

T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİNGÖL İLİ ADAKLI İLÇESİ GÜNGÖRSÜN KÖYÜNDE
KAYA DÜŞMELERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet Emin AYDIN

TOPRAK BİLİMİ VE BİTKİ BESLEME ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
Prof. Dr. Alaaddin YÜKSEL

Bingöl-2025



T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİNGÖL İLİ ADAKLI İLÇESİ GÜNGÖRSÜN KÖYÜNDE KAYA DÜŞMELERİNİN
DEĞERLENDİRİLMESİ**

Prof. Dr. Alaaddin YÜKSEL danışmanlığında, Mehmet Emin AYDIN tarafından hazırlanan bu çalışma 12/09/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak **oy birliği** ile kabul edilmiştir.

Başkan	: Prof. Dr. Alaaddin YÜKSEL	İmza:
Üye	: Prof. Dr. Ali Rıza DEMİRKIRAN	İmza:
Üye	: Prof. Dr. Abdulkadir SÜRÜCÜ	İmza:

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulunun/...../.....tarih ve...../..... nolu
kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Zafer ŞİAR
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖNSÖZ

Yüksek Lisans öğrenimim ve tez çalışmam süresince tüm bilgilerini benimle paylaşmaktan kaçınmayan her türlü konuda desteğini benden esirgemeyen ve tezimde büyük emeği olan, aynı zamanda kişilik olarak da bana çok şey katan Sayın Hocam Prof. Dr. Alaaddin YÜKSEL'e, Maddi ve manevi olarak her zaman desteklerini hissettiren ANNEME ve Kız arkadaşım Nurnehir ŞAHİN'e

Desteklerinden dolayı Doç. Dr. Yasin DEMİR, Prof. Dr. Ali Rıza DEMİRKIRAN, Dr. Öğr. Üyesi Alperen MERAL, Teknik ve idari yardımlarından dolayı Bingöl Üniversitesi Rektörlüğü'ne, Ziraat Fakültesi Dekanlığı'na ve Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölüm Başkanlığı'na teşekkür ederim.

Mehmet Emin AYDIN

Bingöl 2025

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vi
TABLolar LİSTESİ	vii
ÖZET.....	viii
ABSTRACT	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	6
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	11
3.1. Kaya Şeklinin Modellenmesi	11
3.2. Yerçekimi ve Jiroskopik Kuvvetlerle Serbest Uçuş Hareketi.....	12
3.3. Temas Kuvvetleri	13
3.4. Sürtünme Kuvvetleri.....	13
3.5. İtici Kuvvetler (Geri tepme)	14
3.6. Temas Sürtünmesi	14
3.7. Coulomb Sürtünmesi ve Kayma	14
3.8. Viskoplastik Zemin Sürtünmesi.....	15
3.9. Orman/Bitki Örtüsü	15
3.10. Arazi Malzemesi	16
3.11. Arazi Modeli	18
3.12. DEM Çözünürlüğü.....	19
3.13. Bir Simülasyonun Ayarlanması.....	19

3.13.1. Hazırlıklar.....	19
3.13.2. Topografik Veriler - Dijital Yükseklik Modeli (DEM).....	19
3.13.3. Proje ve Senaryolar	21
3.13.4. Tercihler	21
3.13.5. Araştırma Alanı.....	22
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	24
4.1. Bingöl İli Adaklı İlçesi Güngörsün Köyünün Tanıtımı.....	24
4.2. Bingöl İli Adaklı İlçesi Güngörsün Köyünün Coğrafi, İklimsel ve Ekolojik Özellikleri	26
4.3. Bingöl İli Adaklı İlçesi Güngörsün Köyünün İklim Özellikleri	26
4.3.1. Çalışma Alanının Jeolojisi.....	27
4.3.2. Çalışma Alanının Bitki Örtüsü	27
4.4. Kaya Düşmesi Olaylarının Tespiti.....	28
4.5. Kaya Düşmesi Türleri.....	28
4.5.1. Devrilme	28
4.5.2. Kayma.....	29
4.5.3. Yanal Yayılma.....	29
4.5.4. Akma.....	29
4.5.5. Karmaşık Kaymalar	30
4.6. Kaya Düşmesini Neden Olan Faktörler	30
4.6.1. Donma-Erime Süreçleri ve Buz Çatlatması.....	30
4.6.2. Isınma-Soğuma Süreçleri	30
4.6.3. Isınma-Kuruma Süreçleri.....	31
4.6.4. Bitkilerin Çözülme Etkileri	31
5. KAYA DÜŞMESİNİ KONTROL EDEN FAKTÖRLER	32
5.1. Düşebilecek Blokların Boyutları ve Konumları.....	32
5.2. Arazi Deneyleri	32
5.3. Kaynak Zonu Malzeme Özelliklerinin Değerlendirilmesi.....	32

5.4. Kaya Düşmesi Analizi Aşamaları.....	33
5.5. Kaya Düşmesi Islah Yöntemleri.....	33
5.6. Bulguların Değerlendirilmesi	33
5.6.1. Kaya Düşmesi Olayının Bingölde Dağılımı ve Etkileri	33
5.6.2. Geçmiş ve Güncel Kaya Düşmesi Olayları	34
5.6.3. Kaya Düşmesi Risk ve Tehlike Analizi.....	35
5.6.4. Kaya Düşmesine Neden Olan Önemli Faktörler.....	35
5.7. Kaya Düşmelerini Önleme Yöntemleri.....	41
5.7.1. Orman	41
5.7.2. Hendekler	41
5.7.3. Bariyerler	41
5.7.4. Kayaç Tutma Çitleri ve Sönümleyiciler	42
5.7.5. Perdeli Ağ Yöntemi	42
5.7.6. Kaya Sundurmaları ve Tüneller	42
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	44
KAYNAKLAR	46

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

°C	: Santigrat derece
km	: Kilometre
%	: Yüzde
m	: Metre
cm	: Santimetre
ha	: Hektar
kg	: Kilogram
DSİ	: Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü
mm	: Milimetre
Jeo	: Jeoloji
GIS	: Coğrafi Bilgi Sistemleri
DEM	: Sayısal Yükseklik Modeli (Digital Elevation Model)
GPS	: Küresel Konumlama Sistemi (Global Positioning System)
m³	: Metre küp
OGM	: Orman Genel Müdürlüğü

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Çalışma Alanı Bulduru Haritası.....	37
Şekil 3.1. Gerçek Kayaların Lazer Taramaları.....	12
Şekil 3.2. Kaya Kütlesinin Haritalandırılması.....	12
Şekil 3.3. Yumuşak Toprakta Kaya Darbe İzi... ..	15
Şekil 3.4. Yüksek Çözünürlüklü Üç Boyutlu Arazi Modeli.....	18
Şekil 3.5. ESRI ASCII Izgarası.....	20
Şekil 3.6. ASCII X,Y,Z Tek Boşluklu Veriler.....	21
Şekil 3.7. Çalışma Alanı Uydu Görünümü.....	23
Şekil 5.1. Bingöl Kaya Düşmesi Poligonları.....	34
Şekil 5.2. Bingöl İli Sayısal Yükseklik Modeli Haritası.....	36
Şekil 5.3. Kaya Kaynak Alanları.....	37
Şekil 5.4. Bingöl Kaya Düşmesi Duyarlılık Analizi	38

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 3.1. Arazi Parametrelerinin Varsayılan Değerleri.....	17
Tablo 3.2. Alp Jeomorfolojik Arazilere İlişkin Önerilen Arazi Kategorileri	17
Tablo 5.1. Bingölde Geçmişte Yaşanan Kaya Düşmesi Olayları	35



BİNGÖL İLİ ADAKLI İLÇESİ GÜNGÖRSÜN KÖYÜNDE KAYA DÜŞMELERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

ÖZET

Kaya Düşmesi, kayalık bir yamaçtan veya gevşek materyalden kopan taş veya kaya bloklarının düşmesi, yuvarlanması veya yere çarpıp sıçrayarak ilerlemesi olayıdır. Kaya Düşmesinin yoğun olarak görüldüğü Bingöl ilinde can ve mal kaybına sebep olup yerleşim yeri ve meskenlere zarar vermektedir. Bu çalışmanın amacı, Bingöl ili Adaklı ilçesi Güngörsün köyündeki kaya düşme riskinin incelenmesi ve ıslahı için önlem ve önerilerin belirlenmesi ile kaya düşme riskinin azaltılıp yok edilmesidir. Bu amaç için bölgesel problemi yansıtan lokasyonlardan biri olan Güngörsün çalışma alanı olarak seçilmiştir. Çalışma boyunca, mevcut jeolojik birimlerin jeomekanik özelliklerinin belirlenmesine yönelik olarak yoğun şekilde arazi ve laboratuvar çalışmalarının (mesafe, hız, sıçrama yüksekliği, arazi deneyleri, toplam kinetik enerji değerlerinin belirlenmesi ve diğer haritalama çalışmaları) yapılmıştır. RAMMS:ROCKFALL kaya düşmesi programı analiz sonuçlarına göre, çalışma alanının hangi noktalar olacağı belirlenmiştir. Bundan dolayı olası kaya düşmelerinin yerleşim alanına olumsuz etkilerini önlenmesi gerekmektedir.

Anahtar Kelimeler: Kaya Düşmesi, Deney, Güngörsün, Bingöl.

EVALUATION OF ROCK FALLS IN GÜNGÖRSÜN VILLAGE, ADAKLI DISTRICT OF BİNGÖL PROVINCE

ABSTRACT

Rockfall is the phenomenon of stones or rock blocks broken off from a rocky slope or loose material falling, rolling, or hitting the ground and bouncing. In Bingöl province, where rock falls are frequently seen, it causes loss of life and property and damages settlements and dwellings. The aim of this study is to examine the rockfall risk in Güngörsün village of Adaklı district of Bingöl province and to determine precautions and suggestions for its improvement and to reduce and eliminate the rockfall risk. For this purpose, Güngörsün, one of the locations reflecting the regional problem, was chosen as the study area. Throughout the study, intensive field and laboratory studies (distance, speed, jump height, field tests, determination of total kinetic energy values and other mapping studies) were carried out to determine the geomechanical properties of existing geological units. According to the RAMMS:ROCKFALL rockfall program analysis results, the points of the study area were determined. Therefore, it is necessary to prevent the negative effects of possible rock falls on the residential area.

Keywords: Rock Fall, Experiment, Güngörsün, Bingöl.

1. GİRİŞ

Doğal afetler, insan iradesi dışında gelişen ve zaman zaman ciddi can ve mal kayıplarına yol açabilen doğa kaynaklı olaylardır. Genellikle ani bir şekilde ortaya çıkan bu afetler, başladıktan sonra insan müdahalesiyle durdurulamaz. Her ne kadar doğal afetlerin tamamen önüne geçmek mümkün olmasa da, gerekli önleyici tedbirlerin alınması sayesinde meydana gelebilecek zararlar önemli ölçüde azaltılabilir (Bulut, 2019).

Dünyanın pek çok bölgesinde doğal afetler, hem can kayıplarına hem de ciddi ekonomik zararlara yol açmaktadır. Bu afet türlerinden biri olan kaya düşmesi, özellikle dağlık ve engebeli arazilerde önemli bir risk unsuru olarak öne çıkmaktadır. Türkiye özelinde değerlendirildiğinde ise, kaya düşmeleri; deprem, heyelan ve taşkın olaylarının ardından en sık karşılaşılan ve etkileri bakımından öne çıkan afet türlerinden biridir (Gökçe vd., 2008).

Türkiye'nin jeolojik yapısı, tektonik özellikleri ve iklimsel koşulları, çeşitli kütle hareketlerinin oluşumuna zemin hazırlamaktadır. Bu hareketler arasında, özellikle kaya kütlelerinin denge kaybına uğraması sonucu meydana gelen kaya düşmeleri dikkat çekmektedir. Yapılan istatistiksel analizlere göre, 1950 ile 2008 yılları arasında kaydedilen 2.956 olayla kaya düşmeleri, heyelanlardan sonra en sık rastlanan ikinci doğal afet türü olarak öne çıkmaktadır (Koçyiğit, 2019).

Türkiye, morfolojik yapısı, jeolojik çeşitliliği ve iklimsel özellikleri nedeniyle çeşitli doğal afetlere açık bir konumda bulunmaktadır. Her ne kadar depremler etki düzeyi açısından en yıkıcı afet türü olarak öne çıksa da, kaya kütlelerinin stabilitesini kaybetmesi sonucu gelişen olaylar, özellikle kaya düşmeleri, ülkemizde sıkça karşılaşılan ve ciddi risk oluşturan diğer doğal afetler arasında yer almaktadır (Akın vd., 2019).

Kaya düşmeleri, süreksizlik düzlemleriyle sınırlandırılmış kaya bloklarının, bulundukları konumdan hızla koparak yerçekimi etkisiyle eğim doğrultusunda hareket etmesiyle meydana gelen bir yamaç stabilite sorunudur. Bu tür kütle hareketleri, yüksek enerjili olmaları nedeniyle hem can hem de mal güvenliği açısından önemli tehlikeler oluşturur (Varnes, 1978; Hutchinson, 1988; Cruden ve Varnes, 1996).

Kaya düşmesi, genellikle kayma veya devrilme mekanizmalarıyla ana kütleden ayrılan kaya parçalarının, dik yamaçlar boyunca serbestçe düşmesi, sıçraması ya da eğimli yüzeylerde yuvarlanması şeklinde gelişen bir kütle hareketi türüdür. Bu süreçte kaya parçaları, hem yerçekiminin etkisiyle hem de zeminle olan etkileşimleriyle yüksek kinetik enerji kazanarak hareket eder (Highland ve Bobrowsky, 2008).

Kaya düşmeleri, hızlı gelişen ve geniş alanlara yayılan dinamik yapıları nedeniyle özellikle ulaşım altyapıları (karayolları ve demiryolları) ile yamaçlara yakın yerleşim alanları açısından ciddi riskler barındırmaktadır. Bu tür tehlikelerin etkili biçimde yönetilebilmesi için, dik topoğrafik özelliklere sahip kaynak bölgelerden başlayarak düşme hareketinin yayılım gösterebileceği potansiyel alanların belirlenmesi gereklidir. Bu amaçla oluşturulan yayılım zonu haritaları, riskli bölgelerde yapılaşma kararlarının alınmasında ve mevcut yapıların güvenliğinin sağlanmasında karar vericilere önemli katkılar sunmaktadır (Kalender, 2017).

Kaya düşmeleri, farklı sertlikteki tabakaların ardışık olarak yer aldığı eğimli yamaçlarda, üstteki sert kütlelerin zamanla aşınarak dengesini yitirmesi sonucunda meydana gelmektedir. Bu kütleler, yerçekimi etkisiyle eğim boyunca yuvarlanarak alt kısımlarda yer alan kara yolları, demiryolları ve benzeri altyapı unsurlarında ciddi yapısal hasarlara neden olabilmektedir. Bu durum, hem can güvenliği hem de ekonomik kayıplar açısından yüksek düzeyde risk oluşturmaktadır (Biricik, 2001).

Tam ölçekli modeller, kaya düşmelerine bağlı darbe kuvvetlerinin analizinde oldukça etkili ve gerçekçi sonuçlar sunabilmektedir. Ancak bu tür uygulamalar, yüksek maliyetleri ve operasyonel zorlukları nedeniyle her zaman uygulanabilir değildir. Son yıllarda, bilgisayar destekli modelleme tekniklerinde yaşanan gelişmeler sayesinde, fiziksel uygulamaların mümkün olmadığı durumlarda yenilikçi sayısal yöntemlerin kullanımı belirgin şekilde artmıştır. Bu bağlamda önerilen sayısal yaklaşımın, hem literatüre katkı sunması hem de ilerleyen süreçteki saha uygulamalarında pratik çözümler üretmesi açısından önemli faydalar sağlayacağı öngörülmektedir (Aşıcı, 2019).

Bingöl ili, Doğu Anadolu Bölgesi'nin Yukarı Fırat bölümünde konumlanmakta olup, sert karasal iklim koşullarına sahiptir. Özellikle kış aylarında yoğun kar yağışı görülmektedir. İl sınırları içindeki arazi yapısının engebeli ve yüksek oluşu, çeşitli doğal afetlerin meydana gelmesine zemin hazırlamaktadır. Bu afetlerden biri de, özellikle dik yamaçlarda sıkça gözlemlenen kaya düşmeleridir (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2023).

Bingöl ilinde 1989-1993 yılları arasında gerçekleşen sel, çığ ve kaya düşmesi gibi afet olayları sonucunda, 13 köy tamamen boşaltılmış, 5 köy ise kısmi tahliyeye tabi tutulmuştur. Bu durum, bölgede doğal afet riskinin oldukça yüksek seviyede olduğunu ve afet yönetimi açısından ciddi önlemlerin alınması gerektiğini ortaya koymaktadır (Bingöl Online, 2014).

Adaklı ilçesinin jeolojik yapısı, Solhan formasyonuna ait aglomera, tuf ve bazalt birimlerinden oluşmaktadır. Bu formasyonda yer alan tuf ve kil gibi zayıf litolojik birimler, kaya düşmesi gibi kütle hareketlerinin gelişmesine elverişli bir zemin oluşturmaktadır (Yılmaz ve Türkmen, 2018).

Bingöl ili, engebeli arazi yapısı ve aktif fay hatlarına yakın konumuyla birçok doğal afetin etkisi altında kalmaktadır. Özellikle Adaklı ilçesine bağlı Güngörsün köyü, çığ ve kaya düşmesi gibi olayların sıkça yaşandığı yüksek riskli alanlardan biridir. Bu riskleri azaltmak amacıyla Bingöl Orman İşletme Müdürlüğü tarafından bölgeye yönelik projelendirme çalışmaları başlatılmıştır (Bingöl Kent Haber, 2021).

Bölgenin iklimsel koşulları, kaya düşmelerinin meydana gelmesinde belirleyici bir role sahiptir. Özellikle kış aylarında hava sıcaklıklarının 0°C'nin altına düşmesi, donma-çözülme süreçlerinin sıklaşmasına neden olarak kaya kütlelerinin parçalanmasını ve düşme riskini artırmaktadır (Duman, 2019).

Bölgede meydana gelen kaya düşmeleri, hem yerleşim alanları hem de altyapı sistemleri açısından ciddi tehlike oluşturmaktadır. Bingöl ilinin jeolojik özellikleri, özellikle Merkez, Solhan, Genç ve Adaklı ilçelerinde bu tür olayların daha sık görülmesine neden olmaktadır. Ayrıca, il genelinde Fırat Havzası'na bağlı olarak su baskınlarının da sıkça yaşandığı bilinmektedir. Bu proje kapsamında, kaya düşmesi ve ilgili kayma tehlikesinin değerlendirilmesi amacıyla kapsamlı arazi çalışmaları gerçekleştirilmiş ve ilk modelleme için kullanılacak parametreler belirlenmiştir. Hedeflenen sonuçlar doğrultusunda, olası can ve mal kayıplarının asgari düzeye indirilmesi amaçlanmaktadır

(<https://drive.google.com/file/d/15FdMHuL68uoSNA1qqVap5dUQor8m5G6c/view?usp=drivesdk>).

Kaya düşmelerine karşı geliştirilen önleyici yöntemler, doğal ve yapay yapılar olmak üzere iki temel grupta toplanabilir. Ağaçlandırma, kaya tutma hendekleri ve toprak setler gibi doğal veya yarı-doğal çözümler, düşen kütlelerin etkisini azaltmayı amaçlarken; çelik bariyerler ve istinat duvarları gibi endüstriyel yapılar ise doğrudan fiziksel koruma sağlamaktadır. Bu çalışma, Bingöl ili Adaklı ilçesi Güngörsün köyündeki kaya düşme risklerini değerlendirerek, bölgeye özgü önlem stratejilerinin belirlenmesini hedeflemektedir. İnceleme yapılan alanda, jeolojik yapıların karakteri nedeniyle kaya düşmesi olaylarının sıkça yaşandığı tespit edilmiştir (Bkz. Şekil 1).



Şekil 1.1. Çalışma Alanı Bulduru Haritası

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Koçyiğit (2019) yaptığı çalışmasında Göre (Nevşehir) deki kaya düşmesi çalışmaları yapılmış jeolojik ve jeomekanik özellikler belirlenmiştir. Bu çalışmada kinematik analiz ve simülasyonlar yapılmıştır. Kayanın fiziksel özelliklerini bulmak amacıyla deneyler yapılmıştır. Kaya düşmesi oluşma riskinin olduğu kısımların mesafeleri, öteleme hızı, kinetik enerjisi hesaplanmıştır. Gözlemler sonucunda çalışma alanı kuzeyinde mesafe artmakta güneyinde ise kayaların ulaştığı mesafe daha azdır. Araştırma kapsamında kinematik analizde tüm yenilme türleri gözlemlenmiştir. Yapılan simülasyonları sıçramasının yüksekliği tespit edilmek istenmiştir ve yararlı olmuştur. Yapılan testler sonucunda bu bölgede kaya düşmesini önleme amaçlı blokların zaman aralıklarıyla temizlenmesi gerektiği, çelik ağ kullanılarak yapılmış esnek bariyerler kullanılması gerektiği can ve mal kaybını azaltacağı öngörülmüştür.

Polat ve Güney (2023) yaptığı çalışmasında Bağbaşı Köyü (Uşak) kaya düşmesini incelemiştir. Engebe çok olduğundan yerçekimi etkisiyle kayalar yuvarlanıp yerleşim yerine zarar vermektedir. Kaya düşmesi için kayaları çelik halatlarla bağlanmış, bazıları taş ile desteklenmiştir. Sonuç olarak bitki örtüsünün kaya düşmesi hızını azaltıcı etkisi olduğu tespit edilmiştir. Kaya düşmesinin olduğu yamacın tel ağlarla kaplanması, blok yuvarlanmasını engelleyecek duvarların inşa edilmesi gerektiği kanısına varılmıştır.

Altay (2015) yaptığı çalışmasında kaya düşmesinde karşı kullanılan toprak dolgu setinin etkisini bilgisayarda ANSYS programıyla incelemiştir. Bu çalışmada düşen kayanın hızı, çarpma yüksekliği değiştirilmiş toprak dolgu seti üzerinde meydana gelecek değişimleri incelemiştir. Bu araştırmada farklı parametrelerden yararlanılmıştır. Seri 1 Analizde küp numuneleri kullanılmıştır ve değişimleri gözlemlenmiştir. Bunun sonucunda deformasyonların yüksek hızlarda arttığını gözlemlenmiştir. Seri 2 Analizde 1.5m³'lük numuneler kullanılmıştır. 4 farklı hız kullanmıştır, hız arttıkça deformasyonun arttığını gözlemlenmiştir. Seri 12'ye kadar analizler yapılmış farklı hızlar kullanılmıştır. Sonuç

olarak kaya bloğunun kütlesinin artması deformasyonu artırmıştır. Küresel kayalar, kübik kayalara göre daha çok deformasyona uğramıştır. Yani toprak dolgu setleri ekonomik ve daha çok önleyebilir amacıyla tercih edilebilir. Ağırlığının'da yüksek olması kayaları durdurmaya yardımcı olacaktır.

Kalender (2017) yaptığı çalışmada kaya düşmesine yönelik haritalama çalışması yapmıştır. Konik yayılım yaklaşımı, sayısal yükseklik modeli, potansiyel hızı gibi haritalardan yararlanılmıştır. Bu tez sonucunda MMP sınıflaması önerilmiştir. Kaya düşme tehlike puanlaması için RHR önerilmiştir.

Polat (2020) yaptığı çalışmada Sivas'ta kaya düşmesi üzerine çalışmalar yapmıştır. RF3D yazılımı kullanılmıştır. Sayısal Yüzey Modelinden yardım alınmıştır. İnsansız Hava Aracı kullanılmıştır. Ortofoto görüntüleri, zemin tipi ve kaya bloklarının tanımlanması için kullanılmıştır. Çalışma sonucunda bölgedeki kaya yapısı ve topoğrafya oradaki kaya düşme riskini artırmaktadır.

Özcan (2023) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Çorum ili İskilip ilçe merkezindeki kaya düşmesi riski ele alınmıştır. Araştırmada, Rockfall yazılımı kullanılarak düşme potansiyelinin modellenmesi yapılmış ve risk değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. Analizlerde kullanılacak olan konglomera kaynak kayasına ait birim hacim ağırlık, tek eksenli basınç dayanımı gibi bazı jeoteknik parametreler, arazi gözlemleri ve laboratuvar deneyleri ile belirlenmiştir. Ayrıca, çalışmanın ön aşamasında, potansiyel duraysızlık türlerini ortaya koymak amacıyla kinematik analiz yöntemi uygulanmış ve düzlemsel kayma, kama tipi hareket ve devrilme olasılıkları incelenmiştir. Literatürdeki birçok kaya düşmesi değerlendirme sistemi çoğunlukla ulaşım altyapılarına yönelik geliştirildiğinden, bu çalışmada yerleşim alanlarına özgü analizlerle farklılık ortaya konmuştur. İnceleme sahası A, B, C ve D olmak üzere dört ayrı bölgeye ayrılmış ve analiz sonucunda A, B ve C bölgelerinin yüksek risk grubunda, D bölgesinin ise orta düzeyde risk taşıdığı belirlenmiştir.

Bulut (2019), Bitlis ili Muştakbaba Mahallesi'nde meydana gelen kaya düşmesi olaylarını ele aldığı çalışmada, düşmeye neden olan faktörleri belirlemeyi ve uygun iyileştirme yöntemlerini ortaya koymayı amaçlamıştır. Arazi çalışmalarında, zemin özellikleri, yüzey şekli, yer altı su düzeyi, çatlak sistemleri ve mevcut yükler gibi parametreler detaylı biçimde incelenmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda, temel iyileştirme yöntemi olarak ankraj sisteminin bu bölge için uygun olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, Geo5 yazılımı kullanılarak deprem senaryosu altında kaya bloklarının davranışı analiz edilmiş; bu analizler sonucunda şev stabilitesini sağlayacak ankraj tipi ve açısı belirlenmiştir.

Öztürk (2022), Niğde ili Merkez ilçesine bağlı Murtaza köyünde kaya düşmesi tehlikesini değerlendirdiği çalışmada, insansız hava aracı (İHA) kullanarak yüksek çözünürlüklü sayısal yüzey modeli (SYM) oluşturmuş ve bu modeli arazi ölçümleri ile desteklemiştir. Üç boyutlu (3B) düşme analizleriyle birlikte gerçekleştirilen çalışmada, risk teşkil eden 14 adet kaya bloğu belirlenmiştir. Bu bloklara ait geometrik ölçümler sahada yapılmış ve elde edilen veriler, RAMMS yazılımına aktararak gerçekçi bir şekilde modellenmiştir. Böylece kaya bloklarının olası hareket senaryoları bilimsel temele dayalı olarak değerlendirilmiştir.

Taylan (2020), Gümüşhane ilindeki yerleşim alanlarına yakın sarp yamaçlarda bulunan düşmüş ve askıda kalmış kaya bloklarını belirleyerek, bu blokların konumlarını dikkate alarak bir kaya düşmesi envanter haritası oluşturmuştur. Riskli bölgelerde belirlenen kesit hatları boyunca RocPro3D yazılımı kullanılarak düşme analizleri gerçekleştirilmiş ve düşen blokların yayılım mesafeleri, sıçrama yükseklikleri ile sahip oldukları kinetik enerji değerleri hesaplanmıştır. Bu analizler sayesinde, ileride düşme potansiyeli taşıyan bloklara yönelik önleyici mühendislik çözümleri geliştirilmiştir.

Düzgün ve Akgün (2012) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, kaya düşmesi tehlikesinin güvenilirlik indeksi ile olasılıksal ve nümerik analiz yöntemlerine dayalı olarak öngörülmesi amaçlanmıştır. Bu çerçevede, belirlenen tehlike senaryoları doğrultusunda meydana gelebilecek olası kayıplar değerlendirilmiş ve elde edilen risk düzeyine bağlı olarak çeşitli mühendislik çözüm alternatifleri analiz edilmiştir. Yapılan analizlerde, Amasya'daki Harşena Dağı üzerinde kaya düşmesi ve şev kayması potansiyeli taşıyan

alanlar ayrı ayrı tanımlanarak, bu bölgelerden gerekli veriler toplanmıştır. Toplanan veriler, olasılıksal-nümerik analiz teknikleri kullanılarak değerlendirilmiş; uygulama sürecinde UDEC ve RocFall yazılımları aracılığıyla düşme davranışları modellenmiş ve olası risk senaryoları ortaya konmuştur.

Hoek (2007) tarafından yapılan çalışmada, dağlık bölgelerde kara ve demir yollarının güvenliği açısından kaya düşmeleri kritik bir tehlike olarak değerlendirilmiştir. Kaya düşmeleri arazi boyutuna göre aynı düzeyde ekonomik risk oluşturmaya da ulaşım güzergahlarını günlerce kapatabilecek potansiyeldedir buda insanların başka yerlere gitmesini engellemeye, ihtiyaçlarını karşılamada sorun oluşturmaya daha birçok duruma sebebiyet vermektedir. Bodger ve Lowell (1992) Wahington'un kaya düşme olayını özetledi. Son 30 yılda çok sayıda ölüm yaşandı. Bu yaşanan ölümlerin yüzde 45'i kaya düşmesiyle ilgilidir.

Dorren (2003) yaptığı çalışmasında Kaya düşmesi, dağlık bölgelerde meydana gelen önemli tehlikelerdendir. Bu süreç, kaya kütlelerinin etkisiyle düşüş, yuvarlanma ve sıçrama şeklinde meydana gelir. Kaya düşmesi olaylarının modellenmesi amacıyla farklı yöntemler geliştirilmiş, bu alandaki çalışmalar saha gözlemleri, fiziksel modeller ve uzaktan algılama tekniklerini içermektedir.

Hungr ve Evans (1988) yaptığı çalışmasında Kaya düşmesi araştırmaları, başlangıçta saha gözlemleri ve tarihsel kayıtlardaydı. Bu çalışmalarda, düşen kaya kütlelerinin büyüklüğü, hareket biçimi gibi özellikler incelenerek risk analizleri yapılmıştır. Ancak, bu tür çalışmalarda geniş kapsamlı tahminler yapmakta yetersiz kalmıştır.

Guzzetti vd., (2002) yaptığı çalışmasında Kaya düşmesi modellenmesinde yapılan yöntemlerden biri kinematik analizlerdir. Bu analizlerde, kayaların düşme açısı, sıçrama ve hareket doğrultuları gibi şeyler hesaplanarak, olası düşme yörüngeleri belirlenmektedir.

Abellán vd., (2014) yaptığı çalışmasında LiDAR ve İHA (İnsansız Hava Araçları) gibi teknolojilerin gelişmesiyle, uzaktan algılama yaygınlaşmıştır.

Lan vd., (2010) yaptığı çalışmasında Bu tekniklerle, yüksek çözünürlüklü arazi modelleri yapılarak kaya düşme riski olasılıkları daha kolay belirlenebilmektedir.

Durmuş vd., (2025) yılında yaptığı çalışmasında Kaya Düşmesi risklerine karşı esnek kaya bariyerlerinde enerji kapasitesi tayini ve uygun yer seçim kriterlerini ele almıştır. Günümüz teknolojisindeki gelişmeler kaya düşmelerinin önleminde önemli proje ve imalatların ortaya çıkmasına katkı sağlamaktadır. Alınan önlemler neticesinde daha güvenli yerleşim alanları, daha güvenli karayolu geçişleri oluşturulabilmektedir. Bu çalışmada son yıllarda kaya düşme riski olan sahalarda koruma önlemi olarak imal edilen yüksek enerji sönmülemeli esnek kaya bariyerlerinin enerji ve yükseklik modeli tayini ile bariyer tasarımı için seçilecek uygun hat kriterleri hesaplanan sonuca göre değerlendirilmiştir.

Durmuş vd., (2024) tarafından yürütülen çalışmada, kaya düşmesi ve devrilme risklerinin kent planlaması üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma kapsamında, Çoruh Havzası ve özellikle Artvin il merkezinde yer alan yerleşim alanlarında bu tür jeolojik tehlikelerin oluşturduğu riskler detaylı şekilde ele alınmıştır. Araştırma sonuçlarına göre, bölgedeki yerleşim alanları ve yapılar, kaya bloğu düşmeleri ve devrilmeleri nedeniyle ciddi tehdit altındadır. Çoruh Havzası'ndaki en büyük yerleşim birimi olan Artvin ilinde, kaya düşmesi kaynak alanlarının dağılımı analiz edildiğinde, bu olayların ortaya çıkmasında iklimsel koşullardan ziyade morfolojik yapı ve jeolojik özelliklerin daha etkili olduğu görülmüştür. Elde edilen bulgular, kent planlamasında jeolojik tehlike analizlerinin ne denli önemli olduğunu bir kez daha ortaya koymaktadır.

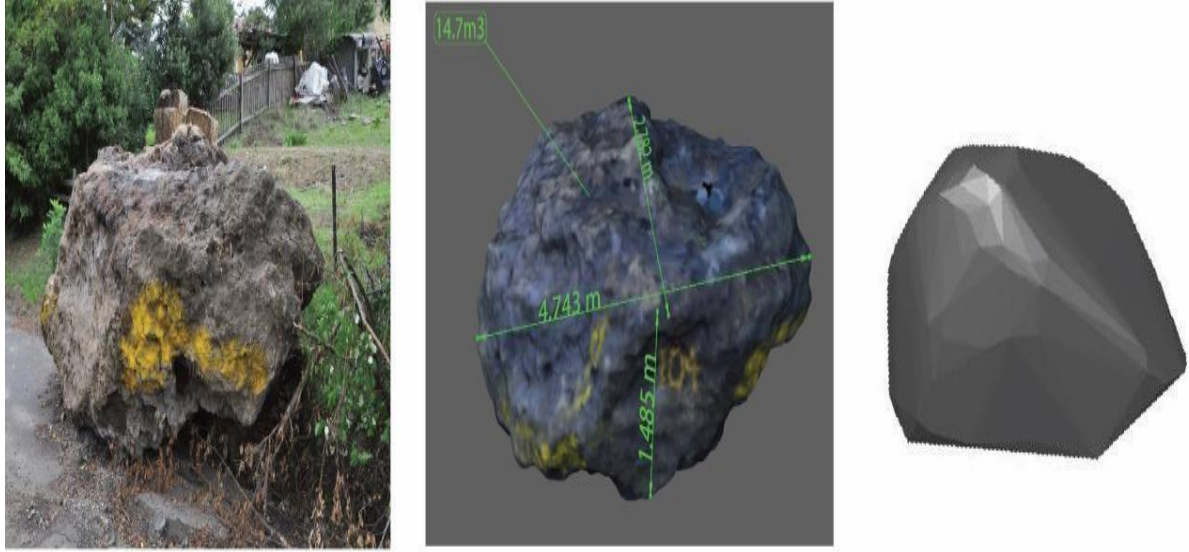
3. MATERİYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışması Bingöl İli Adaklı İlçesi Güngörsün köyünde kaya düşmesi alanlarını belirlemek kaya düşmesi alanlarındaki etkiyi en aza indirmek amacıyla hazırlanmıştır. Kaya Düşmesi Tehlikesi Olan Alanları tespit etmek amacıyla RAMMS:ROCKFALL programından yararlanılmıştır.

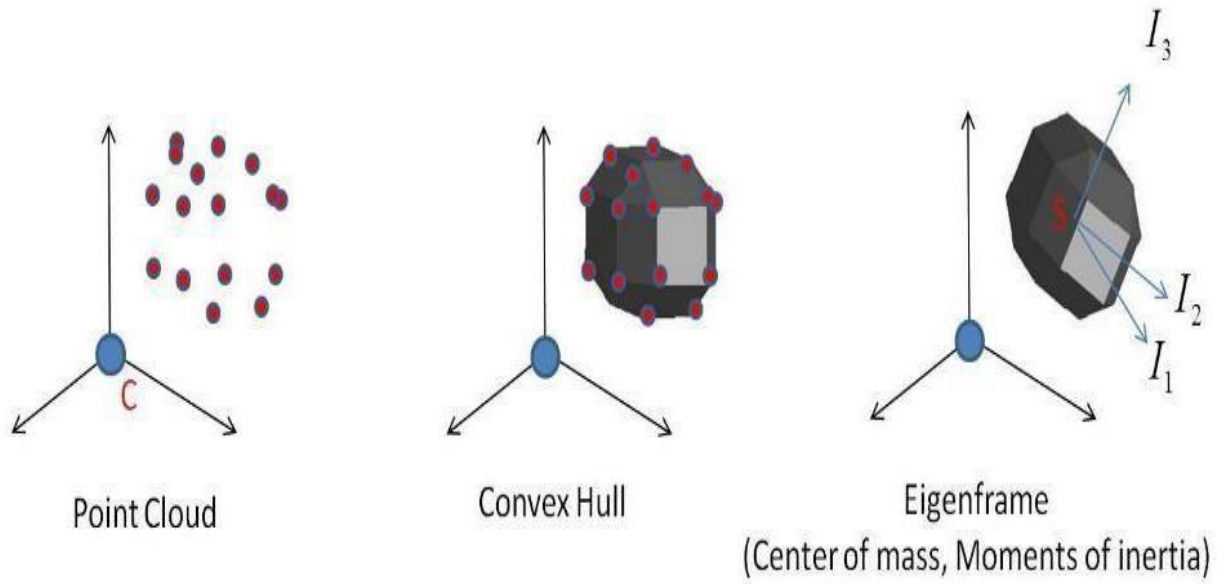
3.1. Kaya Şeklinin Modellenmesi

Kaya gövdeleri simülasyon alanı koordinat çerçevesine orijinli (O), orijinli (K) kendilerine ait koordinat sistemine bağlı olan bir nokta bulutu olarak dahil edilir. Koordinat çerçevesi (K), kaya gövdesinin dönüşlerinin haritasını çıkarmaya yarar. Noktalar x, y, z formatında *.pts dosyaları olarak verilir ve yapay olarak oluşturulabilir veya kaya birikintilerinin lazer taramasından toplanabilir (Şekil 2). Kaya gövdesinin nokta bulutunun dışbükey bir gövdesi yaratılır, böylece tamamen dışbükey bir gövde yaratılır; Bu süreçte iç bükeylikler kapatılır. Bir sonraki adım, yoğunluğun homojen olduğu kabul edilen cismin kütle merkezini hesaplamaktır. Son olarak, cismin atalet tensörü, üç ana atalet momenti bulunarak hesaplanır; başlangıç noktası kayanın ağırlık merkezidir.

(S) Simülasyon alanındaki kaya kütlelerinin ötelemeleri, O'ya göre S koordinat çerçevesi kullanılarak haritalanır (Şekil 3). Kayanın kütlesi m, noktanın dışbükey gövdesinden hesaplanan hacminden verilir. Bulut ve kullanıcı tanımlı bir yoğunluk ρ (tipik olarak 2700 kg m⁻³). Kayanın kütlelerini tanımlamak için kayanın üç öteleme (doğrusal momentum) ve üç dönme serbestlik derecesi (dönme) vardır. O arazi koordinat çerçevesinde herhangi bir t anında merkez konumu $qT = (X, Y, Z)$. Dönme hareketleri kayanın dış geometrisinin uzaydaki yönünü yakalar. $t = 0$ zamanında kaya $qT = (X_u, Y_u, Z_u)$ konumundan serbest bırakılır ve bu konumun elbette biraz yukarıda olması gerekir. Arazi, $Z_0 > Z_m$ ve dolayısıyla bırakma yüksekliği $h_0, Z_0 - Z_m$ 'dir
(<https://drive.google.com/file/d/15FdMHuL68uoSNA1qqVap5dUQor8m5G6c/view?usp=drivesdk>).



Şekil 3.1. Gerçek Kayaların Lazer Taramaları



Şekil 3.2. Kaya Kütlesinin Haritalandırılması

3.2. Yerçekimi ve Jirokopik Kuvvetlerle Serbest Uçuş Hareketi

Serbest uçuşta hakim hareket denklemi şöyledir: (Leine vd., 2013) $M\ddot{u} - h(q,u) = 0$ burada M sabit ve diyagonal kütle matrisidir (kütleyi ve üç momenti içerir eylemsizlik I) u vektörü kayanın üç öteleme ve üç dönme hızını içerir. Kaya gövdesinin hareketi, yörüngesini

belirleyen bir dizi kuvvet tarafından yönetilir. Yerçekimi kuvveti (F_g) küresel olarak etki eder; ağaçların, çalılıkların ve toprak deformasyonunun etkilerini temsil etmek için bir sürüklenme kuvveti (D) uygulanır. Düzensiz şekilli kayaların dik durmasına ve yuvarlanma eksenini etrafında dönmesine neden olabilen jiroskopik kuvvetler (G) ile birlikte (https://drive.google.com/file/d/15FdMHuL68uoSNA1qqVap5dUQor8m5G6c/view?usp=drivesdk).

3.3. Temas Kuvvetleri

Kaya gövdesi ile arazi arasında teması bulmada, temas noktası etrafında temas kuvvetleri λ ve sürtünme temas kuvvetleri (F_c) etki ediyor. Bu kuvvetler düşen kayanın yönüne etki eden dış kuvvetler olarak varsayılabilir. Sert olan kaya gövdesinin teması, kayanın köşe noktaları (P) ile arazi çıkıntıları (Q) arasındaki dikey boşluk uzunluğu g_N 'nin sürekli olarak ölçülmesiyle tespit edilir. Boşluk uzunluğu şu şekilde tanımlanır: $g_N(X, Y, Z) = Z - Z_m(X_m, Y_m)$ Daha sonra $g_N = 0$ olduğunda temas yoktur; $g_N \leq 0$ olduğunda temas vardır, P temas noktasına etki eden temas kuvvetleri λ hesaplanır. Temas durumunun sonuçlanmasına izin vermek için arazide az nüfusa izin verilir. Bu durum fiziksel olmayan bir nüfuzdur. Sürtünme kuvvetlerine gelince, temas çerçevesi C , bir normal temas kuvveti bileşeni λN ve iki yatay bileşen $\lambda T_1, \lambda T_2$ içerir. Temas kuvveti λN , temasın tek yönlülüğü içindir; yani, penetrasyon kısıtlamasını sağlar. Yatay kuvvetler Coulomb sürtünmesindendir ve temas yasaları tarafından yönetilir. Bu yaklaşım, katı sistemlerde fiziksel durumları analiz etmek için daha güzel bir model sunarak, sürtünme kuvvetlerinin güzel halde modellenmesini uygun kılar

(https://drive.google.com/file/d/15FdMHuL68uoSNA1qqVap5dUQor8m5G6c/view?usp=drivesdk).

3.4. Sürtünme Kuvvetleri

Temas çerçevesi C , bir normal temas kuvveti bileşenine λN ve iki teğet bileşenine $\lambda T_1, \lambda T_2$ sahiptir. Temas kuvveti λN temasın tek yanlı olduğunu, yani nüfuz etmeme kısıtlamasını sağlar. Teğetsel kuvvet bileşenleri Coulomb sürtünmesinden kaynaklanmaktadır ve temas yasalarına tabidir. Normal kuvvet bileşeni λN , temas periyodu süresince geçici kuvvet vektörünün hesaplanabildiği bir temas konisi dahil

edilmesiyle bulunur. Temas süresinde, gN boşluk fonksiyonuyla tanımlanan tüm temas dönemlerini inceleyen ayar değerine sahip normal kuvvettir
(<https://drive.google.com/file/d/15FdMHuL68uoSNA1qqVap5dUQor8m5G6c/view?usp=drivesdk>).

3.5. İtici Kuvvetler (Geri tepme)

Darbeleri olan temas kuvvetleri, boşluk fonksiyonu $\gamma^- < 0$ negatif hız ile teması bulunduğu zaman ortaya çıkar, yani nokta, darbeleri olarak işlem görmezse temas teorik olarak arazi boyunca harekette bulunur. Bu, çarpma sonrası normal hızın negatif olmadığı $\gamma^+ < 0$ olacak şekilde hız sıçraması olur. Bu çarpma kanunu, Newton çarpma kanununa dayanıyor. $\varepsilon N = 1$ normal hızın geri kazanılmasına tekabül ederken, daha küçük bir εN enerjiyi dağıtır. Kaya gövdesine etki eden bileşke kuvvetin durumunu bulmak için darbenin konfigürasyonu hesaplanmalıdır
(<https://drive.google.com/file/d/15FdMHuL68uoSNA1qqVap5dUQor8m5G6c/view?usp=drivesdk>).

3.6. Temas Sürtünmesi

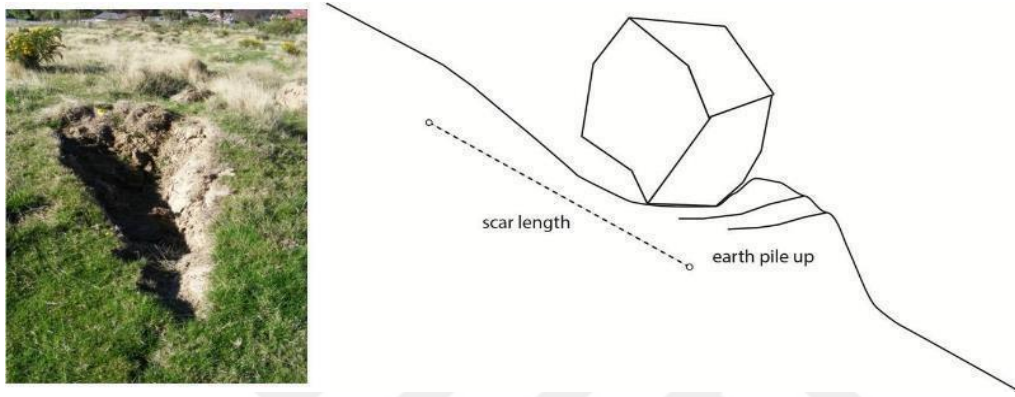
Düşen kayanın hareketine iki fiziksel kuvvet kaşı çıkar: kayma sürtünmesi ve sürüklenme. Kayma sürtünmesi, kayanın yüzeyinin yerle temas eden noktalarında etki eder; kayanın yerde kayma mesafesiyle ilişkili Coulomb tipi sürtünmedir. Kaya temas etmediğinde bu sürtünme etkili olmaz. Sürtünme kuvveti kayanın ne zaman kayacağını, yuvarlanacağı gibi durumları bilir. Kayanın hareketinin (hızının) tersi yönde etki eder. RAMMS:ROCKFALL modelinde iki sürüklenme kuvveti vardır. Birincisi, Bitki örtüsünün sürüklenmesiyle ilgili bilgiler; ikincisi, viskoplastik sürtünmeyi açıklar
(<https://drive.google.com/file/d/15FdMHuL68uoSNA1qqVap5dUQor8m5G6c/view?usp=drivesdk>).

3.7. Coulomb Sürtünmesi ve Kayma

Mekanik temas kanunu, katı cisim ile arazi arasındaki sert olan temasları önemser. Gerçekte kaya-zemin etkileşimi, farklı malzemelerde meydana gelir. Yüksek durumda

kayanın teması, temas halinde kolayca bozulan yumuşak topraklarla bulunabilir. Temas olduğunda toprak arazisi yumuşak ve uyumlu ise örtüsü olan toprağa giderken belirli dereceye giren kaya gövdesi kayması vardır ve gerisinde biriken malzeme bulunur bu malzemede açık bir şekilde darbe izi görünür

(<https://drive.google.com/file/d/15FdMHuL68uoSNA1qqVap5dUQor8m5G6c/view?usp=drivesdk>).



Şekil 3.3. Yumuşak Toprakta Kaya Darbe İzi

3.8. Viskoplastik Zemin Sürtünmesi

Yumuşak zeminde kaya etkisinde olan viskoplastik deformasyonu bulmak için bir kaymaya bağlı kuvvet sürüklemesi eklenir viskoplastik direnç şöyle bulunur:

$$F = - m C v^2$$

(<https://drive.google.com/file/d/15FdMHuL68uoSNA1qqVap5dUQor8m5G6c/view?usp=drivesdk>)

3.9. Orman/Bitki Örtüsü

Sürüklenen ormanın arkasında yatan fikir sürüklenen kaya katmanı yüksekliği Z_h 'nin altında olduğunda kütle merkezine kayanın direnç kuvvetinin etki etmesidir. Bu kuvvet kaya hızıyla doğru orantılıdır.

RAMMS programında orman türleri birbirinden farklı olanlara uygulandı:

- Orta Orman \ 35 m²/ha \ orman direnci = 500 kg/s

- Yoğun Orman \ 50 m²/ha \ orman sürüklemesi = 750 kg/s
- Açık Orman \ 20 m²/ha \ orman sürüklemesi = 250 kg/s

Bu açıklanan model: Leine ve diğer tarafın eksiksiz, basitleştirilmiş bir özetidir. 2013’de yöntem olarak kullanılan zaman adımlaması açıklanmıştır

(<https://drive.google.com/file/d/15FdMHuL68uoSNA1qqVap5dUQor8m5G6c/view?usp=drivesdk>).

3.10. Arazi Malzemesi

Arazi malzemesi, simülasyon sonuçlarını ciddi derecede etkiler. Arazi bölgelerini belirli olan malzeme türleriyle sınırlandırmak amacıyla şekil dosyası kullanılır. Önceki zamanlarda belirlenmiş olan sekiz farklı arazi kategorisi Aşağıda belirtilmiştir:

1. Ekstra Yumuşak-
2. Yumuşak
3. Orta Yumuşak
4. Orta
5. Orta Sert
6. Zor
7. Ekstra Sert
8. Kar

RAMMS kullanırken, uygun arazi malzemesinin seçimi tehlike analizini yapan mühendisin temel sorumluluklarından biridir. Eğer belirli bir arazi malzemesi hakkında kesin bir bilgi bulunmuyorsa, farklı malzeme olasılıklarının karşılaştırılması tavsiye edilir (<https://drive.google.com/file/d/15FdMHuL68uoSNA1qqVap5dUQor8m5G6c/view?usp=drivesdk>).

Tablo 3.1. Arazi Parametrelerinin Varsayılan Değerleri

Terrain	Mu-Min	Mu-Max	Beta	Kappa	Epsilon	Drag
Ekstra Yumuşak	0,2	2	50	1	0	0,9
Yumuşak	0,25	2	100	1,25	0	0,8
Orta Yumuşak	0,3	2	125	1,5	0	0,7
Orta	0,35	2	150	2	0	0,6
Orta Sert	0,4	2	175	2,5	0	0,5
Zor	0,55	2	185	3	0	0,4
Ekstra Sert	0,8	2	200	4	0	0,3
Kar	0,1	0,35	150	2	0	0,7

Bu sürümle arazi kategorisi seçilmiş olan kayalar büyüdüğü zaman bu sürümü kullananların yumuşak kategorilere girmesini sağlıyor. Büyük kayaların daha yumuşak toprağa ilerlemesi her zaman tercih edilen bir durumdur. Blok boyutlarının arazide bulunan malzemedeki önerilen boyuttaki taneyle niteliksel olarak karşılaştırılması gereklidir. Tablo 2’de kaya boyutları farklı olan Alp jeomorfolojik arazilere ilişkin önerilen arazi kategorileri listelenmiştir

(<https://drive.google.com/file/d/15FdMHuL68uoSNA1qqVap5dUQor8m5G6c/view?usp=drivesdk>).

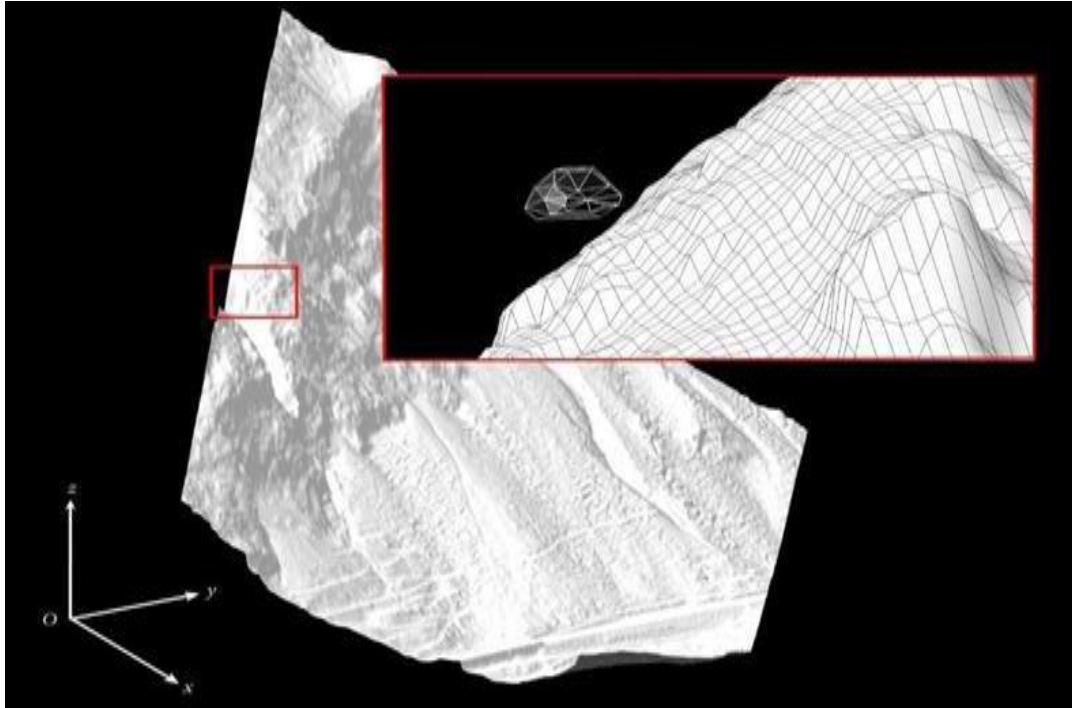
Tablo 3.1. Alp Jeomorfolojik Arazilere İlişkin Önerilen Arazi Kategorileri

Tipik morfolojik Alp birimleri Blok boyutu senaryosu	İnce, ince taneli Alp talusu	Kalın, kaba taneli Alp talusu	Kalın, orta taneli, alçak rakımlı yamaç molozu	Kültür arazisi (bitkilendirilmiş)
0,1-0,5 m3	Orta sert - Orta	Medium hard - Medium	Orta	Orta
1-5 m3	Orta	Orta-Orta yumuşak	Orta yumuşak	Orta yumuşak-Yumuşak
5-50 m3	Orta	Orta yumuşak	Yumuşak	Yumuşak-Ekstra Yumuşak

Bu modellemeyeyle kaya şeklinin salgı dinamiği ile üzerindeki kalıcılığı simüle edilebilir. Önemli bir modeldir çünkü geri tepme yaklaşımı olması durumunda skotastik yöntemlerle ele alınması gereken kaya şekline duyarlıdır.(Bourrier vd., 2009) Kaya şeklinin salgı dinamiğindeki rolü çok önemlidir.

3.11. Arazi Modeli

RAMMS:ROCKFALL modeli, çözünürlüğü yüksek olan bir dijital yükseklik modelinden yararlanan düşmüş olan kayaların yörüngelerini üç boyutlu olan arazide simüle eder. Arazinin koordinat sistemi, simülasyon çerçevesi O olarak alınır. Arazi yüksekliği Z_m , her koordinat çifti (X_m, Y_m) olarak belirlenir ve dört koordinat çifti mozaik araziye oluşturan düzlemlerin köşelerini tanımlar (Şekil 3). Düzlemler düzdür yönelimleri birbirinden farklıdır, bunun sebebi her koordinat çiftinin Z_m yüksekliği farklı olabilir. (X_m, Y_m) koordinatlar arasındaki mesafe arazinin çözünürlüğünü yani morfolojisinin temsil edildiği doğruları açıklar. Simülasyonlarda kullanılan çözünürlük 1m ile 10m arasındadır. Bunlar arazi özelliklerini doğru şekilde modeller. Sertlik, pürüzlük gibi değişkenler her düzlemin özelliğine göre değiştirilebilir.



Şekil 3.4. Yüksek çözünürlüklü üç boyutlu arazi modeli

3.12. DEM Çözünürlüğü

Sonuçların gerçekçi elde edilebilmesi için minimum 2-5m hücre boyutu kullanılmalıdır. > 2 km'lik uzun kaçış mesafeleri ve büyük blok boyutlarına (>10-50 m³) sahip senaryolarda hücre boyutu artırılabilir. Proje çevresi oldukça küçükse, karşılık gelen çıkış mesafeleri kısaysa (<50m) ve birkaç metre içinde arazinin değişkenliği yüksekse, bu durumda DEM'in hücre boyutu daha düşük olmalıdır; 1,0 veya hatta 0,5 m.den sonra olmalıdır.

3.13. Bir Simülasyonun Ayarlanması

3.13.1. Hazırlıklar

Yeni bir RAMMS projesini başarıyla başlatmak için birkaç önemli hazırlık gereklidir. Topografik girdi verileri (ASCII veya GEOTIFF formatında DEM), proje sınır koordinatları ve coğrafi referanslı haritalar veya uzaktan algılama görüntüleri önceden hazırlanmalıdır (.tif formatı ve .tfw dosyası, haritalar ve görüntüler zorunlu değildir ancak olması güzeldir). Coğrafi referanslı veri kümelerinin DEM ile aynı Kartezyen koordinat sisteminde (örneğin İsviçre CH1903 LV03) olması gerekir. Derece cinsinden kutupsal koordinat sistemleri (örn. WGS84 Boylam Enlem) desteklenmez. Belirli ulusal koordinat sistemleri hakkında daha fazla bilgi için lütfen ülkenizdeki ulusal topografya kurumuyla iletişime geçin.

3.13.2. Topografik Veriler - Dijital Yükseklik Modeli (DEM)

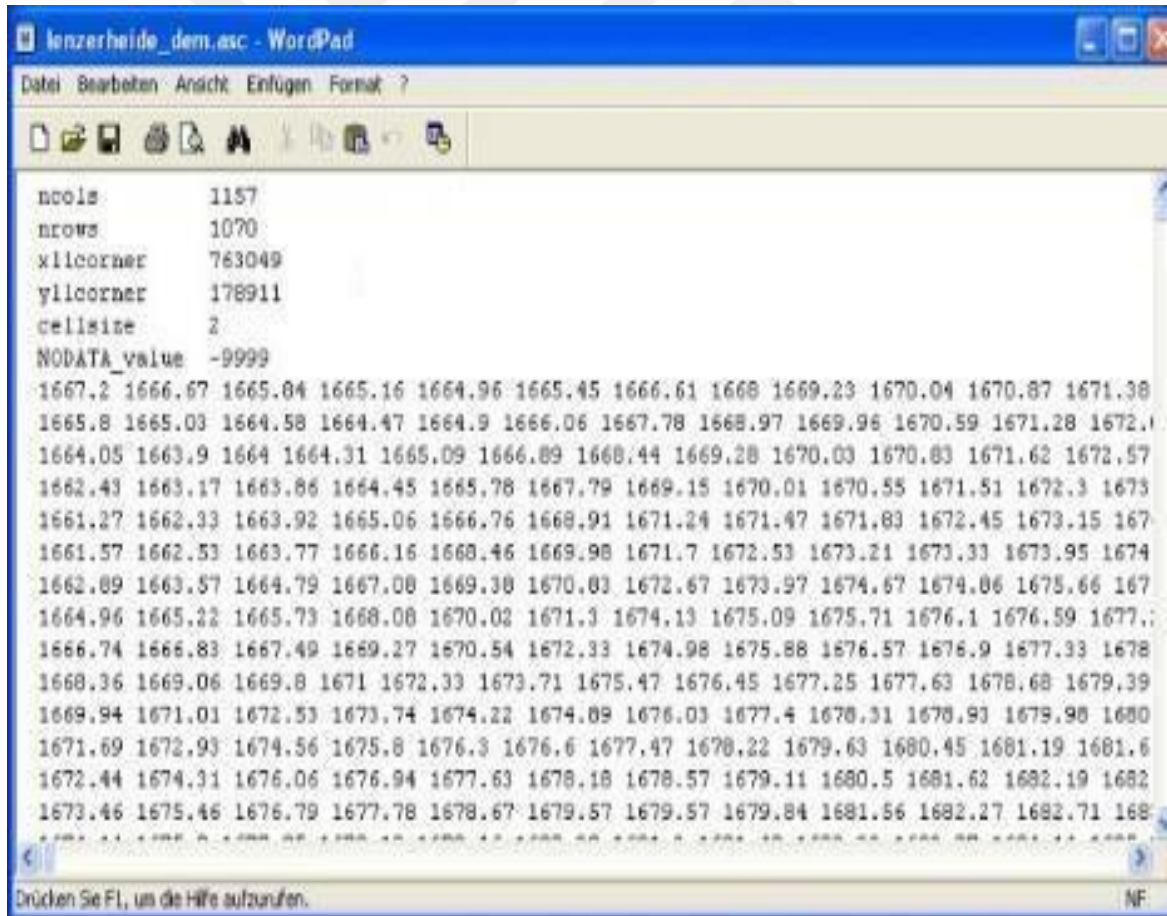
Topografik veriler en önemli girdi gereksinimidir. Bir kayanın nasıl hareket ettiği (yani nihai kaçış mesafesi, sıçrama yükseklikleri, öteleme ve dönme hızları ve kayanın toplam enerji içeriği) araziyle olan etkileşimden büyük ölçüde etkilenir. Bu nedenle simülasyon sonuçları büyük ölçüde topografik giriş verilerinin çözünürlüğüne ve doğruluğuna bağlıdır. Karmaşık arazilerde anlamlı kaya düşmesi simülasyonları için 2-5 m veya daha iyi bir DEM çözünürlüğü öneriyoruz. Ancak bu kadar yüksek uzaysal çözünürlüklü DEM verileri mevcut değilse, kullanıcının önemli arazi özelliklerinin DEM tarafından doğru şekilde temsil edilemeyebileceğini akılda tutması gerekir. Bu gerçekçi olmayan simülasyon sonuçlarına yol açabilir. Bir simülasyona başlamadan önce tüm önemli arazi özelliklerinin

DEM girişinde temsil edildiğinden emin olun. RAMMS aşağıdaki topografik verileri işleyebilir:

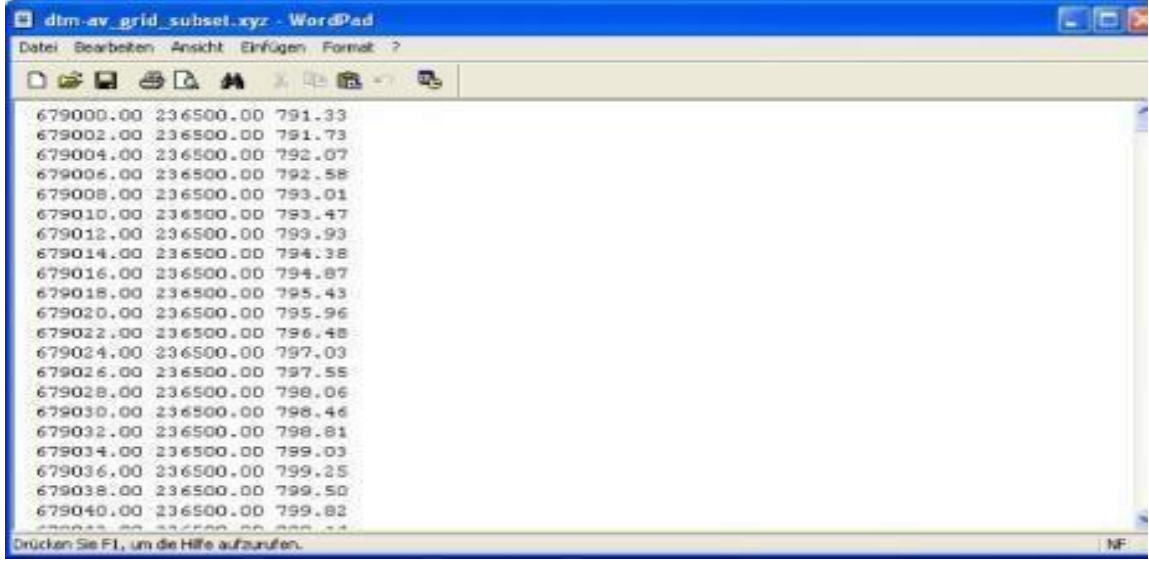
- ESRI ASCII ızgarası (Şekil 4-1)
- GEOTIF
- ASCII X, Y, Z tek boşluklu veriler (Şekil 4-2)

ASCII X, Y, Z verileri (düzenli ve düzensiz), RAMMS içerisinde bir ASCII veya GEOTIFF ızgarasına dönüştürülebilir. Bir sihirbaz, dönüştürme işlemi boyunca size yol gösterecektir. Aşağıdaki enterpolasyon yöntemleri mevcuttur: DOĞRUSAL veya TERS MESAFE olarak belirtilir.

Bir ESRI ASCII ızgarasının başlığı, Şekil 4-1'de gösterilen bilgileri içermelidir.



Şekil 3.5. ESRI ASCII Iızgarası



Şekil 3.6. ASCII X,Y,Z Tek Boşluklu Veriler

3.13.3. Proje ve Senaryolar

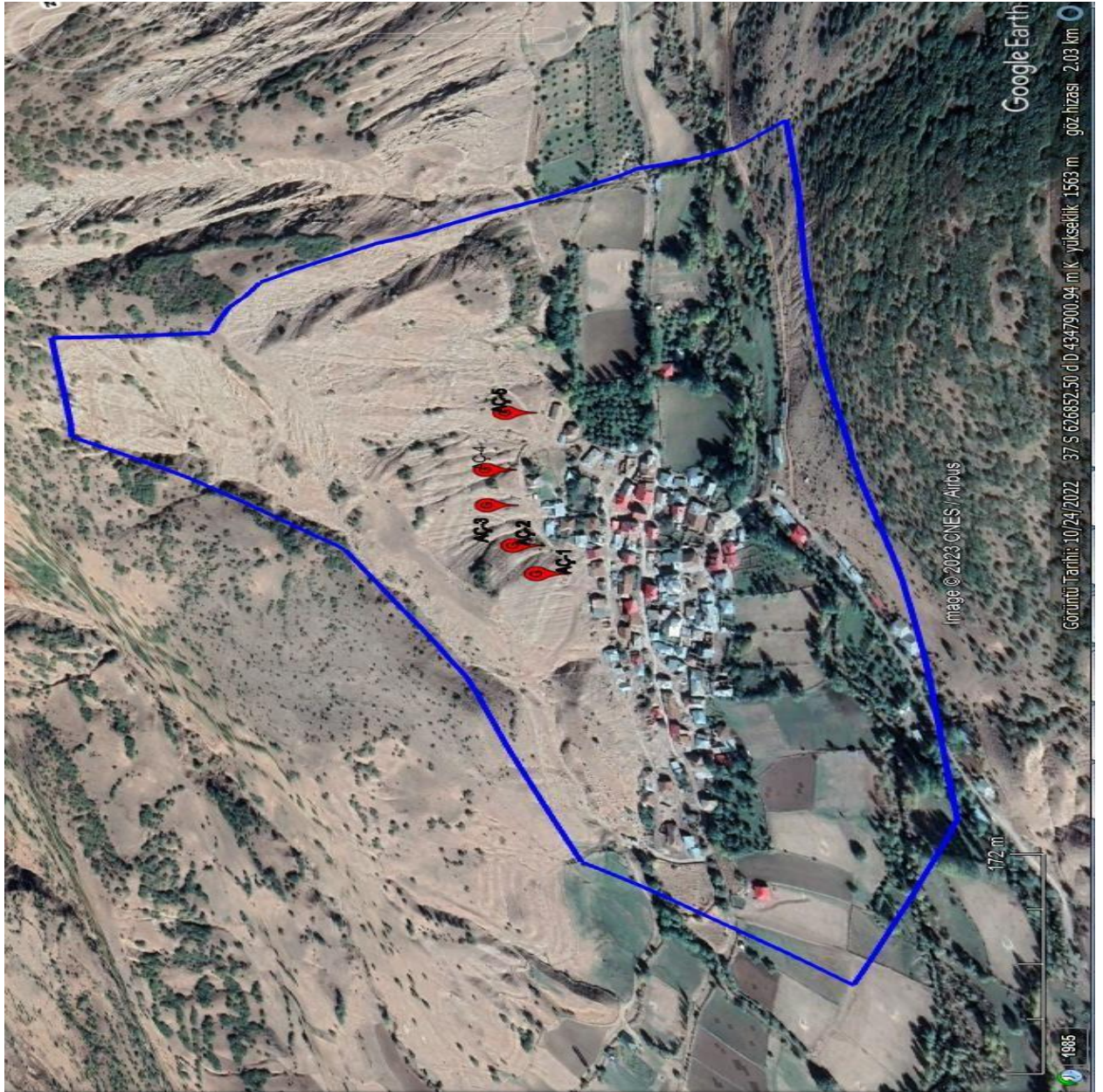
İlgi duyulan bir bölge için bir proje tanımlanır. Bir proje içerisinde bir veya daha fazla senaryo belirlenip analiz edilebilir. Her senaryo için bir hesaplama yürütülebilir. Bu nedenle bir proje, farklı girdi parametre dosyalarına (serbest bırakma ve sürtünme dosyaları) sahip farklı senaryolardan (girdi dosyaları) oluşur. Temel topografik girdi verileri her senaryo için aynıdır. Topografik giriş verilerini değiştirmek istiyorsanız (örneğin giriş DEM çözünürlüğünü veya proje sınır koordinatlarını değiştirin) yeni bir proje oluşturmanız gerekir. Diğer giriş parametreleri (kaya şekli, yüzey bilgisi, bitiş zamanı, zaman adımı vb.) her senaryo için değiştirilmesi mümkündür.

3.13.4. Tercihler

Dosya işlemeyi kolaylaştırmak için simülasyonlara başlamadan önce tercihleri ayarlayınız. Tercihler, çalışma dizinine ve DEM, haritalar ve ortogörüntüler gibi gerekli dosyalara giden yolu bulmayı sağlar. Haritaların ve görüntü dosyalarının yolu tercihlerde doğru ayarlanmışsa, bir proje oluşturduğunuzda RAMMS coğrafi referanslı verileri otomatik olarak açacaktır. RAMMS tercihleri penceresini açmak için Parça → Tercihler menüsü kullanılır ya da ilgili düğmeye tıklanarak tercih penceresi açılması gerekir. Genel tercihleri sıfırlamak için Yardım → Gelişmiş... → Genel Tercihleri Sıfırla seçeneği kullanılmalıdır.

3.13.5. Araştırma Alanı

Bingöl coğrafi olarak yüksek ve dağlık bölgede bulunmaktadır. Yükselti fazla olduğundan dolayı dik arazi yapısı hakimdir. Doğu ve Güneydoğu Anadolunun kesişme noktasında bulunması dolayısıyla sosyal yapısında pek çeşitlilik yoktur. İnceleme Alanı; Bingöl İli, Adaklı İlçesi Güngörsün köyü sınırları içerisinde yer almaktadır. Şev duraysızlığı problemi hakimdir. Arazi ulaşımı gayet rahattır herhangi bir sorun yoktur. İlçenin İl merkezine uzaklığı sancak üzerinden 76 km ve Karakoçan üzerinden İl merkezine olan uzaklığı ise 145 km dir. Adaklı 1987 yılında ilçe olmuştur ve içerisinde 7 köy mevcuttur. Tunceli ve Bingöl sınırının birleştiği yere dağlar arasına kurulmuş bir ilçemizdir. Adaklı, Doğu Anadolu Bölgesi'nin Yukarı Fırat Bölümü'nde olup, bu bölümün yeryüzü şekillerinin özelliklerini gösterir. Çok engebeldir. Deniz seviyesinden 1430 m. yüksekliktedir. Ulaşım kara yolu ile sağlanır.2024 nüfus sayımına göre İlçe nüfusu 7978'dir. İnceleme alanı Doğu Anadolu Bölgesinde bulunur. Bölgede Karasal iklim hakimdir. Kışları yoğun kar yağışı meydana gelmektedir. Adaklı ilçesinde bozkır bitkileri mevcuttur. İlçe arazisinde ciddi derecede meşe ve yaban kavağı ormanları mevcuttur
(<https://drive.google.com/file/d/15FdMHuL68uoSNA1qqVap5dUQor8m5G6c/view?usp=drivesdk>).



Şekil 3.7. Çalışma Alanı Uydu Görünümü

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Bingöl İli Adaklı İlçesi Güngörsün Köyünün Tanıtımı

Adaklı ilçesi, Doğu Anadolu Bölgesi'nde yer alan Yukarı Fırat Bölümü sınırları içinde konumlanmıştır ve idari olarak Bingöl iline bağlıdır. Yaklaşık 825 km²'lik bir yüzölçümüne sahip olan ilçe, kuzeyde Yedisu, doğuda Karlıova, batıda Kığı, güneyde ise Merkez İlçe ile komşudur. Coğrafi sınırları içerisinde kuzeyde Şeytan Dağları (2913 m) ve güneybatıda Karaboğa Dağları (2050 m) yer almakta olup, ilçe sınırları 7 mahalleden oluşan bir kasaba ile 33 köy ve 68 mezrayı kapsamaktadır. İlçenin nüfus yapısı ve dağılımı, hem doğal hem de beşeri faktörlerin etkisi altında şekillenmiştir. Bu bağlamda, iklimsel, jeolojik ve jeomorfolojik özellikler yanı sıra yerleşim tarihçesi ve bölgedeki terör olayları gibi insan kaynaklı etkenler de önemli rol oynamaktadır. Bölge genelinde hakim olan karasal iklim koşulları, yılın 4-5 ayını kar örtüsü altında geçirmekte ve kış aylarında sıcaklıklar zaman zaman 0 °C'nin altına düşerek yerleşim ve yaşam koşullarını zorlaştırmaktadır. İlçenin yıllık ortalama sıcaklığı 11,1 °C, yıllık yağış miktarı ise 1001,3 mm olarak kaydedilmiştir. Jeolojik açıdan ise Adaklı, aktif tektonik yapıların etkisi altında olup, Kuzey Anadolu Fayı (KAF) ile Sancak-Uzunpazar (Uzunpınar) Fay Zonu'nun kesişim noktasında yer almaktadır. Bu fay hatları kuzeybatı-güneydoğu ve kuzeydoğu-güneybatı doğrultusunda uzanmakta ve eğim değerlerinin artmasına neden olmaktadır. Bölgede gözlenen yüksek sismik aktivite, bu fay sistemlerinin varlığı ile ilişkilendirilmektedir (Avcı, 2016).

Bölgede meydana gelen depremler, önemli ölçüde yıkıcı etkilere sahiptir ve bu sarsıntılar, Hasbağlar, Gökçeli, Kozlu, Erbaşlar, Aysaklı, Yeldeğirmeni, Kamışgölü ve Kuşçimeni gibi köylerde heyelan oluşumunu tetiklemektedir. Deprem kaynaklı yer hareketleri, toprak taneleri arasındaki bağların zayıflamasına yol açmakta ve böylece kütledeki yapısal bozulmalar kayma olaylarının gerçekleşmesine zemin hazırlamaktadır (Sür, 1972; Arınç, 2016).

Bu doğal koşullar, nüfusun dağılımını ve göç eğilimlerini etkileyerek ilçe nüfusunda azalma eğilimine neden olmaktadır. Ayrıca, Adaklı'nın engebeli ve dağlık topografyası ile hakim olan karasal iklim özellikleri, tarım başta olmak üzere ekonomik faaliyetlerin yürütülmesini zorlaştırmaktadır. Bu durum, bölge halkının ekonomik kaynaklarının yetersiz kalmasına ve geçim sıkıntısının artmasına sebep olarak, ilçe dışına doğru göçü artırmaktadır. Öte yandan, Adaklı ve çevresinde yerleşimin başlangıç tarihi tam olarak bilinmemekle birlikte, bölgede bulunan bazı tarihi kalıntılar yerleşimin M.Ö. 3000'li yıllara dayandığını düşündürmektedir. Tarihsel süreçte birçok medeniyetin etkisi altında kalan bölge, ilkçağda Etiler ve Urartuların egemenliğinde bulunmuş, daha sonra Persler, Makedonyalılar ve Selevkosların hakimiyetine geçmiştir. M.Ö. 395 yılında Bizans topraklarına katılan Doğu Anadolu Bölgesi, Müslüman Arapların Sasani Devleti'ne son vermesiyle bölge Bizans ve Persler arasında el değiştirmiştir. Adaklı, daha sonraki dönemlerde Araplar (İslam Dönemi), Selçuklular, Akkoyunlular, Karakoyunlular, Osmanlılar ve son olarak Türkiye Cumhuriyeti sınırları içinde yer almaya devam etmiştir. 1839 yılında Kiğı ilçesiyle birlikte Erzurum'a bağlı bir köy iken, 1926'da Erzincan'a, 1936'da ise Bingöl'e bağlanmış ve Nahiye statüsüne yükselmiştir. Yapılan idari düzenlemeler sonucunda ise 4 Temmuz 1987 tarihinde 3392 sayılı yasa ile ilçe statüsüne kavuşmuştur (Adaklı Kaymakamlığı, 2018; Soylu, 2011).

Yöre halkının başlıca geçim kaynaklarından biri olarak tarım ve hayvancılık öne çıkmaktadır. Ancak, çalışma alanında tarıma elverişli arazilerin sınırlı olması nedeniyle, ekonomik yaşamda ağırlıklı rolü hayvancılık üstlenmektedir (Soylu, 2003).

Bingöl İl Gıda Tarım ve Hayvancılık Müdürlüğü'nün 2018 yılı verilerine göre, ilçede beslenen hayvanların yaklaşık 47.514'ü küçükbaş, 8.560'ı ise büyükbaş hayvanlardan oluşmaktadır. İlçede gerçekleştirilen hayvancılık faaliyetlerinde en önemli sorunlardan biri, hayvan varlığının büyük ölçüde verim açısından düşük performans gösteren yerli ırklardan oluşmasıdır. Bu sorunun çözümü amacıyla, devlet destekli kredi imkânları kullanılarak kültür ırkı hayvan ithalatı gerçekleştirilmiş ve böylece büyükbaş hayvanlar arasında kültür ırklarının oranı artırılmaya çalışılmıştır. Buna rağmen, ekonomik kaynakların yetersizliği ve diğer olumsuz faktörler, bölge halkının göç etmesine zemin hazırlamakta ve bu durum ilçe nüfusunun sürekli olarak azalmasına yol açmaktadır (Narınç vd., 2019).

4.2. Bingöl İli Adaklı İlçesi Güngörsün Köyünün Coğrafi, İklimsel ve Ekolojik Özellikleri

İl sınırları içerisindeki arazi yapısı oldukça engebeli ve yüksek olup, deniz seviyesinden yüksekliği 1250 metreyi aşmaktadır. Bölge, yaygın şekilde dağlık ve tepelik alanlardan oluşmakta; özellikle 1500 ila 2000 metre arasında değişen tepeler ve 2000 metreyi aşan dağlık kısımlar bulunmaktadır. Bu yükseltilerin, 3. jeolojik zamanın (Mezozoik ve Tersiyer dönemleri) tektonik hareketleri sonucunda oluştuğu belirlenmiştir. Bingöl dağları genellikle bazalt ve andezit türü volkanik kayalardan meydana gelmektedir. Dağların kuzey yamaçları nispeten hafif eğimli iken, güney kesimleri oldukça dik ve sarpıtır. Doğu Anadolu'nun en zengin orman varlığına sahip illerinden biri olan Bingöl'de, özellikle meşe türlerinin hakim olduğu ormanlar yaygın şekilde görülmekte ve bu ormanlar 1900 metreye kadar uzanmaktadır. Ancak uzun süreli orman tahribatı sonucu, ormanların yok olduğu alanlarda bozkır (step) bitki örtüsü oluşumu gözlemlenmektedir. İl genelinde toplam arazi alanı 812,537 hektar olup, kullanım dağılımı ise; %7,28'i tarım arazisi, %27,92'si ormanlık alan, %10,25'i ağaçlandırma alanı, %51'i mera, %2,2'si çayır ve %1,3'ü diğer arazi türlerinden oluşmaktadır (Bingöl Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Müdürlüğü).

4.3. Bingöl İli Adaklı İlçesi Güngörsün Köyünün İklim Özellikleri

Bingöl ve çevresi, kuzeyden gelen nemli ve serin hava kütlelerinin etkisi altında olup, ayrıca yüksek rakımın da etkisiyle yaz aylarında sıcak, kış aylarında ise soğuk bir iklim özellikleri göstermektedir. Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü verilerine göre, bölgenin yıllık ortalama sıcaklığı 12,1 °C civarındadır. Yıllık yağış miktarı yaklaşık 873,7 mm olarak kaydedilmiş olup, yıllık ortalama kar yağışlı gün sayısı 24,5, donlu gün sayısı ise 94,1 gün olarak belirlenmiştir (Bingöl Çevre Şehircilik İl Müdürlüğü). Bölgedeki başlıca yaylalar arasında Bingöl Yaylası, Şerafettin Yaylaları, Genç ilçesindeki Çötele (Çotla) Yaylası, Karlıova'daki Hırhal ve Çavreş Yaylaları, Kiğı'daki Kiğı Yaylası ile Dağın Düzü Yaylaları ve Adaklı ilçesindeki Karer Yaylası yer almaktadır. Hayvancılık açısından son derece elverişli olan bu yaylalar, özellikle Beritan (Bertyan) aşireti ve çevre köyler için önemli bir yaşam alanı teşkil etmektedir. Ayrıca, bu yaylalarda yürütülen arıcılık faaliyetlerinden elde edilen bal, ülke genelinde yüksek talep görmektedir.

4.3.1. Çalışma Alanının Jeolojisi

İnceleme alanı ve çevresinde, Orta-Üst Miyosen dönemine ait olan Yolüstü Formasyonu (ply) yer almakta olup, bu formasyon çakıltası, kumtaşı, silttaşı, çamurtaşı, marn, tüflü marn, kıltaşı, tüfit ve görsel kireçtaşı litolojilerinden oluşmaktadır. Ayrıca, Üst Miyosen yaşlı Solhan Formasyonu (Mivs) bazaltik andezit, andezitik bazalt, andezit, aglomera, volkanik breş, lapilli ve tuf gibi volkanik kayalardan meydana gelmektedir. Bölgedeki diğer litolojik birimler arasında trakiandezit, andezit ve kuvars latitten oluşan Golibabadağı Lavı (Mivsg), Üst Miyosen yaşlı Kohkaletepe Lavı (Mivsk), Hisarbabadağı Lavı (Mivshi), Selçuk İgnimbiriti (Mivss) ile Oligosen-Alt Miyosen dönemine ait Mollakulaçdere Formasyonu (Olmim) yer almaktadır. Ayrıca, bölge üzerinde Kuvaterner yaşlı alüvyon birimleri de gözlemlenmektedir (Bingöl Adaklı Güngörsün Çığ Etüdü).

4.3.2. Çalışma Alanının Bitki Örtüsü

Bingöl, yoğun kar ve yağmur yağışının etkisiyle, özellikle ilkbahar aylarında zengin ve canlı bir bitki örtüsüyle kaplanmaktadır. İlin yüzölçümünün yaklaşık %15'i ormanlık alanlardan, %70'i ise çayır ve meralardan oluşmaktadır. Özellikle akarsuların vadileri oldukça verimli ve yeşil alanlar halinde dikkat çekmektedir (Coğrafya Dünyası).

Bu araştırmada, Adaklı-Bingöl bölgesinde yer alan Hiro Yaylası ve çevresinin florası incelenmiştir. 2013-2016 yılları arasında gerçekleştirilen saha çalışmaları neticesinde 2250 bitki örneği toplanmıştır. Örneklerin taksonomik incelenmesi sonucunda, 74 familyaya ve 361 cinse ait toplam 548 tür, 200 alttür ve 98 varyete olmak üzere 846 takson belirlenmiştir. Araştırma alanında tespit edilen taksonların %8,51'i (72 takson) endemik türlerden oluşmaktadır. Ayrıca, endemik ve diğer risk altında bulunan toplam 77 taksonun koruma statüleri şu şekildedir: 5 takson kritik tehlike (CR), 3 takson tehlikede (EN), 13 takson hassas (VU), 6 takson yakın tehdit altında (NT), 48 takson az endişe verici (LC) ve 2 takson için veri yetersizliği (DD) raporlanmıştır. Fitocoğrafik açıdan taksonların dağılımı ise; İran-Turan elementleri %34,75 (290 takson), Avrupa-Sibirya elementleri %7,91 (67 takson), Akdeniz elementleri %5,31 (45 takson) ve çok bölgeli ya da fitocoğrafik bölgesi belirlenemeyen taksonlar %52,48 (444 takson) şeklindedir. Takson sayısına göre en fazla tür barındıran ilk 10 familya ise sırasıyla Asteraceae (105), Fabaceae (83), Poaceae (67), Brassicaceae (61), Lamiaceae (57), Caryophyllaceae (54), Apiaceae (39), Boraginaceae

(27), Rosaceae (26) ve Plantaginaceae (22) olarak belirlenmiştir. En fazla türe sahip ilk 10 cins ise Astragalus (23), Trifolium (16), Centaurea (12), Salvia (12), Veronica (12), Alyssum (12), Ranunculus (11), Silene (11), Vicia (10) ve Medicago (10) şeklindedir (Behçet vd., 2018).

4.4. Kaya Düşmesi Olaylarının Tespiti

Bingöl ili, kütle hareketlerinin sıkça gözlemlendiği bir bölge olma özelliği taşımaktadır. Merkez ilçenin yanı sıra Yedisu, Adaklı, Genç ve Solhan ilçelerinde heyelan olayları yoğunlukla yaşanmaktadır. Bölge, Kuzey Anadolu Fay (KAF) ve Doğu Anadolu Fay (DAF) zonlarının kesişim alanında yer aldığından, bu fay hatları boyunca kütle hareketleri yaygın biçimde görülmektedir. Bölgenin deprem aktivitesi, litolojik yapısı, topoğrafik eğimi ve yer altı su içeriği gibi faktörler heyelan oluşumunda belirleyici etmenler olarak ön plana çıkmaktadır. Bingöl ve bağlı yerleşim birimlerinde 2000-2020 yılları arasında meydana gelen veya meydana gelme riski taşıyan heyelan, kaya düşmesi, taşkın ve çığ gibi afetler kapsamında toplam 52 olay tespit edilmiştir. Bu doğrultuda hazırlanan jeolojik etüt raporları sonucunda, ilgili alanlar Bakanlar Kurulu kararıyla Afete Maruz Bölge (yapı ve ikamete yasaklı saha) olarak ilan edilmiştir. Raporda yer alan riskli bölgelerden nakil edilmesi kararlaştırılan alanlarda 473 kişi afetzede statüsünde kabul edilmiştir. Kaya düşmesi tehlikesi bulunan bir bölgede ise ıslah çalışmaları ekonomik olarak uygulanabilir bulunmuştur. Örneğin, Genç ilçesine bağlı Sarıdibek Köyü'nde hendek açılarak, tehlike oluşturan kaya blokları bu hendeğe yerleştirilmiş ve böylece risk azaltılmıştır. Kütle hareketlerinden zarar gören hak sahiplerine yönelik yeni yerleşim alanlarının oluşturulması ise ilgili müdürlük tarafından acilen yürütülmektedir (AFAD, 2021).

4.5. Kaya Düşmesi Türleri

4.5.1. Devrilme

Devrilme duraysızlığı, genellikle eğimin ters yönünde yer alan süreksizliklerle ayrılmış kolonlardan oluşan yapısal birimler üzerinde gözlemlenir; bu durum, kolonların belirli bir dönme eksenini etrafında, komşu kolonların etkisi ve yerçekimi kuvvetiyle birlikte kazı boşluğuna doğru devrilmesiyle karakterizedir. Bu tür devrilme, temel olarak bükülme

devrilmesi ve blok tipi devrilme olmak üzere iki ana kategoriye ayrılır. Bükülme devrilmesi, ince ve sürekliliği yüksek kolonların kazı boşluğuna doğru bükülmesi ve kayacın çekme dayanımının aşılması neticesinde kolonların kırılmasıyla ortaya çıkar. Öte yandan blok tipi devrilme, dikey konumda olan süreksizliklerin yanı sıra bu süreksizlikleri kesen diğer yapı elemanları tarafından sınırlanan blokların kayma hareketi sonucu gelişir.

4.5.2. Kayma

Kayma hareketleri, bir ya da birden fazla yüzey boyunca ve makaslama birim deformasyonu sonucunda meydana gelen yer değiştirmeler olarak tanımlanır. Bu hareketler temel olarak dairesel ve ötelenmeli kayma türleri şeklinde sınıflandırılır. Dairesel kaymalarda, kayma yüzeyi kaşık biçiminde kıvrımlı bir yapıya sahiptir; eğer tek bir yenilme yüzeyi mevcutsa buna tekil dönel kayma, birden fazla ardışık yenilme yüzeyi varsa ise dönel kayma denir. Bu tür kaymalarda, kayan kütlenin üzerindeki yapılar genellikle geriye doğru eğimlidir. Öte yandan ötelenmeli kaymalarda, kütle eğimli ve düzlemsel bir yüzey boyunca geriye yatmaksızın hareket eder.

4.5.3. Yanal Yayılma

Yanal yayılma, makaslama ve çekilme çatlaklarının varlığı sonucunda ortaya çıkan yatay doğrultudaki genişleme hareketidir. Bu hareket, kayan malzemenin özelliğine bağlı olarak iki ana kategoriye ayrılır: yanal kaya yayılması ve yanal zemin yayılması.

4.5.4. Akma

Bu tür duraysızlık, kohezyonsuz malzemenin, doymuş ya da kuru kum formunda, düşük ya da yüksek hızlarla yamaç boyunca akması şeklinde ortaya çıkar. Hareketin karakteristik özelliği, birden fazla makaslama yüzeyi boyunca gerçekleşmesi ve su içeriğinin yüksek olması durumunda malzemenin akışkan davranış sergilemesidir. Akışan malzeme türüne bağlı olarak bu olay, kaya akması, zemin akması ve moloz akması olmak üzere üç ana gruba ayrılmaktadır.

4.5.5. Karmaşık Kaymalar

Heyelanlar, genellikle birden fazla farklı duraysızlık türünün aynı anda geliştiği karmaşık yapılar sergileyebilir. Bu duruma örnek olarak, kaya düşmesi ile moloz çığının bir arada görülmesi, dönel kayma ile kaya devrilmesinin birlikte meydana gelmesi, dönel kayma ile zemin akmasının eşzamanlı gerçekleşmesi veya ötelenmeli kayma ile kaya düşmesinin birlikte yaşanması verilebilir (jmo.org.tr).

4.6. Kaya Düşmesini Neden Olan Faktörler

4.6.1. Donma-Erime Süreçleri ve Buz Çatlatması

Yılın büyük bir bölümünde gece ile gündüz arasındaki sıcaklık farklarından kaynaklanan donma-çözülme döngüsü, fiziksel aşınma süreçlerini tetiklemektedir. Kayaçlardaki kılcal çatlaklara sızan su tanecikleri, çatlakları tamamen doldurduktan sonra, gece sıcaklıklarının sıfırın altına düşmesiyle katılaşıp hacimsel olarak genişler ve çatlaklar arasındaki mesafeyi genişletir. Gündüz sıcaklıkların artmasıyla ise buzlar eriyerek sıvı hale dönüşür. Bu donma ve çözülme döngüsünün tekrarlanması sonucunda, küçük kılcal çatlaklar zamanla genişleyerek büyük yarıklara dönüşür ve kaya bloğunun ana kayadan ayrılmasına yol açar. Bu süreç, özellikle sıcaklık değişimlerinin belirgin olduğu mevsimlerde yoğun şekilde gerçekleşmektedir.

4.6.2. Isınma-Soğuma Süreçleri

Mekanik aşınmaya yol açan bir diğer önemli süreç ise çözülme olayıdır. Bu durum, gece ile gündüz arasındaki sıcaklık değişimlerinin neden olduğu kaya yüzeyindeki ısınma ve soğuma etkileriyle ortaya çıkar. Özellikle su bulunmayan zeminlerde bu ısınma ve soğuma etkileri daha belirgin şekilde hissedilir. Gündüz saatlerinde artan sıcaklık nedeniyle kaya yüzeyinde genleşme meydana gelirken, ısının kayaç derinliklerine ulaşmaması sebebiyle iç kısımlarda bu genleşme gözlenmez. Gece ise yüzey sıcaklığının düşmesiyle büzülme yaşanırken, ortadaki bölgelerde sıcaklık değişimi az olduğundan herhangi bir genleşme veya büzülme gerçekleşmez. Bu tekrarlayan genleşme ve büzülme döngüsü, kaya

yüzeyinde pullanma ve çatlakların oluşmasına neden olur. Ayrıca, bu çatlakların oluşumunda kimyasal etkilerin de rol oynadığı bilinmektedir.

4.6.3. Islanma-Kuruma Süreçleri

Isınma ve soğuma kaynaklı pullanma ve çatlamalara kıyasla daha az sık rastlanan bir diğer süreç ise ıslanma ve kuruma döngüsüdür. Mevsim geçişlerinde, kar örtüsünün sıcaklık artışıyla eriyip sıvı forma dönüşmesi sonucu zemin ıslanmakta; ardından kuruma süreciyle birlikte kaya zemini büzülme göstermektedir. Bu olgu, özellikle ilkbahar döneminde, sık aralıklarla yağan yağmurun ardından güneşin etkisiyle zeminin kuruması esnasında da kendini göstermektedir. Özellikle killi ve marnlı kayalarda bu süreç daha belirgin ve etkili olurken, suyu emme ve verme kapasitesine sahip geçirgen yapısıyla kalkerlerde de ıslanma-kuruma etkileri daha az yoğunlukta gözlemlenebilmektedir.

4.6.4. Bitkilerin Çözülme Etkileri

Kayaçların kılcal çatlaklarında bulunan otlu bitkilerin kökleri tarafından salgılanan organik asitler, kayalarda kimyasal aşınma süreçlerini hızlandırmaktadır. Ayrıca, ağaç köklerinin büyüme sürecine paralel olarak gelişmeleri, kayalardaki çatlakların genişlemesine ve mekanik ayrışmaya yol açarak, fiziksel bozulma sonucunda kaya bloklarının kopmasına neden olmaktadır. Bu durum, özellikle ana kayanın ağaç kökleri tarafından parçalanmasına zemin hazırlamaktadır. Bununla birlikte, ağaç yüzeyinde bulunan yosunlar ve likenler, köklerinden salgılanan kimyasal maddeler aracılığıyla kayalarda kimyasal aşınmayı desteklemektedir. Bitkiler, su etkisinden sonra ağaç ayrışmasında ikinci en etkili doğal faktör olarak kaya düşmelerinin oluşumunda önemli bir rol oynamaktadırlar.

5. KAYA DÜŞMESİNİ KONTROL EDEN FAKTÖRLER

5.1. Düşebilecek Blokların Boyutları ve Konumları

Arazi çalışmaları sırasında blokların şekli ve boyutları mutlaka titizlikle incelenmelidir. Bu süreçte, maksimum ve ortalama blok boyutları, yaygın blok şekilleri ile düşme riski taşıyan blokların koordinatları (x, y, z) gibi bilgilerin yamaç veya şev boyunca sistematik olarak toplanması gerekmektedir. Elde edilen bu veriler, detaylı haritalar halinde sunulmalıdır. Ayrıca, bazı gelişmiş yazılımlar (örneğin RAMMS v1.6) kullanıcıların karmaşık blok şekillerini tanımlamasına imkan tanıyarak analizlerin doğruluğunu artırmaktadır.

5.2. Arazi Deneyleri

Bloğun hareket yönünde herhangi bir zarar oluşturmayacak güvenli bir test sahası oluşturulabilirse, arazide gerçekleştirilen deneysel çalışmalar değerli veriler sunabilir. Ancak bu her zaman mümkün olmayabilir. Düşen bloklara ilişkin verilerle kalibre edilmemiş veya arazi testlerinden yararlanılmamış kaya düşmesi modelleri, koruma ve önlem projelerinde yeterli katkı sağlamamaktadır. Kaya düşme analizlerinde, geri verme katsayıları (R_n ve R_t) tahminlerinin doğruluğu açısından bu veriler önemli bir rol oynamaktadır.

5.3. Kaynak Zonu Malzeme Özelliklerinin Değerlendirilmesi

Birim hacim ağırlığı, kaya mühendisliği analizlerinde kritik bir girdi parametresi olarak kabul edilmektedir. Özellikle yüksek yağış alan bölgelerde, doymun birim hacim ağırlığının dikkate alınması önem taşımaktadır. Kaynak zonundaki malzemenin dayanım özellikleri, örneğin tek eksenli basınç ve çekme dayanımları, mekanik davranışın doğru değerlendirilmesi açısından büyük rol oynar. Ayrıca, blokların kaya kütesine sabitlenmesi ya da kaya yüzeylerinin basit ya da güçlendirilmiş tel kafes sistemleriyle kaplanması sırasında kullanılacak kaya saplamalarının tasarımında, kaya malzemesinin çekme dayanımı değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun yanı sıra, yuvarlanma zonu içinde yer

alan pasif kaya düşmesi koruma yapılarının—örneğin kaya tutma bariyerlerinin—yerleştirilmesi kararı alındığında, bu yapıların sabitleneceği topoğrafik yüzeyin özellikleri de tasarım sürecinde göz önünde bulundurulmalıdır (Akın, 2021).

5.4. Kaya Düşmesi Analizi Aşamaları

- Veri toplama süreci kapsamında; saha fotoğraflarının çekilmesi, jeolojik incelemelerin yapılması, süreksizliklerin ölçülmesi, kaya örneklerinin temin edilmesi, temel sürtünme açısının belirlenmesi ve ilgili literatürün kapsamlı olarak incelenmesi gerçekleştirilmektedir.
- Sahada çeşitli deneysel uygulamalar yapılmaktadır.
- Duraylılık analizleri titizlikle yürütülmektedir.
- Kaya düşmesi olaylarının değerlendirilmesi ve bu risklere karşı önleyici tedbirlerin geliştirilmesi çalışmaları sürdürülmektedir.

5.5. Kaya Düşmesi Islah Yöntemleri

Kaya düşmesi ıslah yöntemleri, aktif ve pasif sistemler olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır. Pasif sistemler, düşen kaya parçalarının hareketini durdurmayı veya bunların korunan alanlara girmesini engellemeyi hedefleyen uygulamalardır; bu kapsamda örtüleme, bariyer sistemleri, sedde yapıları ve hendekler gibi yöntemler yer almaktadır. Aktif sistemler ise, potansiyel olarak düşme riski taşıyan blokların yerinde sabitlenmesi (örneğin zemin çivileri ve derin ankraj sistemleri) ya da kontrollü şekilde uzaklaştırılması (patlatma, kırma gibi) suretiyle kaya düşmesi riskini azaltmayı amaçlayan müdahaleleri içermektedir.

5.6. Bulguların Değerlendirilmesi

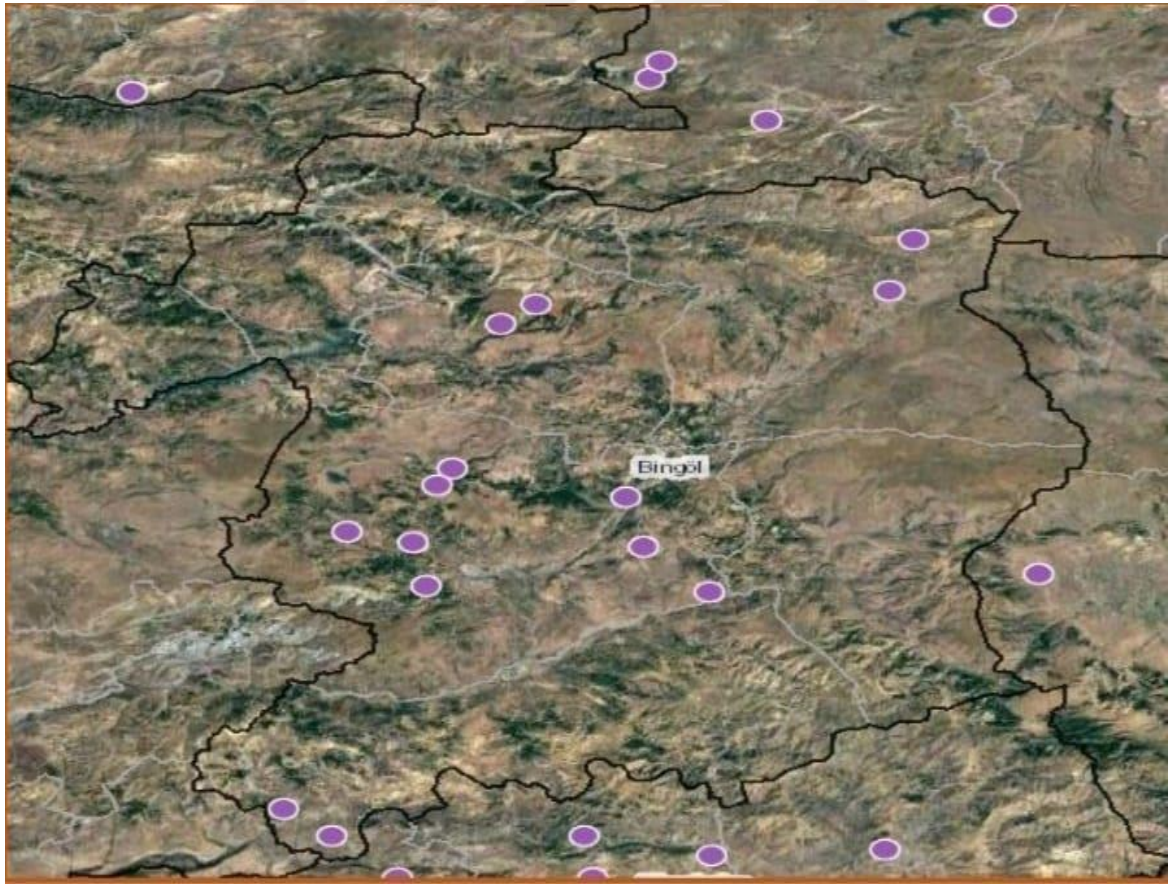
5.6.1. Kaya Düşmesi Olayının Bingölde Dağılımı ve Etkileri

İlimizde, yüksek rakımlı alanların bitki örtüsünün zayıf olması ve litolojik yapının kaya düşmesi oluşumuna elverişli olması nedeniyle, kaya düşmesi olayları sıklıkla

yaşanmaktadır. Ayrıca, bölgenin deprem kuşağı üzerinde yer alması sebebiyle, deprem sırasında ve sonrasında da kaya düşmesi vakaları gözlemlenmektedir. Bu durum, özellikle Kuzey Anadolu Fayı (KAF) ve Doğu Anadolu Fayı (DAF) zonları boyunca kaya düşmesi riskinin artmasına yol açmaktadır (Bingöl AFAD IRAP, 2012).

5.6.2. Geçmiş ve Güncel Kaya Düşmesi Olayları

Bingöl ilinde kaya düşmesi riskine bağlı olarak 22 adet Afete Maruz Bölge (AMB) tespit edilmiştir. Bu bölgelerde meydana gelen 22 kaya düşmesi olayı sonucunda toplam 688 konut etkilenmiştir. Belediyeler kontrolünde bulunan ve imar planlarına temel oluşturan jeolojik-jeoteknik etüt raporlarında önlemler belirtilmiş olmasına karşın, belediyelerin bu hususları yeterince dikkate almadığı gözlemlenmektedir. Son yıllarda ise, imarlı alanlarda gerekli güvenlik tedbirleri alınmadan yapılaşmaya izin verildiği görülmektedir.



Şekil 5.1. Bingöl Kaya Düşmesi Poligonları (ARAS)

Aşağıdaki tabloda Bingöl İlinde geçmişte yaşanan kaya düşmesi olaylarına yer verilmiştir:

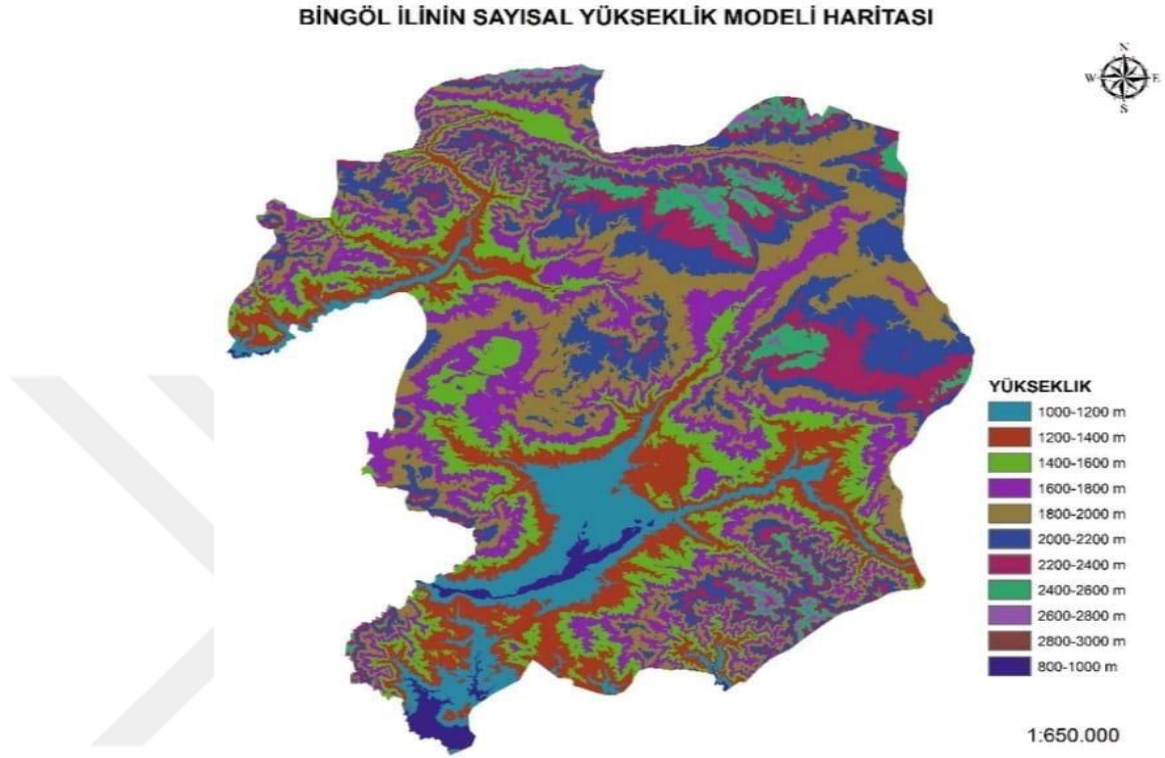
Tablo5.1. Bingölde Geçmişte Yaşanan Kaya Düşmesi Olayları

İLİ	İLÇESİ	KÖYÜ/BELDESİ	MAHALLESİ	AFETİN TÜRÜ	AFETİN MEYDANA GELDİĞİ TARİH	AFETE MARUZ YAPI SAYISI
BİNGÖL	MERKEZ	BALIKLIÇAY	ÜNLÜCE	HEY+KD+SB	12,09,1997	16
BİNGÖL	MERKEZ	GÖKÇEKANAT	MERKEZ	KD	13,09,1997	7
BİNGÖL	YAYLADERE			HEY+KD		
BİNGÖL	ADAKLI	GÜNGÖRSÜN		KD+ÇİĞ	29,05,1992	20
BİNGÖL	MERKEZ	AŞAĞIKÖY		KD+ÇİĞ	26,05,1992	2
BİNGÖL	MERKEZ	MERKEZ	KARŞIYAKA,BULAK	KD	25,09,1965	299
BİNGÖL	KARLIOVA	MERKEZ	KANİREŞ	KD	10,10,2004	4
BİNGÖL	KARLIOVA	KAYNARPINAR		HEY+KD+ÇİĞ	03,09,1962	35
BİNGÖL	MERKEZ	KIRKAĞIL		KD	24,04,1989	17
BİNGÖL	GENÇ	HARMANCIK		KD	22,12,2005	16
BİNGÖL	SOLHAN	YENİDAL	GÖL	KD	05,04,2006	5
BİNGÖL	GENÇ	YAZILI		HEY+KD+YAMAÇ	15,09,2006	52
BİNGÖL	ADAKLI	ÇATMAOLUK		KD	07,12,2006	15
BİNGÖL	MERKEZ	OĞULDERE	KİLİSE	KD	16,10,1982	55
BİNGÖL	MERKEZ	ALİBİR		KD	08,10,1982	24
BİNGÖL	MERKEZ	KARDEŞLER	NEBİYAN	KD		0
BİNGÖL	ADAKLI	ARICA		KD	23,07,1970	57
BİNGÖL	ADAKLI	AYVADÜZÜ	GÖZÜPEK	HEY+KD	19,06,2009	2
BİNGÖL	GENÇ	SARIBUDAK		KD	24,07,2013	4
BİNGÖL	MERKEZ	KIRKAĞIL	YUSUFBEĞEN	SB,ÇİĞ,HEYELAN,KD	11,07,1980	15
BİNGÖL	MERKEZ	ORTAÇANAK	ALMALI	ÇİĞ,KD,SB	14,07,1980	14
BİNGÖL	MERKEZ	ÇİRİŞ		HEY,KD,ÇİĞ	25,06,1981	45

5.6.3. Kaya Düşmesi Risk ve Tehlike Analizi

Bütünleşik Afet Risk Azaltma çalışmaları kapsamında, ilin risk yönetimi faaliyetlerine temel oluşturmak, afet ve acil durum planlarının hazırlanmasına katkı sağlamak, çevre düzeni planlarının oluşturulmasında plancılara ihtiyaç duyulan afet bilgilerini sunmak ve karar alıcılarla uygulayıcı mekanizmalara doğru ve güncel veriler ile destek vermek amaçlanmaktadır. İl sınırları içerisinde toplam 378 kaya düşmesi kaynak alanı tespit edilerek analizlere dahil edilmiştir. Bunlardan 175 kaya düşmesi kaynak alanı envantere alınmış ve AYDES sistemine aktarılmıştır. Kaya düşmesi; dik eğimli, yüzeylenen ve eklemlili kayaç ortamlarında, süreksizliklerin sınırladığı kaya bloklarının serbest yüzeye doğru küçük hareketlerle duyarlılığını kaybetmesi ve eğim aşağı hızlı bir şekilde hareket

etmesi sonucu ortaya çıkan yamaç duraysızlığı türüdür. Bu bağlamda, eğim faktörü kaya düşmelerinin oluşumunda önemli bir rol oynamaktadır.



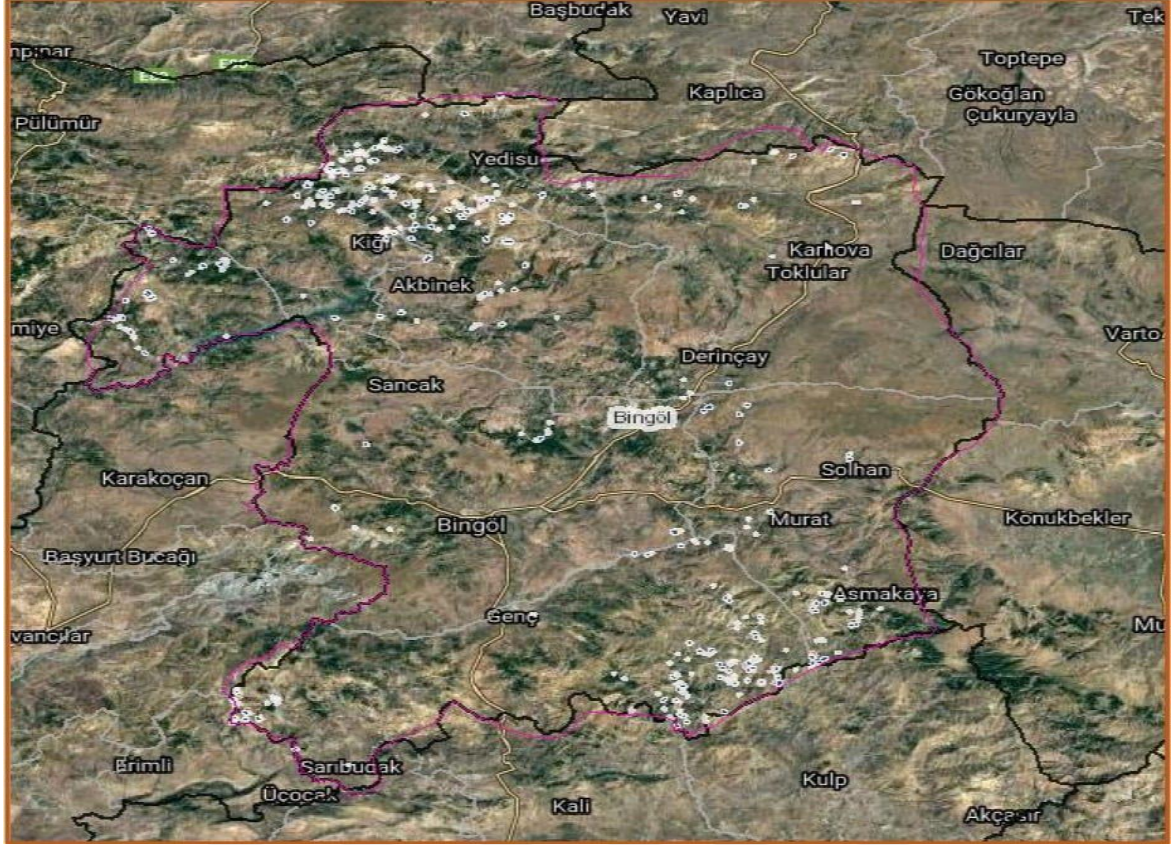
Şekil 5.2. Bingöl İli Sayısal Yükseklik Modeli Haritası

Eğim haritası kullanılarak, 43° ve üzeri eğim değerine sahip piksellere +1, diğer eğim değerlerine sahip piksellere ise -1 değeri atanmış ve bu veriler coğrafi bilgi sistemi (CBS) aracılığıyla sınıflandırılarak potansiyel kaynak alanlar tespit edilmiştir. +1 ile işaretlenen bölgeler, potansiyel kaynak alanlarını temsil etmektedir.



Şekil 5.3. Kaya Kaynak Alanları.

İlimiz sınırları içerisinde tespit edilen potansiyel kaya düşmesi kaynak alanlarının etki bölgeleri, duyarlılık haritasında 0 ile 3 arasında değerler alacak şekilde sınıflandırılmıştır. Burada 3 değeri en yüksek kaya düşmesi duyarlılığını, 2 orta seviyede duyarlılığı, 1 düşük duyarlılığı, 0 ise kaya düşmesi açısından duyarsız alanları temsil etmektedir. Analize dahil edilen 175 kaya düşmesi kaynak alanının pikselleri incelendiğinde, düşük duyarlılığa sahip alanların %30, orta duyarlılıktakilerin %21 ve yüksek duyarlılıktakilerin ise %49 oranında olduğu belirlenmiştir. Piksel dağılımı incelendiğinde, Bingöl ilinin kuzeybatısındaki Yedisu ve Kığı ilçeleri ile Genç ilçesinin güneydoğusundaki bölgelerde kaya düşmesi potansiyelinin daha yoğun olduğu görülmektedir (Bingöl AFAD IRAP, 2012).



Şekil 5.4. Bingöl Kaya Düşmesi Duyarlılık Analizi (ARAS).

5.6.4. Kaya Düşmesine Neden Olan Önemli Faktörler

Kaya düşmesi olayları, farklı içsel ve dışsal kuvvetlerin etkisi altında gelişmektedir. Genellikle bu tür düşmeleri tetikleyen birden fazla faktör bir arada rol oynar. Bu faktörler temel olarak yapısal, çevresel ve antropojenik (insan kaynaklı) olmak üzere üç ana kategoriye ayrılabilir. Söz konusu kategorilere bağlı alt faktörler aşağıda detaylı şekilde sunulmuştur (AFAD, 2020).

1. Yapısal faktörler (iç faktörler)

Yapısal faktörler kapsamında şu unsurlar öne çıkmaktadır:

- Yamaç veya şevnin jeolojik özellikleri,
- Kinematik açıdan duraysızlık riski taşıyan süreksizlik yüzeyleri,
- Kırıklıklı ve çatlaklı kaya kütlelerinin varlığı.

2. Çevresel faktörler (dış faktörler)

Çevresel faktörler arasında şunlar yer almaktadır:

- a. Yağışlar,
- b. Donma ve çözülme döngüleri,
- c. Rüzgar etkileri,
- d. Kar erimesi süreçleri,
- e. Ani yüzeysel su akışları,
- f. Yeraltı su kaynakları veya sızıntılar,
- g. Kazıcı hayvan faaliyetleri,
- h. Farklı derecelerdeki ayrışma,
- i. Ağaç köklerinin etkisi,
- j. Deprem hareketleri.

3. Antropojenik faktörler (dış faktörler)

- a. Kontrolsüz patlatma uygulamaları,
- b. Trenlerin ve ağır inşaat makinelerinin neden olduğu titreşimler,
- c. Uygun olmayan şev tasarım uygulamaları

Kaya düşmesi potansiyeli bulunan bölgelerde, kaya düşmelerinin oluşumunda yamaç ya da şevi meydana getiren malzemenin jeolojik özellikleri önemli bir rol oynar. Öncelikle, düşen kaya kütesinin can ve mal güvenliği açısından tehlike yaratabilmesi için, kaya bloğunun çarpma anında dayanıklılığını koruyacak sağlamlıkta olması gerekmektedir. Örneğin, granit, kireçtaşı ve bazalt gibi yüksek mukavemete sahip kayalar, büyük ve tehlikeli kaya düşmelerine yol açabilirken; şeyl ve fillit gibi zayıf dayanımlı kayalar ise ayrılarak daha küçük ve zararsız parçalara ayrılmaktadır. Kaya düşmelerinde etkili diğer bir jeolojik faktör ise süreksizliklerin aralığı ve sürekliliğidir. Süreksizlik aralıklarının dar olduğu kaya kütlelerinde oluşan bloklar daha küçük boyutlu olur ve bu durum genellikle sadece yayalar ve küçük araçlar açısından sınırlı hasar riski taşır (Wyllie, 2015).

Diğer yandan, süreksizliklerin yönelimleri de kaya düşmelerini belirleyen önemli bir etkidir. Kinematik açıdan düzlemsel, kama ve devrilme türündeki yenilme potansiyeline sahip bloklarda gerçekleşen kırılmalar, kaya düşmelerini tetikler. Yamaç veya şev jeolojisi aynı zamanda düşen blokların geometrik şekillerini ve atalet momentlerini belirlemektedir. Örneğin, yaklaşık eşit aralıklarda birbirini kesen iki süreksizlik seti, küp veya elipsoidal şekillerde bloklar oluştururken; ince tabakalı kaya kütlelerinde bloklar disk veya levhamsı biçimde gelişir. Sütun bazaltlarda ise silindirik blokların oluşumu yaygındır. Kaya düşmesi esnasında, çarpma etkisiyle blokların düzensiz ve çıkıntılı yüzeyleri kırılarak daha düzgün bir forma ulaşmaya çalışır (Wyllie, 2015).

Atmosferik koşulların döngüsel etkileri ve aşırı yağışlar, kaya düşmelerinin başlıca tetikleyicilerindendir. Süreksizliklerde biriken su ve buz, bu yüzeylere basınç uygulayarak blokların yer değiştirmesine ve şev boyunca hareketine neden olur. Donma derinliği genellikle 1-2 metreyi aşmaz; bu yüzden donma-çözülme döngüleri çoğunlukla yüzeysel düzeyde etkili olur ve şev yüzeyindeki blokların hareketini tetikler. Ayrıca, buzların erimesiyle oluşan sular daha önceden hareket eden blokları iterek düşme sürecini başlatabilir. Nemli iklimlerde hızlı gelişen bitki örtüsü ve ağaç kökleri, kaya kütlelerindeki süreksizliklere derinlemesine nüfuz edebilir. Ağacın büyümesiyle kökler de genişleyerek süreksizliklerin genişlemesine yol açar; bu da yüzey sularının süreksizliklere erişimini kolaylaştırır ve dolayısıyla kaya kütlesi, su ve don basınçlarına daha fazla maruz kalır (Wyllie, 2015).

Depremler ise kaya düşmelerini tetikleyen önemli dış etkenlerden biridir. Özellikle dağlık bölgelerde gerçekleşen sarsıntılar sonrasında kaya düşmeleri yoğun şekilde gözlemlenmektedir. Ayrıca, büyük depremler sonrası yerleşim alanlarında çok sayıda kaya düşmesi olayı rapor edilmiştir (Grant ve ark., 2018).

5.7. Kaya Düşmelerini Önleme Yöntemleri

5.7.1. Orman

Yamaçlarda sınırlı sayıda ağaç bulundurulması, yuvarlanan taş ve kayaların hareketini yavaşlatarak maksimum sıçrama yüksekliklerinin azalmasına katkıda bulunabilir. Yuvarlanan malzemeler, yaklaşık olarak 40 metre mesafeden sonra en yüksek hızlarına ulaşmaktadır. Bu nedenle, potansiyel tehlike alanlarında açıklık mesafesinin 20 metreyi geçmemesine dikkat edilmelidir.

5.7.2. Hendekler

Şevin taban kısmında yeterli alan bulunması durumunda, kaya tutucu hendekler ekonomik ve etkili bir çözüm yöntemi olarak tercih edilmektedir. Yaklaşık 75° 'den daha dik eğimli şevlerde, kaya blokları yüzeye yakın kalma eğiliminde olup, genellikle şevin topuk kısmına yakın bir noktada durmaktadırlar. Eğimi 55° ile 75° arasında değişen şevlerde ise düşen kaya bloklarının sıçrama olasılığı bulunduğundan, hendeklerin topuk noktasından biraz daha uzakta konumlandırılması gerekmekte ve bu nedenle daha geniş hendekler tasarlanmalıdır. Öte yandan, eğimi 40° ile 55° arasında olan arazilerde ise kaya blokları yuvarlanarak hendek içine doğru hareket etmektedir.

5.7.3. Bariyerler

Mevcut uygulamalarda, hendeklerin dayanıklılığını artırmak ve şev tabanında etkili yakalama alanları oluşturmak amacıyla bariyer sistemleri kullanılmaktadır. Bu bariyerlerin türü, şevin boyutları, bölgenin jeolojik özellikleri ve düşen kaya bloklarının sahip olduğu enerjiye göre belirlenmektedir. Bariyerler, çarpma anında esnek bir yapı sergileyerek enerjiyi absorbe edecek şekilde tasarlanmalıdır. Özellikle yüksek enerjili kaya düşmelerinde, bariyerlerin hem esnekliği koruması hem de gelen yükü güvenli bir biçimde karşılayabilmesi gerekmektedir.

Taş sepetleri ve beton bloklar, çapı 0,75 metreye kadar olan kaya parçalarının etkili bir şekilde kontrol altına alınmasında kullanılan koruyucu bariyerlerdir.

Jeofabrik-zemin bariyerlerinin kaya düşmelerini durdurma kapasitesi ise, çarpma sırasında oluşan enerjiye kıyasla bariyerin kütlesi, tabanındaki kesme direnci ve yapının yenilmeden önceki deformasyon kapasitesi gibi faktörlere bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

5.7.4. Kayaç Tutma Çitleri ve Sönümleyiciler

Kaya tutma çitleri ve enerji sönümleyiciler, rijit olmayan yapıları sayesinde düşen kaya bloklarının çarpma enerjisini absorbe edebilecek şekilde tasarlanmalıdır. Kaya bloğunun çarpması sonucunda bu ağlar enerjiyi etkili biçimde sönümleyerek potansiyel tehlikelerin oluşmasını engeller. Bu yöntem, kaya bloklarını tutmada yüksek verim sağladığından, yapısal açıdan maliyeti düşük ve ekonomik çözümler geliştirilmesine olanak tanımaktadır.

5.7.5. Perdeli Ağ Yöntemi

Kaya bloklarına yakın bölgelerde, kaya parçalarının düşmesini önlemek amacıyla yüzeye gerilen ağlar, kaya bloklarının insanlara veya yollara sıçramasını engellemede etkili bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Koparak düşen kaya bloklarının enerjisi ağlar tarafından sönümlendiğinden, şevin tabanında büyük çaplı hendeklerin yapılmasına gerek kalmamaktadır. Zincirleme bağlı ağlar, genellikle 0.6-1 metre çapındaki küçük kaya düşmelerine karşı koruma sağlarken, 1-3 metre boyutlarındaki kaya blokları için halkalı ağlar veya örgülü tel ipler daha uygun bir çözüm sunmaktadır. Ağların kendi ağırlığını taşıyamadığı durumlarda, çelik tellerle güçlendirilmesi mümkündür. Düşen kaya bloklarının ağlara çarpması sonucu momentumun azalması için, ağların kaya zemininin üst kısmına doğru gerilmesi gerekmektedir. Ayrıca, ağlar şev yüzeyine veya tabanına ankrajlanmamalıdır; böylece düşen kaya parçaları şevin topuğundaki hendeğe doğru yönlendirilir ve ağın arkasında birikme yaparak yırtılma riski azaltılır. Aksi takdirde, biriken kaya parçaları ağın zarar görmesine sebep olabilir.

5.7.6. Kaya Sundurmaları ve Tüneller

Kaya düşmelerinin önlenmesine yönelik yapılan çalışmaların maliyetinin yüksek olduğu durumlarda, kara yolunun mevcut güzergâhında kaya sundurma tünelleri inşa edilmesi veya yolun tünel içerisinden geçirilmesi daha pratik bir çözüm olarak

değerlendirilmektedir. Özellikle eğimin fazla olduğu bölgelerde, kaya sundurma tünellerinin üst kısımlarının hafif eğimli olması gerekmektedir; böylece düşen kaya bloklarının enerjisi etkili bir şekilde sönmülenebilmektedir. Sundurma tünellerinin tasarımında en kritik unsur, enerjiyi ve ağırlığı emerek dağıtan yastık malzemesinin özellikleridir. Bu yastık, gelen enerjiyi yalnızca soğurmakla kalmayıp, aynı zamanda enerjinin tek bir noktada yoğunlaşmasını engelleyerek daha geniş bir alana yayılmasını sağlar. Ayrıca, bu yastık malzemesi tek kullanımlık olmayıp, hasar sonrası yeniden kullanılabilir şekilde tasarlanmalıdır (insapedia.com).



6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, Bingöl ili Adaklı ilçesi Güngörsün köyünde meydana gelebilecek kaya düşmeleri, RAMMS Rockfall yazılımı kullanılarak modellenmiş ve bölgenin risk durumu ortaya konulmuştur. Yapılan çalışmalarda Yüksek çözünürlüklü Sayısal Yükseklik Modeli (DEM) kullanılarak bölge yüzey morfolojisi analiz edilmiştir. Eğim haritaları ve curvature (eğrilik) analizleri ile kaya düşmesinin muhtemel başlangıç ve birikme alanları belirlenmiştir. Simülasyonlarda farklı boyut ve yoğunlukta taş blokları modellenmiştir. Yapılan analizler, çalışma alanındaki dik yamaçlar ve topoğrafik özellikler gibi faktörlerin kaya düşmesi tehlikesini artırdığı görülmüştür. Modelleme sonuçlarına göre, kaya bloklarının hareket ettiği zaman kazandıkları hız ve enerji değerleri, tarım arazileri, yerleşim alanları, yollar ve altyapılar üzerinde ciddi tehdit oluşturmaktadır.

Çalışmadan elde edilen bulgular sonucunda aşağıdaki öneriler geliştirilmiştir:

- Yamaç eteklerinde tel ağ sistemleri, enerji sönümleyici bariyerler veya beton duvarlar yapılmalıdır.
- Düşme güzergahlarında koruyucu hendek ve bentler planlanmalıdır.
- Düşme riski taşıyan bölgelerde sensör destekli erken uyarı sistemleri kurulmalıdır.
- Eğim, sıcaklık gibi parametreler sürekli izlenmelidir.
- Köy halkı, olası kaya düşmesi tehlikesi ve korunma yolları hakkında bilgilendirilmelidir.
- Riskli olan alanlarda yapılaşmaya izin verilmemelidir.
- Yerleşime yakın kayalık alanlarda kontrollü kaya bloklarının düşürülmesi ve yamaç stabilizasyonu sağlanmalıdır.
- Yamaçları güçlendirmek amacıyla ankraj sistemleri, beton püskürtme yapıları kullanılmalıdır.
- Ulaşım ağları üzerinden kaya düşmesine karşı çelik ağlar ve uyarı sistemleri tesis edilmelidir.

- Eğimli arazilerde ağaçlandırma çalışmaları yapılmalı kök sistemleri aracılığıyla hem toprağın tutunması hem de küçük blokların hareketinin engellenmesi sağlanmalıdır.
- Erozyonu kontrol etmek amacıyla yüzey örtücü bitkilerle arazi stabilitesi desteklenmeli, tarımsal alanlarda teraslama gibi toprak muhafaza yöntemleri uygulanmalıdır.
- Halkın riskli bölgeleri tanıyabilmesi ve gerekli önlemleri zamanında alabilmesi için bilgilendirme çalışmaları yapılmalıdır.
- Bingöl’de özellikle kırsal yerleşimler için afet risk azaltma planları hazırlanmalı ve düzenli aralıklarla güncellenmelidir.
- Riskli alanlarda yeni yapılaşmaya izin verilmemeli, mevcut olan yapıların güvenli alanlara taşınması için yeniden yerleşim ve kamulaştırma politikaları uygulanmalıdır.
- Benzer çalışmaların Türkiye genelinde yürütülmesi, kaya düşmesi risklerinin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesine ve ulusal ölçekte bir veri tabanının oluşturulmasına katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

Abellán, A., Calvet, J., Vilaplana, J. M., and Blanchard, J. (2010). Detection and spatial prediction of rockfalls by means of terrestrial laser scanner monitoring. *Geomorphology*, 119(3-4), 162-171.

AFAD, A. A. Y. T. S. (2014). TC Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Deprem Dairesi Başkanlığı.

AİGM. (1993). Zemin ve temel etüdü raporunun hazırlanmasına ilişkin esaslar. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı Yayınları, s. 93-94.

AİGM. (2007). Deprem bölgelerinde yapılacak binalar hakkında yönetmelik. T.C. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Ankara.

Ceylanoğlu, A., Gül, Y., ve Akın, A. (2007). Kazılabilirlik ve Riperlenebilirlik Sınıflama Sistemlerinin İncelenmesi ve Yeni Bir Sınıflama Sisteminin Önerilmesi. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 46(2), 13-26.

Akın, M., Dinçer, İ., & Orhan, A. (2020). Kaya Düşmelerinden Kaynaklı Afetlerin Değerlendirilmesine Yönelik Teknik Kılavuz. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD), Ankara, s.169.

Altay, G. (2015). Kaya düşmelerine karşı kullanılan toprak dolgu setlerin nümerik incelenmesi. [Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü].

Bingöl Belediye Başkanlığı. (2023). Bingöl Belediyesi çevre yönetimi raporu. Bingöl Belediyesi. Erişim tarihi: 24 Şubat 2025.
https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/bingol_icdr-2023-20241218155553.pdf.

Bingöl Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü. (2023). Bingöl ili 2023 yılı çevre durum raporu. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı.

Bingöl Online. (2018, Kasım 28). Afet gerçeği. Bingöl Orman İşletme Müdürlüğü. (2021). Bingöl'de hayat kurtaran proje. Bingöl Kent Haber.

Bowles, J. (1998). Foundation analysis and design. McGraw-Hill Book Company, Singapore.

Bulut, Ö. (2019). Bitlis Merkez Muştakbaba Mahallesi kaya düşme potansiyelinin incelenmesi ve çözüm önerileri. [Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü].

Cernica, J. N. (1995). Geotechnical engineering foundation design. John Wiley and Sons, Inc., USA. Coğrafya.gen.tr.(b.t.). Bingöl'ün iklimi. Erişim 24 Şubat 2025.

Colorado Geological Survey. (n.d.). Rockfall hazards. Erişim 24 Şubat 2025
<https://coloradogeologicalsurvey.org/hazards/rockfall>.

Craig, R. F. (1987). Soil mechanics (4. basım). E.L. BS, Londra.

Çetin, H., ve Demirtaş, R. (1999). Preliminary report on the Adana (Turkey) earthquake of June 27, 1998. Winter 1999, USA, AEG News, 42(1).

Demirtaş, R., ve Yılmaz, R. (1996). Türkiye'nin sismotektoniği. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı Yayınları, Ankara.

Dorren, L. K. (2003). A review of rockfall mechanics and modelling approaches. Progress in Physical Geography, 27(1), 69-87.

Düzgün, Ş. H., Akgün, A., ve Gheıbie, S. (2012). Kaya düşmeleri ve kaya şev kaymaları için risk analizine dayalı mühendislik çözümlerinin değerlendirilmesi.

Ercan, A. (1999). Mühendislik jeofiziği ders notları. İTÜ Maden Fakültesi, İstanbul.

Gencoğlu, S., ve diğerleri. (1990). Türkiye'nin deprem tehlikesi. TMMOB Jeofizik Mühendisleri Odası Yayını, 103-116, Ankara.

GTM Geo. (2025). Kaya düşmesi uygulamaları.
<https://www.gtmgeo.com/tr/uygulamalarimiz/kaya-dusmesi-uygulamaları>.

Hoek, E. (2007). Analysis of rockfall hazards. In Practical rock engineering (Chapter 9). Rocscience.

Hungr, O. (1988). Engineering evaluation of fragmental rockfall hazard. Proc. of 5th Int. Sympo. on Landslide, Lausanne, 685-690.

İnsapedia. (2020). Kaya düşmesi: Nedenleri ve koruma yöntemleri. Erişim tarihi: 24 Şubat 2025. <https://insapedia.com/kaya-dusmesi-nedenleri-ve-koruma-yontemleri>.

Kalender, A. (2017). Konik yayılım yaklaşımıyla kaya düşmesi potansiyelinin değerlendirilmesine yönelik bir yöntem önerisi. Hacettepe Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Doktora tezi, 172.

Kara, R. T. (2020). Üç boyutlu kaya düşme analizleri ile olası tehlike haritası üretilmesi ve önlem yapıları tasarımı: Gümüşhane kent merkezi örneği. [Yüksek lisans tezi, Gümüşhane Üniversitesi].

Keçeli, A. (1990). Sismik yöntemlerle müsaade edilebilir dinamik zemin taşıma kapasitesi ve oturmanın saptanması. Ankara, Jeofizik Dergisi, 4(2).

Lan, H., Martin, C. D., Zhou, C., and Lim, C. H. (2010). Rockfall hazard analysis using LiDAR and spatial modeling. Geomorphology, 118(1-2), 213-223.

Narınç, A., ve Zaman, M. (2019). Adaklı ilçesinin (Bingöl) demografik yapısı ve analizi. Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 23(4), 1657-1676.

NEHRP. (2003). Recommended provisions for new buildings and other structures (FEMA-450). Building Seismic Safety Council for the Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.

Özcan, N. T. (2023). İskilip (Çorum) civarının kaya düşmesi potansiyelinin değerlendirilmesi. International Journal of Engineering Research and Development, 15(1), 219-232.

Özçep, F. (2010). Zemin jeofizik analiz. İ.Ü. Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, İstanbul.

Öztürk, M. Z., Utlu, M., ve Şimşek, M. (2022). Kaya düşmesi tehlikesinin belirlenmesi ve önlenmesinde İHA tabanlı 3B modelleme çalışmaları: Murtaza Köyü örneği (Niğde). Yerbilimleri, 43(2), 182-196.

Polat, A. (2020). CBS tabanlı 3B kaya düşmesi analizi ve veri hazırlama süreçleri: Kavak Köyü (Sivas-Türkiye) örneği. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 25(3), 1205-1222.

Polat, S., ve Güney, Y. (2013). Bağbaşı Köyü'nde (Uşak) kaya düşmesi. *Uşak Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 6(1), 198-224.

T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2023). Hava kalitesi izleme sistemi. Erişim tarihi:24.02.2025. [Havaizleme.gov.tr](http://havaizleme.gov.tr).

T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı.Coğrafi durumu. Bingöl Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü. Erişim tarihi 24.02.2025. <https://bingol.csb.gov.tr/cograf-durumu-i-1393>

Terzaghi, K., and Peck, R. B. (1967). *Soil mechanics in engineering practice* (2. basım). John Wiley and Sons, NY.TS 1900. (1987). *İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri*. Ankara.

Ulusay, R. (2001). *Uygulamalı jeoteknik bilgiler*. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları: 38 (Genişletilmiş 4. baskı), Ankara.

Yapar, Y., ve Behçet, L. (2018). Hiro Yaylası Adaklı-Bingöl/Türkiye ve çevresinin florası. *Biological Diversity and Conservation*, 11(3), 126-140.

Yetiş, C., Demirkol, C., Lagap, H., ve Ünlügenç, U. C. (1991). MTA Türkiye Jeoloji Haritaları Serisi, No: 36, Kozan-K20 Paftası. MTA Jeoloji Etütleri Dairesi Yayınları, Ankara.

Yılmaz, M., ve Türkmen, A. (2018). Adaklı ilçesinde (Bingöl) görülen heyelanların jeomorfolojik analizi. *Bingöl Araştırmaları Dergisi*, 2(1), 25-40.

Yiğiter, N. (2008). Isparta Çünür Bölgesi'nde yüzey dalgası yöntemi ile zemin özelliklerinin araştırılması. [Yüksek lisans tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü], Isparta.

Abellán, A., Calvet, J., Vilaplana, J. M., and Blanchard, J. (2010). Detection and spatial prediction of rockfalls by means of terrestrial laser scanner monitoring. *Geomorphology*, 119(3-4), 162-171.

Akın, M., Dinçer, İ., Orhan, A., Ok, A. Ö., Akin, M. ve Topal, T. (2019). Kaya tutma hendek performansının 3-boyutlu kaya düşme analizleriyle değerlendirilmesi: Akköy (Ürgüp) örneği. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 43(2), 211-232.

Akin, M., Orhan, A. ve Dinçer, İ. (2022). Kaya düşmelerinin 3-boyutlu analizi: Kapadokya Bölgesinden bir örnek. *Yer Mühendisliği Dergisi*, 17, 46-59.

Altay, G. (2015). Kaya düşmelerine karşı kullanılan toprak dolgu setlerin nümerik incelenmesi. [Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü].

Aşıcı, S. (2019). Kaya Düşmelerine Karşı Elastik Enerji Sönümleyicilerinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Mersin.

Bingöl Online. (2018, Kasım 28). Afet gerçeği.

Bingöl Orman İşletme Müdürlüğü. (2021). Bingöl'de hayat kurtaran proje. Bingöl Kent Haber.

Bingöl, A. F. A. D. (2021). İRAP İl Afet Risk Azaltma Planı. TC Bingöl Valiliği İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü.

Bulut, Ö. (2020). Bitlis Merkez Muştakbaba Mahallesi kaya düşme potansiyelinin incelenmesi ve çözüm önerileri. [Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü].

Dorren, L. K. (2003). A review of rockfall mechanics and modelling approaches. *Progress in Physical Geography*, 27(1), 69-87.

Durmuş, E., Coruk, Ö., ve Karakaş, A. (2024). Kaya düşmesi risklerinin kentlerin planlamasına etkileri: Çoruh Havzası örneği. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 48(2), 139-160.

Durmuş, E., Coruk, Ö., ve Karakaş, A. (2025). Kaya düşmeleri risklerine karşı esnek kaya bariyerlerinde enerji kapasitesi tayini ve uygun yer seçim kriterleri. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 11(1), 135-156.

Düzgün, Ş. H., Akgün, A., ve Gheibie, S. (2012). Kaya düşmeleri ve kaya şev kaymaları için risk analizine dayalı mühendislik çözümlerinin değerlendirilmesi.

Guzzetti, F., Crosta, G., Detti, R., and Agliardi, F. (2002). STONE: A computer program for the three-dimensional simulation of rock-falls. *Computers and Geosciences*, 28(9), 1079-1093.

Granit Mühendislik. (2023). Bingöl İli Adaklı İlçesi Güngörsün Köyü çığ önlem ve kontrol projesi jeolojik-jeoteknik etüt raporu. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Çölleşme ve Erozyonla Mücadele Genel Müdürlüğü. (<https://drive.google.com/file/d/15FdMHuL68uoSNA1qqVap5dUQor8m5G6c/view?usp=drivesdk>).

Hoek, E. (2007). Analysis of rockfall hazards. In *Practical rock engineering* (Chapter 9). Rocscience.

Hungr, O. (1988). Engineering evaluation of fragmental rockfall hazard. *Proc. of 5th Int. Sympto. on Landslide, Lausanne*, 685-690.

Kalender, A. (2017). Konik yayılım yaklaşımıyla kaya düşmesi potansiyelinin değerlendirilmesine yönelik bir yöntem önerisi, Ankara, Doktora tezi, 172.

Kara, R. T. (2020). Üç boyutlu kaya düşme analizleri ile olası tehlike haritası üretilmesi ve önlem yapıları tasarımı: Gümüşhane kent merkezi örneği. [Yüksek lisans tezi, Gümüşhane Üniversitesi].

Lan, H., Martin, C. D., Zhou, C., and Lim, C. H. (2010). Rockfall hazard analysis using LiDAR and spatial modeling. *Geomorphology*, 118(1-2), 213-223.

Narınç, A., ve Zaman, M. (2019). Adaklı ilçesinin (Bingöl) demografik yapısı ve analizi. *Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 23(4), 1657-1676.

Okan, N. (b.t.). Heyelan "Geliyorum".

Özcan, N. T. (2023). İskilip (Çorum) civarının kaya düşmesi potansiyelinin değerlendirilmesi. *International Journal of Engineering Research and Development*, 15(1), 219-232.

Öztürk, M. Z., Utlu, M., ve Şimşek, M. (2022). Kaya düşmesi tehlikesinin belirlenmesi ve önlenmesinde İHA tabanlı 3B modelleme çalışmaları: Murtaza Köyü örneği (Niğde). *Yerbilimleri*, 43(2), 182-196.

Polat, A. (2020). CBS tabanlı 3B kaya düşmesi analizi ve veri hazırlama süreçleri: Kavak Köyü (Sivas-Türkiye) örneği. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 25(3), 1205-1222.

Polat, S., ve Güney, Y. (2013). Bağbaşı Köyü'nde (Uşak) kaya düşmesi. *Uşak Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 6(1), 198-224.

PreventionWeb. (n.d.). Understanding disaster risk terminology: HIPS GH0032.

T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2023). Hava kalitesi izleme sistemi. [Havaizleme.gov.tr](http://havaizleme.gov.tr).

T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (n.d.). Coğrafi durumu. Bingöl Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü.

Yılmaz, M., ve Türkmen, A. (2018). Adaklı ilçesinde (Bingöl) görülen heyelanların jeomorfolojik analizi. *Bingöl Araştırmaları Dergisi*, 2(1), 25.