

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**MAKİNE ÖĞRENME ALGORİTMALARI KULLANILARAK
HEYELAN DUYARLILIK HARİTALAMASI**

Ashı İlgin HORZUM

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

OCAK 2024

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**MAKİNE ÖĞRENME ALGORİTMALARI KULLANILARAK
HEYELAN DUYARLILIK HARİTALAMASI**

Ashı İlgin HORZUM

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

JEOLojİ MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

OCAK 2024

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE ÖĞRENME ALGORİTMALARI KULLANILARAK
HEYELAN DUYARLILIK HARİTALAMASI

Ashı İlgin HORZUM
JEOLojİ MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez TÜBİTAK tarafından 121M706 (TUBİTAK-1001 Projesi) nolu proje ile desteklenmiştir.

OCAK 2024

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE ÖĞRENME ALGORİTMALARI KULLANILARAK
HEYELAN DUYARLILIK HARİTALAMASI

Ashı İlgin HORZUM
JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 18/01/2024 tarihinde jüri tarafından Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Bekir Taner SAN (Danışman)	[imza]
Prof. Dr. Hakan Ahmet NEFESLİOĞLU	[imza]
Doç. Dr. Yasemin LEVENTELİ	[imza]

ÖZET

MAKİNE ÖĞRENME ALGORİTMALARI KULLANILARAK HEYELAN DUYARLILIK HARİTALAMASI

Aslı İlgin HORZUM

Yüksek Lisans Tezi, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Bekir Taner SAN

Ocak 2024; 58 sayfa

Bu çalışmada, İstanbul Anadolu yakasının güneyinde yer alan Kartal İlçesi sınırları içerisinde bulunan 38.54 km²'lik bölgede uzaktan algılama ve coğrafi bilgi sistemleri kullanılarak alanın heyelan duyarlılık haritalaması yapılması amaçlanmıştır. Çalışma alanı nüfus ve ticaret alanı olması nedeniyle önemli bir konuma sahiptir.

Çalışma kapsamında farklı veri setinden oluşturulan topografik, morfometrik ve spektral parametreler kullanılmıştır. Bu parametreler ASTER uydu görüntüleri ve bunların analizlerinden elde edilen görünür ve yakın kızılötesi, kısa dalga boylu kızılötesi, termal kızılötesi, normalleştirilmiş fark bitki örtüsü indeksi, dekorelasyon gemesi, temel bileşenler analizi, sayısal yükseklik modeli ve türevleri (eğim, bakı, kanallara olan uzaklık, plan eğriliği, profil eğriliği, topografik ıslaklık indeksi, LS faktör) verileri ile mevcut fay hatlarına olan uzaklık ve heyelan envanter verileri kullanılmıştır.

Çalışmada analiz ve işlem sonuçları ile elde edilen girdi parametreleri, makine öğrenme algoritmalarından Destek Vektör Makinesi (SVM) kullanılarak heyelan duyarlılık haritalaması yapılmıştır. Çalışmada İki Seviyeli Rastgele Örnekleme (2LRS) algoritması kullanılarak eğitim ve test sınıfları belirlenmiştir. Bu algoritmanın en önemli özelliği çalışma sahasında heyelan öncesi koşulların kullanılmasıdır. Böylece otomatik heyelan haritalaması değil, heyelan duyarlılık haritalaması yapılmıştır.

Üretilen heyelan duyarlılık haritasında, her piksel 0.0 ile 1.0 aralığında süreklilik arz eden duyarlılık değerlerini göstererek sınıflandırılmıştır. Elde edilen duyarlılık haritaları, her biri yüksek, orta, düşük ve çok düşük duyarlılık olmak üzere dört farklı sınıfa ayrılmıştır. Sınıflandırma sonucunda elde edilen haritaların doğruluk değerlendirmesi için alıcı işletim karakteristik (ROC) eğrisi ve eğri altında kalan alan (AUC) değerleri kullanılmıştır. Üretilen heyelan duyarlılık haritalarının doğruluk değerleri olarak hesaplanan AUC değerleri %93 olarak bulunmuştur.

ANAHTAR KELİMELE: ASTER, Heyelan Duyarlılık Haritalaması, İstanbul, Makine Öğrenme Algoritması

JÜRİ: Prof. Dr. Bekir Taner SAN

Prof. Dr. Hakan Ahmet NEFESLİOĞLU

Doç. Dr. Yasemin LEVENTELİ

ABSTRACT

LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY MAPPING USING MACHINE LEARNING ALGORITHMS

Ash İlgin HORZUM

MSc Thesis in Geological Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Bekir Taner SAN

January 2024; 58 pages

In this study, it was aimed to carry out landslide susceptibility mapping of the area using remote sensing and geographical information systems in a 38.54 km² area within the borders of Kartal District located in the south of the Anatolian side of Istanbul. The study area has an important location due to its population and trade area.

Within the scope of the study, topographic, morphometric and spectral parameters created from the different data set were used. These parameters include visible and near infrared, short wavelength infrared, thermal infrared, normalized difference vegetation index, decorrelation stress, principal component analysis, digital elevation model and its derivatives (slope, aspect, distance to canals, plan curvature, profile curvature, topographic wetness index, LS factor), distance to existing fault lines and landslide inventory data obtained from ASTER satellite images and their analysis.

In the study, landslide susceptibility mapping was performed by using the input parameters obtained from the analysis and processing results and the Support Vector Machine (SVM), one of the machine learning algorithms. In the study, training and test classes were determined using the Two Level Random Sampling (2LRS) algorithm. The most important feature of this algorithm is the use of pre-landslide conditions in the study area. Thus, landslide susceptibility mapping was performed, not automatic landslide mapping.

In the landslide susceptibility map produced, each pixel is classified by showing continuous susceptibility values between 0.0 and 1.0. The resulting susceptibility maps are categorized into four different classes, each of which is high, medium, low and very low susceptibility. Receiver operating characteristic (ROC) curve and area under the curve (AUC) values were used to evaluate the accuracy of the maps obtained as a result of classification. AUC values calculated as the accuracy values of the produced landslide susceptibility maps were found as 93%.

KEYWORDS: ASTER, Istanbul, Landslide Susceptibility Mapping, Machine Learning Algorithm

COMMITTEE: Prof. Dr. Bekir Taner SAN

Prof. Dr. Hakan Ahmet NEFESLİOĞLU

Assoc. Prof. Dr. Yasemin LEVENTELİ

ÖNSÖZ

Geçmişte ve günümüzde gerçekleşen heyelan afetleri hem Dünyada hem de Türkiye’de maddi ve manevi olarak yıkıcı etkilere neden olmuştur. Bu çalışma ile birlikte ülkemizde en çok göç alan ve en kalabalık şehri olan İstanbul ili tercih edilerek, meydana gelen heyelanların incelenmesiyle ve ileride oluşabilecek yeni heyelan alanlarını belirlemek ve afetin etkisini en aza indirmek amacıyla gerçekleştirilen heyelan duyarlılık haritalaması oluşturulması amaçlanmıştır.

“Makine Öğrenme Algoritmaları Kullanılarak Heyelan Duyarlılık Haritalaması” başlıklı hazırlanmış olan bu çalışma, 2021-2023 yılları arasında Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır. Yüksek lisans tez çalışması aynı zamanda 121M706 numaralı TÜBİTAK-1001 projesinin iş paketlerinden birinin bir parçasını oluşturmaktadır. Bu bağlamda projeye destek olan TÜBİTAK’a teşekkürü bir borç bilirim.

Üniversite Jeoloji Mühendisliği bölüm seçimimden başlayarak, lisans ve yüksek lisans eğitimlerimin her aşamasında bana yardımcı olan, bilgilerini, zamanını ve tecrübesini benden esirgemeyen ve desteğini hep hissettiğim değerli danışman hocam Prof. Dr. Bekir Taner San’a çok teşekkür ederim.

TÜBİTAK 1001 Projesinde bu akademik çalışmanın bir parçası olduğum ve beraber çalışma fırsatı bulduğum değerli Akdeniz Üniversitesi Öğretim Üyesi Doç. Dr. Nusret Demir, İstanbul Teknik Üniversitesi Öğretim Üyesi Doç. Dr. Ufuk Yazgan, Mimar Bilge Ulukaya Uçan’a teşekkürlerimi sunarım.

Değerli yorum ve görüşleriyle tezime katkı sağlayan Prof. Dr. Hakan Ahmet Nefeslioğlu ve Doç. Dr. Yasemin Leventeli hocalarıma teşekkür ederim.

Bu çalışmada kullanmam için İstanbul İli, Kartal İlçesi Heyelan Envanterini benimle paylaşan; İstanbul Büyükşehir Belediyesi, Deprem Risk Yönetimi ve Kentsel İyileştirme Daire Başkanlığı, Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü’nde çalışmakta olan yönetici ve meslektaşlarıma teşekkür ederim.

Hayatımın her evresinde yanımda olan, sevgili babam Tefik Fikret Horzum’a, kıymetli annem Kadriye Horzum’a, değerli kardeşim Dilara Horzum’a ve beni her an güçlendiren nişanlım Buğra Er’e sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER	iv
AKADEMİK BEYAN	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Amaç ve Kapsamı	1
1.2. Çalışma Alanı.....	2
2. KAYNAK TARAMASI	6
2.1. Literatür Çalışmaları	6
2.2. Afet Kavramı ve Sınıflandırılması.....	8
2.3. Heyelan Tanımı ve Türleri	13
2.4. Heyelanların Nedenleri	16
2.5. Dünyada ve Türkiye’de Gerçekleşen Heyelanlar	18
3. MATERYAL VE METOT	22
3.1. Materyal	22
3.1.1. Topografik parametreler.....	24
3.1.1.1. Sayısal yükseklik modeli	25
3.1.1.2. Eğim.....	26
3.1.1.3. Bakı.....	26
3.1.1.4. Plan eğriliği.....	27
3.1.1.5. Profil eğriliği.....	28
3.1.1.6. LS faktörü	29
3.1.1.7. Topoğrafik nemlilik indeksi (TWI)	30
3.1.2. Morfometrik parametreler	31
3.1.2.1. Normalleştirilmiş fark bitki örtüsü indeksi.....	31
3.1.2.2. Kanallara olan uzaklık	32
3.1.2.3. Fay hatlarına olan uzaklık.....	33

3.1.3. Spektral parametreler.....	33
3.1.3.1. Görünür ve yakın kızılötesi	33
3.1.3.2. Kısa dalga boylu kızılötesi	34
3.1.3.3. Termal kızılötesi	35
3.1.3.4. Dekorelasyon gemesi	35
3.1.3.5. Temel bileşenler analizi	36
3.2. Metod	38
3.2.1. Heyelan duyarlılık haritalaması için örnekleme stratejisi	40
3.2.2. Heyelan duyarlılık haritalaması için makine öğrenme algoritma sınıflandırması	42
3.2.3. Doğruluk değerlendirmeleri	44
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	45
5. SONUÇLAR	48
6. KAYNAKLAR	50
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Makine Öğrenme Algoritmaları Kullanılarak Heyelan Duyarlılık Haritalaması” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

04/01/2024

Aslı Ilgın HORZUM

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

%	: Yüzde
km	: Kilometre
km ²	: Kilometrekare
m	: Metre
mm	: Milimetre
μ	: Mikron
μm	: Mikrometre
°	: Derece
,	: Dakika
°C	: Santigrat

Kısaltmalar

2LRS	: Two Level Random Sampling
AFAD	: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı
ASTER	: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
AUC	: Area Under Curve
CBS	: Coğrafi Bilgi Sistemleri
CRED	: Centre for Research on the Epidemiology of Disasters
DEM	: Digital Elevation Model
DVM	: Destek Vektör Makinesi
FPR	: False Positive Rate
GB	: Gigabayt
GHz	: Gigahertz
İBB	: İstanbul Büyükşehir Belediyesi
KAF	: Kuzey Anadolu Fayı
LS Factor	: Slope Length and Steepness Factor

MGM	: Meteoroloji Genel Müdürlüğü
MTA	: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü
NDVI	: Normalized Difference Vegetation Index
NIR	: Near infrared
PBRS	: Polygon Based Random Sampling
PCA	: Principal Component Analysis
RGB	: Red Green Blue
ROC	: Receiver Operating Characteristic Curve
RUSLE	: Revised Universal Soil Loss Equation
SAGA	: System of Automated Geoscientific Analyzes
SCI	: Science Citation Index
SVM	: Support Vector Machine
SWIR	: Short Wave Infrared
SYM	: Sayısal Yükseklik Modeli
TIR	: Thermal Infrared
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
TWI	: Topographic Wetness Index
UNDRR	: The United Nations Office for Disaster Risk Reduction
UNISDR	: United Nations International Strategy for Disaster Reduction
USGS	: United States Geological Survey
UTM	: Universal Transverse Mercator
VNIR	: Visible and Near Infrared
WGS	: World Geodetic System
WoS	: Web of Science

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. a) Türkiye haritası; b) Çalışma alanının konumu ve mevcut heyelan alanları (Google Maps 2023)	2
Şekil 1.2. Türkiye deprem tehlike haritası (AFAD 2022)	4
Şekil 1.3. Bölgenin jeoloji haritası (İBB 2020)	5
Şekil 2.1. Coğrafi bilgi sistemi bileşenleri.....	12
Şekil 2.2. Heyelan ve bölümlerinin temsili gösterimi (Varnes 1978).....	13
Şekil 2.3. Akma heyelan türlerinin temsili gösterimi (AFAD 2022).....	14
Şekil 2.4. Devrilme heyelan türlerinin temsili gösterimi (AFAD 2022)	14
Şekil 2.5. Düşme heyelan türlerinin temsili gösterimi (AFAD 2022)	14
Şekil 2.6. Yanal yayılma heyelan türlerinin temsili gösterimi (AFAD 2022).....	14
Şekil 2.7. Kayma heyelan türlerinin temsili gösterimi (AFAD 2022).....	15
Şekil 2.8. Karmaşık heyelan türlerinin temsili gösterimi (AFAD 2022).....	15
Şekil 2.9. 1950 ila 2008 yılları arasında Türkiye’de illere göre heyelan dağılımları (Gökçe vd. 2008).....	20
Şekil 2.10. 1950 ila 2018 yılları arasında Türkiye’de illere göre heyelan dağılımları (AFAD 2018).....	21
Şekil 2.11. Türkiye’de son 50 yılda gerçekleşen heyelan afetinin mekânsal dağılımı (AFAD 2018).....	21
Şekil 3.1. Terra uzay aracı (NASA 2022).....	23
Şekil 3.2. Çalışma alanı ASTER görüntüsü yapay renk kompoziti (RGB 321) ve heyelan alanları (sarı renk) a) Yakacık Caddesi heyelan alanının arazi görüntüsü b) Sarraf Sokak heyelan alanının arazi görüntüsü c) Üst Sokak heyelan alanının arazi keşif görüntüsü	24
Şekil 3.3. Sayısal yükseklik modeli haritası	25
Şekil 3.4. Eğim haritası.....	26
Şekil 3.5. Bakı haritası.....	27
Şekil 3.6. Plan eğriselliği haritası	28
Şekil 3.7. Profil eğriselliği haritası	29

Şekil 3.8. LS faktörü haritası	30
Şekil 3.9. Topoğrafik nemlilik indeksi haritası.....	31
Şekil 3.10. Normalize fark bitki örtüsü indeksi haritası	32
Şekil 3.11. Kanallara olan uzaklık haritası	32
Şekil 3.12. Fay hatlarına olan uzaklık haritası.....	33
Şekil 3.13. Görünür ve yakın kızılötesi haritası.....	34
Şekil 3.14. Kısa dalga kızılötesi haritası.....	34
Şekil 3.15. Termal görüntüleme radarı haritası	35
Şekil 3.16. Dekorelasyon gerilmesi haritası	36
Şekil 3.17. Temel bileşenler analizi haritası	36
Şekil 3.18. Veri setinden oluşturulan topoğrafik, morfometrik ve spektral parametreler: (a) VNIR, (b) SWIR, (c) TIR, (d) NDVI, (e) dekorelasyon gerilmesi, (f) Temel bileşenler analizi, (g) sayısal yükseklik modeli, (h) eğim, (i) bakı, (j) kanallara olan uzaklık, (k) plan eğriliği, (l) profil eğriliği, (m) topoğrafik ıslaklık indeksi, (n) LS faktör ve (o) fay hatlarına olan uzaklık.....	37
Şekil 3.19. Önerilen yaklaşımın iş akış şeması.....	38
Şekil 3.20. Kartal ilçesinde bulunan bir heyelan gövdesinden tohum hücre poligonu oluşturma	41
Şekil 3.21. İki Düzeyli Rastgele Örnekleme (2LRS) algoritmasının işleyiş adımları	41
Şekil 3.22. Destek Vektör Makineleri (SVM) modeli (Burges 1998; San 2014).....	43
Şekil 3.23. Destek Vektör Makineleri (DVM) sınıflandırma parametreleri.....	44
Şekil 4.1. Kartal ilçesinin SVM algoritması kullanılarak üretilen heyelan varlık bilgisine ait olasılık değerleri ile üretilmiş heyelan duyarlılık haritası	45
Şekil 4.2. Kartal ilçesinin SVM algoritması kullanılarak üretilen heyelan yokluk bilgisine ait olasılık değerleri ile üretilmiş heyelan duyarlılık haritası	46
Şekil 4.3. Kartal ilçesinin SVM algoritması Equal İnterval yöntemiyle üretilen heyelan duyarlılık haritası	47
Şekil 4.4. Python kullanılarak çizdirilen ROC eğrisi ve AUC değeri.....	48

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Kartal ve Aydos dağı istasyonlarına ait aylık ve yıl genelinde sıcaklık, yağış, nem, rüzgar ortalama değerleri (MGM 2022).....	3
Çizelge 1.2. Nüfus bilgisi (TÜİK 2022)	3
Çizelge 2.1. Doğal afetler (Guha-Sapir et al. 2016)	9
Çizelge 2.2. Doğal olmayan afetler (Guha-Sapir et al. 2016).....	10
Çizelge 2.3. Varnes'in 1978 heyelan sınıflandırma sisteminin bir özeti (Hungar 2013)..	15
Çizelge 2.4. Heyelan duyarlılık parametreleri (Gökçeoğlu ve Ercanoğlu 2001).....	18
Çizelge 2.5. 1990 ila 2016 Yılları arasında yapılan çalışmalarda parametrelerin kullanım sayısı ve oranı (SCI 2022)	18
Çizelge 2.6. Dünyada gerçekleşen doğal afet sayısı (CRED 2021).....	19
Çizelge 2.7. Dünyada gerçekleşen doğal afetlerden ölen kişi sayısı (CRED 2022)	19
Çizelge 2.8. Dünyada gerçekleşen doğal afetlerden etkilenen kişi sayısı (CRED 2022)	19
Çizelge 3.1. ASTER uydusunun özellikleri.....	23
Çizelge 3.2. Tohum hücre poligonlarında kullanılan parametrelerin tanımlayıcı istatistikleri.....	39
Çizelge 3.3. Heyelan alanlarında kullanılan parametrelerin tanımlayıcı istatistikleri	39
Çizelge 3.4. Heyelan olmayan alanlarda kullanılan parametrelerin tanımlayıcı istatistikleri.....	40

1. GİRİŞ

1.1. Çalışmanın Amaç ve Kapsamı

Yer yüzeyi doğal olayların yanı sıra mühendislik faaliyetlerinden kaynaklı olarak devamlı olarak bir değişim halindedir. Toprak kayması olarak da isimlendirilen heyelanlar; çeşitli fiziksel, morfolojik ve jeolojik faktörler etkisi altında gelişmekte olup kayalardan, molozlardan ve topraktan meydana gelmiş olan kütlelerin, yerçekimi etkisi ile yamaç boyunca yer değiştirmesi olayı olarak tanımlanmaktadır.

Kütle hareketi doğal yamaçlarda, şevlerde oluşabildiği gibi yeraltında oluşmuş boşluklarla da meydana gelebilmektedir. Bu tür hareketler karada oluşabildiği gibi deniz ve okyanuslarda oluşabilmektedir (Nurlu vd. 1997).

Heyelana duyarlı alanların önceden tespit edilmesi, mühendisler ve planlayıcılar tarafından bu alanların kullanılması için planlamayı kolaylaştırır. Heyelanların meydana gelmesine sebep olan çeşitli etkenler mevcuttur. Bu etkenler arazinin jeolojisi, iklim koşulları, arazi eğimi, tektonik hareketler, bitki örtüsü varlığı vb., doğal faktörlerden gerçekleşebildiği gibi; mühendislik çalışmaları, yapılan kazılar, kütle üzerinde oluşan ek yükler, yapay sismik aktiviteler vb. insan kaynaklı faktörlerden de gerçekleşebilmektedir.

Heyelanlar, insan hayatını ve ekonomik faaliyetleri etkilemesiyle, Dünyadaki en büyük yıkıma sebebiyet veren felaketlerden biridir (Glade 1997). Dünyanın çeşitli bölgelerinde her sene milyarlarca dolar zararın yanı sıra can ve mal kayıplarına sebep olmaktadır (Gorsevski et al. 2000). Gelişmekte olan ülkelerin gelirlerinin %0.5 heyelan sebebiyle kaybolmaktadır (Chung et al. 1995). Deprem, heyelan ve taşkınlar Türkiye’de en çok tahribata neden olan afetler arasındadır. 1950 ila 2008 yılları arasında Türkiye’de gerçekleşen heyelanlar, en yıkıcı doğal afetler arasında yerini almıştır. Heyelanlar, afetten etkilenen kişi sayısı açısından Türkiye’de ikinci sırada yerini almaktadır. 1959 ila 1994 yılları arasında ise Türkiye’de heyelandan dolayı 76995 yapı zarar görmüş ve yıkılmıştır (İldir 1995). Yapılara ek olarak yolların ve tarım alanlarının da zarar görmesine sebep olmuştur (Duman vd., 2005). Ulusal açıdan doğal afetlerden etkilenen konut alanları ele alındığında yapılan çalışmaların genelinde heyelanlar; yaşanan olay sayısı bakımından ilk, yaşanan kayıplar bakımından ise ikinci sıradadır (Çan vd. 2013).

Bu etkiler göz önüne alındığında, heyelan duyarlılık çalışmalarının planlama bakımından önem taşıdığı, oluşabilecek heyelanların önlenmesi ve etkilerinin azaltılması için heyelan duyarlılık haritalarının yapılması önem arz etmektedir.

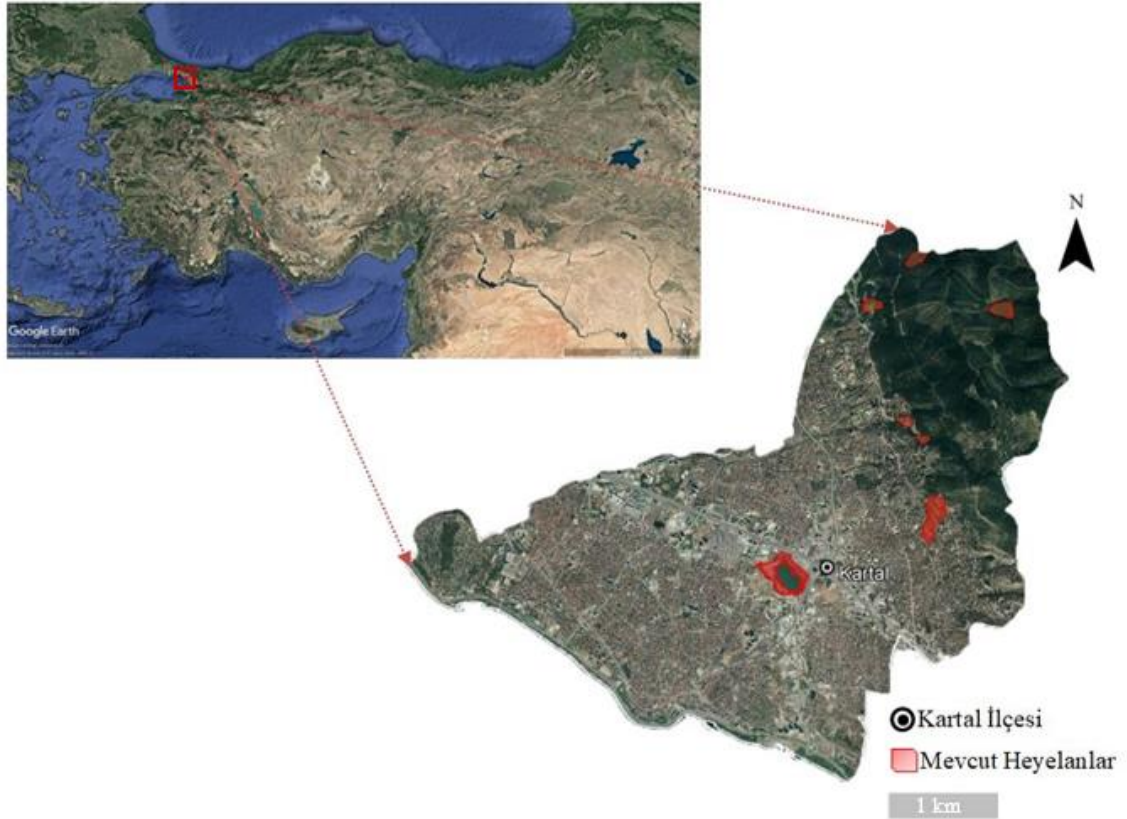
Bu çalışma, Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda yüksek lisans tezi olarak belirlenmiştir. Tez çalışması toplamda beş bölümden meydana gelmektedir. İlk bölümünde giriş kısmı yer alarak araştırmanın amacı ve kapsamı bulunmaktadır. İkinci bölümünde literatür taraması ile birlikte yer alarak, afet ve heyelanlarla ilgili kuramsal bilgiler çeşitli kaynaklarla desteklenmiştir. Üçüncü bölümünde tezin materyal ve metodu ile ilgili bilgiler vererek Kartal ilçesi heyelan duyarlılığının belirlenmesi için kullanılan veriler, duyarlılığa etki eden parametreler ve yöntemine yer verilmiştir. Dördüncü bölümde ise destek vektör makinesi yönteminin yöntemiyle elde edilen bulgular ve tartışma kısmında bulgular

kıyaslanarak değerlendirilmesi gerçekleşir. Son olarak beşinci bölümde çalışmanın sonuçları ortaya konulmuştur.

Bu tez çalışmasının temel amacı; uzaktan algılama verilerini kullanarak, destek vektör makinesi gibi makine öğrenme algoritmasının kullanılarak heyelan duyarlılık haritası üretmektir. Bu kapsamda, İstanbul Anadolu yakasının güneyinde yer alan Kartal İlçesi sınırları ile çevrili olan çalışma alanı seçilmiştir. Kartal İlçesi heyelan envanteri ve ASTER uydu verisi kullanılarak, SVM makine öğrenme algoritmaları uygulanmıştır. Poligon tabanlı rastgele örnekleme (PBRS) ve bu algoritmanın bir ileri versiyonu olan İki Seviyeli Rastgele Örnekleme (2LRS) kullanılması uygun görülmüştür. Çalışmada kullanılması tercih edilen topografik, morfometrik ve spektral parametreler, yöntem sonucunda heyelan duyarlılık haritası üretilmiş ve bölgede yüksek duyarlı, duyarlı, düşük ve çok düşük duyarlı alanlar belirlenmiştir. Üretilmiş olan heyelan duyarlılık haritası doğruluk değerlendirmesi ve ROC eğrisi ile belirlenmiştir.

1.2. Çalışma Alanı

Çalışma alanı Türkiye'nin İstanbul iline bağlı, Kartal ilçesi sınırları ile çevrili olup ilçenin yüz ölçümü 38.54 km² alanı kaplamaktadır. Alanın batısında Maltepe İlçesi, kuzeyinde Sancaktepe ve Sultanbeyli İlçeleri, doğusunda Pendik İlçesi, güneyinde Marmara Denizi ile çevrilidir. 29°7' ve 29°15' doğu boylamları, 40°58' ve 40°53' kuzey enlemleri arasında konumlanmaktadır (Şekil 1.1).



Şekil 1.1. a) Türkiye haritası; b) Çalışma alanının konumu ve mevcut heyelan alanları (Google Maps 2023)

Çalışma alanının iklimi; yazları sıcak ve az yağışlı olarak, kışları ise ılıman ve yağışlı olan Akdeniz iklimi, Karadeniz ve kıtasal karakterler içinde bir geçiş tipi olan Marmara iklimi etkilidir. Meteorolojik istasyonlardan elde edilen 2022 yılına ait veriler istatistiksel çalışmalar sonucuna göre; alanın yıllık ortalama sıcaklığı 14,5 °C'dir. Yılın sıcaklık ortalaması en yüksek ayı Ağustos iken sıcaklık ortalaması en düşük ay ise Ocak ayıdır. Yıllık yağış miktarı 62 mm'dir. Yılın en fazla yağış alan ayı 108 mm yağışla Aralık ayı ve yağış miktarıyla en kurak ayı 28 mm ile Temmuz-Ağustos aylarında görülmektedir (Çizelge 1.1).

Çizelge 1.1. Kartal ve Aydos dağı istasyonlarından aylık ve yıl genelinde sıcaklık, yağış, nem, rüzgar ortalama değerleri (MGM 2022)

	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Yıllık
Ortalama Sıcaklık (°C)	5.6	6.1	8.2	11.7	16.7	21.3	23.9	24.2	20.7	16.0	11.9	7.6	14.5
Yağış Miktarı (mm)	90	76	76	51	38	39	28	28	55	80	79	108	62
Ortalama Nem (%)	79	77	75	74	72	70	68	69	70	76	77	78	73.75
Ortalama Rüzgar Hızı (km/sa)	12.6	13.7	14.0	13.9	12.3	11.5	11.8	10.4	11.6	11.8	12.2	12.3	12.34

Çalışma alanı olan Kartal İlçesinin bitki örtüsü ormandır ve kapladığı orman alanı yaklaşık 9,18 km²'dir. Bitki örtüsü orman olmayan alanlarda ise maki ve otsu bitkiler bulunmaktadır. Çalışma alanı olan Kartal İlçesinin bitki örtüsü ormandır ve kapladığı orman alanı yaklaşık 9,18 km²'dir.

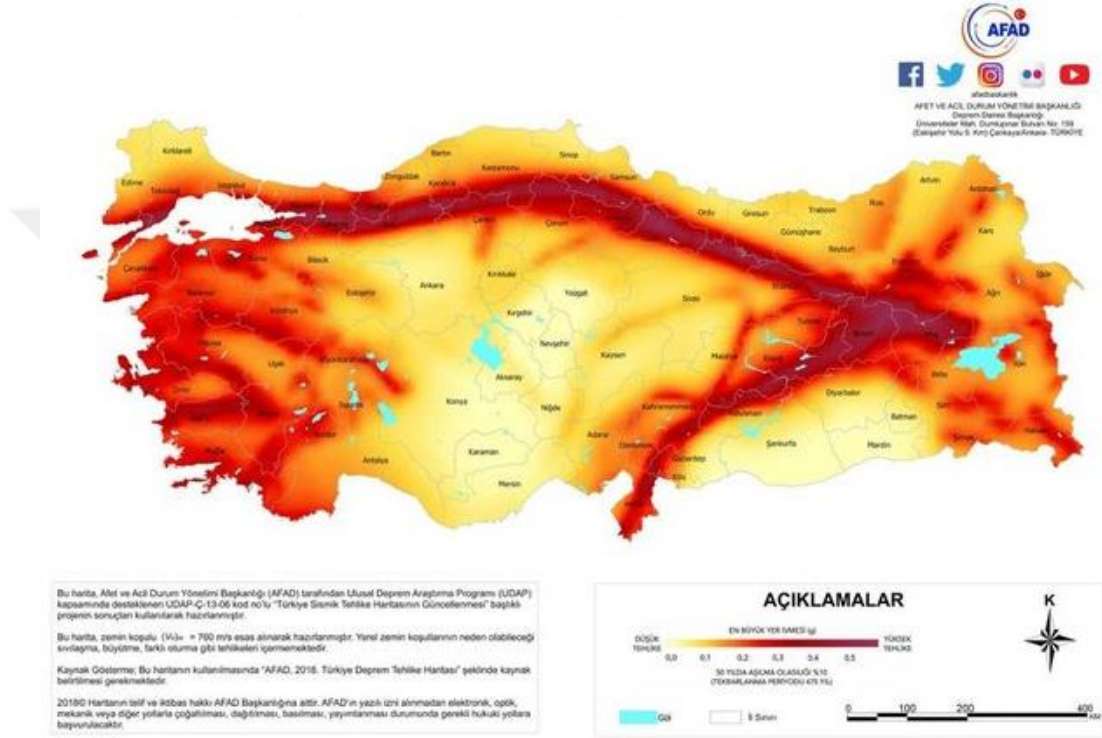
Bitki örtüsü orman olmayan alanlarda ise maki ve otsu bitkiler bulunmaktadır. Günümüzde 2023 yılına gelene kadar mevcutta bulunan yeşil alanlar azalmış ve yerini yerine yerleşme alanları, iş yerleri ve sanayi alanları kurulmuştur.

İstanbul İli, Türkiye'nin en fazla nüfusa sahip ilidir. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK)'nden elde edilen 2022 yılına ait nüfus verilerine göre Kartal İlçesi 483.418 kişidir. Çizelge 1.2'de Kartal İlçesine ait 2016-2022 yılları arasında artan nüfus ve nüfus artış hızı bilgileri yer almaktadır.

Çizelge 1.2. Nüfus bilgisi (TÜİK 2022)

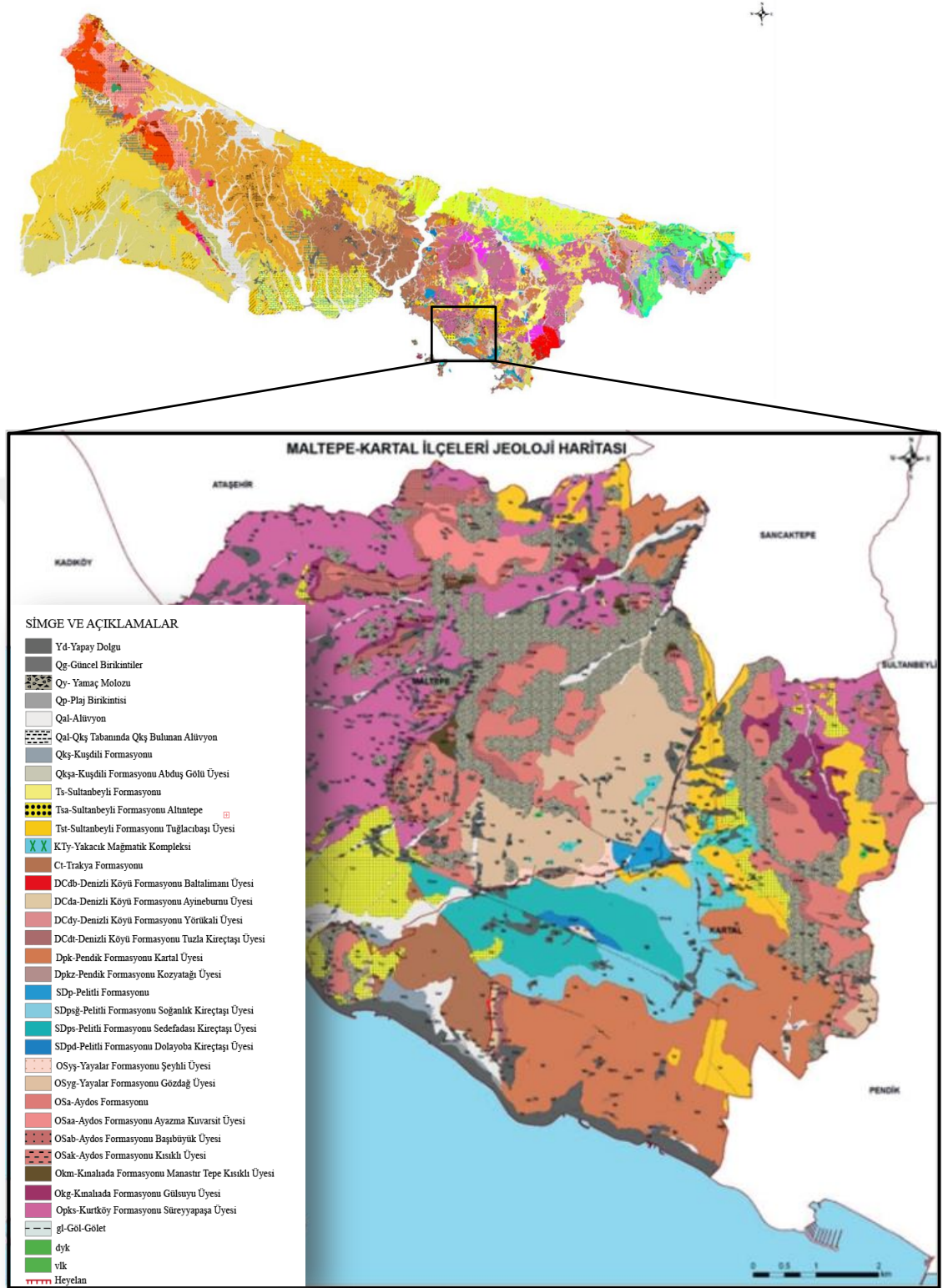
YILLAR	NÜFUS	NÜFUS ARTIŞ HIZI (%)
2016	459.298	0.38
2017	463.433	0.90
2018	461.155	-0.49
2019	470.676	2.06
2020	474.514	0.82
2021	480.738	1.31
2022	483.418	0.56

Kartal ilçesi, Türkiye'nin aktif fay hatları bölgesinde yer almaktadır. İstanbul'un genelinde olduğu gibi, Kartal ilçesi de birden fazla fay hattı tarafından etkilenmektedir. İstanbul'da en önemli aktif fay hatlarının ilk sırasında gelen Kuzey Anadolu Fay Hattı, ilçenin yakınından geçmektedir. Bu fay hattı, Türkiye'nin batısından doğusuna kadar uzanan bir çizgi şeklinde yer alır ve büyük depremlere neden olabilecek önemli bir potansiyele sahiptir. Bunun yanı sıra, ilçe yakınlarındaki diğer fay hatları arasında Yalova Fay Hattı, Ganos Fay Hattı ve Manyas Fay Hattı da bulunur. Bu fay hatları da deprem potansiyeline sahip olup, İstanbul'un genelinde olduğu gibi Kartal ilçesi için de bir risk oluşturabilir (Şekil 1.2).



Şekil 1.2. Türkiye deprem tehlike haritası (AFAD 2022)

Kartal ilçesi, genel olarak sedimentlerin hakim olduğu bir alana sahiptir ve ilçe coğrafi olarak iki ana bölgeye ayrılır; Kuzeyde yer alan yüksek arazi ve güneyde yer alan alçak arazidir. Kuzey bölgesinde, Paleozoik yaşlı volkanik kayalar, batolitler, gabrolar ve granitler hakimdir. Bu kayalar, ilçenin kuzeybatısındaki Aydos Dağı ve kuzeydoğusundaki Soğanlı Dağı'nda görülebilir. Bu bölgede yer alan kayalar genellikle sert ve dirençli olup, heyelana karşı dayanıklıdır. Güney bölgesinde ise, Neojen yaşlı kumlu ve killi çökeller hakimdir. Bu çökeller, kumtaşı, silttaşı ve kiltaşı gibi farklı tiplerde görülebilir. Bu bölgedeki kayalar daha yumuşak ve heyelana daha duyarlıdır. Kartal ilçesi, deniz kıyısında yer aldığından, kıyı erozyonu ve kıyı dinamikleri de önemli bir jeomorfolojik özellik olarak ortaya çıkar. Kıyı boyunca, kumul sistemleri, deniz setleri ve kıyı kayaları görülebilir (Şekil 1.2).



Şekil 1.3. Bölgenin jeoloji haritası (İBB 2020)

2. KAYNAK TARAMASI

2.1. Literatür Çalışmaları

Heyelan duyarlılık haritalaması, literatür de sıklıkla yer verilen çok değişkenli istatistiksel yöntemlerden biri olan makine öğrenme algoritmaları ile de kullanılmıştır. Bu bölümde aynı konuda yapılmış olan çalışmalar incelenmiştir.

Heyelan duyarlılık analizi ve haritalamasıyla ilgili yapılan çalışmalar, öncelikle geçmiş yıllara dayanmaktadır. Ancak, bu alandaki gelişmeler özellikle 2000'li yıllarda ivme kazanmıştır. Heyelan duyarlılık analizi ve/veya haritalamasıyla ilgili önemli çalışmalardan bazıları şunlardır: Atkinson ve Massari'nin (1998) çalışması, Aleotti ve Chowdhury'nin (1999) çalışması ve Fernández ve diğerleri (1999) tarafından gerçekleştirilen çalışmalardır. Bu çalışmalar, literatürde kendilerine yer bulmuş ve heyelan duyarlılık analizi alanındaki önemli katkılara sahip olmuşlardır.

2000'li yıllarda Türkiye'de yapılan çalışmalar incelendiğinde (Ercanoglu ve Gokceoglu 2002; Çevik ve Topal 2003; Ercanoglu ve Gokceoglu 2004; Süzen ve Doyuran 2004; Ercanoglu 2005; Temiz 2005; Yalcin ve Bulut 2007; Akgün ve Bulut 2007; Akgun vd. 2008; Ercanoglu vd. 2008; Yilmaz 2009; Yilmaz 2010) gibi çalışmalar, yurtdışında ise (Parise ve Jibson 2000; Wachal ve Hudak 2000; Dai et al. 2001; Dai ve Lee 2001; Van Westen et al. 2003; Remondo et al. 2003; Corominas et al. 2003; Lee 2004; Moreiras 2004; Lee et al. 2004; Wang ve Sassa 2005; Lee ve Talib 2005; Ayalew ve Yamagishi 2005; Van Westen et al. 2006; Wang et al. 2009; Ghosh et al. 2009) gibi çalışmalar yerini almıştır. Heyelan duyarlılık analizi ve/veya haritalaması konusu bu dönemde büyük gelişme göstermiştir. Araştırmacıların, çalışmada kullandıkları parametreler ve yöntemler gelecek yıllardaki çalışmalara yol gösterici nitelikte olmuştur.

2010 yılından itibaren günümüze doğru geldikçe, Türkiye'de (Akgun ve Türk 2010; Nefeslioglu vd. 2010; Ercanoglu ve Temiz 2011; Yalcin vd. 2011; Nefeslioglu vd. 2012; Yilmaz vd. 2012; Akgün vd. 2012; Kavzaoglu vd. 2012; Erener ve Düzgün 2012; Özdemir ve Altural 2013; Ercanoğlu vd. 2016; Akgün ve Erkan 2016; Çölkesen vd. 2016) gibi, yurtdışında ise (Baeza et al. 2010; Wang et al. 2012; Oh ve Pradhan 2011; Park 2011; Intarawichian ve Dasananda 2011; Rozos et al. 2011; Xu et al. 2012; Wang et al. 2012; Che et al. 2012; Lee et al. 2012; Pourghasemi et al. 2012; Mondal ve Maiti 2012; Pradhan 2013) gibi önemli çalışmalar gerçekleştirildiği görülmüştür. Gerçekleştirilen heyelan duyarlılık haritalaması çalışmalarında; farklı alanlar, farklı bölgesel ölçekler, farklı yöntem teknikleri ve parametreler çalışmalarda kullanılmıştır. Bu çalışmaya yönelik literatür de yer almakta olan farklı yöntemler başlıklar altında toplandığında, aşağıdaki gibi bir liste oluşturulabilir:

- Analitik Hiyerarşi Süreci (Analytical Hierarchy Process (AHP)); Hasekioğulları ve Ercanoğlu 2012, Basu ve Pal 2017, Bahrami et al. 2020
- Bulanık Mantık (Fuzzy Logic Method); Ercanoglu ve Gökceoglu 2004, Pradhan et al. 2009, Akgun vd. 2012

- Destek Vektör Makinesi (Support Vector Machine (SVM)); Yao vd. 2008, Yilmaz 2009, Marjanovic et al. 2011, Pradhan 2013, San 2014

- İstatistiksel yöntemler; Guzzetti et al. 1999, Baeza ve Corominas 2001, Lee ve Min 2001, Ayalew ve Yamagishi 2005, Can vd. 2005, Lee ve Pradhan 2007, Nefeslioglu vd. 2008, Süzen ve Doyuran 2004, Domínguez-Cuesta et al. 2007, Duman vd. 2006, Das et al. 2010, Das et al. 2012, Süzen ve Kaya 2012

- Karar ağacı (Decision Tree); Saito et al. 2009, Wan 2009, Nefeslioglu vd. 2010, Yeon et al. 2010

- Rastgele Orman (Random Forest); Chen et al. 2017

- Sinirsel-bulanık; Oh ve Pradhan 2011, Bui et al. 2012, Pradhan 2013

- Yapay sinir ağları (Artificial Neural Networks); Lee et al. 2004, Gomez ve Kavzoglu 2005, Yesilnacar ve Topal 2005, Nefeslioglu vd. 2008

Literatürde yapılan çalışmalar, heyelan duyarlılığı, heyelan tehlikesi ve heyelan riski konularında yoğunlaşmıştır. İncelenen çalışmalar arasında, en fazla çalışması yapılan konunun heyelan duyarlılık değerlendirmeleri üzerine odaklandığı görülmektedir. Web of Science (WoS) veri tabanında yer alan çalışmalara göre, Türkiye'de gerçekleştirilmiş ilk heyelan duyarlılık çalışması 1996 yılında olduğu ve 2002 yılından itibaren bu alanda yapılan çalışmaların sayısı artmıştır. Türkiye'deki araştırmacılar tarafından 1996-2017 yılları arasında toplamda 84 heyelan duyarlılığı çalışması yapılmış ve Avrupa Birliği üye ülkeleriyle karşılaştırıldığında, bu çalışmaların toplamda en fazla atıf aldığı belirlenmiştir (Derin ve Ercanoğlu 2018).

Verilen çalışmalara ilave olarak, çeşitli yöntemlerle yapılmış ülkede ve dünyada heyelan duyarlılık haritalamaları oluşturulmuştur. Yapılan çalışmalara özet şeklinde değinilmemiz gerekirse;

Nefeslioglu vd. (2012), Türkiye'nin Karadeniz Bölgesi'nde bulunan Kelemen Havzasının Heyelan Duyarlılık Haritalamasını oluşturmuşlardır. Sayısal Yükseklik Modeli ve Uydu görüntüsü olarak ASTER L3A kullanılarak parametreler gerçekleştirerek, yüksek değerlere sahip mekânsal performans sonuçları ortaya koymuşlardır.

Ada ve San (2017), Antalya'da (Türkiye) yer alan Alakır Havzası'nın Heyelan Duyarlılık Haritalaması çalışmasını gerçekleştirdiler. Bu çalışma Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri teknikleri kullanarak çıkarılmış 28 giriş veri seti kullandılar. Makine Öğrenme Algoritmalarından olan Destek Vektör Makineleri ve Random Forest, yeni örnekleme stratejisi olan İki Düzeyli Rastgele Örnekleme ile karşılaştırdılar. DVM ve RF algoritmalarının her biri yüksek mekânsal doğruluğa sahip sonuçlar çıkardılar ve bu sonuçlar %82 ile %87 arasında doğruluğa sahiptirler.

Elmacı vd. (2017), Ankara ili Çubuk-Kalecik ile Çankırı Şabanözü arasında bulunan 2360 km²'lik alanın heyelan duyarlılığını araştırmayı hedeflemişlerdir. Alanın Türkiye Heyelan Envanter Haritasında 122 km² alanda ve 876 adet heyelan bulunduğu

tespit edilmiştir. Sayısal yükseklik modeli, litoloji haritası, yamaç eğimi, arazi kullanımı, topoğrafik nemlilik indeksi gibi heyelan oluşumuna etki eden parametreleri ortaya çıkarmışlardır. Yöntem olarak mantıksal regresyonu tercih ederek, oluşturdukları duyarlılık haritasını farklı 5 olasılık kategorisi ile değerlendirmeye almışlardır. Çalışmanın AUC değerini 0,794 olarak bulmuşlardır.

Bahrami vd. (2020), İran'ın Gilan şehrinde heyelan duyarlılık haritalamasını amaçlamıştır. Duyarlılık haritalaması için iki farklı yöntem olan AHP ve Bulanık Mantık kullanmışlardır. Eğim, arazi kullanımı, yağış, litoloji, faya olan uzaklık, nehre olan uzaklık ve yola olan mesafe parametreler ele alınmıştır. Oluşturulan haritada; çalışma alanının %36.53'ü çok yüksek riskli ve yüksek bölgeleri tespit edilmiştir. Çalışmanın AUC değerleri AHP yöntemi için 92.4, Bulanık Mantık Yöntemi için 91.9'ı bulunmuştur.

2.2. Afet Kavramı ve Sınıflandırılması

Birleşmiş Milletler Afetlerin Azaltılması Uluslararası Stratejisi (The United Nations Office for Disaster Risk Reduction - UNDRR) online sözlüğünde afet kavramı “maruz kalma, savunmasızlık ve kapasite koşullarıyla etkileşime giren ve aşağıdakilerden bir veya daha fazlasına yol açan tehlikeli olaylar nedeniyle bir topluluğun veya bir toplumun işleyişinin herhangi bir ölçekte ciddi şekilde bozulması: insani, maddi, ekonomik ve çevresel kayıplar ve etkiler” olarak tanımlanmaktadır (UNDRR 2024).

Afet Kavramının Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Teşkilat ve Görevleri Hakkında Kanunun 2. Maddesinde ise şöyle tanımlanmıştır; toplumun tamamı veya belli kesimleri için fiziksel, ekonomik ve sosyal kayıplar doğuran, normal hayatı ve insan faaliyetlerini durduran veya kesintiye uğratan doğal, teknolojik veya insan kaynaklı olaylar (Anonim 2009).

Tanımlamalardan da anlaşılacağı üzere, oluşan olayı afet olarak nitelendirebilmek için oluşturduğu etkiler bakımından, etki ettiği toplumda can ila mal kayıplarına ve günlük hayat akışını etkileyecek büyük sorunsallara sebep olması gerekmektedir.

Afetlerin ortak özelliklerine bakıldığında; insanların, hayvanların ve bitkilerin doğal ekosistemini etkilerler, travmatik etkiler bırakır, sarf edilen müdahale gerekenden her zaman daha az miktarda, sosyal destekler büyük bir rol oynar, toplumun dayanma kapasitesinin üzerindedir, ihtiyaç duyulan malzeme/alet vb. kaynaklardan çok daha fazladır (Önsüz ve Atalay 2015).

Çeşitli türleri bulunan afetler, jeolojik, jeomorfolojik, iklimik, meteorolojik, hidrografik, teknolojik, biyolojik ve sosyal kökenlere göre sınıflandırılmaktadır (Erkal ve Değerliyurt 2009).

Afetler kendi içerisinde; doğal afetler ve doğal olmayan afetler olmak üzere 2 temel kategoride (Çizelge 2.1-2.2) toplanmaktadır. Bu temel kategoriler altında farklı özelliklere göre alt başlıkta sınıflandırılmaktadır.

Doğal afetler; oluşumu engellenemeyecek çığ, deprem, fırtına, heyelan, hortum, kuraklık, sel gibi her türlü jeolojik, hidrolojik ve meteorolojik faaliyetli doğa olaylarına denmektedir (Ergünay vd. 2008).

Doğal afetler, doğa olaylarından kaynaklı olup meydana gelmeleri doğanın hareketleri çerçevesindedir. Gözlenme ihtimali yüksekten düşüğe doğru şu şekilde sıralanabilir; depremler, heyelanlar, su baskınları, çamur akıntıları, çığlar, dolu, don, çölleşme, deniz göl su seviye değişimleri, fırtına kabarması, hortum, kaya düşmesi, kuraklık, zemin çökmesi, orman yangınları, seller, sis, sıcak ve soğuk hava dalgaları, şiddetli rüzgâr, tarımsal zararlar, toz, kum, yağmur ve kar fırtınaları, tsunami, yanardağ patlaması, buzlanma, lav akıntısı, yıldırım, salgın hastalıklar, bulaşıcı hastalıklar, çekirge istilaları, şeklinde ilerlemektedir (Kadioğlu 2011).

Birleşmiş Milletler Genel Kurulu'nun Aralık 1999 toplantısında, Birleşmiş Milletler Afet Zararlarının Azaltılması Uluslararası Stratejisi (United Nations International Strategy for Disaster Reduction - UNISDR) kabul edilmiş ve bu strateji aracılığıyla afet olaylarına karşı farkındalık oluşturmayı amaçlayan bir kitle oluşturulmuştur. Bu kitle, afet tehditlerini en aza indirme ve sürdürülebilir kalkınmanın önemli bir bileşeni olma hedefini taşımıştır. UNISDR'nin çabaları, doğal afetler nedeniyle ortaya çıkan can ve mal kayıplarını en aza indirme amacını taşımaktadır (UNISDR, 2017). Küresel ölçekte, doğal afetler altı ana başlık altında sınıflandırılarak kayıt altına alınmaktadır. Bu sınıflandırmadan kaynaklanan başlıklar şu şekildedir (Guha-Sapir et al. 2016):

- i. Jeofiziksel kaynaklı doğal afetler: Deprem ve volkanik aktivite
- ii. Hidrolojik kaynaklı doğal afetler: Sel ve toprak kaymaları
- iii. Meteorolojik kaynaklı doğal afetler: Aşırı sıcak ve kasırga
- iv. İklimsel kaynaklı doğal afetler: Kuraklık ve buzul erimeleri
- v. Biyolojik kaynaklı doğal afetler: Salgın hastalık ve böcek istilası
- vi. Dünya dışı etkenlerin neden olduğu doğal afetler: Göktaşı faaliyetleri ve uzaydan gelebilecek etkiler

Doğal afetleri jeofiziksel oluşumlu afetler (deprem, volkanik aktivite), jeolojik oluşumlu afetler (heyelan), hidrolojik oluşumlu afetler (sel), meteorolojik oluşumlu afetler (fırtına), oşionografik oluşumlu afetler (tsunami), biyolojik oluşumlu afetler (salgın hastalıklar) şeklinde sınıflandırılmaktadır (Kadioğlu 2011).

Çizelge 2.1. Doğal afetler (Guha-Sapir et al. 2016)

DOĞAL AFETLER							
Jeofiziksel Afetler		Hidrolojik Afetler		İklimsel Afetler	Dünya Dışı Kaynaklı	Meteorolojik Afetler	Biyolojik Afetler
Heyelan	Deprem	Heyelan	Taşkın	Kuraklık	Göktaşı Faaliyetleri	Kasırga	Salgın Hastalık
Kaya Düşmesi	Çığ	Kaya Düşmesi	Çığ	Buzul Erimeleri	Uzay Etkileri	Aşırı Sıcaklık	Böcek İstilasası
Çökme	Volkanik Patlama	Çökme	Sel				

UNISDR tarafından doğal olmayan afetler; insan kökenli afetler ve teknolojik afetler olarak iki başlıkta sınıflandırılarak "bütünüyle veya çoğunluğuyla insan davranışları ve tercihleriyle oluşturulan felaketler" şeklinde tanımlanmaktadır. Teknolojik kaynaklı tehlikeler, insan kaynaklı yapılmış tehlikenin bir sınıfı olduğu varsayılır. Nükleer, kimyasal ve radyolojik tehlikelerin yanı sıra ulaşım tehlikelerinin, teknolojik durumların veya endüstri ve alt yapı sorunlarının ya da belirli insan faaliyetlerinin neden olduğu tehlikelerdendir. Örnek olarak endüstriyel kirlilik, kimyasal sızıntılar, ulaşım kazaları, atık maddeler ve fabrika patlamaları bunlardan bir kaçıdır. Doğal afetler, etkiledikleri alan açısından teknoloji kaynaklı afetlere doğrudan neden olabilmektedirler, böylelikle doğal afetler sonucuyla oluşan teknolojik afetlere "Natech" adı verilmektedir (UNISDR 2017).

Afetlerin Epidemiyolojisi Araştırma Merkezi (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED)) sınıflandırılmasına göre, doğal olmayan afetler iki sınıfa ayrılmaktadır. Bunlar insan ve teknolojik kaynaklı afetlerdir. Bu iki yardımcı sınıf, kendi içinde iki alt sınıftan oluşur (Sawada et al. 2011).

Teknolojik Kaynaklı Afetler:

- i. Endüstriyel kaynaklanan afetler: Kimyasal sızıntılar ve radyoaktif madde patlamaları
- ii. Ulaşımdan oluşumlu afetler: Havayolu ve demiryolu kazaları

İnsan Kaynaklı Afetler:

- i. Ekonomik kaynaklı afetler: Yüksek enflasyon ve mali krizler
- ii. Şiddet oluşumlu afetler: Savaşlar ve terör eylemleri

Doğal olmayan afetler, insan faaliyetleri ve politik olaylar tarafından tetiklenen savaşlar, iç savaşlar, terör faaliyetleri, geniş çaplı nüfus hareketleri ve bu olayların sonuçlarıyla ilgili tüm durumları kapsar. Teknolojik kökenli afetler ise insanların teknolojiyi kötüye kullanmasının neden olduğu olumsuz etkileri içerir (Ergünay vd. 2008)

Teknoloji oluşumlu afetler doğal afetleri oluşturmaktadır. Doğal afet sınıfında yer alan ormanlık alanlardaki yangınlar, salgın hastalıklar ve böcek istilaları çevresel felaketlere sebep olan teknoloji kaynaklı afetlerin meydana gelmesine örnek olarak verilebilir. Dolayısıyla, insan kaynaklı ve/veya teknoloji kaynaklı afet durumlarında birbirlerini etkileme eğilimindedirler.

Toplumda teknoloji kaynaklı meydana gelen afetlere örnek olarak; asit yağmurları, hidroelektrik barajların yıkılması, gaz ve kimyasal sızıntılar, endüstri kaynaklı kazalar, hava kirliliği, hayvanlarda ve bitkilerde meydana gelen salgın hastalıklar, çevre kirliliği, savaşlar, terörizm aktiviteleri, iş kazaları, ekonomik kriz, kıtlık, küresel ısınma, orman alanlarının yok olması, kimyasal ve biyolojik kazalar, radyasyon ve nükleer serpintiler gibi örnekler verilebilir. Ayrıca, kara, deniz, hava ve demiryolu kazaları ile tehlikeli madde taşımacılığı yapan ulaşım aracı kazaları da bu afetler arasında yer almaktadır (Kadıoğlu 2011).

Çizelge 2.2. Doğal olmayan afetler (Guha-Sapir et al. 2016)

DOĞAL OLMAYAN AFETLER							
İnsan Kaynaklı Afetler				Teknolojik Afetler			
Ekonomik Krizler		Şiddet İçeren Krizler		Endüstriyel Kazalar		Ulaşım Kazaları	
Yüksek Enflasyon	Finansal Kriz	Savaş	Terör Eylemi	Yangın	Kimyasal Sızıntı	Karayolu Kazaları	Havayolu Kazaları
Mali Kriz		Ayaklanma		Radyoaktif Madde Zararları	Endüstriyel Altyapı Çökmeleri	Denizyolu Kazaları	Demiryolu Kazaları

Doğal afetlerin ortaya çıkışı ve sayısının giderek artmasında insan ve bu faktörün ne miktarda olduğu araştırılırken, giderek son yıllarda ekolojik dengenin büyük oranda bozulmasıyla doğal afetlerin meydana gelmesinde bir artış olduğu dünyaca görülmektedir (Kanlı 2018).

Afete yönelik çalışmalarda birbirleriyle ilişkili olarak kullanılmakta olan duyarlılık, tehlike ve risk kavramları aslında farklı tanım ve kullanım amaçlarına sahiptir.

Afet yönetimi çalışmaları bütünüyle bir zincir halinde olup duyarlılık haritalarının oluşturulması bu zincirin ilk halkası niteliğindedir ve çalışmaya yön vermesi konusunda büyük öneme sahiptir. Afet yönetimi; afete hazırlık, önlenmesi, zararları en az seviyede tutmanın yanında afet gerçekleştikten sonra ki aşamada da afete müdahale etme ve iyileştirme çalışmaları gibi çalışmaların bütününe kapsamaktadır. Tüm kurum kuruluşları ve kaynaklar, tek bir amaç doğrultusunda koordine edilir (Kadıoğlu 2011).

Zarar azaltma, hazırlık, müdahale ve iyileştirme şeklinde dört ana başlıktan oluşmuş olan afet yönetimi süreci; afetlerin gerçekleşmesinden önce zarar azaltma ve hazırlık adımları yer alırken, afet anında ve sonrasında müdahale ve iyileştirme adımları yer almaktadır. Bulunan bütün adımlar birbirleriyle bir bütün halinde olup yap-boz etkisindedir (Anonim, 2004). Afet öncesinde gerçekleştirilen zarar azaltma ve hazırlık adımları, risk yönetimi perspektifi altında yürütülürken; afet sonrasında gerçekleştirilen müdahale ve iyileştirme adımları ise kriz yönetimi kapsamında yürütülmektedir (Şahin 2009).

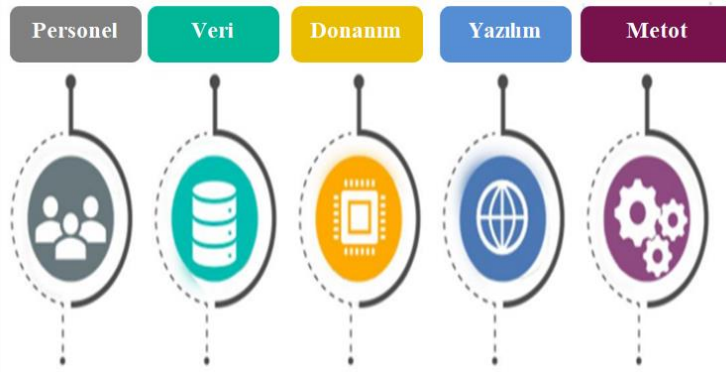
Afet yönetimi sürecinde afet öncesi önlemlerin ilk aşaması ve öneme sahip olanı; afete karşı duyarlılık, tehlike ve risklerin tespit edilmesidir. Bu bilgiler ışığında arazi kullanım politikaları ve geniş kapsamlı çalışmalar geliştirilebilmektedir. Bu sebeple duyarlılık, tehlike ve risklerin doğru şekilde belirlenmesi, bununla birlikte yürütülecek çalışmaların da uygun olarak gerçekleştirilmesine imkân tanıyacaktır (Öztürk 2009; Taştan ve Aydınoglu 2015).

Duyarlılık, dış olayların neden olduğu durumlara karşı yatkınlık derecesini ifade eder ve tehlike olarak tanımlanır (Ergünay 2002). Tehlike, can ve mal kayıplarına neden olabilen, toplumun sosyo-ekonomik yapısına, doğal çevreye, tarihi ve kültürel kaynaklara zarar verebilecek potansiyele sahip doğal, teknolojik veya insan kaynaklı olay ya da olay zinciri olarak tanımlanır. Risk ise belirli bir zaman ve mekânda gerçekleşmesi muhtemel bir tehlikenin sonucunda, tehdit altındaki canlılar, altyapı

tesisleri, tarım ürünleri, doğal ve kültürel kaynaklar gibi unsurların maruz kalabileceği potansiyel kayıpları ifade eder (Kadioğlu 2011).

Tanımlamalara göre oluşturulacak olan risk haritaları, ihtimal tehlikenin topluma, canlılara, şehre, ülkeye, doğal ve kültürel dokuya gelebilecek muhtemel tehlikenin anlaşılmasına yardımcı olmaktadır. Matematiksel açıdan tehlikenin olasılığı x zarar görülebilirlik olarak ifade edilirken, riskin belirlenmesinde öncelikle afete sebep olabilecek tehlikelerin belirlenmesi, yani tehlike analizi yapılması gerekmektedir (Kadioğlu 2011). Heyelan duyarlılık haritaları, afet olma olasılığı olan bölgenin yüksek, orta ve düşük şeklinde heyelan hassasiyetini ifade ederek tehlike haritalarının da alt temelini oluşturmaktadır. Heyelan duyarlılığının belirlenmesi için meydana gelmiş olan heyelanların başlıca özelliklerinin tespit edilmesi ve bu olayları tetikleyen faktörlerin analiz edilmesine bağlıdır.

Heyelan duyarlılık, tehlike ve risk analizleri son yıllarda uzaktan algılama ve CBS yöntemleriyle hızlı, ekonomik ve yüksek doğruluk oranında sonuçlar ortaya konmaktadır. Uzaktan algılama sayesinde çeşitli çözünürlüğe sahip geçmiş ve güncel verilere erişilmekte olup CBS sayesinde elde edilen verilerin toplanması, depolanması, işlenmesi, sorgulanması, analiz edilmesi ve çıktı alınmasını mümkün kılar. CBS tabanlı çalışmalarda temel işlemler aşağıda belirtilmiştir (Van Westen 1993).



Şekil 2.1. Coğrafi bilgi sistemi bileşenleri

Buna göre;

- Yürütülecek çalışmalar için ölçeğin ve yöntemlerin planlanması,
- Verilerin toplanma ve depolanma şeklinin belirlenmesi, veri tabanı tasarımı ve oluşturulması
- Verilerin elde edilmesi,
- Uydu görüntülerin ve/veya hava fotoğrafların incelenmesi ve analizle oluşturulan yeni girdi haritalarının üretilmesi,
- Haritaların sayısallaştırılma yapılması ve elde edilen öznitelik verilerinin girişi,
- Verilerin doğruluğunun sorgulanması,
- Verilerin analize uygun şekilde dönüştürülmesi,

- Duyarlılık, tehlike ve risk haritalarının oluşturulması için gerekli verilerin analizi,
- Duyarlılık, tehlike ve risk analizi,
- Duyarlılık, tehlike ve risk haritasının doğruluk değerlendirilmesi

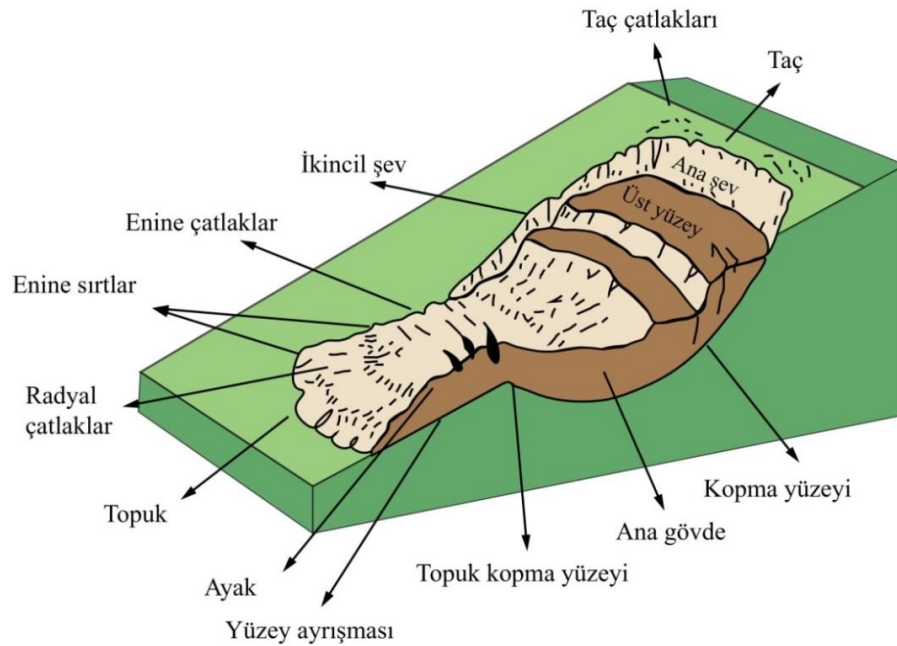
2.3. Heyelan Tanımı ve Türleri

AFAD'ın afet terimleri sözlüğüne göre, heyelan terimi şu şekilde tanımlanmaktadır; toprak ve kaya gibi parçaların, yer çekiminin etkisiyle ya da meydana gelen depremler ve sürekli yağmurlar gibi dış faktörlerin etkisi ile anlaşılabilir oranda, aşağı yönde hareket etmesi ya da kayması sonucu şeklinde tanımlanırken aynı zamanda toprak kayması olarak da ifade edilmektedir (AFAD 2022).

Yamaç stabilitesinin bozulması sonucunda meydana gelen kütle hareketleri, yerçekiminin etkisiyle tabakaların, kayaların, taşların, toprağın ve diğer arazi öğelerinin bir kısmının yer ve şekil değiştirmesi olarak tanımlanmaktadır (Öztürk 2002).

Heyelan, doğal afet gruplandırmasında sel ve çığ gibi doğal afetlerle birlikte hidrolojik oluşumlu afetler arasında yer alırken; eğimli, sürekli ve fazla miktarda yağış alan yerlerde meydana gelmekte olan doğal afet çeşitlerinden biridir. Hidrolojik oluşumlu afetler fırtına ve yağışlarla doğal afetleri harekete geçiren etkenler arasında olup iki etken arazi şartlarının uygun olmasıyla birlikte afetler meydana gelerek insan kaybına ve maddi zararlara yol açmaktadır. Kuraklık, kıtlık ve yoksulluk su miktarının düşük olmasıyla gerçekleşirken heyelan, sel, çığ ve taşkın gibi afetler su miktarının fazla olmasıyla gerçekleşmektedir (Kadioğlu ve Özdamar 2008).

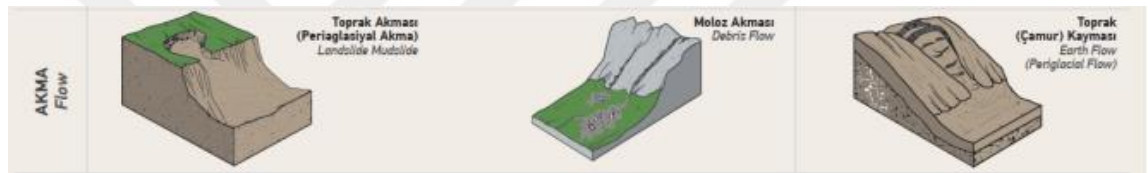
Mevcut bir heyelanın Şekil 2.2'de heyelan ve bölümlerinin özelliklerini tanımlayan ve yaygın olarak kullanılan temsili gösterimini göstermektedir.



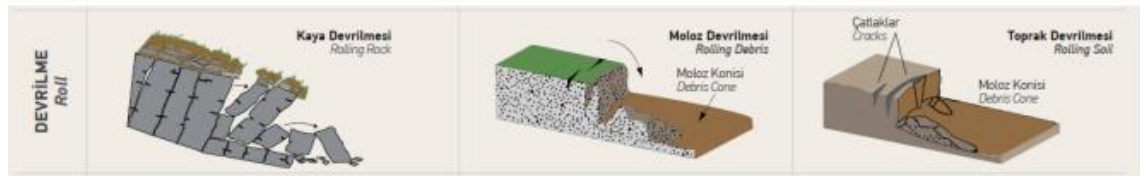
Şekil 2.2. Heyelan ve bölümlerinin temsili gösterimi (Varnes 1978)

Heyelanın meydana gelebilmesi için belli koşulları barındırması gerekmektedir. Bu koşullardan ilki arazinin eğime sahip olmasıdır. Bunun nedeni yağıştan ve/veya zeminden kaynaklı etkiler arazinin eğime sahip olmaması durumunda kaya kütleleri, moloz ya da toprağı hareket ettiremez (Öztürk 2002). Arazinin sahip olduğu eğim açısı, bitki örtüsü, bitki bulundurması halinde bitkinin genç ya da yaşlı bitkilerden oluşması, bitkinin türü, arazinin iklimi, yağış sıklığı gibi çeşitli faktörler heyelanı etkileyen koşullardandır (Eker ve Aydın 2014). Heyelan, ülkemizde de genellikle yüksek eğim açısına sahip alanlarda ve fazla miktarda yağış alan Kuzey Anadolu bölümünü temsil eden Karadeniz Bölgesinin dağlık alanlarında meydana gelmektedir (Öztürk 2002). Heyelanlar, materyal ve hareket türüne bağlı olarak kendi içerisinde gruplandırılmaktadır. Derinlikleri bakımından değerlendirildiğinde derin ve sığ heyelanlar olmak üzere iki ana başlıkta değerlendirilmektedir (Eker ve Aydın 2014).

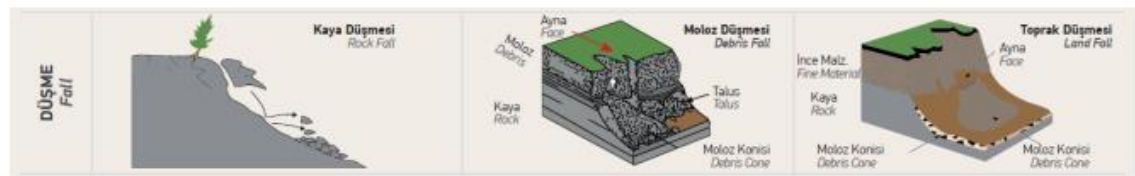
Akma heyelan türlerinin temsili gösterimleri Şekil 2.3’de, devrilme heyelan türlerinin temsili gösterimleri Şekil 2.4’de, düşme heyelan türlerinin temsili gösterimleri Şekil 2.5’de, yanal yayılma heyelan türlerinin temsili gösterimleri Şekil 2.6’da, kayma heyelan türlerinin temsili gösterimleri Şekil 2.7’de ve karmaşık oluşumlu heyelan türlerinin temsili gösterimleri Şekil 2.8’de verilmiştir.



Şekil 2.3. Akma heyelan türlerinin temsili gösterimi (AFAD 2022)



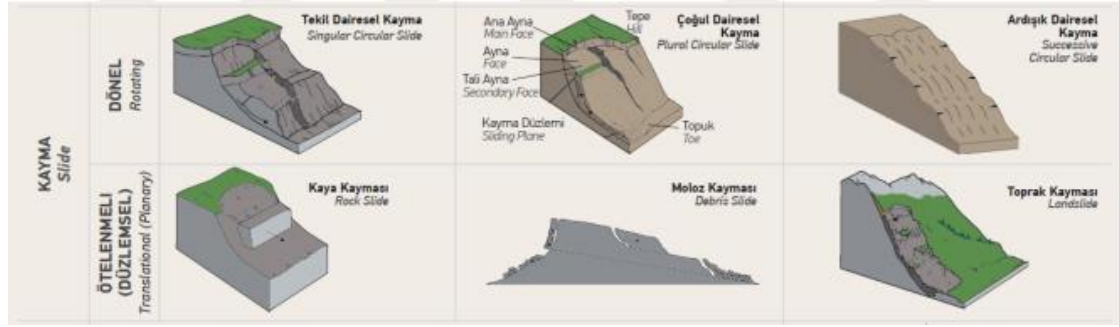
Şekil 2.4. Devrilme heyelan türlerinin temsili gösterimi (AFAD 2022)



Şekil 2.5. Düşme heyelan türlerinin temsili gösterimi (AFAD 2022)



Şekil 2.6. Yanal yayılma heyelan türlerinin temsili gösterimi (AFAD 2022)



Şekil 2.7. Kayma heyelan türlerinin temsili gösterimi (AFAD 2022)



Şekil 2.8. Karmaşık heyelan türlerinin temsili gösterimi (AFAD 2022)

Heyelan türleri; kaya, moloz, toprak gibi barındırdığı malzeme türleri ve hareket türleri ile yer çekiminin de etkisiyle yer değişimini tanımlayan Varnes (1978), bu parametrelere göre sınıflandırılan sistemin özeti niteliğinde Hungr ve arkadaşları (2013) tarafından oluşturularak Çizelge 2.3’de gösterilmiştir (Varnes 1978; Hungr et al 2013).

Çizelge 2.3. Varnes’in 1978 heyelan sınıflandırma sisteminin bir özeti (Hungr et al. 2013)

Movement Type	Rock	Debris	Earth
Fall	1.Rock fall	2.Debris fall	3.Earth fall
Topple	4.Rock topple	5.Debris topple	6.Earth topple
Rotational sliding	7.Rock slump	8.Debris slump	9.Earth slump
Translational sliding	10.Block slide	11.Debris slide	12.Earth slide
Lateral spreading	13.Rock spread	-	14.Earth spread
Flow	15.Rock creep	16.Talus flow	21.Dry sand flow
		17.Debris flow	22.Wet sand flow
		18.Debris avalanche	23.Quick clay flow
		19.Solifluction	24.Earth Flow
		20.Soil creep	25.Rapid earth flow
			26.Loess flow
Complex	27.Rock slide-debris valanche	28.Cambering, valley bulging	29.Earth slump-earth flow

Düşme hareket türü; dik yamaçlardan ve/veya uçurum kenarlarından ayrılmakta olan kaya ve kaya parçaları gibi malzemelerin ayrılma, kırıklar, eklemler gibi süreksizlikler boyunca serbest düşüş, sıçrama ve yuvarlanma kütsel hareketlerinden oluşmaktadırlar (Şekil 2.5). Düşme tipi heyelanlar, büyük ölçüde yer çekimi, mekanik hava koşulları ve geçiş suyunun varlığından etkilenir.

Devrilme hareket türü; yer alan birimlerin, aşağıya doğru birçok dönme noktasında, yerçekimi ve birleşik birimler tarafından uygulanan kuvvetler veya çatlaklardaki akışkanlar altında öne doğru dönmesiyle meydana gelmektedir (Şekil 2.4).

Kayma hareket türü; heyelan kavramının içerisinde birçok kütsel hareket bulunmaktadır. Kayma başlığının altında rotasyonel ve translasyonel kaymalar olmak üzere iki ana türü içerir (Şekil 2.7). Kayma hareket türü çoğunlukla dağlık alanlarda rastlansa da düşük yüksekliğe alanlarda da görülebilmektedir. Düşük yüksekliğe sahip alanlarda kazı ve dolgu problemleri, yanal yayılım gösteren heyelanlar, maden atık yığınlarının çökmesi, nehir blöf sorunları ve taş ocakları gibi eğim hatalarından kaynaklanarak toprak kayması oluşmaktadır.

i. Rotasyonel kayma; kopan yüzeyin konkavsal şekilde yukarıya doğru kıvrılması ve hareketin zemine paralel olacak şekilde, kayma boyunca çapraz bir eksen etrafında kabaca dönmesiyle gerçekleşerek tanımlanmaktadır.

ii. Translasyonel kayma; kütlenin, geriye doğru eğim veya az rotasyonla düzlemsel bir yüzey boyunca hareket ettiği kayma türü şeklinde tanımlanmaktadır.

Yanal yayılma hareket türü; genellikle çok az eğimlerde ve/veya düz arazilerde görülerek ayırt edici özelliktedirler. Baskın şeklinde hareketi, gerilme kırılmalarında veya makaslamaya eşlik ederek yanal bir uzantıdır (Şekil 2.6).

Akma hareket türü, 3 temel akma türü içermektedir (Şekil 2.3). Akma, eğimi bulunan kayanın veya toprağın sabit, yavaş ve aşağı doğru hareketi şeklinde tanımlanmaktadır.

i. Kaya akması: kırık veya eğimli yamaçlarda yer alan büyük kaya kütesinin yer çekimi etkisiyle aşağı doğru hareket etmesi olayıdır. Jeolojik yapıdaki zayıf noktalardan kaynaklanır ve yağışlar gibi faktörlerle tetiklenebilir.

ii. Moloz akması: kaya, toprak, organik madde, hava ve su gibi bileşenlerin hızla karışarak aşağı yönlü hareket ettiği bir kütle hareketi türü olarak açıklanmaktadır.

iii. Toprak akması: Hareket materyali sıvılaşarak, eğim dışılarına doğru akmaktadır. Böylelikle tepe bölümünde bir çöküntü oluşturur.

Karmaşık hareket türü; iki veya daha fazla hareket türünün kombinasyonu ile oluşan kompleks heyelan olarak tanımlanmaktadır (Şekil 2.8).

2.4. Heyelanların Nedenleri

Heyelan afetinin oluşumuna birçok faktör neden etkili olmaktadır. Bu etkenleri doğal etkenler ve beşeri etkenler olmak üzere iki ana başlık altında toplanabilir.

Eğim yüksekliği, yağış fazlalığı, suya doygunluk, litolojide kilin varlığı, bitki varlığının az olması, çökmeler, depremler ve erozyon, donma ve çözülme olayları gibi vb. faktörler heyelanın oluşumunda etkili olan doğal etkenler arasında bulunmaktadır. Bu etkenlerin etkileme oranı diğerlerine göre daha fazla olabilmektedir. Su doygunluğun fazla, eğimin fazla ve kil varlığının çoğunluk olduğu alanlarda, heyelan

oluşma ihtimali yüksektir. Eğimin az olduğu alanlarda ise heyelan oluşma ihtimali beklenemez.

Yamacın eğimindeki değişiklikler ve yamaç materyalinin dayanıklılığının deforme olması, heyelan oluşum parametrelerinden önemli bir faktördür. Yamaçtaki eğimin artması, toprak ve kaya bloklarının yükünün artmasına sebep olmaktadır. Sonucunda yamaç dayanıklılığının bozulmasıyla kütle hareketi meydana gelmektedir (Öztürk 2002).

Genellikle yağışlı mevsimlerde heyelanların gerçekleşmesi oranı daha sık olmaktadır. Yağışların şiddetli olması ve karların erimesiyle ana kayaya veya zemindeki toprak katmanının içine daha da suyun sızmasına neden olarak katmanın kütlelerinin artmasıyla sürtünmenin azalması heyelanın meydana gelmesini kolaylaştırmaktadır. Suya doygun kayaların varlığı heyelan oluşumunu hızlandırırken killerin bulunduğu bölgeler, heyelan oluşumuna en eğilimli arazilerdir. Böylelikle Kil içeren kayalar, yağış suyunu hapsederek kaygan bir zemin özelliği kazanır.

Kilin oranı ve çeşidi, heyelan duyarlılığının artması ya da azalmasında ve heyelanların yayılış alanlarının şekillenmesinde önemli faktörlerden olduğu gibi killi formasyonların, fliş, marn ve tuf gibi formasyonların bulunduğu bölgelerde sıklıkla meydana gelme olasılığı fazlayken, kalker ve bazalt türü kayaların bulunduğu bölgelerde ise heyelanların görülme ihtimali azdır (Öztürk 2002).

Heyelan olayına etki eden doğal etkenler jeolojik ve morfolojik olarak sınıflandırıldığında; zayıf veya duyarlı malzemeler, makaslanmış, eklemli veya çatlak malzemeler, ters yönlü süreksizlik, tektonik veya volkanik yükselme, yeraltı erozyonu (çözümleme, borulama), birikim (depolama) yükleme eğimi veya tepesi, bitki örtüsü azalması/uzaklaşması (yangın, kuraklık), donma, çözülme olayları morfolojik nedenler arasında söylenebilmektedir.

Beşeri etkenler; yamacın altından tünel, baraj, yol, kanal vb. nedenler ile yapıma bağlı olarak eğimin değişmemesine neden olması ve doğal etkenlerinde elverişli olmasıyla heyelan oluşumu kolay hale gelmektedir. Çeşitli kazılar, maden ve taş ocaklarında gerçekleşen yapay patlamalar sebebiyle oluşmakta olan sarsıntılar, tabakalardaki bozulmalar, yamaçlarda gerçekleştirilen yapılan kazı işlemleri ve vegetasyonun zarar görmesi veya tamamen yok edilmesi gibi bunlara bağlı olarak heyelan oluşmasına neden olmaktadır (Öztürk 2002).

İnsandan kaynaklı nedenler: Yamaçların düzensizliği, yamaçlara veya yamaç tepelerine aşırı yük bindirme, ormanların kontrolsüz kullanımı, aşırı sulama, madencilik faaliyetleri, yapay titreşimler ve maden rezervuarındaki azalma gibi faktörler örnek olarak verilebilir (Öztürk 2002).

Heyelan oluşumuna neden olan parametreler, Gökçeoğlu ve Ercanoğlu (2001) çalışmasında tetikleyici ve hazırlayıcı parametreler olmak üzere iki sınıfa kategorize olmuştur. Hazırlayıcı parametreler, heyelanların gelişmesinde ve değerlendirilmesinde önemli oranda etkili olarak, heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesinde temel unsur olarak görülmektedir (Ercanoğlu 2005). Tetikleyici ve hazırlayıcı unsurlar, bir alanın heyelan duyarlılığı bakımından göreceli olarak sınıflandırılmasında temel unsurlardandır (Gökçeoğlu ve Ercanoğlu 2001). Hazırlayıcı unsur tehlike ve risk

haritalamalarının ön değerlendirme aşamalarında kullanılırken heyelan tehlike ve risk haritalamalarında tetikleyici parametreler önemli parametreler olarak kabul edilmektedir (Ercanoğlu 2005).

Çizelge 2.4. Heyelan duyarlılık parametreleri (Gökçeoğlu ve Ercanoğlu 2001)

HEYELAN DUYARLILIK PARAMETRELERİ					
HAZIRLAYICI FAKTÖRLER					TETİKLEYİCİ FAKTÖRLER
JEOLJİK		TOPOĞRAFİK		ÇEVRESEL	
Litoloji	Faya Yakınlık	Eğim	Bakı	Arazi Örtüsü	Yağış
Yeraltı Suyu	Güvenlik Katsayısı	Yükseklik	Drenaj Ağı	Yola Yakınlık	Deprem
Zemin Kalınlığı	Zemin Yapısı	Yamaç Şekli	Akarsuya Yakınlık		İnsan
Ayrışma Derinliği	Süreksizlik Yoğunluğu	Göreceli Yükseklik			
Zemin Makaslama Dayanımı	Yapısal Yamaç İlişkisi				

Çalışmalarda kullanılan parametreler, haritalamada kullanılan yöntemden, çalışmanın yapılacağı alandan gibi çeşitli farklılıklardan dolayı parametre farklılıkları görülebilmektedir. Heyelan duyarlılık analizi için hangi faktörlerin kullanılmasının olumlu sonuçlar vereceği, hangi faktörlerin eksik sonuçlara neden olacağı konusunda bir standart bulunmamaktadır. Tetik Biçer (2017) tarafından gerçekleştirilen ve çalışmada, genellikle zeminin toprak olduğu alanlarda meydana gelen heyelan olayları ve bu olayların duyarlılık analizlerinde kullanılan faktörler istatistiksel olarak incelenmiştir. Çalışma verilerinden elde edilen bilgilerle parametrelerin kullanım oranları belirlenmiştir. 1990 ila 2016 yılları arasındaki veriler birleştirilerek heyelan duyarlılık, tehlike ve risk analizi için yapılan 266 çalışmanın parametreleri ve kullanım oranları Çizelge 2.5’te sunulmuştur.

Çizelge 2.5. 1990 ila 2016 Yılları arasında yapılan çalışmalarda parametrelerin kullanım sayısı ve oranı (SCI 2022)

PARAMETRE ADI	KULLANIM SAYISI	KULLANIM ORANI (%)
Yamaç eğimi	230	86,47
Litoloji	179	67,29
Bakı	159	59,77
Yükseklik	148	55,64
Drenaj özelliği	135	50,75
Arazi kullanımı	124	46,62
Eğrisellik	108	40,60
Faya uzaklık	76	28,57
Bitki özelliği	64	24,06
Malzeme özelliği	63	23,68
Yollara uzaklık	63	23,68
Yağış	62	23,31
Topoğrafik nemlilik indeksi	54	20,30
Depremsellik	50	18,80
Yamaç özelliği	45	16,92

2.5. Dünyada ve Türkiye’de Gerçekleşen Heyelanlar

Dünya genelinde, gerçekleşen doğal afet verileri CRED tarafından yayınlanan 2021 yılı raporuna göre 9138 ölüm, 39 milyondan fazla etkilenen insan, 140 milyar dolarlık ekonomik kayıp ve 371 doğal afet olayı kaydedildiği görülmüştür.

Bu doğal afetler arasında depremler, sel, kasırgalar, fırtınalar, kuraklık, çığ, volkanik patlamalar ve diğer doğal olaylar yer almaktadır. Dünya genelinde veriler incelendiğinde, kıtalar arasında afetin etkisi en fazla Asya kıtasında görülmektedir. Asya kıtasında gerçekleşen afetler, küresel afet olaylarının toplamının %45'ini, ölümlerin %80'ini ve afetten etkilenen insanların %76'sını oluşturmaktadır. Dünya genelinde, Endonezya'da gerçekleşen afetler, toplam ölümlerin %47'sini oluşturarak ilk sıraya yerleşmişken, afetten etkilenme açısından Hindistan, %35 ile lider konumdadır.

CRED 2021 raporu, doğal afet verilerini analiz ederek ortaya çıkan toplam doğal afet sayısını Çizelge 2.6'da, afetlerden kaynaklanan ölü sayısını Çizelge 2.7'de ve afetlerden etkilenen kişi sayısını Çizelge 2.8'de sunmaktadır.

Çizelge 2.6. Dünyada gerçekleşen doğal afet sayısı (CRED 2021)

DOĞAL AFET SAYISI		
Afet Türü	2021	Ortalama (2000-2021)
Deprem	2941	606
Heyelan, Kütle Hareketi	377	551
Sel	570	355
Fırtına	952	592
Aşırı Sıcaklık	167	322
Kuraklık	67	294
Orman Yangını	4916	6600
Volkanik Faaliyetler	73	220

Çizelge 2.7. Dünyada gerçekleşen doğal afetlerden ölen kişi sayısı (CRED 2022)

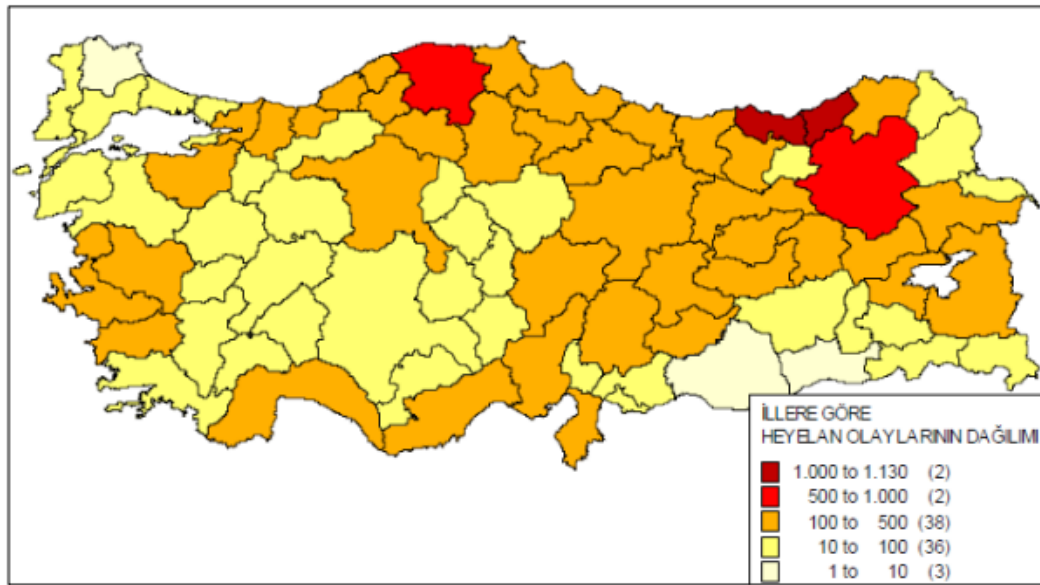
DOĞAL AFETLERDEN ÖLEN KİŞİ SAYISI		
Afet Türü	2021	Ortalama (2000-2021)
Deprem	32013	43000
Heyelan, Kütle Hareketi	2728	5700
Sel	3026	35000
Fırtına	970	11000
Aşırı Sıcaklık	2702	10000
Kuraklık	536	7388
Orman Yangını	873	80
Volkanik Faaliyetler	66	44

Çizelge 2.8. Dünyada gerçekleşen doğal afetlerden etkilenen kişi sayısı (CRED 2022)

DOĞAL AFETLERDEN ETKİLENEN KİŞİ SAYISI (MİLYON)		
Afet Türü	2021	Ortalama (2000-2021)
Deprem	111	4
Heyelan, Kütle Hareketi	60	11.7
Sel	86	107
Fırtına	29	47
Aşırı Sıcaklık	49	9
Kuraklık	47	73.9
Orman Yangını	2.8	0.1
Volkanik Faaliyetler	1	0.2

Türkiye'nin tüm bölgelerinde heyelan afeti önemli derecelerde etkisini göstermektedir. Ülkemizde jeolojik ve jeomorfolojik nitelikleri incelendiğinde heyelanların sürekli olarak birinci sırada Karadeniz Bölgesi ikinci sırada ise Doğu Anadolu Bölgesi ve İç Anadolu Bölgesi olduğu görülmektedir.

Karadeniz Bölgesinin doğu tarafında bulunan Trabzon ve Rize çevresi, orta ve batı tarafında bulana Zonguldak, Bartın, Karabük ve Kastamonu illeri heyelanların sık görüldüğü iller arasında yer almaktadır. Heyelan, ülkemizde en çok görülen afetlerden biridir. Gökçe vd. (2008) tarafından yapılan çalışma incelendiğinde 1950 ile 2008 yılları arasında şehirlerden tespit edilen heyelan sayılarıyla tematik haritası hazırlanmıştır (Şekil 2.9). Şehirlerin sayısal verileri incelendiğinde en fazla heyelan afeti 1123 ile Trabzon, en az heyelan afeti 3 ile Kırklareli'dir. En fazla heyelan afeti görülen şehirlerde; ilk sırada 1123 ile Trabzon, ikinci sırada 1049 ile Rize, üçüncü sırada 613 ile Kastamonu, dördüncü sırada 573 ile Erzurum ve son olarak beşinci sırada 471 ile Artvin yer almaktadır. En az heyelan afeti görülen şehirler sıralandığında ise ilk sırada 3 ile Kırklareli, ikinci sırada ile Mardin ve son olarak üçüncü sırada 6 ile Şanlıurfa yer almaktadır. Ülke genelinde toplam heyelan sayısı ise 13494'dür (Gökçe vd. 2008).



Şekil 2.9. 1950 ile 2008 yılları arasında Türkiye'de illere göre heyelan dağılımları (Gökçe vd. 2008)

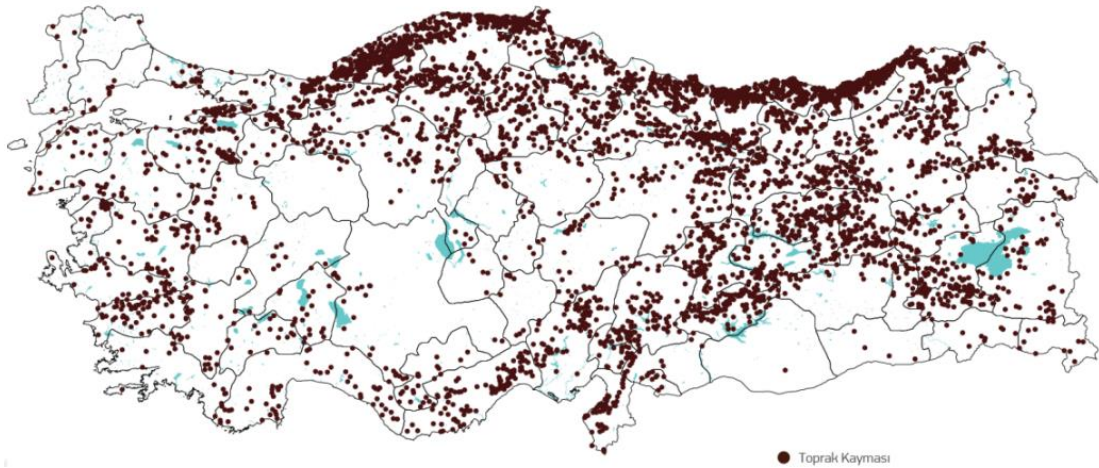
AFAD'ın 2018 tarihli raporunda, Türkiye'de afet yönetimi ve doğa kaynaklı afet istatistikleri incelenmiş olup, bu raporda 01.01.1950 ile 01.06.2018 tarihleri arasındaki heyelan verilerine de yer verilmiştir.

Şehirlere ait veriler incelendiğinde en fazla heyelan olayı 1517 ile Trabzon, en az ise 6 heyelan olayıyla Kırklareli yer almaktadır. Heyelanın en çok görüldüğü illerin ilk sırasında 1517 olayla Trabzon alırken, ikinci sırada 1319 olayla Rize, üçüncü sırada 939 olayla Erzurum ve son olarak dördüncü sırada 913 olayla Giresun yer almaktadır. Bu dört şehirdeki toplam 23041 heyelan olayı, ülke genelindeki heyelanların %21'ine denk gelmektedir. İlk dört ili takip eden diğer şehirler ise sırasıyla 768 olayla Kastamonu, 765 olayla Artvin, 693 olayla Bingöl, 688 olayla Malatya, 666 olayla Sivas ve son olarak 622 olayla Erzincan, heyelan potansiyeli yüksek olan şehirler arasında yer almaktadır. En az heyelan olayının görüldüğü iller ise sırasıyla 6 olayla Kırklareli, 19 olayla Edirne ve 22 olayla Tekirdağ'dır; bu illeri Kırşehir, Mardin ve Şırnak takip etmektedir. Belirtilen illerin heyelan potansiyeli, yılda bir veya daha az sıklıkta yaşanan olaylarla karakterizedir (AFAD 2018).

1950 ila 2018 yılları arasında AFAD tarafından hazırlan Türkiye’de illere göre heyelan dağılımlarını gösteren harita Şekil 2.10’da verilmiştir. Heyelanların şehirlerde gerçekleşme sayıları incelendiğinde yükseklik faktörünün etkili olduğu göze çarpmaktadır. Türkiye ortalamasıyla karşılaştırıldığında arazi yüksekliği fazla olan Karadeniz Bölgesi’nin Doğu kısmı ve Doğu Anadolu Bölgesi’nde heyelanın fazla, arazi yüksekliğinin az olduğu Marmara Bölgesi’nin Doğu kısmı ve Güneydoğu Anadolu Bölgesi’nin heyelan afetinin az olduğu görülmektedir (AFAD 2018).



Şekil 2.10. 1950 ila 2018 Yılları arasında Türkiye’de illere göre heyelan dağılımları (AFAD 2018)



Şekil 2.11. Türkiye’de son 50 yılda gerçekleşen heyelan afetinin mekânsal dağılımı (AFAD 2018)

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Materyal

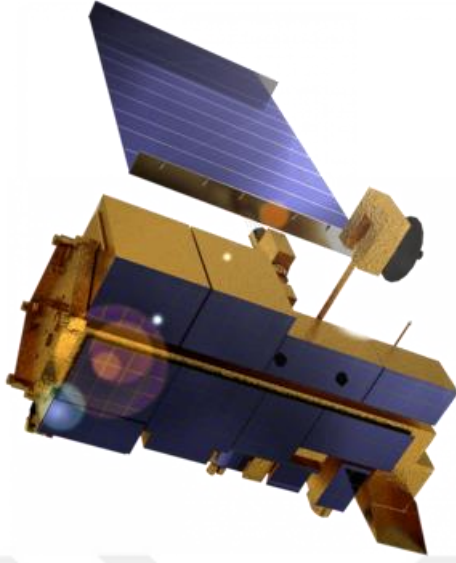
İstanbul İli, Kartal İlçesine ait çalışma alanının verileri olan uydu görüntüsü ve heyelan envanter haritaları elde edilmiştir. Çalışma sırasında, 0,4–2,5 μm aralığının da 14 spektral banda sahip Terra/Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) görüntüsü ana veri seti olarak seçilerek kullanılmıştır. ASTER görüntüsü, United States Geological Survey (USGS) sitesinden çalışma alanını kapsayarak en uygun şekilde (bulutluluk oranı en az, tarih olarak en güncel) görüntü seçilmiştir.

Çalışmada kullanılan bir diğer ana veri seti de vektör verisi olan heyelan envanteridir. Heyelan alanları İstanbul Büyükşehir Belediyesi, Deprem Risk Yönetimi ve Kentsel İyileştirme Daire Başkanlığı, Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü tarafından oluşturulan 2020 İstanbul İli Kartal-Maltepe İlçeleri heyelan farkındalık kitapçığından, yüksek çözünürlüklü uydu görüntülerinden (Google Earth) ve saha çalışmasındaki gözlemlerden elde edilmiştir.

Çalışma alanı ve çalışma metodu ile ilgili makale, bildiri, tez, kitap, rapor vb. gibi literatür taranmıştır. Çalışma alanı ve çevresine ait yapılmış Maden Tetkik ve Arama (MTA) 1/25000 ölçekli heyelan haritaları F22 ve G22 paftaları incelenmiştir.

Tez kapsamında kullanılan bilgisayarlar, Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemi laboratuvarı bünyesinde ve kişisel bilgisayardan gerçekleştirilmiştir. Bilgisayar işlemci hızı Intel Core 1.60 GHz 1.80 GHz ve RAM 8.0 GB özelliklere sahiptir.

ASTER, National Aeronautics and Space Administration (NASA) tarafından TERRA uzay aracına yerleştirilmiş olan multispektral görüntüleri kayıt altına alan bir algılayıcıdır (Şekil 3.1). ASTER sensörü toplam 14 bant ve 3 farklı algılayıcıdan oluşmaktadır. Bunlar; görünür ve yakın-kızılötesi (VNIR) 15 metrelik mekânsal çözünürlüğe sahip olan 3 bant (Bant 1, 2 ve 3N) ile birlikte 1 bant stereo görüş için geri bakış teleskopu (3B), kısa dalga kızılötesi (SWIR) 30 metrelik mekânsal çözünürlüğe sahip olan 6 bant (Bant 4, 5, 6, 7, 8 ve 9) ve termal kızılötesi (TIR) 90 metrelik mekânsal çözünürlüğe sahip olan 5 bant (10, 11, 12, 13 ve 14) mevcuttur. Radyometrik çözünürlük olarak değerlendirildiğinde VNIR ve SWIR görüntüleri 8 bit iken TIR görüntüleri 12 bitlik çözünürlüğe sahiptirler. Uydunun zamansal çözünürlüğü 16 gündür. Tarama genişliği 60 km olup ASTER verileri 60 km x 60 km alana sahip görüntüler yer almaktadır (Lillesand et al. 2015). ASTER algılayıcısının temel özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Bu çalışmada 08.08.2005 tarihine ait level-3 ve kısa adı AST3A1 olan uzun adı AST3A1 0408140902320508080017 olan ASTER uydu verisi kullanılmıştır.

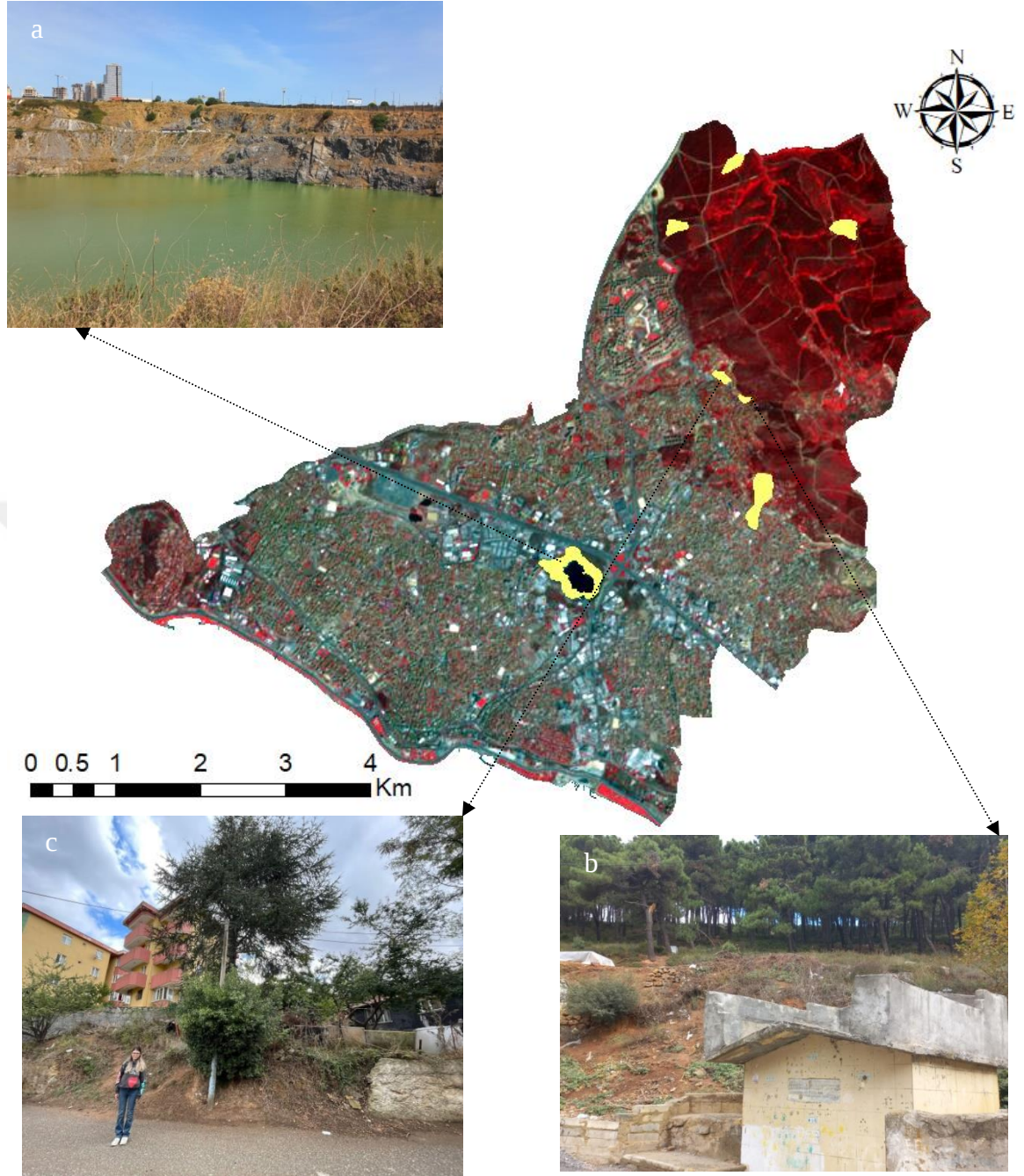


Şekil 3.1. Terra uzay aracı (NASA 2022)

Çizelge 3.1. ASTER uydusunun özellikleri

ASTER	Bant Numarası	Spektral Çözünürlük (µm)	Mekânsal Çözünürlük (m)	Radyometrik Çözünürlük (bit)	Şerit Genişliği (km)
Yakın Kızılötesi (VNIR)	1	0,52-0,60	15	8	60
	2	0,63-0,69			
	3	0,78-0,86			
Kısa Dalga Kızılötesi (SWIR)	4	1,60-1,70	30	8	60
	5	2,145-2,185			
	6	2,185-2,225			
	7	2,235-2,285			
	8	2,295-2,365			
Termal Kızılötesi (TIR)	9	2,360-2,430	90	12	60
	10	8,125-8,475			
	11	8,475-8,825			
	12	8,925-9,275			
	13	10,25-10,95			
	14	10,95-11,65			

Bu çalışmada, İstanbul ili Kartal ilçesine ait üç ana sınıfa ayrılacak şekilde 15 farklı girdi parametresi olarak topografik parametreler, morfometrik parametreleri ve spektral parametreler kullanıldı. 15 farklı veri seti SYM'den üretilerek, türevleri şeklindedir. SYM dışında yer alan veriler ASTER uydu görüntülerinden üretildi. Çalışma alanında yer alan heyelanlar, esas olarak aktif ve potansiyel yerleşimli kayma, düşme, devrilme tipi heyelanlar olarak tanımlanabilecek heyelan içermektedir. Heyelan duyarlılık analizleri için çalışma alanında, 15 heyelan poligonu içermektedir. Çalışma sahasının büyük bir kısmı yoğun yerleşim alanları içerdiğinden olduğundan heyelan envanter çalışması için kısıtlı gözlem imkanlarına sahiptir. Çalışma alanında yer alan heyelan sahaları farklı mevsimlerde görme amacı ile farklı aylarda arazi çalışmaları düzenlenmiştir. Araziden koordinatlar ve notlar alınarak, fotoğraflar çekilmiştir. Kartal ilçesine ait ASTER görüntüsünün yapay renkli bant kombinasyonu (RGB 321) ve çalışma alanında aktif ve potansiyel yerleşimli kayma, düşme, devrilme tipi heyelanlar yer almaktadır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Çalışma alanı ASTER görüntüsü yapay renk kompoziti (RGB 321) ve heyelan alanları (sarı renk) **a)** Yakacık Caddesi heyelan alanının arazi görüntüsü **b)** Sarraf Sokak heyelan alanının arazi görüntüsü **c)** Üst Sokak heyelan alanının arazi keşif görüntüsü

Düşme hareketlerinin sonucunda heyelanın topuk kısmında moloz birikintisi meydana gelir. Devrilme hareketleri ise genellikle kayan kütlelerin eğim yönünde dönme hareketiyle oluşur. Düşme ve devrilme kütle hareketlerinin her ikisi de eğim yönünde ve yer çekim kuvvetinin etkisiyle gerçekleşmesine rağmen düşme, kütlelerin doğrudan inmesiyle gerçekleşirken, devrilme kütlelerinin üst kısmının alt kısmına göre daha hızlı hareket etmesi neticesinde gerçekleşir.

Her iki hareket için en önemli faktör topoğrafik eğimdir. Bu hareketleri birbirinden ayıran en temel özellik ise kütleleri oluşturan jeolojik birimler ve bunlara ait eklem sistemleridir.

3.1.1. Topografik parametreler

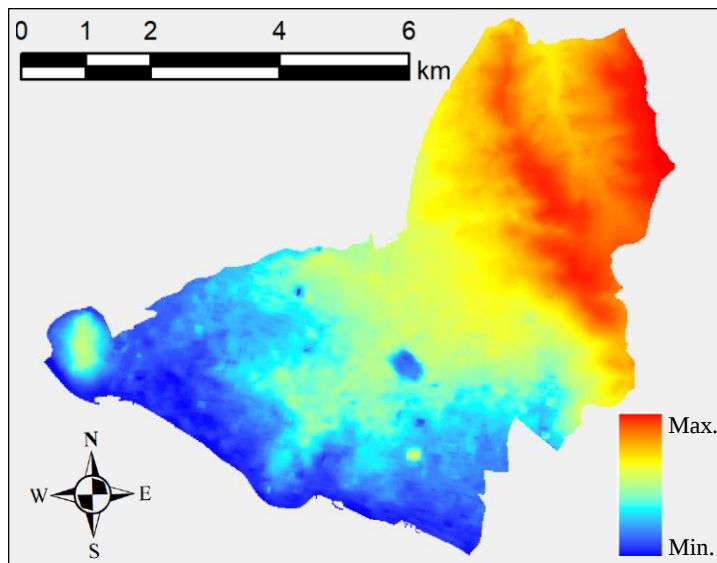
Topografik parametreler; SYM ve eğim, bakı, plan eğriliği, profil eğriliği, LS faktörü ve topografik nemlilik indeksi gibi SYM türevlerinden oluşturulmaktadır. Heyelan duyarlılık harita üretimi için bu yer alan parametreler, temel girdi parametreleri olarak kullanılmaktadır.

3.1.1.1. Sayısal yükseklik modeli

Heyelanlarla ilişkili en önemli parametre yükseklik verisidir. Kütlenin yüksekliği arttıkça potansiyel enerjisi artar ve kütle hareketi olma ihtimali artar. Bu nedenle bu çalışmada sayısal yükseklik modeli heyelan duyarlılık haritalaması için en önemli veri setini oluşturmaktadır.

ASTER, yakın kızılötesi bantları için stereoskopik görüntü üretilmekte olup, SYM üretmek için kullanılmaktadır. SYM veri setlerini 15m, 30 m ve 90 m olmak üzere üç farklı piksel boyutunu kapsamaktadır. Çalışmada temel altlık olarak ASTER VNIR bantlarına ait 15m x 15m piksel boyutu tüm üretilen katmanlar için belirlenmiştir. Üretilen ilk topografik parametre, ASTER verilerinden elde edilen yükseklik verileridir.

Çalışma alanındaki minimum ve maksimum yüksekliği 5-560 m aralığında değişmektedir ve ortalama yükseklik 152 m'dir (Şekil 3.3). Şekil 3.3'de SYM parametresi için farklılığın daha net ortaya koyulması adına lejantında gökkuşağı renk aralıkları seçilmiş olup yüksek değeri kırmızı ve düşük değerleri mavi renkte kullanılarak temsil etmektedir. Çizelge 3.2, Çizelge 3.3 ve Çizelge 3.4, girdi parametrelerinin en düşük, en yüksek, ortalama ve standart sapma değerlerini sunmaktadır.



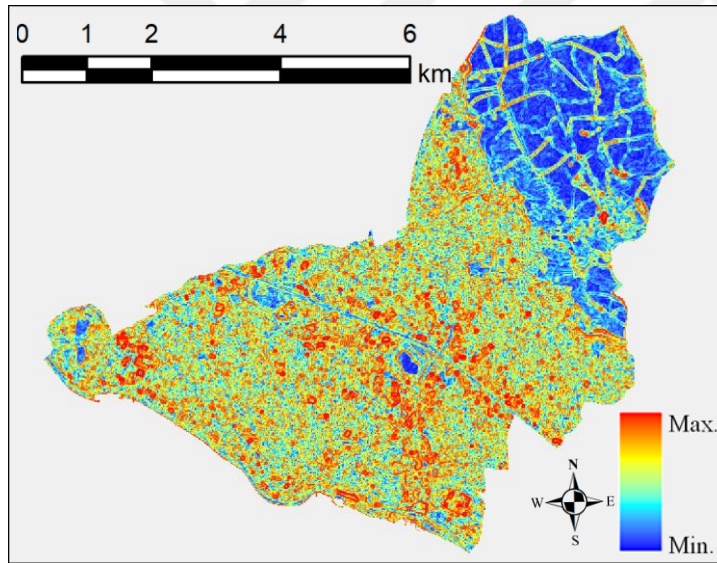
Şekil 3.3. Sayısal yükseklik modeli haritası

3.1.1.2. Eğim

Çalışma sahasında yer alan kütle hareketlerinden devrilme ve düşme hareketlerine en çok etki eden faktörlerden bir tanesi de eğim faktörüdür. Eğim arttıkça kütle duyarsızlaşır ve yerçekimi etkisiyle hareket etmeye başlar. Birincil topografik türev eğimdir. SAGA GIS yazılımı kullanılarak 15 m uzamsal çözünürlüğe sahip ASTER Sayısal yükseklik modeli verilerinden türetilmiştir. Heyelan alanlarında eğim aralığı 0° ve 62.78° ve ortalama eğim değeri 20.45° olarak hesaplanmıştır (Çizelge 3.3). Eğim değerlerinin mekânsal dağılımları Şekil 3.4’de görülmektedir.

Sayısal yükseklik modelinin ilk türevlerinden biri olan eğim gradyanı, en dik iniş yönünde irtifa değişim hızını ölçer (Wilson ve Gallant 2000). Literatürde eğim gradyanını hesaplamak için çeşitli algoritmalar bulmak mümkündür (Jones 1996; Wilson ve Gallant 2000’den sonra). Bu çalışmada kullanılan D8 algoritması, eğim gradyanını hesaplamak için başka bir yaklaşımdır (Denklem (3.1)).

$$S_{D8} = \max_{i=1,8} \frac{Z_9 - Z_i}{h_{\emptyset}(i)} \quad (3.1)$$



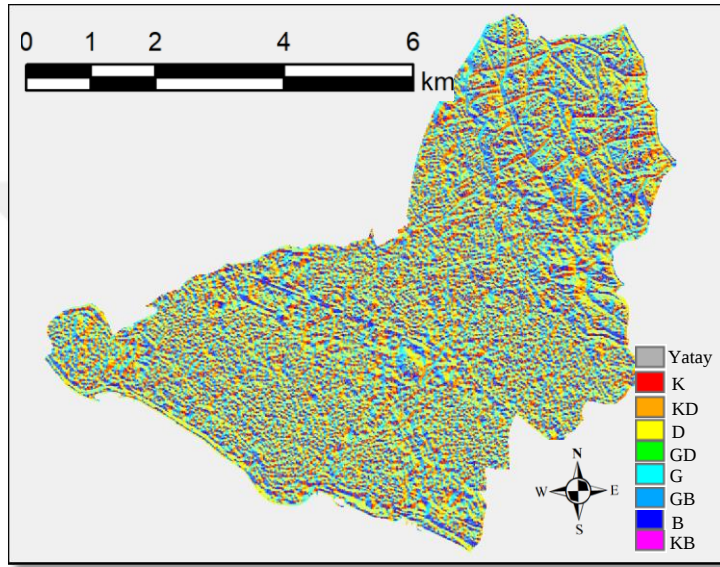
Şekil 3.4. Eğim haritası

3.1.1.3. Bakı

SYM’nin bir başka türevi ise bakıdır. Bakı, eğim yönünün kuzey ile yaptığı açıdır (Wilson ve Gallant, 2000). Çalışmada bu parametre SAGA GIS yazılımı ile elde edilmiştir. Derece cinsinden eğim yönü, sonlu farklar yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır (Denklem 3.2). Bakı değerleri 0.0° ile 360.0° ve -1.0 arasında değişmektedir. Ayrıca -1 değeri yatay bir yüzeyi gösterir.

Çalışma alanındaki ortalama değeri 177.5° olarak bulunmuştur. Bakı değerleri kategorik verilerdir ve toplamda Kuzey, Kuzeydoğu, Doğu, Güneydoğu, Güney, Güneybatı, Batı, Kuzeybatı ve yatay yüzeyler olmak üzere 9 sınıf yer almaktadır. Eğim yöneliminin büyük bir kısmı Güney yönüne doğrudur (Şekil 3.5).

$$\psi_{FD} = 180 - \arctan\left(\frac{\partial_z / \partial_y}{\partial_z / \partial_x}\right) + 90\left(\frac{\partial_z / \partial_x}{|\partial_z / \partial_x|}\right) \quad (3.2)$$



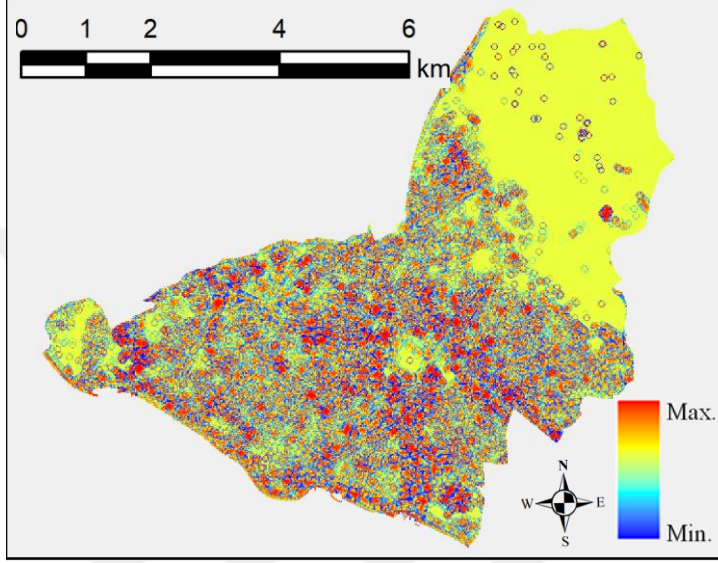
Şekil 3.5. Bakı haritası

3.1.1.4. Plan eğriliği

Eğim eğrilikleri, SYM'lerin ikinci türevlerini oluşturur ve birinci türevlerin eğim gradyanı ve eğim yönünün belirli bir yönde değişim oranı olarak tanımlanır (Wilson ve Gallant 2000). Hesaplanan iki tür eğrilikten ilki plan-kontur eğriliğidir (Denklem (3.3)) Plan eğriliği, su akış yönünü etkiler; eğer plan eğriliği yakınsaksa, su birikimi artar, ıraksaksa ise su birikimi azalır. Plan eğriliği konkavlığın negatif değerleriyle birlikte eğim yüzünün konveksliğini ifade etmektedir. Konveksliğin ise pozitif değerleriyle birlikte konkavlığını ifade etmektedir.

Plan eğriliği, System of Automated Geoscientific Analyzes (SAGA) yazılımı kullanılarak ASTER SYM verilerinin bir türevi olarak üretildi. Plan eğrilik değerleri -0.123 ile 0.196 arasında elde edilmiştir (Çizelge 3.4). Plan eğrilikleri, Şekil 3.6'da gösterilmektedir.

$$K_c = \frac{\partial_z^2 / \partial_{z^2} \left(\frac{\partial_z}{\partial_y} \right)^2 - 2 \left(\frac{\partial_z^2}{\partial_x \partial_y} \right) \left(\frac{\partial_z}{\partial_x} \right) \left(\frac{\partial_z}{\partial_y} \right) + \partial_z^2 / \partial_{y^2} \left(\frac{\partial_z}{\partial_x} \right)^2}{\left[\left(\frac{\partial_z}{\partial_x} \right)^2 + \left(\frac{\partial_z}{\partial_y} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \quad (3.3)$$

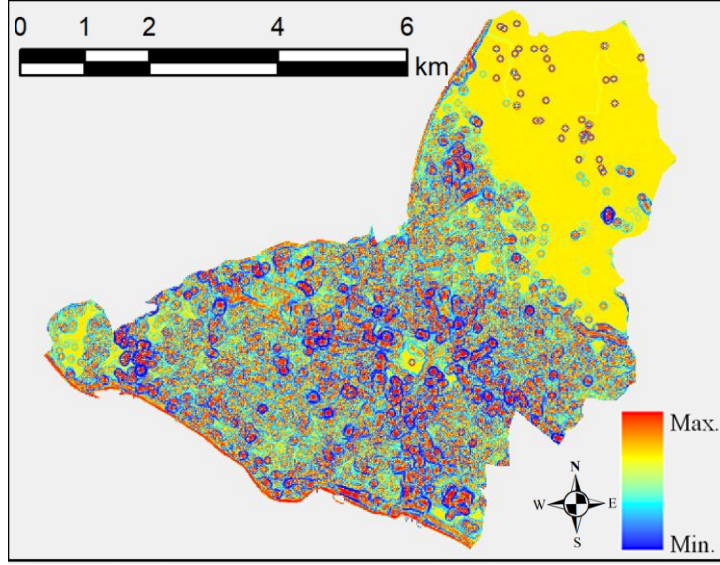


Şekil 3.6. Plan eğriselliği haritası

3.1.1.5. Profil eğriligi

Çalışma kapsamında hesaplanan bir diğer diğer topografik parametrelerden profil eğriligi, eğim profilinin eğriliklerini göstermektedir (Denklem (3.4)) (Wilson ve Gallant 2000). Profil eğriligi, System of Automated Geoscientific Analyzes (SAGA) yazılımı kullanılarak ASTER Sayısal yükseklik modeli verilerinin bir türevi olarak üretildi. Profil eğrilik değerleri -0.139 ile 0.207 arasında elde edilmiştir (Çizelge 3.4). Profil eğrilikleri, Şekil 3.7’de gösterilmektedir.

$$K_p = \frac{\partial_z^2 / \partial_{x^2} \left(\frac{\partial_z}{\partial_x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial_z^2}{\partial_x \partial_y} \right) \left(\frac{\partial_z}{\partial_x} \right) \left(\frac{\partial_z}{\partial_y} \right) + \partial_z^2 / \partial_{y^2} \left(\frac{\partial_z}{\partial_y} \right)^2}{\left[\left(\frac{\partial_z}{\partial_x} \right)^2 + \left(\frac{\partial_z}{\partial_y} \right)^2 \right] \left[\left(\frac{\partial_z}{\partial_x} \right)^2 + \left(\frac{\partial_z}{\partial_y} \right)^2 + 1 \right]^{\frac{3}{2}}} \quad (3.4)$$



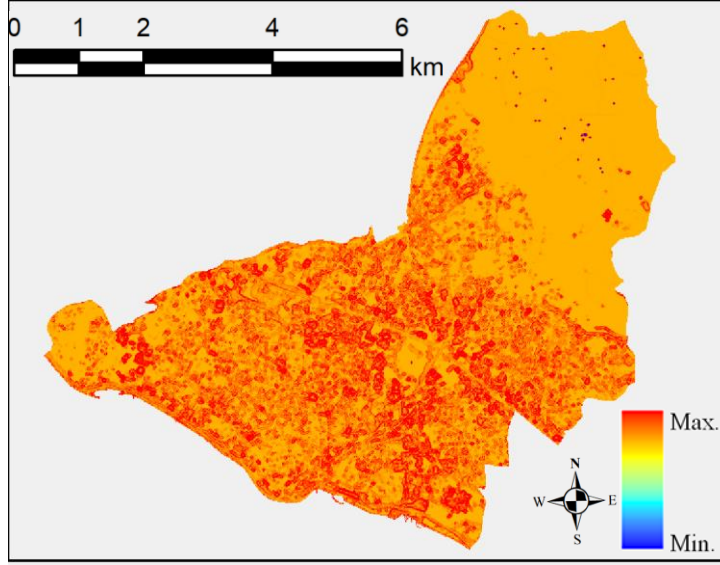
Şekil 3.7. Profil eğriselliği haritası

3.1.1.6. LS faktörü

LS faktörü, heyelan tahmini için kullanılan bir parametredir ve "eğim uzunluğu ve dikliği faktörü" olarak da bilinmektedir. LS faktörü, topografyanın yanal heyelan üzerindeki etkisini ölçen bir çarpan faktördür. Bu faktör, eğim uzunluğu ve eğim eğriliği gibi faktörleri hesaba katarak, yüzey akış hızını ve hacmini tahmin etmek için kullanılır. LS faktörü, RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation-Düzenlenmiş Evrensel Zemin Kaybı Denklemi) heyelan modelinin bir bileşenidir ve heyelan potansiyelini tahmin etmek için kullanılır. Sedimanın taşıma kapasitesi indeksi (K faktörü) ise, RUSLE modelinde kullanılan bir başka faktördür. Bu faktör, yağışların etkisi altında toprak yüzeyindeki erodibilitiyi ölçer ve erozyonu tetikleyen yağış şiddeti ve toprağın koruyucu örtüsü (bitki örtüsü) kaybı gibi faktörleri hesaba katar. LS faktörü ve K faktörü, RUSLE modelindeki birlikte çalışan faktörlerdir ve toprak erozyonunu tahmin etmek için kullanılır. (Moore ve Wilson 1992).

SYM türevlerinde olan LS faktörü SAGA yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır. Denklem (3.5) ile LS faktörü hesaplanabilmektedir. Denklemde yer alan m ve n değerleri Moore ve Wilson (2000) tarafından belirlenmiş olup m değeri 0.4, n değeri ise 1.3 olarak verilmiştir. A_s , özel havza alanını, β ise eğim gradyanını temsil etmektedir. Şekil 3.8'de LS faktörü haritası yer almaktadır.

$$Ls = (m + 1) \left(\frac{A_s}{22.13} \right)^m \left(\frac{\sin \beta}{0.0896} \right)^n \quad (3.5)$$



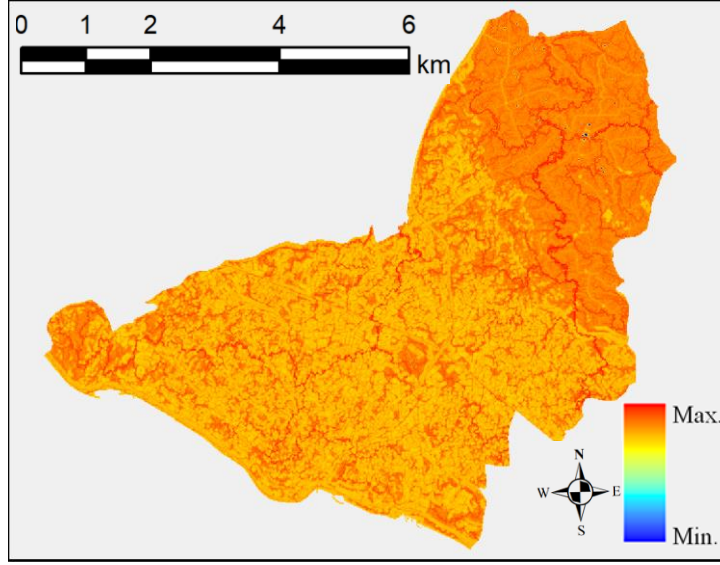
Şekil 3.8. LS faktörü haritası

3.1.1.7. Topoğrafik nemlilik indeksi (TWI)

Çalışmada değerlendirilen bir diğer topoğrafik parametre, Topoğrafik Nemlilik İndeksidir (TWI). Topoğrafik Islaklık İndeksi (TWI) veya Topoğrafik Nem İndeksi, arazinin topoğrafik özelliklerine dayalı olarak potansiyel ıslaklık veya nem içeriğini tahmin etmek için kullanılan bir arazi analiz tekniğidir. Su akışını, heyelanı ve diğer ilgili süreçleri modellemek için hidroloji, ekoloji, ziraat ve jeoloji yaygın olarak kullanılır. TWI, topoğrafyanın peyzajdaki su hareketini ve tutulmasını etkilediği ilkesine dayanmaktadır. İndeks, SYM kullanılarak hesaplanır ve her bir ızgara hücresinin eğimini ve katkı alanını dikkate alır. Her bir hücrenin TWI değeri, yukarı eğime katkıda bulunan alanın, peyzajın su tutma kapasitesinin bir ölçüsü olan yerel eğime oranını temsil eder. Yüksek TWI değerleri potansiyel ıslaklık veya neme sahip alanları gösterirken, düşük değerler kuru alanları gösterir. TWI, konumu bilinen topoğrafinin etki hesabını ve akıntının doymun kaynağının büyüklüğünü ifade etmektedir (Moore et al. 1991).

Moore et al. (1991) TWI'yi hesaplamak için bir denklem (Denklem (3.6)) önerir. Bu öneri, kararlı durum koşullarını ve düzgün toprak özelliklerini varsayar. TWI faktörü veri seti, SAGA yazılımı ile 15 m uzamsal çözünürlüğe sahip ASTER SYM verilerinin bir türevi olarak üretildi. TWI değerleri için maksimum 22.30 olarak hesaplanmıştır. Şekil 3.9'da TWI'nin mekansal dağılımı gösterilmektedir.

$$TWI = \ln \frac{A_5}{\tan \beta} \quad (3.6)$$



Şekil 3.9. Topoğrafik nemlilik indeksi haritası

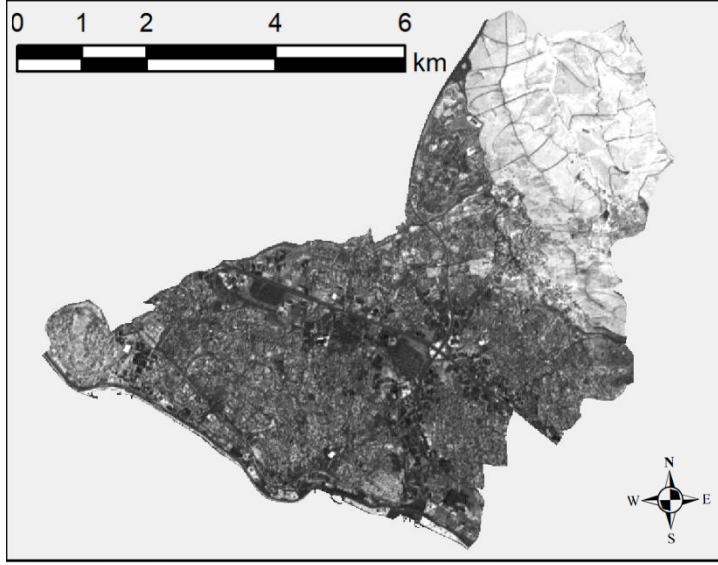
3.1.2. Morfometrik parametreler

3.1.2.1. Normalleştirilmiş fark bitki örtüsü indeksi

Heyelan duyarlılık haritalamasında, bitki örtüsü en önem arz eden parametrelerinden biridir. Bu veri seti, arazi örtüsü kombinasyonunun mekânsal dağılımını tanımlamak için bilgiler içerir. NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), bitki örtüsü ve yeşil alanların nicel olarak değerlendirilmesinde kullanılan bir ölçüttür. NDVI, bitki örtüsündeki fotosentez aktivitesiyle doğrudan ilişkilidir. Yeşil bitkiler, fotosentez sırasında güneş ışığına maruz kaldıklarında, klorofil sayesinde güneş ışığını emer ve oksijen üretirler. NDVI, bitkilerin fotosentez faaliyetlerinin yoğunluğunu ölçer ve bu yoğunluğun değerlendirilmesiyle bitki örtüsü hakkında bilgi sağlar.

Çalışmada, ASTER görüntüsünün Normalleştirilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi (NDVI) kullanılmıştır. Normalleştirilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi, ENVI yazılımı kullanılarak üretildi (Şekil 3.10). Çalışma alanındaki bitki örtüsünün mekânsal dağılımı ve yoğunluğu, -1.0 ile +1.0 değerleri arasında değişebilen NDVI kullanılarak hesaplanabilmektedir. ASTER veri seti için NDVI değerinde bant 3 ve bant 2 kullanılmakta olup kırmızı ve kızılötesi bantlara karşılık gelmektedir (Denklem 3.7). Çalışma alanındaki minimum NDVI değerleri -0.349 ve maksimum NDVI değerleri 0.619'dur (Çizelge 3.2). Şekil 3.10'da bitki örtüsünün mekânsal dağılımı gösterilmektedir.

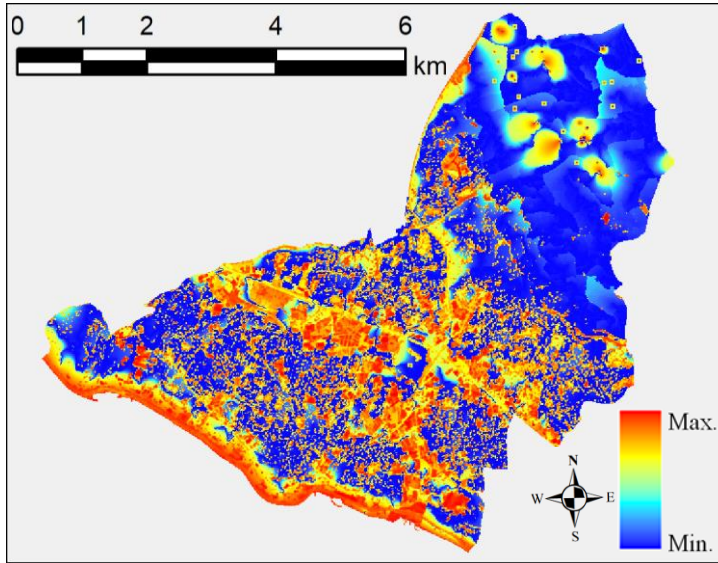
$$NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)} \quad (3.7)$$



Şekil 3.10. Normalize fark bitki örtüsü indeksi haritası

3.1.2.2. Kanallara olan uzaklık

Drenaj ağına olan mesafe, bir yerin veya özelliğin nehirler, akarsular veya kanallar gibi bir su yolları ağına olan yakınlığını ifade etmektedir. Genellikle sel veya heyelana karşı erişilebilirlik ve savunmasızlığın bir ölçüsü olarak kullanılır. Örneğin, heyelan tehlikesi haritalamasında, bir drenaj ağına daha yakın olan alanların, daha uzakta olanlara göre daha yüksek risk altında olduğu kabul edilir. Kanal ağlarına olan uzaklık parametresi, objeye olan uzaklıktan olan mesafeler ile hesaplanmakta olup ilgili piksele atanıp ölçülen mesafeyi göstermektedir. Yakınlık veri setleri, kanal ağlarına uzaklığı kapsamaktadır. Bu parametre, SAGA yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır. Çizelge 3.2'de görüleceği gibi drenaj ağına olan uzaklık maksimum 151 m civarlarındadır. Şekil 3.11'de oluşturulan kanallara olan uzaklık haritası gösterilmiştir.

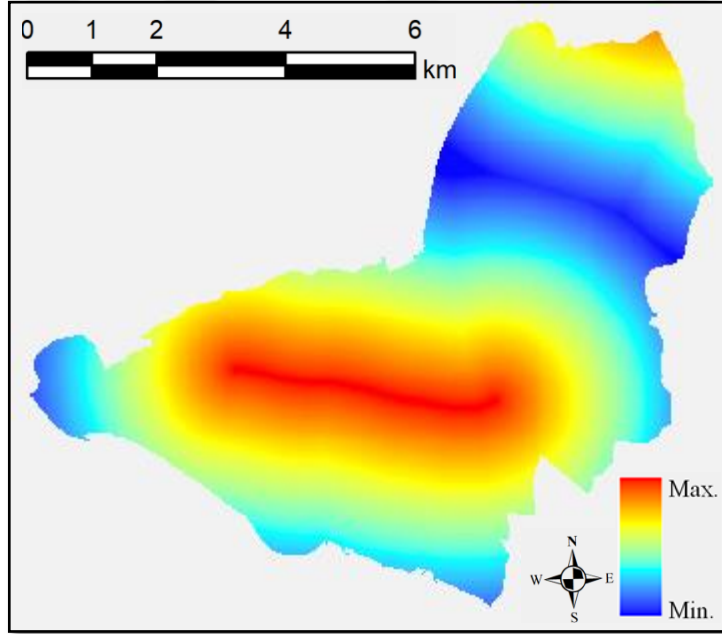


Şekil 3.11. Kanallara olan uzaklık haritası

3.1.2.2. Fay hatlarına olan uzaklık

Kütle yer çekimiyle dengedeysen (herhangi bir hareket olmadığında) bu dengeyi bozabilecek tetikleyici faktörlerden bir tanesi tektonik hareketlerdir. Tektonik hareketler fay hatları boyunca gerçekleşmekte olup faya olan uzaklığa ve üzerindeki litolojik birime göre etkisi değişmektedir. Fay hatlarına olan mesafeyi bilmek, bölgede heyelan ve diğer doğal afet riskini değerlendirmek için önemlidir. Fay hatlarına olan mesafe, bir konum ile aktif bir fay hattı arasındaki mesafeyi sayısal olarak ifade eder. Heyelan olayının gerçekleşmesi için fay hatları veri seti önemli bir parametredir. Bir fay hattı heyelana yakınsa heyelan oluşma olasılığı yüksek olup uzaksa düşük olmaktadır. Bu parametre, ArcGIS 9.5 yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır.

Çizelge 3.2’de çalışma alanında her bir piksel için hesaplanan faya olan uzaklık değeri hesaplanmış ve çalışma alanı için bu değer en yüksek 3.44 km olarak hesaplanmıştır. Bu değer çalışma alanına ait Şekil 3.12’de gösterilen koyu mavi renklere karşılık gelmektedir. Bu alanlar çalışma sahasında faya uzaklık bakımından en güvenli alanlar olarak hesaplanmıştır.



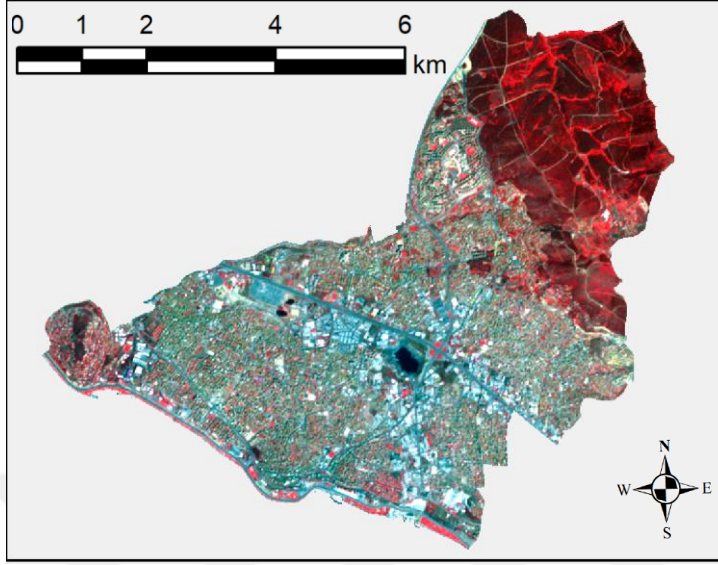
Şekil 3.12. Fay hatlarına olan uzaklık haritası

3.1.3. Spektral parametreler

3.1.3.1. Görünür ve yakın kızılötesi

VNIR, uzaktan algılama uygulamalarında yaygın olarak kullanılan bir dizi elektromanyetik radyasyon dalga boyuna atıfta bulunan "Görünür ve Yakın Kızılötesi" anlamına gelir. VNIR aralığı, yaklaşık 400 ila 1000 nanometre dalga boylarını kapsar ve görünür ışık spektrumunun yanı sıra yakın kızılötesi spektrumun bir bölümünü içerir. VNIR aralığı, farklı bitki örtüsü, toprak, kaya ve mineral türleri arasında ayırım yapmak için kullanılabilen yansıtma özelliklerine dayalı olarak yüzey özelliklerinin tanımlanması ve haritalanması için özellikle yararlıdır. Şekil 3.13’de görünür ve yakın

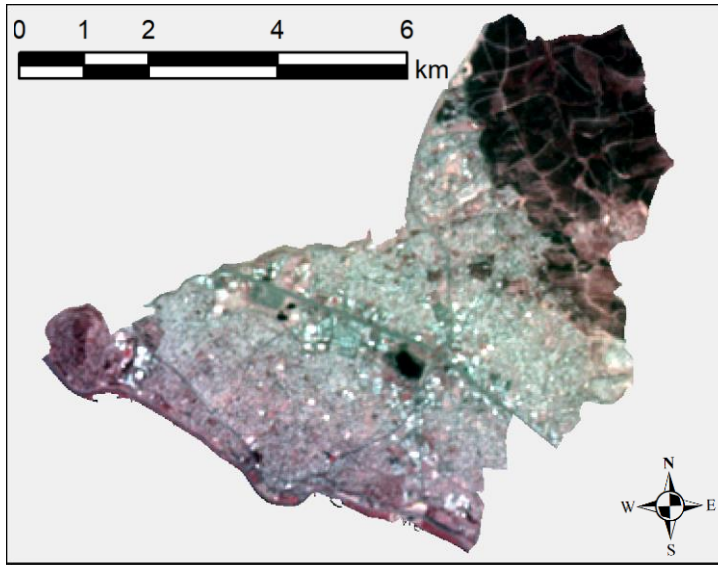
kızılötesi haritası gösterilmiştir. Sırasıyla Kırmızı, yeşil ve maviye, Bant 3, 2 ve 1 atamaları yapılarak görüntü oluşturulmuştur (Şekil 3.13).



Şekil 3.13. Görünür ve yakın kızılötesi haritası

3.1.3.2. Kısa dalga boylu kızılötesi

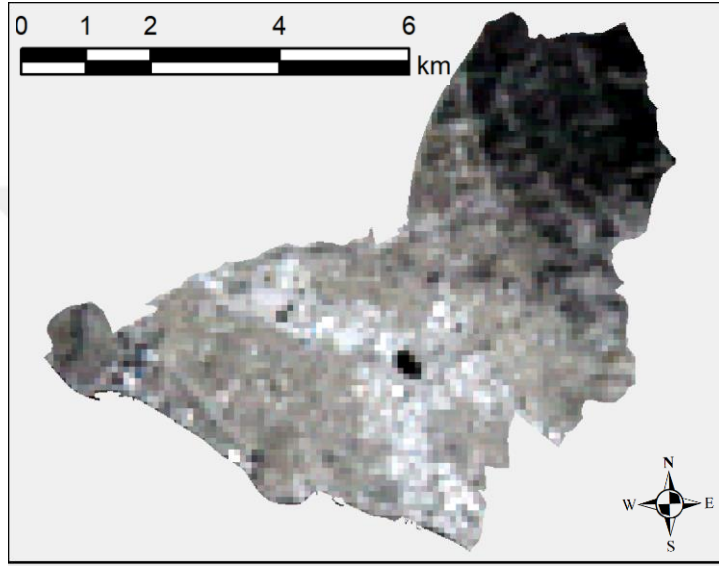
SWIR, VNIR aralığındakilerden daha uzun, 1000 ve 2500 nanometre arasında olan bir dizi elektromanyetik radyasyon dalga boyu anlamına gelen "Kısa Dalga Kızılötesi" anlamına gelir. SWIR radyasyonu görünür spektrumun ötesindedir, ancak termal kızılötesi radyasyondan daha kısadır. SWIR sensörleri, mineraller, bitki örtüsü ve insan yapımı nesneler dahil olmak üzere farklı malzeme türleri arasında ayrım yapmak için kullanılabilen yansıtma özelliklerine dayalı olarak yüzey özelliklerini belirlemek ve haritalamak için özellikle yararlıdır. Şekil 3.14'de kısa dalga kızılötesi haritası gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Kısa dalga kızılötesi haritası

3.1.3.3. Termal kızılötesi

TIR, SWIR aralığındakilerden daha uzun, 8000 ve 14000 nanometre arasında olan bir dizi elektromanyetik radyasyon dalga boyu anlamına gelen "Termal Kızılötesi" anlamına gelir. TIR radyasyonu, görünür ve SWIR spektrumlarının ötesindedir ve sıcaklıklarının bir sonucu olarak nesneler tarafından yayılır. TIR sensörleri tarafından toplanan veriler, Dünya yüzeyinin sıcaklığı ve özellikleri hakkında bilgi elde etmek için termal görüntüleme ve radyometrik analiz dahil olmak üzere çeşitli teknikler kullanılarak işlenebilir ve analiz edilebilir. Şekil 3.15’de termal görüntüleme radarı haritası gösterilmiştir.

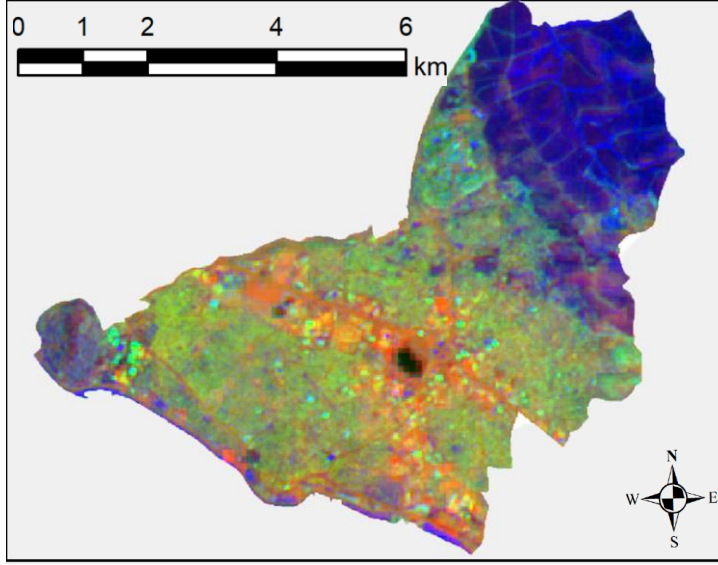


Şekil 3.15. Termal görüntüleme radarı haritası

3.1.3.4. Dekorelasyon germesi

Bu çalışmada jeolojik uzaktan algılama için, litolojik birimleri ve arazi örtüsünü ayırtmak adına kullanılan son girdi veri seti, dekorelasyon gerilmesi ASTER bantlarıdır. Dekorelasyon gerilmesi, jeolojik uzaktan algılama için kullanılan bir görüntü işleme tekniğidir. Bu teknik, bir litolojik birim ile diğer litolojik birimi birbirinden ayırmak için kullanılır. Görüntüdeki her pikselin, diğer piksellerle olan korelasyonunu azaltmak için bir ana bileşen analizi yöntemi kullanılır. Bu işlemin sonucunda elde edilen ana bileşenlerin histogramlarına Gauss eğrisi uygulanarak, yüzey malzemelerinin spektral bantlarında spektral ayrılabilirlikleri en üst düzeye çıkarılır. Bu sayede litolojik ve arazi örtüsü yüzey farklılıkları, hem görsel hem de dijital olarak açıkça tanımlanır ve vurgulanır.

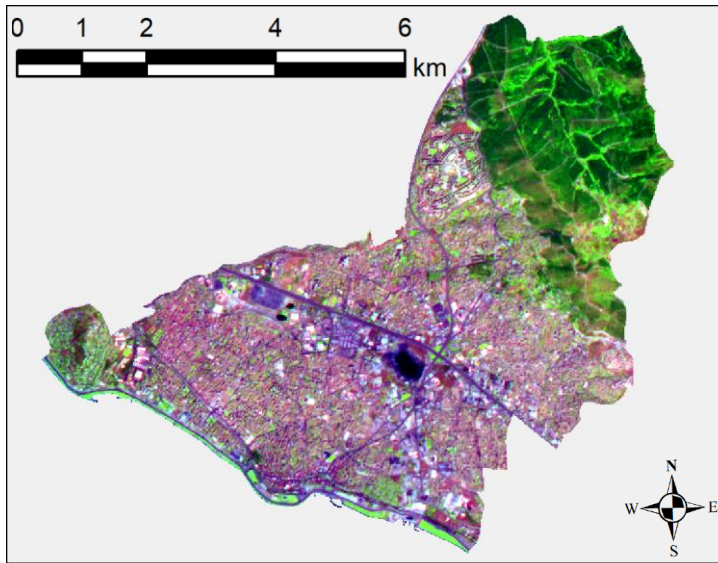
ASTER görüntüsünün dekorelasyon gerilmesi Şekil 3.16 göstermektedir. Üretilen dekorelasyon gerilmesi parametresi ENVI yazılımı kullanılarak yapıldı. Üretilen şekilden de görülebileceği üzere, ağırlıklı olarak mavi ve mavimsi renkte, yeşil ve yeşilimsi renkte dekorelasyon gerilmesi görünmekte olup benzer birimler aynı renk tonlarında olmaktadır.



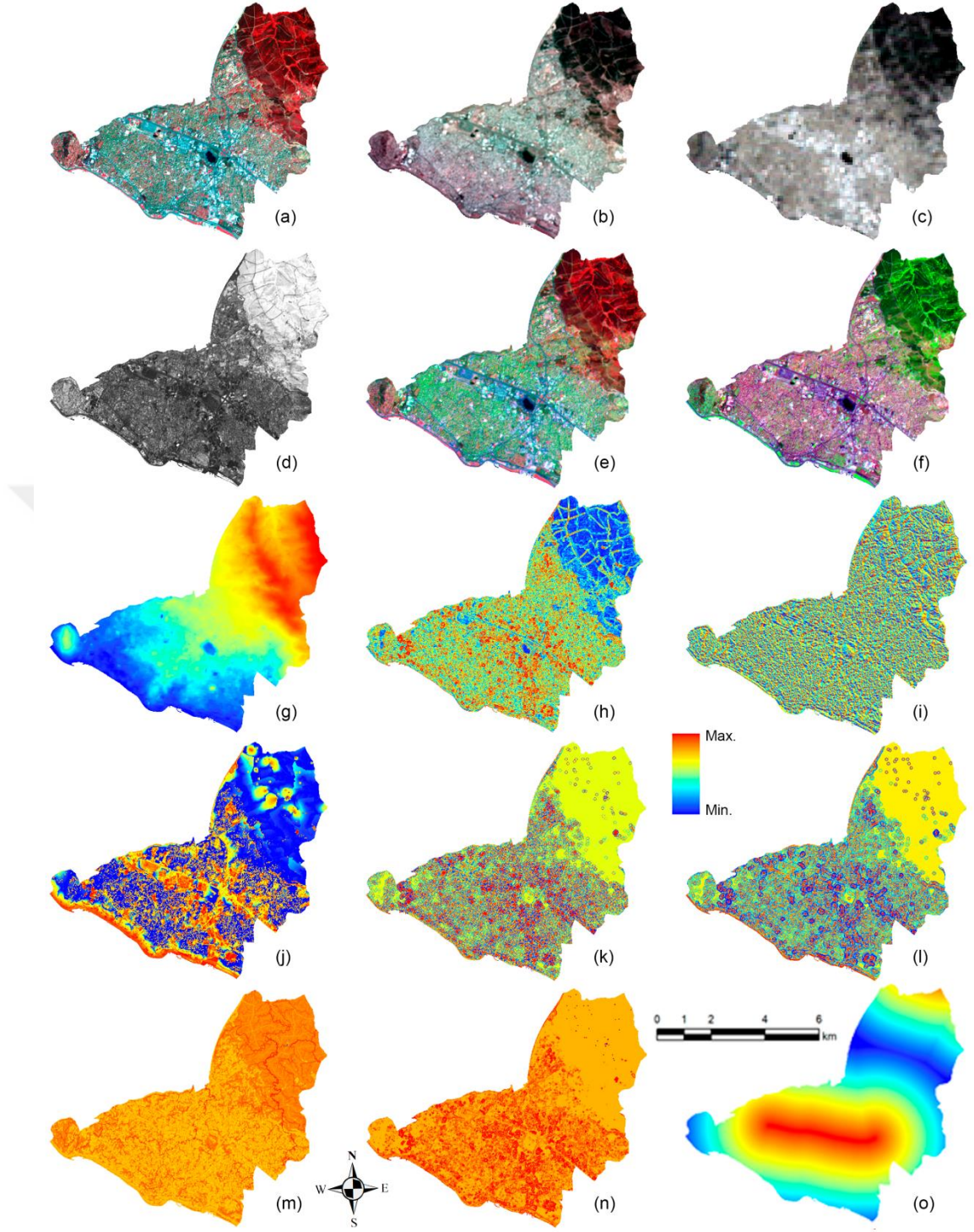
Şekil 3.16. Dekorelasyon gerilmesi haritası

3.1.3.5. Temel bileşenler analizi

Principal Component Analysis (PCA), Türkçede bilinen adıyla Temel Bileşen Analizi büyük veri kümelerini boyutsallıklarını azaltarak analiz etmek için kullanılan çok değişkenli bir istatistiksel tekniktir. PCA, orijinal veri kümesinden temel bileşenler olarak bilinen doğrusal olarak ilişkisiz bir dizi değişkeni çıkaran bir doğrusal dönüşüm yöntemidir. Bu bileşenler, açıkladıkları varyasyon miktarına göre sıralanır; birinci bileşen, verilerdeki en fazla varyasyonu açıklar, ardından ikinci bileşen gelir ve bu böyle devam etmektedir. PCA, veri sıkıştırma, özellik çıkarma, veri görselleştirme ve gürültü azaltma gibi çeşitli amaçlar için kullanılabilir. PCA, verilerin boyutsallığını azaltarak karmaşık veri kümelerini basitleştirerek bunların yorumlanmasını ve görselleştirilmesini kolaylaştırabilir. ASTER görüntüsünün Temel bileşenler analizi haritası Şekil 3.17’de gösterilmiştir.



Şekil 3.17. Temel bileşenler analizi haritası

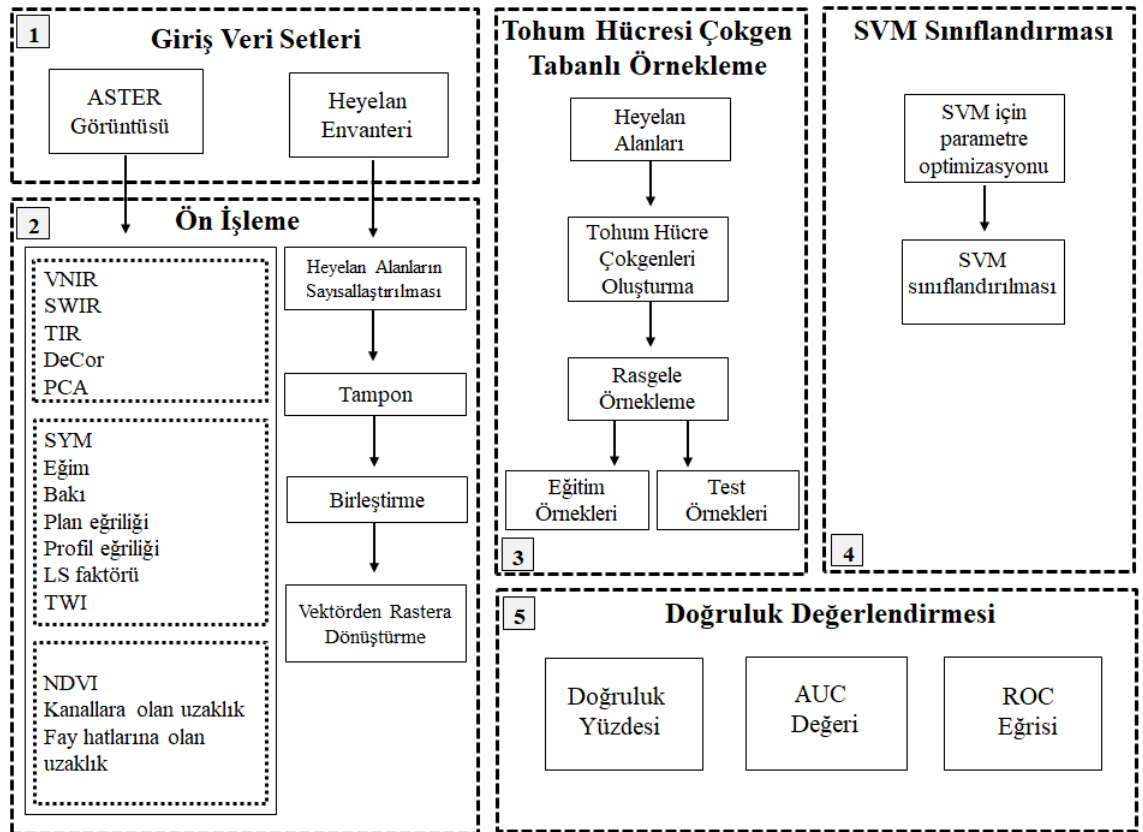


Şekil 3.18. Veri setinden oluşturulan topoğrafik, morfometrik ve spektral parametreler: **(a)** VNIR, **(b)** SWIR, **(c)** TIR, **(d)** NDVI, **(e)** dekorelasyon gemesi, **(f)** Temel bileşenler analizi, **(g)** sayısal yükseklik modeli, **(h)** eğim, **(i)** bakı, **(j)** kanallara olan uzaklık, **(k)** plan eğriliği, **(l)** profil eğriliği, **(m)** topoğrafik ıslaklık indeksi, **(n)** LS faktör ve **(o)** fay hatlarına olan uzaklık.

3.2. Metod

Bu çalışmada, makine öğrenme algoritmalarından sınıflandırma tekniği olan destek vektör makinesi (DVM) öğrenme algoritmasıyla İstanbul İli Kartal İlçesi heyelan duyarlılık haritası üretildi. Üretilen heyelan duyarlılık haritasını daha gerçeğe yakın olması adına uzaktan algılama analizleri esnasında dekorelasyon gerilmeleri ve temel bileşenler analizi gibi veri setleri özel girdi parametreleri için kullanıldı.

Şekil 3.19’da önerilen yaklaşımın iş akış şeması gösterilmektedir. Bu çalışma; giriş veri setleri, ön işleme, tohum hücresi çokgen tabanlı örnekleme, destek vektör makinesi (DVM) sınıflandırması ve doğruluk değerlendirmesi olmak üzere beş ana işleme ayrılabilir. Ön işleme aşamasında ASTER görüntüsünden 15 parametre türetilmiştir. Bu ürünlerin tümü SAGA ve ENVI 5.0 görüntü işleme ve analiz yazılımları kullanılarak oluşturulmuştur. Çalışmada veri setleri UTM (Universal Transverse Mercator) koordinat sistemine, zone 35 ve WGS 84 datumuna sahip olarak koordinatlandırılmıştır. 2020 İstanbul ili Kartal, Maltepe ilçeleri heyelan farkındalık kitapçığında bulunan heyelan alanları ArcGIS yazılımı ile sayısallaştırılarak vektör poligon verileri üretilmiştir.



Şekil 3.19. Önerilen yaklaşımın iş akış şeması

ASTER görüntüsü kullanılarak, heyelan duyarlılığının haritalandırılması için girdi parametreleri topografik ve morfometrik parametreler, uydu görüntüsü tabanlı spektral parametreler ve jeolojik parametreler olmak üzere üç gruba ayrılabilir. Bu gruplar içerisinde toplam olarak 32 veri seti kullanılmıştır.

Bunlar ASTER verisinden elde edilmiş sayısal yükseklik modeli, bu modelin türevleri eğim, bakı, eğrilik, plan eğriligi, profil eğriligi, TWI, LS faktörü, yine ASTER verisinden üretilmiş NDVI, mevcut fay hatlarına olan mesafe, kanallara olan mesafe, ASTER görüntü verisinden üretilmiş dekorelasyon gemesi ve temel bileşenler analizine ait ürünlerdir.

Çizelge 3.2. Tohum hücre poligonlarında kullanılan parametrelerin tanımlayıcı istatistikleri

Değişkenler	Bantlar	Minimum	Maximum	Ortalama	Standart Sapma
Tohum Hücre Poligonları					
Görünür Ve Yakın Kızılötesi	Band 1	59.000	220.000	90.503	22.860
	Band 2	32.000	176.000	62.697	22.705
	Band 3	30.000	106.000	68.163	8.963
Kısa dalga kızılötesi	Band 4	28.000	100.000	51.084	12.590
	Band 5	22.000	77.000	40.919	11.145
	Band 6	21.000	95.000	42.314	12.885
	Band 7	19.000	88.000	40.940	12.864
	Band 8	17.000	83.000	37.311	12.356
	Band 9	19.000	58.000	30.816	7.088
Termal Kızılötesi	Band 10	1228.000	1505.000	1330.724	65.701
	Band 11	1338.000	1690.000	1461.466	80.477
	Band 12	1440.000	1829.000	1575.699	87.383
	Band 13	1701.000	2065.000	1834.361	86.762
	Band 14	1770.000	2091.000	1894.561	76.803
Normalleştirilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi	Band 15	-0.276	0.477	0.067	0.179
Korelasyon Gemesi	Band 16	37.414	40.835	38.940	0.463
	Band 17	17.097	22.425	18.884	0.915
	Band 18	925.921	926.516	926.149	0.125
Temel Bileşenler Analizi	Band 19	-1810.670	-1055.780	-1325.221	177.736
	Band 20	-22.333	158.534	34.342	34.706
	Band 21	-45.366	68.892	6.903	20.018
	Band 22	-74.359	98.990	-4.424	16.947
Sayısal Yükseklik Modeli	Band 23	21.000	369.000	199.887	87.178
Eğim	Band 24	0.000	72.646	20.955	16.130
Bakı	Band 25	-1.000	359.484	177.019	107.733
Eğrisellik	Band 26	-35.311	62.677	-0.037	8.801
Kanallara Olan Mesafe	Band 27	0.000	112.629	3.809	10.538
Plan Eğriligi	Band 28	-0.054	0.057	0.001	0.008
Profil Eğriligi	Band 29	-0.069	0.057	-0.001	0.010
Topografik Islaklık İndeksi	Band 30	-9999.000	21.256	-91.748	3174.195
LS Faktörü	Band 31	-9999.000	54.124	-98.789	3173.971
Fay Hatlarına Olan Mesafe	Band 32	0.000	2620.840	1547.634	802.542

Çizelge 3.3. Heyelan alanlarında kullanılan parametrelerin tanımlayıcı istatistikleri

Değişkenler	Bantlar	Minimum	Maximum	Ortalama	Standart Sapma
Heyelan Alanları					
Görünür Ve Yakın Kızılötesi	Band 1	60.000000	160.000000	92.910210	21.247047
	Band 2	31.000000	133.000000	64.222881	21.616966
	Band 3	23.000000	106.000000	63.567001	13.325739
Kısa dalga kızılötesi	Band 4	19.000000	82.000000	47.455333	13.674113
	Band 5	20.000000	64.000000	39.410665	11.420835
	Band 6	16.000000	73.000000	39.907931	13.024993
	Band 7	19.000000	74.000000	39.308113	12.811334
	Band 8	16.000000	72.000000	35.914768	12.371825
	Band 9	19.000000	52.000000	30.190520	6.881326
Termal Kızılötesi	Band 10	1189.000000	1505.000000	335.911577	72.596948
	Band 11	1299.000000	1690.000000	468.560620	88.976063
	Band 12	1403.000000	1829.000000	582.149499	97.799755
	Band 13	1668.000000	2065.000000	842.171376	97.397689
	Band 14	1745.000000	2091.000000	900.186873	84.472542
Normalleştirilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi	Band 15	-0.276836	0.483333	0.011280	0.197628
Korelasyon Gemesi	Band 16	37.295811	40.488766	38.759360	0.587390
	Band 17	17.146820	21.327412	18.814523	0.875654
	Band 18	925.921570	926.522705	926.168939	0.141061
Temel Bileşenler Analizi	Band 19	-1809.802612	-976.882996	-339.437274	197.296530
	Band 20	-46.650574	128.187103	30.692493	35.521234
	Band 21	-37.508652	64.946579	11.847843	20.488809
	Band 22	-65.950668	58.893654	-5.796517	17.863855
Sayısal Yükseklik Modeli	Band 23	31.000000	348.000000	176.659070	89.132714
Eğim	Band 24	0.000000	62.783653	20.459556	13.965220
Bakı	Band 25	-1.000000	359.421265	178.549152	102.338353
Eğrisellik	Band 26	-33.104301	45.463242	0.174826	7.748593
Kanallara Olan Mesafe	Band 27	0.000000	52.814629	2.891520	6.478149
Plan Eğriligi	Band 28	-0.029988	0.032306	0.000715	0.006048
Profil Eğriligi	Band 29	-0.055894	0.039071	-0.001516	0.007452
Topografik Islaklık İndeksi	Band 30	-9999.000000	19.124538	-82.412331	3018.781869
LS Faktörü	Band 31	-9999.000000	29.735043	-89.336584	3018.571487
Fay Hatlarına Olan Mesafe	Band 32	0.000000	2544.612061	148.777352	843.738807

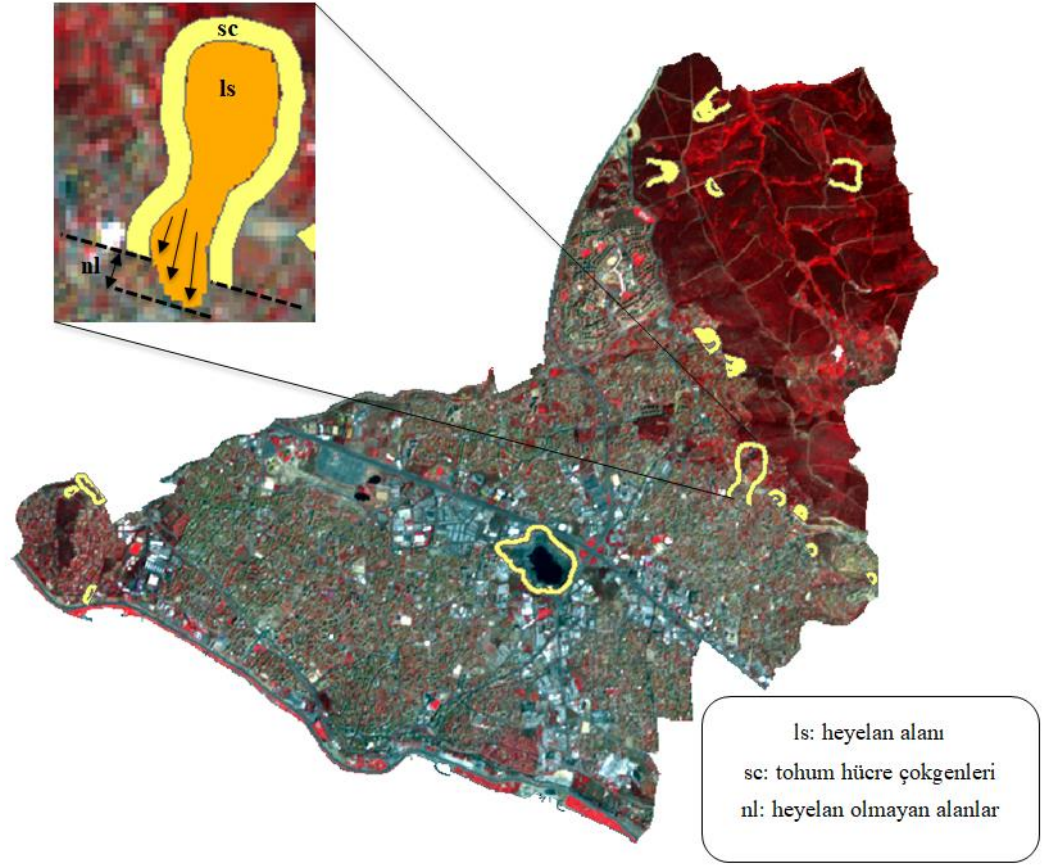
Çizelge 3.4. Heyelan olmayan alanlarda kullanılan parametrelerin tanımlayıcı istatistikleri

Değişkenler	Bantlar	Minimum	Maximum	Ortalama	Standart Sapma
Heyelan Olmayan Alanlar					
Görünür Ve Yakın Kızılötesi	Band 1	58.000000	255.000000	101.582291	24.973518
	Band 2	30.000000	255.000000	74.222305	24.500727
	Band 3	21.000000	229.000000	68.965872	9.657417
Kısa dalga kızılötesi	Band 4	17.000000	165.000000	57.934158	12.791403
	Band 5	16.000000	143.000000	47.824673	12.169637
	Band 6	15.000000	181.000000	51.488241	14.678464
	Band 7	16.000000	167.000000	50.313895	14.738608
	Band 8	15.000000	171.000000	46.641930	14.458543
Termal Kızılötesi	Band 9	17.000000	112.000000	36.199981	8.690674
	Band10	1165.000000	1637.000000	363.638920	61.064318
	Band 11	1269.000000	1789.000000	500.820882	73.888456
	Band 12	1367.000000	1908.000000	614.446538	80.028531
	Band 13	1632.000000	2193.000000	875.584804	81.305764
	Band 14	1711.000000	2222.000000	931.349874	72.146290
Normalleştirilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi	Band 15	-0.339901	0.496933	-0.012911	0.164313
Korelasyon Girmesi	Band 16	36.787086	44.525566	38.784388	0.452972
	Band 17	16.980043	28.257624	19.555012	1.051104
	Band 18	925.770020	926.706116	926.201802	0.109890
Temel Bileşenler Analizi	Band 19	-2051.461914	-898.555176	-410.208559	165.099470
	Band 20	-51.418621	383.481384	56.007492	37.491012
	Band 21	-53.722595	105.246025	17.852200	20.072008
	Band 22	-90.706078	174.553513	-3.345873	18.339710
Sayısal Yükseklik Modeli	Band 23	5.000000	560.000000	152.272405	106.582042
Eğim	Band 24	0.000000	80.621140	23.986578	16.039283
Baki	Band 25	-1.000000	359.819244	178.758852	104.389753
Eğrisellik	Band26	-98.871513	152.279785	0.032620	11.391404
Kanallara Olan Mesafe	Band 27	0.000000	151.031860	7.132224	14.436575
Plan Eğriligi	Band 28	-0.123931	0.196375	0.001651	0.011601
Profil Eğriligi	Band 29	-0.139198	0.206807	-0.001396	0.013112
Topografik Islaklık İndeksi	Band 30	-9999.000000	22.304987	-17.694450	1594.550231
LS Faktörü	Band 31	-9999.000000	136.316742	-21.926273	1594.484193
Fay Hatlarına Olan Mesafe	Band 32	0.000000	3441.674805	554.855926	821.877764

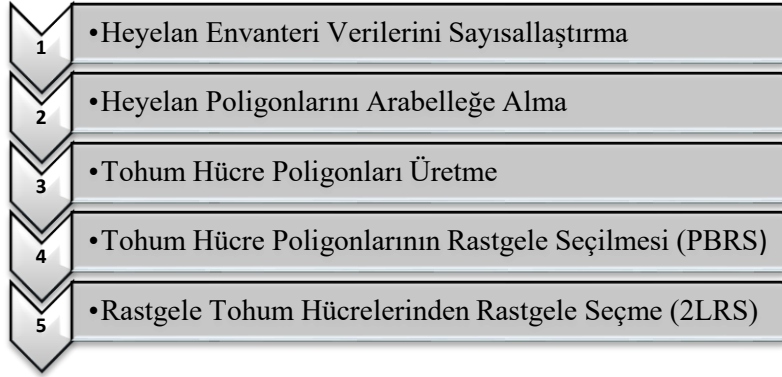
3.2.1. Heyelan duyarlılık haritalaması için örnekleme stratejisi

Çalışmada üretilen yukarıda bahsi geçen tüm veri setleri 15 m piksel boyutuna sahip tek bir hücre tabanlı veri seti içerisinde birleştirilmiştir. Veri setleri Çizelge 3.2, Çizelge 3.3 ve Çizelge 3.4’de görüldüğü gibi farklı değer aralıklarında bulunmaktadır. Bu nedenle sınıflandırma işlemi öncesinde tüm veri katmanları 0 – 1 sürekli aralığına yeniden ölçeklendirilmiştir.

Çalışmada duyarlılık haritalaması için kullanılacak eğitim veri setleri için heyelan poligonları değil, heyelan poligonları ile ilişkili olarak tohum hücre poligonları (Süzen ve Doyuran 2004) yaklaşımı benimsenmiştir. Bu yaklaşımda, heyelan oluşmadan önceki morfolojik koşullar, çevredeki heyelan poligonlarından çıkarılabilir. Literatürde yer alan heyelan duyarlılık çalışmalarında sıklıkla yapılan hatanın, heyelan poligonları içerisinde örneklem yapılması olduğu San (2014), Ada ve San (2018), Aktaş ve San (2018) çalışmalarında belirtilmiştir. Bu çalışmada bahsi geçen durum göz önünde bulundurularak, poligon tabanlı rastgele örnekleme (PBRs) ve bu algoritmanın bir ileri versiyonu olan two-level random sampling (2LRS) kullanılması uygun görülmüştür. Bu örneklem algoritmalarının temelinde örneklerin tohum hücreleri içerisinde rastgele seçimi ilkesi yatmaktadır. Çalışmada tohum hücre alanı için çalışmanın temel ölçeği olan 15m piksel boyutunun 4 katı değer olan 60 m alınmıştır. Bu işlem için Şekil 3.20’de görüldüğü gibi heyelan poligonları için tampon alan belirlenmiş ve akma yönünden 1/3’lük kısım elimine edilmiştir. Bunun sebebi moloz akma veya döküntü alanının heyelan önceki koşulları tanımlamada yetersiz kalmasıdır.



Şekil 3.20. Kartal ilçesinde bulunan bir heyelan gövdesinden tohum hücre poligonu oluşturma



Şekil 3.21. İki Düzeyli Rastgele Örnekleme (2LRS) algoritmasının işleyiş adımları

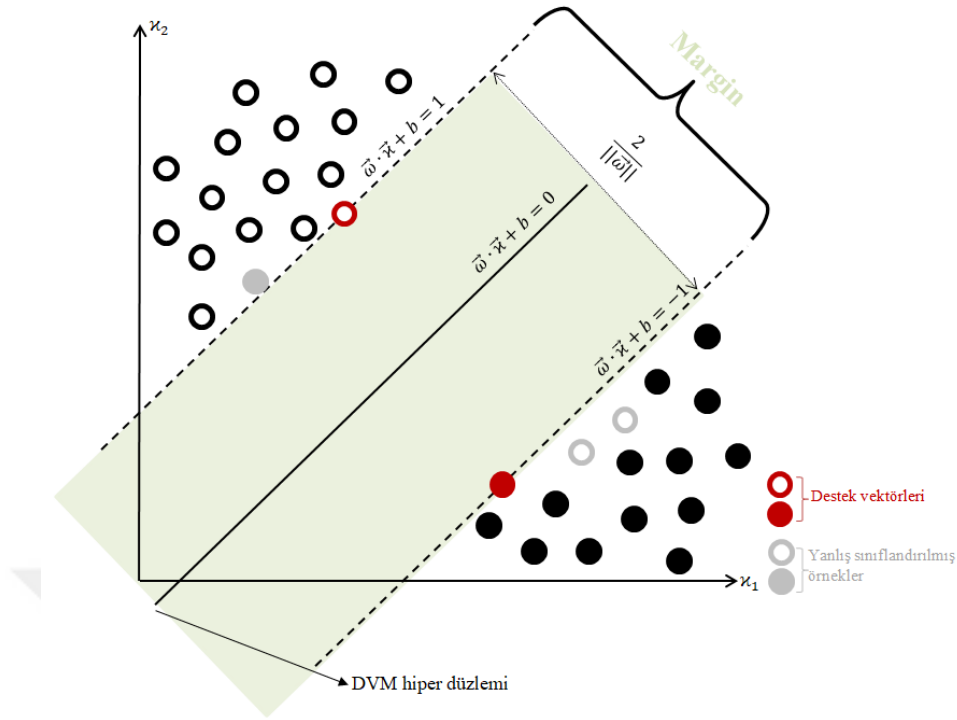
3.2.2. Heyelan duyarlılık haritalaması için makine öğrenme algoritma sınıflandırması

Destek vektör makinesi (DVM) ya da literatür de bilinen adıyla Support vector machine (SVM), makina öğrenme algoritmalarından biridir ve sınıflandırma, regresyon ve ayırt etme gibi uygulamalarda kullanılır. Vapnik'e (1995) göre, SVM algoritması iki temel işleme dayanmaktadır. Bunlardan biri bir hiper düzlemin oluşturulması, diğeri ise bu düzleme göre veri setlerinin ayrılması işlemleridir. Ancak veri setleri her zaman mükemmel bir şekilde hiper düzlem ile ayrılmayabilir. Bu nedenle kernel fonksiyonları kullanılarak, girdi veriler hiper düzlemde ayrılacak şekilde dönüştürülürler. Bu işlem için oluşturulmuş algoritma, verileri n-boyutlu uzayda sınıflandırmak için ve sınıflar arasındaki ayrımı maksimize etmek için bu hiper-düzlemi kullanır. Kısaca bu düzlem, veri noktalarını sınıflara ayırmak için kullanılır. Şekil 3.22'de, iki boyutlu uzayda temel bir iki sınıf ayırma problemini göstermektedir (Borges 1998). Halka ve daire şeklinde gösterilen noktalar iki farklı sınıfı belirtir. SVM, özellikle yüksek boyutlu verilerde ve sınıflar arasındaki sınırın belirsiz olduğu durumlarda yüksek doğruluk oranı sağlar. Bu algoritma, özellikle uzaktan algılama ve görüntü işleme alanlarında sıkça kullanılmaktadır (Yao et al. 2008; Yılmaz 2009; Marjanović et al. 2011; Pradhan 2013; Ada ve San 2018; Manap ve San 2022). Destek vektör makinesinin avantajları şu şekilde özetlenebilir;

- i. Etkili sonuçlar: SVM, diğer sınıflandırma algoritmalarından daha iyi sonuçlar verir. Bu algoritma, doğru sınıflandırma için en iyi hiper-düzlemi seçerek ve maksimum uç (marjinal) ayrımı sağlayarak çalışır.
- ii. İyi performans: SVM, yüksek boyutlu verilerle de iyi performans gösterir. Diğer bazı sınıflandırma algoritmaları, yüksek boyutlu verilerde verimli çalışamayabilir.
- iii. Verimli bellek kullanımı: SVM, veri kümesinin büyüklüğünden bağımsız olarak verimli bellek kullanımı sağlar. Bu nedenle, büyük veri kümelerinde bile etkili sonuçlar verir.
- iv. Esneklik: SVM, farklı çekirdek fonksiyonları kullanarak farklı veri türlerinde kullanılabilir. Bu, SVM'nin esnek bir sınıflandırma yöntemi olmasını sağlar.
- v. İyileştirilmiş genelleme: SVM, veri örneklerindeki gürültüyü filtreleyebilen bir algoritma olduğundan, genelleme performansını artırır. Bu nedenle, SVM, sınıflandırma işlemindeki veri kümelerindeki gürültüyü filtrelemek için ideal bir seçenektir.

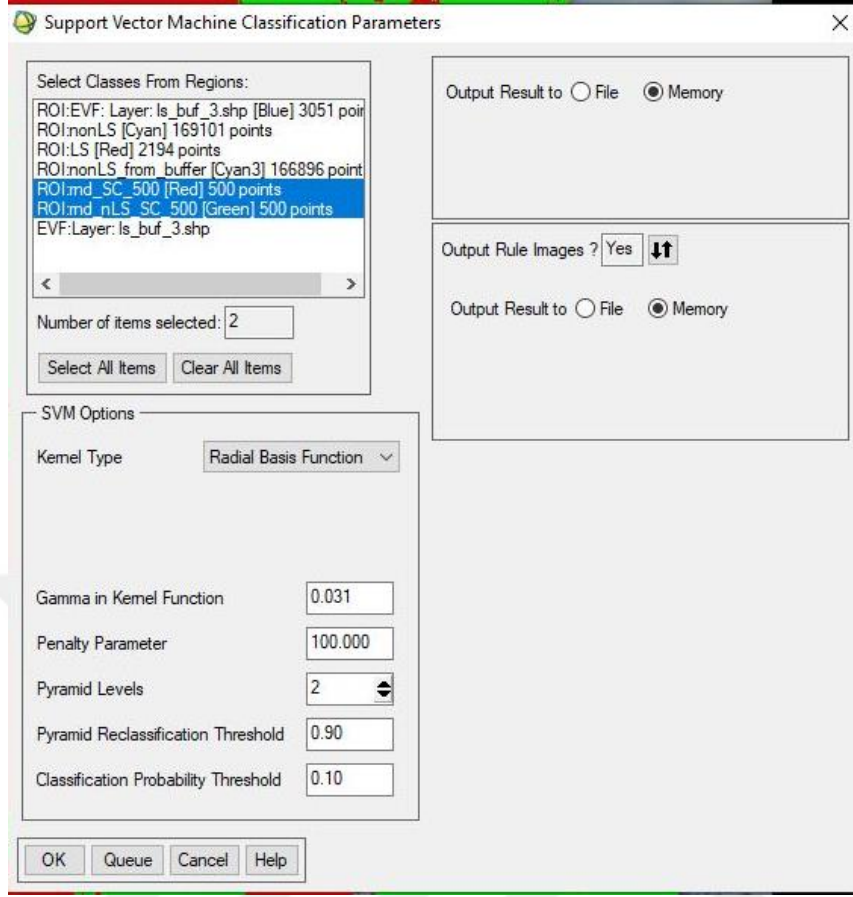
Destek vektör makinesinin bazı dezavantajları ise şunlardır;

- i. Hassas parametre ayarları: SVM, bir dizi parametre ayarı yapılması gerektiren bir algoritmadır. Bu parametrelerin ayarlanması doğru sonuçlar elde etmek için çok önemlidir. Ancak, bu ayarların yapılması acemi bir kullanıcı tarafından zor olabilir.
- ii. Veri ölçeği: SVM, veri özelliklerinin ölçeğiyle ilgili sorunlar yaşayabilir. Veri özellikleri arasında büyük farklılıklar varsa, SVM performansı düşük olabilir. Ancak bu durumu düzeltmek için veriler girdi aşamasında yeniden ölçeklendirilir.



Şekil 3.22. Destek Vektör Makineleri (SVM) modeli (Burges 1998; San 2014)

Çalışmada, tüm veri setlerinin heyelan duyarlılık haritalarını oluşturmak için yukarıda bahsi geçen makine öğrenme algoritmalarından biri olan SVM (Vapnik 1995) kullanıldı. Heyelan duyarlılık haritalaması çalışmalarında etkin bir şekilde kullanılan SVM, denetimli ve denetimsiz olarak yüksek doğruluğa sahip sınıflandırma gerçekleştirir. Bu çalışmada, heyelan duyarlılık haritası oluşturmak için denetimli (eğitilmiş) SVM sınıflandırma uygulanmıştır. Çalışmada kullanılan veri katmanları literatürde San (2014), Ada ve San (2018), Aktas ve San (2019) çalışmalarındaki gibi uydu görüntü analizleri sonuçları, Sayısal Yükseklik Modeli ve türevlerinden üretilen verilerden oluşturulmuştur. Projede toplam 32 veri seti (VNIR, SWIR, TIR, NDVI, dekorelasyon gemesi, temel bileşenler analizi, sayısal yükseklik modeli, eğim, bakı, kanallara olan uzaklık, plan eğriliği, profil eğriliği, topografik ıslaklık indeksi, ls faktörü ve fay hatlarına olan uzaklık) girdi olarak kullanılmıştır. SVM sınıflandırması için bahsi geçen veri setleri ENVI görüntü işleme ve analiz yazılımı kullanılarak bir araya getirilmiştir. Şekil 3.23, parametre optimizasyon işlemi boyunca bulunan her set için elde edilen SVM öğrenme parametrelerini sunmaktadır. Çekirdek tipi, çekirdek fonksiyonunda gamma in kernel function, penalty parameter, pyramid levels, pyramid reclassification threshold, classification probability threshold gibi parametreler seçilerek SVM sınıflandırma işlemi gerçekleştirildi.



Şekil 3.23. Destek Vektör Makineleri (DVM) sınıflandırma parametreleri

3.2.3. Doğruluk değerlendirmeleri

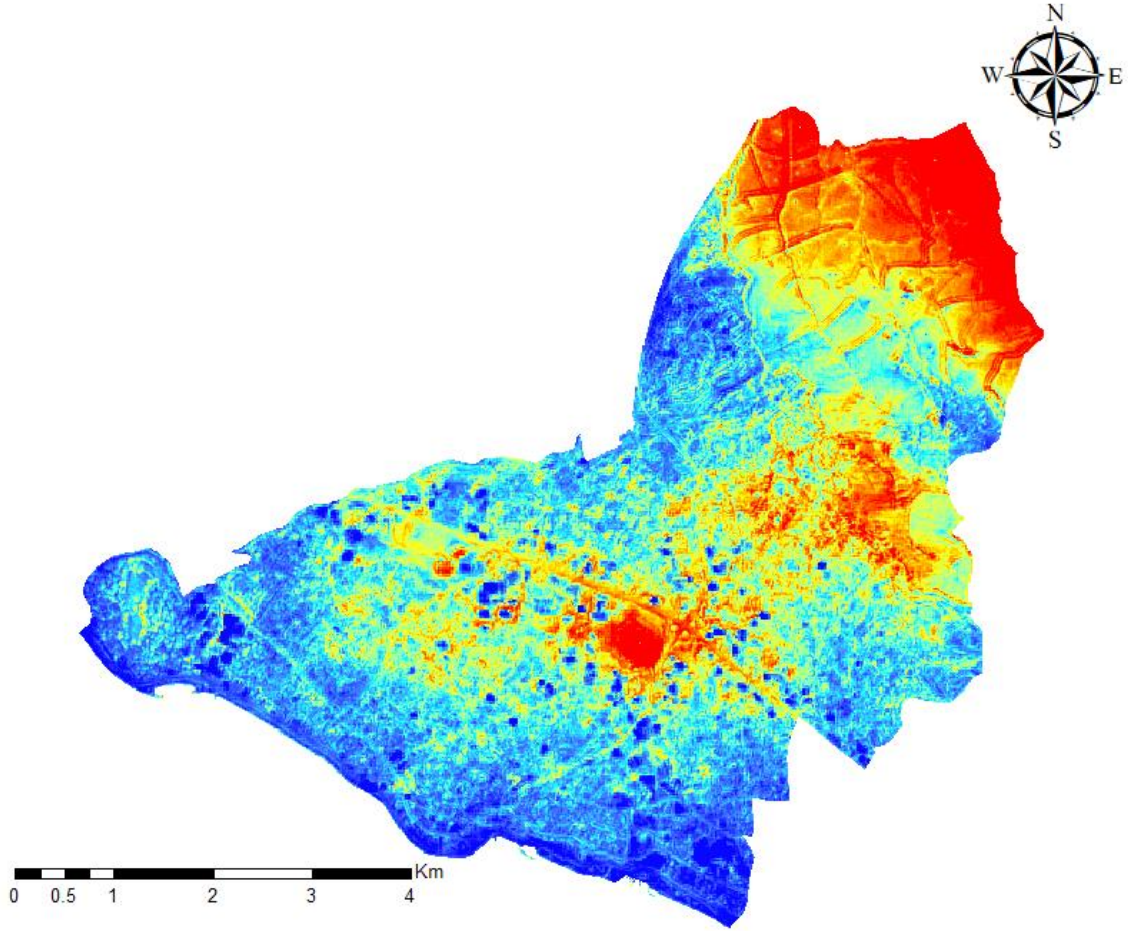
Çalışmanın son adımı doğruluk değerlendirmesidir. Eğri Altındaki Alan (AUC) olarak adlandırılan Alıcı İşletim Karakteristiği (ROC) eğrisi altındaki alan, modellerin mekânsal performansını değerlendirmek amacıyla hesaplanmıştır. Beguería (2006), ROC eğrisinin bir eşik bağımsız doğruluk değerlendirme tekniği olduğunu vurgulayarak, tahmini modelleri onayladığını ifade eder. AUC, Eğri Altındaki Alan anlamına gelir ve ikili sınıflandırma modellerinin performansını değerlendirmek için makine öğreniminde yaygın olarak kullanılan bir ölçüdür. AUC özellikle, modelin pozitif ve negatif sınıfları ayırt etme yeteneğinin bir ölçüsüdür.

AUC'yi hesaplamak için, çeşitli sınıflandırma eşiklerinde Gerçek Pozitif Oranın (TPR) Yanlış Pozitif Orana (FPR) karşı grafiği olan Alıcı Çalışma Karakteristik (ROC) eğrisini çizeriz. Bu eğrinin altındaki alan AUC'dir. Mükemmel bir sınıflandırıcının AUC'si 1.0 iken rastgele bir sınıflandırıcının AUC'si 0.5 olacaktır. Genel olarak, 0,7'nin üzerindeki bir AUC kabul edilebilir olarak kabul edilirken, 0,8'in üzerindeki bir AUC iyi olarak kabul edilir ve 0,9'un üzerindeki bir AUC mükemmel olarak kabul edilir (Lee ve Dan 2005).

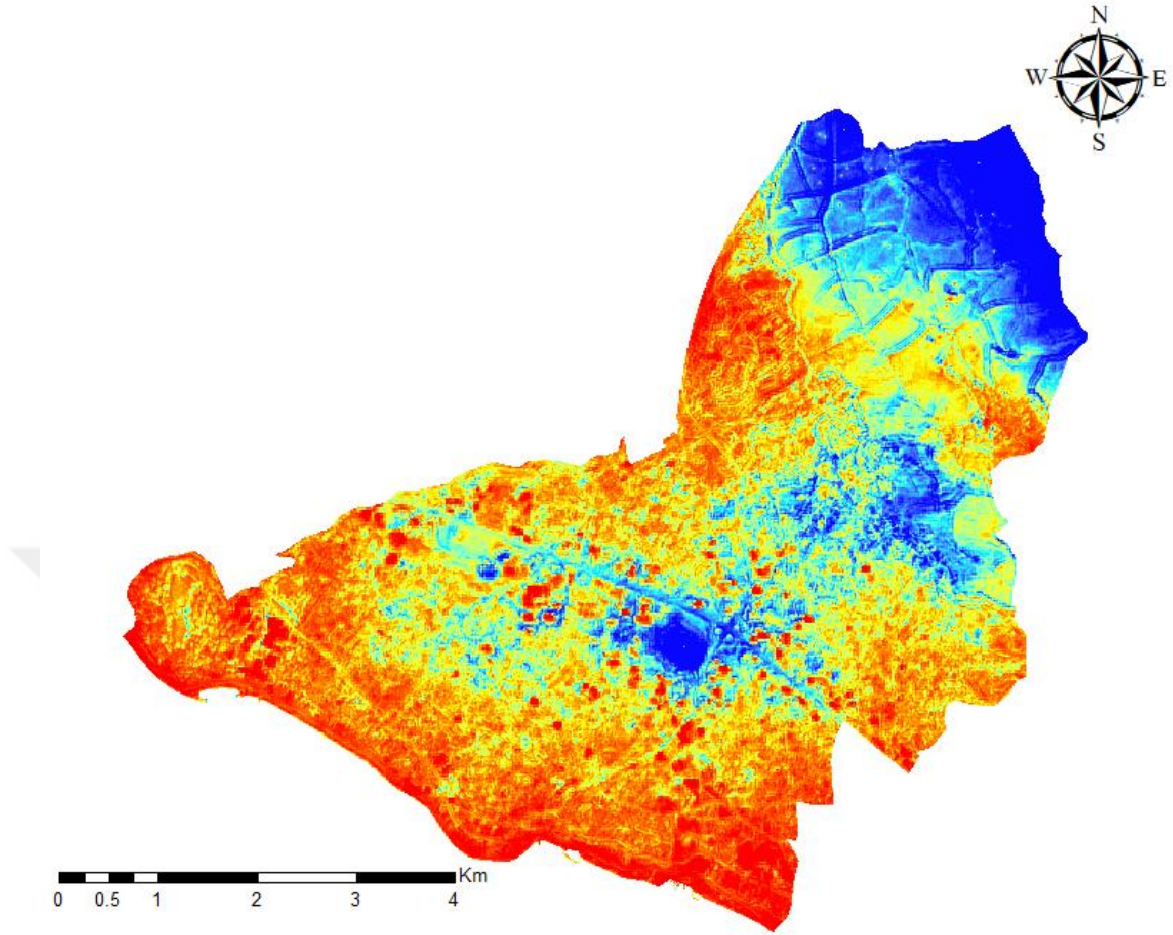
Sınıflandırma sonrasında, sınıflandırma sonuçları için doğruluk değerlendirmesi yapılmıştır. Çalışmada yer alan bütün ROC değerleri, ENVI yazılımı ile AUC değeri ve ROC eğrisi ise Python kullanılarak hesaplandı.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışmada elde edilen SVM sınıflandırması için, toplamda iki adet (heyelan varlık ve yokluk) sınıf bilgisi içeren sınıflandırma sonucu ve her bir sınıfa ait piksellerin olasılık değerlerini hesaplayan iki dosya çıktı olarak elde edildi. Elde edilen bu olasılık haritalarındaki her bir piksel, 0.0 ile 1.0 arasındaki olasılık değerlerini göstermektedir. Bu olasılık değerleri aslında duyarlılık haritalarının temelini oluşturan değerlere karşılık gelmektedir. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de 2 adet olasılık sınıfına ait haritası, uygulanan algoritmalara göre çıktı halinde yer almaktadır.

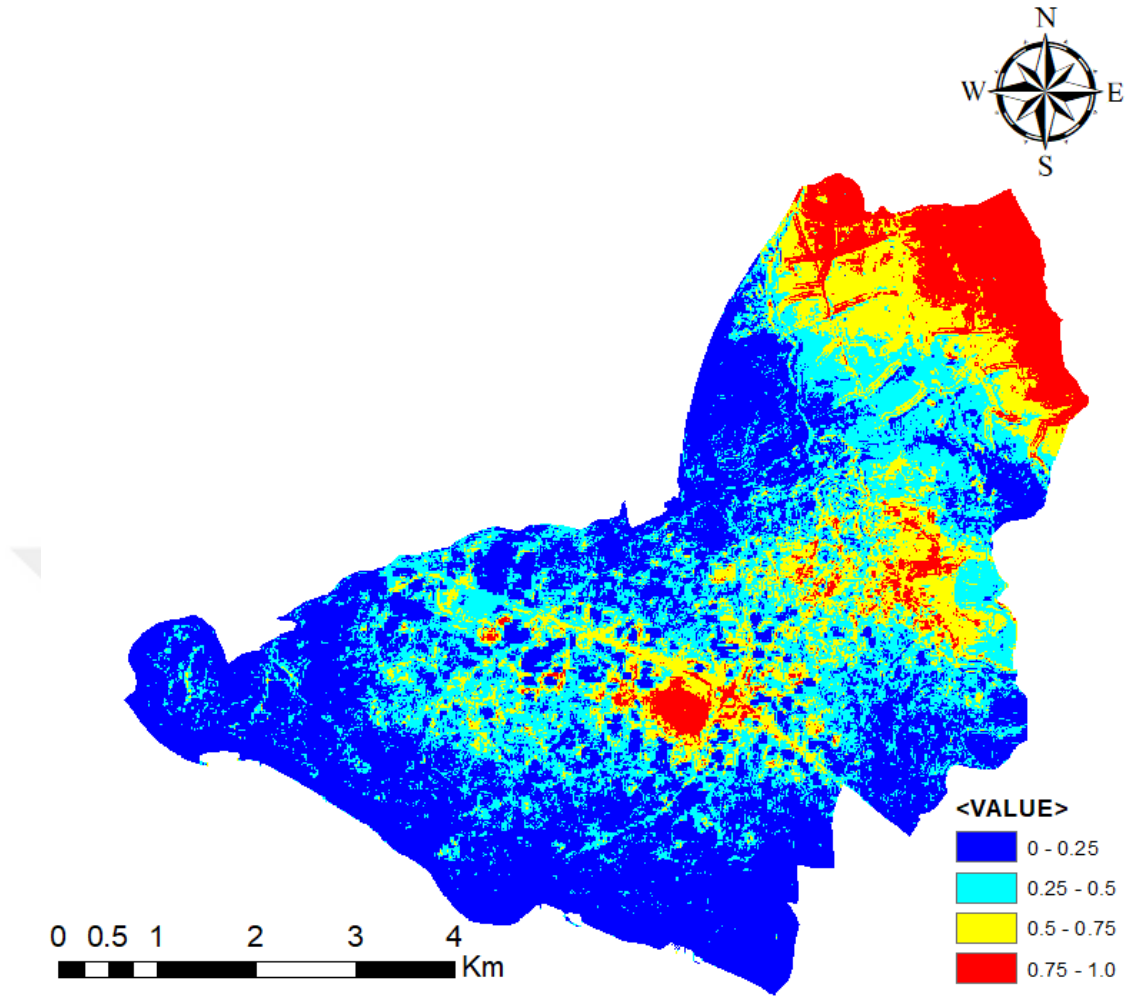


Şekil 4.1. Kartal ilçesinin SVM algoritması kullanılarak üretilen heyelan varlık bilgisine ait olasılık değerleri ile üretilmiş heyelan duyarlılık haritası



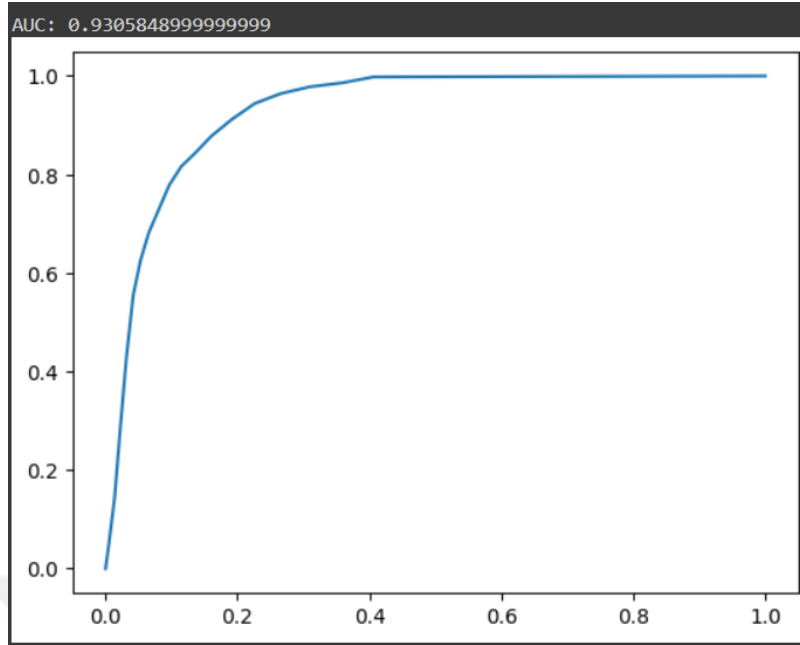
Şekil 4.2. Kartal ilçesinin SVM algoritması kullanılarak üretilen heyelan yokluk bilgisine ait olasılık değerleri ile üretilmiş heyelan duyarlılık haritası

SVM sınıflandırma algoritması kullanılarak üretilen heyelan duyarlılık haritasında, haritadaki her bir piksel 0.0 ile 1.0 aralığının da duyarlılık değerlerini göstermekte olup dört eşit sınıfa (0.0, 0.25, 0.5, 0.75 ve 1.0) bölünerek sınıflandırılmıştır. Her bir duyarlılık haritası, yüksek, duyarlı, düşük ve çok düşük olmak üzere dört farklı sınıfın verisini sunmaktadır. Heyelan duyarlılık sonuçlarının mekânsal dağılımının analizi yapıldığında, sınıflandırma sürecinde üretilen çıktı arasında tutarlılık olduğu gözlemlenmektedir. Üretilen heyelan duyarlılık haritasına bakıldığında yüksek duyarlı ve duyarlı bölgeler ilçenin orta kesiminden başlayarak Kuzeyine doğru ilerlemektedir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Kartal ilçesinin SVM algoritması Equal İnterval yöntemiyle üretilen heyelan duyarlılık haritası

Sınıflandırma sonrasında, sınıflandırma sonuçları için doğruluk değerlendirmesi yapılmıştır. Çalışmada yer alan bütün ROC değerleri, ENVI yazılımı ile AUC değeri ve ROC eğrisi ise Python kullanılarak hesaplandı. Aşağıda Python programla dili ile yazılan kodlamada AUC değeri hesaplama ve ROC eğrisi çizdirme kodu yer almaktadır. Şekil 4.4’de gösterilmekte olan sınıflandırma sonucunda Python kodu kullanılarak çizdirilen ROC eğrisi ve AUC sonucu yer almaktadır. Destek Vektör Makineleri ile elde edilen sınıflandırmanın sonucunda iyi performans gösterdiği görülmektedir. Elde edilen sonuçlar, yüksek mekânsal performansa sahip sonuç ve doğruluk değeri vermiştir.



şekil 4.4. Python kullanılarak çizdirilen ROC eğrisi ve AUC değeri

Çalışmada kullanılan verilerin büyük bir bölümü uydu bazlı veriler olup, çeşitli avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Veriye hızlı erişim, kullanım rahatlığı avantaj olurken, verinin güncelliği ve çözünürlüğü ise dezavantaj olabilmektedir. Bu bağlamda kullanılan verilerin güncelliği ve çözünürlüğü elde edilecek sonuç duyarlılık haritası için oldukça önemlidir. Özellikle arazi kullanımı ve arazi örtüsü verisi için üretilen dekorelasyon gemesi, temel bileşenler analizi, NDVI verileri doğrudan arazi örtüsü ile ilişkilidir. Çalışma alanı olan Kartal ilçesi de oldukça dinamik değişimlerin görüldüğü inşaat faaliyetlerinin bulunduğu bir bölge olduğu için, heyelan duyarlılık haritalarının güncel koşullara ve veriye göre yenilenmesi gerekecektir.

Heyelan duyarlılık haritalamalarında elde edilen sonuç harita, mevcut koşullar değişmediği takdirde beklenen sonucu vermektedir. Dolayısıyla yağış rejimi, çevresel faktörler (antropojenik etkiler) değişmemiş kabul edilmiştir. Bu nedenle, sürekli değişimlerin olduğu metropol alanlarında veri güncelliği önem kazanmakta olup, bu tip çalışmalarda göz önünde bulundurulmalıdır.

5. SONUÇLAR

Çalışmada uydu görüntüleri ve makine öğrenme algoritmaları kullanarak Kartal ilçe sınırları içindeki bölge için heyelan duyarlılık haritalaması yapılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda; ASTER uydu görüntüsü ve İstanbul ili, Kartal İlçesine ait heyelan envanter haritası ana veri seti olarak seçilerek kullanılmıştır. Üç ana sınıfa ayrılacak şekilde 15 farklı girdi parametresi (görünür ve yakın kızılötesi, kısa dalga boylu kızılötesi, termal kızılötesi, normalleştirilmiş fark bitki örtüsü indeksi, dekorelasyon germesi, temel bileşenler analizi, sayısal yükseklik modeli, eğim, bakı, kanallara olan uzaklık, plan eğriliği, profil eğriliği, topografik ıslaklık indeksi, LS faktör ve fay hatlarına olan uzaklık) olarak topoğrafik, morfometrik ve spektral parametreler kullanılmıştır. Uzaktan algılama tekniklerinden olan makine öğrenme algoritması, İki Düzeyli Rastgele Örnekleme yöntemiyle heyelan duyarlılık haritalaması gerçekleştirilmiştir.

Heyelan duyarlılık haritalamasında girdi verilerin çözünürlüğü ve kalitesi elde edilecek heyelan duyarlılık haritasına doğrudan etki etmektedir. Bu çalışma ile bir metropol alanında yüksek nüfus ve ticari faaliyet bölgesinde uydu görüntüleri bazlı girdi veriler kullanarak bir heyelan duyarlılık yaklaşımı sergilenmiştir. Çalışmada sınıflandırma doğruluğu oldukça yüksek olan makine öğrenme algoritması, destek vektör makinası, iki seviyeli rastgele örneklem algoritması ile kullanılmıştır. Üretilen heyelan duyarlılık haritalarının doğruluk değerleri olarak Python programla dili ile yazılan kodlamada hesaplanan AUC değerleri %93 olarak elde edilmiştir. Bu değer eşik değer bağımsız hesaplanan mekânsal bir performans göstergesi olup, oldukça yüksek doğruluğa sahip olduğunu göstermektedir.

Elde edilen heyelan duyarlılık haritasına ile en yüksek heyelan duyarlılık değerlerinin hesaplandığı alanlar Kartal İlçe sınırının kuzey bölümünde Aydos ormanlarını içine alan bölgede olduğu görülmüştür. Bununla birlikte ilçe sınırı içerisinde yer alan taşocaklarına ait yapay gölet de çalışmada yüksek duyarlılığa sahip olarak belirlenmiştir.

Heyelanlar için en temel tetikleyici faktörlerden birisi yağış, diğeri ise depremdir. Yağış rejiminin kısa vadede değişmeyeceği göz önüne alındığında ve çalışma sahasının ülkemizin en önemli diri fay hatlarından biri olan Kuzey Anadolu Fayının yaklaşık 13 km kuzeyinden geçtiği düşünüldüğünde heyelan duyarlılık haritasının önemli bir çıktı olduğu görülmektedir. Dolayısıyla bu çalışmada gerçekleştirilen çalışmalar ile birlikte deprem konusu da tamamlayıcı bir etkidir. 6 Şubat 2023 tarihinde ülkemizde gerçekleşen Kahramanmaraş, Hatay başta olmak üzere toplam 11 ili etkileyen büyük depremle birlikte heyelanların da bölgedeki yaşamı ve aktiviteyi etkileyen bir olgu olduğunu bir kez daha gözler önüne sermiştir.

Gerçekleştirilen heyelan duyarlılık haritalaması çalışması, mekânsal olarak çok duyarlı/duyarlı bölgelerin tespiti ve bu bölgelerin belirlenerek planlama çalışmalarına altlık teşkil etmesine olanak sağlayacaktır. Bu durum da afet yönetiminde zarar azaltma ve önleme çalışmalarına katkı sağlayacaktır. Bu çalışma elde edilebilen ulaşılabilir veriler ile üretilmiş olup, sonrasında bölgede gerçekleştirilecek diğer çalışmalar için yöntem bazında yol gösterir nitelikte olacaktır.

6. KAYNAKLAR

- Ada, M., San, B.T., 2018. Comparison of machine-learning techniques for landslide susceptibility mapping using two-level random sampling (2LRS) in Alakir catchment area, Antalya, Turkey. *Nat Hazards* 90, 237–263. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-3043-8>
- AFAD. (2014). Açıklamalı Afet Yönetimi Terimleri Sözlüğü. TC Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Deprem Dairesi Başkanlığı, Ankara.
- AFAD. (2018). Türkiye’de Afet Yönetimi ve Doğa Kaynaklı Afet İstatistikleri. T.C. İç İşleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.
- Akgun, A. Sezer. E.A. Nefeslioglu, H.A. Gokceoglu, C. Pradhan, B. (2012). An easytouse MATLAB program (MamLand) for the assessment of landslide susceptibility using a Mamdani fuzzy algorithm. *Comput Geosci*, 38:23–34.
- Akgun, A., Dag, S., & Bulut, F. (2008). Landslide susceptibility mapping for a landslide-prone area (Findikli, NE of Turkey) by likelihood-frequency ratio and weighted linear combination models. *Environmental geology*, 54(6), 1127-1143
- Akgun, A., & Türk, N. (2010). Landslide susceptibility mapping for Ayvalik (Western Turkey) and its vicinity by multicriteria decision analysis. *Environmental Earth Sciences*, 61(3), 595-611.
- Akgün, A., & Bulut, F. (2007). GIS-based landslide susceptibility for Arsin-Yomra (Trabzon, North Turkey) region. *Environmental geology*, 51(8), 1377-1387.
- Aktas, H. and San, B. T., 2019. Landslide susceptibility mapping using an automatic sampling algorithm based on two level random sampling, *Computers & Geosciences*, Volume 133, 104329, ISSN 0098-3004, <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2019.104329>.
- Aleotti, P. ve Chowdhury, R. 1999. Landslide Hazard Assessment: Summary Review And New Perspectives. *Bull. Eng. Geoll. Env.*, 58, 21-44.
- Anonim, 2009. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığının Teşkilat ve Görevleri Hakkında Kanun, Kanun Numarası: 5902 Kabul Tarihi: 29/5/2009 Resmi gazete Tarih: 17/6/2009 Sayı: 27261.
- Atkinson, P.M., Massari, R. 1998. Generalised linear modelling of susceptibility to landsliding in the central Appenines, Italy.

- Ayalew, L., & Yamagishi, H. (2005). The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*, 65(1-2), 15-31.
- Baeza, C., Lantada, N., & Moya, J. (2010). Validation and evaluation of two multivariate statistical models for predictive shallow landslide susceptibility mapping of the Eastern Pyrenees (Spain). *Environmental Earth Sciences*, 61(3), 507-523.
- Baeza, C. Corominas, J. 2001. Assessment of shallow landslide susceptibility by means of multivariate statistical techniques. *Earth Surf Proc Land*, 26:1251–1263.
- Bahrami, Y., Hassani, H. & Maghsoudi, A. Landslide susceptibility mapping using AHP and fuzzy methods in the Gilan province, Iran. *GeoJournal* 86, 1797–1816 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10708-020-10162-y>.
- Basu, T., & Pal, S. (2017). Exploring landslide susceptible zones by analytic hierarchy process (AHP) for the Gish River Basin, West Bengal, India. *Spatial Information Research*, 25(5), 665-675.
- Bui, D. Pradhan, B. Lofman, O. Revhaug, I. Dick, O. 2012. Landslide susceptibility mapping at Hoa Binh province (Vietnam) using an adaptive neuro fuzzy inference system and GIS. *Comput Geosci*, 45:199–211.
- Burges, C.J.C., 1998. A Tutorial on Support Vector Machines for Pattern Recognition, in: Fayyad, U. (Ed.), *Data Mining and Knowledge Discovery*. Kluwer Academic Publishers, Boston, The Netherlands, pp. 121-167.
- Can, T. Nefeslioglu, H.A. Gokceoglu, C. Sonmez, H. Duman, T.Y. 2005. Susceptibility assessments of shallow earthflows triggered by heavy rainfall at three subcatchments by logistic regression analyses. *Geomorphology*, 72:250–271
- Chen, W. Xie, X. Wang, J. Pradhan, B. Hong, H. Bui, DT. Duan, Z. Ma, J. 2017. A comparative study of logistic model tree, random forest, and classification and regression tree models for spatial prediction of landslide susceptibility. *CATENA*, 151:147–160.
- Chung, F.C., Fabbri, A.G. and van Westen, C.J. 1995. Multivariate regression analysis for landslide hazard zonation. In: Carrara, A. and Guzzetti, F. (eds.) *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands, 107-142.
- CRED. (2021). *Natural Disasters*.

- Dai, F., & Lee, C. (2001). Terrain-based mapping of landslide susceptibility using a geographical information system: a case study. *Canadian Geotechnical Journal*, 38(5), 911-923.
- Dai, F., Lee, C., Li, J., & Xu, Z. (2001). Assessment of landslide susceptibility on the natural terrain of Lantau Island, Hong Kong. *Environmental geology*, 40(3), 381-391.
- Das, I. Sahoo, S. Van W.C. Stein, A. Hack, R. 2010. Landslide susceptibility assessment using logistic regression and its comparison with a rock mass classification system, along a road section in the northern Himalayas (India). *Geomorphology*, 114:627–637
- Das, I. Stein, A. Kerle, N. Dadhwal, V.K. 2012. Landslide susceptibility mapping along road corridors in the Indian Himalayas using Bayesian logistic regression models. *Geomorphology*, 179:116–125.
- Dominguez-Cuesta, M. Jime'nez-Sa'nchez, M. Berrezueta, E. 2007. Landslides in the Central Coalfield (Cantabrian Mountains, NW Spain): geomorphological features, conditioning factors and methodological implications in susceptibility assessment. *Geomorphology*, 89:358–369.
- Duman T.Y., Can T., Gökçeoğlu C., Nefeslioglu H.A. 2005. Landslide susceptibility mapping of Çekmece area (Istanbul, Turkey) by conditional probability. *Hydrol Earth Syst Sci Discuss* 2:155–208. <http://www.hydrol-earth-syst-scidiscuss.net/2/155/2005/hessd-155-2005.html>
- Duman, T.Y. Can, T. Gokceoglu, C. Nefeslioglu, H.A. Sonmez, H. 2006. Application of logistic regression for landslide susceptibility zoning of Cekmece Area, Istanbul, Turkey. *Environ Geol*, 51:241–256.
- Eker, R., & Aydın, A. (2014). Ormanların heyelan oluşumu üzerindeki etkileri. *Türkiye Ormancılık Dergisi*, 15(1), 84-93
- Elmacı, H., Tekin, S., ve Ünsal, N. 2017. Coğrafi Bilgi Sistemi Tabanlı Mantıksal Regresyon Yöntemi Kullanılarak Çubuk-Kalecik (Ankara) Şabanözü (Çankırı) Arasının Heyelan Duyarlılık Değerlendirmesi. *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, (155), 165-190.
- Ercanoğlu, M. (2005). Landslide susceptibility assessment of SE Bartın (West Black Sea region, Turkey) by artificial neural networks.
- Ercanoğlu, M. ve Gökçeoğlu, C. 2002. Assessment Of Landslide Susceptibility For A Landslide Prone Area (North of Yenice, NW Turkey) by Fuzzy Approach. *Environmental Geology*, 41 (6), 720-730.

- Ercanoglu, M., Kasmer, O., & Temiz, N. (2008). Adaptation and comparison of expert opinion to analytical hierarchy process for landslide susceptibility mapping. *Bulletin of Engineering Geology and the environment*, 67(4), 565- 578.
- Ercanoğlu, M. and Gökçeoğlu, C. 2004. Use of fuzzy relations to produce landslide Susceptibility map of a landslide prone area (West Black Sea Region, Turkey). *Engineering Geology*, 75:3-4 229-250.
- Ercanoglu, M., & Temiz, F. (2011). Application of logistic regression and fuzzy operators to landslide susceptibility assessment in Azdavay (Kastamonu, Turkey). *Environmental Earth Sciences*, 64(4), 949-964.
- Ergünay, O., 2002. Afete hazırlık ve afet yönetimi. Türkiye Kızılay Derneği Genel Müdürlüğü Operasyon Merkezi (AFOM), Ankara.
- Ergünay, O., Gülkan, P., & Güler, H. (2008). Afet Yönetimi ile İlgili Terimler: Açıklamalı Sözlük. Afet Zararlarını Azaltmanın Temel İlkeleri. JICA Türkiye Ofisi, Yayın o, 2, 301-353.
- Erkal, T. ve Değerliyurt, M. 2009. Türkiye’de afet yönetimi. *Doğu Coğrafya Dergisi*, 14:22, 147-164.
- Fernandez, C.I., DelCastillo, T.F., ElHamdouni, R., Montero, J.C. 1999. Verification of landslide susceptibility mapping: A case study. *Earth Surf Proc Landforms* 24:537–544
- Gillespie, A., Kahle, A., Walker, R., 1987. Color enhancement of highly correlated images. I. Decorrelation and HSI contrast stretches. *Remote Sensing of Environment* 20, 209–235
- Glade T., 1997. Establishing the Frequency and Magnitude of Landslide-Trigging Rainstorm Events in New Zealand. *Environmental Geology* 35 (2-3) August 1998
- Gomez, H. Kavzoglu, T. 2005. Assessment of shallow landslide susceptibility using artificial neural networks in Jabonosa River Basin, Venezuela. *Eng Geol*, 78:11– 27.
- Gorsevski, P.V., Gessler, P., Foltz, R.B 2000. Spatial prediction of landslide hazard using logistic regression and GIS. In: *Proceed-ings of 4th International Conference on Integrating GIS and environmental modelling: problems, prospects and research needs*, Banff, Alberta, 2–8 September 25–27
- Gökçe, O., Özden, Ş., & Demir, A. (2008). Türkiye’de afetlerin mekansal ve istatistiksel dağılımı. Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara

- Gökçeoğlu, C., & Ercanoğlu, M. (2001). Heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanmasında kullanılan parametrelere ilişkin belirsizlikler. *Yerbilimleri Dergisi*, 22(23), 189-206.
- Guha-Sapir, D., Hoyois, P., Wallemacq, P., & Below, R. (2016). Annual disaster statistical review 2016: The numbers and trends brussels. Brussels: CRED.
- Guzzetti, F. Carrarra, A. Cardinali, M. Reichenbach, P. 1999. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, 31:181–216.
- Hasekioğulları, G. D., and Ercanoğlu, M. (2012). A new approach to use AHP in landslide susceptibility mapping: a case study at Yenice (Karabuk, NW Turkey). *Natural Hazards*, 63(2), 1157- 1179.
- Hungr, O., Lerouseil S., Picarelli, L. (2013) The varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11, 167-194.
- Ildır, B.1995. Türkiyede heyelanların dağılımı ve afetler yasası ile ilgili uygulamalar. In: Onalp A (ed)Proceedings of 2nd national landslide symposium. Sakarya University, Turkey, pp 1–9 (in Turkish)
- Kadıoğlu, M. 2011. Afet yönetimi: Beklenilmeyeni beklemek, en kötüsünü yönetmek. T.C. Marmara Belediyeler Birliği Yayını, Yayın No: 65.
- Kadıoğlu, M., & Özdamar, E. (2008). Afet zararlarını azaltmanın temel ilkeleri. JICA Türkiye Ofisi Yayınları(2), 1-34.
- Kanlı, İ. B., D. (2018). Küreselleşme ve Çevre Sorunları Bağlamında Göç: İklim Mültecileri. *Siyaset, Ekonomi ve Yönetim Araştırmaları Dergisi*, 6(3).
- Lee, S. Min, K. 2001. Statistical analysis of landslide susceptibility at Yongin, Korea. *Environ Geol*, 40(1095–1113):263.
- Lee, S. (2004). Application of likelihood ratio and logistic regression models to landslide susceptibility mapping using GIS. *Environmental Management*, 34(2), 223-232.
- Lee, S., Ryu, J.-H., Won, J.-S., & Park, H.-J. (2004). Determination and application of the weights for landslide susceptibility mapping using an artificial neural network. *Engineering Geology*, 71(3-4), 289-302.
- Lee, S., & Talib, J. A. (2005). Probabilistic landslide susceptibility and factor effect analysis. *Environmental geology*, 47(7), 982-990.
- Lee, S. Pradhan, B. 2007. Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models. *Landslides*, 4:33–41.

- Manap, H.S., San, B.T., 2022. Data Integration for Lithological Mapping Using Machine Learning Algorithms. *Earth Sci Inform* 15, 1841–1859. <https://doi.org/10.1007/s12145-022-00826-3>
- Marjanovic, M., Kovacevic, M., Bajat, B., Vozenilek, V., 2011. Landslide susceptibility assessment using SVM machine learning algorithm. *Engineering Geology* 123, 225–234.
- Moore, I.D., Grayson, R.B., Ladson, A.R., (1991). Dijital arazi modellemesi: bir inceleme hidrolojik, jeomorfolojik ve biyolojik uygulamalar. *Hidrolojik Prosesler* 5, 3-30.
- Moore, I., Wilson, J., 1992. Length-slope factors for the revised universal soil loss equation: simplified method for estimation. *Journal of Soil and Water Conservation* 47, 423–428
- Nefeslioglu, H., Sezer, E., Gokceoglu, C., Bozkir, A., & Duman, T. (2010). Assessment of landslide susceptibility by decision trees in the metropolitan area of Istanbul, Turkey. *Mathematical Problems in Engineering*, 2010.
- Nefeslioglu, H. A., San, B. T., Gokceoglu, C., & Duman, T. (2012). An assessment on the use of Terra ASTER L3A data in landslide susceptibility mapping. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 14(1), 40-60.
- Nefeslioglu, H.A. Gokceoglu, C. Sonmez, H. 2008. An assessment on the use of logistic regression and artificial neural networks with different sampling strategies for the preparation of landslide susceptibility maps. *Eng Geol*, 97:171–191.
- Nurlu, M., Ozsarac, V., Özmen, B.A. 1997. Case of study using remote sensing and GIS techniques after Dinar (SW Turkey). *Earthquake international symposium on geology and environment*, September 1–5, İstanbul
- Oh, H.J. Pradhan, B. 2011. Application of a neuro-fuzzy model to landslide susceptibility mapping for shallow landslides in a tropical hilly area. *Comput Geosci*, 37:1264–1276.
- Önsüz, M., & Atalay, B. (2015). Afet Lojistiği. *Osmangazi Tıp Dergisi*, 37(3), 1-6.
- Öztürk, K. 2002. Heyelanlar ve Türkiye’ye etkileri. *G.Ü. Gazi Eğitim Fakültesi Dergisi*, 22:2, 35-50.
- Öztürk, D. 2009. CBS Tabanlı Çok Ölçütlü Karar Analizi Yöntemleri ile sel ve taşkın duyarlılığının belirlenmesi: Güney Marmara Havzası örneği. *Doktora Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 243844.
- Pradhan, B., 2013. A comparative study on the predictive ability of the decision tree, support vector machine and neuro-fuzzy models in landslide susceptibility mapping using GIS. *Computers & Geosciences* 51, 350–365.

- Pradhan, B. Lee, S. Buchroithner, M. 2009. Use of geospatial data for the development of fuzzy algebraic operators to landslide hazard mapping: a case study in Malaysia. *Appl Geomat*, 1:3–15.
- Saito, H. Nakayama, D. Matsuyama, H. 2009. Comparison of landslide susceptibility based on a decision-tree model and actual landslide occurrence: the Akaishi Mountains, Japan. *Geomorphology*, 109:108–121.
- San, B.T., 2014. An evaluation of SVM using polygon-based random sampling in landslide susceptibility mapping: The Candir catchment area (western Antalya, Turkey) *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 26 , 399-412.
- Sawada, Y., Bhattacharyay, R., & Kotera, T. (2011). Aggregate impacts of natural and man-made disasters: A quantitative comparison: Research Inst. of Economy, Trade and Industry.
- Seyyar, N., Yıldırım, Y. Y., Fitöz, E., Yılmaz, N., Aksoy, P., Talay, T., Bostancıoğlu, İ., Duran, K., Kahraman, T. (2020). İstanbul İli Kartal-Maltepe İlçeleri Heyelan Farkındalık Kitapçığı, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, Deprem Risk Yönetimi ve Kentsel İyileştirme Daire Başkanlığı, Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü. 79s.
- Suzen, M. L., Doyuran, V. (2004). Data driven bivariate landslide susceptibility assessment using geographical information systems: a method and application to Asarsuyu catchment, Turkey. *Engineering Geology*, 71, s.303 – 321
- Suzen, M.L. Kaya, B.S. 2012. Evaluation of environmental parameters in logistic regression models for landslide susceptibility mapping. *Int J Dig Eart*, 5:338–355.
- Şahin, N. 2009. Afet yönetimi ve acil yardım planları. TMMOB İzmir Kent Sempozyumu, 8-10 Ocak, İzmir.
- Taştan, B. ve Aydınoglu, A. Ç. 2015. Çoklu afet risk yönetiminde tehlike ve zarar görülebilirlik belirlenmesi için gereksinim analizi. *Marmara Coğrafya Dergisi*, 31, 366-397.
- Temiz, A. (2005). Coğrafi Bilgi Sistemleri Kullanılarak Heyelan Duyarlılık Haritalarının Hazırlanması: Karabük Örneği, Deprem Sempozyumu, Kocaeli.
- Tetik Biçer, Ç. (2017). Heyelan Risk Haritalaması Üzerine Yarı Sayısal Bir Değerlendirme.
- UNDRR. 2024. Terminology. <https://www.undrr.org/terminology>
- UNISDR. (2017). Man-made and Technological Hazards
- Van Westen, C. J. 1993. Application of geographic information systems to landslide hazard zonation. ITC Publication No:15. International Institute for Aerospace and Earth Resources Survey, Enschede, The Netherlands.

- Van Westen, C., Rengers, N., & Soeters, R. (2003). Use of geomorphological information in indirect landslide susceptibility assessment. *Natural Hazards*, 30(3), 399-419.
- Van Westen, C., Van Asch, T. W., & Soeters, R. (2006). Landslide hazard and risk zonation—why is it still so difficult? *Bulletin of Engineering Geology and the environment*, 65(2), 167-184.
- Wan, S. 2009. A spatial decision support system for extracting the core factors and thresholds for landslide susceptibility map. *Eng Geol*, 108:237–251
- Wang, H., & Sassa, K. (2005). Comparative evaluation of landslide susceptibility in Minamata area, Japan. *Environmental geology*, 47(7), 956-966.
- Wang, W.-D., Guo, J., Fang, L.-G., & Chang, X.-S. (2012). A subjective and objective integrated weighting method for landslides susceptibility mapping based on GIS. *Environmental Earth Sciences*, 65(6), 1705-1714.
- Vapnik, V., 1995. *Nature of Statistical Learning Theory*. John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Varnes, D. 1978. Landslides types and processes, landslides and engineering practice. In: Eckel E (ed) *Highway research board spec report*. National Research Council, Washington, 20–47.
- Varnes, D.J. 1978. Slope movement types and processes, in Schuster, R.L., and Krizek, R.J., eds., *Landslides—Analysis and control*: National Research Council, Washington, D.C., Transportation Research Board, Special Report, 176: 11–33.
- Wilson, J.P., Gallant, J.C., 2000. *Arazi Analizi İlkeleri ve Uygulamaları*. John Wiley and Sons, Inc., Kanada.
- Yalcin, A., & Bulut, F. (2007). Landslide susceptibility mapping using GIS and digital photogrammetric techniques: a case study from Ardesen (NE-Turkey). *Natural Hazards*, 41(1), 201-226.
- Yalcin, A., Reis, S., Aydinoglu, A., & Yomralioglu, T. (2011). A GIS-based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistics regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey. *Catena*, 85(3), 274-287.
- Yao, X., Tham, L.G., Dai, F.C., 2008. Landslide susceptibility mapping based on support vector machine: a case study on natural slopes of Hong Kong, China. *Geomorphology* 101, 572–582.
- Yeon, Y.K. Han, J.G. Ryu, K.H. 2010. Landslide susceptibility mapping in Injae, Korea, using a decision tree. *Eng Geol*, 116:274–283.
- Yesilnacar, E. Topal, T. 2005. Landslide susceptibility mapping: a comparison of logistic regression and neural networks methods in a medium scale study, Hendek region (Turkey). *Eng Geol*, 79:251–266

- Yilmaz, C., Topal, T., & Süzen, M. L. (2012). GIS-based landslide susceptibility mapping using bivariate statistical analysis in Devrek (Zonguldak-Turkey). *Environmental Earth Sciences*, 65(7), 2161-2178.
- Yilmaz, I., 2009. Landslide susceptibility mapping using frequency ratio, logistic regression, artificial neural networks and their comparison: a case study from Kat landslides (Tokat, Turkey). *Computers & Geosciences* 35, 1125–1138



ÖZGEÇMİŞ

Aslı İlgin HORZUM

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2021-2024	Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2016-2020	Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Antalya