal of Geography*, 3(1), 14–23.
- Anselin, L. (1995). Local indicators of spatial association—LISA. *Geographical Analysis*, 27(2), 93–115. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x>
- Anselin, L. (1995). Local indicators of spatial association—LISA. *Geographical Analysis*, 27(2), 93–115. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x>
- Arefi, M. (2007). Reinterpreting urban landscape through cultural heritage. *Cities*, 24(4), 252–265. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2007.04.001>

- Athick, F., & Shankar, S. (2019). Integration of cultural heritage and environmental planning: A case study from North Africa. *Journal of Cultural Heritage Management*, 12(1), 45–60.
- Bandarin, F., & van Oers, R. (2012). The historic urban landscape: Managing heritage in an urban century. *Wiley-Blackwell*.
- Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., & Wood, E. F. (2018). Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data*, 5, 180214.
- Castells-Quintana, D., García-López, M.-À., & Llop, M. (2022). 3D urban morphology and heat island mitigation: Evidence from Mediterranean cities. *Urban Climate*, 42, 101123. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101123>
- Chander, G., & Markham, B. L. (2003). Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(11), 2674–2677.
- Chavez, P. S. (1988). An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sensing of Environment*, 24(3), 459–479.
- Climate-Data.org. (2024). Climate: Tobruk – Libya.
- Congalton, R. G. (1991). A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 37(1), 35–46.
- Congalton, R. G., & Green, K. (2008). Assessing the accuracy of remotely sensed data: Principles and practices (2nd ed.). *CRC Press*.
- Copernicus Open Access Hub. (2024). Sentinel-2 satellite data.
- Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., et al. (2012). Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>
- Elbaj, S., Mohamed, A., & Faraj, S. (2021). Cultural heritage preservation in Tobruk: Architectural features and challenges. *Journal of Mediterranean Studies*, 29(3), 220–235.
- El-Fawal, A. (2015). Geographical and climatic analysis of coastal Libya. *Mediterranean Geography Journal*, 12(2), 100–112.
- ESRI. (2020). ArcGIS Desktop: Release 10.8. *Environmental Systems Research Institute*.
- ESRI. (2022). Building Footprint Extraction – Africa Model Documentation. *ArcGIS Living Atlas*.

- Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., et al. (2007). The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics*, 45(2), RG2004. <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>
- Field, A. (2013). *Discovering statistics using IBM SPSS statistics* (4th ed.). Sage Publications.
- Foody, G. M. (2002). Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment*, 80(1), 185–201.
- FRAGSTATS v4.2. (2015). Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps. *University of Massachusetts*.
- Gao, B. C., Montes, M. J., Davis, C. O., & Goetz, A. F. (2009). Atmospheric correction algorithms for hyperspectral remote sensing data of land and ocean. *Remote Sensing of Environment*, 113, S17–S24.
- Gao, Y., Li, X., & Wang, S. (2020). Land use/land cover change detection using Landsat data in North Africa. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(5), 291. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8181-9>
- Gill, S. E., Handley, J. F., Ennos, A. R., & Pauleit, S. (2007). Adapting cities for climate change: The role of the green infrastructure. *Built Environment*, 33(1), 115–133.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Grimm, N. B., Grove, J. M., Pickett, S. T. A., & Redman, C. L. (2008). Integrated approaches to long-term studies of urban ecological systems. *BioScience*, 58(2), 139–149.
- Healey, P. (1997). *Collaborative planning: Shaping places in fragmented societies*. Macmillan International Higher Education.
- Herold, M., Goldstein, N. C., & Clarke, K. C. (2003). The spatiotemporal form of urban growth: Measurement, analysis and modeling. *Remote Sensing of Environment*, 86(3), 286–302. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00075-0](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00075-0)
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1–2), 195–213. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)
- Hussain, T., Malik, R. N., & Abbas, M. (2018). Effects of urban expansion on thermal environment: A study of arid cities. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(2), 1738–1749. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0636-x>

- IPCC. (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press*.
- Jensen, J. R. (2005). Introductory digital image processing: A remote sensing perspective (3rd ed.). Prentice Hall.
- Jiang, Y., & Buyantuyev, A. (2019). Urban growth, land use change and the effects on climate: A case study of urban heat island in China. *Environmental Research Letters*, 14(12), 124019. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab5acb>
- Khalil, M., & Mahfouz, S. (2020). Climate change impacts on coastal cities of Libya. *Climate Risk Management*, 27, 100213. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2019.100213>
- Latif, M., Khan, A., & Shakir, M. (2023). Urban heat island effects and vegetation cover in desert cities: Remote sensing approaches. *Remote Sensing Letters*, 14(2), 156–168. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2023.1854980>
- Li, X., & Yeh, A. G. O. (2004). Analyzing spatial restructuring of land use patterns in a fast growing region using remote sensing and GIS. *Landscape and Urban Planning*, 69(4), 335–354.
- Li, X., Wei, W., & Yu, Y. (2020). Exploring urban heat islands and their relationship with land use in dry climates. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(22), 8499. <https://doi.org/10.3390/ijerph17228499>
- Li, X., Zhou, Y., Asrar, G. R., Imhoff, M., & Li, X. (2019). The surface urban heat island response to urban expansion: A panel analysis for the conterminous United States. *Science of The Total Environment*, 695, 133780.
- Liang, C., Zhou, Y., & Chen, J. (2019). The impact of urban morphology on surface temperature in arid environments. *Sustainable Cities and Society*, 48, 101527. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101527>
- Libyan Meteorological Authority. (2021). Annual climate report 2011-2021. Tripoli: LMA Publications.
- Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J. (2015). Remote sensing and image interpretation (7th ed.). Wiley.
- Liu, D., He, C., & Wang, X. (2020). Effects of urban morphology on microclimate: A case study of hot arid climate zones. *Building and Environment*, 182, 107107. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107107>
- Liu, X., Li, X., Chen, Y., Tan, Z., Li, S., & Ai, B. (2010). A new landscape index for quantifying urban expansion using multi-temporal remotely sensed data. *Landscape Ecology*, 25, 671–682.
- Liu, X., Zhang, Y., Xu, X., Wu, J., & Zhou, Y. (2020). Urban expansion and warming in Asian megacities. *Environmental Research Letters*, 15(3), 034020.

- Long, Y., & Liu, X. (2016). Multi-scale 3D urban morphology metrics for the description of urban thermal environment. *Remote Sensing of Environment*, 178, 123–136. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.063>
- Lu, D., & Weng, Q. (2007). A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. *International Journal of Remote Sensing*, 28(5), 823–870. <https://doi.org/10.1080/01431160600746456>
- Lu, D., Mausel, P., Brondizio, E., & Moran, E. (2004). Change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 25(12), 2365–2407.
- Lundberg, S. M., & Lee, S.-I. (2017). A unified approach to interpreting model predictions. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 30, 4765–4774.
- McGarigal, K., Cushman, S., & Ene, E. (2012). FRAGSTATS v4: Spatial pattern analysis program for categorical and continuous maps. *University of Massachusetts*.
- Myint, S. W., Wentz, E. A., Brazel, A. J., & Quattrochi, D. A. (2013). The impact of distinct anthropogenic and vegetation features on urban warming. *Landscape Ecology*, 28(5), 959–978.
- NASA Earthdata. (2024). Landsat data download.
- Newman, P., & Jennings, I. (2008). Cities as sustainable ecosystems: Principles and practices. *Island Press*.
- Oke, T. R. (1982). Boundary layer climates (2nd ed.). Routledge.
- Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1–24.
- Oliveira, S., Andrade, H., & Vaz, T. (2011). The cooling effect of green spaces as a contribution to improve thermal comfort in urban environments. *Building and Environment*, 46(11), 2186–2194. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.05.002>
- OpenStreetMap. (2024). OSM Geodata portal.
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen–Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(5), 1633–1644.
- Pendlebury, J. (2013). Conservation values, the authorised heritage discourse and the conservation-planning assemblage. *International Journal of Heritage Studies*, 19(7), 709–727. <https://doi.org/10.1080/13527258.2012.700448>
- QGIS Development Team. (2024). QGIS Geographic Information System (Version 3.34).



- Ratti, C., Raydan, D., & Steemers, K. (2003). Building form and environmental performance: Archetypes, analysis and an arid climate. *Energy and Buildings*, 35(1), 49–59.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1973). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. NASA Special Publication, 351, 309.
- Roy, D. P., Wulder, M. A., Loveland, T. R., et al. (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>
- Seto, K. C., Güneralp, B., & Hutyrá, L. R. (2012). Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(40), 16083–16088. <https://doi.org/10.1073/pnas.1211658109>
- Sharifi, A., & Yamagata, Y. (2014). Principles and criteria for assessing urban energy resilience: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 345–355. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.020>
- Shen, S., Huang, J., & Qiu, F. (2021). Coupling urban morphology with thermal comfort: A 3D perspective. *Building and Environment*, 196, 107751. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107751>
- Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C., & Paolini, L. (2004). Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment*, 90(4), 434–440.
- Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879–1900.
- Taha, H. (1997). Urban climates and heat islands: Albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. *Energy and Buildings*, 25(2), 99–103. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(96\)00999-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(96)00999-1)
- UNESCO. (2011). Recommendation on the Historic Urban Landscape. UNESCO World Heritage Centre.
- UN-Habitat. (2020). Libya Urban Profile – Tobruk.
- United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs (OCHA). (2023). *Libya Floods Situation Report*.
- USGS. (2019). Landsat Surface Temperature Science Products. U.S. Geological Survey.
- Vandewalle, D. (2012). A History of Modern Libya (2nd ed.). Cambridge University Press.

- 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\(03\)00112-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00112-8)
- Weng, Q. (2009). Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(4), 335–344. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.03.007>
- Weng, Q., Lu, D., & Schubring, J. (2004). Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment*, 89(4), 467–483. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.11.005>
- World Bank. (2022). Libya climate and environmental profile. Washington, DC: World Bank Publications.
- World Population Review. (2023). Tobruk Population 2023.
- Wright, J. (2007). A History of Libya. Hurst & Company.
- Yao, R., Zhang, X., & Wang, Y. (2020). Urban morphology and its impact on surface urban heat island: A case study in Wuhan, China. *Sustainable Cities and Society*, 56, 102084.
- Zhao, H., Zhang, Y., Xu, X., & Weng, Q. (2011). A study of urban heat island and its driving factors using Landsat ETM+ data and multiple linear regression. *Remote Sensing*, 3(2), 210–229.
- Zhao, Q., Zhang, M., & Chen, W. (2018). The effects of urban form on the urban heat island effect in China. *Sustainable Cities and Society*, 42, 822–830.
- Zhou, D., Zhao, S., Liu, S., Zhang, L., & Zhu, C. (2017). Surface urban heat island in China's 32 major cities: Spatial patterns and drivers. *Remote Sensing of Environment*, 195, 90–101. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.04.006>
- Zhou, W., Huang, G., & Cadenasso, M. L. (2022). Shape, size and distribution: Landscape configuration effects on land surface temperature. *Landscape Ecology*, 37(2), 293–309.