



T.C.
AKSARAY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

MAKİNE ÖĞRENMESİ MODELLERİ KULLANARAK
PS-INSAR VERİLERİNE DAYALI ZEMİN ÇÖKME
DUYARLILIK HARİTALARININ OLUŞTURULMASI:
AKSARAY İLİ ÖRNEĞİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Osman KORKMAZ

DANIŞMAN

Doç. Dr. Süleyman Sefa BİLGİLİOĞLU

AKSARAY, 2025

Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 222306421 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi Osman KORKMAZ tarafından hazırlanan “**MAKİNE ÖĞRENMESİ MODELLERİ KULLANARAK PS-INSAR VERİLERİNE DAYALI ZEMİN ÇÖKME DUYARLILIK HARİTALARININ OLUŞTURULMASI: AKSARAY İLİ ÖRNEĞİ**” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Harita Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Süleyman Sefa BİLGİLİOĞLU

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Üye: Dr. Öğretim Üyesi Cemil GEZGİN

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Üye: Dr. Öğretim Üyesi Ahmet Tarık TORUN

Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Tez Savunma Tarihi: 23.01.2025

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....
Prof. Dr. Fazliye KARABÖRK
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

DOĞRULUK BEYANI

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışmayı, akademik kurallara ve bilimsel etik, ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın yazdığımı, yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden olduğunu, çalışmamda kullandığım verilerin orijinalliğini ve her türlü intihalden uzak olduğunu beyan ederim.

Enstitü tarafından belli bir zamana bağlı olmaksızın, tezimle ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildiririm.

Osman KORKMAZ

TEŞEKKÜR

Bu çalışma esnasında mesleki bilgi ve birikimiyle emeğini ve ilgisini esirgemeneyen, desteğini her zaman yanımda hissettiğim danışman hocam Doç. Dr. S. Sefa BİLGİLİOĞLU'na çok teşekkür ederim. Ayrıca çalışma süreci içerisinde değerli katkılarından dolayı Dr. Osman OKTAR'a ve Harita Mühendisliği Bölümü araştırma ve öğretim üyeleri tüm hocalarıma teşekkür ediyorum.

Aksaray AFAD ailesine katıldığım ilk andan itibaren bilgi birikimi ve tecrübeleriyle desteklerini esirgemeyen Aksaray İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü ve personelleri ile çok değerli mesai arkadaşlarım Jeofizik Mühendisi İbrahim ÇETİNE'e, Jeoloji Mühendisi Erkan YILDIRIM'a ve Jeoloji Mühendisi Ramazan CANSU'ya teşekkür ederim.

Hayatımın her anında yanımda olan, benim için hiçbir fedakârlığı esirgemeyen ve çalışmalarım esnasına manevi desteklerini her zaman hissettiğim annem, babam ve eşim Gönül KORKMAZ'a teşekkür ederim.

Osman KORKMAZ
AKSARAY, 2025

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
2. MATERYAL VE YÖNTEM.....	7
2.1 Çalışma Alanı	8
2.2 Aksaray Zemin Çökme Envanterinin PS-InSAR Yöntemi ile Oluşturulması 10	
2.3 Zemin Çökmesi Koşullandırma Faktörleri.....	27
2.3.1 Jeolojik faktörler.....	29
2.3.1.1 Litoloji.....	29
2.3.1.2 Faylara yakınlık	31
2.3.2 Hidrojeolojik faktörler	32
2.3.2.1 Yeraltı su seviyesi değişim hızı	32
2.3.2.2 Drenaj yoğunluğu.....	34
2.3.2.3 Akarsu aşındırma güç indeksi (AGİ).....	35
2.3.2.4 Topoğrafik nemlilik indeksi (TNİ)	36
2.3.3 Topoğrafik faktörler.....	37
2.3.3.1 Yükseklik	37
2.3.3.2 Eğim	38
2.3.3.3 Bakı	39
2.3.3.4 Eğrisellik	40
2.3.4 Antropojenik faktörler	41
2.3.4.1 Arazi kullanımı	41
2.3.4.2 Yola yakınlık.....	42
2.3.4.3 Kuyu yoğunluğu.....	43
2.3.4.4 Normalize edilmiş bitki örtüsü fark indeksi (NDVI).....	44
2.3.4.5 Yerleşim merkezlerine yakınlık.....	45
2.4 Faktör Seçimi	46
2.4.1 Çoklu doğrusallık (Multicollinearity) analizi	46
2.5 Zemin Çökmesi Duyarlılık Modelleri	48
2.5.1 Makine öğrenmesi	49
2.5.1.1 Uyarlanabilir güçlendirme (AdaBoost) algoritması.....	50
2.5.1.2 Aşırı gradyan artırma (XGBoost) algoritması	51
2.5.1.3 Hafif gradyan artırma (LightGBM) algoritması	52
2.5.1.4 Kategorik artırma (CatBoost) algoritması	52
2.5.1.5 Rastgele orman (RF) algoritması	53
2.5.2 Model performansı.....	54
2.5.3 Hiperparametre optimizasyonu.....	55
3. ARAŞTIRMA BULGULARI	57
3.1 Envanter Haritasının Oluşturulması	57
3.2 Koşullandırma Faktörlerinin Hazırlanması	65
3.3 Çoklu Doğrusallık Kontrolü	66
3.4 Pearson Korelasyon Matrisi Sonuçları	67
3.5 Modelin Oluşturulması.....	67

3.5.1 Hiperparametrelerin optimizasyonu	67
3.5.2 Frekans oranı	68
3.5.3 Modellerin performans sonuçları.....	70
3.5.4 Aksaray ili zemin çökmesi duyarlılık haritası	73
4. TARTIŞMA VE SONUÇLAR	80
KAYNAKLAR	88
ÖZGEÇMİŞ.....	106



YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNE ÖĞRENMESİ MODELLERİ KULLANARAK PS-INSAR VERİLERİNE DAYALI ZEMİN ÇÖKME DUYARLILIK HARİTALARININ OLUŞTURULMASI: AKSARAY İLİ ÖRNEĞİ

Osman KORKMAZ

**Aksaray Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Harita Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Doç. Dr. Süleyman Sefa BİLGİLİOĞLU

ÖZET

Bu çalışma, Aksaray ilindeki zemin çökme duyarlılığını makine öğrenimi (MÖ) yöntemleri ile değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Zemin çökme duyarlılık haritalarının oluşturulması için gerekli olan zemin çökmesi envanteri, geniş bir bölgeyi kapsayan arazi çalışmaları ile toplanması mümkün olmayan bir veri türüdür. Bu nedenle, bu çalışmada zemin çökmesi envanterin PS InSAR (Sabit Saçıcı İnterferometrik Sentetik Açıklıklı Radar) tekniği kullanılarak elde edilmesi amaçlanmıştır. Beş yıllık bir izleme sürecinde, iki farklı çerçeve için toplamda 80 Sentinel-1 uydu görüntüsü işlenmiş ve 63.437 PS noktası analiz edilmiştir. Zemin çökmesi duyarlılığını değerlendirmek amacıyla, litoloji, eğrisellik, eğim, bakı, yükseklik, yeraltı su seviyesi, drenaj yoğunluğu, kuyu yoğunluğu, Topografik Nem İndeksi (TNİ), Akış Gücü İndeksi (AGİ), arazi kullanımı, yerleşim yerine yakınlık, fay hattına yakınlık, yola yakınlık ve NDVI dahil olmak üzere toplam 15 koşullandırıcı faktör analiz edilmiştir. Bu faktörler, Random Forest, XGBoost, CatBoost, LightGBM ve AdaBoost gibi makine öğrenmesi algoritmalarına dahil edilmiştir. Modellerin karşılaştırılması sonucunda, %95 doğruluk oranı ile Random Forest algoritması en yüksek tahmin performansını göstermiştir. Ayrıca faktörlerin önem dereceleri analiz edilmiş ve litoloji, yükseklik, yeraltı su seviyesi değişimi ve arazi kullanımının zemin çökmesi üzerinde en önemli etkilere sahip olduğu belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, Aksaray ilinin Sultanhanı, Eski ve Merkez ilçelerinin yüksek ve çok yüksek zemin çökme riskine sahip olduğunu göstermektedir. Çalışma, yerel yönetimler için zemin çökmesi risklerini daha iyi anlamak ve etkin risk yönetimi stratejileri geliştirmek için önemli bir rehber sunmaktadır. Aynı zamanda, sürdürülebilir tarım stratejilerinin geliştirilmesi ve su kaynaklarının etkin yönetimi açısından da değerli veriler sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Makine Öğrenmesi, PS-INSAR, CBS, Zemin Çökmesi, Duyarlılık Haritası.

Ocak, 2025; 106 sayfa

M.Sc. THESIS

DEVELOPMENT OF LAND SUBSIDENCE SUSCEPTIBILITY MAPS BASED ON PS-INSAR DATA USING MACHINE LEARNING MODELS: THE CASE OF AKSARAY PROVINCE

Osman KORKMAZ

**Aksaray University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Geomatics Engineering**

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Süleyman Sefa BİLGİLİOĞLU

ABSTRACT

This study aims to evaluate land subsidence susceptibility in the Aksaray province using machine learning (ML) methods. The creation of land subsidence susceptibility maps requires a comprehensive inventory of land subsidence occurrences, which is challenging to obtain through fieldwork for large areas. Therefore, this study utilized the PS InSAR (Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar) technique to generate the subsidence inventory. Over a five-year observation period, 80 Sentinel-1A satellite images were processed for two distinct frames, resulting in the analysis of 63,437 PS points. To assess land subsidence susceptibility, 15 conditioning factors were analyzed, including lithology, curvature, slope, aspect, elevation, groundwater level, drainage density, well density, Topographic Wetness Index (TWI), Stream Power Index (SPI), land use, proximity to settlements, proximity to fault lines, proximity to roads, and NDVI. These factors were incorporated into machine learning algorithms such as Random Forest, XGBoost, CatBoost, LightGBM, and AdaBoost. Among these models, Random Forest demonstrated the highest predictive performance with an accuracy of 95%. Furthermore, feature importance analysis revealed that lithology, elevation, groundwater level change, and land use had the most significant impact on land subsidence. The findings indicate that Sultanhanı, Eskişehir, and the central districts of Aksaray are at high and very high risk of land subsidence. This study provides valuable insights for local governments to better understand land subsidence risks and develop effective risk management strategies. Additionally, it offers critical data for advancing sustainable agricultural practices and efficient water resource management.

Keywords: Machine Learning, PS-INSAR, GIS, Land Subsidence, Susceptibility Map.

January, 2025; 106 Pages

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. İş akış şeması	7
Şekil 2.2. Çalışma alanı haritası.....	10
Şekil 2.3. Elektromanyetik spektrumun.....	11
Şekil 2.4. SLR sistemi geometrisi.....	12
Şekil 2.5. SLR sistemlerindeki azimut ve menzil çözünürlükleri.....	13
Şekil 2.6. Dalga boylarının nesne üzerine etkisi.....	14
Şekil 2.7. a) L Band Görüntüsü b) X Band Görüntüsü	15
Şekil 2.8. Yatay (horizontal) ve düşey (vertical) polarizasyon.....	15
Şekil 2.9. Yapay açıklıklı radar geometrisi.....	16
Şekil 2.10. Tekrarlı geçiş interferometrisini açıklayan şematik çizim.	17
Şekil 2.11. Faz ve genlik değerlerinden interferogram oluşumu.	19
Şekil 2.12. DInSAR deformasyon ölçümü şeması	21
Şekil 2.13. Kararlı piksellerin seçilmesi	23
Şekil 2.14. Sentinel-1A uydusu 119 ve 124 iz numaralı çerçeve alanı ve coğrafi kapsamı.....	24
Şekil 2.15. a) 124 iz numaralı çerçeveye ait görüntüler ve b) 119 iz numaralı çerçeveye ait görüntülerin zaman ve dikey taban çizgisi grafiği	26
Şekil 2.16. Uydu bakış açısı doğrultusunda (dLOS) belirlenen yer değiştirmenin, gerçek yer değiştirme (d) ile ilişkisi.....	27
Şekil 2.17. Aksaray litoloji haritası	31
Şekil 2.18. Faya yakınlık haritası.....	32
Şekil 2.19. Yeraltı su seviyesi değişim hızı.	34
Şekil 2.20. Drenaj yoğunluğu haritası.....	35
Şekil 2.21. Aksaray AGİ haritası.	36
Şekil 2.22. Aksaray TNİ haritası.....	37
Şekil 2.23. Aksaray yükseklik haritası.....	38
Şekil 2.24. Aksaray eğim haritası.	39
Şekil 2.25. Aksaray bakı haritası.	40
Şekil 2.26. Aksaray eğrisellik haritası.	41
Şekil 2.27. Aksaray arazi kullanımı haritası.	42
Şekil 2.28. Aksaray yola yakınlık haritası.	43
Şekil 2.29. Aksaray kuyu yoğunluk haritası.	44
Şekil 2.30. Aksaray NDVI haritası.	45
Şekil 2.31. Aksaray yerleşim merkezlerine yakınlık.	46
Şekil 3.1. Çerçeve iz numarası 119, bölüm IW1'in LOS doğrultusunda PS nokta a) yıllık hızları b) yıllık hızların standart sapma değerleri.	58
Şekil 3.2. Çerçeve iz numarası 119, bölüm IW2'nin LOS doğrultusunda a) yıllık hızlar b) yıllık hızların standart sapma değerleri.....	59
Şekil 3.3. Çerçeve iz numarası 119, bölüm IW3'ün LOS doğrultusunda a) yıllık hızlar b) hızların standart sapma değerleri.	60
Şekil 3.4. Çerçeve iz numarası 124, bölüm IW2'nin LOS doğrultusunda a) yıllık hızlar b) yıllık hızların standart sapma değerleri.....	61
Şekil 3.5. Çerçeve iz numarası 124, bölüm IW3'ün LOS doğrultusunda a) yıllık hızlar b) yıllık hızların standart sapma değerleri.....	61
Şekil 3.6. Aksaray ili PS noktalarının LOS doğrultusunda a) yıllık hızları b) yıllık hızların standart sapma değerleri.....	62
Şekil 3.7. PS noktalarının bulunduğu bir bölgede arazi incelemesi.	63
Şekil 3.8. Zemin çökme alanların hava fotoğrafları	64

Şekil 3.9. Zemin çökme envanter haritası.....	65
Şekil 3.10. Korelasyon matrisi.....	67
Şekil 3.11. Model performans karşılaştırması.	71
Şekil 3.12. Algoritmalara ait hata matrislerinin karşılaştırılması.	72
Şekil 3.13. Faktör önem dereceleri.	73
Şekil 3.14. RF ile Aksaray zemin çökmesi duyarlılık haritası.....	74
Şekil 3.15. CatBoost ile Aksaray zemin çökmesi duyarlılık haritası.....	75
Şekil 3.16. LightGBM ile Aksaray zemin çökmesi duyarlılık haritası.....	75
Şekil 3.17. XGBoost ile Aksaray zemin çökmesi duyarlılık haritası.	76
Şekil 3.18. AdaBoost ile Aksaray zemin çökmesi duyarlılık haritası.....	76
Şekil 3.19. Modellerin duyarlılık haritasında sınıfların kapladığı alanların karşılaştırılması.	77
Şekil 3.20. Modellerin duyarlılık sınıfları ile envanter verilerinin uyumu.	77



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. 119 iz numaralı SAR görüntülerinin çekim tarihleri.	25
Çizelge 2.2. 124 iz numaralı SAR görüntülerinin çekim tarihleri.	25
Çizelge 2.3. Zemin çökmesi duyarlılık haritası için kullanılan koşullandırma	28
Çizelge 3.1. Koşullandırma faktörleri VIF ve TOL değerleri	66
Çizelge 3.2. GridSearch yöntemi kullanılarak optimize edilen hiperparametreler... ..	68
Çizelge 3.3. Frekans oranı sonuçları	68
Çizelge 3.4. Model performans karşılaştırması	71



SİMGELER VE KISALTMALAR

AdaBoost	Adaptif Güçlendirme
AHP	Analitik Hiyerarşi Prosesi
BRT	Güçlendirilmiş Regresyon Ağaçları
CatBoost	Kategorik Güçlendirme
CBS/GIS	Coğrafi Bilgi Sistemleri
DEM	Dijital Yükseklik Modeli
DInSAR	Diferansiyel İnterferometrik Sentetik Açıklıklı Radar
DSİ	Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü
EBF	Kanıtsal İnanç Fonksiyonu
ESA	Avrupa Uzay Ajansı
FR	Frekans Oranı
GLM	Genelleştirilmiş Doğrusal Model
GPS	Küresel Konumlandırma Sistemi
IDW	Ters Ağırlıklı Uzaklık Enterpolasyonu
InSAR	İnterferometrik SAR
KKH	Konya Kapalı Havzası
LightGBM	Hafif Gradyan Güçlendirme Makinesi
LIDAR	Işık Algılama ve Menzil Ölçümleme
MaxEnt	Maksimum Entropi
MÖ	Makine Öğrenimi
MÖA	Makine Öğrenimi Algoritmaları
NDVI	Normalize Edilmiş Bitki Örtüsü Fark İndeksi
NIR	Yakın Kıızıl Ötesi
OOB	Out-of-Bag
PS	Sabit Saçıcı
PS-InSAR	Sabit Saçıcı İnterferometrik Sentetik Açıklıklı Radar
RED	Kırmızı Işık Dalga Boyu
RF	Rastgele Orman (Random Forest)
SLC	Tek Bakışlı Karmaşık (Veri)
AGİ	Standart Yağış İndeksi
SYM	Sayısal Yüzey Modeli (Dijital Yüzey Modeli)
TGFZ	Tuz Gölü Fay Zonu
TOL	Tolerans
TNİ	Topoğrafik Nemlilik İndeksi
USGS	Amerikan Jeolojik Araştırma Merkezi Dünya Kaşifi
VIF	Varyans Şişirme Faktörü
WoE	Kanıtı Dayalı Ağırlık
XGBoost	Aşırı Gradyan Güçlendirme

1. GİRİŞ

Zemin çökmesi, yeryüzeyinin genellikle alçalarak zaman içinde düşey hareketle kademeli, yavaş veya ani şekilde gelişebilen bir yüzey hareketidir. Bu oluşumların bazıları doğal sebeplerden kaynaklanırken, bazıları ise insan faaliyetlerinden kaynaklanmaktadır. (Bianchini vd., 2019; Ranjgar vd., 2021; Xue vd., 2005). İnsan kaynaklı faktörlerin başında, yeraltı su kaynaklarının plansız ve aşırı kullanımı yer almaktadır. Ayrıca tarımsal faaliyetler, yerleşim alanlarındaki aşırı yapılaşma (konut alanları, sanayi alanları, yol ve tünel yapıları vb.), yeraltı kaynaklarının (maden, petrol ve doğalgaz) çıkarılması gibi faaliyetler de etkili olmaktadır (Fiaschi vd., 2017; Lee ve Park, 2013; Mohammady vd., 2019b).

Yerleşim alanlarında artan su kullanım gereksinimi özellikle alüvyon, deniz veya göl çökeltilerinin iri taneli su içeren tabakalarında suyun çekilmesi, yüzey basıncına mukavemetinin azalmasına neden olmaktadır. Bu durum, sıkıştırılabilir tabakaların oluşumuna zemin hazırlayarak zemin çökmesinin önemli bir etmeni olarak karşımıza çıkmaktadır (Mohammady vd., 2019b). Kentsel alanlardaki hızlı büyüme ise planlamalarda zemin özelliklerinin göz ardı edilmesine ve aşırı yük binmesine neden olmaktadır. Bu durum, zemin çökmesini kaçınılmaz bir sonuç haline getirmektedir. Kentleşme ve sanayileşmeye yönelik hızlı gelişmeler, birçok sanayi şehrinde zemin çökmelerinin her geçen gün artmasına neden olmaktadır. Bu bölgelerdeki zemin çökmesi, ciddi çevre sorunlarıyla birlikte ekonomiye de büyük zararlar vermektedir (Buckley vd., 2003; Holzer ve Johnson, 1985; Hu vd., 2019; Machowski vd., 2016; Ng vd., 2012; Tao vd., 2025; Yi vd., 2025).

Zemin çökmesi, kentsel alanlarda meydana geldiği gibi tarımsal faaliyetlerin oldukça yoğun olduğu kırsal alanlarda da sıklıkla görülmektedir. Fiziksel tarım faaliyetlerinin yanı sıra tarım ürünlerinin yetiştirilmesinde plansız ve rastgele davranış, bölgenin iklim şartlarının ve litolojisinin göz ardı edilmesi zemin çökmesini tetiklemektedir. Su gereksinimi fazla olan ürünlerin kurak coğrafyada yetiştirilmesi yeraltı su kaynaklarıyla mümkündür. Bu durum su kaynaklarının hızla tüketilmesiyle birlikte kırsal alanlarda yeraltı su seviyesinin hızla düşmesine ve zemin çökmesine neden olmaktadır (Çomut, 2010; Foroughnia vd., 2019).

Zemin çökme hareketinin başlıca doğal sebepleri ise volkanik hareketler, karbonatlı kayaçların çözülmesi ile tortu sıkışması ve fayların tektoniği olarak sıralanabilir (Bui vd., 2018; Modoni vd., 2013; Stanley ve Corwin, 2013).

Bir fayın hareketlenmesi, yer kabuğunun derinliklerinden başlayarak yeryüzüne ulaşır ve şiddetli sarsıntılar ile yeryüzünde kalıcı deformasyonlara yol açabilir. Fay kırıkları zaman zaman yeryüzüne kadar ulaştığı durumlarda zemin diferansiyel hareketi görünmektedir. Zemin diferansiyel hareketi, depremin özelliklerine yani büyüklüğüne, faylanma türüne, süresine ve zemin litolojisine bağlı olarak, deprem nedeniyle tetiklenen zemin çökmesine neden olmaktadır (Bray ve Travasarou., 2007; Tokimatsu ve Seed, 1987).

Volkanik faaliyetler sırasında etrafa yayılan lav akıntıları, yüzeyde bir örtü katmanı oluşturmasıyla birlikte deformasyon sürecinin uzun yıllar boyunca devam etmesine neden olmaktadır (Briole vd., 1997; Schaefer vd., 2016; Stevens vd., 2001). Bu süreç, lav tabakasında gerçekleşen soğuma ve katılaşmaya bağlı olarak ortaya çıkan termal büzülme, gaz kabarcıklarının ve boşlukların sıkışması ile devam eder. Ayrıca yüzey yükünün etkisiyle deformasyon meydana gelmektedir (Schaefer vd., 2016; Stevens vd., 2001). Bu tür deformasyonlar, lav akıntısı alanlarında ve çevresindeki bölgelerde zemin çökmeleri şeklinde gözlemlenmektedir (Chen vd., 2018).

İklimsel değişiklikler nedeniyle kuraklaşan alanlarda yeraltı su seviyesinde ciddi düşüşler gözlemlenmektedir. Su seviyesindeki düşmeler, akifer veya rezervuarlardaki boşluk basıncının düşmesi ile örtü tabakasındaki efektif gerilimin artmasına neden olur. Bu durum, tortulardaki sıkışmalar ile zemin çökmesine neden olmaktadır (Gambolati vd., 1996). Yeraltı su akım yönlerinin veya seviyelerinin değişimi ile su içerisindeki kimyasallar da değişir. Bu değişim, çözülebilen kayaçların çözülme miktarlarını ve sürecini doğrudan etkiler. Çözülen kayaçlar boşluklar oluşturur ve yüzeyde çökmelere sebep olmaktadır (Fidelibus vd., 2011; Selçuk, 2018).

Zemin çökmesi, hem kırsal alanlarda hem de kentsel alanlarda birçok hasara yol açmaktadır. Binalarda oluşturduğu hasarlar, yollarda ve alt yapılarda kasılmalar, çatlaklar veya kırıklar, planlanan ekonomik ömrünü bir hayli kısaltmakla kalmayıp, kesintilere uğratmakta ve yerel yönetimlere maliyet, zaman ve iş gücü bakımından önemli ölçüde ek yük oluşturmaktadır (Abidin vd., 2013; Kok ve Costa, 2021). Zemin

çökmesine yol açan faktörlerin belirlenmesi ve zemin çökmesi risk değerlendirmesinin yapılması, engellemeye yönelik tedbirlerin alınmasının yanı sıra gelecekteki planlama ve politikalar açısından yerel yönetimler için önem arz etmektedir (Sardooi vd., 2021). Risk değerlendirmesi sürecinde, zemin çökmelerinin mekânsal dağılımını ve olasılıklarını belirleyen duyarlılık haritalarının oluşturulması, son derece önemlidir.

Zemin çökmesi duyarlılık haritalarının oluşturulması için kapsamlı bir zemin çökmesi envanterine ihtiyaç duyulmaktadır. Zemin çökmesi envanteri, yersel yöntemler ve uzaktan algılama teknikleriyle tespit edilebilmektedir. Zemin çökmesinin doğası ve etkileyen faktörlerin sürekliliği, mekânsal ve zamansal dağılımının izlenmesi önemli bir araştırma sorunu oluşturmaktadır (Khan vd., 2022). Geleneksel yöntemler, arazi gözlemleri ve Küresel Navigasyon Uydu Sistemi (Global Navigation Satellite System - GNSS) verileri hassas ve güvenilir sonuçlar vermesine rağmen, geniş alanlarda örnekleme yoğunluğunun sınırlı olması, yüksek maliyet ve zamansal gereksinimler gibi zorluklarla karşılaşmaktadır (Luo vd., 2014). Uzaktan algılama tekniklerindeki gelişmeler, bu problemin çözümüne yönelik önemli bir yöntem sunmuştur. Özellikle geniş alanlardaki deformasyonların santimetre düzeyinde hassasiyetle gözlemlenebilmesini sağlayan DInSAR (Diferansiyel İnterferometrik Sentetik Açıklıklı Radar) tekniği, deformasyon analizinde yenilikçi bir yaklaşım ortaya koymuştur (Gabriel vd., 1989). Ancak, DInSAR tekniğinin uygulanabilirliğini sınırlayan mekânsal-zamansal korelasyon kaybı ve atmosferik bozulmalar gibi sorunlar, yöntemin daha etkin kullanımını engelleyen önemli faktörler arasında yer almaktadır (Zebker vd., 1997). Bu sınırlamaları aşmak amacıyla geliştirilen PS (Sabit Saçıcı-Persistent Scatterer) tekniği, milimetrik hassasiyetle deformasyon analizine olanak tanımış ve geniş alanlardaki hareketlerin güvenilir bir şekilde tespit edilmesini sağlamıştır (Ferretti vd., 2001). PS-InSAR (Sabit Saçıcı İnterferometrik Sentetik Açıklıklı Radar) yöntemi, sunduğu yüksek doğruluk ve güvenilirlik sayesinde, literatürde yapılan birçok çalışmada yaygın olarak kullanılmıştır (Chai vd., 2024; Foroughnia vd., 2019; Khan vd., 2022; Li vd., 2022; Maghsoudi vd., 2018; Oktar, 2023). Bu yöntem, zemin çökmesi duyarlılık haritalarının üretilmesi çalışmalarında envanterin belirlenmesi ve mekânsal dağılımının tespiti için önemli bir veri kaynağı olarak birçok araştırmada kullanılmıştır (Chai vd., 2024; Ranjgar vd., 2021; Zhao vd., 2024b).

Duyarlılık haritalarının üretilmesi, farklı kaynaklardan gelen yoğun mekânsal verilerin entegrasyonunu içeren oldukça karmaşık bir süreçtir. Bu bağlamda, farklı veri setlerinin kullanımı ve bunların etkin işlenmesi gerekmektedir. Bu verilerin işlenmesi ve bilgi çıkarımı, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS)'nin sunduğu avantajlarla mümkün hale gelmektedir (Yılmaz ve Bilgilioğlu, 2023). Ayrıca MÖ (Makine Öğrenmesi) ile elde ettiğimiz faktörler arası ilişkiler ve ağırlıklar, CBS yaklaşımı ile farklı faktörlerle desteklenen çeşitli haritaların üretilmesini sağlamaktadır.

Zemin çökmesi duyarlılık haritalarının hazırlanmasında, mevcut yöntemlerin bu alana uyarlanarak kullanımı sağlanmıştır. Bu bağlamda, araştırmacılar tarafından istatistiksel ve MÖ gibi veri güdümlü modeller yaygın bir şekilde kullanılmıştır (Ebrahimi vd., 2020; Tsangaratos vd., 2019). İstatistiksel modeller, zemin çökmesine neden olan faktörler arasında doğrusal ilişkiler kurarken, MÖ modelleri nedensel değişkenler arasında doğrusal olmayan ilişkileri de değerlendirerek avantajlı bir model ortaya çıkarmaktadır (Sardooi vd., 2021). Zemin çökmesi duyarlılık haritası üretiminde; Frekans Oranı (Frequency Ratio - FR) (Na vd., 2021), Kanıt Ağırlıklı Model (Weight of Evidence - WoE) (Oh ve Lee, 2010), Maksimum Entropi Modeli (Maximum Entropy - MaxEnt) (Abdollahi vd., 2019b), Kanıtsal İnanç Fonksiyonu (Evidential Belief Function - EBF) (Pradhan vd., 2014), Genel Doğrusal Model (Generalized Linear Model – GLM) (Arabameri vd., 2021) gibi istatistiksel modeller yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, bu yöntemler doğrusal ilişkilere dayandığından, karmaşık ve doğrusal olmayan ilişkilerin tam olarak değerlendirilememesi gibi sınırlamalara sahiptir. Bu durum, istatistiksel modellerin doğruluğunu ve genelleme yeteneğini olumsuz etkileyebilmektedir. Bu sınırlamaları aşmak için zemin çökmesi duyarlılık haritası üretiminde MÖ modellerini kullanmak daha etkili sonuçlar sağlamaktadır. Zemin çökme duyarlılık haritası üretiminde farklı MÖ modelleri kullanılmıştır; Güçlendirilmiş Regresyon Ağaçları (Boosted Regression Trees - BRT) (Zamanirad vd., 2020), Rastgele Orman Algoritması (Random Forest - RF) (Zhao vd., 2024b), Destek Vektör Makinesi (Support Vector Machine - SVM) (Mohammady vd., 2019a), Bayes Algoritması (Bayesian Algorithm) (Oh vd., 2019), Yapay Sinir Ağları (Neural Networks - ANN) (Lee ve Park, 2012), Aşırı Gradyan Artırma Algoritması (Extreme Gradient Boosting - XGBoost) (Shi vd., 2020), Hafif Gradyan Artırma Algoritması (Light Gradient Boosting Machine - LightGBM) (Ahmed vd., 2024), Kategorik Artırma Algoritması (Categorical Boosting - CatBoost)

(Wan vd., 2024), Uyarlamalı Artırma Algoritması (Adaptive Boosting - AdaBoost) (Nhu vd., 2020) bulunmaktadır.

Literatürde, zemin çökmesi duyarlılık haritalarının hazırlanmasında PS-InSAR gibi uzaktan algılama yöntemleri yaygın bir şekilde kullanılmış ve bu yöntemlerle zemin çökmesinin tespiti üzerine önemli katkılar sağlanmıştır (Ferretti vd., 2001; Hooper vd., 2007; Maghsoudi vd., 2018; Ranjgar vd., 2021). KKH (Konya Kapalı Havzası), su kaynaklarının aşırı kullanımı, yoğun tarımsal faaliyetler ve hızlı kentleşme gibi insan kaynaklı etkiler nedeniyle zemin çökmesi riskine açık bir bölge konumundadır. Yeraltı su seviyesindeki ciddi düşüşler ve buna bağlı olarak meydana gelen zemin çökmelerine sebep olmaktadır (Gezgin, 2022). Ayrıca zemin çökmesinin mekânsal ve zamansal tespitine yönelik bazı çalışmalarda bölgede zemin çökmesinin olduğu ortaya konulmuştur (Çomut, 2010, 2016; Gezgin, 2022; Karşlıoğlu vd., 2020; Orhan, 2021). Ancak, KKH içerisinde kalan bölgeler için yapılan çalışmalarda duyarlılık analizlerinin ve bölgeye özgü duyarlılık haritalarının bulunmadığı görülmektedir. Bu durum, KKH'nin zemin çökmesi potansiyelinin mekânsal olarak değerlendirilmesi ve risklerin yönetilmesi açısından önemli bir eksiklik oluşturmaktadır.

Bu çalışmada, KKH'sı içerisinde yer alan, yoğun tarım faaliyetleri ve kentsel yapının her geçen gün hızla büyümesiyle dikkat çeken Aksaray İli için zemin çökmesi duyarlılık haritalarının üretilmesi amacıyla PS-InSAR yöntemiyle elde edilen envanter ve MÖ teknikleri bir araya getirilmiştir. Çalışmada kullanılan yöntemler, ağaç tabanlı ve topluluk öğrenme (ensemble learning) tekniklerini içermektedir. RF, XGBoost, CatBoost, AdaBoost ve LightGBM algoritmalarının zemin çökmesi duyarlılık analizlerindeki performansları karşılaştırılmıştır. Literatürde, zemin çökmesi duyarlılık analizinde kullanılarak bu algoritmaların etkinliğini kıyaslayan kapsamlı bir analiz bulunmadığı ve bu modellerin çalışma bölgesi özelinde uygulanmasına yönelik bir çalışma olmadığı görülmektedir. Çalışmanın amacı, literatürdeki bu eksiklikleri gidermek, yöntemlerin doğruluğunu değerlendirmek ve bölgede zemin çökmesi duyarlılık haritalarını üretmektir. Elde edilen sonuçlar hem literatüre katkı sağlamakta hem de yerel yönetimlerin bölgesel risk yönetim stratejileri geliştirmesi için önemli bir rehber sunmaktadır.

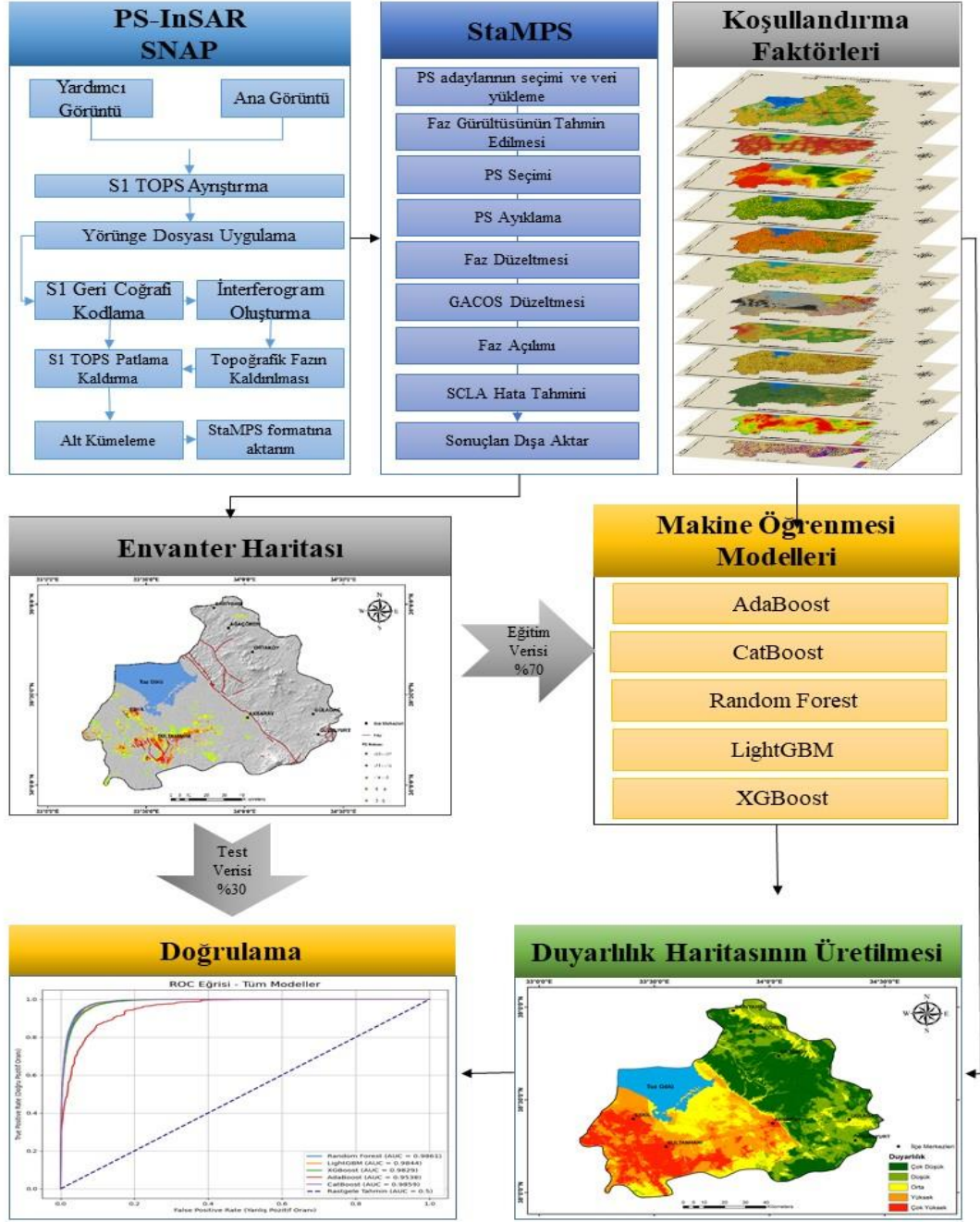
Tez kapsamında, Aksaray ili üzerinde MÖ modelleri kullanılarak zemin çökmesi duyarlılık haritalarının üretilmesi hedeflenmiş ve bu amaç doğrultusunda detaylı ve kapsamlı analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın temel aşamalarından biri, PS-InSAR yöntemiyle elde edilen zemin çökmesi envanterinin oluşturulmasıdır. Bu envanter, zemin çökmesinin mekânsal dağılımı ve zamansal değişimini tespit etmek amacıyla kullanılmış ve makine öğrenimi modellerinin eğitimi için bağımlı değişken olarak işlev görmüştür. Zemin çökmesine etki eden faktörler (arazi kullanımı, bakı, drenaj yoğunluğu, eğim, eğrisellik, faya yakınlık, kuyu yoğunluğu, litoloji, NDVI (normalleştirilmiş fark bitki örtüsü indeksi), AGİ (Akarsu Güç Endeksi), TNİ (Topografik Nemlilik Endeksi), yeraltı su seviyesi değişim hızı, yerleşim merkezlerine yakınlık, yola yakınlık ve yükseklik) literatür araştırmaları sonucunda belirlenmiştir. Faktörlerin veri uyumluluğunu ve ilişkilerini değerlendirmek amacıyla Pearson korelasyon yöntemiyle bir korelasyon matrisi oluşturulmuş ve VIF (Variance Inflation Factor) ile TOL (Tolerans) değerleri hesaplanmıştır. Bu analizler sonucunda faktörler arasında ciddi bir bağımlılık bulunmamış ve tüm faktörler modellemede kullanılmıştır. Bir diğer önemli aşama, MÖ yöntemlerini kullanarak zemin çökmesi duyarlılık analizinin yapılmasıdır. Çalışmada, RF, XGBoost, CatBoost, LightGBM ve AdaBoost olmak üzere beş farklı MÖA (Makine Öğrenimi Algoritması) kullanılmıştır. Modellerin eğitilmesi ve doğruluğunun değerlendirilerek güvenilir sonuçlar elde edilmesi için veri seti, %70 eğitim ve %30 test verisi olarak ikiye ayrılmıştır. Eğitim verisi, modellerin öğrenmesi için kullanılmıştır. Test verisi ise modellerin performansını bağımsız bir şekilde doğrulamak için kullanılmıştır. Her modelin performansı, GridSearchCV yöntemi ile hiperparametre optimizasyonu yapılarak değerlendirilmiş ve en iyi tahmin kapasitesine ulaşması sağlanmıştır. Optimizasyonu tamamlanan modellerin doğruluğu karşılaştırılmış ve sonuçlar incelenmiştir. Bu analiz sonucunda, Aksaray ili için beş farklı zemin çökmesi duyarlılık haritası üretilmiş ve karşılaştırılmıştır. Çalışma, bölgedeki zemin çökmesi duyarlılık analizinde kullanılan MÖ modellerinin güvenilirliğini artırmakta ve modeller arası karşılaştırma yapmaya olanak tanımıştır. Ayrıca bu çalışma, Aksaray ili için kapsamlı bir zemin çökmesi duyarlılık haritaları üreterek, bölgesel düzeyde eksikliği hissedilen analizleri tamamlamış ve literatüre önemli bir katkı sağlamıştır. Üretilen duyarlılık haritaları, yerel yönetimlerin risk yönetim stratejileri geliştirmesi için değerli bir kaynak sunmaktadır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, zemin çökmesi duyarlılık haritasının MÖ modelleri ile oluşturulması için kullanılan veri kaynakları, yöntemler ve analiz süreçleri detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Araştırmanın temel bileşenleri; zemin çökmesi envanterinin oluşturulması, etki eden faktörlerin belirlenerek hazırlanması ve MÖ modellerinin uygulanması aşamalarından oluşmaktadır. Ayrıca elde edilen sonuçların doğruluğunun değerlendirilmesi ve zemin çökmesi potansiyelini mekânsal olarak gösteren duyarlılık haritalarının üretilmesi de çalışmanın önemli aşamalarını kapsamaktadır.

Zemin çökmesi envanteri, PS-InSAR yöntemiyle farklı zaman aralıklarında alınan radar görüntülerinin analiz edilmesi ve yüzey deformasyonlarının milimetre hassasiyetinde ölçülmesiyle oluşturulmuştur. Bu envanter, duyarlılık analizi için belirlenen 15 koşullandırıcı faktörle ilişkilendirilmiş ve bu faktörlerin zemin çökmesi üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir. Koşullandırıcı faktörler; jeolojik, hidrojeolojik, topografik ve antropojenik olmak üzere hem doğal hem de insan kaynaklı etkenleri kapsamaktadır. Duyarlılık analizinde, bu faktörlerin zemin çökmesi üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla RF, XGBoost, CatBoost, AdaBoost ve LightGBM algoritmaları kullanılmıştır. Her bir algoritma, koşullandırıcı faktörleri modelleyerek en uygun sonuçları elde etmek için uygulanmıştır. Algoritmaların performansı; doğruluk, duyarlılık ve hata metrikleri kullanılarak karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, CBS ile mekânsal analizlere dönüştürülerek zemin çökmesi duyarlılık haritalarının oluşturulmasında kullanılmıştır.

Bu tez çalışmasında izlenen yöntem ve aşamalar, Şekil 2.1'de gösterilen iş akışı diyagramında sistematik olarak sunulmuştur. Bu diyagram, veri toplama, analiz ve değerlendirme süreçlerini kapsamlı bir şekilde özetlemektedir.



Şekil 2.1. İş akış şeması.

2.1 Çalışma Alanı

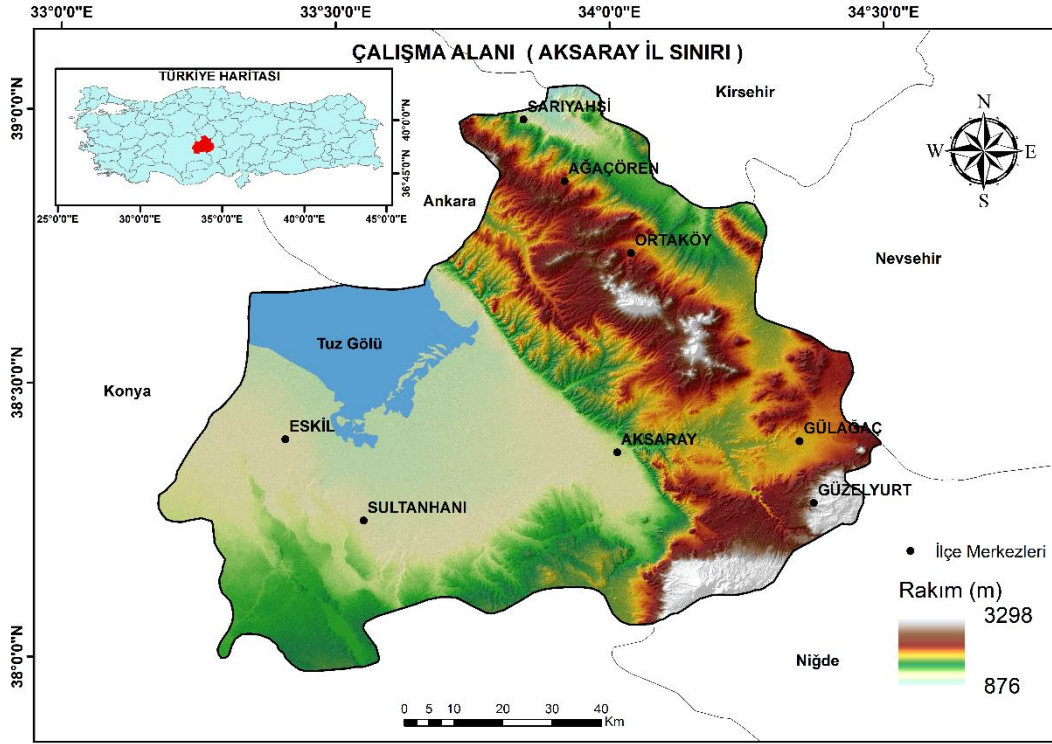
Bu çalışma, Türkiye'nin İç Anadolu Bölgesi'nde yer alan Aksaray ili sınırları içerisinde gerçekleştirilmiştir. Aksaray, yaklaşık $37^{\circ}58' - 39^{\circ}02'$ kuzey enlemleri ile $33^{\circ}10' - 34^{\circ}29'$ doğu boylamları arasında bulunmakta ve toplam yüzölçümü yaklaşık 7.700 km^2 'dir (Bilgilioğlu ve Bilgilioğlu, 2023). İl; kuzeydoğuda Kırşehir,

kuzeybatıda Ankara, batı ve güneybatıda Konya, doğuda Nevşehir ve güneydoğuda Niğde ile çevrilidir. Türkiye'nin coğrafi merkezine yakın konumu, ulaşım ve lojistik avantajlar sağlamasının yanı sıra, doğal ve beşeri unsurlar açısından zengin bir yapıya sahiptir. Bu özellikler sayesinde, her geçen gün gelişen ve hızla büyüyen bir şehir olarak dikkat çekmektedir.

Aksaray ili, karasal iklim özellikleri sergileyen bir bölgededir; yazları sıcak ve kurak, kışları ise soğuk ve kar yağışlıdır. Ancak, son yıllarda yağış miktarındaki belirgin azalma, iklim değişikliğinin etkilerinin gözlemlendiğine işaret etmektedir (Yayvan ve Ersoy, 2008). Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden elde edilen verilere göre, Ocak 2020 ile Aralık 2023 yılları arasında yıllık ortalama yağış miktarı (kg/m²) sırasıyla 366,6, 273,4, 276,8 ve 288,6 olarak kaydedilmiştir. Bu değerler, yağışların genel olarak azaldığını ve iklim değişikliğinin etkilerinin belirginleştiğini göstermektedir. İklim değişikliği, ilin zemin çökmesi ile ilgili yapılan araştırmalar için önemli bir çalışma alanı sunmaktadır.

Aksaray, Türkiye'nin en büyük ikinci gölü olan Tuz Gölü ve volkanik kökenli Hasan Dağı'na ev sahipliği yapmaktadır. Aksaray'ın yüzey şekilleri genellikle düz ve hafif eğimli ovalar ile dağlık alanlar arasında çeşitlilik göstermektedir. İlin orta kesimleri, kuzeyi ve güneyi geniş ovalarla kaplıdır. Güneyinde Obruk Platosu'nun uzantıları ve Aksaray Ovası yer almaktadır (Işık, 2018). İlin merkezini çevreleyen bölgelerde tarım arazileri geniş bir alan kaplarken, doğu ve kuzeydoğu kesimlerinde daha engebeli ve dağlık alanlar yer almaktadır. Aksaray'ın geniş ovalarında mısır, şeker pancarı ve yonca gibi tarım ürünleri yaygın olarak yetiştirilmektedir. Suyu yüksek derecede ihtiyaç duyan tarımsal faaliyetler, bölgedeki ekonomik faaliyetlerin temelini oluşturmaktadır. Özellikle Sultanhanı ve Eski gibi ilçelerde tarım, hem yerel halkın geçim kaynağı hem de ilin ekonomik yapısını etkileyen başlıca sektörlerden biri olarak öne çıkmaktadır. Buna ek olarak, sulama faaliyetlerinin büyük ölçüde yeraltı su kaynaklarına dayalı olması, bölgenin su yönetimini kritik bir öneme taşımaktadır.

Sonuç olarak, Aksaray ilinin topoğrafik, jeolojik ve beşeri özellikleri zemin çökmesi duyarlılık analizinde geniş bir yelpazesi ve mekânsal analiz olanağı sunmuştur. Şekil 2.2'de çalışma alanı haritası verilmiştir.



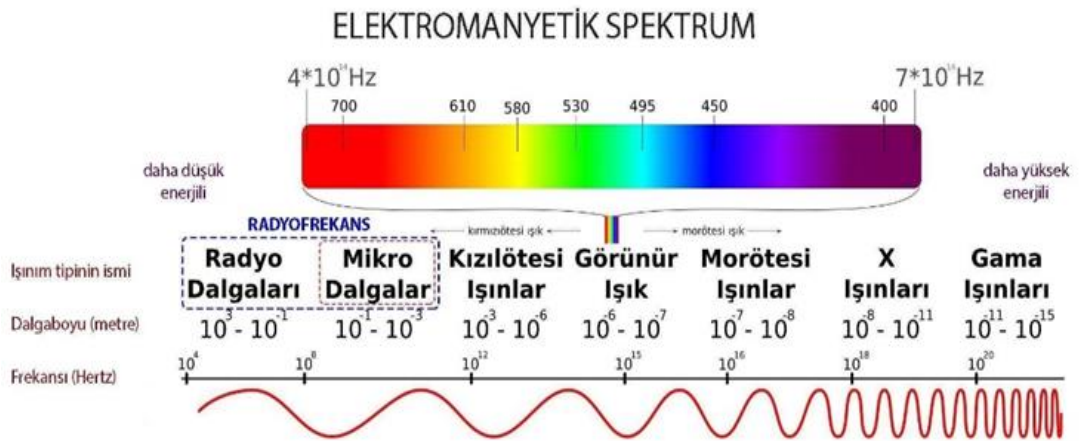
Şekil 2.2. Çalışma alanı haritası.

2.2 Aksaray Zemin Çökme Envanterinin PS-InSAR Yöntemi ile Oluşturulması

Zemin çökmelerinin tespitine yönelik SAR (Sentetik Açıklıklı Radar) verileri kullanılarak gerçekleştirilen ilk çalışma, Kaliforniya'daki Antilop Vadisi ve Mojave Çölü'nde uygulanmıştır. Geniş bir alanı kapsayan bu araştırmada, ERS-1 uydusundan elde edilen radar verileri kullanılarak 1993-1995 yıllarına ait görüntüler analiz edilmiştir. Çalışma sonucunda, yeraltı su seviyesindeki azalmaya bağlı olarak meydana gelen zemin çökmesinin yer yer 2 metreye kadar ulaştığı tespit edilmiştir. Ayrıca, elde edilen bulguların GPS ve hassas nivelman gibi jeodezik ölçüm teknikleriyle elde edilen verilerle tutarlılık gösterdiği belirlenmiştir. (Galloway vd., 1998). Las Vegas Vadisi'nde gerçekleştirilen bir başka çalışmada, uzun yıllar boyunca jeodezik yöntemlerle izlenen zemin çökmeleri, InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) tekniği kullanılarak analiz edilmiştir. 1992-1999 yılları arasında yaklaşık 40 adet interferogram değerlendirilmiş, tespit edilen zemin çökmeleri jeodezik yöntemlerle karşılaştırılarak doğruluk analizi yapılmıştır (Hoffmann vd., 2001). Ayrıca, İran'ın Masshad Vadisi'nde InSAR, nivelman ve GPS teknikleri kullanılarak zemin çökmeleri incelenmiştir. 2003-2005 yılları arasında elde edilen uydu görüntülerinden 10 adet interferogram oluşturulmuş ve zemin çökme hızı 27

cm/yıl olarak belirlenmiştir. Elde edilen bu sonuçlar, GPS istasyonlarından elde edilen 22 cm/yıl çökme değerleriyle karşılaştırılmış ve yöntemin doğruluğu bir kez daha teyit edilmiştir. (Motagh vd., 2007). Bölgede InSAR ve GPS verilerini karşılaştırarak yapılan başka bir çalışma ise Tuz Gölü'nün kinematik analizidir. Yapılan analiz sonucu veriler arasındaki uyum, GNSS ve SAR görüntülerinin 2000 günlük zaman periyodunda aynı tepkileri vererek her iki yöntemin de tutarlılığını ortaya koymuştur (Gezgin, 2020). Büyük Menderes Grabeni'nde GNSS ve PS-InSAR yöntemleri ile deformasyon analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan inceleme sonucunda, GNSS yöntemiyle elde edilen veriler ile PS-InSAR yöntemiyle tespit edilen değerlerin %91 oranında örtüştüğü belirlenmiş ve bu durum, yöntemin yüksek doğruluk sağladığını ortaya koymuştur (Oktar, 2020). Struhár vd. (2022), tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, Çek Cumhuriyeti'nin Güney Moravya bölgesinde bulunan Tvrdonice yeraltı doğal gaz depolama alanındaki zemin hareketleri, PS-InSAR ve GNSS yöntemleriyle izlenmiştir. Çalışma, her iki yöntemin sonuçlarının tutarlı olduğunu göstermiştir.

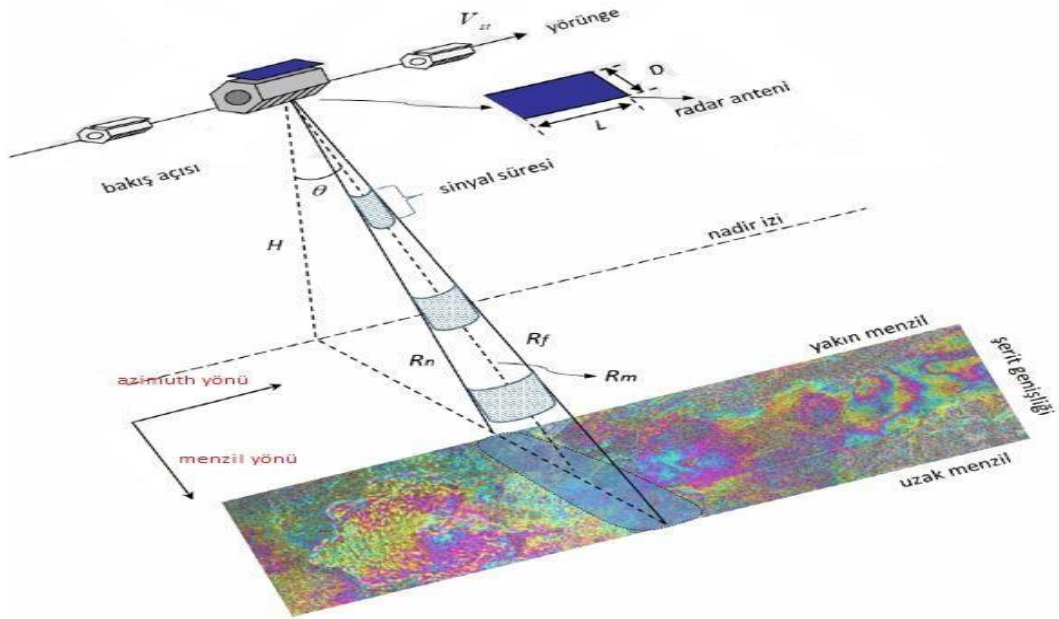
Uzaktan algılamada çeşitli frekans aralıkları kullanılmaktadır. Mikrodalga algılayıcılarının en yaygın örneği radar sistemleridir. Mikrodalga bölgesi, dalga boyu 10^{-1} ile 10^{-3} metre arasında değişen bir spektruma sahiptir (Şekil 2.3). Radarlar, aktif algılama sistemlerinin temel prensibine dayanır; bu prensibe göre, radar tarafından gönderilen darbeler, nesnelere yansır ve yansıyan sinyaller, radar algılayıcıları tarafından tespit edilir. (Hanssen, 2001).



Şekil 2.3. Elektromanyetik spektrumun (URL-1).

Verici, sistematik aralıklarla ardışık kısa patlamalar ile üretilen ve bir anten tarafından iletilen elektromanyetik dalgalar gönderir. Gönderilen dalgalar belirli bir enerji ile nesnelere çarpar. Nesnelere, bu enerjinin bir kısmını soğururken, kalan kısmını yansıtır veya saçar. Nesneden yansıyan veya geri saçılan bu enerji “yankı” olarak adlandırılmaktadır (Balık, 2004). Yankıyla geri dönen elektromanyetik enerjinin gücü, dijital olarak piksel değerlerine dönüştürülür ve bu değerler kullanılarak istenilen görüntüler oluşturulur (Akabalı, 2002). Görüntüler, hedef tarafından yansıtılan genlik ve faz bilgilerinin sayısal olarak kaydedilmesiyle oluşturulmaktadır. Faz bilgisi, hedefe olan uzaklığın belirlenmesinde kullanılırken, genlik bilgisi ise hedefin yansıtma özelliklerini tanımlamak için kullanılmaktadır (Akabalı, 2002; Orhan, 2018).

Radar sistemleri, sahip oldukları teknik özelliklere göre iki ana gruba ayrılmaktadır: Düzlemsel Göstergeli Radar ve Yan Bakışlı Radar (Side Looking Radar - SLR) (Şekil 2.4). SLR sistemleri ise kendi içinde iki farklı teknikle çalışmaktadır: Gerçek Açıklı Radar (Real Aperture Radar - RAR) ve Sentetik Açıklı Radar (Synthetic Aperture Radar - SAR) (Oktar, 2020).



Şekil 2.4. SLR sistemi geometrisi (Oktar, 2020).

SLR sistemleri, hedef alanında iki farklı çözünürlük türü sağlamaktadır (Şekil 2.5). Menzil (range) çözünürlüğü, bakış doğrultusundaki hedefin ayırt edilebilme yeteneğini ifade etmektedir (Denklem 2.1). Uydunun veya uçağın uçuş doğrultusuna

paralel konumlanan hedeflerin ayırt edilebilme yeteneği ise azimut (azimuth) çözünürlüğü olarak tanımlanmaktadır (Denklem 2.2). Bu çözünürlük türleri, SLR sistemlerinin hedefleri farklı açılardan ve farklı mesafelerden ayırt etme kabiliyetini belirler (Çakır, 2003).

Menzil çözünürlüğünü hesaplamak için:

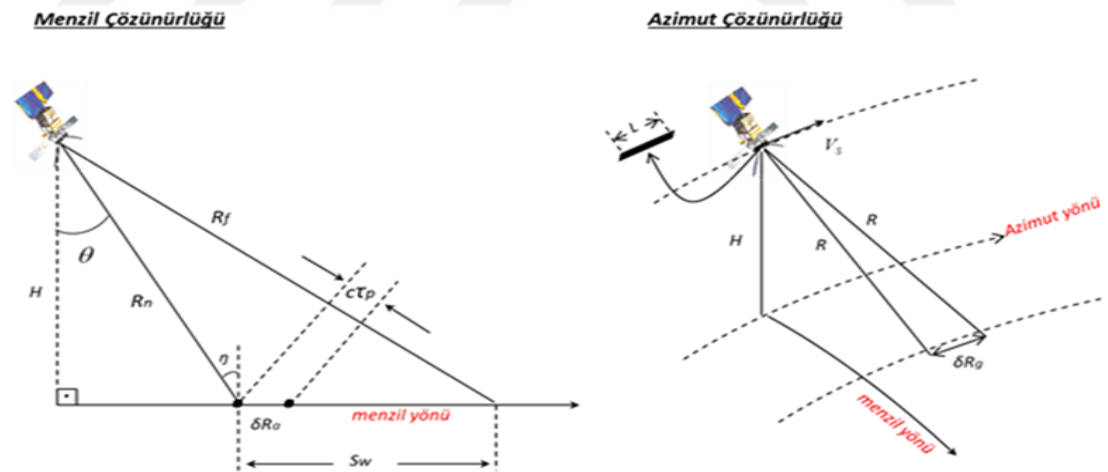
$$\delta R_g = \frac{c\tau_p}{2 \sin(\eta)} \quad (2.1)$$

Denklemi kullanılır. Burada; c ışık hızı, τ_p sinyal süresi, η geliş açısını ifade etmektedir.

Azimut çözünürlüğünü hesaplamak için:

$$\delta R_a = \frac{R\lambda}{L} \quad (2.2)$$

Denklemi kullanılır. Burada; R (R_m) menzil mesafesini, λ dalga boyunu, L anten uzunluğunu ifade etmektedir.



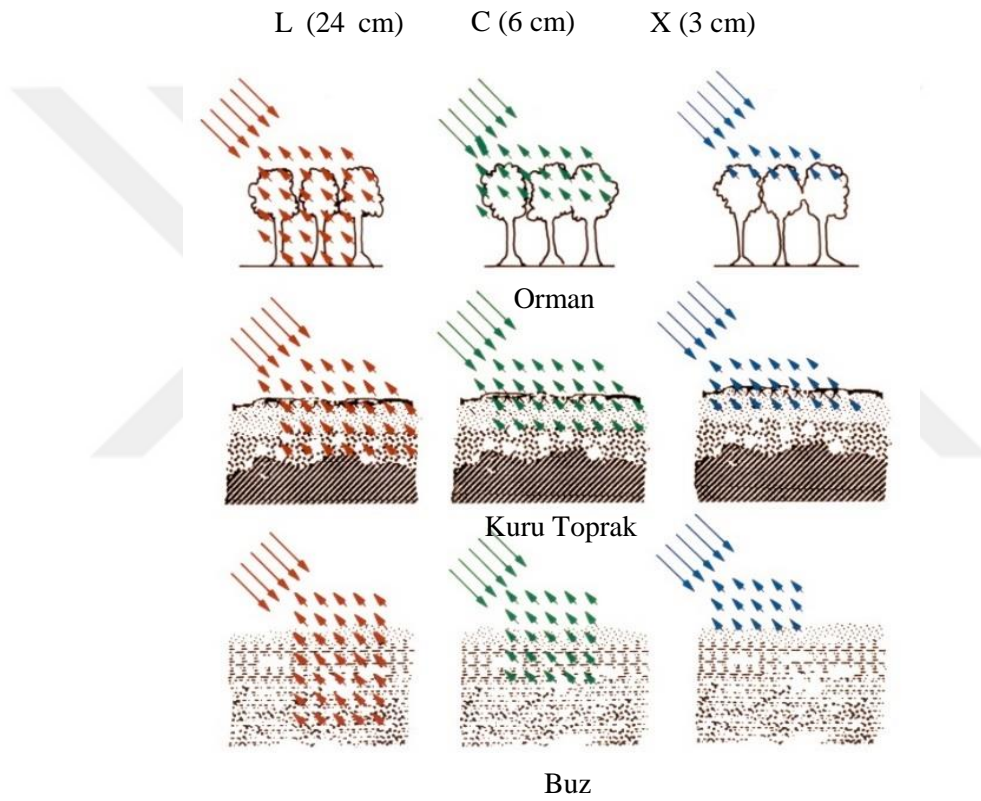
Şekil 2.5. SLR sistemlerindeki azimut ve menzil çözünürlükleri.

Burada; H uydunun yüksekliği, R_n yakın menzil, R_f uzak menzil, S_w şerit genişliği, V_s uydunun hızı, θ bakış açısıdır (Orhan, 2018).

SAR görüntüleri, çeşitli alanlarda geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. Bu uygulamalarda istenilen görüntülerin elde edilebilmesi için farklı uydular, bantlar,

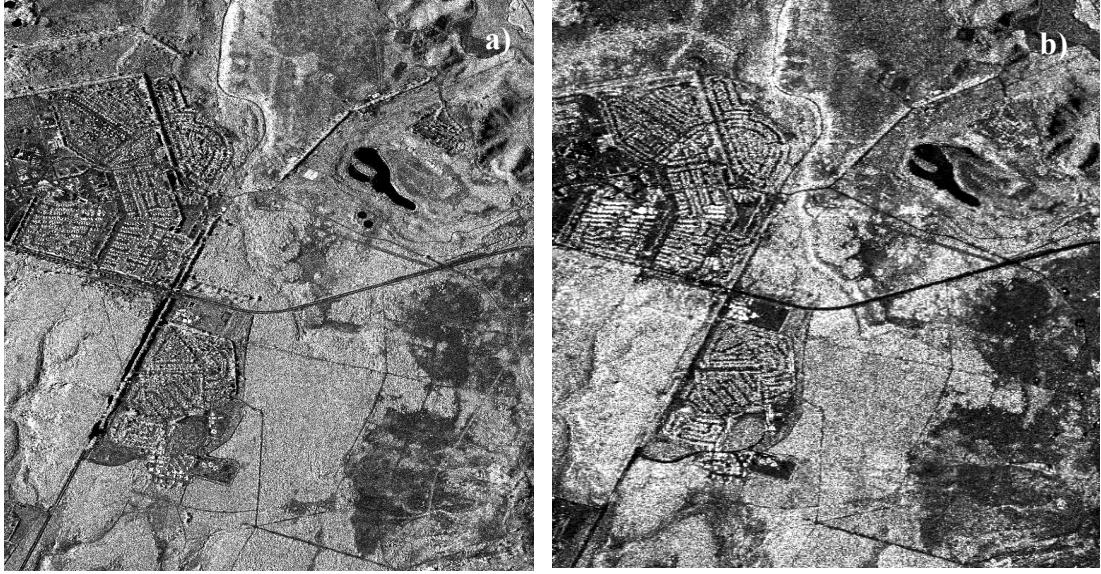
dalga boyları ve polarizasyonların parametre olarak dikkate alınması gerekmektedir (Şekil 2.6 ve Şekil 2.7).

Radar bantlarında kullanılan farklı dalga boyları, hedef alandan elde edilecek veriler üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Dalga boyu arttıkça sinyal, nesnelerin içinden geçme eğilimindeyken; daha kısa dalga boyları nesnelere çarparak geri yansımaktadır (Şekil 2.6). Bu durum, çalışmalarda amaca uygun dalga boyu seçiminin önemini ortaya koymakta ve her dalga boyunun farklı türde bilgiler sağladığını göstermektedir (Eren, 2008).

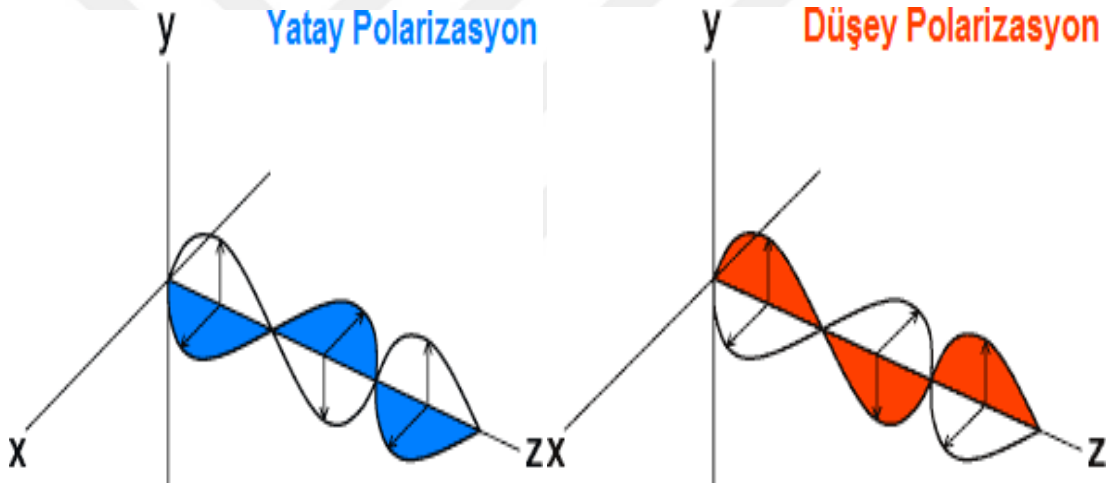


Şekil 2.6. Dalga boylarının nesne üzerine etkisi.

Ormanlık alanlarda yapraklar, X bandı dalga boylarını yansıtırken, L bandı dalga boylarını yansıtılmamaktadır. Kuru toprak yüzeyleri, X bandı dalga boyuna kadar pürüzlü bir yapı sergilerken, L bandında daha düzgün bir yüzey görünümüne sahiptir. Benzer şekilde, buz yüzeyleri ve katmanlanmaları X bandında pürüzlü bir yapı gösterirken, L bandında daha düz bir yapı olarak algılanmaktadır. Şekil 2.7’de a) L bandı ile b) X bandı arasındaki görüntü farklılıkları karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.



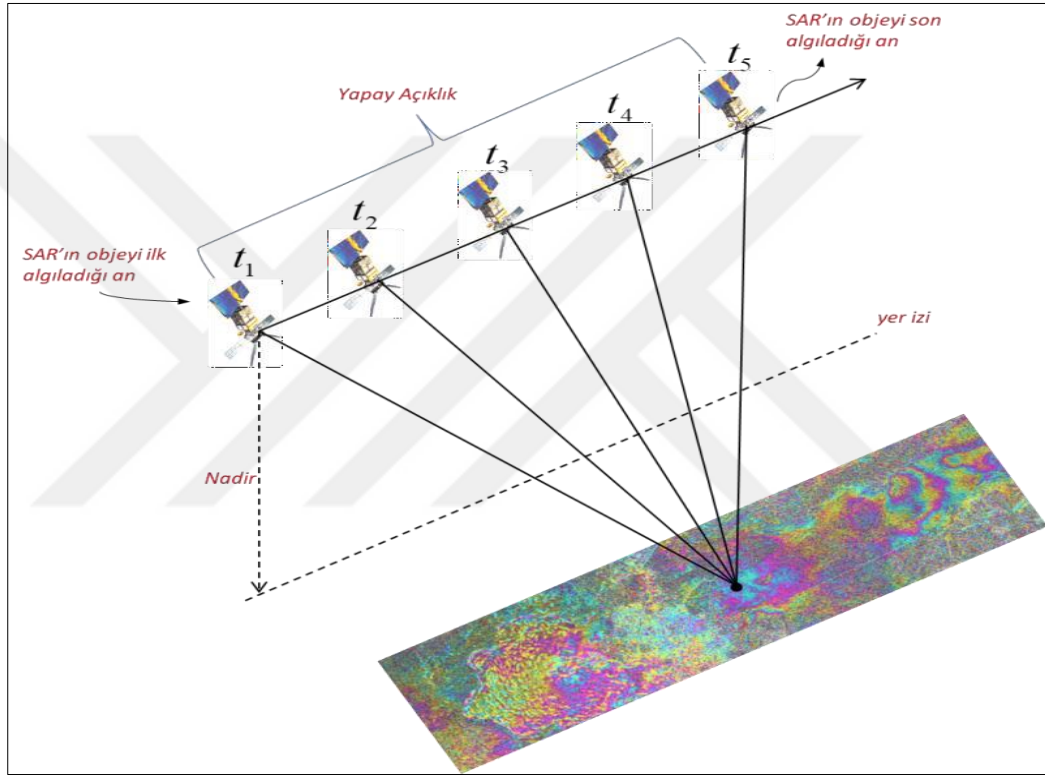
Şekil 2.7. a) L Band Görüntüsü b) X Band Görüntüsü.



Şekil 2.8. Yatay (horizontal) ve düşey (vertical) polarizasyon (Yılmaztürk, 2015).

Radardan elde edilen verilerin uzaysal çözünürlüğü, dalga boyu ile antenin uzunluğu arasında doğrusal bir orantıya sahiptir. Sabit bir dalga boyu göz önüne alındığında, anten uzunluğu arttıkça hedef nesnenin uzaysal çözünürlüğü de artmaktadır. Ancak hava araçlarında kullanılan antenlerin boyutları donanımsal olarak kısıtlıdır. Bu durum, alternatif bir çözüm ihtiyacını doğurmuştur. Bu konuda bilim insanları ve mühendisler, SAR sistemini keşfederek yenilikçi bir yöntem geliştirmişlerdir. SAR görüntüleme sistemi, yüksek çözünürlük elde etmek için büyük bir anten yerine anten dizisi kullanma fikrine dayanmaktadır (Curlander ve McDonough, 1991). Bu yöntemde, kısa bir anten ile elde edilen bir dizi sinyal birleştirilerek, Doppler

prensibinden yararlanılarak büyük bir antenin işlevi simüle edilmektedir. Doppler prensibinde, uçuş sürecince anten hareket ettirilerek yapay açıklık oluşturulur. Hedef nesne başlangıç noktasından itibaren sürekli sinyal göndermeye ve yansıyan sinyalleri kaydetmeye başlar. Yapay açıklık yöntemiyle, gerekli anten boyutuna ulaşana kadar bu işlem yol boyunca tekrarlanır (Şekil 2.9). Böylelikle geri yansıyan sinyallerin sayısı kadar veri elde edilerek, SAR sayesinde büyük bir antenin sağladığı yüksek çözünürlüklü veriler üretilebilmekte ve uzaysal çözünürlük sorunu etkin bir şekilde aşılmaktadır (Abdikan, 2007; Gezgin, 2020; Gürmen, 2003).



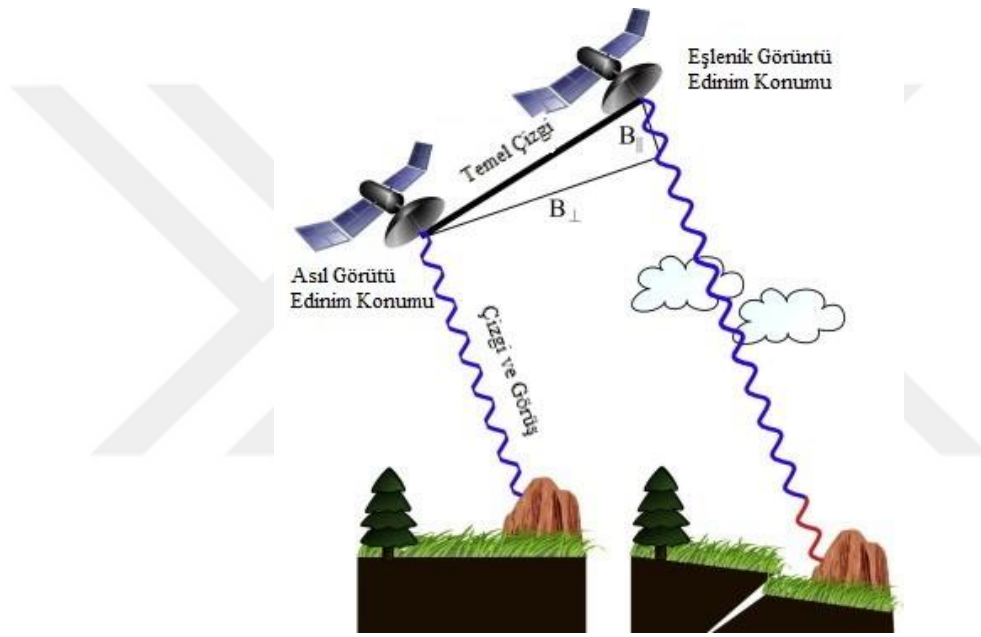
Şekil 2.9. Yapay açıklıklı radar geometrisi (Orhan, 2018).

SAR teknolojisi ile elde edilen kazanımı aşağıdaki formül ile hesaplayabiliriz:

$$L = \frac{R \cdot \lambda}{SA} \quad (2.3)$$

Örneğin $R = 1000$ m uzaklıktaki bir objeyi $\lambda = 10$ cm dalga boyu ile $SA = 1$ metre azimut çözünürlüğünde görüntülemek istersek, $L = 100$ m anten boyuna ihtiyaç duyulduğu görülmektedir (Gündoğdu, 2021).

İnterferometri, hedef noktadan gelen iki farklı faz ve genlik bilgisi kullanarak yükseklik bilgisini veya bu yüksekliğin belirlenen zaman içerisindeki değişimini gözlemleyen bir tekniktir (Şekil 2.10). InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) ise interferometri prensiplerine dayalı olarak jeodezik deformasyonları izleme çalışmalarında yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. InSAR, radar görüntülerinden elde edilen karmaşık veriler sayesinde Sayısal Arazi Modeli (SAM) oluşturulmasına olanak tanımakta ve yeryüzündeki deprem, heyelan, volkanik faaliyetler ile zemin çökmesi gibi dinamik değişimlerin santimetre altı hassasiyetle izlenmesini sağlamaktadır (Çakır, 2003; Hanssen, 2001).



Şekil 2.10. Tekrarlı geçiş interferometrisini açıklayan şematik çizim (Osmanoğlu vd., 2016).

InSAR'ın temel prensibi, farklı zamanlarda aynı noktadan alınan iki adet SAR görüntüsünün faz bilgilerini kullanarak faz farkının ölçülmesi ile değişimin gözlemlenmesi esasına dayanır (Gabriel vd., 1989). Hedef alandan elde edilen bu iki adet SAR görüntüsünden biri asıl (referans), diğeri ise bağımlı (slave) görüntü olarak ayrıştırılır (Şekil 2.10). Asıl görüntüye A, bağımlı yani eş görüntüye de E harfiyle isimlendirilerek, SAR görüntülerinin karmaşık sayılarla ifadesini Şengül (2010) şu şekilde aktarmıştır;

$$gA(x, y) \cong |gA(x, y)| \exp\{i\phi A\}; \phi A = \frac{4\pi RA(x, y)}{\lambda} \quad (2.4)$$

$$g_E(x, y) \cong |g_E(x, y)| \exp\{i\phi_E\}; \phi_E = \frac{4\pi RE(x, y)}{\lambda} \quad (2.5)$$

olarak verilebilir.

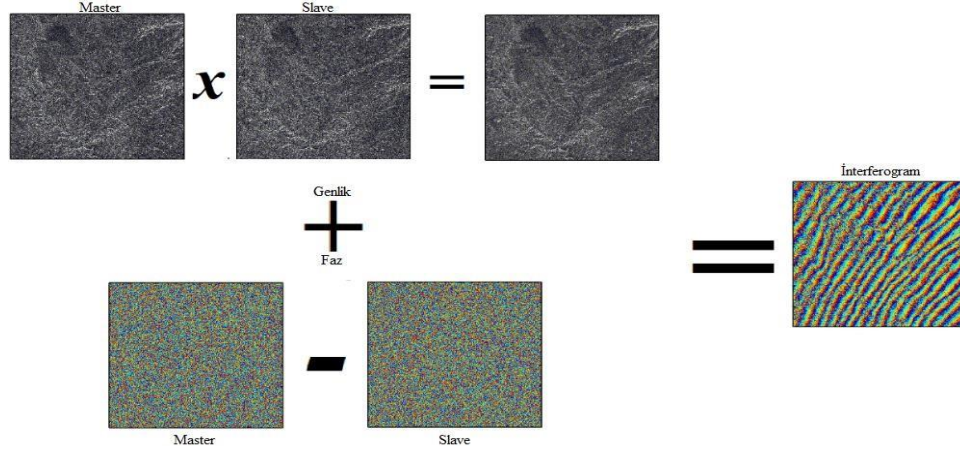
Burada genlik bilgisi $|g_A(x, y)|$ ve $|g_E(x, y)|$, belirli bir noktaya olan mesafe RA ve RE, faz değeri ϕ_A ve ϕ_E ve son olarak λ ise dalga boyunu ifade etmektedir.

Eşlenik görüntü, asıl görüntüde kendisine karşılık gelen her bir pikseli konumlandırarak yeniden örneklendirir. Ardından, iki görüntüdeki verilerin birbirine girişimi sağlamak amacıyla, asıl görüntünün karmaşık değeri ile eşlenik görüntünün karmaşık değerleri çarpılarak;

$$g_A(x, y) \cdot g_E(x, y) \cong |g_A(x, y)| |g_E(x, y)| \exp\{i(\phi_A - \phi_E)\} \quad (2.6)$$

Sonuçlarına varılır.

Bu sonuçla, kompleks interferogram elde etmiş oluruz. Hedef alandan elde ettiğimiz her iki görüntüde aynı davranışı sergiler ve $g_A(x, y) \cong g_E(x, y)$ gösterirse, görüntüler arasındaki faz farkı sadece geometrik farklılığa bağlı olur ve saçılma olgusuna bağlı olmaz. Bu durumda, faz farkı değeri 2π 'nin modülü şeklinde kalır (Şekil 2.11) (Zebker vd., 1994). Yani, bir bölgenin iki radar görüntüsünde geri yansıma karakteristiği değişmez ve faz değerlerinin farkı alındığında, bu faz farkı iki zaman arasındaki mesafe değişimi ve atmosferik mesafe gecikmesinden kaynaklı farktan oluşur (Wright, 2000). Kısacası, faz farkının nedenleri; görüntüleme geometrisi, topografya, yeryüzü küreselliği ve yüzey deformasyonu olabilir (Şengül, 2010). Deformasyonun güvenilir bir şekilde hesaplanabilmesi için farklı yöntemlerle geometrik düzeltmeler, topografik hataların giderilmesi ve atmosferik düzeltmeler uygulanmalıdır. Böylece hedef noktaya ait yükselmeler veya alçalmalar, LOS (Line of Sight- uydu bakış doğrultusunda) hareketi belirlenir.



Şekil 2.11. Faz ve genlik değerlerinden interferogram oluşumu.

Günümüze kadar radar teknolojisi ve buna dayalı yöntemler sistematik olarak geliştirilmiş, doğal veya yapay sebeplerden kaynaklanan yeryüzü hareketlerinin ölçülmesi daha yüksek hassasiyet ve güvenilirlik seviyelerine ulaşmıştır. SAR tekniğinin kullanımının yaygınlaşmasıyla birlikte InSAR yöntemi geliştirilmiştir. InSAR yöntemi çalışmanın amacına, konumuna, zamanına ve ölçeğine bağlı olarak farklı teknikler sunmaktadır. Bu teknikler DInSAR, SBAS (Kısa Baz Uzunluklu İnterferometri) ve PS-InSAR olarak sınıflandırılmaktadır.

DInSAR yönteminin temel prensibi, aynı bölgeye ait farklı zamanlarda elde edilmiş görüntülerin kullanılmasıyla, bu iki zaman aralığında meydana gelen deformasyonun tespit edilmesine dayanır. Tekrarlı olarak hedef alan üzerinden elde edilen görüntüler genellikle aynı sistem ve özelliklere sahip sensörler tarafından gerçekleştirilir (Crosetto vd., 2016). Bu konuda Gabriel ve arkadaşları, 1989 yılında L-band Seasat verilerini kullanarak DInSAR yöntemi ile büyük alanlarda küçük yükseklik değişimlerini tespit etmek için radar interferometrisinin kullanımını önermişlerdir. SAR interferometrisinin genel incelemesi için bakınız (Bamler ve Hartl, 1998; Rosen vd., 2000). DInSAR prensibini aşağıdaki şekilde özetleyebiliriz (aktaran Crosetto vd., 2016).

Yeryüzündeki belli bir alanı ifade eden tek bir piksel alanı (P) dikkate alınarak, sensör uydu konumundan (M)'den ilk SAR görüntüsü elde edilir ve (φ_M) fazı ölçülür.

$$\varphi_M = \varphi_{geom-M} + \varphi_{scatt-M} = \frac{4\pi \cdot MP}{\lambda} + \varphi_{scatt-M} \quad (2.7)$$

Burada MP hedef alanı ve sensör arasındaki mesafedir. φ_{scatt} mikrodalgalar ile hedef P arasında gerçekleşen etkileşim sırasında oluşan faz kaymasını belirtir. φ_{geom-M} geometrik faz bileşenini ifade eder. λ , radar dalga boyunu ve 4π faktörü, radar-hedef-radar yolu üzerindeki çift yönlü mesafe ile ilişkilidir. Eğer sensör, uydu konumu S'den aynı piksel alanı P üzerinden ikinci bir görüntü olarak φ_S fazını ölçerse:

$$\varphi_S = \varphi_{geom-S} + \varphi_{scatt-S} = \frac{4\pi.SP}{\lambda} + \varphi_{scatt-S} \quad (2.8)$$

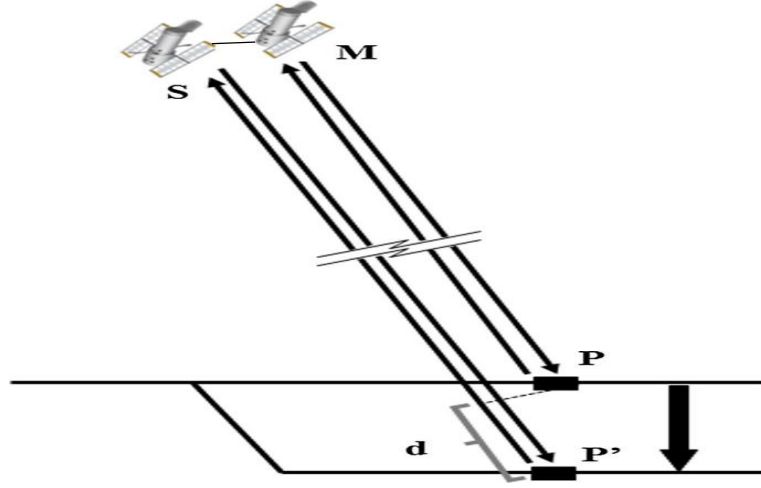
Olur. Bu aşamadan sonra (InSAR) tekniğinin faz farkı işlemini devreye alabiliriz ve $\varphi_S - \varphi_M$ şu şekilde düzenleyebiliriz.

$$\Delta\varphi_{int} = \varphi_S - \varphi_M = \frac{SP-MP}{\lambda} + \varphi_{scatt-S} - \varphi_{scatt-M} \quad (2.9)$$

Interferometrik faz, Denklem 2.9 ile elde edilir ve tamamen mesafe farkı SP-MP ile ilişkilidir. Burada elde ettiğimiz faz farkı, gözlemlenen hedef alanın topografyasını tahmin etmek için gerekli olan Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) oluşturulmasında da temel bir unsurdur (Bamler ve Hartl, 1998; Crosetto vd., 2016; Rosen vd., 2000). Uydular görüntü elde ederken, Şekil 2.12'de gösterilen M ve S konumları arasında bulunduğu varsayılan çizgiye “taban çizgisi” denir. Çalışılan InSAR yönteminde, topografya duyarlılığı uydu taban çizgisine SM'ye bağlıdır. Yani SM'nin LOS doğrultusuna dik olan taban çizgisine bağlıdır (Crosetto vd., 2016). DInSAR yöntemi ile yeryüzü hareketinin gözlemlenmesi durumunda, uydu M konumundayken bir görüntüleme yapılır ve bu görüntüler yardımıyla φ_M fazı ölçülebilir. Bu işlemi uydu S konumundayken yine aynı hedef olan P alanı gözlemlenir. İki farklı zaman ve taban çizgisi olduğu durumda P alanındaki bir hareketlenmenin sonucu P' olduğunu düşünürsek, ilk görüntülerden elde ettiğimiz fazdan farklı olarak φ_S fazı da elde etmiş oluruz. Bu durumda φ_S :

$$\varphi_S = \varphi_{geom-S} + \varphi_{scatt-S} = \frac{4\pi.SP'}{\lambda} + \varphi_{scatt-S} \quad (2.10)$$

olur.



Şekil 2.12. DInSAR deformasyon ölçümü şeması (Crosetto vd., 2016).

Interferometrik faz ise $\Delta\varphi_{int}$ şu şekilde verilir:

$$\Delta\varphi_{int} = \varphi_S - \varphi_M = \frac{SP' - MP}{\frac{\lambda}{4\pi}} + \varphi_{scatt-S} - \varphi_{scatt-M} \quad (2.11)$$

Verilen denkleme $SP / \frac{\lambda}{4\pi}$ terimi eklenir çıkarılırsa;

$$\Delta\varphi_{int} = \varphi_S - \varphi_M = \frac{SP - MP}{\frac{\lambda}{4\pi}} + \frac{SP' - SP}{\frac{\lambda}{4\pi}} + \varphi_{scatt-S} - \varphi_{scatt-M} \quad (2.12)$$

Denklem sonucuna varılır. Bu aşamadan sonra, ilk terim topografik faz bileşeni φ_{Topo} olup, referans elipsoidal faz bileşenini de içerir. İkinci terim ise, Şekil 2.12'de gösterilen LOS yer değiştirmesi d ile ilgili olarak yer değiştirme faz bileşenini φ_{Displ} temsil etmektedir. Denklem 2.12'nin son iki teriminin birbirini yok ettiğini varsayarak ve görüntülenen sahnenin bir SYM mevcutsa, φ_{Topo} simüle edilip $\Delta\varphi_{int}$ 'den çıkarılabilir (InSAR, SYM oluşturma işleminde gerçekleştirilen ters işlemdir) ve böylece DInSAR fazı $\Delta\varphi_{D-int}$ elde edilir:

$$\Delta\varphi_{D-int} = \Delta\varphi_{int} - \varphi_{Topo_{simu}} = \varphi_{Displ} \quad (2.13)$$

Burada $\varphi_{Topo_{simu}}$, düz dünya faz bileşenini de içeren topografik bir bileşendir. Sonuç olarak, Denklem 2.13 ile hedef alandan elde edilen görüntülerin işlenmesi ile yer değiştirmenin iki farklı SAR görüntüsünden belirlenmesini sağlayan DInSAR çalışma

prensibini özetlemektedir (Crosetto vd., 2016). Hataları giderilmiş ve kapsamlı sonuç denklemi ise şu şekilde verilebilir:

$$\begin{aligned}\Delta\varphi_{D-int} &= \Delta\varphi_{int} - \varphi_{Topo_{simu}} \\ &= \varphi_{Displ} + \varphi_{Topo_{res}} + \varphi_{Atm_S} - \varphi_{Atm_M} + \varphi_{Orb_S} - \varphi_{Orb_M} + \varphi_{Noise} + 2.k.\pi \quad (2.14)\end{aligned}$$

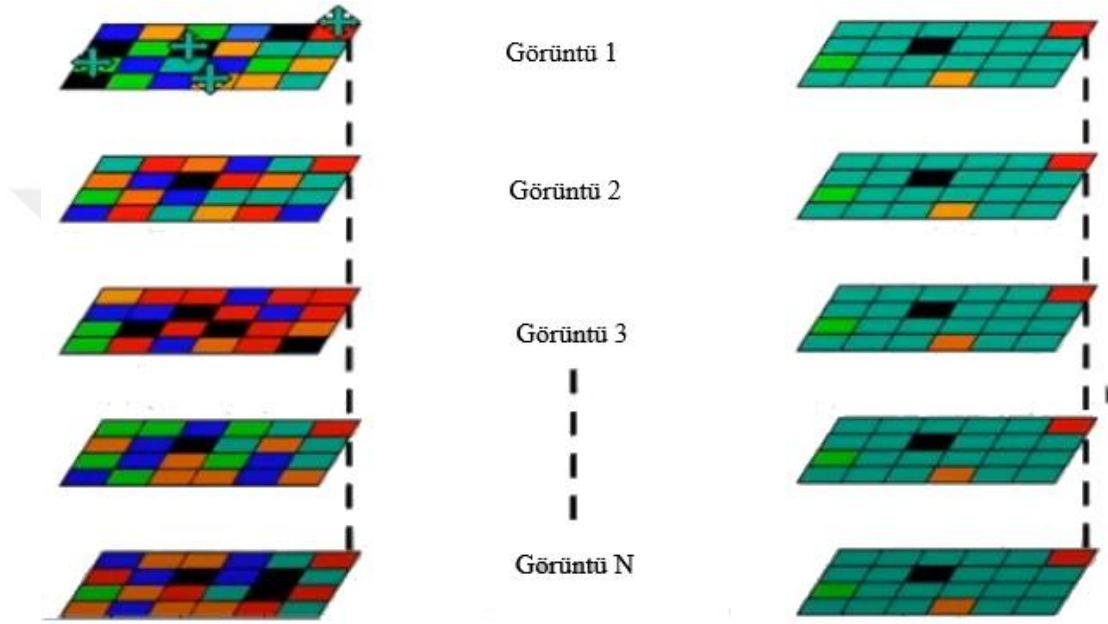
Denklemden yer alan yeni terimler ise $\varphi_{Topo_{res}}$ artık topoğrafik hata bileşenini (RTE), φ_{Atm_S} ve φ_{Atm_M} sinyal alım anındaki atmosferik faz bileşenlerini φ_{Orb_S} ve φ_{Orb_M} yörüngesel hatalardan kaynaklanan faz bileşenlerini, φ_{Noise} faz gürültüsünü ve $2.k.\pi$ ise fazın sınırlı aralıkta (genellikle $-\pi$ ile π arasında) ifade edilmesinden kaynaklanan faz belirsizliği bileşenini ifade eder (Bamler ve Hartl, 1998).

SBAS tekniği, yüzey deformasyonlarının zamansal değişimini yüksek hassasiyetle incelemek amacıyla Berardino ve arkadaşları tarafından 2002 yılında geliştirilmiştir. Bu yöntem, aynı bölgeye ait farklı zaman dilimlerinde algılanmış çok zamanlı SAR görüntülerini kullanarak, yüksek korelasyona sahip dağılmış hedefleri (Distributed Scatterer) analiz etmektedir (Lanari vd., 2004; Orhan, 2018). SBAS yönteminde, toplam N+1 adet SAR görüntüsü, azimut ve menzil yönündeki kaymaların ortadan kaldırılması amacıyla ana görüntü (master) ile eşleştirilir (Coregistration). Ardından mekânsal korelasyonsuzluk (spatial decorrelation) ve atmosferik etkiler gibi hataları minimize etmek için zamansal ve geometrik dik baz uzunluklarına bağlı olarak M adet görüntü çifti oluşturulur. Bu görüntülerden üretilen interferogramlar, deformasyonun zamansal trendini belirlemek amacıyla tekil değer ayrışımı (Singular Value Decomposition - SVD) yöntemi ile analiz edilir. Böylece SBAS algoritması deformasyonların hassas ve zamana bağlı bir şekilde izlenmesine olanak tanır (Berardino vd., 2002; Gezgin, 2020).

PS-InSAR, InSAR yöntemlerinden biri olup DInSAR tekniklerine dayanır. Aynı bölgeye ait çoklu SAR görüntüleri üzerinde gerçekleştirilen veri işleme ve analiz adımları ile Denklem 2.14'te gösterilen diğer faz bileşenlerini φ_{Displ} 'den ayrıştırmayı amaçlar (Crosetto vd., 2016).

DInSAR, yeryüzü hareketlerini yüksek doğrulukla ölçebilmesine rağmen, elde edilen interferogramlar geniş alanları kapsadığı için bazı pikseller düşük korelasyon

sergileyerek analizlerde sınırlamalara yol açabilir. Bu sınırlamaların giderilmesi için zaman serisinde tutarlılığını koruyan ve yüksek korelasyona sahip piksellerin belirlenmesi ve analiz edilmesi gerekmektedir (Şekil 2.13). Bu tür pikseller, “sabit saçıcılar” olarak adlandırılır ve bu yaklaşım, daha doğru ve güvenilir sonuçların elde edilmesini sağlar (Hooper vd., 2004). InSAR uygulamalarında, bilim insanları bu konuya yönelik farklı yöntemler geliştirmiştir (Adam vd., 2003; Colesanti vd., 2003; Ferretti vd., 2001; Lyons vd., 2003).



Şekil 2.13. Kararlı piksellerin seçilmesi (UNAVCO Eğitim Serisi, 2020)’den değiştirilmiştir.

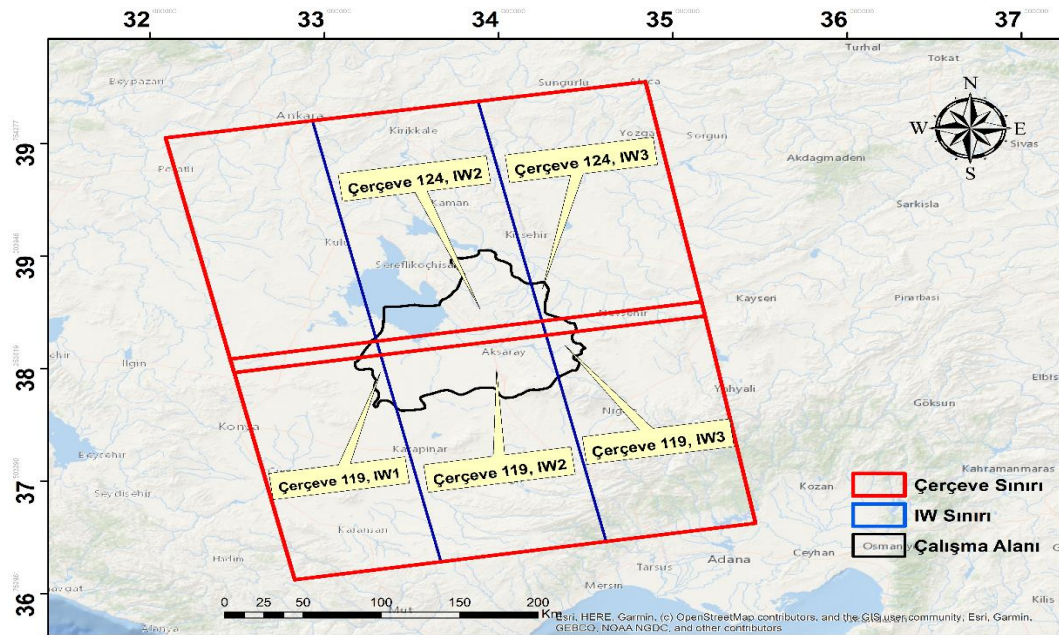
PS-InSAR yöntemi ile anlamlı bir analiz yapabilmek için aynı bölgeye ait en az 12 adet SAR görüntüsünün değerlendirilmeye alınması gerekmektedir (Hooper vd., 2007). Hedef alanın ölçümü sırasında oluşabilecek hata payları ise görüntü sayısı ve zamansal dağılıma bağlıdır. PS-InSAR yönteminde N adet interferogram oluşturmak için N+1 adet SAR görüntüsü gerekmektedir. İnterferogram oluşturulurken, her görüntü çifti bir ana görüntü (master) ve bir bağımlı görüntü (slave) olmak üzere eşleştirilir. Master görüntünün seçimi büyük önem taşımaktadır. Seçilecek master görüntü, diğer görüntülerle yüksek korelasyon göstermeli ve analiz edilecek zaman serisinin yaklaşık ortasında yer almalıdır (Oktar, 2020). PS noktalarını belirlemek amacıyla Ferretti vd. (2001), aşağıdaki denklemi tanımlamışlardır:

$$D_A = \frac{\tau_A}{\mu_A} \quad (2.15)$$

Denklemdede; D_A genlik dağılım endeksi, τ standart sapma ve μ genlik değerinin ortalamasını temsil eder.

PS noktaları sahada genellikle yüksek yansıtma kabiliyetine sahip yapılara karşılık gelmektedir. Kentsel alanlarda bu noktalar binalar, yollar ve köprüler gibi insan yapımı yapılar üzerinde yoğunlaşırken, kırsal alanlarda ise çıplak arazi örtüsü, kayalar ve taş bloklar üzerinde bulunabilmektedir (Orhan, 2018).

PS-InSAR analizinde Avrupa Uzay Ajansı (ESA) tarafından uzaya fırlatılan Sentinel-1A uydu görüntüleri kullanılmıştır. Tek bir çerçeve Aksaray il sınırını kapsamadığı için iki farklı çerçeve ile il sınırının tamamını kapsayan 119 ve 124 iz numaralı yükselen (ascending) görüntüler kullanılmıştır. Yükselen görüntüler, Sentinel-1A uydusunun güneyden kuzeye geçtiği sırada elde edilir ve Aksaray bölgesindeki deformasyonların yatay ve düşey bileşenlerinin daha net algılanmasına olanak tanır. Bu yörünge modu, yüzey hareketlerinin coğrafi kapsama alanını optimize ederek yüksek hassasiyetli ölçüm imkânı sağlar. Bu nedenle çalışma kapsamında yükselen yörüngeye ait görüntüler kullanılmıştır. Şekil 2.14'te 119 ve 124 iz numaralı uydu görüntülerinin çerçeve alanı ve coğrafi kapsamı gösterilmiştir.



Şekil 2.14. Sentinel-1A uydusu, 119 ve 124 iz numaralı çerçeve alanı ile coğrafi kapsamı.

Çalışmada, 12.04.2019 ile 05.11.2023 tarihleri arasındaki dönemi kapsayan bir zaman serisi oluşturmak amacıyla, her çerçeve için tespit edilen 40 adet toplamda 80 adet Sentinel-1A uydu görüntüsü seçilmiştir. Bu görüntüler, Interferometric Wide (IW) modunda ve C bandında çalışan Sentinel-1A SAR (Sentetik Açıklıklı Radar) uydu sistemi tarafından elde edilmiştir. Çizelge 2.1 ve Çizelge 2.2’de, kullanılan Sentinel-1A uydu görüntülerinin kayıt tarihleri detaylı bir şekilde sunulmuştur.

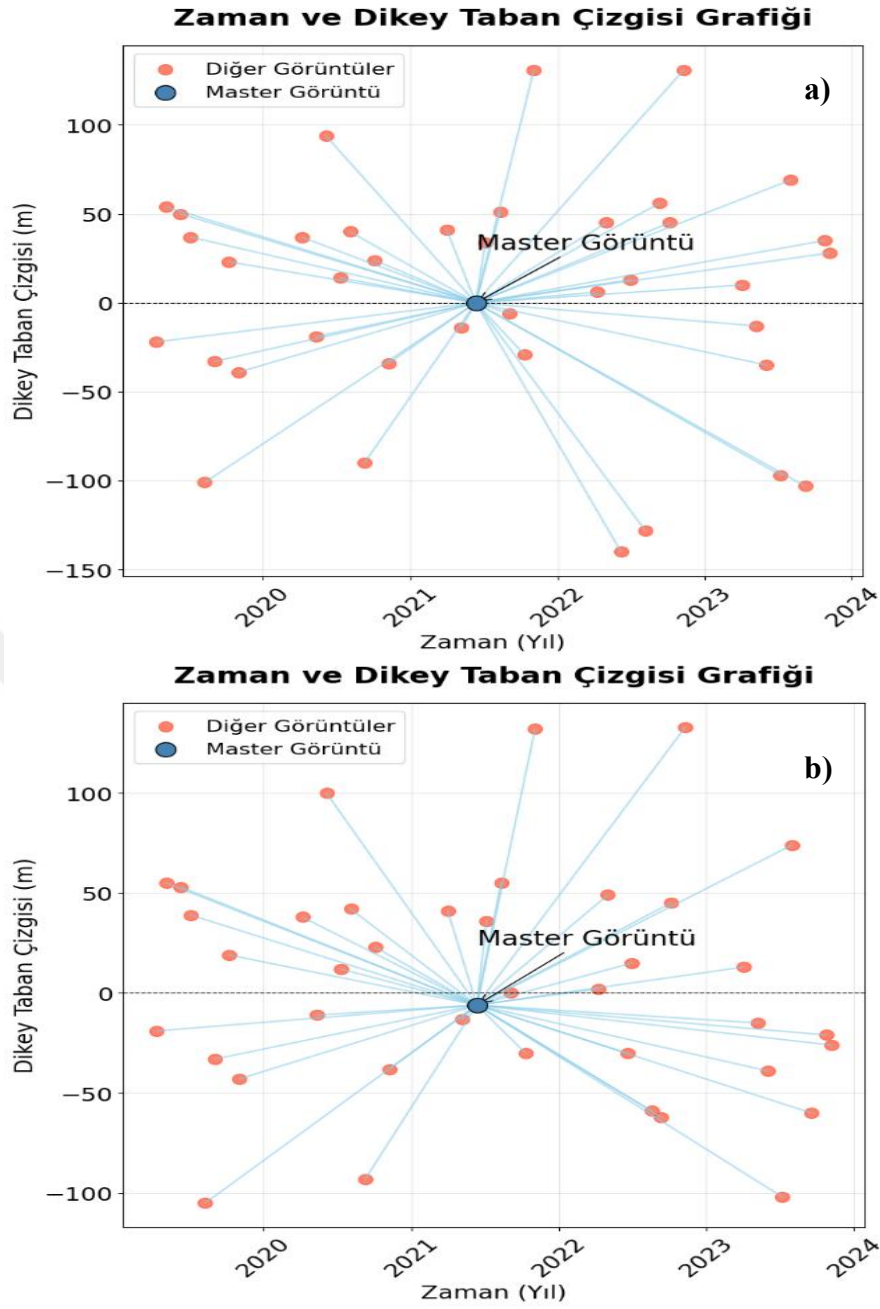
Çizelge 2.1. 119 iz numaralı SAR görüntülerinin çekim tarihleri.

12.04.2019	05.06.2020	11.08.2021	05.10.2022
06.05.2019	11.07.2020	04.09.2021	10.11.2022
11.06.2019	04.08.2020	10.10.2021	03.04.2023
05.07.2019	09.09.2020	03.11.2021	09.05.2023
10.08.2019	03.10.2020	08.04.2022	02.06.2023
03.09.2019	08.11.2020	02.05.2022	08.07.2023
09.10.2019	01.04.2021	19.06.2022	01.08.2023
02.11.2019	07.05.2021	01.07.2022	18.09.2023
06.04.2020	12.06.2021	18.08.2022	12.10.2023
12.05.2020	06.07.2021	11.09.2022	05.11.2023

Çizelge 2.2. 124 iz numaralı SAR görüntülerinin çekim tarihleri.

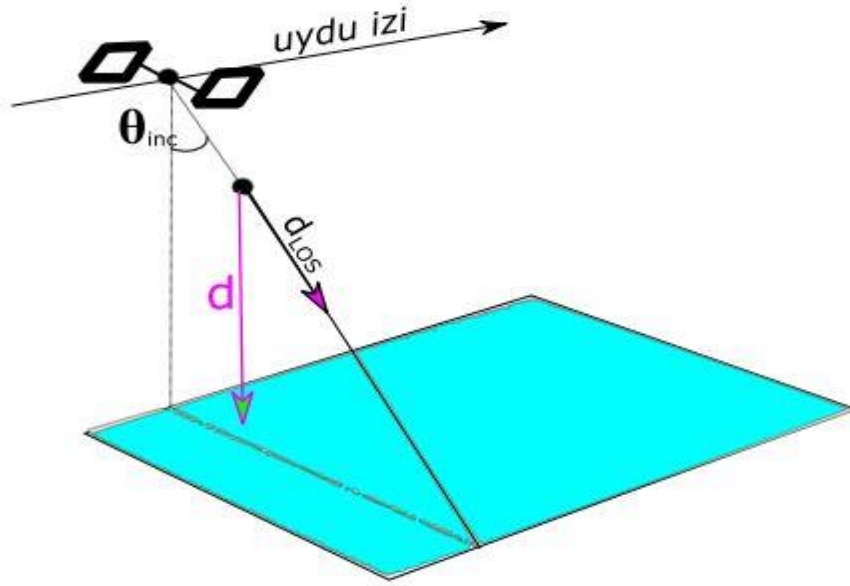
12.04.2019	05.06.2020	11.08.2021	05.10.2022
06.05.2019	11.07.2020	04.09.2021	10.11.2022
11.06.2019	04.08.2020	10.10.2021	03.04.2023
05.07.2019	09.09.2020	03.11.2021	09.05.2023
10.08.2019	03.10.2020	08.04.2022	02.06.2023
03.09.2019	08.11.2020	02.05.2022	08.07.2023
09.10.2019	01.04.2021	07.06.2022	01.08.2023
02.11.2019	07.05.2021	01.07.2022	06.09.2023
06.04.2020	12.06.2021	06.08.2022	24.10.2023
12.05.2020	06.07.2021	11.09.2022	05.11.2023

Çalışmada seçilen Sentinel-1A uydu görüntüsü, analizlerde kullanılması düşünülen master görüntüye göre zamansal homojenlik ve dikey taban çizgisi (perpendicular baseline) değerlerinin uygunluğu dikkate alınarak belirlenmiştir. Görüntülerin homojen bir zaman aralığında dağıtılmış olması, zamansal değişimlerin analizi için önem arz ederken; dikey taban çizgisi mesafelerinin optimize edilmesi, uydu görüntülerinin radar geometrisi açısından uyumlu bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanımıştır. Bu yaklaşım, hem zamansal hem de mekânsal doğruluğu artırarak güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır (Şekil 2.15).



Şekil 2.15. a) 124 iz numaralı çerçeveye ait görüntüler ve b) 119 iz numaralı çerçeveye ait görüntülerin zaman ve dikey taban çizgisi grafiği.

Bilindiği üzere, faz değişimlerinden yararlanarak elde edilen PS noktaları, uydu LOS doğrultusundaki yer değiştirme miktarını göstermektedir. Zemin çökmesi ise düşey yönlü hareketi temsil eder. Burada yapılması gereken, LOS doğrultusundaki yer değişimini yatay ve düşey olarak ayırmaktır. Yer değiştirmelerin düşey yönü, InSAR geometrisine dayalı olarak hesaplanabilir (Çomut, 2016). Şekil 2.16 incelendiğinde, SAR görüntüleme geometrisi ile LOS yansıma geometrisi birlikte düşünüldüğünde, aşağıdaki eşitlik ile düşey yönlü hareket hesaplanabilir.



Şekil 2.16. Uydu bakış açısı doğrultusunda (d_{LOS}) belirlenen yer değiştirmenin, gerçek yer değiştirme (d) ile ilişkisi (Çomut, 2016).

Yataydaki yer değiştirmenin 0 olduğunu varsayarsak;

$$d = \frac{d_{LOS}}{\cos\theta_{inc}} \quad (2.16)$$

Dönüşüm işlemi gerçekleştirilebilmek için kullanılan uydu görüntüsünün elde edildiği andaki geliş açısı dikkate alınarak hesaplama yapılmalıdır. Bu bağlamda, Denklem 2.16 doğrultusunda bilinmesi gereken temel parametreler, θ_{inc} (geliş açısı) ve d_{LOS} (LOS doğrultusundaki yer değişimi miktarı) olduğu görülmektedir. Geliş açısı, her çerçeve ve çerçeveyi oluşturan alt bölümler (IW1, IW2, IW3) için değişmekte olup, bu bölümlerde kalan noktalar için ayrı ayrı hesaplanmalıdır. Bu işlem, her bir PS noktası için bulunduğu alana göre değişen geliş açıları dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Böylece LOS doğrultusunda gerçekleşen deformasyonlar düşey yönlü çökme veya yükselme bileşenlerine dönüştürülmüş ve bu veriler kullanılarak Aksaray ili için zemin çökmesi envanter haritası oluşturulmuştur (Şekil 3.9).

2.3 Zemin Çökmesi Koşullandırma Faktörleri

Zemin çökmesi, doğal süreçler ve insan faaliyetlerinin etkisiyle ortaya çıkan karmaşık bir olgudur. Bu süreçlerin tam olarak anlaşılması, etkin yönetim stratejilerinin

geliştirilmesi ve potansiyel risklerin doğru bir şekilde değerlendirilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Farklı metodolojik yaklaşımlar, duyarlılık haritalarının oluşturulmasında önemli bir rol oynamaktadır. En yaygın kullanılan yöntemlerden biri, çeşitli coğrafi faktörler ve parametrelerden elde edilen verilerin mekânsal modelleme süreçlerinde işlenmesidir. Bu yaklaşım, çevresel analizlerde sıklıkla uygulanmaktadır (Moreno Navas vd., 2012). Dolayısıyla zemin çökmesini etkileyen koşullandırma faktörlerinin detaylı incelenmesi, duyarlılık analizlerinin temelini oluşturmuştur.

Genel literatür incelemeleri sonucunda (Bianchini vd., 2019; Ebrahimi vd., 2020; Hakim vd., 2020; Mohammady vd., 2019a; Ranjgar vd., 2021; Sekkeravani vd., 2022; Yang vd., 2024), zemin çökmesi genellikle dört ana başlık altında sınıflandırılan koşullandırma faktörleriyle ilişkilendirilmiştir. Bunlar: jeolojik, hidrojeolojik, topoğrafik ve antropojenik faktörlerdir. Bu çalışmada, önceki araştırmalarda sıklıkla kullanılan faktörler değerlendirilerek 15 adet koşullandırma faktörü belirlenmiş ve analiz kapsamına alınmıştır. Bu faktörler; arazi kullanımı, bakı, drenaj yoğunluğu, eğim, eğrisellik, fay hattına yakınlık, kuyu yoğunluğu, litoloji, NDVI, AGİ, TNİ, yola yakınlık, yeraltı su seviyesi, yerleşim merkezlerine yakınlık ve yükseklik olarak kaynakları ile birlikte Çizelge 2.3'te sunulmuştur. Bu faktörlerin her biri, zemin çökmesi süreçlerine farklı açılardan katkı sağlayarak potansiyel risk alanlarının belirlenmesine olanak tanımaktadır.

Çizelge 2.3. Zemin çökmesi duyarlılık haritası için kullanılan koşullandırma faktörleri.

Faktör	Veri Kaynağı	Açıklama
Arazi Kullanımı	ESA Land Cover 2021	Avrupa Uzay Ajansı tarafından belirlenen 2021 yılı Arazi Örtüsü/Kullanımı raster verisi
Bakı	ALOS PALSAR	Uydu verisinden türetilmiştir.
Drenaj Yoğunluğu	ALOS PALSAR	Uydu verisinden türetilmiştir.
Eğim	ALOS PALSAR	Uydu verisinden türetilmiştir.
Eğrisellik	ALOS PALSAR	Uydu verisinden türetilmiştir.
Faya Yakınlık	MTA	Yerbilimleri MTA web sitesi üzerinden sayısallaştırma ile

Çizelge 2.3 (devam). Zemin çökmesi duyarlılık haritası için kullanılan koşullandırma.

Kuyu Yoğunluğu	Aksaray İl Özel İdaresi, Aksaray Belediyesi, Aksaray İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü,	3183 adet kuyudan enterpole
Litoloji	MTA Genel Müdürlüğü, AFAD	Vektörel olarak elde edilen verilerden üretilmiştir.
NDVI	Landsat-9 uydusu	Band 4 ve 5 verileri kullanılarak
AGİ	ALOS PALSAR	Uydu verisinden türetilmiştir.
TNİ	ALOS PALSAR	Uydu verisinden türetilmiştir.
Yeraltı Su Seviyesi Değişim Hızı	Aksaray İl Özel İdaresi ve Aksaray İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü	585 adet kuyudan enterpole
Yerleşim Merkezine Yakınlık	Çevre Düzeni Planı	1/100.000 ölçekli Çevre Düzeni Planı üzerinden üretilmiştir.
Yola Yakınlık	Çevre Düzeni Planı	Vektörel verilerden türetilmiştir
Yükseklik	ALOS PALSAR	Uydu verisinden türetilmiştir.

2.3.1 Jeolojik faktörler

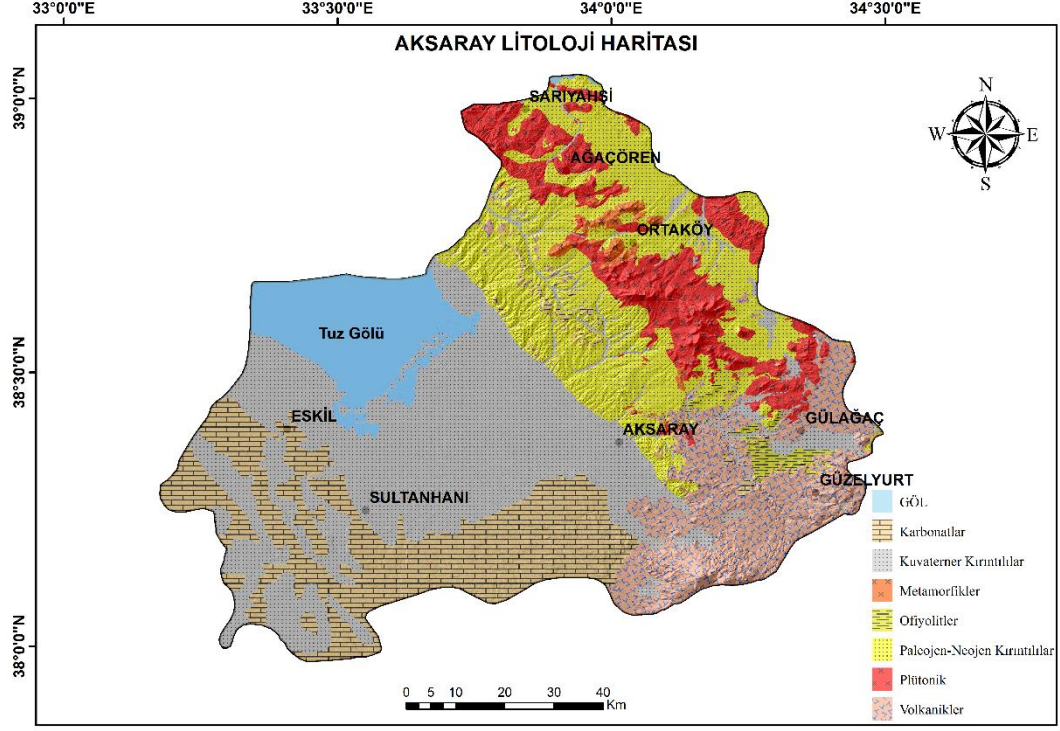
2.3.1.1 Litoloji

Litoloji, bir bölgedeki kayaç türlerini, bu kayaçların mineral bileşimlerini ve dokusal özelliklerini inceleyen bir bilim dalıdır. Litolojik özellikler, zemin stabilitesi, yeraltı su hareketleri ve deformasyon süreçleri gibi zemin çökmesiyle ilişkili kritik faktörler üzerinde doğrudan etkilidir. Gevşek yapılı veya suya duyarlı litolojik birimler (örneğin, alüvyon, kum, kil) genellikle zemin çökmesine daha duyarlıdır (Xu vd., 2023). Çalışmalar, bu tür malzemelerin zayıf mekanik dayanımının yanı sıra yer altı suyu seviyesindeki değişimlerle birlikte zemin deformasyonlarını hızlandırabileceğini göstermektedir (Fariás vd., 2024). Pekin'deki bir araştırma, yer altı suyu seviyesi ve litolojinin birleşik etkilerinin zemin deformasyonu üzerinde kritik bir rol oynadığını göstermiştir. Zemin çökmesi trendlerini analiz etmek için InSAR ve MÖ yöntemleri bir arada kullanılmış ve litolojik özelliklerin bu süreçteki belirleyiciliği vurgulanmıştır (Zhou vd., 2017).

Çalışma alanındaki en yaşlı birim, Orta Anadolu Metamorfikleri olarak adlandırılan Paleozoik yaşlı birimlerdir. Bu birimler, alttan üste doğru gnays, şist, kuvarşist,

kuvarsist karmaşığı (Kalkanlıdağ Formasyonu), mermer-şist ve gnays ardalanması (Tamadağ Formasyonu) ile en üstte mermer ve metaçörtlü mermer içeren kayalardan (Bozcadağ Formasyonu) oluşmaktadır (Seymen, 1981). Bu birimleri, Mezozoik yaşlı gabro, granit ve granodiyorit bileşimli magmatik kayalardan oluşan Orta Anadolu Granitoidleri kesmektedir (Yıldız vd., 2012). Çalışma alanının güneydoğusunda, Eosen yaşlı flişler ile Oligosen yaşlı karbonatlar gözlemlenmektedir. Konya-Aksaray arasında yüzeylenen Pliyosen-Kuvaterner yaş aralığındaki kırıntılı kayalardan (konglomera, breş, kumtaşı, silttaşı ve daha ince taneli kayalardan oluşan çamurtaşı, şeyl ve kiltası) görülmektedir (Özcan, 2009). Çalışma alanının doğusunda, Paleojen-Kuvaterner yaş aralığında karasal kırıntılılar ile yer yer traverten birimlerini içeren karbonatlı kayalar ve Neojen yaşlı andezit, dasit, riyolit, bazalt, tuf, aglomera ve lavlarla temsil edilen volkanikler bulunmaktadır (Bilgilioğlu ve Bilgilioğlu, 2023). Karstlaşmanın en yoğun gözlemlendiği birimler, Neojen yaşlı marn, killi kireçtaşı, kumtaşı, çamurtaşı ile üst seviyelerde bol erime boşlukları ve organik madde içeren gölssel tabakalı kireçtaşlarından oluşan İnsuyu Formasyonu'dur (Ulu vd., 1994). Bu formasyon, çalışma alanının güneyinde oldukça geniş bir alanda yayılım göstermektedir. Çalışma alanının batısında, İnsuyu formasyonu üzerinde ise Tuzgölü formasyonuna ait birimler izlenmektedir. Tuzgölü formasyonu genel olarak yanal ve düşey geçişli gri, koyu gri renkli az tutturulmuş karbonatlı çakıl, kum, silt ve killi kırıntılı çökellerle birlikte yer yer jips ve evaporitik kayalarla temsil edilmektedir (Arık vd., 2022).

Zemin çökmesi duyarlılık çalışmalarında litoloji, birçok araştırmada önemli bir faktör olarak kullanılmıştır (Bianchini vd., 2019; Hakim vd., 2020; Oh vd., 2019; Ranjgar vd., 2021). Çalışma alanı incelenerek, yaş ve litoloji özellikleri dikkate alınarak çalışmanın amacına uygun şekilde 7 sınıfa ayrılmış ve haritalanmıştır (Şekil 2.17).



Şekil 2.17. Aksaray litoloji haritası.

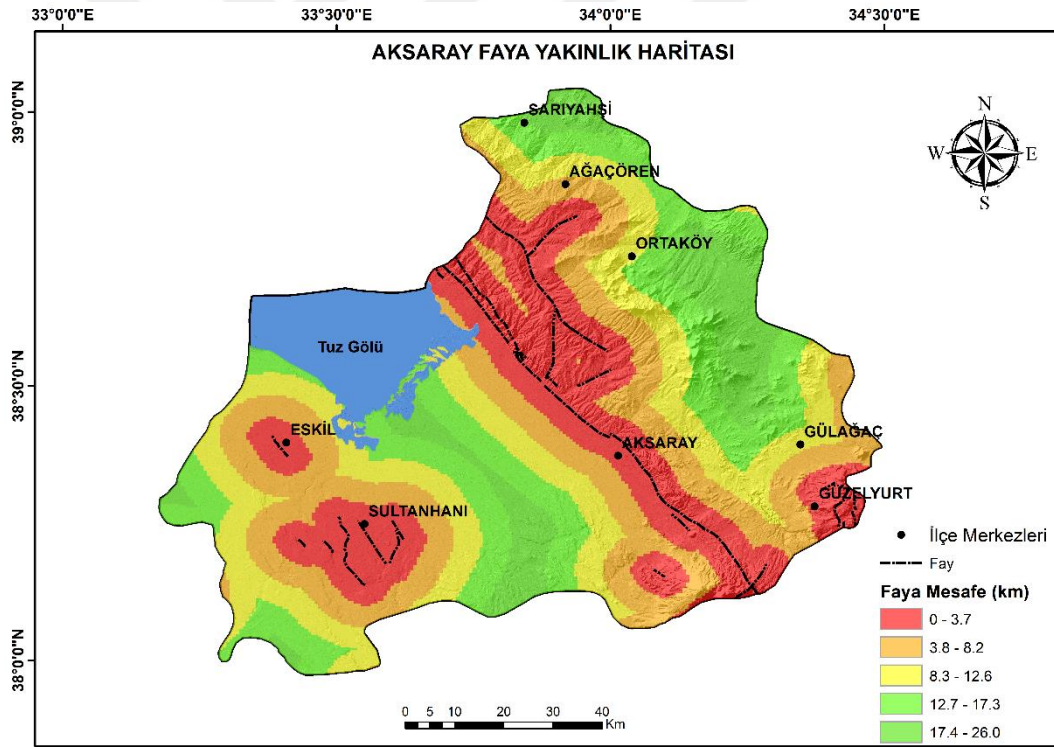
2.3.1.2 Faylara yakınlık

Levhaların birbirine yaklaşması, uzaklaşması veya yanal hareketi sırasında yer kabuğu üzerindeki gerilmeler birikir ve bu süreç sonunda faylar oluşur. Faylar, yer kabuğunda kayaçların kırılmasına ve kaymasına neden olan bir deformasyona sebep olabilir. Bu deformasyon, genellikle levha tektoniğinden kaynaklanır (Fletcher vd., 2020; Schuck vd., 2020). Faylardaki bu hareketlenmeler, zeminin türüne bağlı olarak belirli bir mesafe boyunca etkisini gösterir ve zemin çökmelerini tetikleyebilir. Fay zonları, çevresindeki kayaçlara kıyasla daha yüksek geçirgenliğe sahiptir ve bu özellikleri sayesinde yağmur suları ile tabakalardaki yeraltı sularının hareketine olanak tanır. Bu durum sıvı dolaşımına yol açarak karbonatlı kayaçların çözülmesine sebep olur. Bu süreç, obruklara, karstik mağaralara ve zemin çökmelerinin oluşmasında önemli bir role sahiptir (Billi vd., 2007; Sekkeravani vd., 2022; Caramanna vd., 2008; Santo vd., 2011).

Aksaray, Tuz Gölü Fay Zonu (TGFZ) gibi önemli fay hatlarını sınırları içerisinde barındırmaktadır. Bu fay zonu, Orta Anadolu'nun en önemli aktif tektonik unsurlarından biri olarak bölgedeki jeolojik yapının şekillenmesinde büyük bir rol

oynamaktadır. Tuz Gölü'nün kuzeyi ile Niğde'nin Kemerhisar ilçesi arasında kuzeybatı-güneydoğu doğrultusunda uzanan Tuz Gölü Fay Zonu (TGFZ), yaklaşık 200 kilometre uzunluğunda olup, birbirine paralel veya kısmen paralel fay segmentlerinden oluşmaktadır (Gezgin, 2020). Aksaray il sınırları içerisinde ve çevresinde deformasyonlara sebep olacak başlıca faylar ise Ovalıbağ Fay Zonu, Nasuhpınar Fayı, Seyithacı Fayı, Altınekin Fayı ve Sultanhanı Fay Zonu'dur.

MTA Genel Müdürlüğü tarafından sağlanan diri faylar ve Kuvaterner faylar sayısallaştırılarak CBS ortamına aktarılmıştır. Bu veriler üzerinde, faylara olan uzaklığı gösteren bir yakınlık haritası oluşturulmak amacıyla Öklid mesafe analizi uygulanmıştır (Şekil 2.18). Elde edilen mesafe verileri, doğal kırılım yöntemi (Jenks) kullanılarak sınıflandırılmış ve bu sınıflandırma, faylara olan mesafelerin analizinde temel alınmıştır.



Şekil 2.18. Faya yakınlık haritası.

2.3.2 Hidrojeolojik faktörler

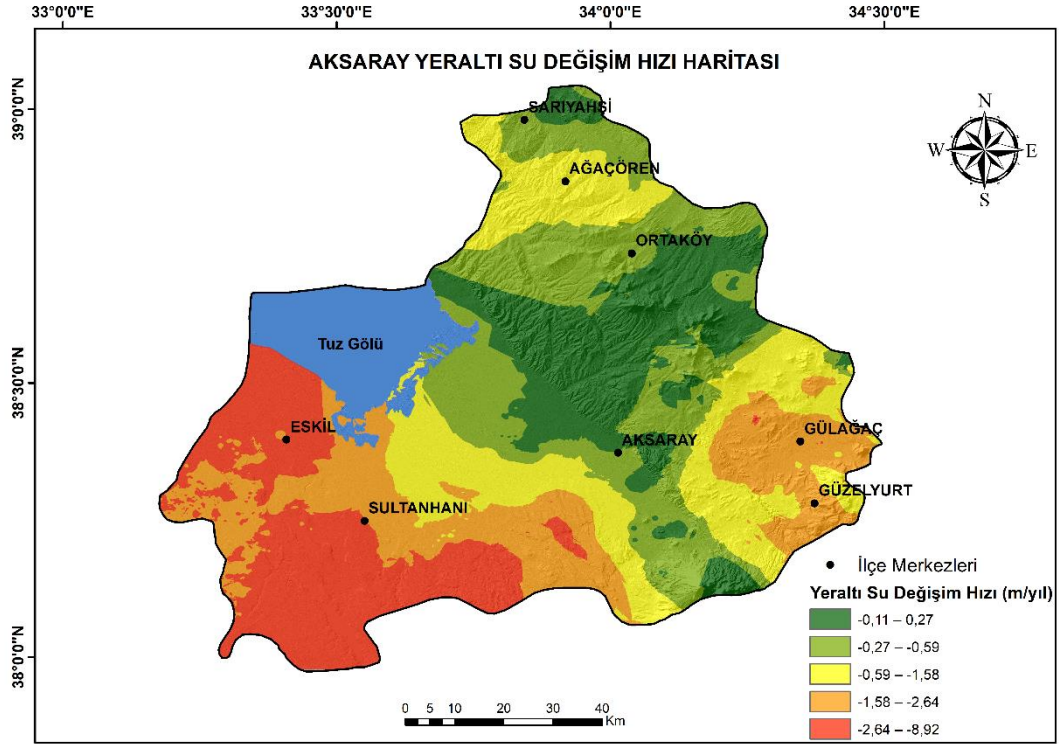
2.3.2.1 Yeraltı su seviyesi değişim hızı

Yeraltı suyunun aşırı tüketimiyle ilişkili zemin çökmesi, günümüzde küresel ölçekte ciddi bir sorun olarak öne çıkmaktadır. Bu fenomen, doğal kaynakların tükenmesi ve

insan faaliyetlerinden kaynaklanan çevresel bir felakettir (Guzy ve Malinowska, 2020). Son yüzyılda, yeraltı su seviyesindeki düşümlere bağlı olarak dünya çapında en az 200 farklı bölge bu sorundan etkilenmiştir (Zhang vd., 2023). Çökme, yeraltındaki sıvı ya da katı madde hareketlerinden kaynaklanan ve çoğunlukla yeraltı suyu tükenmesi ile bağlantılı olarak yavaş gelişen bir tehlike olarak tanımlanır (Guo vd., 2015; Tzampoglou vd., 2023). Akiferlerdeki su hacminin azalması, gözenekli yapının sıkışmasına ve yapısal deformasyonların (büzülme ve daralma) meydana gelmesine neden olan doğal bir süreçtir. Bu deformasyonlar, yüzeyde zemin çökmesi olarak kendini gösterir ve genellikle kalıcı arazi değişikliklerine yol açar. Yeraltı suyunun tükenmesiyle birlikte akifer sistemlerinin taşıma kapasitesi azalır; bu da bölgesel topografyada gözle görülür çökmelere neden olur ve çevresel riskleri artırır (Üstün vd., 2007). Bu süreç, aylar ile yıllar arasında değişen uzun zaman dilimlerinde ortaya çıkar ve genellikle büyük alanları etkiler (Herrera-García vd., 2021). Zemin çökmesi, arazi yüzeyinin kademeli olarak santimetre ya da desimetre düzeyinde yükseklik kaybetmesine neden olur ve hem kentsel hem de tarımsal alanlarda farklı derecelerde olumsuz etkiler yaratır. Bu tür deformasyonlar, akiferlerin depolama kapasitesinin kalıcı olarak kaybolmasına yol açar, toprakta çatlakların oluşmasını hızlandırır ve binalar ile altyapı sistemleri üzerinde önemli hasarlara neden olur. Ayrıca bu süreç, sel riskini ve duyarlılığını artırarak ekolojik ve ekonomik etkileri daha da kötüleştirir (Famiglietti, 2014; Trenberth, 2011).

Çökme, yalnızca fiziksel alan kaybıyla sınırlı kalmaz; aynı zamanda gelecekteki su yönetimi stratejilerinin planlanmasını zorlaştırarak sürdürülebilir kalkınma hedefleri açısından önemli bir engel teşkil eder.

Aksaray ili için, İl Özel İdaresi ve İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü tarafından yürütülen çalışmalar kapsamında, toplam 585 adet kuyudan elde edilen veriler kullanılarak yeraltı su seviyesinin yıllık değişim hızı hesaplanmış ve haritası oluşturulmuştur. Bu kapsamda, kuyulardan toplanan veriler, CBS teknikleri ile yaygın olarak kullanılan IDW (Inverse Distance Weighting) yöntemiyle enterpole edilmiştir. Elde edilen yeraltı su seviyesi değişim hızı haritası, doğal kırılım yöntemi (Jenks) ile beş sınıfa ayrılmıştır. Bu sınıflandırma, değişim hızının bölgesel dağılımını belirlemek ve yeraltı su seviyesindeki düşüşlerin etkisini görselleştirmek amacıyla yapılmıştır (Şekil 2.19).



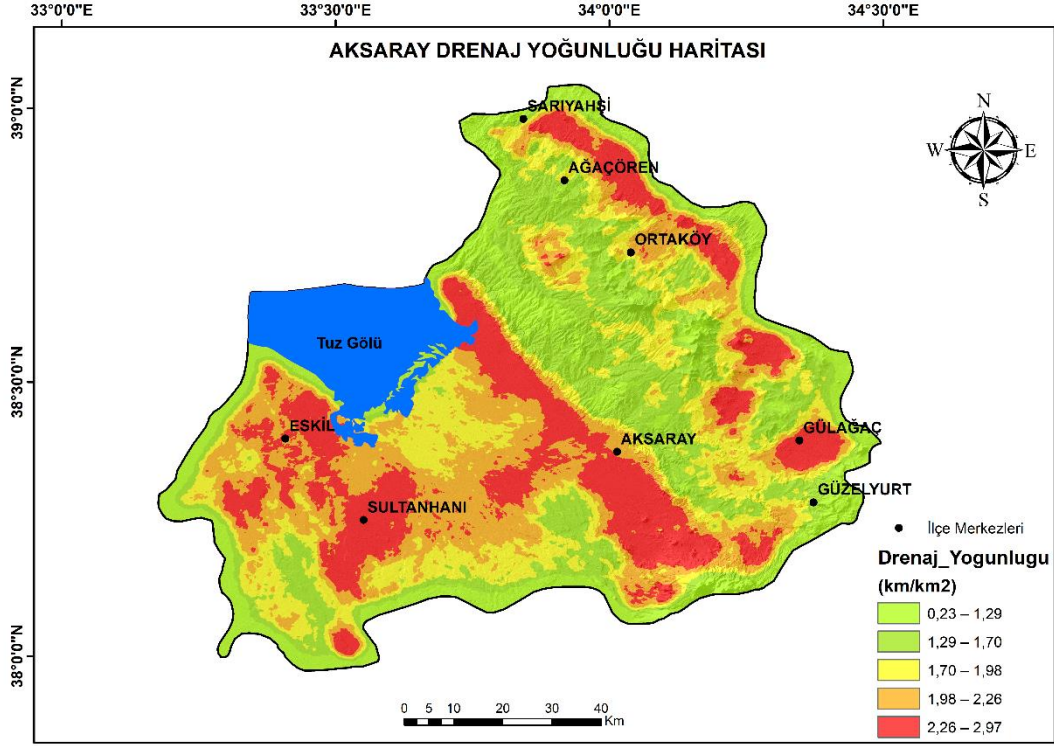
Şekil 2.19. Yeraltı su seviyesi değişim hızı.

2.3.2.2 Drenaj yoğunluğu

Drenaj yoğunluğu, bir akarsu havzasındaki toplam akarsu uzunluğunun havza alanına oranlanmasıyla hesaplanan bir parametredir ve havzanın su akış düzeni hakkında önemli bilgiler sunar. Yüksek drenaj yoğunluğu, havzanın hidrolojik özelliklerini etkileyen önemli bir faktördür. Bu durum, suyun toprak tarafından emilme oranını azaltarak yüzey akışını hızlandırır. Diğer bir deyişle, yüzeyde suyun birikmesi yerine daha hızlı bir akışa yol açması söz konusudur (Günek, 2021). Yüzey akışının artması, taşkın riski ve erozyon gibi çevresel sorunların oluşma olasılığını artırabilir. Ayrıca drenaj yoğunluğu bulunduğu yerin litolojisini de doğrudan veya dolaylı olarak etkilemekte ve zemin çökmesinin önemli faktörlerinden biri olmaktadır.

Bu tez kapsamında, drenaj yoğunluğunu belirlemek amacıyla SYM verileri kullanılmıştır. SYM verileri, ALOS PALSAR (Advanced Land Observing Satellite – Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar) uydu sisteminden ücretsiz olarak indirilmiştir. Bu veriler, yüksek çözünürlüklü topografik bilgileri içermekte ve drenaj ağlarının modellenmesi için uygun bir altyapı sağlamaktadır. Bu işlem, her bir akarsu ağı segmentine ait havza sınırlarının belirlenmesini sağlamıştır. Ayrıca drenaj

yoğunluğu analizleri sonucunda elde edilen veriler, havzanın farklı hidrolojik özelliklerini vurgulamak amacıyla doğal kırılım yöntemi (Jenks) kullanılarak 5 sınıfa ayrılmış ve sınıflandırılmış harita formatında sunulmuştur (Şekil 2.20). Bu sınıflandırma, drenaj yoğunluğunun mekânsal dağılımını görselleştirmeye ve il genelindeki farklılıkları belirgin bir şekilde analiz etmeye olanak tanımıştır.



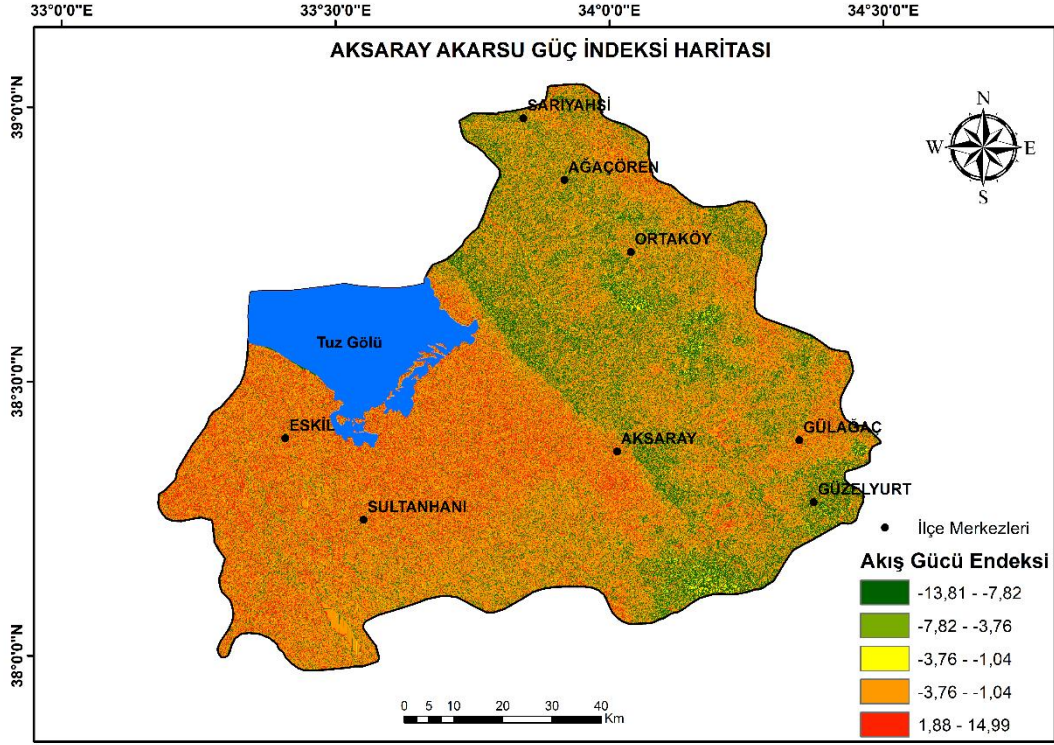
Şekil 2.20. Drenaj yoğunluğu haritası.

2.3.2.3 Akarsu aşındırma güç indeksi (AGİ)

AGİ, suyun akış birikimi ve eğim faktörlerine bağlı olarak yüzeydeki aşındırma gücünü değerlendirir. Yüksek AGİ değerleri, suyun güçlü bir akış ve yüksek enerjiyle yüzeyi aşındırdığını gösterir. Bu durum, toprağın stabilitesini azaltacak bir etkiye sahiptir (Çoruhlu ve Akıncı, 2021). Literatüre bakıldığında AGİ, birçok zemin çökmesi çalışmasında kullanılmıştır (Ebrahimi vd., 2020; Pourghasemi vd., 2013; Wang vd., 2024; Zhao vd., 2024a).

Bu çalışma kapsamında AGİ, SYM verileri üzerinde, CBS yazılımı kullanılarak yüzey eğim haritası ve akış yönü haritası oluşturulmuştur. Bu analizler, suyun hareket ettiği yönü ve arazinin eğim yapısını belirlemek açısından kritik öneme sahiptir. Hesaplanan AGİ değerleri, çalışma alanı genelinde mekânsal analizlerle değerlendirilmiş ve zemin

çökmesi duyarlılığı analizlerinde kullanılmak üzere haritalanmıştır. Haritadaki bu değerler, doğal kırılım yöntemi (Jenks) kullanılarak 5 sınıfa ayrılmış ve harita formatında sunulmuştur (Şekil 2.21).

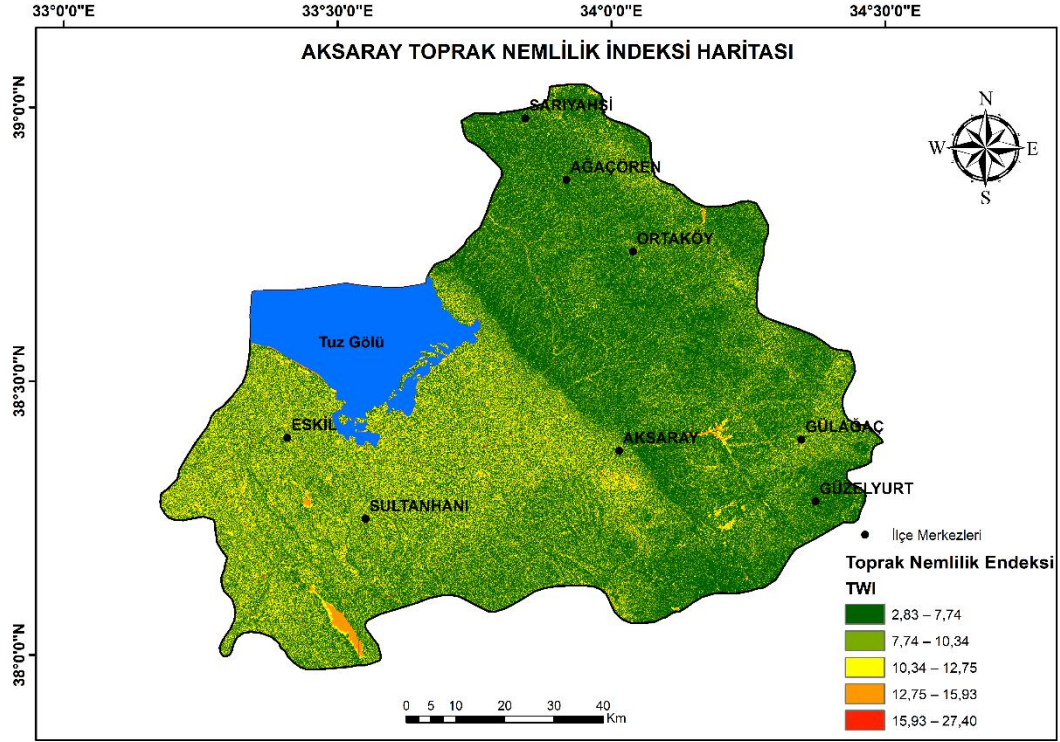


Şekil 2.21. Aksaray AGİ haritası.

2.3.2.4 Topoğrafik nemlilik indeksi (TNİ)

TNİ, topoğrafik anlamda suya doymuş alanların lokasyonlarını ve kapladıkları alanları ifade etmek amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır (Beven ve Kirkby, 1979). TNİ, bir bölgedeki suyun toplanma potansiyelini ve toprak nem miktarını tahmin eder. Bu tahmin, SYM haritalarından elde edilen akış birikimi ve eğim verilerine dayalı olarak yapılır ve arazinin topoğrafik özelliklerini kullanır. SYM kullanılarak üretilen TNİ, geçmişte nem oranı yüksek olan bölgeleri tanımlamaya olanak tanır. Ancak, günümüzde yeraltı suyunun aşırı tüketilmesi veya kuraklık gibi etkenler, bu bölgelerdeki akiferlerin boşalmasına ve buna bağlı olarak zemin çökmelerine yol açabilir. Literatürde birçok çalışmada, TNİ'nin zemin çökmesiyle pozitif bir ilişkiye sahip olduğu araştırmacılar tarafından ifade edilmiş ve zemin çökmesi ile ilgili birçok çalışmada yaygın olarak kullanılmıştır (Eghrari vd., 2023; Khan vd., 2022; Pourghasemi ve Saravi, 2019; Ranjgar vd., 2021; Sardooi vd., 2021). Bu çalışmada,

TNİ değerleri, doğal kırılım yöntemi (Jenks) kullanılarak 5 sınıfa ayrılmış harita formatında sunulmuştur (şekil 2.22).



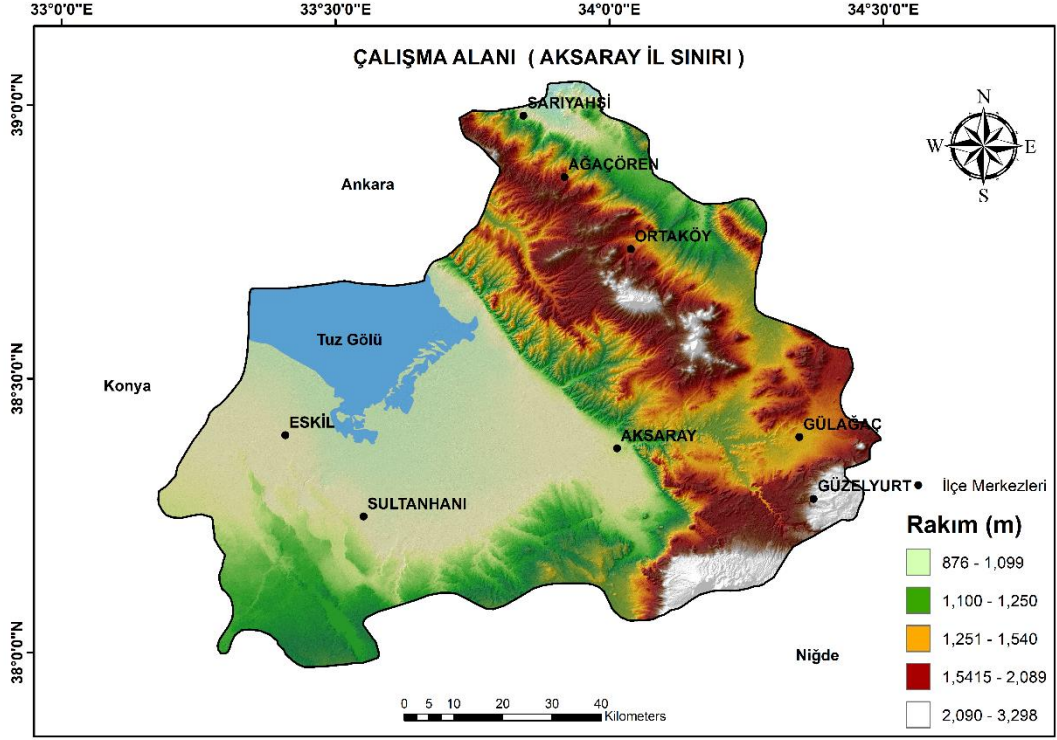
şekil 2.22. Aksaray TNİ haritası.

2.3.3 Topoğrafik faktörler

2.3.3.1 Yükseklik

Arazi yüksekliği, bir bölgenin topografyası, jeolojik yapısı ve jeolojik geğmişi hakkında önemli bilgiler sunar. Yükseklik faktörü, yalnızca tektonik süreci ve eğim gibi arazi özelliklerini değil, aynı zamanda bitki örtüsü ve yağış gibi çevresel faktörleri de etkiler. Bu durum, yükseklik faktörünün dolaylı olarak etkilediği heyelan, obruk, zemin çökmesi, sel ve taşkın gibi afet risklerine yönelik duyarlılık analizlerinde önemli bir parametre olarak kullanılmasına neden olur (Bilgilioğlu ve Bilgilioğlu, 2023; Kuşcu ve Özdemir, 2023; Üzel ve Öztürk, 2021; Yılmaz, 2023).

Aksaray'a ait yükseklik verileri, ALOS PALSAR uydu sistemi aracılığıyla temin edilmiştir. Çalışma alanı 876 ile 3.298 metre arasında değişen yüksekliğe sahip olmasına rağmen, ilin geneli yaklaşık 900 ile 1.500 rakım arasında değişmektedir. Bu yükseklik verileri, doğal kırılım yöntemi (Jenks) kullanılarak 5 sınıfa ayrılmış ve haritalandırılarak analizlerde kullanılmıştır (şekil 2.23).

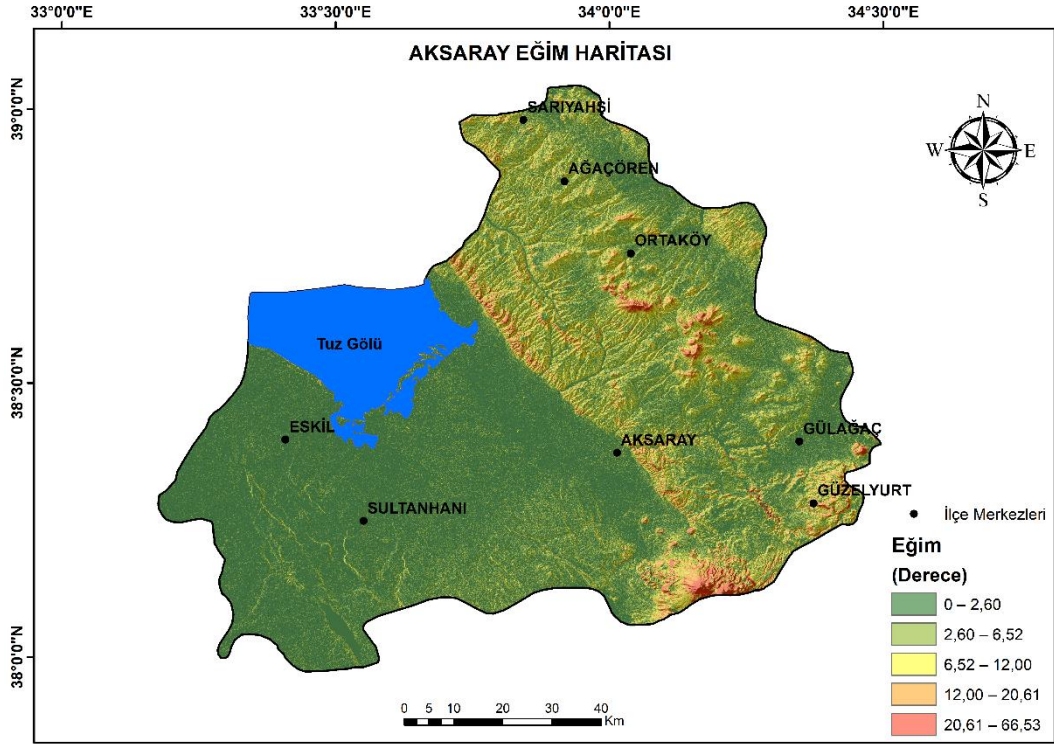


Şekil 2.23. Aksaray yükselik haritası.

2.3.3.2 Eğim

Yüzey eğimi, arazinin ne kadar eğimli ya da düz olduğunu gösteren bir veridir. Eğim, diferansiyel yatay gerilimi ve düşey yer değiştirmeyi etkilemesi sebebiyle eğimli alanlarda zemin daha sık, düz yerlerde ise daha gevşek bir zemine sahip olabilir. Bu durum, zemin çökmelerini tetikleyen bir unsur olarak görülebilmektedir (Chen ve Zhang, 2021; Oh vd., 2019; Singh ve Tripathi, 2010; Yılmaz, 2023;).

Eğim haritası, ALOS PALSAR uydusundan temin edilen SYM verisi kullanılarak, CBS programı ile oluşturulmuştur. Aksaray il genelinde eğim değeri, 0° ile 66° derece arasında değişmektedir. Bu eğim verileri, doğal kırılım yöntemi (Jenks) kullanılarak 5 sınıfa ayrılmış ve haritalandırılarak analizlerde kullanılmıştır (Şekil 2.24).

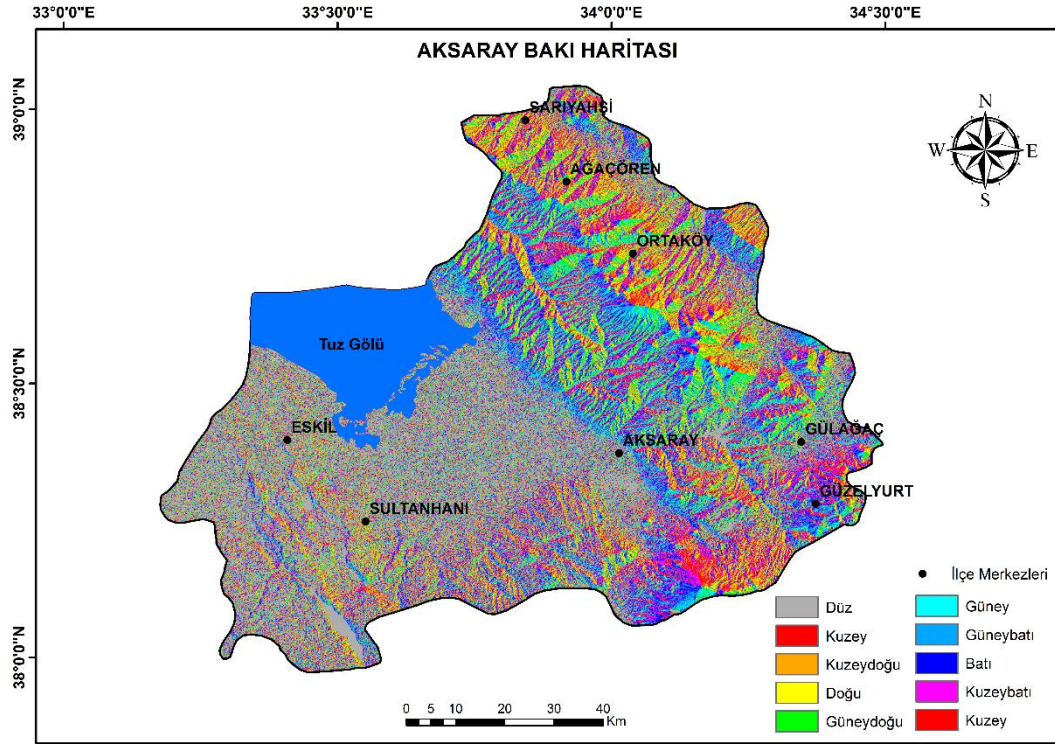


Şekil 2.24. Aksaray eğim haritası.

2.3.3.3 Bakı

Bakı, arazi yüzeyinin hangi yöne dönüklüğünü ifade eden bir terimdir. Arazi yüzeyine düşen güneş açıları bölgedeki toprak yapısı, sıcaklık, nem ve bitki örtüsü üzerinde kritik bir öneme sahiptir (Yılmaz, 2023). Bu etki, zeminin bakı etkisiyle birbirinden farklılaşmasını sağlar. Bahsedilen bu farklılıklar, zemin çökmesi üzerinde dolaylı olarak aktif bir rol alabilir. Yapılan birçok zemin çökmesi çalışmasında da bakı, kullanılması genel kabul görmüş parametrelerden biridir (Chen ve Zhang, 2021; Crosetto vd., 2003; Pham vd., 2017; Pourghasemi vd., 2013).

Bakı, SYM verisi kullanılarak ve CBS programları yardımıyla oluşturulmuştur. Elde edilen bakı verileri, yönlere ayrılarak analizlerde kullanılmak üzere haritalandırılmıştır (Şekil 2.25).

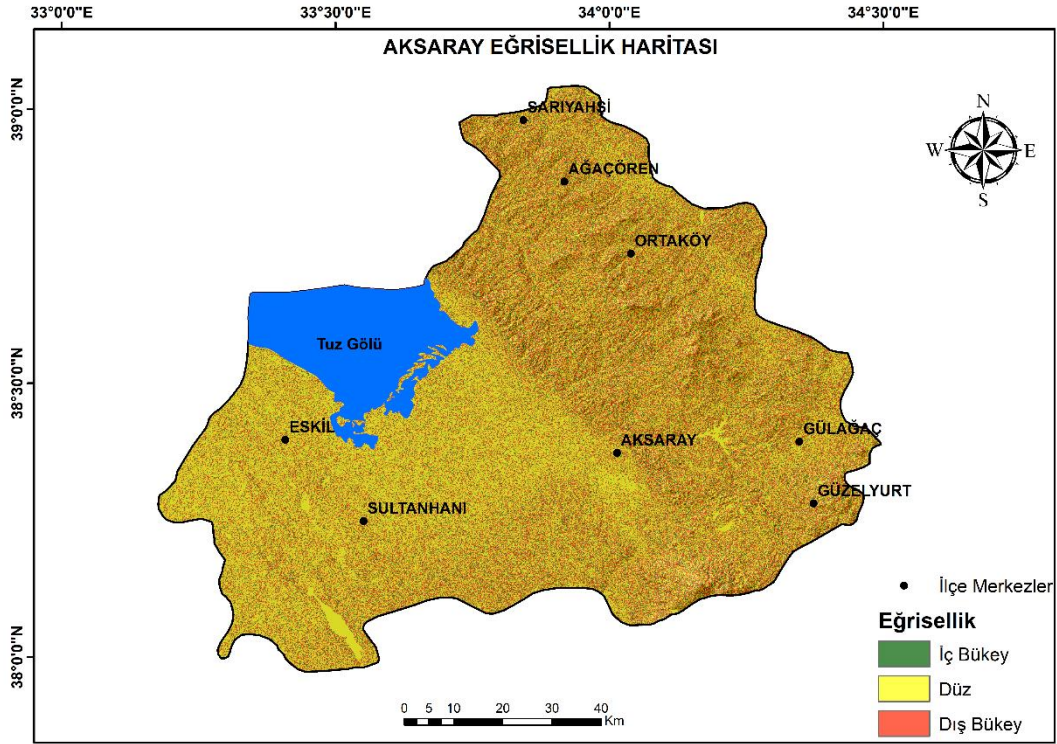


Şekil 2.25. Aksaray baki haritası.

2.3.3.4 Eğrisellik

Eğrisellik, eğim açısı veya yönünün değişim oranıdır (Hutchinson ve Gallant, 2000; Zhu vd., 2014). Arazi yüzeyinde üç sınıfa ayrılan eğrisellik; iç bükey (piksellerin negatif değerleri), dış bükey (piksellerin pozitif değerleri) ve düz (piksellerin sıfır değerleri) olarak arazinin topografik özelliğini ortaya koyan bir veridir. Bu yüzey şekilleri, suyun akış yönü ve birikimi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Senouci vd., 2021). Gerek yeraltı sularının beslenmesi gerekse arazinin ekolojik olarak farklılaşmasına neden olan eğrisellik kavramı, zemin çökmesi duyarlılık çalışmalarında kullanılan bir parametredir (Eghrari vd., 2023; Pourghasemi ve Saravi, 2017; Youssef ve Pourghasemi, 2021).

Eğrisellik, SYM verisi kullanılarak ve CBS yazılımları aracılığıyla matematiksel bir analiz sonucu elde edilmiştir ve piksel değerlerine göre iç bükey, dış bükey ve düz olmak üzere üç sınıfa ayrılmıştır (Şekil 2.26).



Şekil 2.26. Aksaray eğrisellik haritası.

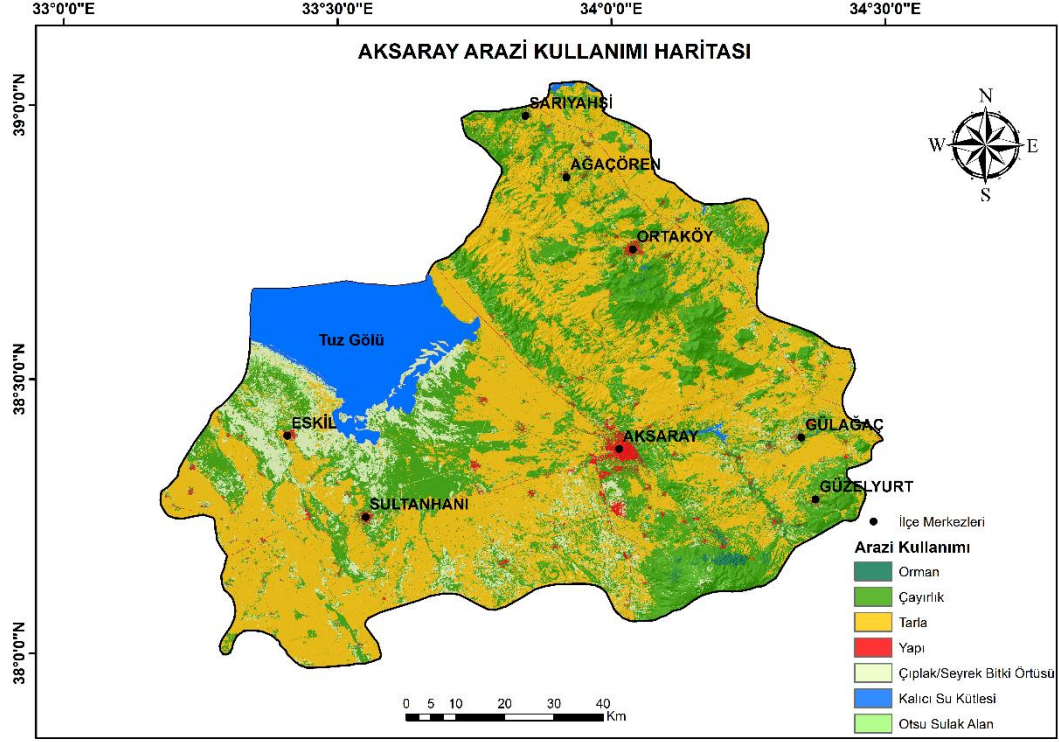
2.3.4 Antropojenik faktörler

2.3.4.1 Arazi kullanımı

İnsanlar, doğal gereksinimleri nedeniyle yaşadıkları coğrafyayı sürekli olarak değişime uğratmaktadır. Barınma ve sosyolojik ihtiyaçlar doğrultusunda hızla büyüyen kentleşme, gıda gibi temel ihtiyaçlar için tarım arazilerinde meydana gelen değişiklikler ve bu gereksinimlerin artışıyla birlikte ormanların tahrip edilmesi, insanların yaşadığı alanlarda büyük değişimlere yol açmaktadır. Arazi üzerinde gerçekleştirilen her türlü mühendislik faaliyetleri (altyapı, yol yapımı, binalaşma ve tarımsal faaliyetler) toprak stabilitesini etkilemektedir (El Jazouli vd., 2019). Ayrıca bu bölgelerde, ihtiyaçların giderilmesi için yeraltı kaynaklarının (su, petrol, maden vb.) aşırı derecede tüketilmesi, zemin çökmesini tetikleyen bir faktördür (Arabameri vd., 2021).

ESA, 2021 yılına ait 10 metre çözünürlüklü küresel arazi örtüsü verisi olan WorldCover 2021'i ücretsiz olarak sunmaktadır (Zanaga vd., 2022). Bu çalışma kapsamında, küresel ölçekte yayınlanan ESA WorldCover 2021 arazi kullanım verisi, Aksaray il sınırlarına uyarlanarak yeniden düzenlenmiş ve analizlerde kullanılmıştır. Arazi kullanım verisi, orman, çayırılık, tarım alanları, yapılaşma bölgeleri, çıplak veya

seyrek bitki örtüsü, kalıcı su kütlesi ve otsu sulak alanlar olmak üzere 7 sınıfa ayrılmıştır. Bu sınıflandırma, Aksaray ilinin arazi kullanım dağılımını daha detaylı bir şekilde incelemek ve analizlerde kullanılmak üzere görselleştirilmiştir (Şekil 2.27).

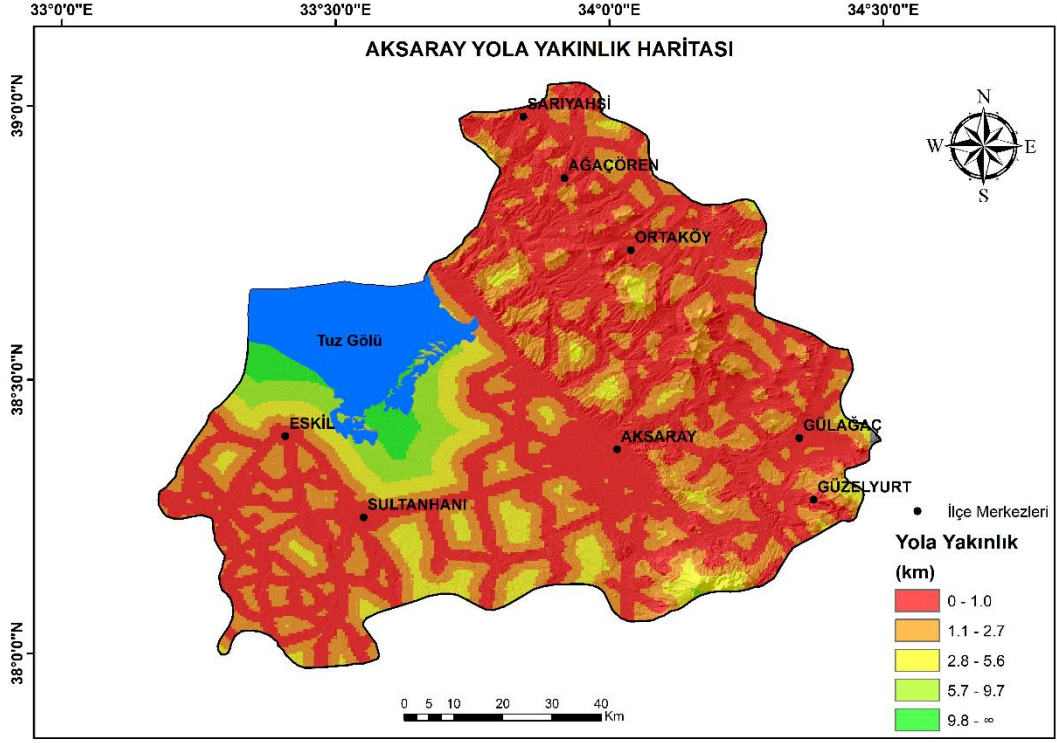


Şekil 2.27. Aksaray arazi kullanımı haritası.

2.3.4.2 Yola yakınlık

Çalışma alanında mevcut yollar, arazinin stabilitesi açısından kritik bir antropojenik unsur olarak değerlendirilmektedir (Yılmaz, 2023). Bu nedenle, yola yakınlık literatürde zemin çökmesi ile ilgili çalışmalarda önemli bir değişken olarak ele alınmıştır (Alqadhi vd., 2022; Chen ve Zhang, 2021; Kidanu vd., 2018; Pourghasemi vd., 2013; Ranjgar vd., 2021; Youssef vd., 2016).

1/100.000 ölçekli Çevre Düzeni Planları üzerinden sayısallaştırılan karayolu verisi, Öklid mesafe analizi yöntemi uygulanarak yollara yakınlık haritasına dönüştürülmüştür (Şekil 2.28). CBS programı kullanarak üretilen yola yakınlık verisi doğal kırılım yöntemi (Jenks) ile 5 sınıfa ayrılmıştır. Bu yöntemin tercih edilme nedeni, verinin doğal dağılımını en iyi şekilde yansıtan sınıflandırma yapısını sağlamasıdır.

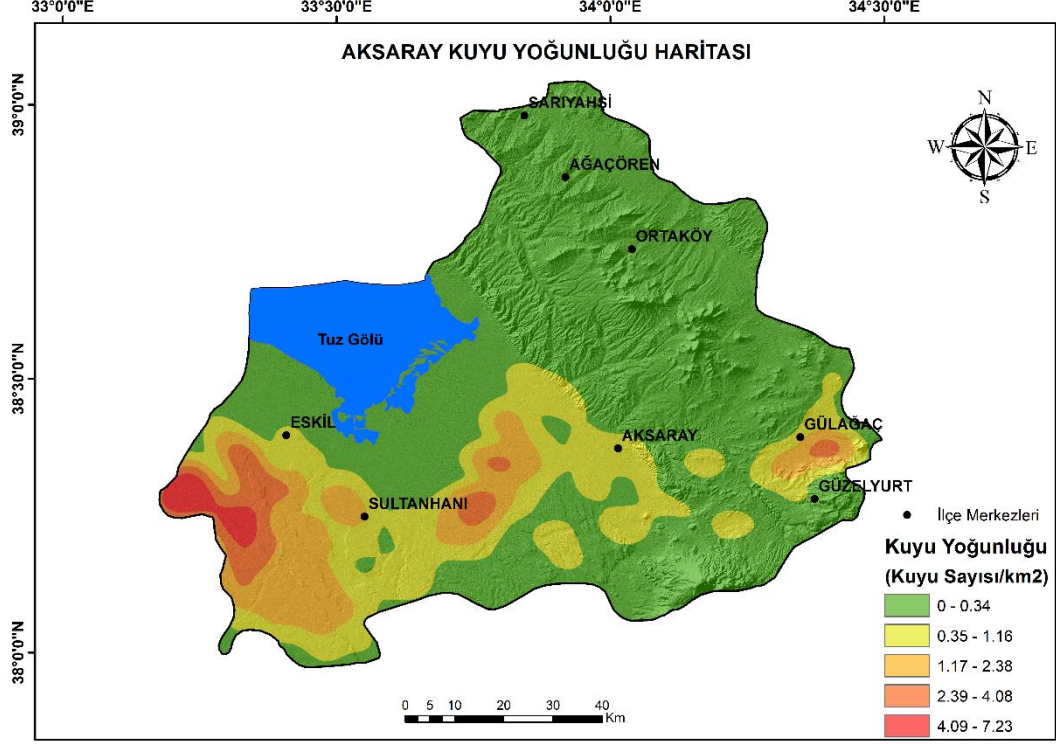


Şekil 2.28. Aksaray yola yakınlık haritası.

2.3.4.3 Kuyu yoğunluğu

Su, insan hayatının vazgeçilmez bir unsurudur. Su kaynaklarının etkin yönetimi, sürdürülebilir bir dünya için kritik bir öneme sahiptir (Direk ve Acar, 2006). Ülkemizde, yeterli gıda üretimini sağlamak veya ekonomik nedenlerle tarımsal faaliyetler çoğu zaman plansız bir şekilde yürütülmektedir. Tarımsal sulama ihtiyacı, yağışlardan veya yağışların yetersiz olduğu durumlarda yeraltı sularının çekilmesiyle karşılanmaktadır (Çakmak ve Gökalp, 2011). İklim değişikliğinin yaşanması, su kuyularının sayısının artmasına neden olabilmektedir. Artan kuyu sayısı ise yeraltı su seviyesinin giderek düşmesine yol açmaktadır. Kuyular aracılığıyla yeraltı suyunun çekilmesi, akifer-rezervuar sistemlerinde ciddi deformasyonlara neden olmakta; bu durum zemin çökmesi, kırılmalar ve çatlaklar şeklinde kendini göstermektedir (Karahanoğlu, 2018). Yapılan birçok araştırma, zemin çökmesinin en önemli nedenlerinden birinin yeraltı su seviyesindeki değişimler olduğunu ortaya koymuştur (Ebrahimi vd., 2020; Ozdemir, 2016; Xue vd., 2005; Zamanirad vd., 2020; Zhang vd., 2023; Zhou vd., 2017). Bu doğrultuda, kuyu yoğunluğu zemin çökmesi analizlerinde önemli bir parametre olarak değerlendirilmektedir.

Aksaray İl Özel İdaresi, Aksaray Belediyesi ve Aksaray İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü'nden temin edilen 3.183 adet kuyu verisi, yoğunluk analizi (Density Analysis) yöntemi ile değerlendirilerek kuyu yoğunluk haritası oluşturulmuştur. Elde edilen harita, doğal kırılım yöntemi (Jenks) kullanılarak 5 sınıfa ayrılmıştır (Şekil 2.29).



Şekil 2.29. Aksaray kuyu yoğunluk haritası.

2.3.4.4 Normalize edilmiş bitki örtüsü fark indesi (NDVI)

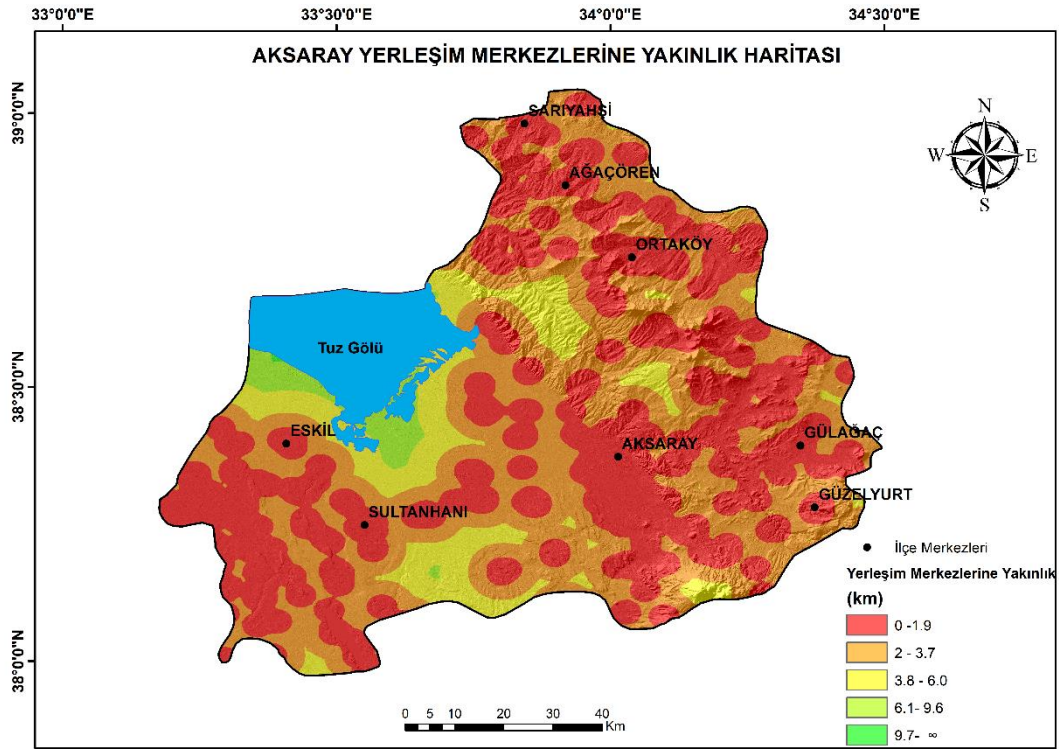
NDVI, gelişmiş uzaktan algılama teknikleri kullanılarak elde edilen ve bitki örtüsünün yoğunluğuna ilişkin bilgi sağlayan bir indekstir(Bozkurt vd., 2018). NDVI, uydu sensörleri tarafından algılanan yakın kızılötesi (NIR) ve kırmızı (RED) bantlardaki yansıma değerleri kullanılarak matematiksel bir model ile hesaplanmaktadır (Denklem 2.17).

$$NDVI = \frac{(NIR-RED)}{(NIR+RED)} \quad (2.17)$$

Bitki örtüsü, bir bölgenin iklimi, toprak yapısı ve yeraltı su seviyesi ile doğrudan ilişkilidir. Ayrıca, yüzey sularının dolaşımı ve toprak nemliliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu nedenle, NDVI ile elde edilen indeks, dolaylı olarak zemin çökmesi

çalışmaları vb.) ise zemin çökmelerini tetiklemektedir (Cigna ve Tapete, 2022; Wang vd., 2024). Yerleşim merkezleri ve çevresinde giderek artan zemin çökmelerine birçok araştırmacı dikkat çekmektedir (Bausilio vd., 2022; Liu vd., 2024; Osmanoğlu vd., 2011; Xu vd., 2023; Zhao vd., 2024a).

Çalışma alanındaki yerleşim merkezleri, 1/100.000 ölçekli Çevre Düzeni Planları kullanılarak sayısallaştırılmış ve öklid mesafesi analiziyle yakınlık haritası oluşturulmuştur. Elde edilen mesafe verileri, doğal kırılım yöntemi (Jenks) kullanılarak beş sınıfa ayrılmış ve analizlerde kullanılmak üzere görselleştirilmiştir (Şekil 2.31).



Şekil 2.31. Aksaray yerleşim merkezlerine yakınlık.

2.4 Faktör Seçimi

2.4.1 Çoklu doğrusallık (Multicollinearity) analizi

Duyarlılık analizlerinde güvenilirlik, seçilen faktörlerin doğru ve anlamlı bir şekilde belirlenmesine bağlıdır (İban ve Bilgilioğlu, 2023). Zemin çökmesi duyarlılık modelleme literatüründe, araştırmacıların kullandığı birçok koşullandırma faktörü bulunmaktadır. Literatür araştırması sonucunda, çalışma alanı için 15 adet

koşullandırma faktörü seçilmiştir (Bianchini vd., 2019; Ebrahimi vd., 2020; Hakim vd., 2020; Mohammady vd., 2019a; Ranjgar vd., 2021; Sekkeravani vd., 2022; Yang vd., 2024).

Her bölgenin kendine özgü koşulları nedeniyle, bu faktörler ve faktörler arasındaki ilişkiler farklılık gösterebilir. Faktörler arasındaki doğrusal ilişkilerin varlığı, aralarında çoklu doğrusal bağlantı (multicollinearity) problemi bulunduğunu gösterir. Bu tür durumlarda, söz konusu faktörlerin aynı modelde kullanılması aşırı öğrenmeye, model performansında düşüşe, zaman kaybına ve bellek kullanımında sorunlara yol açabilir. Bu nedenle, çoklu doğrusal bağlantı problemi tespit edilen faktörlerin veri setinden çıkarılması gerekmektedir (Hong vd., 2018; Lee vd., 2018).

Yaygın olarak kullanılan çoklu doğrusallık endeksleri, VIF ve TOL istatistiksel hesaplama yöntemleri arasında yer alır. Genellikle iki bağımsız değişken arasında paralel bir ilişki olup olmadığını analiz eder (Zamanirad vd., 2020). Hesaplanan TOL değeri 0,1 den küçük, VIF değeri ise 10'dan büyük olması çoklu doğrusal bağlantının varlığını işaret etmektedir. Dolayısıyla 0,1'den büyük, 10'dan küçük VIF değerleri faktörler için genel kabul görmüştür (Lee vd., 2023a). Ve şu şekilde hesaplanır:

$$TOL = 1 - R_j^2 \quad (2.18)$$

$$VIF = \frac{1}{1 - R_j^2} \quad (2.19)$$

R_j^2 , bağımlı değişken olarak X_j 'nin kullanıldığı bir regresyon modelinden hesaplanan belirleme katsayısıdır.

Korelasyon analizi, bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki doğrusal ilişkilerin derecesini belirlemek için kullanılan bir analiz yöntemidir (Lee vd., 2023a). Korelasyon katsayıları -1 ile +1 arasında değişen değerler alır. Değerler +1'e yaklaştıkça iki faktör arasında anlamlı pozitif bir korelasyon olduğu, -1'e yaklaştıkça negatif bir korelasyon olduğu anlamına gelir. Yapılan birçok çalışmada -0,7 ile +0,7 değerleri sınır değerler olarak kabul görmüştür (İban ve Bilgilioğlu, 2023). Bu değerleri aşan endeksler çoklu doğrusallık problemine yol açabilmektedir (İban ve Bilgilioğlu, 2023). Korelasyon katsayısı şu denklemlerle hesaplanabilir (Box ve Cox, 1964; Pearson, 1895):

$$Corr(X, Y) = \rho(X, Y) = \frac{Cov(X, Y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (2.20)$$

$$r = \frac{S_{xy}}{S_x S_y} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (2.21)$$

S_{xy} : X ve Y değişkenlerinin kovaryansı, S_x : değişkenin standart sapması X, S_y : değişken Y'nin standart sapması.

2.5 Zemin Çökmesi Duyarlılık Modelleri

Zemin çökmesi duyarlılığı, belirli bir bölgenin doğal ve insan kaynaklı faktörlerle birlikte o zeminin dış etkenlere verdiği tepkiyi değerlendirerek, bölgenin zemin çökmesi olaylarına yatkınlığını ifade eder. Zemin çökmesi duyarlılığı, risk yönetimi ve değerlendirme süreçlerinde önemli bir rol almaktadır (Çevik ve Topal, 2003; Pal ve Chowdhuri, 2019).

Günümüzde, zemin çökmesi duyarlılığını değerlendirmek için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler genellikle nicel ve yarı nicel yaklaşımlar olarak iki ana kategoriye ayrılabilir. Yarı nicel modeller, uzman görüşlerine ve deneyimlerine dayanarak faktörlerin ağırlıklandırılmasını içerir (Çetin, 2024). Yaygın olarak kullanılan yöntemler arasında Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP), karar vericilerin koşullandırma faktörlerini karşılaştırarak her birinin önem derecesini belirlemesine olanak tanır (Saaty, 1980). Ancak, farklı derecelerde verilen iyi ve kötü puanlar arasındaki farklılıklar bilgi kaybına yol açabilir ve aşırı sayıda ikili karşılaştırmanın yapılması gerekebilir (Haliloğlu ve Odabaş, 2018). Bulanık Mantık (Fuzzy Logic) ise belirsizlik ve bulanıklığın yüksek olduğu durumlarda esnek bir değerlendirme imkânı sağlar (Zadeh, 1965). Bu yöntemlerin uzman görüşüne dayalı olması, yönteme bir öznellik katmaktadır. Farklı uzmanlar arasında kural tabanında veya üye fonksiyonlarında tutarsızlıklar olabilir (Çetin, 2024).

Nicel modeller ise istatistiksel ve matematiksel analizlere dayanır. Lojistik Regresyon (LR), bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi modelleyerek belirli bir olayın olasılığını tahmin eder (Fagerland ve Hosmer, 2012). Ancak, gerçek dünya verilerinde bu tür doğrusal ilişkiler genellikle karmaşık ve doğrusal olmayan bir yapıdadır. Bu durum, modellerin karmaşık veri kümelerini yeterince iyi

açıklayamamasına yol açabilir (Kuhn ve Johnson, 2013). Frekans Oranı (FR) ve Kanıt Ağırlığı (WOE) gibi yöntemler, geçmiş olayların mekânsal dağılımını analiz ederek gelecekteki risk bölgelerini belirlemeye çalışır (Keller, 1995). Bu yöntemlerle başarılı çalışmalar olsa da, istatistiksel modeller zaman alıcı ve çeşitli karmaşık süreçleri içeren büyük miktarda veri toplanmasını gerektirmektedir (Bui vd., 2012).

MÖ, diğer yöntemlerde belirtilen dezavantajlarını gidermek için etkili bir alternatif sunar. Doğrusal olmayan ve karmaşık ilişkileri modelleyebilme kapasitesine sahip olan MÖA, daha esnek ve doğru modeller sunar (Breiman, 2001). Ayrıca MÖA, değişkenler arasındaki karmaşık etkileşimleri analiz edebilme yeteneği ile dikkat çeker ve genelleme yeteneği daha yüksek modeller üretir (Chen ve Guestrin, 2016). Karmaşık mekânsal ve zamansal ilişkileri etkili bir şekilde modelleyen MÖ yöntemleri, duyarlı bölgelerin daha doğru bir şekilde tespit edilmesini sağlamaktadır. Bu özellikleri sayesinde, MÖA zemin çökmesi duyarlılık analizlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Ahmed vd., 2024; Chen vd., 2024; Eghrari vd., 2023; Guo vd., 2023; Hakim vd., 2020; Lee vd., 2023b; Tran vd., 2024).

2.5.1 Makine öğrenmesi

MÖ, bilgisayarların veriler ve deneyimler aracılığıyla bilgi çıkarımı yaparak, bu süreç sayesinde tahmin yapma ve karar alma yeteneklerini geliştirmeyi amaçlayan bir yapay zeka alt dalıdır (Mitchell, 1997). Bu yaklaşım, algoritmaların büyük veri kümelerindeki örüntüleri ve ilişkileri tanımasını ve bu analizlere dayanarak tahminler veya kararlar almasını mümkün kılar (Alpaydın, 2020). Makine öğrenmesi uygulamaları, ilk başlarda veri miktarı arttıkça daha doğru ve etkili sonuçlar üretir mantığıyla ilerlerken son zamanlarda model performansının, veri miktarı ve kalitesiyle doğrudan ilişkili olduğu genel kabul görmüştür (Kariluoto vd., 2021).

Makine öğrenmesi, temel olarak denetimli (supervised learning) ve denetimsiz (unsupervised learning) öğrenme olmak üzere iki gruba ayrılabilir. Denetimli öğrenmede, algoritmalar etiketlenmiş verilerle eğitilir ve belirli bir sonucu tahmin etmeyi öğrenir (Bishop, 2006). Denetimsiz öğrenmede ise algoritmalar etiketlenmemiş verilerdeki örüntüleri veya sınıfları keşfetmeye çalışır (Hastie vd., 2009).

Bazı MÖA, modelin performansını artırmak amacıyla birden çok modeli birleştirerek topluluk (ensemble) yöntemlerini kullanmaktadır (Alsheref vd., 2022). Torbalama (Bagging), Güçlendirme (Boosting) ve Yığınlama (Stacking) gibi teknikler bu yöntemler arasında yer alır. Topluluk yöntemleri, farklı çıktıların sonuçlarını birleştirerek genelleme yeteneğini artırır ve daha güvenilir sonuçlar sağlayabilir (Breiman, 2001). Bu çalışmada, RF, XGBoost, AdaBoost, CatBoost ve LightGBM topluluk öğrenme modelleri kullanılmış ve performansları değerlendirilmiştir. Bu modeller, güçlü sınıflandırma performansları ve farklı veri özelliklerine uyum sağlama yetenekleri nedeniyle tercih edilmiştir.

2.5.1.1 Uyarlanabilir güçlendirme (AdaBoost) algoritması

AdaBoost, Freund ve Schapire (1996) tarafından sınıflandırma ve regresyon görevleri için geliştirilen ve yaygın olarak kullanılan bir topluluk (ensemble) algoritmasıdır. Algoritma, genellikle karar ağaçları gibi zayıf öğrencilerden (weak learners) oluşan bir grup modeli art arda eğiterek güçlü bir tahmin modeli oluşturmayı hedefler. Algoritmanın temel fikri, daha önce yanlış sınıflandırılan örneklere daha fazla ağırlık vermesiyle eğitimi ilerletmesidir. Bu yapı, zorlayıcı örnekler üzerine odaklanarak genel doğruluğun artırılmasını sağlamaktadır (Tran vd., 2024). Bu algoritma, zemin duyarlılık çalışmalarında sıklıkla kullanılmakta ve başarılı sonuçlar elde edilmektedir (Chen vd., 2024; Hakim vd., 2020; Tran vd., 2024). AdaBoost algoritmasının genel biçimi aşağıda verilmiştir.

İkili sınıflandırma problemi üzerinden AdaBoost'un nasıl çalıştığını açıklamak için şu şekilde bir açıklama yapılabilir:

Hedef değişken (y), iki etiketten birini alır: $\{-1, 1\}$. Tahmin fonksiyonu ($f(x_i)$), giriş değişkeni x_i 'nin hangi sınıfa ait olduğunu belirler. Eğitim hatası (r), temel modellerin yaptığı yanlış sınıflandırmaları ifade eder:

$$r = \frac{1}{N} = \sum_{i=1}^N 1(y_i \neq f(x_i)) \quad (2.22)$$

Burada N , eğitim örneklerinin sayısını, α_i , i . örneğin ağırlığını temsil eder. y_i , i . örneğin gerçek sınıf değerini ifade eder. Son tahmin modeli ise şu şekilde tanımlanmıştır:

$$f(x) = \text{sing} \left[\sum_{i=1}^p \alpha_i f_i(x) \right] \quad (2.23)$$

Burada, $\text{sign}(x)$ fonksiyonu x pozitifse 1, negatifse -1 döndürür. Yani sınıflandırmanın sonucunu belirler.

2.5.1.2 Aşırı gradyan artırma (XGBoost) algoritması

XGBoost, Gradient Boosting (GB) algoritmasının optimize edilmiş ve gelişmiş bir versiyonu olarak sunulmuştur (Chen ve Guestrin, 2016). XGBoost, GB'nin yalnızca kayıp fonksiyonunun birinci türevini analiz etmek yerine, Taylor genişlemesini kullanarak iyileştirme sağlar. Bu algoritmanın temel amacı, düzenlenmiş hedef fonksiyonunu minimize etmektir ve aşağıdaki şekilde açıklanabilir (İban ve Bilgilioğlu, 2023):

$$L(\Phi) = \sum_i l(\tilde{y}_i, y_i) + \sum_i \Omega(f_k) \quad (2.24)$$

Burada, ilk tahmin edilen \tilde{y}_i ile gerçek y_i arasındaki farkı ölçen bir kayıp fonksiyonu ifade edilmektedir. İkinci terim ise model karmaşıklığını kontrol etmek amacıyla kullanılan ceza fonksiyonunu temsil eder ve şu şekilde tanımlanmıştır.

$$\Omega(f) = \gamma T + \frac{1}{2} \lambda \|w\|^2 \quad (2.25)$$

Burada T , yaprak sayısını; w , her yaprağın skorunu ve γ ile λ ise düzenleme parametrelerini ifade eder. Optimizasyon süreci ise aşağıdaki şekilde minimize edilir.

$$L(t) = \sum_{i=1}^n l(\tilde{y}_i, y_i^{(t-1)} + f_t(x_i)) + \Omega(f_t) \quad (2.26)$$

Burada ikinci dereceden Taylor açılımı uygulanarak hedef fonksiyonun optimizasyon süreci hızlandırılabilir.

Zemin çökmesi analizi ve birçok duyarlılık çalışmasında, XGBoost yüksek doğruluk oranı ve hızlı işlem yapma kabiliyetiyle araştırmacılar tarafından tercih edilmiştir (Eghrari vd., 2023; Tran vd., 2024).

2.5.1.3 Hafif gradyan artırma (LightGBM) algoritması

LightGBM, büyük veri setleriyle çalışmak için tasarlanmış, hızlı ve hafif bir boosting algoritmasıdır (Ke vd., 2017). Algoritma, tüm karar ağaçlarının sonuçlarını toplayarak tahminler yapmak için birden fazla karar ağacı kullanan geliştirilmiş bir gradyan artırma karar ağacı algoritmasıdır (Chai vd., 2024). XGBoost, seviye bazlı büyüme (level-wise growth) yani karar ağacının her seviyesindeki düğümlerin aynı anda genişletilmesini yaparken; LightGBM, yaprak bazlı büyüme (leaf-wise growth) yöntemi ile en fazla kayıp fonksiyonunun iyileşmesini sağlayan yaprağı genişletmeyi hedefler. Böylelikle yalnızca fayda sağlayan bölümler genişletilmiş olur. En iyi yaprak bölümlerini belirlemek için histogram tabanlı bir teknik kullanan LightGBM, özellik değerlerinin histogramlarını algoritma tarafından bölmelere ayrılarak gruplandırır. Her bir bölme kontrol edildikten sonra, yalnızca en az veriye sahip yaprağın histogramı güncellenir. Bu şekilde, hesaplama maliyeti azalır ve algoritma daha hızlı çalışır. Bu durum, daha hızlı ve daha az bellek kullanımı sağlar. LightGBM algoritması Denklem 2.31 ile açıklanabilir (İban ve Bilgilioğlu, 2023).

$$F_n(x) = \alpha_0 f_0(x) + \alpha_1 f_1(x) + \dots + \alpha_n f_n(x) \quad (2.27)$$

Burada n , karar ağacı sayısını ifade eder ve algoritmanın n kadar karar ağacı ile başlatıldığını belirtir. Eğitim örnek ağırlığı ise $\frac{1}{n}$ olarak belirlenir. Zayıf sınıflandırıcı $f(x)$ eğitilir ve α gücüyle belirlenir. Sınıflandırıcı, $F_n(x)$ elde edilene kadar ağırlıkları günceller ve $F_n(x)$ son sınıflandırıcı olarak kabul edilir. Literatürde, zemin çökmesi duyarlılık analizi için birçok araştırmacı tarafından yoğun olarak kullanılmaktadır (Chai vd., 2024; Guo vd., 2023; Lee vd., 2023b).

2.5.1.4 Kategorik artırma (CatBoost) algoritması

CatBoost, Yandex şirketinin 2017 yılında tanıttığı bir boosting algoritmasıdır. Algoritma, özellikle kategorik verilerin ön işleme gerek duymadan otomatik olarak işlenmesi ve tahmin kaymalarının ciddi derecede azaltılması gibi özellikleriyle, geleneksel gradyan artırma tabanlı karar ağacı algoritmalarına kıyasla önemli avantajlar sunar. Gradient Boosting Decision Tree (GBDT), modellerinde ön işlem olarak kategorik veriler one-hot encoding veya label encoding gibi işleme tabi tutulur. CatBoost'ta ise doğrudan eğitim sürecinde işlenir. Bu özellik, hem veri ön işleme

sürecini basitleştirir hem de işlem verimliliğini artırır. Gradyan artırma yöntemlerinde kategorik verilerin kullanılması genellikle tahminlerde sapmalara neden olmaktadır. CatBoost bu sorunu aşmayı, tahmin doğruluğunu artırmayı ve aşırı uyumu engellemeyi hedefler (Kuş vd., 2021). Sonuç olarak, bu algoritma regresyon ve sınıflandırma problemlerinde yüksek doğruluk sağlayan bir topluluk öğrenme yöntemidir ve büyük veri kümeleriyle olduğu kadar küçük veri kümelerinde de etkili bir şekilde çalışır (Kuş vd., 2021; Nguyen vd., 2024; Yao vd., 2023). Literatürde, zemin çökmesi duyarlılık analizi için araştırmacılar tarafından kullanılmıştır (Hosseini vd., 2025; Zhang vd., 2023).

2.5.1.5 Rastgele orman (RF) algoritması

RF, Breiman (2001) tarafından sınıflandırma ve regresyon problemleri için kullanılan birden fazla karar ağacıyla çalışan güçlü bir algoritmadır (Chatrsimab vd., 2020). RF, gürültülü bir veri kümesindeki varyansı azaltmak için torbalama yöntemine dayanan bir makine öğrenmesi modelidir (Breiman, 2001). RF, üç temel parametre ile çalışır: düğüm boyutu, ağaç sayısı ve örneklenen özellik sayısı. Düğüm boyutu, her bir ağacın dallanma derinliğini kontrol eder. Ağaç sayısı, ormanda kaç tane karar ağacı bulunduğunu ifade ederken, örneklenen özellik sayısı ise her ağacın bölme işlemi sırasında kullanacağı rastgele özellik sayısını ifade etmektedir (Hosseinzadeh vd., 2024). RF, önce önyükleme örneklerini kullanarak her ağaç için farklı bir eğitim alt kümesi oluşturur. Bu işlem sırasında verilerin yaklaşık %33'ü dışarıda bırakılır ve bunlar torba dışı gözlemler (Out-of-Bag - OOB) olarak adlandırılır. OOB gözlemlerini değerlendirerek RF'in genelleme hatasını tahmin eder. OOB hatası, bağımlı değişkenler üzerindeki en etkili faktörleri belirtmek için giriş değişkenlerinin önemini ölçmekte kullanılır. RF, hem ağaçlar arasındaki korelasyonu azaltmak hem de modelin verimliliğini artırmak için bölme değişkenini rastgele bir özellik grubundan seçer. Bu şekilde oluşturulan bütün ağaçların tahmin ortalamaları alınarak sonuç elde edilir. Böylece modelin genelleme yeteneği artarken aşırı uyum problemleri azaltılmış olur (Breiman, 2001; Hosseinzadeh vd., 2024; Mohammady vd., 2019b). RF için Denklem 2.32 kullanılır.

$$\hat{Y} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N T_n(X) \quad (2.28)$$

Denklemden \hat{Y} , toplam tahmini, $T_n(X)$ n'inci ağacın X özellik vektörü ile yaptığı tahmin olarak ifade edilir. Literatürde, zemin çökmesi duyarlılık analizi için birçok araştırmacı tarafından yoğun olarak kullanılmıştır (Ahmed vd., 2024; Eghrari vd., 2023; Youssef vd., 2016; Youssef ve Pourghasemi, 2021).

2.5.2 Model performansı

Modellerin sonuçları, gerekli ölçümler yapılmadan ve değerlendirilmeden kullanmak uygun olmayacaktır. Duyarlılık analizinin başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesinde, her modelin doğruluğunun araştırılması önemli bir adımdır (Chung ve Fabbri, 2003). Oluşturulan modellerin verimliliği, modelleme aşamasının yanı sıra test aşamasında da değerlendirilmesi gerekmektedir. Modelin veriye ne kadar iyi uyum sağladığı, eğitim veri setiyle belirlenebilmektedir. Ancak, bu modelin genelleme performansını değerlendirmek için yeterli olmayacaktır. Bu nedenle, model doğrulama sürecinde modelin eğitimi aşamasında kullanılmayan test verisi kullanılmaktadır (Bui vd., 2018).

Hata matrisi, sınıflandırma modellerinin performansını açık bir şekilde değerlendirmek için kullanılan temel bir araçtır. Modelin temel amacı, tahmin sonuçları ile gerçek sınıf değerleri arasındaki ilişkiyi net bir şekilde ortaya koymaktır. Bu teknik dört temel bileşenden oluşur: Doğru Pozitif (TP), Doğru Negatif (TN), Yanlış Pozitif (FP) ve Yanlış Negatif (FN). Hata matrisi ile modelin sınıflar üzerindeki tahminlerin doğruluk oranları gözlemlenir ve hangi tür hataların öne çıktığı tespit edilir (Fawcett, 2006). Bu matrise dayalı olarak duyarlılık (recall), kesinlik (precision) ve F1 skoru hesaplamaları yapılır ve modelin performansı daha detaylı bir şekilde analiz edilebilir (Alizadehsani vd., 2013; Fawcett, 2006; Powers, 2011).

Sınıflandırma modellerinin performansını daha detaylı bir şekilde değerlendirebilmek için, öncesinde hesaplanan verilere dayalı olarak Hassaslık (Precision), Geri Çağırma (Recall) ve F1-skoru gibi ölçütler hesaplanabilir (Pham vd., 2016).

$$Hassaslık = \frac{TP}{TP+FP} \quad (2.29)$$

$$Geri \text{ Çağırma} = \frac{TP}{TP+FN} \quad (2.30)$$

$$F1 = 2 * \frac{Hassaslık \cdot geri \text{ çağırma}}{Hassaslık + geri \text{ çağırma}} \quad (2.31)$$

Bu ölçüm değerleri, özellikle sınıf dengesizliğine sahip veri setlerinde model performansını daha güvenilir bir şekilde analiz etmeye olanak tanır (Sokolova ve Lapalme, 2009).

Doğruluk, bir modelin sınıflandırmadaki toplam doğru tahmin oranını belirtmektedir. Bu oran, doğru tahmin edilen örneklerin toplam örnek sayısına bölünmesiyle hesaplanır. Yüksek doğruluk oranı, modelin daha doğru tahminler yaptığını ve performansının yüksek olduğunu gösterir (Pham vd., 2016). Matematiksel ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$\text{Doğruluk} = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \quad (2.32)$$

Bu çalışmada, model performansını değerlendirmek amacıyla yaygın olarak kullanılan Python tabanlı scikit-learn kütüphanesi tercih edilmiştir (Pedregosa vd., 2011). Ayrıca, LightGBM için Microsoft LightGBM (Ke vd., 2017) ve XGBoost için XGBoost kütüphanesi (Chen ve Guestrin, 2016) kullanılmıştır.

2.5.3 Hiperparametre optimizasyonu

MÖ, veri setlerini inceleme altına alır ve bu verilerdeki komplike ilişkileri algılayarak akılcı karar vermelerini sağlayan çeşitli modeller geliştirir. Bu algoritmalar, tıpkı insanlar gibi öğrenmeye çalışır ve birtakım çıkarımlarda bulunurlar. MÖA'nın tasarımı ve geliştirilmesinde parametreler ve hiperparametreler oldukça önemli bir role sahiptir (Karcioğlu ve Bulut, 2021). Parametreler ve hiperparametreler birbirine karıştırılmamalıdır. Parametreler, modelin oluşturulması aşamasında eğitim süresi boyunca verilerden öğrenilen ve güncellenen değerlerdir. Bu değerler, eğitim süresinin tamamlanması akabinde nihai halini alarak modelin bir parçası haline gelirler (Sungur ve Bakır, 2024). Hiperparametre ise modelin eğitim sürecini yönlendiren ve kullanıcı tarafından önceden belirlenen değerlerdir. Bu değerler verilerden öğrenilmez, aksine modelin yapılandırılmasında manuel veya bazı tekniklerle belirlenirler. Hiperparametrelerin farklı veri setlerinde farklı değerler alması gayet normaldir. Bu nedenle hiperparametreler doğru şekilde ayarlanmadıklarında düşük performans, yetersiz öğrenme veya aşırı uyum gibi problemlere yol açabilir (Hutter vd., 2019; Sungur ve Bakır, 2024). Bu durumu aşmak için hiperparametre optimizasyonu ile en

iyi performansı elde etmek amacıyla farklı hiperparametre kombinasyonları denenir ve en iyi hiperparametreler belirlenir.

Hiperparametrelerin kullanıcı tarafından belirlenmesi birçok tekrara, zorluğa ve zaman kaybına yol açabilir. Bu durum GridSearch (ızgara arama) vb. yöntemler ile aşılabilir (Bergstra ve Bengio, 2012; Hazer ve Bozdağ, 2024). Bu yöntem, bir modelde kullanıcı tarafından belirlenmiş hiperparametre aralıklarında en iyi kombinasyonu bulmak amacıyla, her bir hiperparametre için olası tüm kombinasyonları sistematik olarak değerlendirir (Pedregosa vd., 2011; Sungur ve Bakır, 2024). Tüm olasılıkları değerlendirmesi zamansal olarak maliyetli olsa da, model üzerinde iyileştirme sağlanmasıyla birçok zemin çökmesi çalışmasında kullanılmıştır (Eghrari vd., 2023; Qiao vd., 2024; Shi vd., 2020).

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

3.1 Envanter Haritasının Oluşturulması

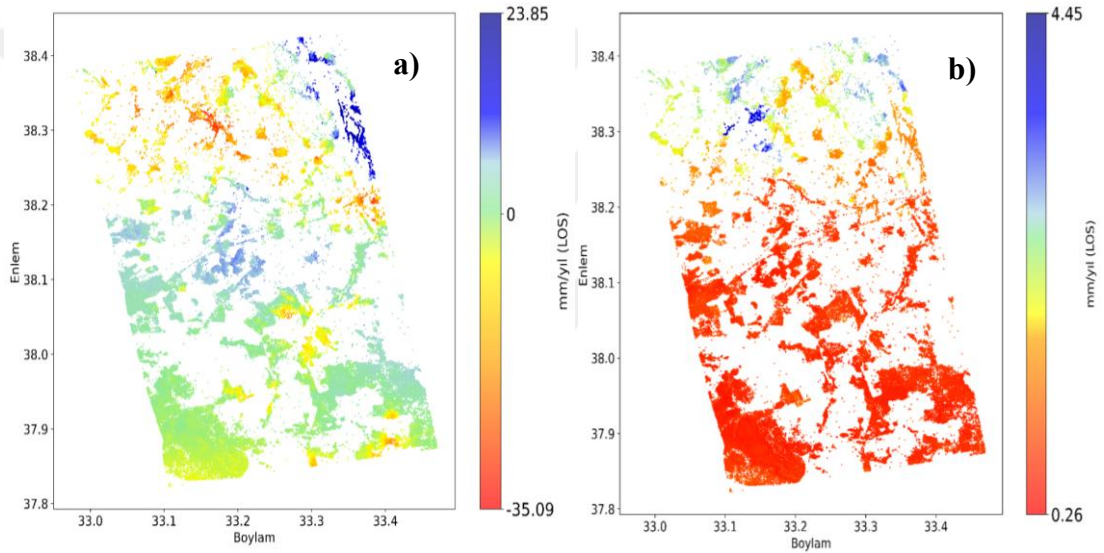
Şekil 2.1'deki iş akış diyagramında belirtilen SNAP ve StaMPS adımları uygulanarak PS noktaları tespit edilmiş, mekânsal konumları ile birlikte mm/yıl hassasiyetinde analiz edilerek envanter haritası oluşturulmuş ve detayları aşağıda sunulmuştur.

Sentinel-1A radar sistemi, birden fazla farklı modda çalışmaktadır. Bu modlar, IW (Interferometric Wide Swath), EW (Extra Wide Swath) ve SM (Stripmap) modlarıdır. Modlar, geniş alanların farklı çözünürlük ve detay seviyelerinde görüntülenmesini sağlamaktadır. Bu çalışmada, yüksek çözünürlük ve geniş kapsama alanı sunan IW modu tercih edilmiştir. Şekil 2.14'te gösterilen 119 ve 124 iz numaralı çerçeveler, kendi içlerinde IW1, IW2 ve IW3 olmak üzere soldan sağa doğru alt bölümlere ayrılmaktadır. PS-InSAR analizinde, tüm işlem adımları Çizelge 2.1 ve Çizelge 2.2'de yer alan tüm görüntüler için uygulanmıştır. 119 iz numaralı çerçevenin IW1, IW2 ve IW3 bölümlerinde, 124 iz numaralı çerçevenin ise IW2 ve IW3 bölümlerinde analizler yapılmıştır.

119 numaralı çerçevede IW1, IW2 ve IW3 bölümlerinin analizinde, homojen tarih aralıklarına sahip seçilmiş uydu görüntülerinden, SNAP yazılımı yardımıyla en uygun tarih ve görüntülerin dikey baz uzunluklarına göre hesap yapabildiği InSAR Stack Overview sekmesi kullanılarak 04.09.2021 tarihli görüntü master görüntü olarak seçilmiştir. 124 numaralı çerçevenin IW2 ve IW3 bölümlerinin analizinde ise yine aynı şekilde değerlendirilen 12.06.2021 tarihli görüntü master olarak kullanılmıştır. Yapılan çalışma kapsamında, her iki çerçeve ve tüm bölümlerin analiz sonuçları aşağıda detaylandırılmıştır.

Çerçeve iz numarası 119, IW1 bölümünde yer alan PS noktalarının LOS doğrultusundaki hızları analiz edilmiştir. Amaç, bölgedeki zemin hareketlerini tespit ederek olası yer kabuğu deformasyonlarını ve zemin çökmelerini belirlemektir. Grafikte yatay eksen boylam, dikey eksen ise enlem bilgisini göstermektedir. Ayrıca renk skalasında mavi renk, LOS doğrultusunda yüksekliği artan noktaları temsil ederken, kırmızı renk ise yüksekliği azalan noktaları temsil etmektedir. Yapılan ölçümlerde LOS doğrultusunda nokta hızları mm/yıl cinsinden ölçülmüştür.

Çerçeve iz numarası 119 ve bölüm IW1'in kapsadığı alanda toplam 305.255 PS noktası elde edilmiştir. Bölge için LOS doğrultusundaki yıllık hızlar ve yıllık hızlarının standart sapma değerleri Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Şekil 3.1 incelendiğinde, LOS doğrultusunda yıllık hız değerlerinin -35.09 mm/yıl (en düşük) ile 23.85 mm/yıl (en yüksek) arasında değiştiği görülmektedir. IW1 bölgesindeki LOS doğrultusunda yıllık hızların standart sapma değerlerinin ise 0.26 mm/yıl ile 2.6 mm/yıl arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Hız dağılımına bakıldığında, genel eğilim daha çok nötr ve negatif hız değerleri etrafında yoğunlaşmaktadır. Kuzey bölgesinin batı ve orta kısmı çökme eğilimindedir. Ayrıca, bölgenin kuzeydoğusunda yükselmeler olduğu anlaşılmaktadır.

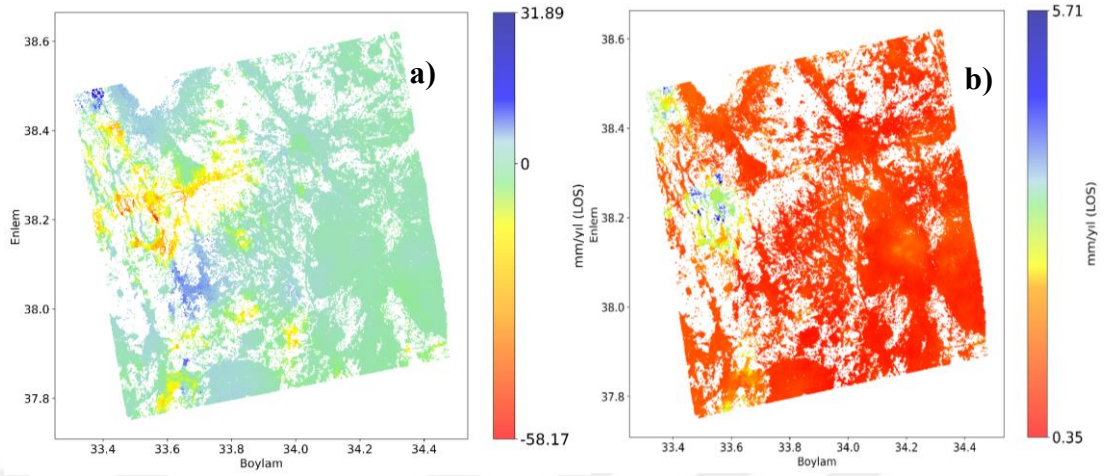


Şekil 3.1. Çerçeve iz numarası 119, bölüm IW1'in LOS doğrultusunda PS nokta a) yıllık hızları b) yıllık hızların standart sapma değerleri.

Bölüm IW2'nin kapsadığı alanda toplam 3.141.240 PS noktası elde edilmiştir. Bölge için LOS doğrultusundaki yıllık hızlar ve bu hızların standart sapmaları Şekil 3.2'de gösterilmiştir.

Şekil 3.2 incelendiğinde, IW2'nin kapsadığı alanda LOS doğrultusunda yıllık hız değerlerinin -58.17 mm/yıl (en düşük) ile 31.89 mm/yıl (en yüksek) arasında değiştiği görülmektedir. Bu bölgede, LOS doğrultusundaki yıllık hızların standart sapma değerlerinin 0.35 mm/yıl ile 5.71 mm/yıl arasında değiştiği gözlemlenmiştir. IW2 bölgesinin hız dağılımına bakıldığında, genel eğilim nötr değerler etrafında yoğunlaşmaktadır. Bölgenin büyük bir kısmı stabil değerler gösterirken, batı

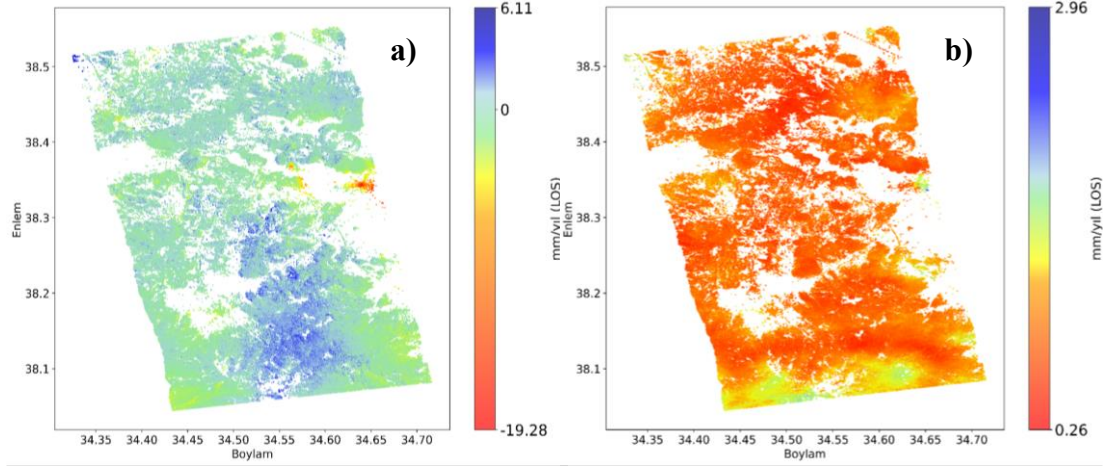
bölgesinin orta kısmında çökmeler tespit edilmiştir. Ayrıca bölgenin küçük bir kısmında yükselmelerin de olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 3.2. Çerçeve iz numarası 119, bölüm IW2'nin LOS doğrultusunda a) yıllık hızlar b) yıllık hızların standart sapma değerleri.

Çerçeve iz numarası 119, bölüm IW3 için yapılan analizde, kapsadığı alanda toplam 1.297.377 PS noktası elde edilmiştir. Bölgeye ait LOS doğrultusundaki yıllık hızlar ve bu hızların standart sapmaları ise Şekil 3.3'te gösterilmiştir.

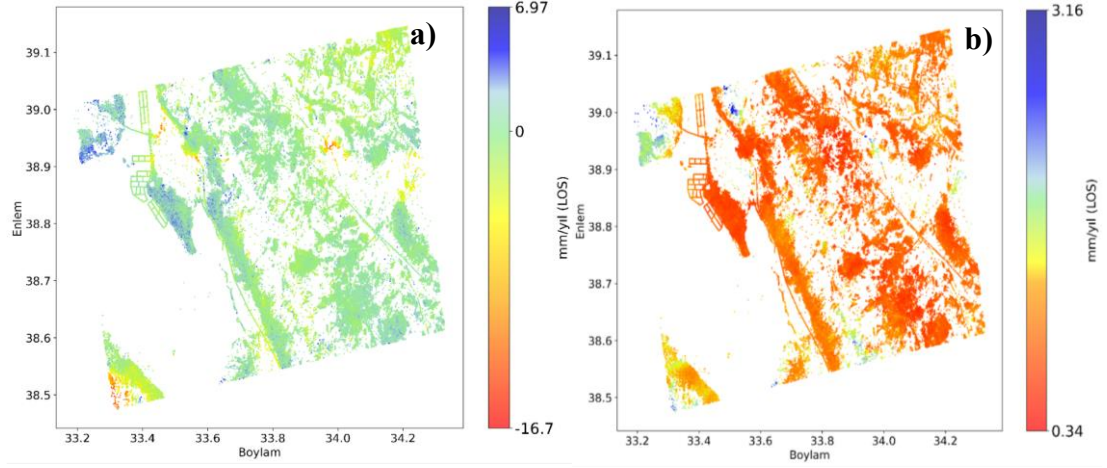
Şekil 3.3'te verilen grafik incelendiğinde, IW3 bölümünün kapsadığı alanda LOS doğrultusunda yıllık hız değerlerinin -19.28 mm/yıl (en düşük) ile 6.11 mm/yıl (en yüksek) arasında değiştiği görülmektedir. IW3 bölgesindeki LOS doğrultusunda yıllık hızların standart sapma değerlerinin 0.26 mm/yıl ile 2.96 mm/yıl arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Analiz sonucunda, IW3 bölgesindeki hız dağılımının genel olarak nötr değerler etrafında yoğunlaştığı görülmektedir. Ancak analiz bölgesinin doğusunda çökmeler, güney bölgesinin orta kısımlarından iç bölgelere kadar uzanan alanda ise yükselmeler tespit edilmiştir.



Şekil 3.3. Çerçeve iz numarası 119, bölüm IW3'ün LOS doğrultusunda a) yıllık hızlar b) hızların standart sapma değerleri.

119 iz numaralı çerçevenin IW1, IW2 ve IW3 bölümleri kullanılarak Aksaray il sınırlarının güney kesimi analiz edilmiş ve sonuçlar detaylı bir şekilde sunulmuştur. Bir sonraki adımda ise Aksaray il sınırlarının kuzey kısmını kapsayan 124 iz numaralı çerçevenin IW2 ve IW3 bölümleri üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerin sonuçları aşağıda ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

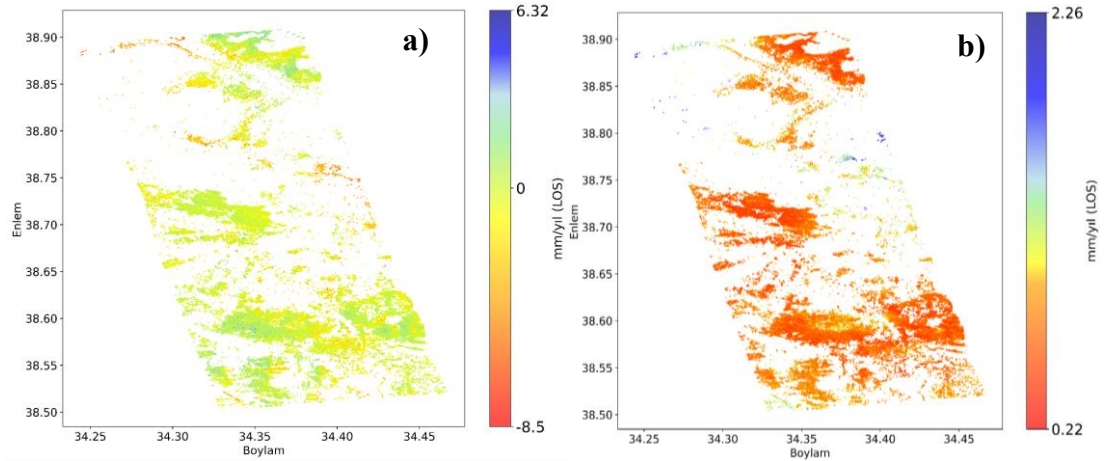
Çerçeve iz numarası 124 ve bölüm IW2'nin kapsadığı alan analiz edilerek toplam 676.057 PS noktası elde edilmiştir. Şekil 3.4'te, LOS doğrultusundaki yıllık hızlar ve bu hızların standart sapma değerleri gösterilmektedir. Şekil 3.4 detaylı bir şekilde incelendiğinde, LOS doğrultusunda yıllık hız değerlerinin -16.7 mm/yıl (en düşük) ile 6.97 mm/yıl (en yüksek) arasında değiştiği anlaşılmaktadır. IW2 bölgesinde LOS doğrultusundaki yıllık hızların standart sapma değerlerinin ise 0.34 mm/yıl ile 3.16 mm/yıl arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Hız dağılımına bakıldığında, genel eğilim daha çok nötr ve negatif hız değerleri etrafında yoğunlaşmaktadır. Bölgenin geniş bir kısmında LOS doğrultusunda belirgin bir hareket gözlemlenmezken, kuzey bölgesinin batı ve orta kısmında çökme eğilimi görülmektedir. Ayrıca, bölgenin kuzeybatısında yükselmelerin olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 3.4. Çerçeve iz numarası 124, bölüm IW2'nin LOS doğrultusunda a) yıllık hızlar b) yıllık hızların standart sapma değerleri.

İz numarası 124 olan çerçevenin IW3 bölgesinde gerçekleştirilen analiz sonucunda toplamda 172.170 PS noktası elde edilmiştir. Bölgeye ilişkin LOS doğrultusundaki yıllık hızlar ve yıllık hızların standart sapma değerleri aşağıda sunulmuştur (Şekil 3.5).

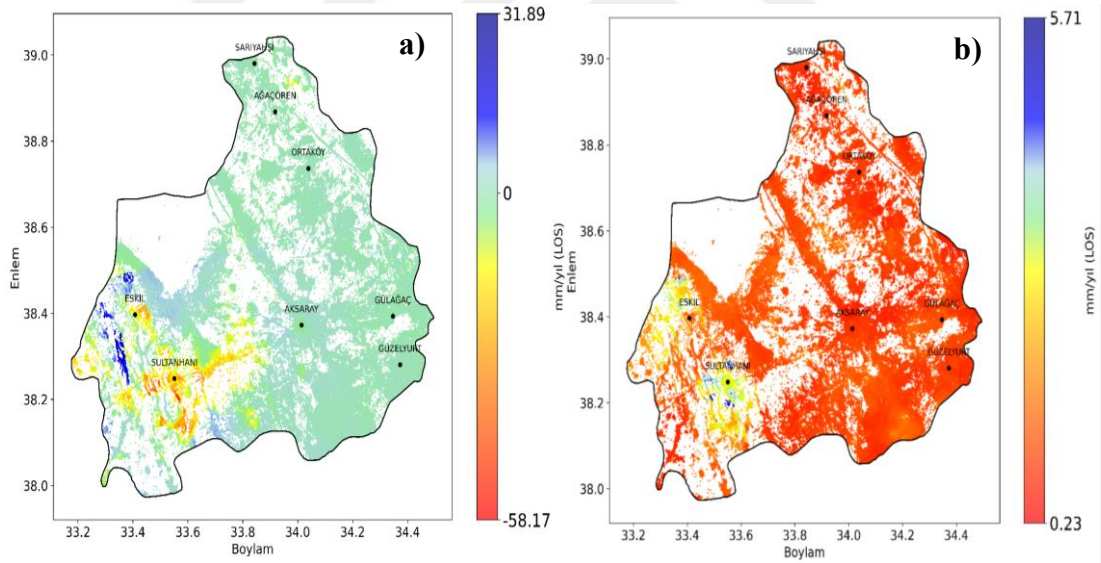
Şekil 3.5 incelendiğinde, IW3 bölgesinde LOS doğrultusunda yıllık hızların -8.5 mm/yıl (en düşük) ile 6.32 mm/yıl (en yüksek) arasında değiştiği görülmektedir. LOS doğrultusundaki yıllık hızların standart sapma değerlerinin ise 0.22 mm/yıl ile 2.6 mm/yıl arasında değiştiği tespit edilmiştir.



Şekil 3.5. Çerçeve iz numarası 124, bölüm IW3'ün LOS doğrultusunda a) yıllık hızlar b) yıllık hızların standart sapma değerleri.

Şu ana kadar, Aksaray il sınırlarını ve çevresini kapsayan 119 iz numaralı çerçevenin IW1, IW2, IW3 bölümleri ile 124 iz numaralı çerçevenin IW2 ve IW3 bölümleri ayrı ayrı analiz edilmiştir. Bu bölümlere yönelik yapılan analizler yukarıda ayrıntılı şekilde incelenmiştir. Ancak, Aksaray il sınırları içerisindeki genel durumu tek bir grafikte gösterebilmek için bu analizlerin birleştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca, bölümlerin coğrafi kapsamı Aksaray il sınırı ile birlikte daha geniş bir alanı içerecek şekilde değerlendirilmiştir. Bu aşamada, tüm analizler birleştirilmiş ve çalışma alanı Aksaray il sınırı ile sınırlandırılmıştır. Çalışma alanında LOS doğrultusundaki yıllık hızlar ve bu hızların standart sapma değerleri Şekil 3.6'da sunulmuştur.

Çalışma alanı içerisinde kalan toplam 1.828.097 PS noktası elde edilmiştir. Şekil 3.6 incelendiğinde, LOS doğrultusunda yıllık hızların -58.17 mm/yıl (en düşük) ile 31.89 mm/yıl (en yüksek) arasında değişim gösterdiği görülmektedir. LOS doğrultusundaki yıllık hızların standart sapma değerlerinin ise 0.23 mm/yıl ile 5.71 mm/yıl arasında değiştiği görülmektedir.

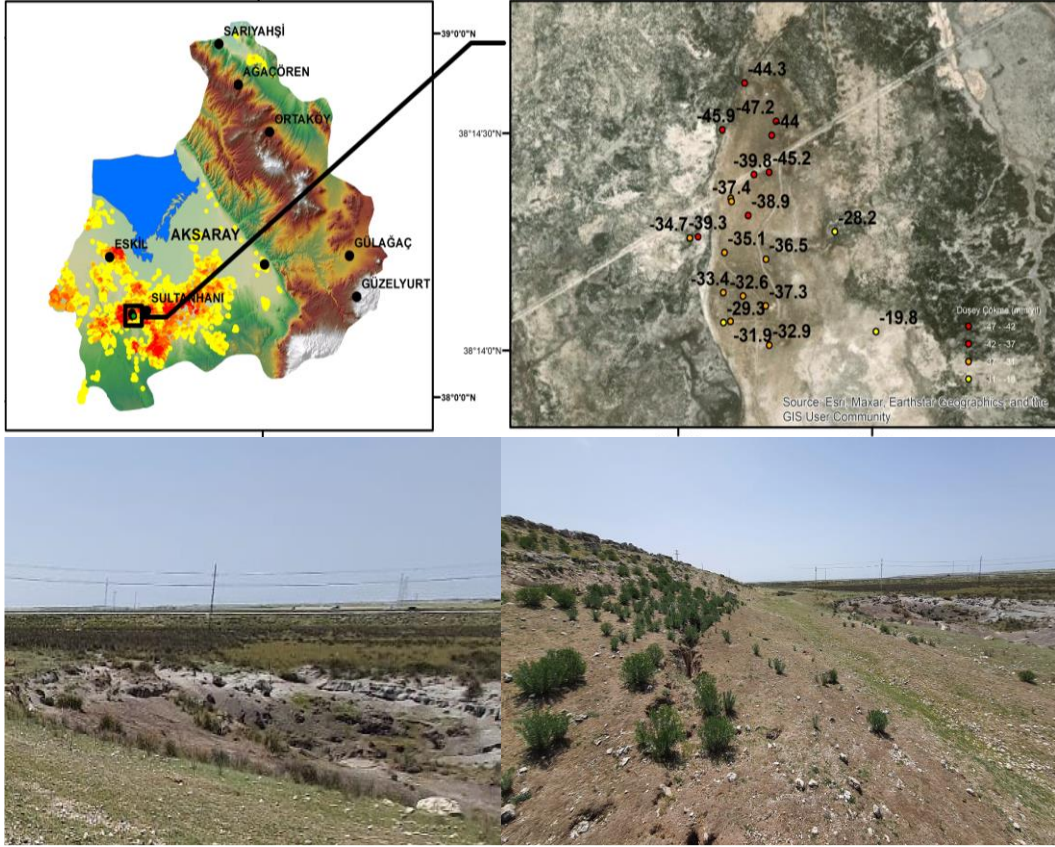


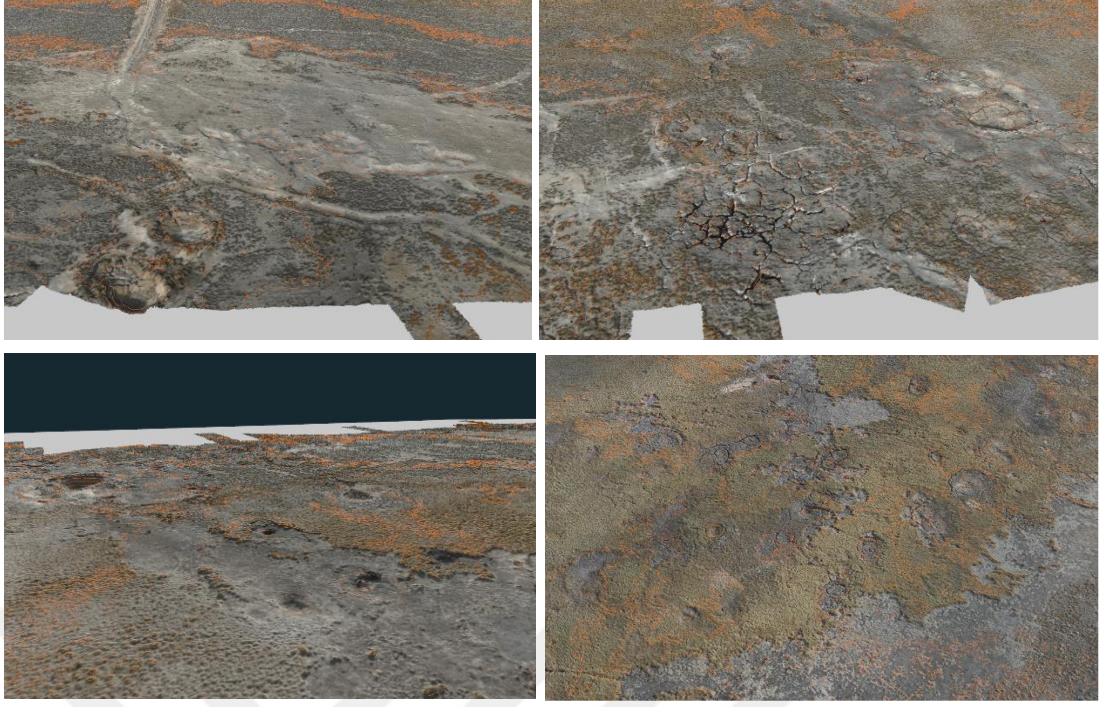
Şekil 3.6. Aksaray ili PS noktalarının LOS doğrultusunda a) yıllık hızları b) yıllık hızların standart sapma değerleri.

Zemin çökmesi duyarlılık analizine yönelik envanterin oluşturulması amacıyla, çalışma alanındaki LOS doğrultusunda yer değişimi PS-InSAR yöntemi ile incelenmiştir. Bu kapsamda, elde edilen PS noktaları arasından yalnızca negatif değerler seçilmiş, pozitif değerler elenerek zemin çökmesinin meydana geldiği bölgeler belirlenmiştir. Analizin doğruluğunu artırmak amacıyla, standart sapma

değerinin altında kalan tüm veriler de çıkarılmıştır. Ön işleme adımları tamamlandıktan sonra, Aksaray il sınırları içinde toplam 63.437 PS noktası elde edilmiştir.

Tespit edilen PS noktaları Denklem 2.16'da belirtilen formül ve parametreler uygulanarak, LOS doğrultusundaki yer değiştirme değerleri düşey yönlü yer değiştirme, yani çökme değerlerine dönüştürülmüştür. Elde edilen veriler doğrultusunda, bölgedeki zemin çökmesi olan ve olmayan alanları tespit ederek bir envanter haritası oluşturulmuştur. Bu haritanın doğruluğunu değerlendirmek amacıyla çalışma bölgesinde hem saha gözlemleri gerçekleştirilmiş hem de hava fotoğrafları incelenmiştir (Şekil 3.7 ve Şekil 3.8). Saha çalışmaları sırasında obruklar, dolinler, yüzey çatlakları ve zemin çökmeleri tespit edilerek analiz sonuçları doğrulanmıştır.

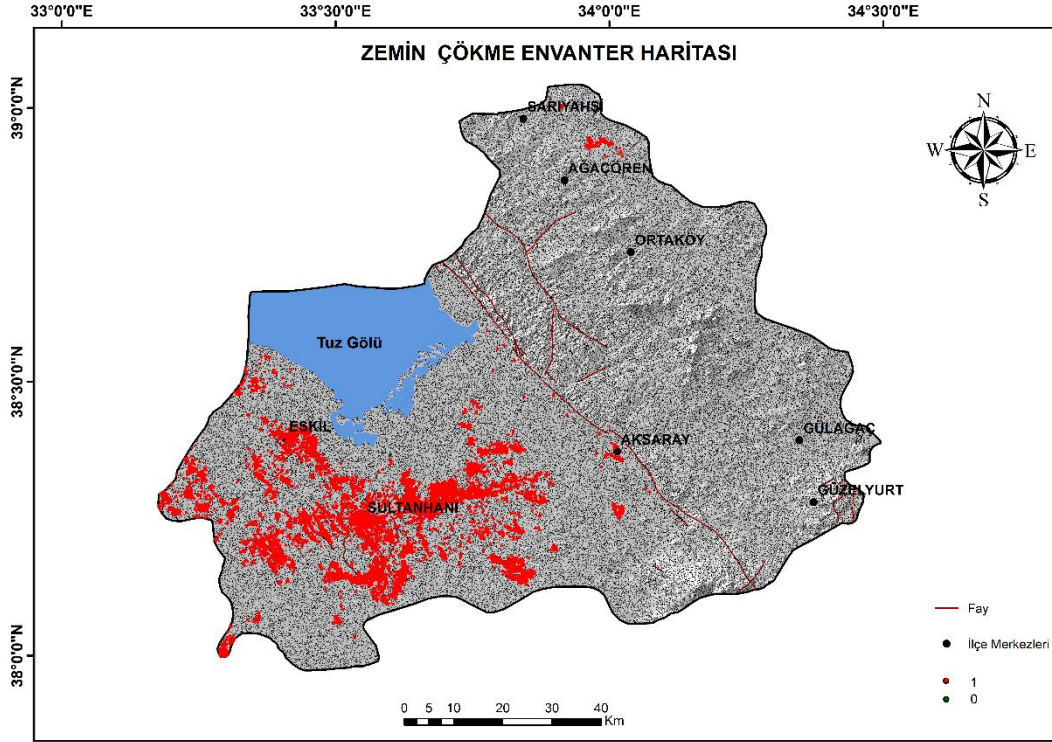




Şekil 3.8. Zemin çökme alanların hava fotoğrafları.

PS-InSAR analizleri sonucunda, çalışma alanındaki dikey yer değiştirme hızları belirlenmiş, çökme eğiliminde olan alanlar tespit edilmiş ve zemin çökme envanteri oluşturulmuştur. Bu alanlar, 1 (Çökme Var) şeklinde sınıflandırılmıştır. Ancak, MÖA'da dengeli bir model eğitimi sağlanabilmesi için yalnızca çökme alanlarının kullanımı yeterli olmayıp, çökme olmayan noktaların da veri setine dahil edilmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda, çökme olmayan noktalar çalışma alanında çökme belirtileri bulunmayan bölgelerden rastgele seçilmiş ve homojen bir dağılım sağlanarak belirlenmiştir. Bu noktalar "0 (Çökme Yok)" olarak sınıflandırılmıştır.

Bu yaklaşım sayesinde, çalışma alanındaki çökme eğilimlerini daha iyi temsil eden ve MÖ modellerinin doğruluğunu artıran dengeli bir veri seti oluşturulmuştur. Elde edilen envanter, çökme varlığı (1) ve çökme yokluğu (0) için eşit sayıda ve homojen dağılım gösteren noktaları içermekte olup, MÖ modellerinin eğitim ve test süreçlerinde kullanılmak üzere hazırlanmıştır (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Zemin çökme envanter haritası.

3.2 Koşullandırma Faktörlerinin Hazırlanması

Bu çalışmada, Bölüm 2.3'te detaylı şekilde ele alınan her bir veri, bütünlük sağlamak amacıyla standartlaştırılmış ve uyumlu hale getirilmiştir. Farklı kaynaklardan elde edilen vektör ve raster veriler, analiz sürecinde tutarlı bir yapıya kavuşturulmuştur. Tüm veri setleri, çalışma alanının coğrafi konumuna uygun olarak, coğrafi koordinat sistemi WGS 1984'e dayalı UTM Zone 36N projeksiyon sistemine dönüştürülmüştür. Böylelikle, yapılacak mekânsal analizlerde koordinat uyumsuzluğu, veri örtüşme hataları ve yanlış projeksiyondan kaynaklanabilecek sorunlar önlenmiş ve verilerin doğruluğu garanti altına alınmıştır. Farklı çözünürlüklerde temin edilen verilerin oluşturabileceği hesaplama hatalarının önüne geçmek için raster formatındaki tüm veriler 20x20 m piksel boyutunda yeniden örneklendirilerek standart bir çözünürlük sağlanmıştır. Ayrıca, vektör veri formatında elde edilen ve türetilen litoloji, yola yakınlık, faya yakınlık, yerleşim merkezlerine yakınlık, kuyu yoğunluğu ve yeraltı su seviyesi değişim hızı gibi veriler de 20x20 m piksel boyutunda raster formatına dönüştürülmüştür. Bu yaklaşım, analiz aşamasında verilerin kullanılabilirliğini artırarak yüksek doğruluklu ve güvenilir sonuçların elde edilmesine yönelik sağlam bir altyapı oluşturmuştur.

3.3 Çoklu Doğrusallık Kontrolü

Bu çalışmada, zemin çökmesi duyarlılık haritasının oluşturulmasında kullanılan değişkenler arasındaki çoklu doğrusallık probleminin tespiti amacıyla, Bölüm 2.4'te açıklanan yöntemler doğrultusunda VIF ve TOL değerleri hesaplanmıştır. Tüm koşullandırma değişkenleri için ayrı ayrı belirlenen bu değerler, Çizelge 3.1'de sunulmuştur.

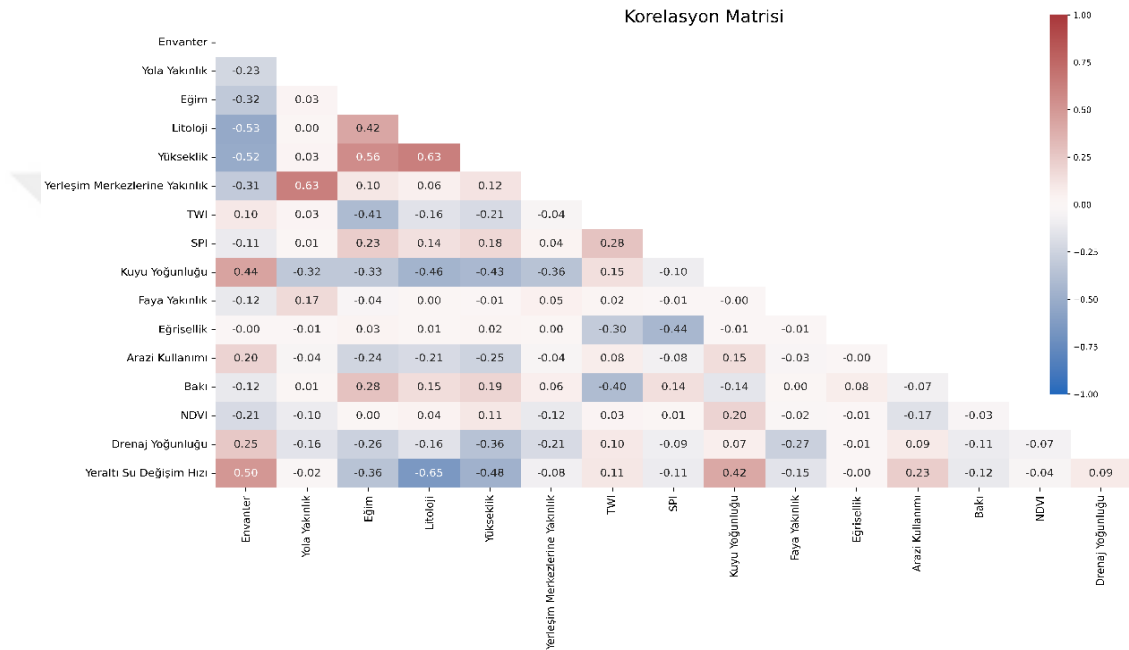
Çizelge 3.1. Koşullandırma faktörleri VIF ve TOL değerleri.

Faktör	VIF	TOL
Yükseklik	2.35	0.4249
Litoloji	2.35	0.4256
Yeraltı Su Değişim Hızı	1.97	0.5072
Eğim	1.95	0.5139
Yola Yakınlık	1.81	0.5523
Yerleşim Merkezlerine Yakınlık	1.81	0.5533
TNİ	1.78	0.5633
Kuyu Yoğunluğu	1.77	0.5643
AGİ	1.61	0.6227
Drenaj Yoğunluğu	1.39	0.7217
Bakı	1.32	0.7595
Eğrisellik	1.30	0.7679
Faya Yakınlık	1.21	0.8283
NDVI	1.14	0.8793
Arazi Kullanımı	1.13	0.8854

Çizelge 3.1 incelendiğinde, yükseklik ve litoloji faktörlerinin VIF değerleri en yüksek değerlerde (2,35) olmasına rağmen, kritik sınır olan 10'un çok altındadır. Diğer yandan, NDVI ve arazi kullanımı ise VIF değerlerinde en düşük değerlere (1,13 ve 1,14) sahiptir ve bu değişkenler bağımsız olarak modele katkı sağlamaktadır. TOL değerleri de tüm değişkenler için güven sınırları içerisinde kalmakta olup, çoklu doğrusal bağlantı problemi olmadığını desteklemektedir. Sonuç olarak, tüm değişkenler arasında çoklu doğrusal bağlantı problemi bulunmadığı tespit edilmiştir. Bu durum, kullanılan tüm değişkenlerin modellemede güvenli bir şekilde kullanılabilmesini ortaya koymaktadır.

3.4 Pearson Korelasyon Matrisi Sonuçları

Bu çalışmada, faktörler arası doğrusal ilişkiyi incelemek amacıyla Pearson Korelasyon Katsayısı kullanılmıştır. Korelasyon matrisi, faktörler arası doğrusal ilişkinin derecesini ve yönünü açıkça ortaya koymuştur. Literatür çalışmalarında yaygın olarak kabul edilen $\pm 0,70$ sınır değerleri baz alınmıştır (Iban ve Bilgilioğlu, 2023; Iban ve Sekertekin, 2022). Analiz sonuçları incelendiğinde, belirtilen sınırı aşan bir faktörün olmadığı tespit edilmiştir (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. Korelasyon matrisi.

Sonuç olarak, Pearson Korelasyon analizinde elde edilen değerler ile VIF ve TOL değerleri birlikte değerlendirildiğinde, faktörler arasında herhangi bir çoklu doğrusallık probleminin bulunmadığı doğrulanmış ve tüm faktörlerin modele sağlıklı bir şekilde katkı sağlama potansiyeline sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

3.5 Modelin Oluşturulması

3.5.1 Hiperparametrelerin optimizasyonu

Bu çalışmada, literatürde sıklıkla kullanılan GridSearch yöntemi kullanılmıştır (Eghrari vd., 2023; Qiao vd., 2024; Shi vd., 2020). Zemin çökmesi duyarlılık haritası oluşturmak için kullanılan farklı MÖ modellerinin performansını artırmak amacıyla, GridSearch yöntemiyle hiperparametre optimizasyonu başarıyla gerçekleştirilmiştir.

Optimizasyon sürecinde, parametre kombinasyonları sistematik bir şekilde taranmış ve RF, XGBoost, LightGBM, CatBoost ve AdaBoost algoritmaları için aşağıdaki hiperparametre değerleri elde edilmiştir (Çizelge 3.2).

Çizelge 3.2. GridSearch yöntemi kullanılarak optimize edilen hiperparametreler.

Model	Parametre	Değer
Random	Forest Örnekleme (bootstrap)	Hayır
	Ayrım Kriteri (criterion)	Entropy
	Maksimum Derinlik (max_depth)	Sınırsız
	Maksimum Özellikler (max_features)	Karekök (sqrt)
	Minimum Yaprak Örneği (min_samples_leaf)	1
	Minimum Bölünme Örneği (min_samples_split)	10
	Ağaç Sayısı (n_estimators)	200
XGBoost	Sütun Alt Örnekleme (colsample_bytree)	0.8
	Gamma Değeri (gamma)	0
	Öğrenme Oranı (learning_rate)	0.2
	Maksimum Derinlik (max_depth)	7
	Ağaç Sayısı (n_estimators)	300
	Satır Alt Örnekleme (subsample)	1
	Sütun Alt Örnekleme (colsample_bytree)	0.8
LightGBM	Öğrenme Oranı (learning_rate)	0.1
	Maksimum Derinlik (max_depth)	15
	Ağaç Sayısı (n_estimators)	150
	Yaprak Sayısı (num_leaves)	50
	Satır Alt Örnekleme (subsample)	0.6
CatBoost	Örnekleme Sıcaklığı (bagging_temperature)	0.5
	Derinlik (depth)	8
	İterasyon Sayısı (iterations)	300
	L2 Yaprak Regülasyonu (l2_leaf_reg)	5
	Öğrenme Oranı (learning_rate)	0.2
AdaBoost	Algoritma (algorithm)	SAMME.R
	Öğrenme Oranı (learning_rate)	1.0
	Zayıf Öğrenici Sayısı (n_estimators)	200

3.5.2 Frekans oranı

Tez kapsamında, frekans oranı yöntemi ile zemin çökmesi duyarlılığı üzerinde etkili olan faktörlerin her bir sınıfına ait frekans oranı değerleri ayrı ayrı hesaplanmıştır (Çizelge 3.3). Frekans oranı, belirli bir faktör sınıfındaki çökme noktalarının yoğunluğunu tüm çalışma alanına oranla değerlendirerek, o sınıfın zemin çökmesine olan katkısını sayısal olarak ifade etmektedir.

Çizelge 3.3. Frekans oranı sonuçları.

Faktör	Sınıf	Çalışma Alanındaki Hücre Sayısı	Çalışma Alanındaki Hücre Oranı (%)	Çökme Alanındaki Hücre Sayısı	Çökme Alanındaki Hücre Oranı (%)	Frekans Oranı (FR)
Arazi Kullanımı	Orman	105578	0,01	7	0,01	0,02
	Çayırılık	6083353	0,34	23828	0,37	1,11
	Tarla	9561976	0,53	8642	0,13	0,25
	Yapı	309338	0,02	19805	0,31	18,07
	Çıplak/Seyrek	1757906	0,09	11104	0,17	1,78
	Kalıcı Su Kütlesi	76724	0,01	42	0,00	0,15
	Otsu Sulak Alan	16199	0,01	9	0,00	0,16
BAKI	Düz	14592320	0,71	22292	0,35	0,49
	Kuzey	1304100	0,06	1256	0,01	0,30
	Kuzeydoğu	4786499	0,23	7253	0,11	0,48
	Doğu	4372058	0,21	5683	0,08	0,41
	Güneydoğu	4371322	0,21	4894	0,07	0,35
	Güney	3553833	0,17	4015	0,06	0,36
	Güneybatı	4686698	0,22	5572	0,08	0,38
	Batı	5034539	0,24	5600	0,08	0,35
	Kuzeybatı	5679441	0,27	5795	0,09	0,32
Kuzey	1435279	0,07	1076	0,01	0,24	
Drenaj Yoğunluğu	0,23- 1,29	1117655	0,06	2128	0,03	0,54
	1,29 – 1,70	2215553	0,12	1685	0,02	0,21
	1,70 – 1,98	5439141	0,30	10474	0,16	0,54
	1,98 – 2,26	6268859	0,35	32891	0,51	1,48
	2,26 – 2,97	2870379	0,16	16259	0,25	1,60
Eğim (°)	0 – 2,60	9233170	0,51	48275	0,76	1,48
	2,60 – 6,52	5256820	0,29	13878	0,21	0,74
	6,52 – 12,00	2270035	0,12	1224	0,01	0,15
	12,00 – 20,61	899745	0,05	60	0,01	0,02
	20,61 – 66,53	240540	0,01	0	0,00	0,00
Eğrisellik	İç Bükey	2353872	0,13	6643	0,10	0,79
	Düz	10339478	0,57	40392	0,63	1,10
	Dış Bükey	5216583	0,29	16402	0,25	0,89
Faya Yakınlık (m)	0 – 3.783	4454375	0,24	24249	0,38	1,53
	3.783 – 8.283	4369893	0,24	16263	0,25	1,05
	8.283 – 12.681	3828481	0,21	5441	0,08	0,40
	12.681 – 17.385	3337752	0,18	12084	0,19	1,02
	17.385 – 26.078	1891261	0,10	5400	0,08	0,80
Kuyu Yoğunluğu (km/km ²)	0 - 0,34	11991477	0,66	10288	0,16	0,24
	0,34 - 1,19	3454794	0,19	27743	0,43	2,26
	1,19 - 2,38	1661348	0,09	15475	0,24	2,63
	2,38 - 4,08	579474	0,03	5624	0,08	2,74
	4,08 - 7,23	224494	0,01	4307	0,06	5,41
Litoloji	Karbonatlar	3254180	0,18	28299	0,44	2,45
	Kuvaterner					
	Kırıntılılar	5921448	0,33	34796	0,54	1,65
	Plütönik	2009688	0,11	0	0,00	0,00
	Volkanikler	2527975	0,14	0	0,00	0,00
	Paleojen-Neojen					
	Kırıntılılar	3814930	0,21	342	0,01	0,03
	Ofiyolitler	190564	0,01	0	0,00	0,00
Metamorfikler	192877	0,01	0	0,00	0,00	

Çizelge 3.3 (devam). Frekans oranı sonuçları.

NDVI	0,46 – 0,00	6135218	0,34	27346	0,43	1,25
	0,00 -0,11	7229021	0,40	29082	0,45	1,13
	0,11 - 0,22	2201758	0,12	5424	0,08	0,69
	0,22 - 0,40	975769	0,05	1175	0,01	0,33
	0,40 - 0,66	1365509	0,07	410	0,00	0,08
AGİ	-13,81 - -7,82	4861568	0,27	18073	0,28	1,04
	-7,82 - -3,76	2422363	0,13	13440	0,21	1,56
	-3,76 - -1,04	5424789	0,30	21327	0,33	1,10
	-1,04 - 1,88	4200603	0,23	8416	0,13	0,56
	1,88 - 14,99	990987	0,05	2181	0,03	0,62
TNİ	2,83 – 7,74	9412210	0,52	26433	0,41	0,79
	7,74 – 10,34	4218038	0,23	16928	0,26	1,13
	10,34 – 12,75	2551374	0,14	13143	0,20	1,45
	12,75 – 15,93	1425599	0,07	5798	0,09	1,14
	15,93 – 27,40	293089	0,01	1135	0,01	1,09
Yeraltı Su Seviyesi Değişim Hızı (m/yıl)	-0,11 – 0,27	3262381	0,18	164	0,00	0,01
	0,27- 0,59	4020034	0,22	966	0,01	0,06
	0,59 – 1,58	3776715	0,21	12896	0,20	0,96
	1,58 – 2,64	3452985	0,19	16489	0,25	1,34
	2,64 – 8,92	3393844	0,18	32922	0,51	2,73
Yerleşim Merkezine Yakınlık (m)	0 – 1.916	5957051	0,33	43829	0,69	2,07
	1.916- 3.700	6642338	0,37	10680	0,16	0,45
	3.700- 6.079	3487728	0,19	7077	0,11	0,57
	6.079- 9.648	1359840	0,07	1476	0,02	0,30
	9.648- 16.851	464667	0,02	375	0,01	0,22
Yola Yakınlık (m)	0 – 1.063	9938822	0,55	50292	0,79	1,42
	1.063- 2.725	5301817	0,29	8741	0,13	0,46
	2.725- 5.651	1715602	0,09	3821	0,06	0,62
	5.651- 9.773	599061	0,03	374	0,01	0,17
	9.773- 16.953	354631	0,01	209	0,01	0,16
Yükseklik (m)	876 – 1.084	8782051	0,49	62543	0,98	2,01
	1.084- 1.265	5007278	0,27	894	0,01	0,05
	1.265- 1.540	3403633	0,19	0	0,00	0,00
	1.540- 2.091	605644	0,03	0	0,00	0,00
	2.091- 3.297	111327	0,01	0	0,00	0,00

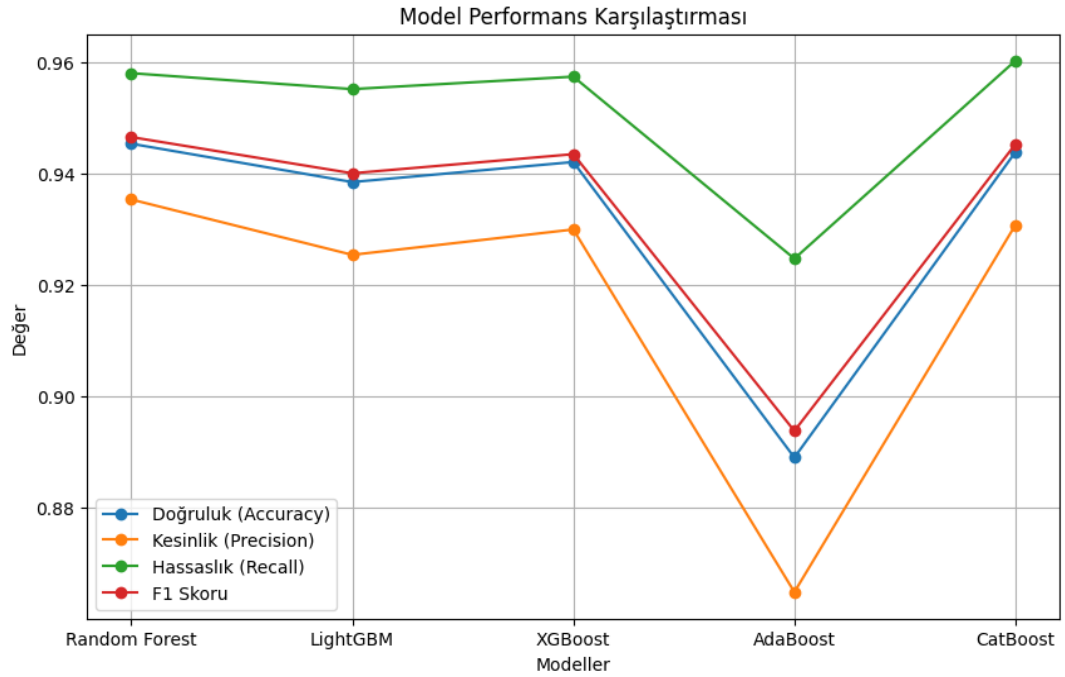
3.5.3 Modellerin performans sonuçları

Tez kapsamında yapılan çalışmalar neticesinde duyarlılık haritalarını oluşturmak amacıyla beş adet farklı MÖ modeli tercih edilmiş ve bu modellerin performansları değerlendirmek amacıyla doğruluk, keskinlik, hassaslık, F1 skoru gibi performans metrikleri hesaplanmıştır. Bu metrikler, zemin çökmesi olan ve olmayan bölgelerin doğru şekilde sınıflandırılmasını değerlendirerek modelin güçlü yönlerini ve geliştirilmesi gereken alanları ortaya koymaktadır. Doğruluk, genel olarak model tahminlerinin ne kadar doğru olduğunu ölçer. Keskinlik, modelin pozitif tahminlerinin ne kadar doğru olduğunu gösterir; zemin çökmesi olmayan bir bölgeye var olarak tahmin etmesi bu değeri düşürecektir. Hassaslık ise tam tersi olarak düşünülebilir; yani

çökmeye maruz bir yeri makine atladığında hassaslık değerini düşürecektir. F1 skoru ise keskinlik ve hassaslık arasındaki dengeyi gözetten bir ölçüttür. Bu iki metriğin harmonik ortalamasını alarak hesaplanır ve dengesiz veri setlerinde modelin performansı hakkında oldukça önemli bilgiler verir. Kullanılan modellerin performans metrikleri (Çizelge 3.4 ve Şekil 3.11)'de sunulmuştur.

Çizelge 3.4. Modellerin performans karşılaştırması.

Model	Doğruluk (Accuracy)	Keskinlik (Precision)	Hassaslık (Recall)	F1 Skoru
RF	0.9453	0.9353	0.9580	0.9465
CatBoost	0.9438	0.9307	0.9602	0.9452
LightGBM	0.9384	0.9254	0.9551	0.9400
XGBoost	0.9361	0.9200	0.9567	0.9380
AdaBoost	0.8890	0.8648	0.9247	0.8938

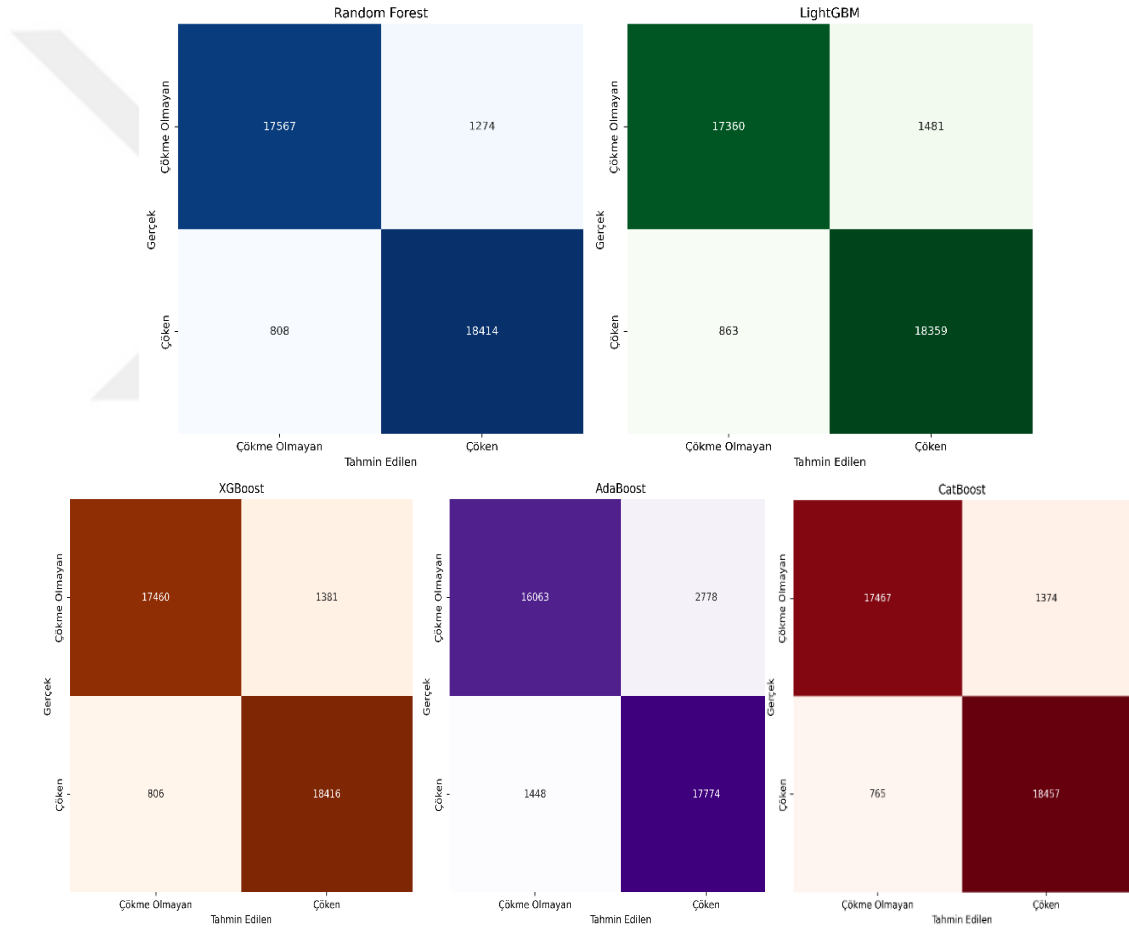


Şekil 3.11. Model performans karşılaştırması.

Model performansları karşılaştırıldığında, RF ve CatBoost modelleri en yüksek performansı gösteren modeller olarak öne çıkmaktadır. RF modeli %94,53 doğruluk ile dikkat çekerken, CatBoost modeli %96,02 hassaslık oranı ile en yüksek değere ulaşmıştır. XGBoost modeli, doğruluk ve F1 skoru açısından sırasıyla %94,20 ve %94,34 ile üçüncü sırada yer alırken, LightGBM modeli %93,84 doğruluk oranı ile başarılı bir performans sergilemiştir. Ancak, diğer modellere kıyasla F1 skoru biraz

daha düşük kalmıştır. AdaBoost modeli ise, diğer modellere göre daha düşük doğruluk %88,90 ve keskinlik %86,48 değerlerine sahiptir. Buna rağmen, sınıf dengesizliklerine rağmen tatmin edici bir performans sergilemiştir.

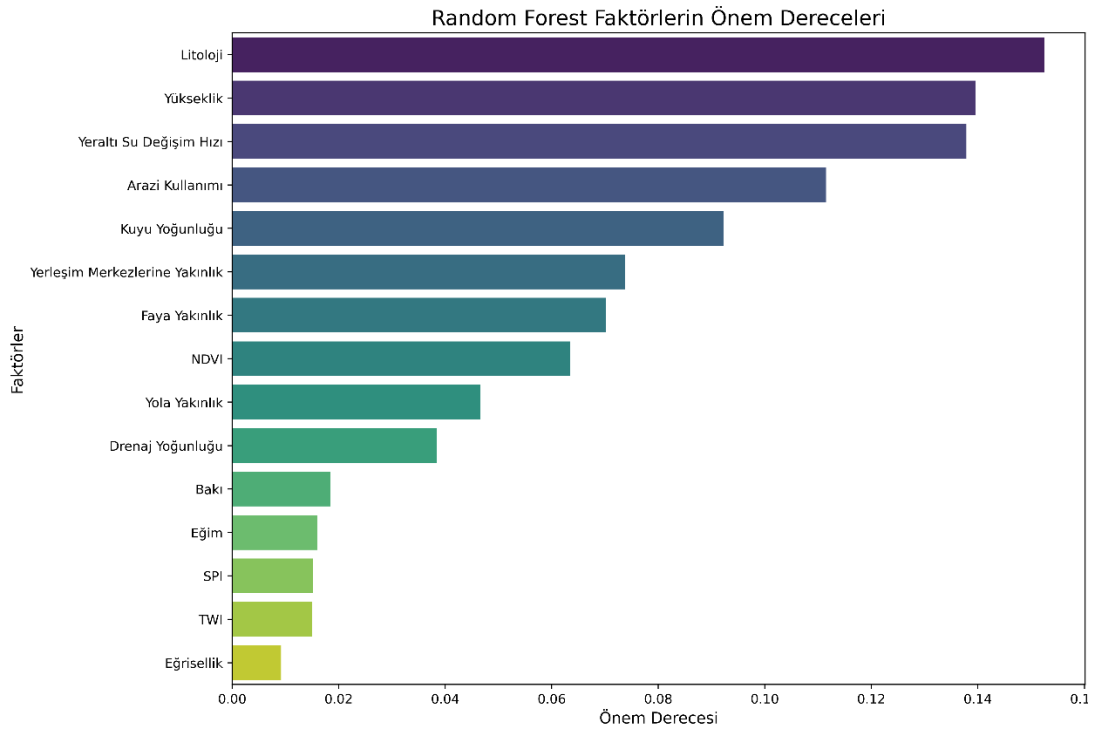
Çalışma kapsamında, model performanslarını daha detaylı bir şekilde incelemek amacıyla her bir model için hata matrisleri oluşturulmuştur. Hata matrisleri, modellerin doğru pozitif (TP), doğru negatif (TN), yanlış pozitif (FP) ve yanlış negatif (FN) tahmin sayılarını göstermektedir. Bu sayede, yanlış pozitif ve yanlış negatif tahminler göz önünde bulundurularak performans eksiklikleri daha etkili bir şekilde analiz edilmiştir. Oluşturulan hata matrisleri Şekil 3.12’de sunulmuştur.



Şekil 3.12. Algoritmalara ait hata matrislerinin karşılaştırılması.

Zemin çökmesi duyarlılık haritası oluşturulurken, kullanılan faktörlerin her birinin modele katkısını belirlemek için RF modelinin sağladığı faktör önem dereceleri hesaplanmıştır. Bu önem dereceleri, modelin hangi faktörlere daha fazla öncelik verdiğini ve hangi faktörlerin modelin tahmin performansında daha etkili olduğunu

ortaya koymaktadır. Karar ağaçları üzerinden çalışan RF modeli, sınıflandırma problemleri için Gini impurity (düzensizlik) azaltımı kullanarak hesaplamalar yapar. Bu hesaplama, bir karar ağacındaki bir düğümün homojenliğini (safliğini) ölçer. Faktör önem dereceleri, özellikle çok sayıda koşullandırma faktörü içeren çalışmalar için hangi faktörlerin modelde daha etkili olduğunu belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. Çalışmada, faktörlerin önem dereceleri analiz edilerek Şekil 3.13'te sunulmuştur.

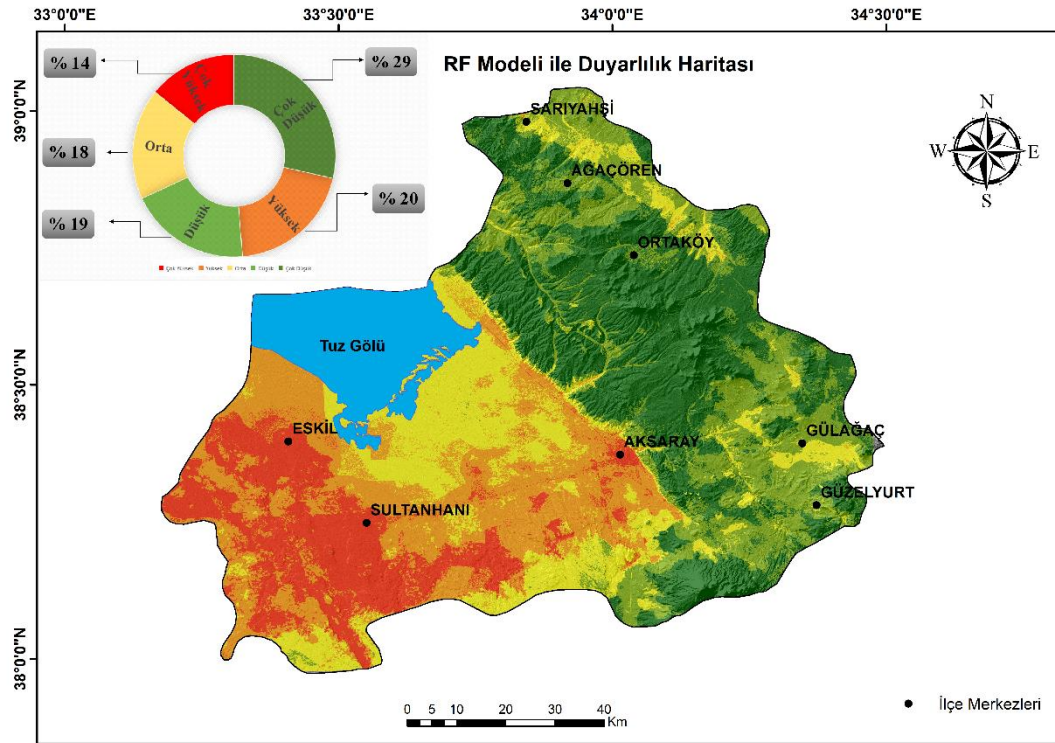


Şekil 3.13. Faktör önem dereceleri.

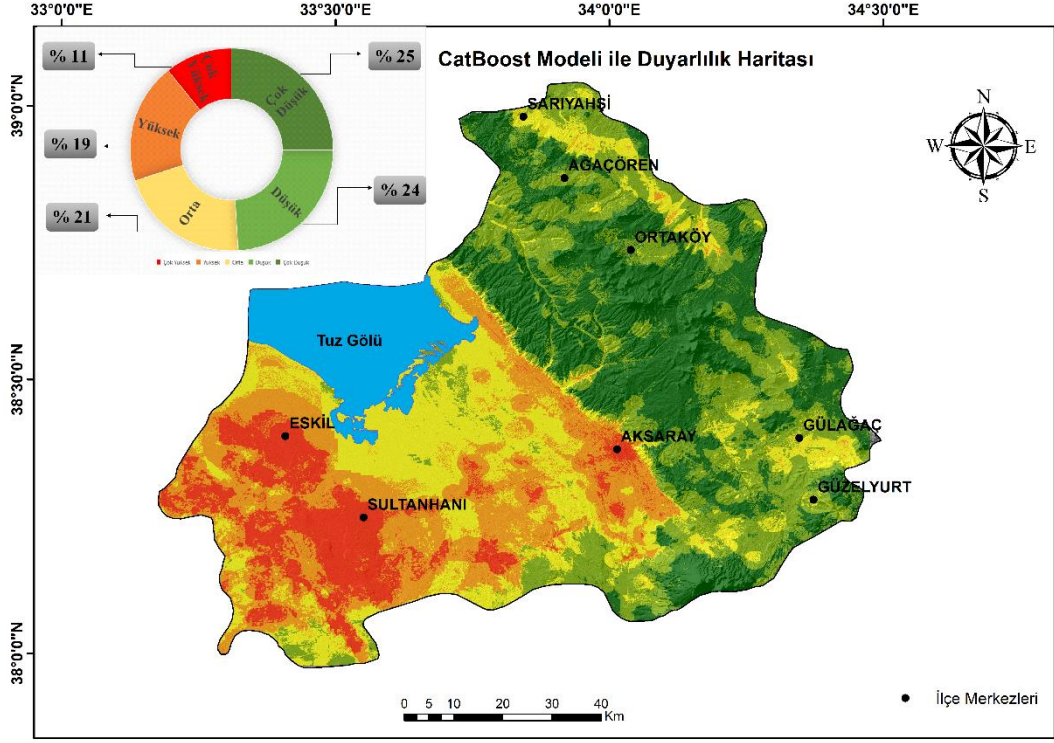
3.5.4 Aksaray ili zemin çökmesi duyarlılık haritası

Duyarlılık haritaları, zemin çökmesinin meydana gelme olasılığını gösteren bir analiz aracıdır. Bu haritalarda, her bir sınıfın temsil ettiği alanlar, bölgedeki zemin çökmesi olasılığını yansıtan farklı duyarlılık seviyelerini ifade eder. Yüksek duyarlılığa sahip alanlar, çökme olasılığı yüksek olan bölgeleri temsil ederken, düşük duyarlılığa sahip alanlar çökme riski daha az olan bölgeleri gösterir. Bu sınıfların belirlenmesi, zemin çökmesinin önceden tahmin edilmesine yardımcı olarak, alınması gereken önlemler için bir temel oluşturur.

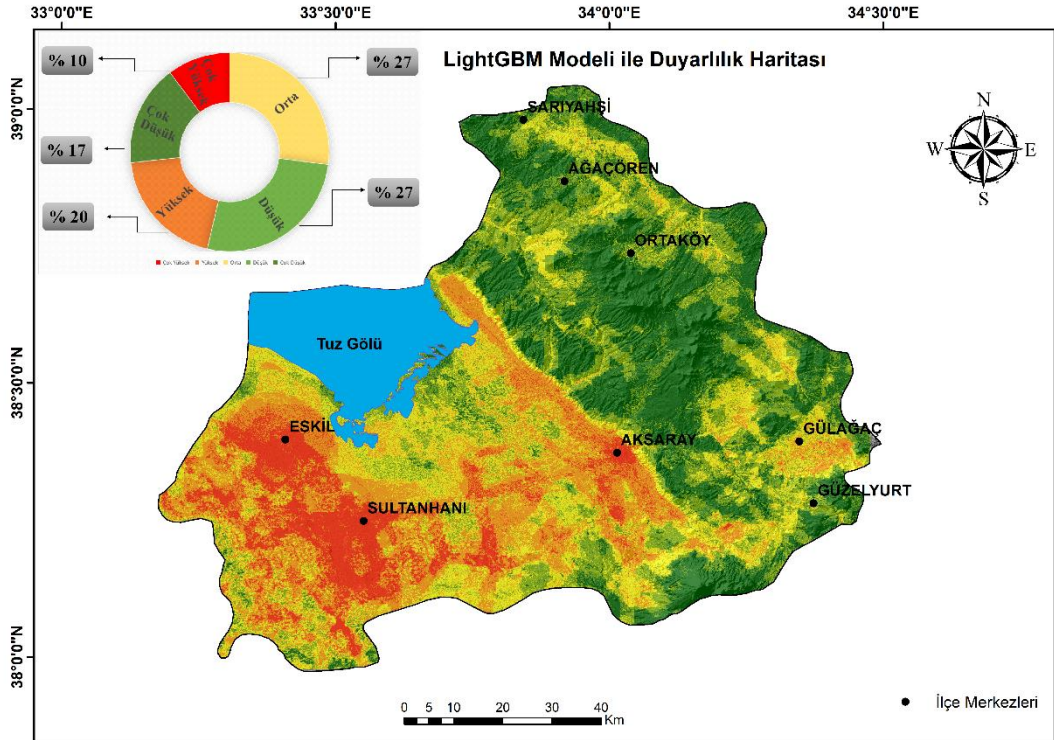
Tez kapsamında, zemin çökmesi duyarlılık haritaları oluşturulmuş ve bu haritalar, kullanılan modellerin sonuçlarına göre doğal kırılım (Jenks) yöntemiyle 5 sınıfa ayrılmıştır. Bu sınıflar, farklı seviyelerde zemin çökmesi duyarlılığına sahip bölgeleri temsil etmektedir. Sınıflar, "çok yüksek", "yüksek", "orta", "düşük" ve "çok düşük" duyarlılık seviyelerine sahip alanları kapsamakta olup, her bir sınıfın kapsadığı alanlar, çökme riskinin bölgedeki dağılımını görsel olarak yansıtmaktadır (Şekil 3.14; Şekil 3.15; Şekil 3.16; Şekil 3.17; Şekil 3.18). Elde edilen haritalar ve bunlara ilişkin istatistiksel sonuçlar aşağıda detaylandırılmaktadır.



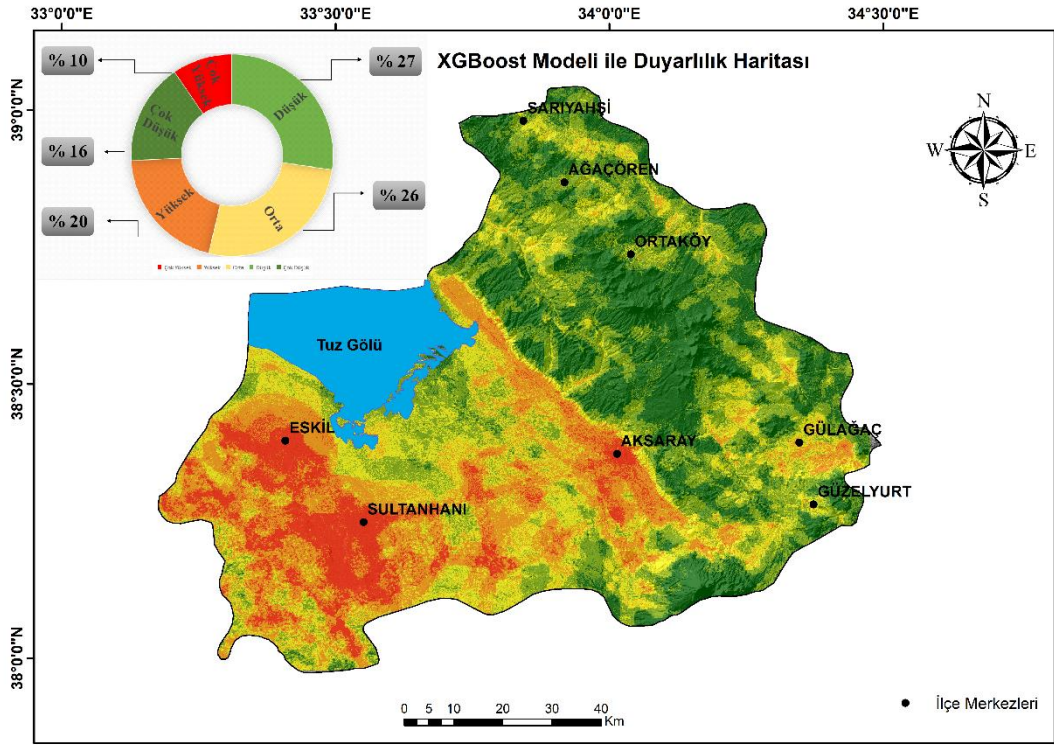
Şekil 3.14. RF ile Aksaray zemin çökmesi duyarlılık haritası.



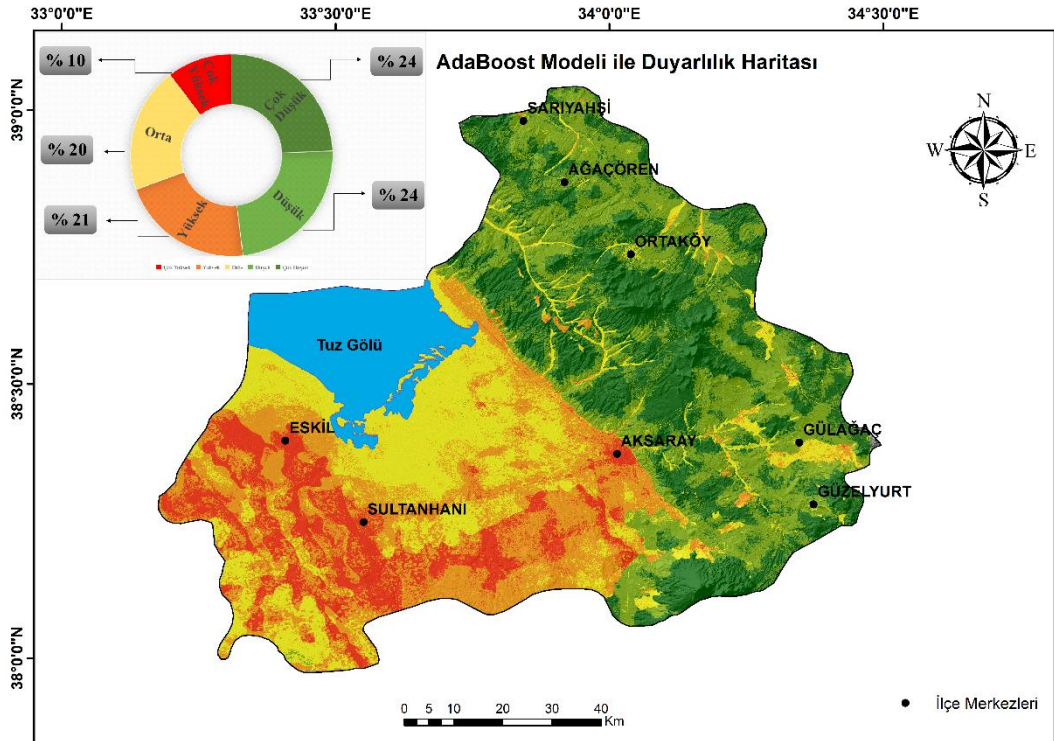
Şekil 3.15. CatBoost ile Aksaray zemin çökmesi duyarlılık haritası.



Şekil 3.16. LightGBM ile Aksaray zemin çökmesi duyarlılık haritası.

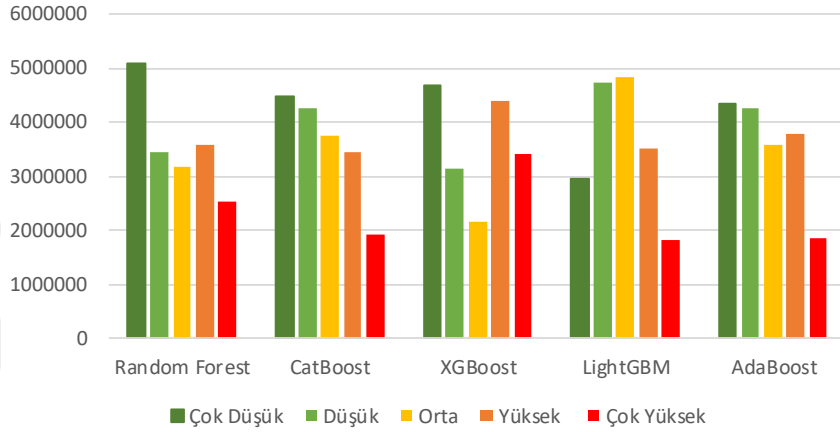


Şekil 3.17. XGBoost ile Aksaray zemin çökmesi duyarlılık haritası.

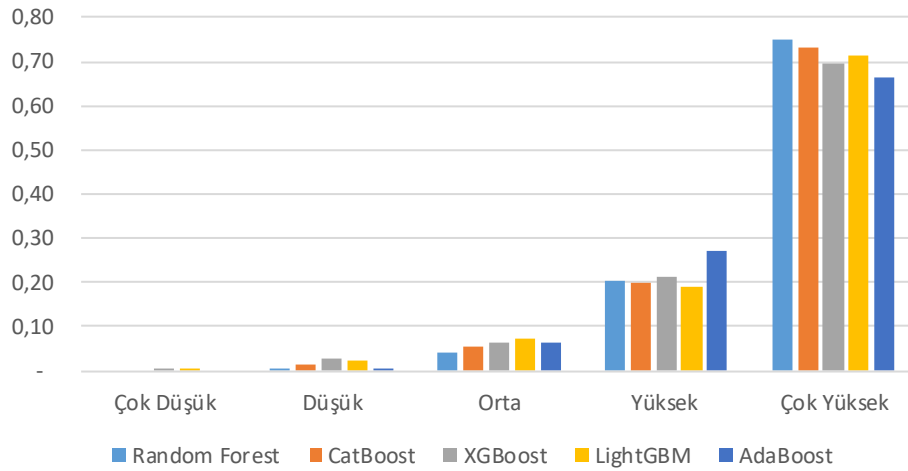


Şekil 3.18. AdaBoost ile Aksaray zemin çökmesi duyarlılık haritası.

Bu çalışmada, Aksaray ili zemin çökmesi duyarlılığını değerlendirmek için beş farklı MÖ modeli (XGBoost, CatBoost, Random Forest, AdaBoost ve LightGBM) kullanılmıştır. Her modelin ürettiği duyarlılık haritalarındaki sınıfların kapladığı alanlar ve bu alanların envanter verileriyle uyumu incelenmiştir. Aşağıda, her bir modelin ürettiği duyarlılık haritaları ve sınıfların karşılaştırmaları detaylı bir şekilde ele alınmıştır (Şekil 3.19 ve Şekil 3.20).



Şekil 3.19. Modellerin duyarlılık haritasında sınıfların kapladığı alanların karşılaştırılması.



Şekil 3.20. Modellerin duyarlılık sınıfları ile envanter verilerinin uyumu.

Her modelin duyarlılık haritası, çok düşük, düşük, orta, yüksek ve çok yüksek sınıflarda farklı alan dağılımları göstermektedir. Bu sınıflar, zemin çökmesi riskinin mekânsal olarak nasıl bir dağılım gösterdiğini ortaya koymakta ve model performanslarının birbirinden farklı olduğunu göstermektedir. Farklılıklar olmasına

rağmen tüm modellerde özellikle Sultanhanı, Eski ve Aksaray ilçe merkezi gibi alanlar, yüksek ve çok yüksek duyarlı sınıflarında öne çıkan bölgeler olmuştur.

Modellerin zemin çökmesi duyarlılık analizindeki performansları yüksek ve çok yüksek duyarlı sınıflarında detaylı olarak incelendiğinde, bazı farklılıkların olduğu gözlemlenmiştir. Çok yüksek duyarlı sınıfında Random Forest, kapladığı %14'lük alan oranıyla (Şekil 3.14) en geniş alanı kaplayan model olmuş ve 47.645 adet envanteri bünyesinde bulundurması sebebiyle en uyumlu model olarak öne çıkmıştır. Bu sonuç, Random Forest'in çok yüksek duyarlı sınıfındaki bölgeleri diğer modellere göre daha başarılı bir şekilde belirlediğini göstermektedir. CatBoost ise %11 oranında (Şekil 3.15) alan kaplamış ve 46.554 adet envanterle bu sınıfta dengeli bir performans sergilemiştir. Bununla birlikte, LightGBM ve XGBoost modelleri, %10 oranında benzer alan kaplamış (Şekil 3.16 ve Şekil 3.17), sırasıyla 45.203 ve 44.014 adet envanter sayısı ile nispeten dengeli bir sonuç vermiştir. AdaBoost, çok yüksek duyarlı sınıfında %10 oranında (Şekil 3.18) alan kapsasa da 42.009 envanter sayısı ile bu sınıfta diğer modellere göre daha sınırlı bir başarı göstermiştir.

Yüksek duyarlı sınıfında, AdaBoost %21 oranında alan kaplamış ve 17.087 envanterle bu sınıfta en başarılı model olmuştur. Random Forest, %20 oranında alan kapsayarak güçlü bir performans sergilemiş ve 12.992 envanterle yüksek duyarlı sınıfında dengeli bir uyum göstermiştir. CatBoost, %19 oranında alan kaplamış ve 12.539 envanterle yüksek duyarlı sınıfında istikrarlı bir sonuç elde etmiştir. XGBoost ve LightGBM, sırasıyla 13.472 ve 12.179 envanterle %20 oranında alan kapsayarak yüksek duyarlı sınıfında tatmin edici bir performans göstermiştir.

Genel olarak, yüksek ve çok yüksek duyarlılık sınıflarında Random Forest ve CatBoost modelleri dikkat çekmektedir. Random Forest, %94,53 doğruluk oranıyla özellikle çok yüksek duyarlı sınıfında en geniş alanı kapsayarak ve envanter yoğunluğunu başarılı bir şekilde yakalayarak öne çıkmıştır. CatBoost ise yüksek doğruluk oranıyla %94,38 ve yüksek duyarlı sınıflarındaki dengeli performansı ile güvenilir bir model olmuştur. AdaBoost, yüksek duyarlı sınıfında en geniş alanı kapsasa da genel doğruluk oranının düşük olması %88,90, diğer modellerin daha başarılı olduğunu göstermektedir. XGBoost ve LightGBM ise yüksek doğruluk oranlarıyla orta ve düşük sınıflarda daha geniş alan kaplarken, yüksek ve çok yüksek sınıflarda ise diğer modellere paralel dengeli bir performans göstermiştir.

Bu değerlendirme, yüksek ve çok yüksek duyarlı alanlara yönelik alınacak tedbirlerde özellikle Random Forest ve CatBoost modellerinin çıktılarının envanter yoğunluğuna paralel olarak sonuç vererek daha başarılı olduğu söylenebilir.



4. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Birçok araştırmacı, zemin çökmesi duyarlılık haritalarının üretilmesinde MÖ yöntemlerinden yararlanmıştır. Literatür incelemesi sonucunda, modellerin performansları dikkate alınarak RF, XGBoost, AdaBoost, CatBoost ve LightGBM modelleri çalışmaya dahil edilmiştir. Bu beş modelin doğruluk oranları karşılaştırıldığında; RF (%94,53), CatBoost (%94,38), LightGBM (%93,84), XGBoost (%93,61), ve AdaBoost (%88,90) şeklinde bir sıralama elde edilmiştir. Benzer şekilde, F-1 skoru dikkate alındığında da en başarılı model RF (%94,53) olarak belirlenmiştir (Çizelge 3.4).

Yapılan birçok çalışmada RF modelinin başarılı sonuçlar ürettiği görülmektedir. Örneğin, Zhao ve ark. (2024b) tarafından Çin'in Wuhan kentinde gerçekleştirilen bir çalışmada farklı modeller karşılaştırılmış ve RF modeli, %94 doğruluk oranı ile en iyi performansı sergilemiştir. Benzer şekilde, Pourghasemi ve Saravi (2019) İran'ın Kerman Eyaleti'nde yaptıkları çalışmada RF modelinin %93 doğruluk oranı ile başarılı sonuçlar elde ettiğini rapor etmişlerdir. Bu bulgular, RF modelinin zemin çökmesi duyarlılık analizlerinde yüksek performans gösterdiğini kanıtlamaktadır. Ayrıca Çetin (2024) tarafından gerçekleştirilen obruk duyarlılık analizinde de farklı modeller değerlendirilmiş ve RF modeli %97 doğruluk oranı ile diğer modellerden üstün bir performans sergilemiştir. Tüm bu çalışmalar, RF modelinin tutarlı ve güvenilir sonuçlar ürettiğini, bu nedenle zemin çökmesi duyarlılık analizlerinde en başarılı modellerden biri olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Yapılan analizler sonucunda, koşullandırma faktörlerinin önem dereceleri en yüksek doğruluk oranına sahip RF modeline göre hesaplanmış ve elde edilen bulgular Şekil 3.13'te sunulmuştur. Bu bulgular doğrultusunda, zemin çökmesine neden olan veya süreci tetikleyen koşullandırma faktörleri aşağıda detaylandırılmıştır.

Analiz sonuçları değerlendirildiğinde, zemin çökmesi üzerinde en etkili faktörlerin litoloji, yeraltı su seviyesi, arazi kullanımı, yükseklik, kuyu yoğunluğu, faylara yakınlık ve NDVI olduğu belirlenmiştir. Benzer çalışmalar incelendiğinde, bu faktörlerin zemin çökmesi üzerinde en önemli etkenler arasında yer aldığı görülmektedir (Billi vd., 2007; Bouwer, 1977; Caramanna vd., 2008; Hosseinzadeh vd., 2024; Lee ve Park, 2012, 2013; Mohammady vd., 2019b; Santo vd., 2011;

Sekkeravani vd., 2022; Zhao vd., 2024a). Bu çalışma kapsamında, zemin çökmesi duyarlılık analizi gerçekleştirilmiş, koşullandırma faktörleri ile zemin çökmesi arasındaki ilişkiler incelenmiş ve elde edilen bulgular, ilgili literatürle karşılaştırılarak aşağıda atıflar eşliğinde detaylandırılmıştır.

Litolojinin, zemin çökmesi üzerinde en belirleyici faktör olduğu tespit edilmiştir. Çalışma bölgesi incelendiğinde, çökmenin yoğun olarak gerçekleştiği alanların Kuvaterner kırıntılıları ve karbonatlı kayalar üzerinde yoğunlaştığı belirlenmiştir. Bu tür litolojik birimlere sahip bölgeler, farklı koşullar (örneğin yeraltı su seviyesi değişimleri, yük artışı ve jeolojik süreçler) ile bir araya geldiğinde zemin çökmesine oldukça yatkın bir durum sergilemektedir. Özellikle karbonatlı kayalar, yeraltı suyu tarafından çözünerek boşluk oluşumuna neden olmakta ve bu durum çökme riskini artırmaktadır. Öte yandan, Kuvaterner kırıntılılar birimi, suya bağlı olarak gevşek yapıları nedeniyle taşıma kapasitelerinin azalmasına ve çökmelerin tetiklenmesine yol açabilmektedir. Bu bulgular, çalışma bölgesinde litolojinin zemin çökmesini koşullandıran en kritik faktörlerden biri olduğunu bir kez daha ortaya koymaktadır (Bagheri-Gavkosh vd., 2021; Tzampoglou vd., 2023; Xue vd., 2005).

Yükseklik faktörü ele alındığında, Aksaray'ın kuzeydoğu kesiminin dağlık, engebeli ve yüksek rakımlı bir yapıya sahip olduğu, güneybatı kesiminin ise ova ile kaplı ve daha düşük yükselteli bir alan olduğu görülmektedir. Aksaray'da tarımsal faaliyetler ve kentsel yerleşim alanlarının büyük bir kısmı, yükseltisi düşük olan ova bölgelerinde yoğunlaşmaktadır. Bu durum, nüfus yoğunluğu, yeraltı su seviyesi değişimleri, tarımsal faaliyetler ve mühendislik yapıları gibi diğer faktörlerle bir araya geldiğinde, zemin çökmesi açısından ayrıştırıcı ve belirleyici bir faktör olarak değerlendirilebilir. Aksaray'da yükselti seviyesindeki değişimle birlikte jeolojik birimler de farklılaşmaktadır. Düşük rakımlı ova bölgeleri, zemin çökmesine yatkın bir yapıya sahipken, yüksek rakımlı alanlarda metamorfik, volkanik ve plütonik kayalar gibi daha sağlam zemin koşulları bulunmaktadır. Dolayısıyla, çalışma bölgesi özelinde değerlendirildiğinde, yükseklik faktörü litoloji ile birlikte modelin sonuçlarına önemli bir etki sağlamaktadır (Ozdemir, 2015; Sekkeravani vd., 2022).

Yeraltı su seviyesi değişim hızı, zemin çökmesi üzerinde en etkili faktörlerden biri olup, yapılan birçok çalışmada vurgulanmıştır. Çalışma bölgesindeki kuyuların yoğunluğu, tarımsal faaliyetlerin plansız ve aşırı sulama ile gerçekleştirilmesi ve

kentsel alanlardaki su tüketimi, yeraltı su seviyesindeki değişimi doğrudan etkileyerek zemin çökmesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Motagh vd., 2008; Ozdemir, 2015; Wilson ve Beck, 1992). Gezgin (2022), Karaman’da gerçekleştirdiği çalışmada PS-InSAR tekniğini kullanarak zemin çökmelerini tespit etmiştir. Analiz sonuçlarına göre, 25 mm/yıl ile 50 mm/yıl arasında değişen çökme hızlarının yeraltı su seviyesi değişimleri ile güçlü bir korelasyon gösterdiği belirlenmiştir. Bu doğrultuda, Karaman ilinde gözlemlenen zemin çökmelerinin, büyük ölçüde yeraltı su çekilmesinden kaynaklanabileceği ifade edilmiştir.

Arazi kullanımı, bölgedeki faaliyetlerin haritalandığı ve mekânsal analizlerde temel bir bilgi kaynağı olarak değerlendirilen önemli bir faktördür. Bitki örtüsü, tarımsal alanlar, kent merkezleri ve ulaşım ağları gibi birçok mekânsal bilgiyi içinde barındırır. Bu tür mekânsal veriler, zemin çökmesi duyarlılık çalışmalarında modellere sağladığı katkı açısından oldukça değerlidir. Arazi kullanımı, insan faaliyetlerinin zemine olan etkisini ortaya koyarak çökme riskinin mekânsal dağılımını anlamada önemli bir rol oynar. Özellikle tarımsal sulamalar, yoğun yerleşim alanları ve ağır mühendislik yapılarının bulunduğu bölgelerde, zeminde oluşan yüklenme ve yeraltı suyu değişimleri çökme duyarlılığını artırmaktadır. Bu nedenle, arazi kullanımı verileri, zemin çökmesi duyarlılık haritasının oluşturulmasında kritik bir faktör olarak değerlendirilebilir (Machowski vd., 2016; Sekkeravani vd., 2022).

Kuyu yoğunluğu, yeraltı su kaynaklarının aşırı kullanımının önemli bir göstergesi olarak değerlendirilebilir. Çalışma alanı incelendiğinde, kuyu yoğunluğunun fazla olduğu bölgelerde tarımsal faaliyetlerin yaygın olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum, hem yeraltı suyu çekiminin fazla olduğunu hem de tarımsal faaliyetler sonucu oluşan birtakım etkileri beraberinde getirmektedir. Yoğun tarımsal sulamalar ve yeraltı su seviyesindeki düşüş, zeminin taşıma kapasitesini azaltarak zemin çökmesi duyarlılığını artırmaktadır. Dolayısıyla, kuyu yoğunluğu ve tarımsal faaliyetler, birbirini tetikleyen faktörler olarak zemin çökmesini kompakt bir şekilde etkileyen önemli unsurlar arasında yer almaktadır (Dehghani vd., 2009; Ozdemir, 2015)..

Çalışma bölgesi değerlendirildiğinde, yerleşim yerleri ve yakın çevrelerinde zemin çökmelerinin yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Bunun başlıca nedenleri; kentleşme ile birlikte yapı yüklerinin artmasıyla zemine doğrudan baskı yapmakta ve zemin çökmesini tetiklemektedir. Yine kentsel alanlarda yeraltı suyunun kontrolsüz

kullanımı, zeminin su kaybederek sıkılaştırılmasına ve çökmesine yol açabilmektedir. Bunun yanı sıra, kentsel alanlarda ve yakınlarında yol kazıları, kanalizasyon ve su hatları gibi çalışmalar zeminde boşluk oluşumuna sebep olarak zemin çökmelerine neden olabilir. Sonuç olarak, yerleşim alanlarında yaşanan bu faaliyetler bir araya gelerek bu bölgeleri zemin çökmesi açısından daha duyarlı hale getirmektedir. Yerleşim merkezlerindeki çökmelerle ilgili birçok çalışma yapılmış ve bu konu üzerine çeşitli değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir (Holzer ve Johnson, 1985; Lee vd., 2023b; Machowski vd., 2016; Orhan, 2021; Zhao vd., 2024b).

Faya yakınlık, zemin çökmesi üzerinde etkili olan önemli jeolojik faktörlerden biridir (Lee ve Park., 2012). Bu bölgelerde, özellikle jeolojik deformasyonlar ve stres birikimleri, zeminin stabilitesini bozarak zemin çökmesine neden olabilir. Fay hatlarında meydana gelen tektonik süreçler titreşime neden olarak zemin çökmesini tetikleyebilir. Alüvyon ve benzer türdeki zemine sahip alanlarda gömülü faylar zemin çökmelerine sebep olabilir. Ayrıca fay hatları yeraltı suyu hareketleri için ideal bir kanal görevi görmesi sebebiyle su akışındaki değişimlere, zeminin gevşemesine ve sıkışmasına neden olarak zemin çökmelerine yol açabilir (Bouwer, 1977; Mohammady vd., 2019b). PS noktalarının genel dağılımına bakıldığında, bazı bölgelerde fay hatları boyunca yoğunlaştığı görülmektedir. Dolayısıyla, başka faktörlerin olmadığı durumlarda, faylardan uzaklaştıkça çökmenin de azaldığı gözlemlenmektedir (Billi vd., 2007; Caramanna vd., 2008; Hu vd., 2019; Santo vd., 2011).

NDVI, zemindeki bitki örtüsünün sağlığı ve mekânsal dağılımı hakkında önemli bilgiler sağlar. NDVI haritası incelendiğinde, yüksek NDVI değerlerinin genellikle tarımsal faaliyetlerin yoğun olduğu alanlar ve orman bölgelerinde yer aldığı görülmektedir. Orman bölgeleri ayrı tutulduğunda, tarımsal bitki örtüsünün varlığı hasat için doğrudan yeraltı su seviyesi ve tarımsal faaliyetlerle ilişkilendirilebilir ve bu durumun zemin çökmesine dolaylı olarak sebep olduğu görülmektedir (Sekkeravani vd., 2022).

PS-InSAR yöntemi ile toplanan envanter yakından incelendiğinde, ulaşım ağları boyunca PS noktalarının yoğunlaştığı ve bu bölgelerde zemin çökmelerinin meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu durum, yolların zemin çökmesine hem oluşturdukları yükler hem de üzerindeki trafik hareketliliği nedeniyle dolaylı olarak sebep olduklarını

veya bu süreci tetiklediklerini göstermektedir. Ayrıca yola yakınlık, kentsel alanlara yakınlıkla alakalı bir izlenim vererek yollara yakınlaştıkça zemin çökmesinin arttığı gözlemlenmiştir (Ranjgar vd., 2021). Faktör önem dereceleri analizi incelendiğinde, bu bulgunun desteklendiği ve yolların zemin çökmesi üzerinde önemli bir faktör olduğu açıkça anlaşılmaktadır.

Drenaj yoğunluğu, eğim, bakı, AGİ, TNİ ve eğrisellik faktörleri ise doğrudan veya dolaylı olarak, gerek kompakt yapıdaki etkileri gerekse diğer faktörleri etkilemeleri sebebiyle zemin çökmesini tetikleyebilmektedir. Topografik ve hidrojeolojik faktörler, yeraltı suyunun beslenmesi ve sızmasını etkilemeleri, bitki örtüsünden iklimsel farklılıklara kadar birçok etkiye sahip olmaları nedeniyle zemin çökmesinde önemli faktörler arasında yer alarak duyarlılık analizine etki etmişlerdir. Bu faktörlerin model üzerindeki etkisi, diğer faktörlere kıyasla daha düşük yüzdelerde olsa da, zemin çökmesi sürecinde belirleyici bir rol oynadıkları gözlemlenmiştir (Arabameri vd., 2020; Hakim vd., 2020; Mohammady vd., 2019b; Pourghasemi ve Beheshtirad, 2015; Ranjgar vd., 2021).

Çalışma alanının duyarlılık haritası incelendiğinde, çok yüksek ve yüksek duyarlılık değerine sahip bölgelerin çalışma alanının güney ve güneybatı kesimi olduğu görülmektedir. Eski ve Sultanhanı çevresi ile Aksaray il merkezi ve yakın çevresi, bu bölgeler içerisinde yer almaktadır. Bölgedeki zemin çökmesinin çok yüksek olmasının başlıca nedenleri arasında yoğun tarımsal faaliyetler, yeraltı su seviyesindeki belirgin düşüş ve kuyu yoğunluğu gibi faktörlerin bir araya gelmesi yer almaktadır. Bu unsurlar, zemin stabilitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca ova bölgesi olarak nitelendirilebilecek bu bölgenin jeolojik yapısı (kuvaterner kırıntılılar ve karbonatlılar) zemin çökmesine oldukça müsait bir yapıda olduğu bilinmektedir. Merkez ilçe özelinde ise kentsel yapılaşma, trafik ve nüfus yoğunluğunun beraberinde getirdiği yük, yeraltı suyunun yoğun kullanımı ve altyapı çalışmaları, bu bölgeleri yüksek duyarlılığa sahip alanlar hâline getirmektedir. Bilgilioğlu ve Bilgilioğlu (2023) tarafından gerçekleştirilen obruk duyarlılık çalışmasında, aynı bölgelerin obruk oluşumu açısından çok yüksek ve yüksek duyarlılık seviyelerinde olduğu tespit edilmiştir. Benzer şekilde, Çetin (2024) tarafından KKH obruk duyarlılık çalışmasında aynı bölgeler çok yüksek ve yüksek duyarlılık sınıfında yer aldığı görülmektedir. Saha çalışmaları yapılarak bölge incelendiğinde obruk oluşumları, dolinler ve zemin

çökmelerinin olduğu gözlemlenmiştir. Orta duyarlı alanlar, nispeten daha az tarımsal faaliyetlerin yürütüldüğü ve kısmen yerleşim alanlarının olduğu görülmektedir.

Çok düşük ve düşük duyarlılığa sahip bölgeler ise çalışma alanının doğu kesiminde yer almakta olup, Sarıyahşi, Ağaçören, Ortaköy, Güzelyurt ve çevresini kapsamaktadır. Bu bölgelerde, topoğrafyanın da etkisiyle tarımsal ve insan faaliyetlerinin daha sınırlı olduğu görülmektedir. Ayrıca, jeolojik birimin (metamorfik, volkanik, plütonik vb.) daha stabil olması, bu bölgelerin zemin çökmesi açısından daha korunaklı olmasını sağlamaktadır.

Bu çalışmada, Aksaray ili için zemin çökmesi duyarlılık haritası hazırlanmıştır. Elde edilen bulgular, zemin çökmesine etki eden en önemli faktörlerden birinin yeraltı su kaynaklarının plansız ve kontrolsüz tüketimi olduğunu göstermektedir. Özellikle tarımsal sulama ve kentsel su kullanımının sürdürülebilir su yönetimi politikalarına uygun olarak gerçekleştirilmemesi, yeraltı su seviyesinde belirgin bir düşüşe neden olmaktadır. Bu durum, bölgenin litolojik özellikleriyle birleştiğinde zemin çökmesi kaçınılmaz hale gelmektedir. Yeraltı su kaynaklarının tükenmesindeki en büyük etkenlerden biri, bölgedeki tarımsal üretim desenidir. Aksaray'da en çok yetiştirilen tarımsal ürünlerin mısır, şeker pancarı ve yonca olduğu bilinmektedir. Bu ürünler yüksek miktarda suya ihtiyaç duyduğundan, mevcut su kaynakları üzerinde ciddi bir baskı oluşturmaktadır. Bu nedenle, su tüketimini azaltmak amacıyla bölgeye daha uygun, su ihtiyacı düşük tarımsal ürünlerin tercih edilmesi gerekmektedir. Ayrıca, mevcut sulama yöntemleri de su tüketimini artıran bir diğer faktördür. Özellikle vahşi sulama yöntemlerinin yaygın olarak kullanılması, su kayıplarını artırarak yeraltı su seviyesinin düşmesine katkıda bulunmaktadır. Bu sorunun önüne geçilebilmesi için modern ve etkin sulama teknikleri, özellikle damla sulama sistemleri teşvik edilmelidir. Son olarak, iklim koşullarının giderek daha kurak hale gelmesi, sürdürülebilir su yönetimi politikalarının acilen hayata geçirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu kapsamda, su kaynaklarının korunmasına yönelik entegre stratejilerin benimsenmesi ve etkin su yönetim planlarının uygulanması gerekmektedir.

Kentsel alanlarda zemin çökmesi, tarımsal alanlardan farklı dinamiklere sahip olmakla birlikte, özellikle yeraltı suyu tüketimi, altyapı yükleri ve insan kaynaklı müdahaleler sebebiyle ciddi bir sorun haline gelmiştir. Çalışma alanı olan Aksaray ili özelinde, kentsel alanlarda zemin çökmesinin ana nedenleri arasında plansız ve kontrolsüz

yeraltı suyu çekimi, ağır mühendislik yapıları, altyapı çalışmaları ve trafik titreşimleri bulunmaktadır. Özellikle kent merkezindeki yerleşim alanlarında, nüfus yoğunluğu ve artan su tüketimi bu süreci hızlandırmaktadır. Yeraltı su seviyesinin düşmesiyle birlikte zemin stabilitesinin bozulması, altyapı sistemlerinde hasarlara, binalarda çatlaklara ve yolların deformasyonuna yol açmaktadır. Zemin çökmesinin kentsel alanlarda meydana getirdiği zararlar, hem ekonomik hem de toplumsal etkiler yaratmaktadır. Altyapı hasarları, su ve enerji sistemlerinin kesintiye uğramasına neden olurken, bu durum ticaret ve günlük yaşamı olumsuz etkilemektedir. Özellikle yollar, köprüler ve bina temellerinde oluşan yapısal sorunlar, can güvenliği açısından risk teşkil etmektedir. Bununla birlikte, yeraltı su seviyesinin düşmesi sonucu zemin gevşemesi ve sıkışması, ani yüzey oturmalarına sebep olarak taşkın ve yüzeysel akış sorunlarını artırmaktadır.

Bu bağlamda, kentsel alanlarda zemin çökmesinin önlenmesine yönelik sürdürülebilir çözüm önerileri sunulmalıdır. İlk olarak, yeraltı suyu kullanımı kontrol altına alınmalı ve su kaynaklarının etkin yönetimi için yeni politikalar geliştirilmelidir. Suni yeraltı suyu besleme projeleri ve yağmur suyu hasadı gibi yöntemler teşvik edilmelidir. İkinci olarak, yeni yapılaşma ve altyapı projelerinde zemin özellikleri detaylı bir şekilde incelenmeli ve jeolojik duyarlılık haritaları kentsel planlamaya entegre edilmelidir. Üçüncü olarak, toplumsal farkındalığın artırılması ve su tasarrufunun teşvik edilmesi gerekmektedir. Yerel yönetimler, yeraltı suyu yönetimi ve kentsel altyapı projelerinde bilimsel verileri temel alarak hareket etmeli ve risk yönetimi stratejilerini uygulamaya koymalıdır. Bu tür önlemler, zemin çökmesinin kentsel alanlarda yol açtığı ekonomik ve çevresel zararları minimize ederken, sürdürülebilir bir şehirleşme ve afet yönetimi için önemli bir temel oluşturacaktır.

Sonuç olarak, su yönetimi politikalarının iyileştirilmesi, jeolojik duyarlılık haritalarının etkin kullanımı ve şehir planlamasında risk bölgelerinin göz önünde bulundurulması, afet yönetiminin ilk aşaması olan risk yönetimi için hayati öneme sahiptir. İyi tasarlanmış, planlanmış ve gerekli önlemleri alınmış bir risk yönetimi, kriz yönetimine olan ihtiyacı ortadan kaldırır veya kriz anında kayıpları en aza indirerek sürecin daha hafif atlatılmasını sağlar. Bu bağlamda, alınacak her türlü tedbir ve hazırlık, gelecekte sürdürülebilir bir yaşam ve çevre için sağlam bir temel

oluşturacaktır. Ayrıca bu tür uygulamalar zemin çökmesinin yol açtığı ekonomik ve çevresel zararların azaltılmasına da önemli katkılar sağlayacaktır.



KAYNAKLAR

- Abdikan, S., 2007. SAR görüntülerinden üretilen interferometrik ve stereo dijitallik modellerinin sınırlarının incelenmesi / İnterferometrik SAR ve stereo SAR'dan oluşturulan DEM'lerin kalite değerlendirmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Abdollahi, S., Pourghasemi, H. R., Ghanbarian, G. A. ve Safaeian, R., 2019a. Prioritization of effective factors in the occurrence of land subsidence and its susceptibility mapping using an SVM model and their different kernel functions, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78, 6, 4017–4034.
- Abdollahi, S., Pourghasemi, H. R., Ghanbarian, G. A. ve Safaeian, R., 2019b. Spatial simulation and land-subsidence susceptibility mapping using maximum entropy model, *Journal of Watershed Management Research*, 10, 20, 133–144.
- Abidin, H. Z., Andreas, H., Gumilar, I., Sidiq, T. P. ve Fukuda, Y., 2013. Land subsidence in coastal city of Semarang (Indonesia): characteristics, impacts and causes. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 4, 3, 226–240.
- Adam, N. A., Kampes, B., Eineder, M., Worawattanamateekul, J. ve Kircher, M., 2003. The development of a scientific permanent scatterer system, *Proceedings of the Joint ISPRS/EARSeL Workshop “High Resolution Mapping from Space 2003”*, ISPRS.
- Ahmed, S., Hiraga, Y. ve Kazama, S., 2024. Land subsidence in Bangkok vicinity: Causes and long-term trend analysis using InSAR and machine learning, *Science of The Total Environment*, 946, 174285.
- Akabalı, O. A., 2002. Stereo yapay açıklıklı radar görüntülerinden otomatik sayısal yükseklik modeli üretilmesi ve doğruluğunun araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Alizadehsani, R., Habibi, J., Hosseini, M. J., Mashayekhi, H., Boghrati, R., Ghandeharioun, A., Bahadorian, B. ve Sani, Z. A., 2013. A data mining approach for diagnosis of coronary artery disease, *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 111, 1, 52–61.
- Alpaydin, E., 2020. *Introduction to machine learning*, MIT Press.
- Alqadhi, S., Mallick, J., Talukdar, S., Bindajam, A. A., Saha, T. K., Ahmed, M. ve Khan, R. A., 2022. Combining logistic regression-based hybrid optimized machine learning algorithms with sensitivity analysis to achieve robust landslide susceptibility mapping, *Geocarto International*, 37, 25, 9518–9543.
- Alsheref, F. K., Fattoh, I. E. ve Mead, W., 2022. Automated prediction of employee attrition using ensemble model based on machine learning algorithms, *Computational Intelligence and Neuroscience*, 1, 7728668.

- Arabameri, A., Lee, S., Rezaie, F., Chandra Pal, S., Asadi Nalivan, O., Saha, A., Chowdhuri, I. ve Moayedi, H., 2021. Performance evaluation of GIS-based novel ensemble approaches for land subsidence susceptibility mapping, *Frontiers in Earth Science*, 9, 663678.
- Arabameri, A., Saha, S., Roy, J., Tiefenbacher, J. P., Cerda, A., Biggs, T., Pradhan, B., Thi Ngo, P. T. ve Collins, A. L., 2020. A novel ensemble computational intelligence approach for the spatial prediction of land subsidence susceptibility, *Science of the Total Environment*, 726.
- Arık, F., Dülger, A., Delikan, A., Coşkuner, B., Göçmez, G., Kansun, G., Döyen, A. ve Arslan, Ş., 2022. Kızören (Karatay-Konya) çevresindeki obrukların jeolojik ve morfolojik özellikleri, *TMMOB Afet Sempozyumu, Ankara, Bildiriler Kitabı*, 927-959
- Atıl, A., Gülgün, B. ve Yörük, I., 2005. Sürdürülebilir kentler ve peyzaj mimarlığı, *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 42, 2, 215–226.
- Bagheri-Gavkosh, M., Hosseini, S. M., Ataie-Ashtiani, B., Sohani, Y., Ebrahimian, H., Morovat, F. ve Ashrafi, S., 2021. Land subsidence: A global challenge, *Science of The Total Environment*, 778, 146193.
- Balık, Ş. F., 2004. Elektro-optik ve SAR uydu görüntüleri ile arazi bitki örtüsünün belirlenmesi, *Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul*.
- Bamler, R. ve Hartl, P. 1998. Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Problems*, 14, 4, 1-54.
- Bausilio, G., Annibali Corona, M., Di Martire, D., Guerriero, L., Tufano, R., Calcaterra, D., Di Napoli, M. ve Francioni, M., 2022. Comparison of two machine learning algorithms for anthropogenic sinkhole susceptibility assessment in the city of Naples (Italy), *Geotechnical Engineering for the Preservation of Monuments and Historic Sites*, CRC press, 1112-1123
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R. ve Sansosti, E., 2002. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40, 11, 2375-2383.
- Bergstra, J. ve Bengio, Y., 2012. Random search for hyper-parameter optimization, *Journal of Machine Learning Research*, 13, 281–305.
- Beven, K. J. ve Kirkby, M. J., 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology / Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant, *Hydrological Sciences Journal*, 24, 1, 43–69.

- Bianchini, S., Solari, L., Del Soldato, M., Raspini, F., Montalti, R., Ciampalini, A. ve Casagli, N., 2019. Ground subsidence susceptibility (GSS) mapping in Grosseto plain (Tuscany, Italy) based on satellite InSAR data using frequency ratio and fuzzy logic, *Remote Sensing*, 11, 17.
- Bilgilioğlu, S. S. ve Bilgilioğlu, H., 2023. Aksaray ili obruk duyarlılık haritasının Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve Analitik Hiyerarđi Süreci (AHS) yöntemleri ile oluşturulması, *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12, 2, 612–625.
- Billi, A., Valle, A., Brilli, M., Faccenna, C. ve Funicello, R., 2007. Fracture-controlled fluid circulation and dissolutional weathering in sinkhole-prone carbonate rocks from central, *Journal of Structural Geology*, 29, 3, 385-395.
- Bishop, C. M., 2006. *Pattern Recognition and Machine Learning*, Springer.
- Bouwer, H., 1977. Land subsidence and cracking due to groundwater depletion, *Groundwater*, 15, 5, 358–364.
- Box, G. E. P. ve Cox, D. R., 1964. An analysis of transformations, *Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology*, 26, 2, 211–243.
- Bozkurt, N., Zontul, M. ve Aslan, Z., 2018. Uydu verilerine dayalı olarak bitki örtüsü analizi, *URUM Mühendislik Sistemleri ve Mimarlık Dergisi*, 2, 1, 75–82.
- Bray, J. D. ve Travasarou, T., 2007. Simplified procedure for estimating earthquake-induced deviatoric slope displacements, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133, 4, 381–392.
- Breiman, L., 2001. Random forests, *Machine Learning*, 45, 1, 5–32.
- Briole, P., Massonnet, D. ve Delacourt, C., 1997. Post-eruptive deformation associated with the 1986–87 and 1989 lava flows of Etna detected by radar interferometry, *Geophysical Research Letters*, 24, 1, 37–40.
- Buckley, S. M., Rosen, P. A., Hensley, S. ve Tapley, B. D., 2003. Land subsidence in Houston, Texas, measured by radar interferometry and constrained by extensometers, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108, 11, 2542.
- Bui, D. T., Pradhan, B., Lofman, O., Revhaug, I. ve Dick, O. B., 2012. Landslide susceptibility assessment in the Hoa Binh province of Vietnam: a comparison of the Levenberg–Marquardt and Bayesian regularized neural networks, *Geomorphology*, 171, 12-29.
- Bui, D. T., Shahabi, H., Shirzadi, A., Chapi, K., Pradhan, B., Chen, W., Khosravi, K., Panahi, M., Bin Ahmad, B. ve Saro, L., 2018. Land subsidence susceptibility mapping in South Korea using machine learning algorithms, *Sensors*, 18, 8, 2464.

- Caramanna, G., Ciotoli, G. ve Nisio, S., 2008. A review of natural sinkhole phenomena in Italian plain areas, *Natural Hazards*, 45, 2, 145–172.
- Chai, L., Xie, X., Wang, C., Tang, G. ve Song, Z., 2024. Ground subsidence risk assessment method using PS-InSAR and LightGBM: A case study of Shanghai metro network, *International Journal of Digital Earth*, 17, 1, 2297842.
- Chatsimab, Z., Alesheikh, A. A., Voosoghi, B., Behzadi, S. ve Modiri, M., 2020. Development of a land subsidence forecasting model using small baseline subset—differential synthetic aperture radar interferometry and particle swarm optimization—random forest (Case study: Tehran-Karaj-Shahriyar Aquifer, Iran), *Doklady Earth Sciences*, 494, 1, 718–725.
- Chen, T. ve Guestrin, C., 2016. XGBoost: A scalable tree boosting system, *Proceedings of the ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 785–794.
- Chen, C., Peng, M., Motagh, M., Guo, X., Xing, M. ve Quan, Y., 2024. Mapping susceptibility and risk of land subsidence by integrating InSAR and hybrid machine learning models: A case study in Xi'an, China, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 3522995.
- Chen, W. ve Zhang, S., 2021. GIS-based comparative study of Bayes network, Hoeffding tree and logistic model tree for landslide susceptibility modeling, *CATENA*, 203, 105344.
- Chen, Y., Zhang, K., Froger, J.-L., Tan, K., Remy, D., Darrozes, J., Peltier, A., Huaizhan, X. ve Villeneuve, N., 2018. Long-Term Subsidence in Lava Fields at Piton de la Fournaise Volcano Measured by InSAR: New Insights for Interpretation of the Eastern Flank Motion, *Remote Sensing*, 10, 4, 597.
- Chung, C. J. F. ve Fabbri, A. G., 2003. Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping, *Natural Hazards*, 30, 3, 451–472.
- Cigna, F. ve Tapete, D., 2022. Urban growth and land subsidence: Multi-decadal investigation using human settlement data and satellite InSAR in Morelia, Mexico, *Science of The Total Environment*, 811, 152211.
- Colesanti, C., Ferretti, A., Novali, F., Prati, C. ve Rocca, F., 2003. SAR monitoring of progressive and seasonal ground deformation using the permanent scatterers technique, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41, 7, 1685–1701.
- Crosetto, M., Arnaud, A., Duro, J., Biescas, E. ve Agudo, M., 2003. Deformation monitoring using remotely sensed radar interferometric data, In *11th FIG Symposium on Deformation Measurements*, Patras Univ., Santorini, Greece.
- Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-González, M., Devanthéry, N. ve Crippa, B., 2016. Persistent scatterer interferometry: A review, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 78–89.

- Curlander, J. ve McDonough, R., 1991. Synthetic aperture radar, 11, Wiley, New York.
- Çakır, Z. 2003. Analysis of the crustal deformation caused by the 1999 İzmit and Düzce earthquakes using synthetic aperture radar interferometry, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Çakmak, B. ve Gökalp, Z., 2011. Climate change and effective water utilization, Research Journal of Agricultural Sciences, 1, 87–95.
- Çetin, İ., 2024. Obruk duyarlılık haritalarının CBS ve makine öğrenmesi yöntemleri ile hazırlanması: Konya Kapalı Havzası örneği, Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray.
- Çevik, E. ve Topal, T., 2003. GIS-based landslide susceptibility mapping for a problematic segment of the natural gas pipeline, Hendek (Turkey), Environmental Geology, 44, 8, 949–962.
- Çomut, F. C., 2010. InSAR yöntemiyle düşey yönlü yüzey deformasyonlarının belirlenmesi: Konya örneği, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Çomut, F. C., 2016. Farklı yeryüzü özelliklerinde ileri insar teknikleri kullanılarak yüzey deformasyonlarının belirlenmesi, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Çoruhlu, E. N. ve Akıncı, H., 2021. Godrahav havzasının (Artvin) erozyon duyarlılığının jeo-çevresel faktörler kullanılarak değerlendirilmesi, Türk Uzaktan Algılama ve CBS Dergisi, 2, 2, 106-119.
- Dehghani, M., Valadan Zoej, M., Entezam, I., Mansourian, A. ve Saatchi, S., 2009. InSAR monitoring of progressive land subsidence in Neyshabour, northeast Iran, Geophysical Journal International, 178, 1, 47–56.
- Direk, M. ve Acar, B., 2006. Konya Ovasında tarımda yeraltı suyu kullanımının sosyal açıdan değerlendirilmesi, 1. TMMOB Su Politikaları Kongresi, Ankara, 79–88.
- Ebrahimi, H., Feizizadeh, B., Salmani, S. ve Azadi, H., 2020. A comparative study of land subsidence susceptibility mapping of Tasuj plane, Iran, using boosted regression tree, random forest and classification and regression tree methods, Environmental Earth Sciences, 79, 10, 1–12.
- Eghrari, Z., Delavar, M. R., Zare, M., Beitollahi, A. ve Nazari, B., 2023. Land subsidence susceptibility mapping using machine learning algorithms, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 10, 129–136.

- El Jazouli, A., Barakat, A. ve Khellouk, R., 2019. GIS-multicriteria evaluation using AHP for landslide susceptibility mapping in Oum Er Rbia high basin (Morocco), *Geoenvironmental Disasters*, 6, 1, 1–12.
- Eren, T., 2008. Radar görüntülerinde istenmeyen yankıları yok etme metodları, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Fagerland, M. W. ve Hosmer, D. W., 2012. A generalized Hosmer-Lemeshow goodness-of-fit test for multinomial logistic regression models, *Stata Journal*, 12, 3, 447–453.
- Famiglietti, J. S., 2014. The global groundwater crisis, *Nature Climate Change*, 4, 11, 945–948.
- Farías, C. A., Lenardón Sánchez, M., Boni, R. ve Cigna, F., 2024. Statistical and independent component analysis of sentinel-1 InSAR time series to assess land subsidence trends, *Remote Sensing*, 16, 21, 4066.
- Fawcett, T., 2006. An introduction to ROC analysis, *Pattern Recognition Letters*, 27, 8, 861–874.
- Ferretti, A., Prati, C. ve Rocca, F., 2001. Permanent scatterers in SAR interferometry, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39, 1, 8–20.
- Fiaschi, S., Tessitore, S., Boni, R., Di Martire, D., Achilli, V., Borgstrom, S., Ibrahim, A., Floris, M., Meisina, C., Ramondini, M. ve Calcaterra, D., 2017. From ERS-1/2 to Sentinel-1: two decades of subsidence monitored through A-DInSAR techniques in the Ravenna area (Italy), *GIScience and Remote Sensing*, 54, 3, 305–328.
- Fidelibus, M. D., Gutiérrez, F. ve Spilotro, G., 2011. Human-induced hydrogeological changes and sinkholes in the coastal gypsum karst of Lesina Marina area (Foggia Province, Italy), *Engineering Geology*, 118, 1-2, 1-19.
- Fletcher, J. M., Teran, O. J., Rockwell, T. K., Oskin, M. E., Hudnut, K. W., Spelz, R. M., Lacan, P., Dorsey, M. T., Ostermeijer, G., Mitchell, T. M., Akciz, S. O., Hernandez-Flores, A. P., Hinojosa-Corona, A., Peña-Villa, I. ve Lynch, D. K., 2020. An analysis of the factors that control fault zone architecture and the importance of fault orientation relative to regional stress, *GSA Bulletin*, 132, 9–10, 2084–2104.
- Foroughnia, F., Nemati, S., Maghsoudi, Y. ve Perissin, D., 2019. An iterative PS-InSAR method for the analysis of large spatio-temporal baseline data stacks for land subsidence estimation, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 74, 248–258.
- Freund, Y. ve Schapire, R. E., 1996. Experiments with a new boosting algorithm, *Proceedings of the International Conference on Machine Learning (ICML)*, 96, 148–156.

- Gabriel, A. K., Goldstein, R. M. ve Zebker, H. A., 1989. Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 94, 7, 9183–9191.
- Galloway, D. L., Hudnut, K. W., Ingebritsen, S. E., Phillips, S. P., Peltzer, G., Rogez, F. ve Rosen, P. A., 1998. Detection of aquifer system compaction and land subsidence using interferometric synthetic aperture radar, Antelope Valley, Mojave Desert, California, *Water Resources Research*, 34, 10, 2573–2585.
- Gambolati, G., Putti, M. ve Teatini, P., 1996. Land subsidence. *Hydrology of Disasters*, Dordrecht: Springer Netherlands. 231–268.
- Gezgin, C., 2020. GNSS ve InSAR teknikleri ile Tuz Gölü Fay Zonu'nun (TGFZ) kinematik analizi, Doktora Tezi, Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray.
- Gezgin, C., 2022. The influence of groundwater levels on land subsidence in Karaman (Turkey) using the PS-InSAR technique, *Advances in Space Research*, 70, 11, 3568–3581.
- Guo, X., Gui, X., Xiong, H., Hu, X., Li, Y., Cui, H., Qiu, Y. ve Ma, C., 2023. Critical role of climate factors for groundwater potential mapping in arid regions: Insights from random forest, XGBoost, and LightGBM algorithms, *Journal of Hydrology*, 621, 129599.
- Guo, H., Zhang, Z., Cheng, G., Li, W., Li, T. ve Jiao, J. J., 2015. Groundwater-derived land subsidence in the North China Plain, *Environmental Earth Sciences*, 74, 2, 1415–1427.
- Guzy, A. ve Malinowska, A. A., 2020. State of the art and recent advancements in the modelling of land subsidence induced by groundwater withdrawal, *Water*, 12, 7, 2051.
- Gündoğdu, B. 2021. Doğal ve İnsan Kaynaklı Afetlerin İnterferometrik SAR Yöntemi İle İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray.
- Günek, H., 2021. Solaklı Havzası'nın (Trabzon) heyelan duyarlılığı ve yerleşim yeri risk analizi, *International Journal of Geography and Geography Education*, 116–128.
- Gürmen, G., 2003. Yapay açıklıklı radar (SAR) ile görüntü oluşturma, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Hakim, W. L., Achmad, A. R. ve Lee, C. W., 2020. Land subsidence susceptibility mapping in Jakarta using functional and meta-ensemble machine learning algorithm based on time-series InSAR data, *Remote Sensing*, 12, 21, 1–26.
- Haliloğlu, M. ve Odabaş, M. S., 2018. Çok ölçütlü karar vermede AHP yöntemi, *Kilis 7 Aralık Üniversitesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 2, 2, 13-18.

- Hanssen, R. F., 2001. Radar interferometry: Data interpretation and error analysis, Springer Science ve Business Media, 2, 435–510.
- Hastie, T., Tibshirani, R. ve Friedman, J., 2009. The elements of statistical learning. Springer, New York, USA.
- Hazer, A. ve Bozdağ, A., 2024. Hiper-optimize edilmiş makine öğrenim teknikleri ile taşınmaz değerlendirilmesi: Yozgat kenti örneği, Geomatik, 9, 3, 299–312.
- Herrera-García, G., Ezquerro, P., Tomas, R., Béjar-Pizarro, M., López-Vinielles, J., Rossi, M., Mateos, R. M., Carreón-Freyre, D., Lambert, J., Teatini, P., Cabral-Cano, E., Erkens, G., Galloway, D., Hung, W. C., Kakar, N., Sneed, M., Tosi, L., Wang, H. ve Ye, S., 2021. Mapping the global threat of land subsidence, Science, 371, 6524, 34–36.
- Hoffmann, J., Zebker, H. A., Galloway, D. L. ve Amelung, F., 2001. Seasonal subsidence and rebound in Las Vegas Valley, Nevada, observed by synthetic aperture radar interferometry, Water Resources Research, 37, 6, 1551–1566.
- Holzer, T. L. ve Johnson, A. I., 1985. Land subsidence caused by ground water withdrawal in urban areas, GeoJournal, 11, 3, 245–255.
- Hong, H., Pradhan, B., Sameen, M. I., Kalantar, B., Zhu, A. ve Chen, W., 2018. Improving the accuracy of landslide susceptibility model using a novel region-partitioning approach, Landslides, 15, 4, 753–772.
- Hooper, A., Segall, P. ve Zebker, H., 2007. Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 112, 7.
- Hooper, A., Zebker, H., Segall, P. ve Kampes, B. 2004. A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers, Geophysical Research Letters, 31, 23, L23611.
- Hosseini, S. M., Isari, M., Bahrami, J., Karimi, S., Faghihi, F. ve Isari, M., 2025. Evaluation of subsidence phenomenon by multilayer perceptron artificial neural network (Case Study: Dehghan Plain, Kurdistan Province, Iran), Environment and Water Engineering, 11, 1, 1–11.
- Hosseinzadeh, E., Anamaghi, S., Behboudian, M. ve Kalantari, Z., 2024. Evaluating machine learning-based approaches in land subsidence susceptibility mapping, Land, 13, 3, 322.
- Hu, L., Dai, K., Xing, C., Li, Z., Tomás, R., Clark, B., Shi, X., Chen, M., Zhang, R., Qiu, Q. ve Lu, Y., 2019. Land subsidence in Beijing and its relationship with geological faults revealed by Sentinel-1 InSAR observations, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 82, 101886.

- Hutchinson, M. F. ve Gallant, J. C., 2000. Digital elevation models and representation of terrain shape, Wilson, J. P. ve Gallant, J. C., Terrain Analysis: Principles and Applications, John Wiley ve Sons Inc., New York, USA.
- Hutter, F., Kotthoff, L. ve Vanschoren, J., 2019. Automated machine learning: Methods, systems, challenges, Springer Nature.
- Işık, M., 2018. Ötrofikasyon ve su kalitesi problemleri-Aksaray örneği, İklim Değişikliği ve Çevre, 3, 1, 37-44.
- İban, C. M. ve Bilgilioğlu, S. S., 2023. Snow avalanche susceptibility mapping using novel tree-based machine learning algorithms (XGBoost, NGBoost, and LightGBM) with explainable artificial intelligence (XAI) approach, Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 37, 6, 2243–2270.
- İban, M. ve Sekertekin, A. 2022. Machine learning based wildfire susceptibility mapping using remotely sensed fire data and GIS: A case study of Adana and Mersin provinces, Turkey, Elsevier, 69, 101647.
- Karahanoğlu, N., 2018. Yeraltısuyu çekimi sonucu oluşan yüzey çökmesi problemi; bilimsel araştırmaların tarihsel gelişimi, Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 42, 77–106.
- Karcioğlu, A. A. ve Bulut, H., 2021. Performance evaluation of classification algorithms using hyperparameter optimization, 6th International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK), IEEE, 354–358.
- Kariluoto, A., Kultanen, J., Soininen, J., Parnanen, A. ve Abrahamsson, P., 2021. Quality of data in machine learning, Proceedings of the 21st International Conference on Software Quality, Reliability and Security Companion (QRS-C 2021), 216–221.
- Karşlıoğlu, A., Alkayış, M., Kalkan, K. ve Onur, M. İ., 2020. Sentinel-1 uydusu ile Konya Karapınar ilçesi bölgesel çökme analizi, Disaster Science and Engineering, 6, 2, 8-15.
- Ke, G., Meng, Q., Finley, T., Wang, T., Chen, W., Ma, W., Ye, Q. ve Liu, T.-Y., 2017. LightGBM: A highly efficient gradient boosting decision tree, Advances in Neural Information Processing Systems, 30.
- Keller, C. P., 1995. Geographic information systems for geoscientists: Modelling with GIS, Computers and Geosciences, 2, 9, 1110–1112.
- Khan, J., Ren, X., Hussain, M. A. ve Jan, M. Q., 2022. Monitoring land subsidence using PS-InSAR technique in Rawalpindi and Islamabad, Pakistan, Remote Sensing, 14, 15, 3722.

- Kidanu, S. T., Anderson, N. L. ve Rogers, J. D., 2018. Using GIS-based spatial analysis to determine factors influencing the formation of sinkholes in Greene County, Missouri, *Environmental and Engineering Geoscience*, 24, 3, 251–261.
- Kok, S. ve Costa, A. L., 2021. Framework for economic cost assessment of land subsidence, *Natural Hazards*, 106, 1931-1949.
- Kuhn, M. ve Johnson, K., 2013. *Applied predictive modeling*, Springer, Berlin, Almanya.
- Kuş, İ., Keser, S. ve Yolaçan, E., 2021. Saldırı tespit sistemlerinde topluluk öğrenme yöntemlerinin kıyaslanması, *Avrupa Bilim ve Teknoloji*, 31, 1, 725–734.
- Kuşcu, İ. ve Özdemir, H., 2023. Taşkın duyarlılık analizinde kullanılan parametreler üzerine bir değerlendirme, *Türk Coğrafya Dergisi*, 84, 67–83.
- Lanari, R., Mora, O., Manunta, M., Mallorquí, J. J., Berardino, P. ve Sansosti, E., 2004. A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42, 7, 1377-1386.
- Lee, S., Kang, J. ve Kim, J., 2023a. Analysis of ground subsidence vulnerability in urban areas using spatial regression analysis, *Applied Sciences*, 13, 15, 8603.
- Lee, S., Kang, J. ve Kim, J., 2023b. Machine learning-based predictive model of ground subsidence risk using characteristics of underground pipelines in urban areas, *IEEE Access*.
- Lee, S. ve Park, I., 2012. Spatial prediction of ground subsidence susceptibility using an artificial neural network, *Springer*, 49, 347–358.
- Lee, S. ve Park, I., 2013. Application of decision tree model for the ground subsidence hazard mapping near abandoned underground coal mines, *Journal of Environmental Management*, 127, 166–176.
- Lee, S., Park, I. ve Choi, J. K., 2012. Spatial prediction of ground subsidence susceptibility using an artificial neural network, *Environmental Management*, 49, 347–358.
- Lee, J. H., Sameen, M. I., Pradhan, B. ve Park, H. J., 2018. Modeling landslide susceptibility in data-scarce environments using optimized data mining and statistical methods, *Geomorphology*, 303, 284–298.
- Li, F., Liu, G., Gong, H., Chen, B. ve Zhou, C., 2022. Assessing land subsidence-inducing factors in the Shandong Province, China, by using PS-InSAR measurements, *Remote Sensing*, 14, 12, 2875.

- Liu, J., Liu, W., Allechy, F. B., Zheng, Z., Liu, R. ve Kouadio, K. L., 2024. Machine learning-based techniques for land subsidence simulation in an urban area, *Journal of Environmental Management*, 352, 120078.
- Luo, Q., Perissin, D., Lin, H., Zhang, Y. ve Wang, W., 2014. Subsidence monitoring of Tianjin suburbs by TerraSAR-X persistent scatterers interferometry, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7, 5, 1642–1650.
- Lyons, S. ve Sandwell, D. 2003. Fault creep along the southern San Andreas from interferometric synthetic aperture radar, permanent scatterers, and stacking, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108.
- Machowski, R., Rzetala, M. A., Rzetala, M. ve Solarski, M., 2016. Geomorphological and hydrological effects of subsidence and land use change in industrial and urban areas, *Land Degradation ve Development*, 27, 7, 1740–1752.
- Maghsoudi, Y., van der Meer, F., Hecker, C., Perissin, D. ve Saepuloh, A., 2018. Using PS-InSAR to detect surface deformation in geothermal areas of West Java in Indonesia, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 64, 386–396.
- Mitchell, T. M., 1997. *Machine Learning*, McGraw-Hill, New York, USA.
- Modoni, G., Darini, G., Spacagna, R. L., Saroli, M., Russo, G. ve Croce, P., 2013. Spatial analysis of land subsidence induced by groundwater withdrawal, *Engineering Geology*, 167, 59–71.
- Mohammady, M., Pourghasemi, H. R. ve Amiri, M., 2019a. Assessment of land subsidence susceptibility in Semnan plain (Iran): A comparison of support vector machine and weights of evidence data mining algorithms, *Natural Hazards*, 99, 2, 951–971.
- Mohammady, M., Pourghasemi, H. R. ve Amiri, M., 2019b. Land subsidence susceptibility assessment using random forest machine learning algorithm, *Environmental Earth Sciences*, 78, 503.
- Moreno Navas, J., Telfer, T. C. ve Ross, L. G., 2012. Separability indexes and accuracy of neuro-fuzzy classification in Geographic Information Systems for assessment of coastal environmental vulnerability, *Ecological Informatics*, 12, 43–49.
- Motagh, M., Djamour, Y., Walter, T. R., Wetzels, H. U., Zschau, J. ve Arabi, S., 2007. Land subsidence in Mashhad Valley, northeast Iran: Results from InSAR, levelling and GPS, *Geophysical Journal International*, 168, 2, 518–526.
- Motagh, M., Walter, T. R., Sharifi, M. A., Fielding, E., Schenk, A., Anderssohn, J. ve Zschau, J., 2008. Land subsidence in Iran caused by widespread water reservoir overexploitation, *Geophysical Research Letters*, 35, 16.

- Na, T., Kawamura, Y., Kang, S. ve Utsuki, S., 2021. Hazard mapping of ground subsidence in east area of Sapporo using frequency ratio model and GIS, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 12, 1, 347–362.
- Ng, A. H. M., Ge, L., Li, X., Abidin, H. Z., Andreas, H. ve Zhang, K., 2012. Mapping land subsidence in Jakarta, Indonesia using persistent scatterer interferometry (PSI) technique with ALOS PALSAR, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 18, 1, 232–242.
- Nguyen, H. D., Nguyen, Q. H., Dang, D. K., Nguyen, T. G., Truong, Q. H., Nguyen, V. H., Bretcan, P., Şerban, G., Bui, Q. T. ve Petrisor, A. I., 2024. Integrated machine learning and remote sensing for groundwater potential mapping in the Mekong Delta in Vietnam, *Acta Geophysica*, 72, 4395–4413.
- Nhu, V. H., Mohammadi, A., Shahabi, H., Ahmad, B. Bin, Al-Ansari, N., Shirzadi, A., Clague, J. J., Jaafari, A., Chen, W. ve Nguyen, H., 2020. Landslide susceptibility mapping using machine learning algorithms and remote sensing data in a tropical environment, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17, 14, 4933.
- Oh, H. J. ve Lee, S., 2010. Assessment of ground subsidence using GIS and the weights-of-evidence model, *Engineering Geology*, 115, 1–2, 36–48.
- Oh, H. J., Syifa, M., Lee, C. W. ve Lee, S., 2019. Land subsidence susceptibility mapping using Bayesian, functional, and meta-ensemble machine learning models, *Applied Sciences*, 9, 6, 1248.
- Oktar, O., 2020. Büyük Menderes Grabeni tektonik hareketlerinin uydu bazlı tekniklerle belirlenmesi, Doktora Tezi, Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray.
- Oktar, O., 2023. Derinkuyu Yeraltı Şehrinin sabit saçıcıli interferometri tekniği ile incelenmesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 23, 5, 1206–1213.
- Orhan, O., 2018. Uzaktan algılama ve coğrafi bilgi sistemleri ile muhtemel obruk alanlarının belirlenmesi, Doktora Tezi, Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray.
- Orhan, O., 2021. Monitoring of land subsidence due to excessive groundwater extraction using small baseline subset technique in Konya, Turkey, *Environmental Monitoring and Assessment*, 193, 174.
- Osmanoğlu, B., Dixon, T. H., Wdowinski, S., Cabral-Cano, E. ve Jiang, Y., 2011. Mexico City subsidence observed with persistent scatterer InSAR, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13, 1, 1–12.

- Osmanoğlu, B., Sunar, F., Wdowinski, S. ve Cabral-Cano, E., 2016. Time series analysis of InSAR data: Methods and trends, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 90–102.
- Ozdemir, A., 2015. Sinkhole susceptibility mapping using a frequency ratio method and GIS technology near Karapınar, Konya-Turkey, *Procedia Earth and Planetary Science*, 15, 502–506.
- Ozdemir, A., 2016. Sinkhole susceptibility mapping using logistic regression in Karapınar (Konya, Turkey), *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75, 2, 681–707.
- Özcan, S., 2009. Aksaray-Doğantarla ve Konya-Kulu bölgelerinde Üst Miyosen yaşlı jeolojik serilerin sedimentolojik ve mineralojik incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray.
- Pal, S. C. ve Chowdhuri, I., 2019. GIS-based spatial prediction of landslide susceptibility using frequency ratio model of Lachung River basin, North Sikkim, India, *SN Applied Sciences*, 1, 416.
- Pearson, K., 1895. VII. Note on regression and inheritance in the case of two parents, *Proceedings of the Royal Society of London*, 58, 347–352, 240–242.
- Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V. ve Thirion, B., 2011. Scikit-learn: Machine learning in Python, *Environmental Health Perspectives*, 127, 9, 2825–2830.
- Pham, B. T., Khosravi, K. ve Prakash, I., 2017. Application and comparison of decision tree-based machine learning methods in landslide susceptibility assessment at Pauri Garhwal Area, Uttarakhand, India, *Environmental Processes*, 4, 711–730.
- Pham, B. T., Tien Bui, D., Dholakia, M. B., Prakash, I. ve Pham, H. V., 2016. A comparative study of least square support vector machines and multiclass alternating decision trees for spatial prediction of rainfall-induced landslides in a tropical cyclones area, *Geotechnical and Geological Engineering*, 34, 1807–1824.
- Pourghasemi, H. ve Beheshtirad, M., 2015. Assessment of a data-driven evidential belief function model and GIS for groundwater potential mapping in the Koohrang Watershed, Iran, *Geocarto International*, 30, 6, 662–685.
- Pourghasemi, H. R., Jirandeh, A. G., Pradhan, B., Xu, C. ve Gokceoglu, C., 2013. Landslide susceptibility mapping using support vector machine and GIS at the Golestan province, Iran, *Journal of Earth System Science*, 122, 349–369.
- Pourghasemi, H. R. ve Saravi, M. M., 2017. Land-subsidence spatial modeling using generalized additive model data mining technique, *Watershed Management Research*, 30, 4, 20–34.

- Pourghasemi, H. R. ve Saravi, M. M., 2019. Land-subsidence spatial modeling using the random forest data-mining technique, *Spatial Modeling in GIS and R for Earth and Environmental Sciences*, Elsevier, 147-159.
- Powers, D. M. W., 2011. Evaluation: From precision, recall and F-Measure to ROC, informedness, Markedness ve Correlation, *Journal of Machine Learning Technologies*, 2, 1, 37-63.
- Pradhan, B., Abokharima, M. H., Jebur, M. N. ve Tehrany, M. S., 2014. Land subsidence susceptibility mapping at Kinta Valley (Malaysia) using the evidential belief function model in GIS, *Natural Hazards*, 73, 1019–1042.
- Qiao, X., Chu, T., Krell, E., Tissot, P., Holland, S., Ahmed, M. ve Smilovsky, D., 2024. Interpretation and attribution of coastal land subsidence: An InSAR and machine learning perspective, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 17, 4768–4783.
- Ranjgar, B., Razavi-Termeh, S. V., Foroughnia, F., Sadeghi-Niaraki, A. ve Perissin, D., 2021. Land subsidence susceptibility mapping using persistent scatterer SAR interferometry technique and optimized hybrid machine learning algorithms, *Remote Sensing*, 13, 7, 1326.
- Rosen, P. A., Hensley, S., Joughin, I. R., Li, F. K., Madsen, S. N., Rodríguez, E. ve Goldstein, R. M., 2000. Synthetic aperture radar interferometry, *Proceedings of the IEEE*, 88, 3, 333-348.
- Saaty, T. L., 1980. The analytic hierarchy process (AHP), *The Journal of the Operational Research*, 41, 11, 1073–1076.
- Santo, A., Ascione, A., Del Prete, S., Di Crescenzo, G. ve Santangelo, N., 2011. Collapse sinkholes in the carbonate massifs of Central and Southern Apennines, *Acta Carsologica*, 40.
- Sardooi, E. R., Azareh, A., Sardoo, F. S. ve Clague, J. J., 2021. Comparison of statistical and machine learning approaches in land subsidence modelling, *Geocarto International*, 37, 21, 6165–6185.
- Schaefer, L. N., Lu, Z. ve Oommen, T., 2016. Post-eruption deformation processes measured using ALOS-1 and UAVSAR InSAR at Pacaya Volcano, Guatemala, *Remote Sensing*, 8.
- Schuck, B., Schleicher, A. M., Janssen, C., Toy, V. G. ve Dresen, G., 2020. Fault zone architecture of a large plate-bounding strike-slip fault: A case study from the Alpine Fault, New Zealand, *Solid Earth*, 11, 1, 95–124.
- Sekkeravani, M. A., Bazrafshan, O., Pourghasemi, H. R. ve Holisaz, A., 2022. Spatial modeling of land subsidence using machine learning models and statistical methods, *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 19, 28866–28883.

- Selçuk, K., 2018. Kozaklı (Nevşehir) jeotermal alanındaki çöküntü mekanizmasının hidrojeolojik açıdan incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray.
- Senouci, R., Taibi, N. E., Teodoro, A. C., Duarte, L., Mansour, H. ve Meddah, R. Y., 2021. GIS-based expert knowledge for landslide susceptibility mapping (LSM): Case of Mostaganem Coast District, West of Algeria, Sustainability, 13, 2, 630.
- Seymen, İ., 1981. Kaman (Kirsehir) dolayında Kirsehir Masifinin metamorfizması, Türkiye Jeoloji Kurultayı 35. Bilimsel ve Teknik Kurultayı, İç Anadolu'nun Jeolojisi Sempozyumu, Ankara, Türkiye, 12-16.
- Shi, L., Gong, H., Chen, B. ve Zhou, C., 2020. Land subsidence prediction induced by multiple factors using machine learning method, Remote Sensing, 12, 24, 4044.
- Singh, R. S. ve Tripathi, N., 2010. Underground coal mine subsidence impacts forest ecosystem, Project Environmental Clearance Engineering and Management Aspect, 263-279.
- Sokolova, M. ve Lapalme, G., 2009. A systematic analysis of performance measures for classification tasks, Information Processing ve Management, 45, 4, 427–437.
- Stanley, J. D. ve Corwin, K. A., 2013. Measuring strata thicknesses in cores to assess recent sediment compaction and subsidence of Egypt's Nile Delta coastal margin, Journal of Coastal Research, 29, 3, 657–670.
- Stevens, N. F., Wadge, G. ve Williams, C. A., 2001. Post-emplacement lava subsidence and the accuracy of ERS InSAR digital elevation models of volcanoes, International Journal of Remote Sensing, 22, 5, 819–828.
- Struhár, J., Rapant, P., Kačmařík, M., Hlaváčová, I. ve Lazecký, M. 2022. Monitoring non-linear ground motion above underground gas storage using GNSS and PSInSAR based on Sentinel-1 data, Remote Sensing, 14, 19, 4898.
- Sungur, F. ve Bakır, H., 2024. Hiperparametre ayarlama ve veri dengelemenin kalp hastalığı tahmini için kullanılan makine öğrenimi algoritmaları üzerindeki etkilerinin incelenmesi, Bilişim Teknolojileri Dergisi, 17, 1, 45–58.
- Şengül, Y. S., 2010. InSAR ölçülerinin doğruluk araştırması (The accuracy assessment of InSAR measurements), Harita Dergisi, 143, 19-25.
- Tao, Q., Li, X., Gao, T., Chen, Y., Liu, R. ve Xiao, Y. 2025. Land subsidence monitoring and analysis in Qingdao, China using time series InSAR combining PS and DS. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 16.
- Tokimatsu, K. ve Seed, H. B., 1987. Evaluation of settlements in sands due to earthquake shaking, Journal of Geotechnical Engineering, 113, 8, 861–878.

- Tran, A. V., Brovelli, M. A., Ha, K. T., Khuc, D. T., Tran, D. N., Tran, H. H. ve Le, N. T., 2024. Land subsidence susceptibility mapping in Ca Mau Province, Vietnam, using boosting models, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 13, 5, 161.
- Trenberth, K. E., 2011. Changes in precipitation with climate change, *Climate Research*, 47, 123–138.
- Tsangaratos, P., Iliä, I. ve Loupasakis, C., 2019. Land subsidence modelling using data mining techniques: The case study of Western Thessaly, Greece, *Advances in Natural and Technological Hazards Research*, 48, 79–103.
- Tzampoglou, P., Iliä, I., Karalis, K., Tsangaratos, P., Zhao, X. ve Chen, W., 2023. Selected worldwide cases of land subsidence due to groundwater withdrawal, *Water*, 15, 6, 1094.
- Ulu, Ü., Öcal, H., Bulduk, A. K., Karakaş, M., Arbas, A., Saçlı L. ve Karabıyıköğlü, M., 1994. Cihanbeyli-Karapınar yöresi geç Senozoyik çökeltme sistemi: Tektonik ve iklimsel önemi, *Türkiye Jeoloji Kurultayı Bülteni*, 9, 149-163.
- Üstün, A., Tuşat, E. ve Abbak, R., 2007. Konya Kapalı Havzasında yeraltı suyu çekilmesi ve olası sonuçlarının jeodezik yöntemlerle izlenmesi, *Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu*, 24-26.
- Üzel, N. ve Öztürk, D., 2021. Heyelan duyarlılığının frekans oranı yöntemiyle analizi, *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 26, 3, 865–884.
- Wan, J., Xiao, H., Chen, L., Wang, X. ve Weng, S., 2024. Landslide susceptibility assessment with time-series InSAR deformation optimization for non-landslide sample selection supported by machine learning, 4954118, 1-39.
- Wang, Y., Fan, R., Yan, J., Jin, M., Lei, X., Wang, Y. ve Song, W., 2024. An analysis of urban land subsidence susceptibility based on complex network, *Natural Hazards*, 1–23.
- Wilson, W. L. ve Beck, B. F., 1992. Hydrogeologic factors affecting new sinkhole development in the Orlando area, Florida, *Groundwater*, 30, 6, 918–930.
- Wright, T., 2000. Crustal deformation in Turkey from synthetic aperture radar interferometry, Ph.D. Thesis, University of Oxford, Department of Earth Sciences, Oxford, United Kingdom.
- Xu, Y., Wu, Z., Zhang, H., Liu, J. ve Jing, Z., 2023. Land subsidence monitoring and building risk assessment using InSAR and machine learning in a Loess Plateau city—A case study of Lanzhou, China, *Remote Sensing*, 15, 11, 2851.
- Xue, Y. Q., Zhang, Y., Ye, S. J., Wu, J. C. ve Li, Q. F., 2005. Land subsidence in China, *Environmental Geology*, 48, 6, 713–720.

- Yang, X., Jia, C., Sun, H., Yang, T. ve Yao, Y., 2024. Integrating multi-source data to evaluate land subsidence susceptibility and management policies, *Environmental Impact Assessment Review*, 104, 107315.
- Yao, Z., Chen, M., Zhan, J., Zhuang, J., Sun, Y., Yu, Q. ve Yu, Z., 2023. Refined landslide susceptibility mapping by integrating the SHAP-CatBoost model and InSAR observations: A case study of Lishui, Southern China, *Applied Sciences (Switzerland)*, 13, 23, 12817.
- Yayvan, M. ve Ersoy, S., 2008. Aksaray iklimi ve küresel ısınma, *Su Enerji Sağlık Sempozyumu Bildirileri, Aksaray, Bildiriler Kitabı*, 1-12.
- Yıldız, H., Mermer, A., Ünal, E. ve Akbaş, F., 2012. Türkiye bitki örtüsünün NDVI verileri ile zamansal ve mekânsal analizi, *Tarla Bitkileri Merkez Araştırma Enstitüsü Dergisi*, 21, 2, 50–56.
- Yılmaz, O. S., 2023. Frekans oranı yöntemiyle coğrafi bilgi sistemi ortamında heyelan duyarlılık haritasının üretilmesi: Manisa, Demirci, Tekeler Köyü örneği, *Geomatik*, 81, 42–54.
- Yılmaz, E. ve Bilgiliöğlü, S. S. 2023. QGIS-based weighted linear combination plugin for landfill site selection: A case study in Tokat Province, Turkey, *Environmental Monitoring and Assessment*, 195, 1290.
- Yılmaztürk, S., 2015. SBAS-InSAR yöntemiyle düşey yönlü yüzey deformasyonlarının belirlenmesi: Bursa-Orhaneli linyit madeni örneği, *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul*.
- Yi, X., Wang, L., Ci, H., Wang, R., Yang, H. ve Yan, Z. 2025. Monitoring of Land Subsidence and Analysis of Impact Factors in the Tianshan North Slope Urban Agglomeration, *14, 1, 202*.
- Youssef, A. M. ve Pourghasemi, H. R., 2021. Landslide susceptibility mapping using machine learning algorithms and comparison of their performance at Abha Basin, Asir Region, Saudi Arabia, *Geoscience Frontiers*, 12, 2, 639–655.
- Youssef, A. M., Pourghasemi, H. R., Pourtaghi, Z. S. ve Al-Katheeri, M. M., 2016. Landslide susceptibility mapping using random forest, boosted regression tree, classification and regression tree, and general linear models and comparison of their performance at Wadi Tayyah Basin, Asir Region, Saudi Arabia, *Landslides*, 13, 839–856.
- Zadeh, L. A., 1965. Fuzzy Sets, *Information and Control*, Academic Press. 83, 338–353.
- Zamanirad, M., Sarraf, A., Sedghi, H., Saremi, A. ve Rezaee, P., 2020. Modeling the influence of groundwater exploitation on land subsidence susceptibility using machine learning algorithms, *Natural Resources Research*, 29, 1127–1141.

- Zanaga, D., Van De Kerchove, R., Daems, D., De Keersmaecker, W., Brockmann, C., Kirches, G., Wevers, J., Cartus, O., Santoro, M. ve Arino, O., 2022. ESA WorldCover 10 m 2021 v200, European Space Agency.
- Zebker, H. A., Rosen, P. A., Goldstein, R. M., Gabriel, A. ve Werner, C. L., 1994. On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: The Landers earthquake, *Journal of Geophysical Research*, 99, 10, 19617–19634.
- Zebker, H. A., Rosen, P. A. ve Hensley, S., 1997. Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102, 4, 7547–7563.
- Zhang, X., Cheng, Z., Xu, B., Gui, R., Hu, J., Yang, C., Yang, Q. ve Xiong, T., 2023. Coupling the relationship between land subsidence and groundwater level, ground fissures in Xi'an city using multi-orbit and multi-temporal InSAR, *Remote Sensing*, 15, 14, 3567.
- Zhao, R., Arabameri, A. ve Santosh, M., 2024a. Land subsidence susceptibility mapping: A new approach to improve decision stump classification (DSC) performance and combine it with four machine learning algorithms, *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 15443–15466.
- Zhou, C., Gong, H., Chen, B., Li, J., Gao, M., Zhu, F., Chen, W. ve Liang, Y., 2017. InSAR time-series analysis of land subsidence under different land use types in the Eastern Beijing Plain, China, *Remote Sensing*, 9, 4, 380.
- Zhao, F., Miao, F., Wu, Y., Xiong, Y., Gong, S. ve Sun, D., 2024b. Land subsidence susceptibility mapping in urban settlements using time-series PS-InSAR and random forest model, *Gondwana Research*, 125, 406–424.
- Zhu, A. X., Wang, R., Qiao, J., Qin, C. Z., Chen, Y., Liu, J., Du, F., Lin, Y. ve Zhu, T., 2014. An expert knowledge-based approach to landslide susceptibility mapping using GIS and fuzzy logic, *Geomorphology*, 214, 128–138.
- URL-1 < <https://www.drozdogan.com/> >, Erişim tarihi: 29.08.2024.

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Osman KORKMAZ

EĞİTİM BİLGİLERİ (Kurum ve Yıl)

Lisans : Cumhuriyet Üniversitesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, 2017-2019

Yüksek Lisans : Aksaray Üniversitesi, Harita Mühendisliği Anabilim Dalı, 2022-2025

TEZDEN ÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER

Kongrelerde Sunulan Makaleler

1. Korkmaz, O. ve Bilgilioğlu, S. S., 2024. Aksaray ili düşey yönlü zemin çökmesi envanterinin PS-InSAR yöntemi ile toplanması, 4. Uluslararası Mühendislik ve Fen Bilimleri Kongresi, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 484.