

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**BARLA DAĞI KUŞAĞI'NDA MOLOZ AKMASI DUYARLILIĞININ
AMPİRİK YAKLAŞIMLA BÖLGESEL ÖLÇEKTE DEĞERLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Furkan KARABACAK

Katı Yer Bilimleri Anabilim Dalı

Jeodinamik Programı

OCAK 2024

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**BARLA DAĞI KUŞAĞI'NDA MOLOZ AKMASI DUYARLILIĞININ
AMPİRİK YAKLAŞIMLA BÖLGESEL ÖLÇEKTE DEĞERLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Furkan KARABACAK
(602211003)**

Katı Yer Bilimleri Anabilim Dalı

Jeodinamik Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Tolga GÖRÜM

OCAK 2024

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**DEBRIS FLOW SUSCEPTIBILITY ASSESSMENT AT REGIONAL SCALE
BASED ON AN EMPIRICAL APPROACH IN THE BARLA MOUNTAIN BELT**

M.Sc. THESIS

**Furkan KARABACAK
(602211003)**

Department of Solid Earth Science

Geodynamics Programme

Thesis Advisor: Prof. Dr. Tolga GÖRÜM

JANUARY 2024

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 602211003 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Furkan KARABACAK, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “BARLA DAĞI KUŞAĞI'NDA MOLOZ AKMASI DUYARLILIĞININ AMPİRİK YAKLAŞIMLA BÖLGESEL ÖLÇEKTE DEĞERLENDİRİLMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Tolga GÖRÜM**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Cengiz YILDIRIM**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ahmet Hakan NEFESLİOĞLU
Eskişehir Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **04 Ocak 2024**
Savunma Tarihi : **23 Ocak 2024**





Anneme,



ÖNSÖZ

Moloz akmaları özellikle dağlık alanlarda bir yamaç süreci olarak gerçekleşen doğal tehlikelerden biridir. Yüksek enerjileri ve hızları, içerdği farklı tane boyutlarındaki malzemeyi uzak mesafelere taşımaları ile birlikte moloz akmaları, yamaçların ve ulaştığı yerin şekillenmesinde önemli rol oynarlar. Moloz akmalarını tetikleyici gücün frekans ve şiddeti gibi bileşenlerin değişkenliği, moloz akması olaylarının önceden tahmin edilebilirliğini güçleştirmektedir. Artan nüfusla birlikte yerleşimlerin ve ekonomik faaliyet bölgelerinin moloz akması tehlikesinin etki alanına doğru gelişmesi önemli oranda can kaybı ve ekonomik kayıplara neden olmaktadır.

Çalışma alanı olarak seçilen Barla Dağı'nın kuzey yamaçlarında moloz akması tehlikesinin etki alanları, bölgesel ölçekte hızlı bir şekilde moloz akması duyarlılık değerlendirmesi yapılmasına imkan sağlayan ampirik ilişkiler kullanılarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Jomorfolojik bileşenlerin bir araya gelerek gerçekleşen moloz akmalarının kaynak alanların tanımlanması ve yayılma alanlarının belirlenmesi ile duyarlı alanların moloz akmalarının yıkıcı etkilerinden kaçınılması bir jeomorfolog bakışıyla sunulmuştur.

Bu çalışma 2 yıllık araştırmanın sonucu tamamlanmıştır. Ampirik ilişkiler kullanılarak gerçekleştirilen duyarlılık analizleri ve geçmiş dönemlere ait hava fotoğraflarıyla belirlenen moloz akması olayları, problem tanıma ve veri toplama amacıyla 2021 yılının Temmuz ayında yapılan arazi çalışmasıyla desteklenmiştir.

Bu tez çalışmasının konusunun belirlenmesinden tamamlanmasına kadar olan süreçte ihtiyaç duyduğum tavsiye, düşünce, motivasyon ve destekleriyle bilimsel bakış açımın şekillenmesinde önemli katkı sağlayan değerli hocam Prof. Dr. Tolga GÖRÜM'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Çalışma sürecinde bilgi ve yardımlarından faydalandığım Prof. Dr. Hakan NEFESLİOĞLU'na ve Dr. Öğr. Üyesi Abdullah AKBAŞ'a teşekkürlerimi borç bilirim. Arazi çalışması sırasında saha hakkında bilgilerinden faydalandığım Senirkent Belediyesi Fen İşleri Müdürü Umut CEYLAN'a teşekkür ederim. Tez çalışmasına katkılarından dolayı tez jüri üyeleri Prof. Dr. Hakan NEFESLİOĞLU'na ve Prof. Dr. Cengiz YILDIRIM'e teşekkür ederim. Tezimin yazım sürecinde sağladıkları rahat çalışma ortamı dolayısıyla ELTEMTEK A.Ş.'ye ve Emre KILCI'ya teşekkür ederim. Çalışma sürecinde maddi desteklerini esirgemeyen Türkp petrol Vakfı'na teşekkürlerimi borç bilirim. Tanıdığım ilk günden bugüne kadar her türlü sorunumda desteği ve emeğiyle yanımda olan Jeomorfolog Abdüssamet Yılmaz'a tez sürecimdeki katkıları için sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Tüm hayatım boyunca sabırla desteğini esirgemeyen her zaman yanımda olan annem Suay PAMUK'a, kardeşim Nurhale KARABACAK'a ve ailem olmuş dostlarıma sonsuz teşekkür ederlerimi sunarım.

Ocak 2024

Furkan Karabacak
Jeomorfolog



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
KISALTMALAR.....	xi
SEMBOLLER.....	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xxi
SUMMARY.....	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Kaya Destekli Moloz Akması	5
1.2 Türbülanslı-Çamurlu Tip Moloz Akması.....	7
1.3 Viskoz Moloz Akması.....	7
2. ÇALIŞMA ALANI	15
2.1 13 Temmuz 1995 ve 18-19 Temmuz 1996 Senirkent Moloz Akma Olayları	20
3. VERİ VE YÖNTEM	23
3.1 Veri Toplama ve Analizi	23
3.2 Moloz Akmalarına Neden Olacak Potansiyel Kaynak Alanların Tespit Edilmesi.....	26
3.3 Moloz Akmalarının Erişim Mesafesinin ve Yayılma Alanının Modellenmesi	29
3.3.1 Akım yönü algoritmaları	29
3.3.2 Erişim mesafesi algoritmaları	31
4. BULGULAR	35
4.1 Moloz Akma Kaynak Alanlarının Dağılımı	35
4.2 Moloz Akması Mekansal Olasılık Haritası	39
4.2.1 Flow-R ekstrem durum senaryoları.....	39
4.2.1.1 Kötü durum senaryosu	41
4.2.1.2 Ekstrem durum senaryosu	43
4.3 Flow-R model sonuçlarının doğrulanması	49
5. SONUÇLAR	51
KAYNAKLAR.....	53
ÖZGEÇMİŞ.....	59



KISALTMALAR

DSİ	: Devlet Su İşleri
Flow-R	: Flow path assessment of gravitational hazards at a Regional scale
HGM	: Harita Genel Müdürlüğü
IMF	: International Monetary Fund
IPCC	: Intergovernmental Panel on Climate Change
MTA	: Maden Tetkik Arama
SYM	: Sayısal Yükseklik Modeli
USGS	: United States Geological Survey



SEMBOLLER

E	: Enerji
E_{kin}	: Kinetik enerji
g	: Yer çekimi ivmesi
p^p	: Akış yönü ağırlığı
S_{ua}	: Su toplama alanının yüzeyi
$\tan\beta_{lim}$	: Eğim eşiği
V	: Hız
Δ	: Yükselti farkı



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Heyelan hız ölçeği (Cruden ve Varnes, 1996'dan düzenlenerek).....	5
Çizelge 1.2 : IMF (2011) sınıflandırmasına göre gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler için tanımlayıcı istatistikler (Dowling ve Santi 2014'ten değiştirilerek).....	13
Çizelge 3.1 : Moloz akmlarının haritalamasında kullanılan uydu görüntüleri ve hava fotoğraflarının listesi.	24
Çizelge 4.1 : Konfüsyon matrisine dayalı sonuçların duyarlılığı.	50



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Senirkent yerleşiminin kuzeyindeki yamaca ait moloz çökeli	2
Şekil 1.2 : Tane boyutu ölçeği (Wentworth, 1922). Mavi alan: moloz akmalarının yüzde 50'sinden fazlasını oluşturan tane boyutu grubu (Jaime Kostelnik, United States Geological Survey (USGS)).	3
Şekil 1.3 : Kütle hareketlerinin mekanik benzerlikleri ve farklılıkları (Takahashi 2014'ten değiştirilerek).	4
Şekil 1.4 : Kaya destekli moloz akması kütesinin şeması (Bardou, 2002'ten düzenlenerek)	6
Şekil 1.5 : Kaya destekli moloz akmasının diagramı (Takahashi, 2014'ten düzenlenerek).	6
Şekil 1.6 : Isparta İli içindeki Barla Dağı'nın kuzeyindeki bir moloz konisinde yer alan kaya destekli bir moloz akmasına ait leveler.....	7
Şekil 1.7 : Katı ve sıvının karışımı halindeki malzemenin hareket oluşum koşulları (Takahashi 2014'ten Türkçeleştirerek).	9
Şekil 1.8 : Isparta İli sınırları içinde yer alan Barla Dağ'ında bir moloz akmasının bölümleri.	10
Şekil 1.9 : 1950-2010 yılları arasında kayıt altına alınmış ölümcül moloz akmaları (Dowling ve Santi, 2014).	11
Şekil 1.10 : 1950-2010 yılları arasında moloz akması başına gerçekleşen ölümlerin medyan değer ve eğilimi. (Dowling ve Santi, 2014).	12
Şekil 2.1 : Çalışma alanının konumu (A), Alt havzaların ve fanların konumu (B) ve Senirkent İlçesi, Hoyran Grabeni'ni ve Barla Dağı Kuşağı'nı gösteren panoramik fotoğraf (C).	16
Şekil 2.2 : Çalışma alanının jeoloji haritası (Maden Tetkik Arama (MTA), 2011'den düzenlenerek).	17
Şekil 2.3 : Senirkent yerleşiminin güneyindeki yamaçlar ve kaynak alanı.	18
Şekil 2.4 : Barla Dağı'nın kuzey yamaçlarındaki Sedir ormanı (A). Ortayazı Buzul Vadisi ile Sedir ormanının batı sınırı (B).	19
Şekil 2.5 : Çalışma alanının jeomorfoloji haritası.	20
Şekil 2.6 : 13 Temmuz 1995 tarihindeki moloz akmasının Senirkent'e güneyindeki yamaçlarda girişi (Anadolu Ajansı)(A). Moloz akmasının Senirkent'in içlerine kadar ilerlemesi (Haber32)(B). Moloz akmasının hasar verdiği evlerden biri (Haber32)(C).	21
Şekil 2.7 : 1995 Temmuz ayı yağışlı günlerin günlük ortalama yağış değeri (A). 1996 Temmuz ayı yağışlı günlerin günlük ortalama yağış değeri (B) (Senirkent Meteoroloji İstasyonu, MGM).	21
Şekil 2.8 : 18-19 Temmuz 1996 tarihlerinde gerçekleşen moloz akması (A). Senirkent Belediyesi ve Hızır Çelebi Camii'nin üzerinde olduğu Atatürk Caddesi'ne kadar ilerlemiş moloz (C). 1995 yılında gerçekleşen moloz akmasının malzemesini kazarak oluşturduğu kanal ve kaya blokları (D). 1995	

yılındaki afetten sonra yapılan setin 1996 yılındaki moloz akmasında hasar almış hali (B); moloz konisinin üst kesimlerinde yapılan tel örgünün 1996 yılındaki moloz akmasıyla dolmuş görüntüsü (E) (Bağırsakçı, 1996).....	22
Şekil 3.1 : Çalışma sahasındaki Senirkent, Ortayazı ve Yassıören yerleşimlerinin güneyinde bulunan havzalara (B13, B28, B29, B33, B35, B36 numaralı havzalar Bölüm 4.1’te açıklanmıştır.) ait moloz akmalarının haritalanması için kullanılan hava fotoğrafları ve uydu görüntüleri. Kalın fontla, siyah renkle belirtilen tarihler, o sütunda bulunan fotoğrafların çekim tarihlerini göstermektedir. İki fotoğrafın çekildiği tarih arasında gerçekleşmiş moloz akmaları, o yıl aralıklarına ait renklerle temsil edilmiştir.	24
Şekil 3.2 : Çalışma sahasında geçmiş dönemlere ait moloz akmalarının haritalanması: Yassıören yerleşiminin güneyindeki moloz konilerindeki gösterimi (2010 yılına ait hava fotoğrafında bu konilerde moloz akması izleri tespit edilmemiştir.).....	25
Şekil 3.3 : Çalışmada kullanılan iş akışı aşamaları. İş adımlarının işlem sırası oklarla belirtilmiştir.	26
Şekil 3.4 : Kaynak alanların değerlendirilmesi için çeşitli veri setlerinin kombinasyonunun gösterimi (Horton vd., 2013’ten Türkçeleştirilerek).....	27
Şekil 3.5 : Nadir ve ekstrem olaylar için moloz akmasının başlaması için kanal eğimleri ve su toplama alanı eşikleri. Horton ve diğerleri (2008), Heinimann (1998) ve Rickenmann ve Zimmermann'dan (1993) sonra.....	28
Şekil 3.6 : Duyarlılık değerinin komşu hücrelere yayılmasının gösterimi (Horton vd., 2013).	31
Şekil 3.7 : Maksimum akma mesafesine tanımlamak için modele tanımlanan erişim açısı diagramı.	32
Şekil 3.8 : Moloz akmasına ilişkin ilerleme algoritmasının dört farklı matris hiyerarşisindeki çalışma döngüsü (Horton vd., 2013’ten yararlanılarak oluşturulmuştur).	33
Şekil 4.1 : Alt Havzalar (A). Moloz akma kaynak alan hücrelerinin çalışma alanındaki dağılımı (B). Kaynak alanlarının detaylı gösterimi (C).....	36
Şekil 4.2 : Kaynak alanların havza bazındaki yoğunluğu (A). Geçmiş dönemlere ait hava fotoğraflarından haritalanan moloz akmaları (B, C, D). Sarı poligon 1956’ya kadar olan moloz akma izlerini; 1956-1964 yılları arasındakileri koyu mavi; 1964-1972 yılları arasındakiler yeşil; 1972-1991 yılları arasındakiler turuncu; 1991-2010 yılları arasındaki moloz akma izleri açık mavi poligon ile gösterilmiştir.	37
Şekil 4.3 : Barla Dağı Kuşağı’nın kuzey yamaçları boyunca tanımlanan 12887 kaynak alanının istatistikleri. Eğim (A). Yamaç eğriselliği (B). Akım katkı alanı ile eğim değerlerinin korelasyonu ve bu çalışmadaki kaynak alanları (C). Arazi örtüsü/kullanımı (D). Litoloji (E). Burada JKtı: Çörtlü kireçtaşı ve kalsitürbidit, JKs: Pelajik kireçtaşı ara tabakalı oolitik kireçtaşı, TRs: Dolomit, Ja: Algli kireçtaşı, Kbe: Çörtlü kireçtaşı, Qym: Yamaç molozu ve birikinti konileri, Tpeu: Fliş, Kkp: Kalsitürbidit ve çörtlü kireçtaşını temsil etmektedir (MTA, 2011).	38
Şekil 4.4 : Flow-R modeli farklı durumları senaryolarının haritası. A, kötü senaryoyu; B, ekstrem senaryoyu; C iki senaryonun üst üste bindirilerek karşılaştırmalı haritayı göstermektedir.	41
Şekil 4.5 : Kötü durum senaryosu olarak değerlendirilen Flow-R modelinin bölgesel ölçekteki haritası (A). Senirkent’teki 7° erişim açısı ve 15 m/s maksimum hız değerleriyle simüle edilen moloz akması mekansal duyarlılık haritası (B),	

modelin üç boyutlu gösterimi (C). 1996 yılında Senirkent'te gerçekleşen moloz akması olayı (D) ve Pazar Cami civarındaki moloz birikimi (E).	43
Şekil 4.6 : Ekstrem durum senaryosu olarak değerlendirilen Flow-R modelinin bölgesel ölçekteki haritası (A). Ortayazı yerleşiminin güneyindeki havzalara ait 6° erişim açısı ve 15 m/s maksimum hız değerleriyle simüle edilen moloz akması mekansal duyarlılık haritası (B). Turuncu poligonlar önceki moloz akmalarının tüm tarihlerdeki hava fotoğraflarıyla tespit yayılma alanlarını göstermektedir.	44
Şekil 4.7 : Senirkent'in güneyindeki moloz kanalına yapılan tersip bentleri ve Flow-R modelinin yayılımını gösteren harita.	45
Şekil 4.8 : Kötü durum ve ekstrem senaryolarının gösterildiği moloz akması duyarlılık haritası (A). Yassıören'in güneydeki havzalara ait moloz akması modellerinin detaylı gösterimi (B). Moloz akması önlem çalışmaları kapsamında yapılan setin insansız hava aracı ile çekilmiş görüntüsü (C).	46
Şekil 4.9 : Ortayazı'nın güneyindeki B31 numaralı havzanın moloz kanalında inşa edilmiş tersip bentleri.	47
Şekil 4.10 : Yassıören'in güneyinde bulunan B28 numaralı havzada tersip bentlerinin moloz akmasıyla havuzların dolması ve tahrip olmasını gösteren hava fotoğrafları (B1 oblik, B2 ve B3 nadir görüntülerdir.)	47
Şekil 4.11 : Senirkent yerleşimi ve güneyindeki moloz kanalında inşa edilmiş tersip bentleri (A). 1370-1450 metre yükseltilerde dolmaya başlamış olan bentlerin havuzları (B).	48
Şekil 4.12 : Flow-R modelinin mekansal olasılık hücrelerinin ormanlık alanda saçılarak durmasını gösteren harita (A) ve üç boyutlu gösterimi (B).	49



BARLA DAĞI KUŞAĞI'NDA MOLOZ AKMASI DUYARLILIĞININ AMPİRİK YAKLAŞIMLA BÖLGESEL ÖLÇEKTE DEĞERLENDİRİLMESİ

ÖZET

Dünyanın pek çok yüksek dağlık alanlarında olduğu gibi Türkiye'deki dağlık alanlar da heyelanlardan yoğun olarak etkilenmektedir. Ekstrem hava olaylarının, iklim değişikliğine de bağlı olarak, büyüklüğündeki ve sıklığındaki karmaşıklığı bakımından dağlık alanlardaki heyelanlar üzerindeki etkisi, artan nüfusun ve gelişen ekonomik faaliyetlerin heyelan tehlikesine karşı daha duyarlı hale gelmesine neden olmaktadır. Modern dünyadaki insan faaliyet zincirinin her alanda sürdürülebilir bir şekilde devam etmesi açısından, bu tip jeomorfik tehlike değerlendirmesinin yapılması ve duyarlı alanların belirlenerek uygun önlem yapılarının risk yönetimi kapsamında hayata geçirilmesi önem arz etmektedir.

Moloz akmaları, özellikle dağlık alanlardaki yamaçlarda oluşan ve içeriğindeki farklı tane boyutu ve su miktarına bağlı olarak etki alanı bakımından uzun mesafelere ulaşip fiziksel ortamı değiştiren bir heyelan türüdür. Söz konusu heyelan yoğun nüfuslu alanlarda afet halinde gerçekleştiğinde, bölgedeki insan yaşamını doğrudan ve dolaylı olarak günlerce ve hatta haftalarca olumsuz etkileyebilmektedir. Özellikle yamaçlarında yüksek moloz üretiminin gerçekleştiği dağlık kuşaklarda moloz akma tehlike potansiyelinin araştırılması ve mevcut riskin kabul edilebilir riske indirgenmesine yönelik korunma ve önlem çalışmalarının yapılması yüksek öneme sahiptir. Bu çalışmada moloz akmalarına duyarlı bölgelerin tanımlanması ve potansiyel yayılma alanlarının belirlenmesi yoluyla bölgesel ölçekte moloz akması duyarlılık analizleri gerçekleştirilmiştir. Geçmişte ölümcül moloz akması olayları ile bilinen Isparta ili sınırları içindeki Barla Dağı Kuşağı'nın litoloji, iklim ve bitki örtüsü bakımından yüksek moloz üretimi potansiyeline sahip olan kuzey yamaçlarındaki 41 havza çalışma alanı olarak belirlenmiştir. Bu sahada, bölgesel ölçekte farklı sahalardaki değişkenler dahilinde uygulanabilirliği ve dinamik modellere göre az veri gereksinimi duyan mekânsal olarak dağıtılmış ampirik bir model olan Flow-R (Flow path assessment of gravitational hazards at a Regional scale) kullanılarak moloz akması duyarlılık analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerin gerçekleştirilmesinde Harita Genel Müdürlüğü'nden temin edilen 5 m yersel çözünürlüğe sahip Sayısal Yükselti Modeli verileri kullanılmıştır. Model sonuçlarının kalibrasyonu, Harita Genel Müdürlüğü'nden temin edilen 5 set hava fotoğrafı ve CORONA programından temin edilen 1 set uydu görüntüleri aracılığı ile gerçekleştirilmiştir. Geriye dönük analizler ile model çıktıları değerlendirilerek kötü durum ve ekstrem senaryoları belirlenmiştir. Buna göre 7°-15m/s modeli kötü durum; 6°-17m/s modeli ekstrem senaryo olarak belirlenmiştir. Flow-R modelinin konfüsyon matrisi doğrulama sonuçlarına göre, doğruluk, hassasiyet ve pozitif tahmin gücü sırasıyla %87,78, %46,45 ve %23,03'tür. Çalışma sonucunda moloz akmalarının karmaşık yapısı göz önüne alındığında, minimum veri gereksinimi ve kısa hesaplama süresi ile bölgesel ölçekte moloz akması duyarlılık haritaları üretilmiş ve afet öncesi risk yönetimi çalışmalarında ilksel kaynak sağlanmıştır.



DEBRIS FLOW SUSCEPTIBILITY ASSESSMENT AT REGIONAL SCALE BASED ON AN EMPIRICAL APPROACH IN THE BARLA MOUNTAIN BELT

SUMMARY

As in many high mountainous areas of the world, mountainous areas in Türkiye are also heavily affected by landslides. The effect of the complex characteristics of extreme weather events in terms of magnitude and frequency on landslides in mountainous areas, also related to climate change, causes the increasing population and developing economic activities to become more susceptible to landslide hazard. In order for human activities in the modern world to proceed in a sustainable manner, it is important to carry out geomorphic hazard assessment and to identify susceptible areas and to implement appropriate prevention structures within the scope of risk management. Debris flows are a very common hazard in many mountainous regions of the world. They are particularly destructive due to the high velocities of the sediment of various grain sizes and their ability to travel long distances. In our country, debris flow events that cause loss of life and economic loss occur every year. When a landslide occurs as a disaster in densely populated areas, it can directly and indirectly negatively affect human life in the region for days and even weeks. Particularly in mountainous belts where high debris production occurs on the slopes, it is of high importance to investigate the debris flow hazard potential and to carry out protection and prevention studies to reduce the existing risk to acceptable risk. Identification of regions susceptible to debris flows and determination of potential spreading areas enables regional debris flow susceptibility analyses to be carried out. Landslide susceptibility is defined as the susceptibility of a slope to instability and susceptibility is usually expressed in a cartographic form. A landslide susceptibility map shows areas likely to have landslides in the future by relating some of the key factors contributing to landslides to the past distribution of slope instability. These maps are essential tools for land use planning, especially in mountainous areas. Landslide susceptibility mapping relies on a highly complex knowledge of slope movements and the factors controlling them. The reliability of landslide susceptibility maps largely depends on the quantity and quality of available data, the scale of the study and the choice of the appropriate analysis and modeling methodology. A debris flow susceptibility assessment is part of a landslide susceptibility assessment that includes the identification of the source area or commonly referred to as the initiation area of debris flows and the flow event. The runoff event identified in a debris flow susceptibility assessment may consist of the distance, velocity and magnitude of impact of existing or potential debris flow. Debris flow modeling is one of the assessment methods that contribute to the prediction of the area to be affected by the potential future hazard and to reveal its dynamic processes. Debris flow modeling consists of 3 models: physical, empirical and dynamic. Physical modeling is carried out by field observation and further analysis of the flow by laboratory analysis. The development of simulation techniques, especially in recent years, has made dynamic modeling an increasingly

important tool for simulating the properties and characteristics of debris flows and their behavior. Empirical relationships are one of the most widely used techniques to estimate the maximum runoff distance of landslides and debris flows. Empirical modeling is often based on well-documented field observations. The modeling parameters derived from well-documented field observations are used for analysis by determining the relationships between each parameter (e.g., the relationship between the impact distance area and the volume of debris flow). Input parameters for the empirical model are volume estimation, topographic profiles, image interpretation and geomorphological studies. The empirical approach, which has been used in various studies on the spread of debris flows, has the advantages of simple data collection, high applicability for large areas and easy adaptability to different regions. The 41 sub-catchment fan systems with high debris production potential with their lithology, climate and vegetation characteristics on the northern slopes of the Barla Mountain Belt in Isparta province, known for fatal debris flow events in the past, were determined as the study area. The study area is located in the north of the Mediterranean Region, 40 km north of Isparta province in the Antalya Department. The Barla Mountains in the north of the Isparta Angle, bordered by the Gulf of Antalya and the Burdur-Hoyran and Beyşehir Lakes, are mostly consisted of limestone series. The Barla Mountains and Hoyran depression basin, which have been structured by the effect of normal faults in the region from the Upper Miocene to the present day in the north of the Isparta Angle, represent a typical horst graben system. With this characteristics, high elevation differences in short distances caused the establishment of steeply sloping slopes. The daily temperature difference, especially in the elevations after the timberline, has a role in the efficiency of physical weathering in the area, which is represented by a hot semi-arid climate characteristic in summers. Considering that the stratigraphic structure is generally tilted to the south, it is observed that debris accumulation is concentrated on the slopes where the channels that intersect the vertical faults steeply develop. This region has experienced the most fatal debris flow disaster in the history of the Republic of Türkiye to date. The deadliest known debris flow occurred at 20:20 on July 13, 1995. The debris flow killed 74 people and damaged 90 houses, completely destroying 179 houses. In addition, approximately 1000 people were left displaced. On July 18 and 19, 1996, debris flow disaster occurred again in Senirkent. The citizens living in the region were warned by the Senirkent District Governorate and left their houses the day before and deaths caused by debris flow were prevented. In the July 19 debris flow, the houses could not be entered due to the debris and mud material from the previous day's flow and thus no loss of life occurred. The presence of the material from the 1995 debris flow in the canals increased the volume of debris flows in 1996, but caused less damage due to the measures taken. The presence of traces of previous debris flows in the study area was determined through 5 sets of aerial photographs obtained from the General Directorate of Mapping of Türkiye and 1 set of satellite images obtained from the CORONA program. In this region, debris flow susceptibility analyses were carried out using Flow-R (Flow path assessment of gravitational hazards at a Regional scale), a spatially distributed empirical model that is applicable to different sites at regional scale and requires less data than dynamic models. Digital Elevation Model data with a spatial resolution of 5 m obtained from the General Directorate of Mapping of Türkiye were used for the analysis. Flow-R is a spatially distributed empirical model developed in Matlab®. The implementation of the model requires two different steps based on a digital elevation model (DEM): (1) source areas are identified through morphological and user-defined criteria, and then (2) debris flows are propagated from these sources based on friction

laws and flow direction algorithms. The volume and mass of the debris flow are not taken into account, as the exact values cannot be easily assessed over a large region, as they are extremely difficult to estimate due to the significant mass changes that occur through erosion and incision. The software has a graphical user interface that allows the user to specify criteria for the identification of source areas and select algorithms and parameters for the assessment of spreading. When normalized, the values never exceed 1 and thus approach the concept of spatial probability. Source area identification uses an index-based approach. Input datasets can represent different types of spatial information and are treated with user-defined parameters. Accordingly, the grid cells of each input dataset are classified as (1) "source area" when initialization is possible, (2) "excluded" when initialization is unlikely, or (3) "ignored" when no decision can be made about this parameter. Datasets are merged according to the following rule: a cell is a source field if it has been selected as a source field at least once but never extracted. Alternatively, the user can directly import source fields created with another (GIS-based) approach.

The models performed in the study area were carried out with maximum reach angles between 6° - 14° and maximum velocities between 15 m/s and 17 m/s. The most appropriate worst-case and extreme-case scenarios between these values were tried to be determined according to the spreading areas by back analysis of previous debris flows. In the determination of these scenarios, the reports presented after the debris flow events in Senirkent were also utilized. In terms of the results of the study, 7° -15 m/s model output was determined as the worst case scenario and 6° -17 m/s model output was determined as the extreme scenario. In regional scale debris flow susceptibility analyses, it is difficult for the Flow-R model to fully account for the effects of small human structures, walls or mitigation measure. Problems with the model's propagation areas were generally observed in basins with human intervention. For these basins, a Digital Elevation Model with higher spatial resolution is needed to perform debris flow sensitivity analyses in both scenarios. For example, in all Flow-R model scenarios, the check dams constructed as a mitigation measure after the debris flow events in Senirkent were neglected in the Digital Elevation Model with 5 m resolution. In this case, the model assumed that there were no mitigation measure in the debris channel and continued its progress and was able to simulate the 1995-1996 debris flow events. To assess the current situation, a Digital Elevation Model with higher spatial resolution is needed in these areas. According to the precision validation results of the Flow-R model, the accuracy, sensitivity and positive predictive power were 87.78%, 46.45% and 23.03%, respectively. As a result of the study, considering the complex structure of debris flows, regional scale debris flow susceptibility maps were produced with minimum data requirement and short computation time, and a primary source was provided in pre-disaster risk management studies.



1. GİRİŞ

Heyelan, deprem, sel ve volkanik patlamalar gibi doğal tehlikeler, yeryüzünü şekillendirmeye ve biyotayı etkilemeye devam etmektedir. Günümüzde bu doğal tehlikeler insan hayatını tehdit eden önemli bir küresel sorun olarak kabul edilmektedir (Skilodimou, 2016). Küresel ölçekte, doğal tehlikelere duyarlı bölgelerdeki aşırı nüfus artışı ve kentsel gelişim hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkelerde doğa kaynaklı tehlikelerin afetlere dönüşme etkisini ve riske maruz kalmasını giderek arttırmaktadır. Doğa kaynaklı gerçekleşen afetler, afetlerin zararlarını giderme kapasitemiz eskiye oranla artmış olmasına rağmen daha sık meydana gelmektedir (Rosenfeld, 1994; Guzzetti, 1999).

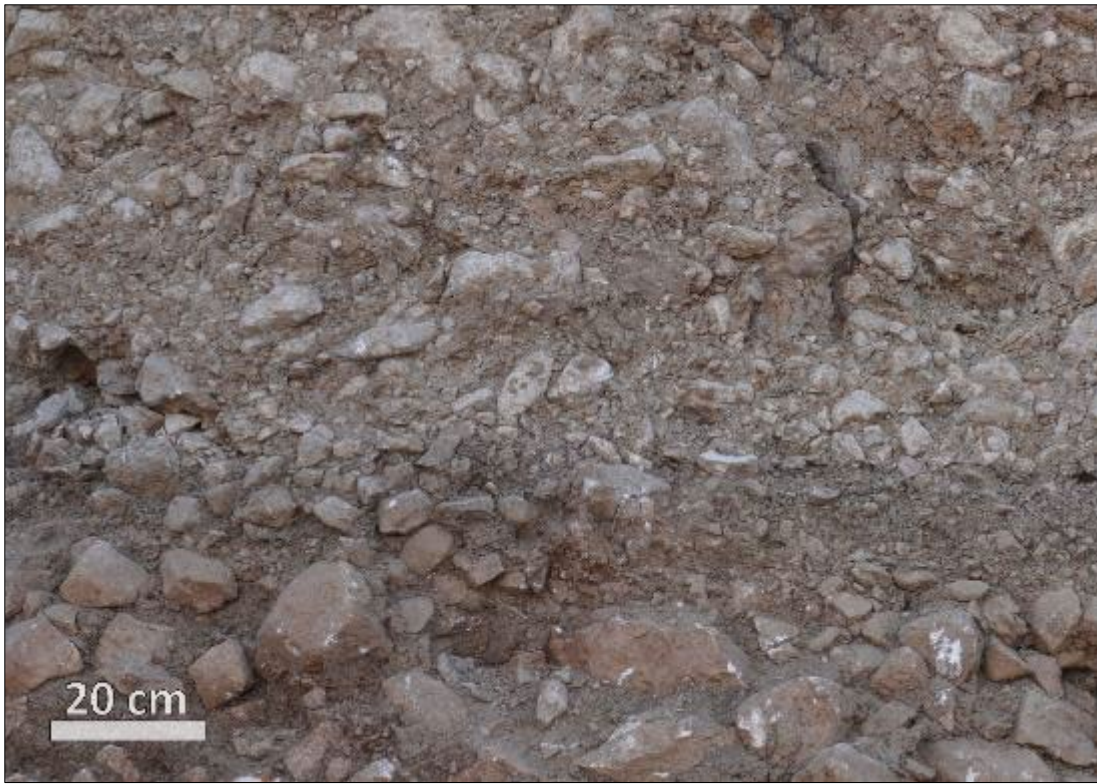
Küresel iklim değişikliğine bağlı olarak daha ekstrem yağışların ve ani kar erimelerinin gerçekleştiği günümüzde özellikle meteorolojik kökenli olayların gerçekleşme sıklığının giderek artacağı beklenmektedir (IPCC, 2022). Uzun ve kısa vadedeki sosyal ve ekonomik olumsuz etkileri düşünüldüğünde bu olayların ne zaman, nerede, neden, nasıl meydana geldiğinin anlaşılması ve gelecek projeksiyonlarının hesaplanması, insan faaliyetlerindeki sürdürülebilirliğinin arttırılması açısından önem arz etmektedir.

Yeryüzündeki karaların yaklaşık %90'ının (Huggett, 2011) yamaçlardan oluştuğu göz önüne alındığında doğal tehlikeler açısından heyelanların çok geniş coğrafyalarda gerçekleştiğini söylemek mümkündür. Heyelan ana kayanın, molozun veya ayrılmış zeminin yerçekimi kuvveti nedeniyle bir kütle veya blok halinde eğim doğrultusunda taşındığı bir harekettir (Cruden ve Varnes, 1996). Varnes (1978), heyelanları hareket tipine göre düşme, devrilme, kayma, yanal yayılma, akma ve karmaşık hareketler olarak sınıflandırmıştır.

Akma tipindeki heyelanlar, transfer edilen kütle içinde tamamen değişken makaslama direnci ile hareket eder ve hareket eden malzemenin tabanında kesin bir düzlem tanımlanamaz. Bazı durumlarda hareket kayma olarak başlar ve su içeriğinin artmasına bağlı olarak akma şeklinde devam edebilir. Malzeme içeriğindeki suyun varlığı, çoğu akma türünün ortaya çıkması için temel bir bileşendir (Takahashi, 1981). Akmalar,

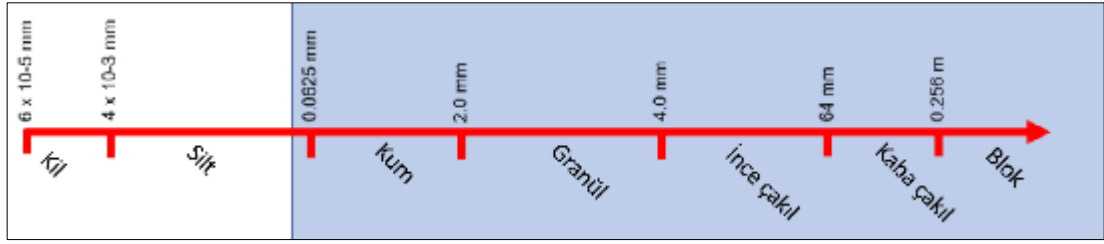
ayırışmış yamaç malzemesinin veya kayma tipindeki heyelan malzemesinin uzun mesafeler taşınmasını sağlamaktadır (Bierman ve Montgomery, 2014).

Jeomorfolojik açıdan değerlendirildiğinde moloz, gravitasyonel aşınım ve birikim süreçleri ile ortaya çıkan (kolüvyal), buzul aşındırma ve biriktirme ürünü olan sedimanlar ile volkanizma (taneli piroklastik malzeme) veya antropojenik faaliyetler (örneğin maden artıkları) sonucunda üretilen, düşük plastisiteye sahip gevşek ve düzenli istiflenmemiş malzeme olarak tanımlanmıştır. Moloz dokusal olarak kum, çakıl ve kayaların bir karışımı olup genellikle değişen oranlarda silt ve kil içerir (Jakop ve Hungr, 2005) (Şekil 1.1).



Şekil 1.1 : Senirkent yerleşiminin kuzeyindeki yamaca ait moloz çökeli.

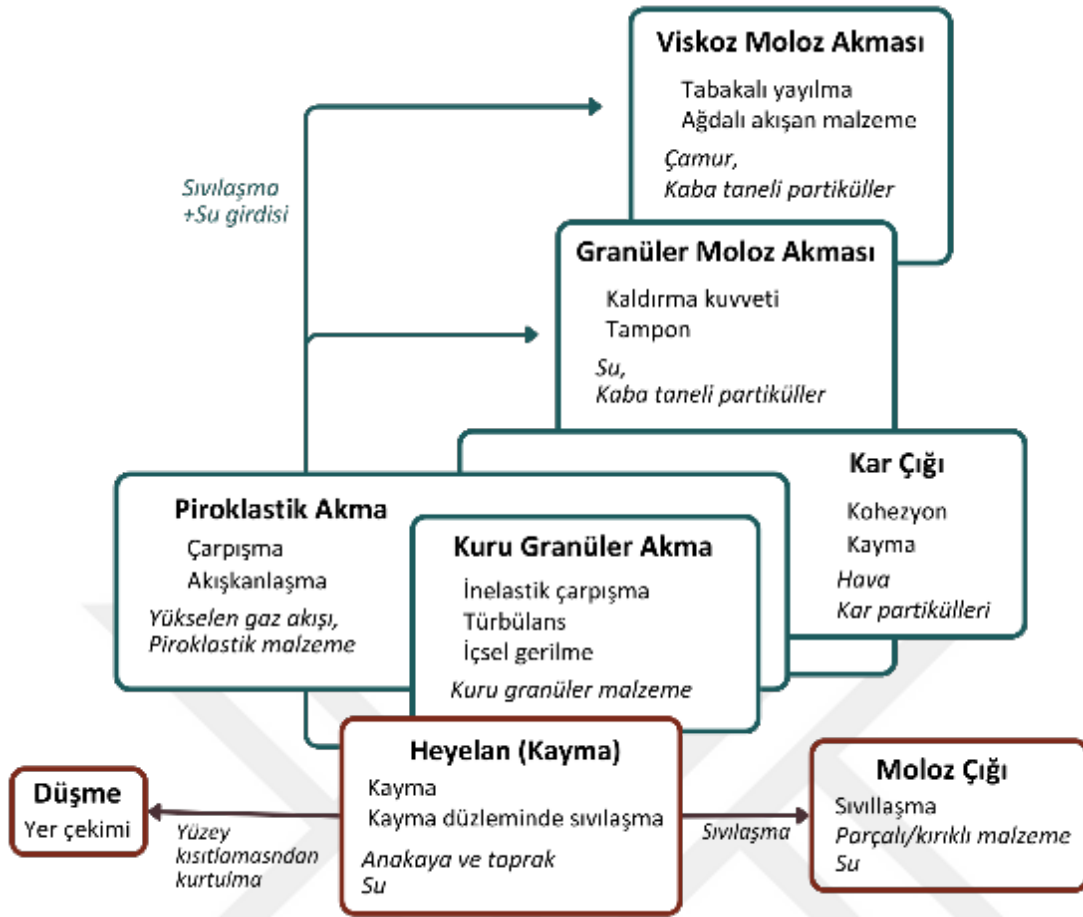
Genellikle değişen oranlarda silt ve kil içerir (Jakop ve Hungr, 2005). Cruden ve Varnes (1996), molozu tane boyutu içeriği bakımından %80'i çakıl ve daha büyük kaba boyutlarla (>2 mm) ve %20'si çakıldan daha küçük kum ve kil gibi malzeme ile açıklamıştır. Moloz ayrıca ağaç kütükleri, ağaç dalları ve yaprak dahil olmak üzere önemli oranda organik malzeme içerebilir (Hungr vd., 2001). Bir moloz akmasında kum ve kumdan daha büyük boyutlardaki çökeller tüm malzemenin yüzde 50'sinden fazlasını oluşturabilmektedir. (Şekil 1.2).



Şekil 1.2 : Tane boyutu ölçeği (Wentworth, 1922). Mavi alan: moloz akmalарının yüzde 50'sinden fazlasını oluşturan tane boyutu grubu (Jaime Kostelnik, United States Geological Survey (USGS)).

Moloz akması, yamacı oluşturan ana kaya türevlerinden olan molozun, su içeriğinin artmasına bağlı olarak (Delmonaco, 2003) çoğunlukla yamaç eğiminin 15° (Takahashi, 1981) ile 45° (Rickenmann ve Zimmermann, 1993) eğim aralığına sahip iç bükey yamaçlarda (Delmonaco vd., 2003; Wieczorek vd., 1997), akma tipindeki hareketidir (Cruden ve Varnes, 1996). Bazı moloz akmaları, kayma ile harekete başlayan heyelanın su girdisinin artmasına bağlı olarak oluşabilmektedir (Jakop ve Hungr, 2005). Moloz akmalarını oluşturan kum ve daha ince taneli malzemenin plastisite indeksi %5'ten daha azdır (Jakop ve Hungr, 2005). Ayrıca taşıdığı ve biriktiği sediman miktarına oranla küçük hacimli malzemenin kayma hareketi ile başlayan moloz akmaları, kanal içindeki malzemeyi kazarak ve kazdığı malzemeyi içerisine dahil ederek hacmini büyütebilir (Jakop ve Hungr, 2005).

Takahashi (2001), hareketin fiziksel mekanizmalarına odaklanarak akma tipindeki kütle hareketlerini yeniden sınıflandırmış ve rijit kütlelerin kayma hareketinden tanecikli malzemenin akmaya geçtiği süreci ortaya koymuştur. Takahashi (2006)'de yeniden geliştirilen bu sınıflandırmaya göre kütle hareketleri kayma, akma ve düşme olarak ayrılır (Şekil 1.3). Bloklar halinde gösterilmiş sekiz tehlike, belirli özellikleri ile temsil edilmiştir. Üstteki beş blok farklı tane boyutlarındaki malzemenin akma halindeki tehlikeleri, alttaki üç blok ise toprak ve kaya yığınlarının olduğu tehlikeleri temsil etmektedir. Eğer kayma ile başlayan hareket, kayma düzleminin kısıtlamasından kurtulursa serbest düşüşe geçen kütle haline gelir; hareket sırasında kayan kütlelerin alt kısmında sıvılaşma gelişirse yüksek hareket kabiliyeti kazanır ve moloz çığı olarak adlandırılabilir. Eğer tüm gövdeye yeterli su girdisi sağlanırsa moloz akmasına dönüşebilir. Bu süreç Şekil 1.3'teki heyelan bloğundan düşme, moloz çığı ve moloz akması bloğuna doğru başlayan oklar ile gösterilmiştir.



Şekil 1.3 : Kütle hareketlerinin mekanik benzerlikleri ve farklılıkları (Takahashi 2014'ten değiştirilerek).

Takahashi (2006)'ye göre sıvılaşmanın gelişmesi için yüksek miktarlarda su içeriği gereklidir. Bu nedenle büyük ölçekli bir moloz çığının oluşması için hareket etmeye başlayan bir yamaç ünitesinin en azından alt kısmında suya doymuş zeminin olması gerekir. Ancak moloz akması durumunda, kayan gövdenin hacmi küçük ise zemin suya doymamış olsa bile, dışarıdan su girdisinin olması onu bir moloz akmasına dönüştürmek için yeterli olabilir. Şekil 1.3'te kuru taneli akma, piroklastik akma, kar çığı ve granüler moloz akmasını (inertial debris flow) temsil eden dört blok birbiriyle kısmen örtüşmektedir. Üst üste binen bloklar ortak çalışan hareket mekanizmasını içeren bloklardır. Ancak bunlar ilgili hareketlerde mutlaka eşit olarak baskın değildir. Örneğin kar çığı için, yaygın olarak çalışan içsel gerilmelerin yanı sıra, kartopu oluşumuna yol açan kohezyonun etkileri ve kar yüzeyindeki kayma çok önemli olmaktadır. Moloz akması için, yaygın olarak çalışan içsel gerilmenin yanı sıra, kaldırma kuvveti ve farklı tane boyutuna sahip parçacıkların çarpışmalarını hafifletmek için taneler arasındaki sıvının tampon etkisi ve ortamdaki sıvılaşmayı

hızlandırmak için ek kütle etkisi önemli olacaktır. Bir moloz akması kil ve silt gibi çok ince sediman içeriyorsa taneler arası akışkandaki viskozite çok büyük olur ve türbülans mutlaka engellenir. Bu durumda, tanelerin çarpışma etkisi minimuma iner ve bunun yerine tabakalı yayılma mekanizması (Phillips vd. 1992) çalışmaktadır. Bu nedenle, viskoz moloz akması ile granüler (Inertial) moloz akması arasındaki ortak mekanizma sadece kaldırma kuvvetidir. Viskoz moloz akmasının aynı zamanda moloz çığı, piroklastik akma ve kar çığı ile çok az ortak noktası vardır. Şekil 1.3'te gösterildiği gibi tehlikeleri temsil eden bloklar arasında hiçbir örtüşme yoktur (Takahashi, 2014).

Moloz akmaları içerdiği su miktarı ve dik eğimli yamaçlarda oluşmaları nedeniyle çok yüksek hızlara ulaşabilir (Hung, 2001). Moloz akmaları yaklaşık 0,5-20 m/s aralığındaki hızları ile hızlı ve aşırı hızlı heyelan grubu arasında yer almaktadır (Çizelge 1.1) (Takahashi, 1981; Cruden ve Varnes, 1996; Iverson, 1997; Hung, 2001).

Çizelge 1.1 : Heyelan hız ölçeği (Cruden ve Varnes, 1996'dan düzenlenerek).

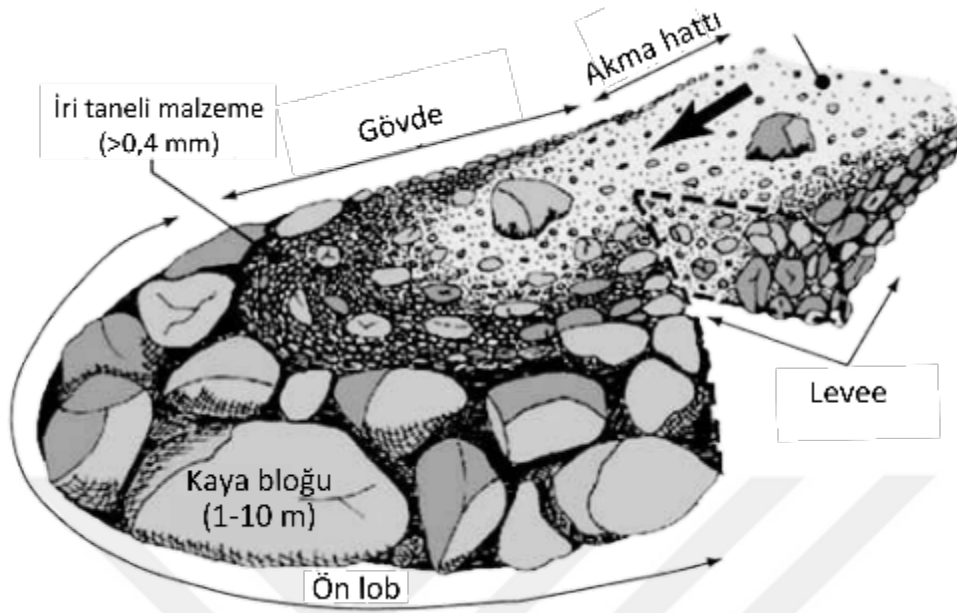
Hız açıklamaları	Hız sınıfları	Hız oranı (mm/s)	Hız değerleri
Aşırı hızlı	7	5	5 m/s
Çok hızlı	6	0,05	3 m/dk
Hızlı	5	$5 \cdot 10^{-4}$	1,8 m/s
Orta düzeyde	4	$5 \cdot 10^{-6}$	13 m/hafta
Yavaş	3	$5 \cdot 10^{-8}$	1,6 m/yıl
Çok yavaş	2	$5 \cdot 10^{-10}$	16 mm/yıl
Aşırı yavaş	1		

Moloz akmalarının hareket davranışları ve yıkıcı güçleri sedimanın tane boyutuna ve oranına, viskozite ve hız değerlerine göre değişmektedir (Takahashi, 2014). Buna göre Takahashi (2014) moloz akmalarını üçe ayırarak sınıflandırmıştır:

1.1 Kaya Destekli Moloz Akması

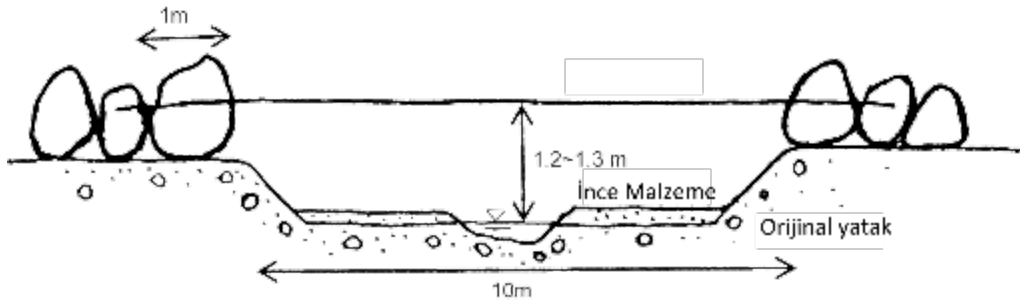
Kaya destekli moloz akmalarında en büyük boyuttaki taneler ön kısımda bulunur ve bu kısımda çok az su bulunmaktadır. 10 cm'den birkaç metreye varan boyuttaki moloz malzemesinin yatağını aşındırma kabiliyeti yüksektir. Ön lobtan sonraki kısımda tane boyutu küçülmekte ve su içeriği artmaktadır. Birikim yaptığı bölgeye ulaştığında

moloz akmasının enerjisi ve kaldırma kuvveti azalır. Malzeme içeriğindeki iri taneli bloklar leve oluşturacak şekilde her iki kenarda birikim yapmaktadır (Şekil 1.4).



Şekil 1.4 : Kaya destekli moloz akması kütlelerinin şeması (Bardou, 2002'ten düzenlenerek)

İlerleyen aşamada hiperkonsantirik akışlar, ilk aşamada gelen kanalın içindeki malzemeyi aşındırarak daha uzak mesafelere taşıyabilmektedir. Süreç tamamlandığında iki kenarda tümsek, orta kısmı aşındırılarak kazılmış bir yatak görünümü ortaya çıkmaktadır (Şekil 1.5 ve Şekil 1.6).



Şekil 1.5 : Kaya destekli moloz akmasının diagramı (Takahashi, 2014'ten düzenlenerek).



Şekil 1.6 : Isparta İli içindeki Barla Dağı'nın kuzeyindeki bir moloz konisinde yer alan kaya destekli bir moloz akmasına ait leveler.

1.2 Türbülanslı-Çamurlu Tip Moloz Akması

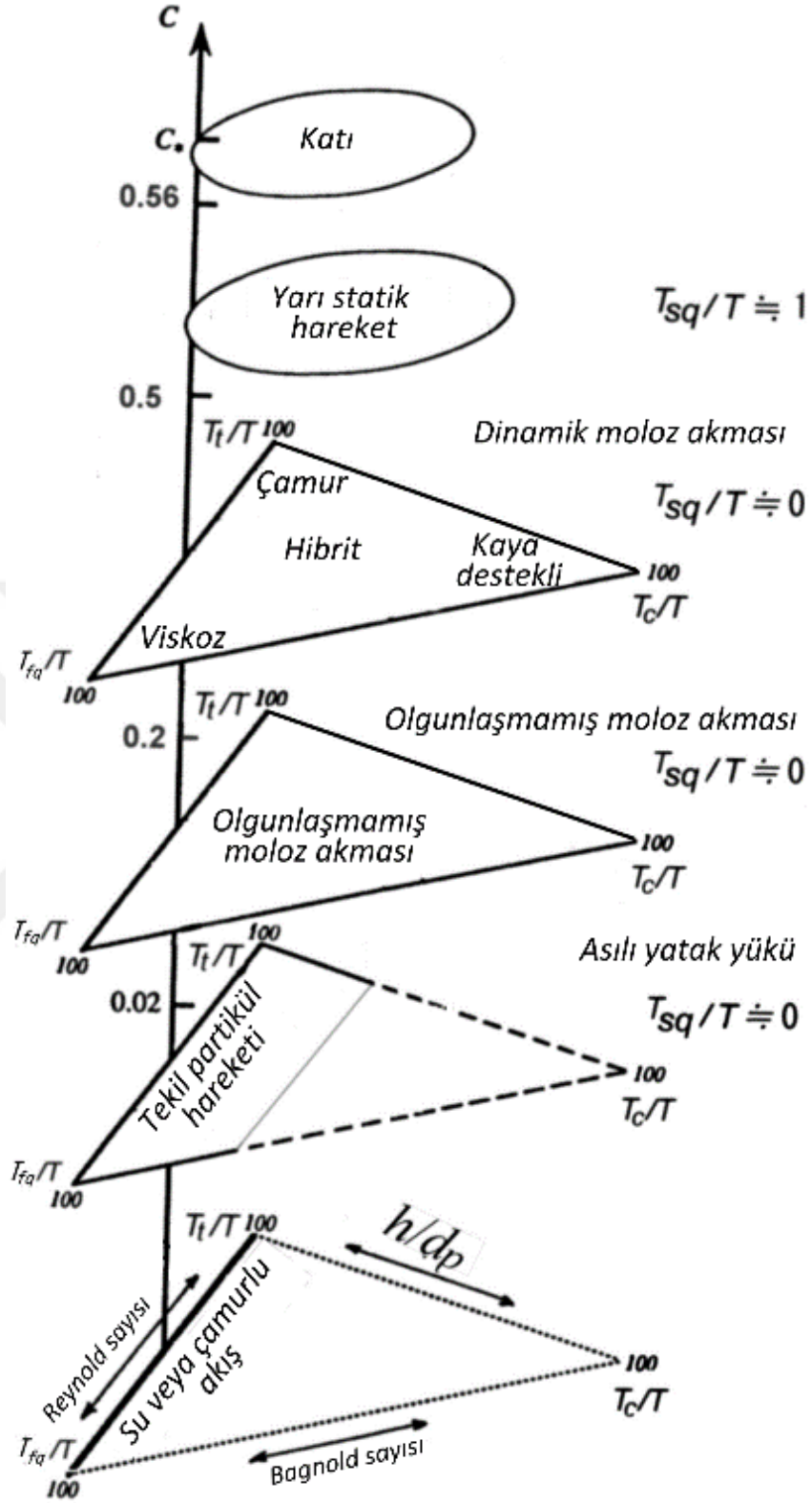
Bu tip moloz akmaları çok sayıda iri taneli malzeme ve büyük kaya blokları içermelerine rağmen kütle içindeki ince taneli malzemenin egemen olmasıyla kaya destekli moloz akmalarından ayrılmaktadır (Takahashi, 2014). Ön kısımdan arkaya kadar çok çalkantılı bir akış gözlemlenir (örn: Badoux, 2009). Bu tür moloz akmalarının plastisitesi ve kaldırma kuvveti düşüktür.

1.3 Viskoz Moloz Akması

Viskozitesi yüksek moloz akmalarının en tipik özelliği akmanın dalgalanmalar halinde aralıklı olarak gerçekleşmesidir. Bu dalgalanmalar yüzlerce kez tekrarlanabilir ve birkaç on saniye ile birkaç dakika arasında değişen zaman aralıklarıyla gerçekleşebilir. Bu tip akmaların genel olarak plastisitesi yüksektir. Bu tipteki moloz akması, 0,1 mm'den büyük iri taneli malzemeler ile çamur matrisinden oluşmaktadır. Çamur matrisindeki kaba taneli malzemenin konsantrasyonu hacimce %50'den fazladır. (Takahashi, 2014).

Yukarıdaki sınıflandırmada hareket eden kütle içindeki iri taneli malzemenin birbiriyle çarpışma, içsel gerilme değerleri, partikül konsantrasyonu ve bir takım akışkanlar mekaniği formülleri değerlendirilmiştir (Takahashi, 2014). Buna göre katı ve sıvının karışımı halindeki malzemenin hareket oluşum koşulları ve üç tipteki moloz akmasının konumu Şekil 1.7’de gösterilmiştir. Hareket halindeki malzemenin fiziksel ve davranış özellikleri üç eksenle temsil edilmiştir. Hacim olarak kaba taneli malzemenin konsantrasyonunu gösteren C ; bir akışkandaki eylemsizlik/atalet kuvvetleri ile viskozite kuvvetlerine oranı ile temsil eden ve akışın genel olarak tabakalı veya türbülanslı olduğu durumları ifade Reynold sayı; granüler bir akıştaki tane içsel sürtünmenin viskoz sıvı gerilmelerine oranı ile temsil edilen ve granüler yapıdaki malzemenin akışını değerlendirmek için kullanılan Bagnold sayısı; bu iki boyutsuz sayının oranı ile temsil edilen ve bağıl derinliği gösteren h/d_p eksen, moloz akmalarının sınıflandırılmasında değerlendirilmiştir. Buna göre Bagnold sayısının büyük ve bağıl derinliğinin küçük olduğu bölge kaya destekli moloz akmalarını; Bagnold sayısı ve Reynolds sayısının küçük olduğu bölge viskoz moloz akmalarını; bağıl derinlik ve Reynolds sayısının büyük olduğu bölge ise türbülanslı-çamurlu moloz akması olarak temsil edilmiştir. Üçgenin içinde değişen oranlardaki değerler ile bu üç tip moloz akması karmaşık olarak veya örneğin viskoz moloz akmasının hakim olduğu ancak diğer moloz akma türlerinin de gözlemlenebileceği akmalar temsil edilmiştir. Moloz akmaları diğer heyelan tiplerinden farklı olarak genellikle yamaçlardaki olukları ve birinci yada ikinci dereceden drenaj kanalları gibi belirli rotayı izleyerek periyodik olarak meydana gelir. Bu kanalları kullanarak hareket eden moloz malzemesi hareket enerjisinin bittiği düşük eğimli arazide birikime başlar. Bu bağlamda moloz akması üç bölüme ayrılabilir: (i) moloz malzemesinin yoğun olarak üretildiği ve su birikiminin kanallara başlamaya başladığı kaynak alanı, (ii) malzemenin transfer olduğu kanal ve (iii) birikim alanı (Şekil 1.8).

Moloz akmaları neden oldukları can ve mal kayıplarına bağlı olarak (Dowling ve Santi, 2014) özellikle kurak-yarı kurak bölgelerde (David-Novak vd., 2004; Vargas vd., 2006) dağlık alanlardaki yerleşmeleri etkilemeleri bakımından öne çıkan kütle hareketleridir (Rickenmann ve Zimmermann, 1993). Bol miktarda iri taneli veya ince taneli sediman kaynağı, dik eğimli yamaçlar ile bol miktarda su kaynağı moloz akması için hazırlayıcı koşullardır (Takahashi, 1981; Rickenmann ve Zimmermann, 1993).



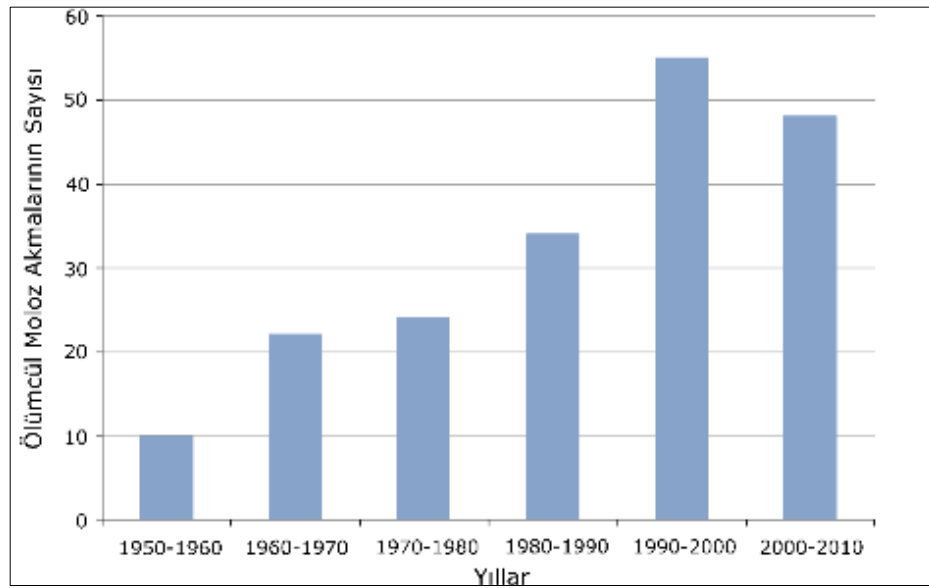
Şekil 1.7 : Katı ve sıvının karışımı halindeki malzemenin hareket oluşum koşulları (Takahashi 2014'ten Türkçeleştirerek).



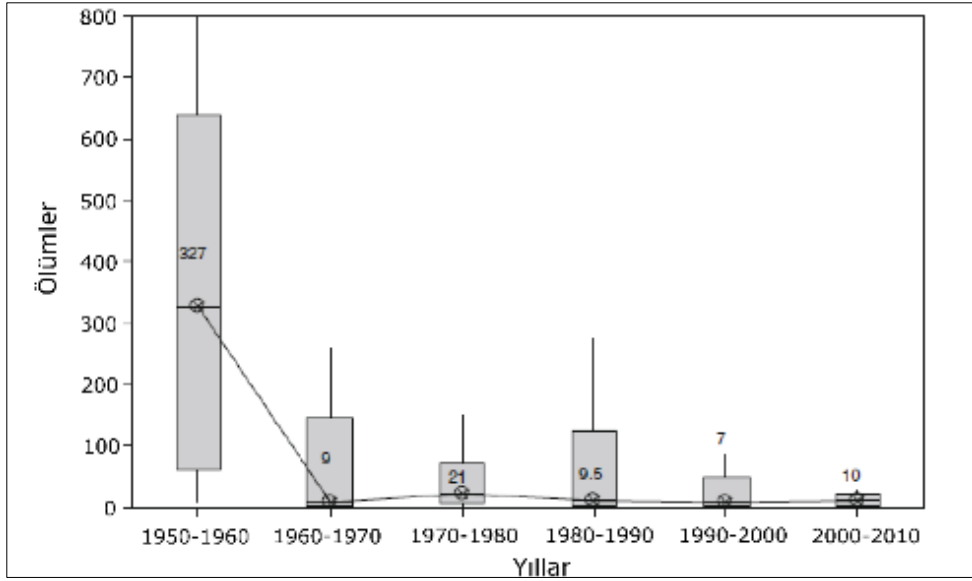
Şekil 1.8 : Isparta İli sınırları içinde yer alan Barla Dağ’ında bir moloz akmasının bölümleri.

Su girdisi, yağış, kar-buz erimesi (örn, Thayyen vd., 2022) ve nadiren volkanik patlamalar (örn, Vallance, 2005) sırasında kar ve buz erimesi (örn, Costard vd., 2002; Decaulne vd., 2005) ile sağlanır. Bu koşullar kurak, yarı kurak, arktik ve nemli bölgelerdeki dağlık alanlarda bulunabilir (Costa, 1984). Yüksek hareket hızları ($\sim 20\text{m/s}$), çarpma kuvvetleri ve uzun etki mesafeleri, zamansal ve mekânsal öngörülebilirliği kısıtlı olması ile birleştiğinde, moloz akmalarının en tehlikeli heyelan türlerinden biri olmasına neden olur (Jakop ve Hungr, 2005). Dowling ve Santi (2014), akademik yayınlardan, gazetelerden ve kişisel yazışmalardan elde edilen verilerle moloz akması olaylarını mekânsal ve zamansal dağılımı ile sosyal göstergeleri inceleyen bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmaya göre 1950-2011 yıllarını kapsayan ve küresel ölçekte gerçekleşen 213 moloz akması 77.779 kişinin ölümüne yol açmıştır (Şekil 1.9 ve 1.10). Moloz akmaları, insan hayatı kaybı, evlerin ve mühendislik yapılarının (yol, köprü, demiryolu hatları, boru hatları, elektrik iletim hatları) yıkılması, tarım arazilerinin degradasyonuna, çiftlik hayvan tesislerinin yıkılması ve ormanlık alanların zarar görmesi, su tedarik sistemlerinin bozulması gibi doğrudan olumsuz etkilere neden olabilmektedir. Bunların yanı sıra ulaşım ağlarının ve lojistik faaliyetlerin aksaması gibi durumlarda ciddi miktarlara varan ekonomik

kayıplara yol açarak dolaylı olumsuz etkilere neden olabilmektedir. Moloz akmalarının şiddeti, hız, akma derinliği, çökel kalınlığı parametreleri ve diğer insan yapılarındaki darbe etkisi gibi parametreler ile hesaplanmaktadır (Jakop ve Hungr, 2005). Ülkemizde de her yıl can ve mal kaybına yol açan moloz akma olayları gerçekleşmektedir. Moloz akması şeklinde gerçekleşen olaylar çoğunlukla çamur çıķı, çamur akıntısı, kaya çıķı, sel ve genel anlamda heyelan olarak kayıtlara geçmiştir (örn, Toprak, 1995; Ertek, 1995; Biricik, 1996; Yeşilkaya vd., 1996; Bağırsakçı, 1996; Toprak, 1996). Nitekim 13 Temmuz 1995 tarihinde Senirkent’te gerçekleşen ve 18-19 Temmuz 1996 tarihinde tekrar eden moloz akması olayı dönemin Afet İşleri Müdürlüğünce “Çamur Çıķı” olarak tanımlanmıştır (Toprak, 1995, 1996). 6 Ağustos 2018 tarihinde Antalya’nın Elmalı İlçesi’ndeki Salur, Yılmazlı ve Eskihisar Mahallelerinde; 7 Ağustos 2018 tarihinde ise Karaköy Mahallesinde gerçekleşen moloz akmaları “sel” olarak ifade edilmiştir (AA, 2018). Ağırlıklı olarak geçim kaynağının hayvancılık olduğu Karaköy’de 21 küçükbş hayvan telef olmuş ve ahırlar yıkılmış, ambarlar ve bazı evler moloz ve çamurla dolmuştur (Aydın ve Çelik, 2019). 22 Ağustos 2020 tarihinde Giresun İlinin Dereli İlçesinde gerçekleşen moloz akmasında 5’i asker olmak üzere 11 kişı hayatını kaybetmiş ve 4 kişı de kaybolmuştur (AA, 2020). “Sel ve heyelan” olarak tanımlanan olayda 19 binanın yıkıldığı, 361 yapı, altyapı ve üstyapı ile elektrik, su ve telefon hatlarının da hasar gördüğu kayıtlara geçmiştir.



Şekil 1.9 : 1950-2010 yılları arasında kayıt altına alınmış ölümöl moloz akmaları (Dowling ve Santi, 2014).



Şekil 1.10 : 1950-2010 yılları arasında moloz akması başına gerçekleşen ölümlerin medyan değeri ve eğilimi. (Dowling ve Santi, 2014).

13 Temmuz 2023 tarihinde Afyonkarahisar-Denizli karayolunda sağanak yağışın tetiklemesi ile gerçekleşen ve kayıtlara sel olarak tanımlanan moloz akması, araç içerisinde mahsur kalan bir kişinin hayatını kaybetmesine neden olmuştur (AA, 2023). Bu moloz akma olayları yüksek eğimli yamaçların olduğu arazilerde şiddetli sağanak yağışların etkisiyle meydana gelmiştir. Üç örnek olayın rapor, haber ve/veya kayıtlarında farklı boyutlarda çakıl, blok boyutlarındaki malzemeden söz edilmesine rağmen moloz terimi kullanılmamıştır. Mevcut olay raporları ve uzman görüş değerlendirmeleri, basında yer alan haberler dikkate alındığında, taşkın, sel, hiperkonsantrik akış, çamur ve moloz akmalarının birer olay ve süreç olarak halen karıştırıldığını göstermektedir. Sel, çığ, akma gibi tehlikelerin tetikleyicisi, oluşumu, gelişimi, mekânsal ve zamansal dağılışı, etki mesafesi açısından değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle her tehlike için farklı tehlike değerlendirmesi, risk yönetimi ve önlem çalışmaları yapılmaktadır. Moloz akması tehlike değerlendirmesi kapsamında, moloz akmasının olduğu yerde üretilen moloz türüne, malzeme boyutuna ve bölgedeki topografik özelliklere göre kendi içinde farklı önlem çalışmaları gerektirmektedir (Huebl ve Fiebigler, 2005). Bunun yanı sıra bir moloz akması olayı moloz akması olarak sınıflandırılmadığında tarihsel kayıtların gerektiği analizlerde karmaşıklığa yol açabilmektedir (Dowling ve Santi, 2014).

Geçmişteki toplumlar, moloz akmalarının tehlikeleri karşısında, elde ettiği deneyimlerle duyarlı bölgelerden kaçınarak başa çıkmıştır (Jakop ve Hungr, 2005).

Ancak günümüzde, gelişmiş ülkelerde sürdürülebilir bir yaklaşımla yürütülen korunma ve önleme çalışmalarının örnekleri mevcuttur (Baum vd., 2010; Chen vd., 2015; Vagnon vd., 2020; He vd., 2022). Bunun yanısıra gelişmekte olan ülkelerdeki toplumsal ve ekonomik gelişmenin hızı, insan faaliyetlerinin deneyim yoluyla bir önlem yaklaşımı oluşturmaya fırsat vermeden tehlikeye duyarlı alanlara girmesine neden olmaktadır (Jakop ve Hungr, 2005). 1950-2011 arasındaki veri setlerinden elde edilen istatistiki veriler, gelişmiş ülkelerde gerçekleşen ölümcül moloz akması sayısının gelişmekte olan ülkelerde gerçekleşen ölümcül moloz akması sayısı ile neredeyse eşit olmasına rağmen ölüm sayısının gelişmekte olan ülkelerde daha fazla olduğunu göstermektedir. (Çizelge 1.2) (Dowling ve Santi, 2014).

Çizelge 1.2 : IMF (2011) sınıflandırmasına göre gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler için tanımlayıcı istatistikler (Dowling ve Santi 2014'ten değiştirilerek).

İstatistik	Gelişmiş	Gelişmekte olan
Toplam ölüm sayısı	5327 (%7)	72,452 (%93)
Toplam moloz akmaları	100 (%47)	113 (%53)
Olay başına ortalama ölüm	52	620
Olay başına medyan ölüm sayısı	6	23
Yıl başına ortalama ölüm	87	1188
Standart sapma	158,4	2834,1
İstatistiksel asimetri	5,5	6,9

Bu bağlamda, özellikle yüksek dağlık arazilere sahip ülkelerde moloz akma tehlikesinin potansiyelinin araştırılması ve mevcut riskin kabul edilebilir risk seviyesine indirgenmesine yönelik korunma ve önlem çalışmalarının yapılmasına giderek daha fazla ihtiyaç duyulmaktadır (Jakop ve Hungr, 2005).

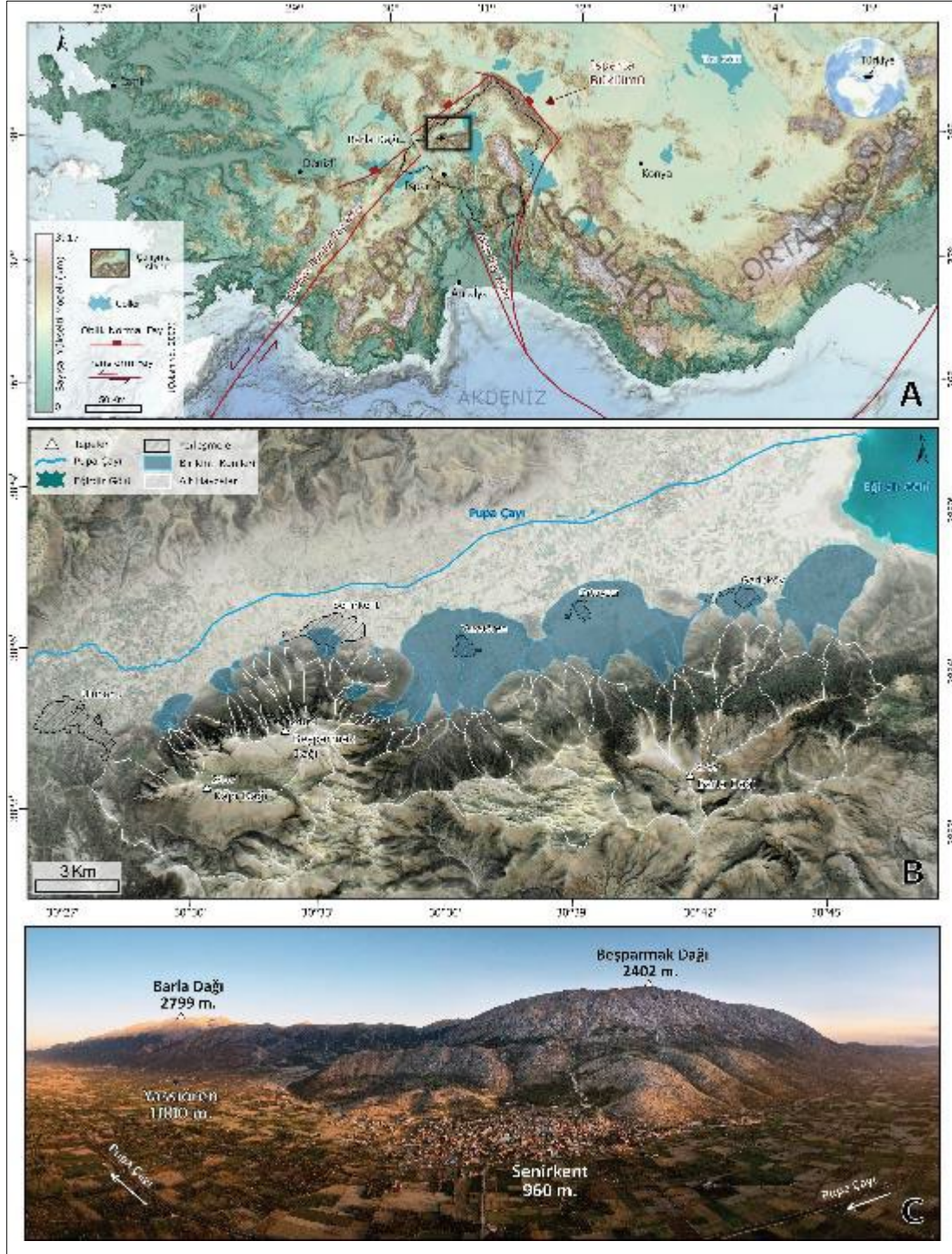
Moloz akmalarına duyarlı bölgelerin tanımlanması ve potansiyel yayılma alanlarının belirlenmesi yoluyla korunma ve önleme çalışmaları, moloz akma tehlike değerlendirme açısından öne çıkmaktadır (Blahut, 2010; Baumann, 2011; Kappes, 2011; Kang, 2018; Jiang, 2021). Bu tez çalışması kapsamında Isparta ili sınırları içinde bulunan Barla Dağı'nın kuzey yamaçları boyunca moloz akma tehlikesi duyarlılığı değerlendirme analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu alanın seçilmesinde moloz akma tehlikesi kapsamında bir dağ kuşağı boyunca bölgesel ölçekte duyarlılık analizlerine uygun olması, Türkiye Cumhuriyeti'nde bilinen en ölümcül moloz akması olayının bu

bölgede gerçekleşmesi ve doğu-batı yönlü sıralanan moloz akmalarına duyarlı havzaların varlığı etkili olmuştur. Çalışmada mekânsal olarak gerçeğe daha yakın sonuçlar elde etmek amacıyla (örn, Fischer vd., 2012) Harita Genel Müdürlüğü'nden elde edilen verilerle hazırlanan 5 m yersel çözünürlüğe sahip Sayısal Yükselti Modeli kullanılmıştır. Bu çalışmanın amacı litoloji, iklim, bitki örtüsü bakımından yüksek moloz üretimi potansiyeline sahip olan Barla Dağı'nın kuzey yamaçlarında mekânsal olarak dağıtılmış ampirik bir model olan Flow-R (Flow path assessment of gravitational hazards at a Regional scale) kullanarak bölgesel ölçekte moloz akma duyarlılık değerlendirmesi yapmaktadır. Bu çalışmanın sonucunda elde edilecek verilerin Barla Dağı'nın kuzeyindeki yoğun olarak tarımsal faaliyetler yürütülen arazilerin ve yerleşimlerin moloz akmalarının tehlikelerine yönelik afet öncesi risk yönetiminde temel kaynak olacağı düşünülmektedir.

2. ÇALIŞMA ALANI

Çalışma alanı Akdeniz Bölgesi'nin kuzeyinde, Antalya Bölümünde Isparta ilinin 40 km kuzeyinde yer alır. Antalya Körfezi ile Burdur-Hoyran ve Beyşehir Gölleri ile sınırlanan Isparta Büklümü'nde yer alan çalışma sahasının toplam alanı 265 km²'dir (Şekil 2.1a). Doğuda Eğirdir Gölü ile sınırlandırılmış alanın kuzey sınırını Senirkent ilçe merkezinin yer aldığı Hoyran Grabeni'nin ortasından geçen Pupa Çayı oluşturur. Doğu-Batı yönünde yaklaşık 35 km uzanan Barla Dağı kütesinin; kuzeyindeki Hoyran Grabeni'ne drene olan alt havzaların en yüksek kesimlerinden oluşan su bölümü hattı çalışma sahasının güney sınırını oluşturmaktadır (Şekil 2.1b). Kapı Dağı (2447 m), Beşparmak Dağı (2402 m) ve Barla Dağı (2799 m) bu sınır içindeki başlıca zirveleri oluşturmaktadır. Isparta iline bağlı Uluborlu (1050 m), Senirkent (960 m) ilçeleri ve Yassıören (1000 m), Ortaköy (970 m) ve Garip (950 m) mahalleleri bu yükseltilerin kuzeyindeki birikinti konilerinin üzerinde konumlanmıştır (Şekil 2.1c). Moloz akmalarnın hakim olduğu birikinti konilerinde eğim değerleri 1° ile 64° arasında değişmekte olup ortalama eğim 6°'dir. Havzaların moloz kaynak alanını oluşturan sarp yamaçları ve malzemenin taşınımının gerçekleştiği moloz kanallarını içeren alt havzalarda eğim değerleri 1° ile 83° arasında değişmektedir. Alt havzaların ortalama eğimi 25°, moloz kanallarının ortalama eğimi ise 22°'dir. Çalışma alanının içerisinde 1995 ve 1996 tarihlerinde moloz akmalarnın gerçekleştiği Senirkent ilçesi yıllık (1970-2021) ortalama 641 mm yağış değeri ile yazları sıcak yarı kurak (Avcı, 2012) iklim özelliği göstermektedir. Bölgede aylık bazda en fazla yağış 2001 yılı Aralık ayında (307.1 mm), yıllık bazda ise 1981 yılında (912.9 mm) ölçülmüştür. Moloz akmalarnın oluşumunda etkili olan yağış, kısa sürede yüksek miktarda gerçekleşen ekstrem yağışlardır. Barla Dağı'nda geçmişte gerçekleşmiş moloz akmalarnın tespit edilmesinde kullanılan tarihi hava fotoğraflarının zamansal çözünürlüğünün düşük olması nedeniyle geçmişteki ekstrem yağışlar ile korelasyon sağlanamamıştır. Ancak tarihi bilinen 13 Temmuz 1995, 18-19 Temmuz 1996 tarihlerinde gerçekleşen ekstrem yağışlara 2.1. bölümünde değinilmiştir. Isparta Büklümü'nün kuzeyinde Üst Miyosen'den günümüze kadar bölgedeki normal fayların etkisiyle şekillenen Barla

Dağı yükseltisi ve Hoyran çöküntü havzası tipik horst graben sistemini temsil etmektedir.



Şekil 2.1 : Çalışma alanının konumu (A), Alt havzaların ve fanların konumu (B) ve Senirkent İlçesi, Hoyran Grabeni’ni ve Barla Dağı Kuşağı’nı gösteren panoramik fotoğraf (C).

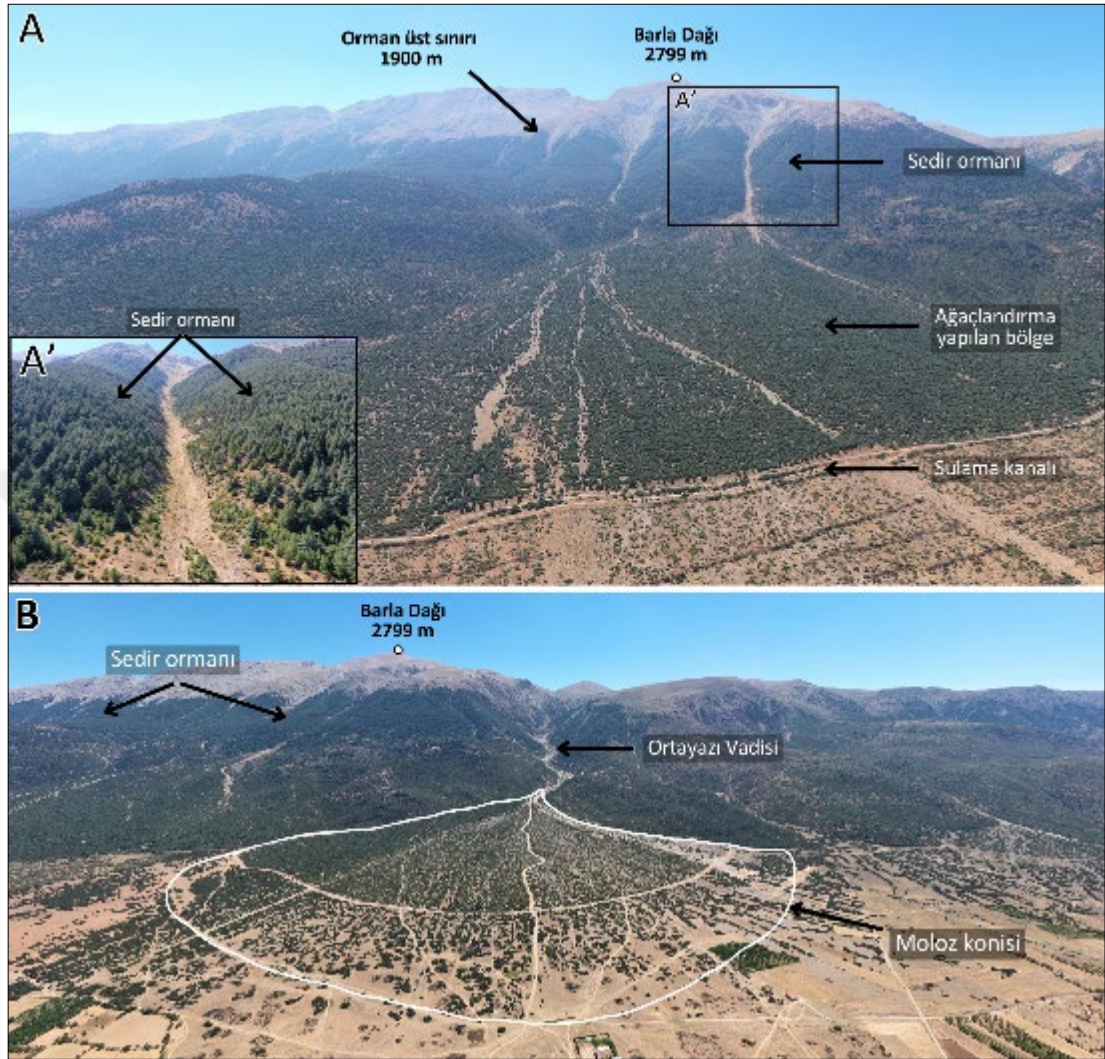
başlayan ve moloz kanalı olarak devam eden Ortayazı Vadisi oluşturmaktadır (Şekil 2.4b).



Şekil 2.3 : Senirkent yerleşiminin güneyindeki yamaçlar ve kaynak alanı.

Ormanın varlığı moloz akmasının oluşumunda hazırlayıcı koşulları ve akımın yayılma mesafesi açısından yamaçlarda stabiliteyi sağlayan bir rol üstlenmektedir (Wang vd., 2017). Bitki örtüsü yüzeydeki pürüzlülüğü artırarak akışın hızı yavaşlatır (Michelini vd., 2017). Bitki örtüsü ile kaplı yamaçlar, bitki örtüsünden yoksun çıplak yamaçlarla kıyaslandığında bitki kökleri, zeminin nemli tutulmasını sağlar ve fiziksel ayrışmanın şiddetini azaltarak moloz girdisini düşürür (Casermeiro vd., 2004). Ayrıca bitkiler yamaçlardaki erozyonun şiddetini azaltarak (Casermeiro vd., 2004) sedimanın birikim yaptığı ve transfer olduğu kanal oluşumunu engeller. Bu nedenle moloz akmalarından korunma çalışmaları kapsamında ağaçlandırma yöntemi (Michelini vd., 2017) veya hayvancılık faaliyetlerini düzenleyerek mevcut doğal bitki örtüsünü koruma yöntemleri tercih edilmektedir (Tunusluoğlu, 2006). Bölgede ağaçlandırma çalışmaları kapsamında akasya, sedir ve çam ağaçları dikilmiştir. Özellikle 1995 yılında Senirkent’de yaşanan moloz akması afetinden sonra diğer havzaların yamaçlarında ve birikinti konilerinde ağaçlandırma çalışmaları yoğunlaşmıştır (Tunusluoğlu, 2006). Barla Dağı’nın zirvesinin Kuzey, Kuzeybatı ve Kuzeydoğusu’nda yer alan sırasıyla Kapıdere, Ortayazı ve Gedik vadilerinin

tabanlarında Geç Pleyistosen dönemi buzullaşmasına ait morenlere rastlanmaktadır (Altınay, 2022).



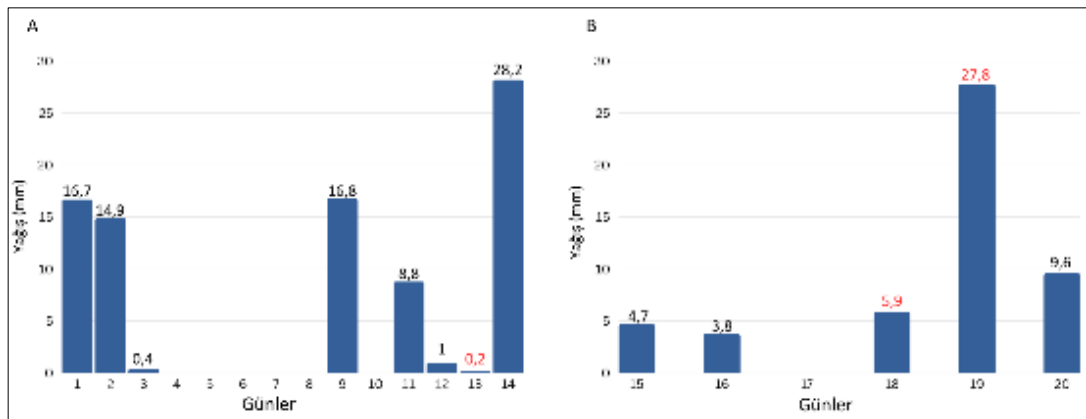
Şekil 2.4 : Barla Dağı'nın kuzey yamaçlarındaki Sedir ormanı (A). Ortayazı Buzul Vadisi ile Sedir ormanının batı sınırı (B).

Bölgede kütle hareketlerinin bir sonucu olarak moloz akmalarının haricinde kayma, düşme ve çığ tipinde heyelanlar bulunmaktadır (Şekil 2.5). Bunlar genellikle alt havzaların 1700-1200 m yükselti aralığında gerçekleşmişlerdir. Önemli miktarlarda moloz girdisi sağlayan döküntü yamaçları özellikle buzullaşma döneminden geriye kalan yamaçlarda gözlenmektedir. Kireçtaşının kimyasal ayrışması sonucu oluşan yaygın karstik şekillerden olan dolinlere Barla Dağı zirvesinin batısında yer alan 2000 m yükseltilerdeki geniş platoda ve Beşparmak Dağı'nın güneyinde 2100 m yükseltilerde rastlanmaktadır. Bölgede bu birimlerin sularını drene ettiği 41 alt havza-birikinti konisi sistemi tespit edilmiştir. Bu birikinti konileri üzerinde yer alan



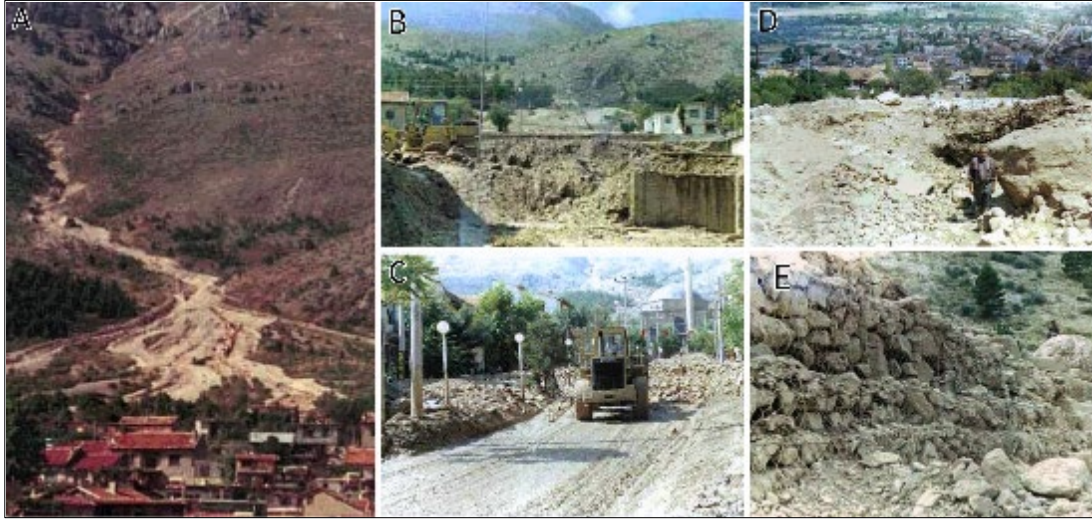
Şekil 2.6 : 13 Temmuz 1995 tarihindeki moloz akmasının Senirkent’e güneyindeki yamaçlarda girişi (Anadolu Ajansı)(A). Moloz akmasının Senirkent’in içlerine kadar ilerlemesi (Haber32)(B). Moloz akmasının hasar verdiği evlerden biri (Haber32)(C).

Temmuz ayı ortalama yağış miktarının 6,4 mm olduğu Senirkent’te 1995 yılı Temmuz ayında toplam yağış değeri 88.8 mm’dir (MGM) (Şekil 2.7). Bu yağışın 28.2 mm’si 13 Temmuz’da gerçekleşmiştir ve önemli bir kısmı yaklaşık 20 dakika gibi kısa bir sürede afet anında gerçekleşmiştir (Toprak, 1995).



Şekil 2.7 : 1995 Temmuz ayı yağışlı günlerin günlük ortalama yağış değeri (A). 1996 Temmuz ayı yağışlı günlerin günlük ortalama yağış değeri (B) (Senirkent Meteoroloji İstasyonu, MGM).

18 ve 19 Temmuz 1996 tarihlerinde Senirkent'te moloz akması afeti tekrar meydana gelmiştir (Şekil 2.8). Bölgede yaşayan vatandaşlar Senirkent Kaymakamlığı tarafından uyarılarak evlerini bir gün öncesinden terk etmiş ve moloz akması kaynaklı ölümlerin önüne geçilmiştir. 19 Temmuz'da gerçekleşen moloz akmasında ise bir gün önceki akmasından kaynaklanan moloz ve çamur malzemesinden dolayı evlere girilememiş ve böylelikle can kaybı yaşanmamıştır. 1995'te gerçekleşen moloz akmasının malzemesinin kanallardaki mevcudiyeti, 1996 tarihinde gerçekleşen moloz akmalarının hacmini arttırmıştır ancak alınan önlemler sayesinde daha az hasara yol açmıştır (Toprak, 1996). 18 Temmuz 1996'da gerçekleşen 27.8 mm yağışın 24.8 mm'si şiddetli yağış anında 15 dakika gibi kısa bir sürede gerçekleşmiştir. 19 Temmuz'da ise bu değer 9.6 mm olarak ölçülmüş olup 9.4 mm'si şiddetli yağış anında düşmüştür (Toprak, 1996) (Şekil 2.7).



Şekil 2.8 : 18-19 Temmuz 1996 tarihlerinde gerçekleşen moloz akması (A). Senirkent Belediyesi ve Hızır Çelebi Camii'nin üzerinde olduğu Atatürk Caddesi'ne kadar ilerlemiş moloz (C). 1995 yılında gerçekleşen moloz akmasının malzemesini kazarak oluşturduğu kanal ve kaya blokları (D). 1995 yılındaki afetten sonra yapılan setin 1996 yılındaki moloz akmasında hasar almış hali (B); moloz konisinin üst kesimlerinde yapılan tel örgünün 1996 yılındaki moloz akmasıyla dolmuş görüntüsü (E) (Bağırsakçı, 1996).

3. VERİ VE YÖNTEM

3.1 Veri Toplama ve Analizi

Moloz akmaları açısından yamaçlardaki fizyografik ve jeolojik özelliklerin yanı sıra, yamaçların bulunduğu bölgelerin meteorolojik koşulları gibi faktörlerin değerlendirilmesi gerekmektedir. Ayrıca daha önceden gerçekleşmiş olan moloz akması olaylarının arşiv uzaktan algılama verileri kullanılarak detaylıca incelenmesi ve moloz erişim mesafeleri gibi parametrelerin tespit edilmesi, ampirik moloz akması modellemesi açısından önem arz etmektedir. Bu tez çalışması kapsamında Barla Dağı'nın kuzey yamaçları boyunca belirlenen alanda Harita Genel Müdürlüğü'nden (HGM) temin edilen 5 m yersel çözünürlüğe sahip SYM verileri kullanılmıştır.

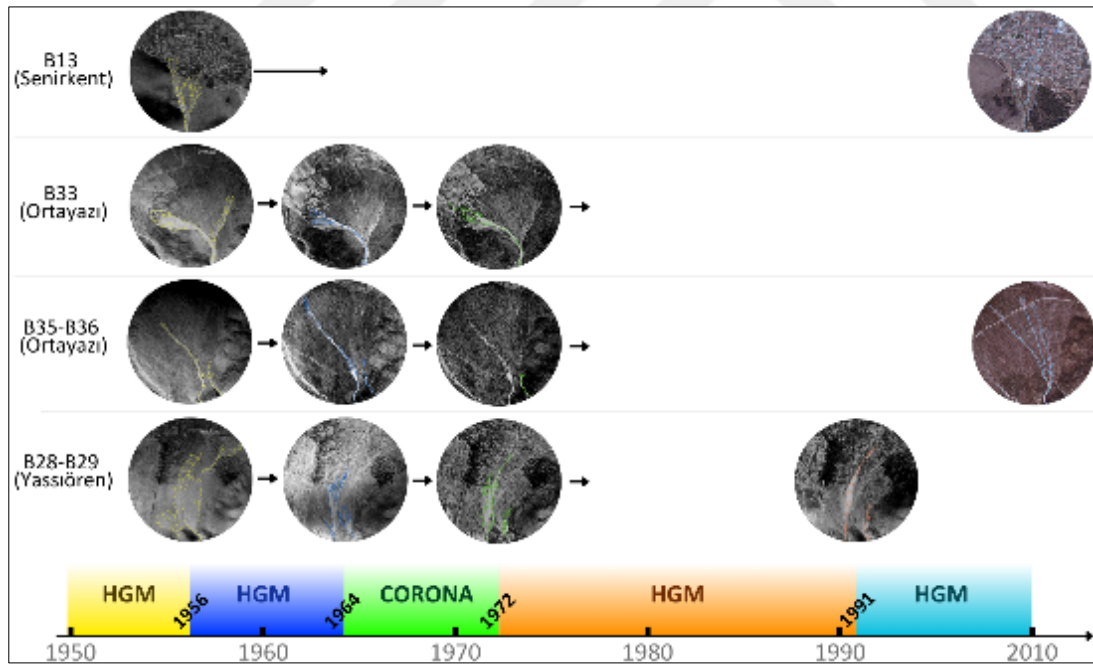
Geçmiş dönemlerde gerçekleşmiş moloz akmalarının haritalanmasında Harita Genel Müdürlüğü'nden temin edilen hava fotoğrafları ve CORONA uydu görüntüleri kullanılmıştır (Çizelge 3.1.). 1956, 1964, 1972, 1991 ve 2010 yıllarına ait 5 set siyah-beyaz hava fotoğrafı bu tez çalışması için belirli havzalarda kullanılmıştır (Şekil 3.1). İnsan müdahalesinin hemen hemen tüm çalışma sahasındaki etkinliğinin gözlemlenmesi üzerine 2010 tarihinden sonraki hava fotoğrafları değerlendirmeye alınmamıştır. Bu müdahaleler, kanal içinde yapılan moloz akması önlem yapıları olduğu gibi yapı malzemesi olarak kullanılması amacıyla moloz konisi üzerinden malzeme alımı yapılmasıdır. Bu havzalardaki insan müdahalesi, moloz akması gerçekleşmiş olsa bile hava fotoğraflarından moloz akması izlerinin tespit edilmesini zorlaştırmıştır. İnsan müdahalesinin yol açtığı belirsizlik açısından daha güvenli veri sunması gerekçesiyle 2010 yılına kadar olan hava fotoğrafı setleri kullanılmıştır.

İkinci bölümde de değinildiği gibi çalışma sahasındaki hakim litolojinin kireçtaşı olduğundan dolayı moloz akmalarındaki malzeme de çoğunlukla kireçtaşından kaynaklanmaktadır. Bu bölgede kireçtaşı malzemesi dolayısıyla moloz akmaları yayılma ve birikim yaptıkları alanda siyah-beyaz fotoğraflarda tespit edildiği üzere çevresine göre daha açık renkte iz bırakmaktadır. Geçmiş dönemlere ait moloz akmalarının haritalanmasında hava fotoğraflarındaki renk ve kontrast değişimleri değerlendirilmiştir (Şekil 3.2). Yayılmanın gerçekleştiği birikinti konisinde eğim değerlerinin düşük olduğu, enerjinin azaldığı ve potansiyel olarak iri taneli moloz

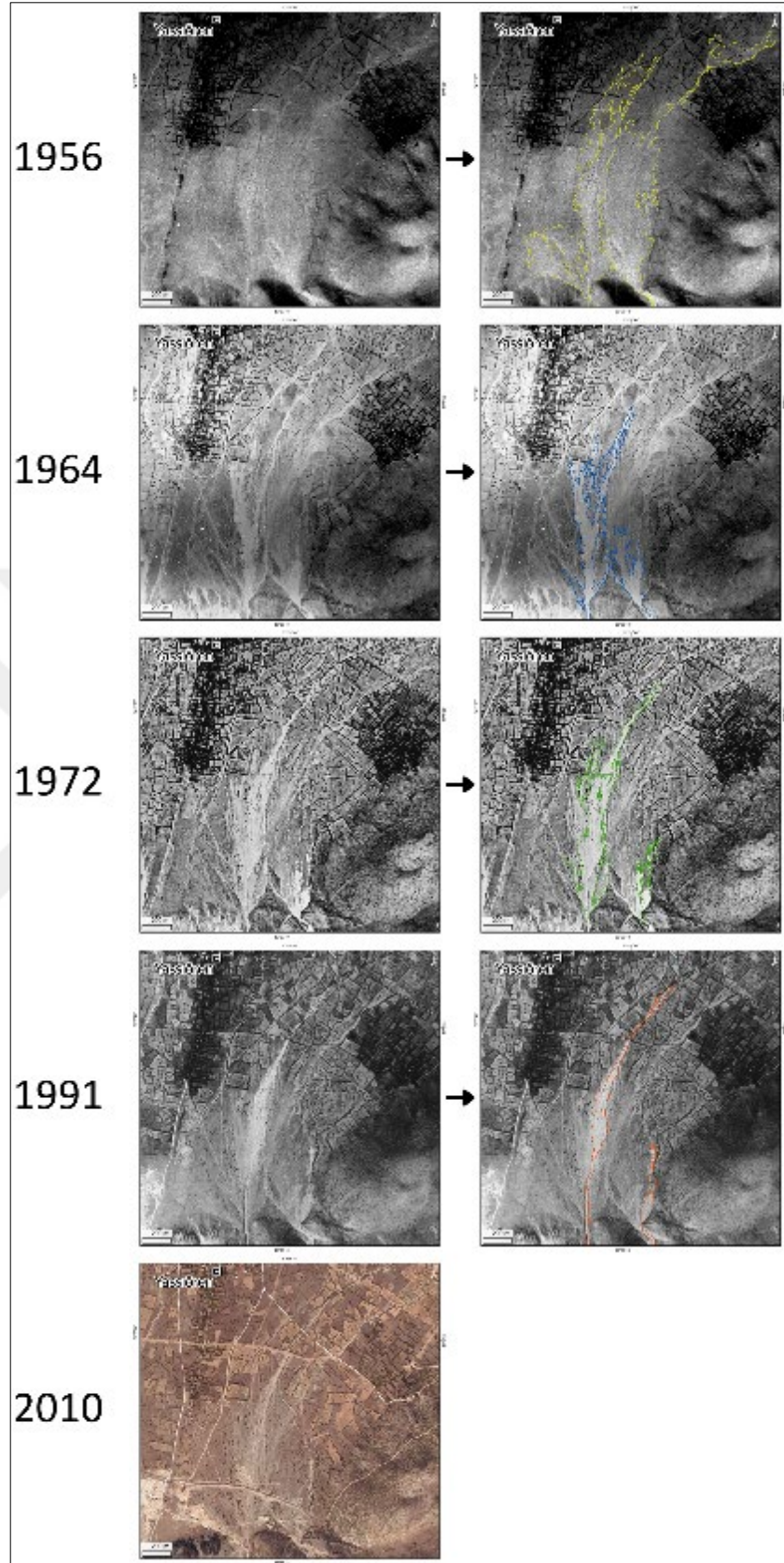
malzemesinin taşınmadığı moloz kaynak alanlarından en uzaktaki bölgelerde tespit edilen açık renk değişimleri, moloz akması malzemesi olup olmadığı verinin yersel çözünürlüğü itibarıyla teyit edilememiştir. Ancak önceliğimizin maksimum güvenlik sınırları olması dolayısıyla bu alanlar analizlere dahil edilmiştir. Çünkü bu alanların bir moloz akması olayını takip eden hiperkonsantirik akış olarak bilinen vizkositenin düşük olduğu, yüksek miktarda asılı yükün olduğu ve ince taneli malzemenin uzun mesafelere taşındığı akış olması söz konusudur (Pierson vd, 1985).

Çizelge 3.1 : Moloz akmalarının haritalamasında kullanılan uydu görüntüleri ve hava fotoğraflarının listesi.

Veri Kaynağı	Yersel Çözünürlük (m)	Tarih
HGM	1	16.10.1956
HGM	0,4	22.07.1964
CORONA	1,8	15.07.1972
HGM	0,7	24.07.1991
HGM	0,45	10.04.2010
HGM	0,45	11.06.2010



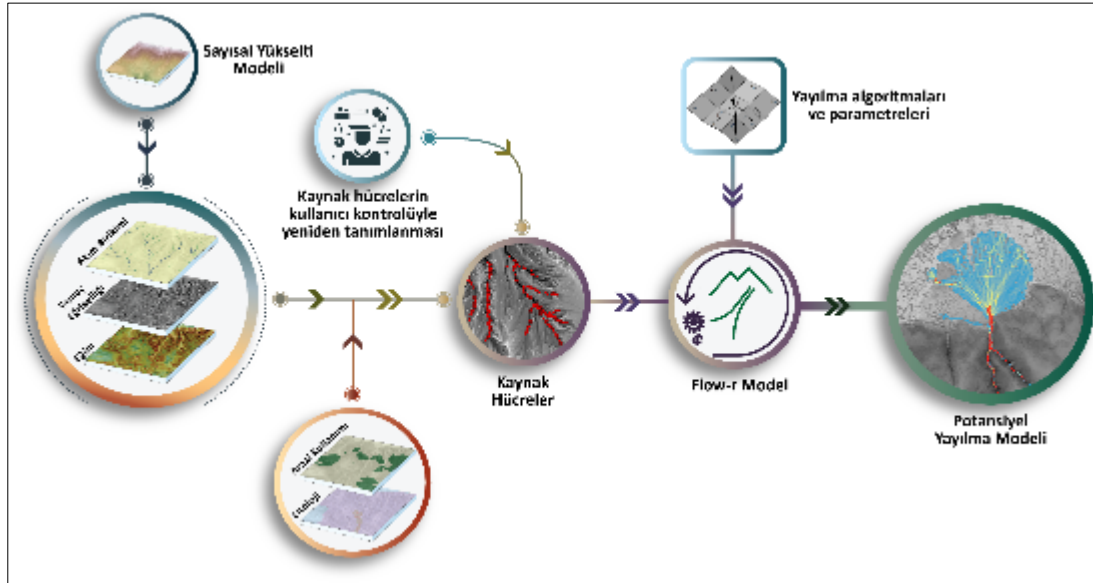
Şekil 3.1 : Çalışma sahasındaki Senirkent, Ortayazı ve Yassıören yerleşimlerinin güneyinde bulunan havzalara (B13, B28, B29, B33, B35, B36 numaralı havzalar Bölüm 4.1’te açıklanmıştır.) ait moloz akmalarının haritalanması için kullanılan hava fotoğrafları ve uydu görüntüleri. Kalın fontla, siyah renkle belirtilen tarihler, o sütunda bulunan fotoğrafların çekim tarihlerini göstermektedir. İki fotoğrafın çekildiği tarih arasında gerçekleşmiş moloz akmaları, o yıl aralıklarına ait renklerle temsil edilmiştir.



Şekil 3.2 : Çalışma sahasında geçmiş dönemlere ait moloz akmalarının haritalanması: Yassıören yerleşiminin güneyindeki moloz konilerindeki gösterimi (2010 yılına ait hava fotoğrafında bu konilerde moloz akması izleri tespit edilmemiştir).

3.2 Moloz Akmalarına Neden Olacak Potansiyel Kaynak Alanların Tespit Edilmesi

Moloz akmalarının başlangıç kesimleri kaynak alan olarak tanımlanmaktadır. Kaynak alanının tanımlaması için indeks tabanlı bir yaklaşım kullanılır. Girdi veri kümeleri farklı türde mekânsal bilgileri temsil edebilir ve kullanıcı tanımlı koşul parametreleri ile ele alınır (Şekil 3.3).

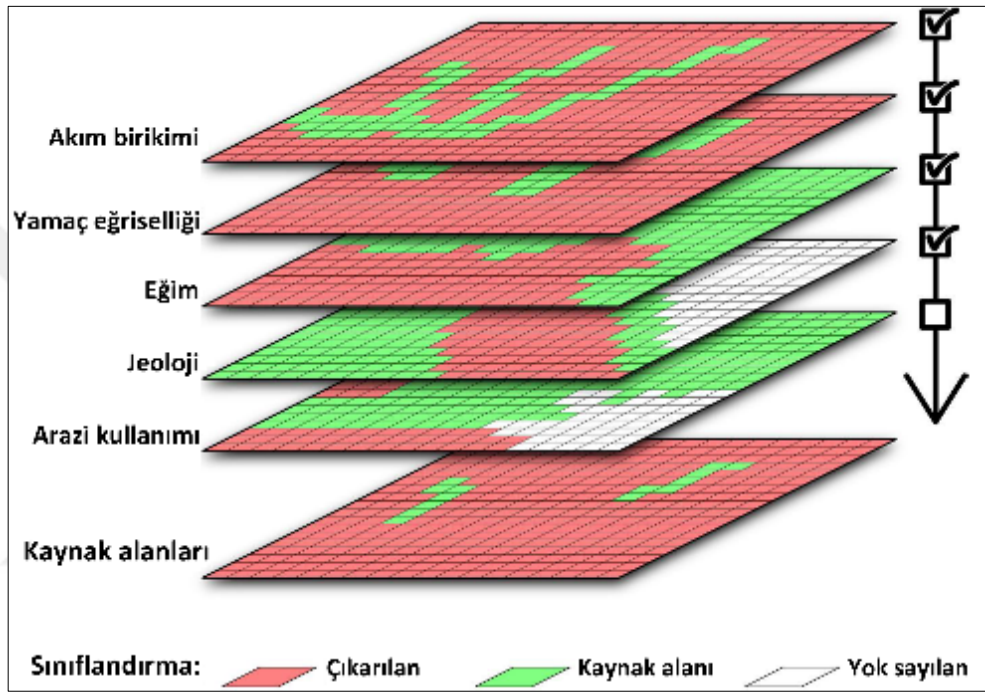


Şekil 3.3 : Çalışmada kullanılan iş akışı aşamaları. İş adımlarının işlem sırası oklarla belirtilmiştir.

Buna göre, her bir girdi veri kümesinin grid hücreleri (1) moloz başlama olasılığına sahip mekansal bir kesim için “kaynak alanı” olarak alınır, (2) moloz akmasının başlama olası olmadığına “çıkarılan” veya (3) bu parametre hakkında herhangi bir karar verilemediğinde “yok sayılan” (Şekil 3.4) olarak sınıflandırılır.

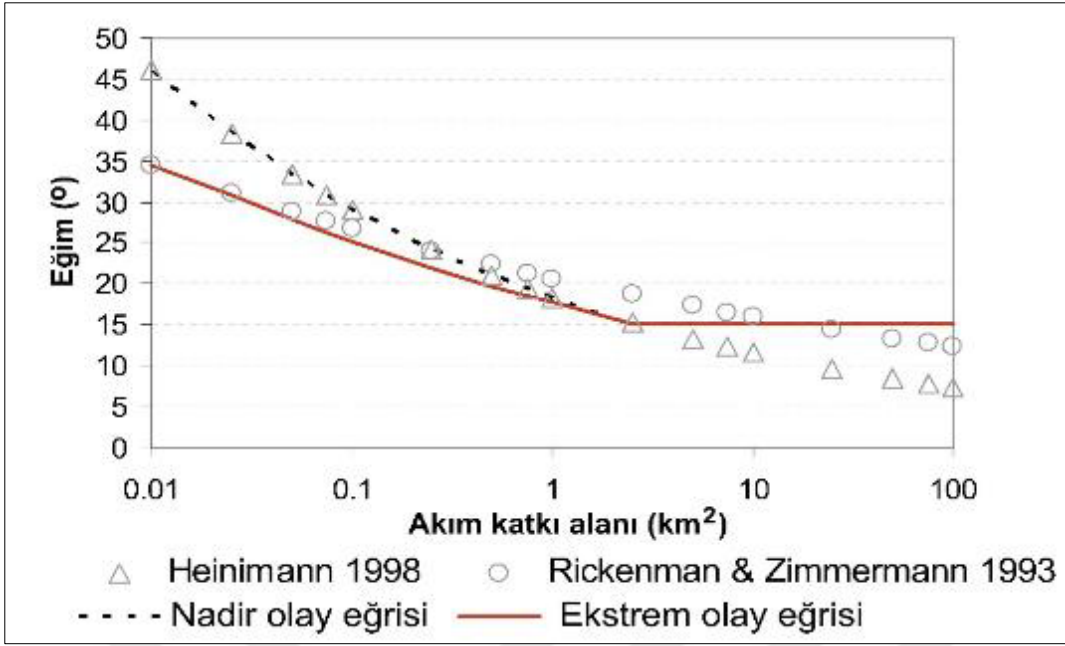
Veri kümeleri aşağıdaki kurala göre birleştirilir: bir hücre en az bir kez kaynak alanı olarak seçilmiş ancak hiçbir zaman çıkarılmamışsa kaynak alandır. Alternatif olarak, kullanıcı başka bir CBS tabanlı yaklaşımla oluşturulmuş kaynak alanları doğrudan modele dahil ederek aktarabilir. Kaynak alan hücrelerinin duyarlılık değeri varsayılan olarak, numerik karşılığı 1’e eşittir. Bununla birlikte, kullanıcı kaynak alan hücrelerini karakterize etmek için duyarlılık veya frekans değerlerinden oluşan bir mekânsal grid de atayabilir (Michoud vd., 2012). Takahashi'ye (1981) ve Rickenmann ve Zimmermann (1993) göre; bir moloz akmasının başlaması için üç kriter önemlidir: çalışma alanına konu olan yamacın topoğrafik eğimi, su içeriği ve sediman girdisi.

Moloz akmalarının çoğu 15°'den daha yüksek eğime sahip arazilerde meydana gelmektedir (Takahashi, 1981; Rickenmann ve Zimmermann, 1993). Genelde bu değer, alt başlangıç eşiği olarak kabul edilir ve topoğrafik plan yamaç eğriselliğine göre içbükeylik oranı (eksi değerlerle ifade edilen eğrisellik değerleri), DEM çözünürlüğünün yeterli olması koşuluyla (Delmonaco vd., 2003; Wieczorek vd., 1997) kanalları tanımlamak için kullanılmaktadır. Böylece moloz akmalarına kaynaklık edecek aday alanlarının tanımlanması gerçekleştirilebilmektedir.



Şekil 3.4 : Kaynak alanların değerlendirilmesi için çeşitli veri setlerinin kombinasyonunun gösterimi (Horton vd., 2013'ten Türkçeleştirilerek).

Su içeriği, dağıtılmış hidrolojik modellerde sıklıkla yapıldığı gibi su toplama alanı (akım birikimi) ile temsil edilebilir (Tarboton, 1997). Literatür, başlangıç için minimum su toplama alanı konusunda farklılık göstermektedir. Çeşitli vaka çalışmalarında 0,01 km²'lik bir eşiğin makul bir değer olduğu gözlemlenmiştir. Rickenmann ve Zimmermann'ın (1993) İsviçre'deki olağanüstü 1987 olayı ve Heinimann'ın (1998) çalışmaları bir araya getirilerek, nadir olaylar ve ekstrem olaylar olmak üzere, moloz akması için kaynak alan eşikleri tanımlayan iki eğri (Şekil 3.5) belirlenmiştir (Horton vd., 2008). Bu çalışmalarda, moloz akmalarında su ile birlikte moloz malzemesinin harekete geçmesi için en az 0.01 km²'lik su toplama alanı minimum eşik olarak belirlenmiştir. Nadir olaylar için eşik Denklem (3.1)'de ve ekstrem olaylar için eşik Denklem (3.2)'de verilmiştir:



Şekil 3.5 : Nadir ve ekstrem olaylar için moloz akmasının başlaması için kanal eğimleri ve su toplama alanı eşikleri. Horton ve diğerleri (2008), Heinimann (1998) ve Rickenmann ve Zimmermann'dan (1993) sonra.

$$\begin{aligned} \tan \beta_{\text{lim}} &= 0.32 S_{\text{ua}}^{-0.2} & \text{eğer} & S_{\text{ua}} < 2.5 \text{ km}^2 \\ \tan \beta_{\text{lim}} &= 0.26 & \text{eğer} & S_{\text{ua}} \geq 2.5 \text{ km}^2 \end{aligned} \quad (3.1.)$$

$$\begin{aligned} \tan \beta_{\text{lim}} &= 0.31 S_{\text{ua}}^{-0.15} & \text{eğer} & S_{\text{ua}} < 2.5 \text{ km}^2 \\ \tan \beta_{\text{lim}} &= 0.26 & \text{eğer} & S_{\text{ua}} \geq 2.5 \text{ km}^2 \end{aligned} \quad (3.2.)$$

burada; $\tan \beta_{\text{lim}}$: eğim eşiği, S_{ua} : su toplama alanının yüzeyidir. Kullanıcılar, yöntemi diğer konumlara göre özelleştirmek için bu ilişkileri değiştirebilir. Bu tez çalışmasında ekstrem olay eşiği formülleri izlenmiştir.

Plan yamaç eğriselliği, arazideki kanalın iç bükey eşiğini tanımlamak için kullanılsa da literatürde kabul görmüş bir eşik yoktur. Genel olarak 10 m yersel çözünürlüğe sahip bir Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) için -2/100 m-1 değerinde optimum değer tanımlanmıştır (Horton vd., 2008). Bu eşiğin değeri, moloz akmalarının konumuna ve türüne göre değişiklik göstermektedir. Bu tez çalışması kapsamında Barla Dağı'nın kuzey yamaçları boyunca belirlenen alanda Harita Genel Müdürlüğü'nden (HGM) temin edilen 5 m yersel çözünürlüğe sahip SYM verileri kullanılacaktır.

3.3 Moloz Akmalarının Erişim Mesafesinin ve Yayılma Alanının Modellenmesi

Moloz yayılma alanlarının belirlenebilmesi ve erişim mesafesinin modellenmesi, bir önceki bölümde topoğrafik, litolojik ve arazi kullanımı parametreleri ile sağlanan moloz kaynak alanları kullanılarak tek bir aşamada olası olayın mekansal değerlendirmesini kapsar. Moloz malzemesinin kaynak alandan başlayarak ulaşabileceği maksimum erişim mesafesini ifade eden yayılma alanının modellenmesi iki tip algoritmayı içerir:

- 1.) Moloz akmasının akışını başlatan ve akım doğrultusunu tanımlayan algoritmalar
- 2.) Erişim mesafesini belirleyen sürtünme yasaları

3.3.1 Akım yönü algoritmaları

Moloz akmasına ilişkin malzemenin yayılması, akış yönü algoritmaları ve süreklilik fonksiyonları tarafından kontrol edilir. Modelde çeşitli akış yönü algoritmaları uygulanmaktadır, ancak bunların hepsi moloz akması modellemesi için uygun değildir. Örneğin neredeyse kanıksanmış ve bu çalışmada olduğu gibi bütün çalışmalardan kullanılan Holmgren (1994) algoritması, çoklu akış yönü algoritmasına, sapmanın kontrol edilmesini sağlayan bir üssel parametre (“x”) ekler (3.3):

$$p_i^{fd} = \frac{(\tan \beta_i)^x}{\sum_{j=1}^8 (\tan \beta_j)^x} \vee \begin{cases} \tan \beta > 0 \\ x \in [1; +\infty[\end{cases} \quad (3.3)$$

Burada $i: j$ akış yönleri, p_i^{fd} : i yönündeki duyarlılık oranı, $\tan \beta_i$: merkezi hücre ile i yönündeki hücre arasındaki eğim gradyanı, x : değişken üsteldir. Bu fonksiyonda x üzerinde değer ne kadar yüksek olursa, akış modeli o kadar dar ve örtüşük hale gelecektir. $x = 1$ olduğunda çoklu yönlü akış gerçekleşirken, “ x ” arttığında akış yönündeki sapma azalır, $x \rightarrow \infty$ olduğunda tek yönlü dağılıma doğru dönüşecek şekilde azalır. Holmgren (1994), yüksek doğruluk ve aykırı değerlerin sınırlandırılması açısından 4-6 aralığındaki “ x ” değerlerinin optimum olduğunu göstermiştir. Bu çalışmada moloz akmaları için saha gözlemleri ve laboratuvar test sonuçlarında önerilen “ $x=4$ ” değeri kullanılmıştır. Moloz akmalarının duyarlılık değerlendirmesi için, Holmgren'in algoritması veya onun modifiye edilmiş versiyonu, diğer akış yönü

algoritmalarının çoğunun yeniden üretilmesine izin verdiği için herhangi bir konum için seçilmelidir. Ayrıca, yayılmanın parameterizasyonuna izin veren tek algoritmadır. Merkezi hücrenin yüksekliğini bir dh faktörü ile değiştirerek Holmgren'in algoritmasının modifiye edilmiş bir versiyonu Horton vd., (2013) tarafından geliştirilmiştir. Bu modifiye edilmiş versiyon özellikle akmaya ilişkin gradyan değerlerini değiştirmektedir. Bu yönüyle modifikasyon, yayılmanın SYM detaylarına göre değil genel topoğrafyaya göre yönlendirilmesine izin vererek, SYM pürüzlülüğünün yumuşatılmasına ve yayılmanın daha tutarlı üretilmesine olanak tanımaktadır.

Topoğrafyanın akış yönü üzerindeki etkisinin yanı sıra, moloz akmalarının sürekliliği veya eylemsizliği (atalet) de dikkate alınmalıdır. Gamma (2000) tarafından yapılan çalışmaya göre, önceki akış yönü ile dahil edilen açı ve akış yönü ağırlığı arasında fonksiyonel bir ilişki (eylemsizlik fonksiyonu) bulunmaktadır (3.4).

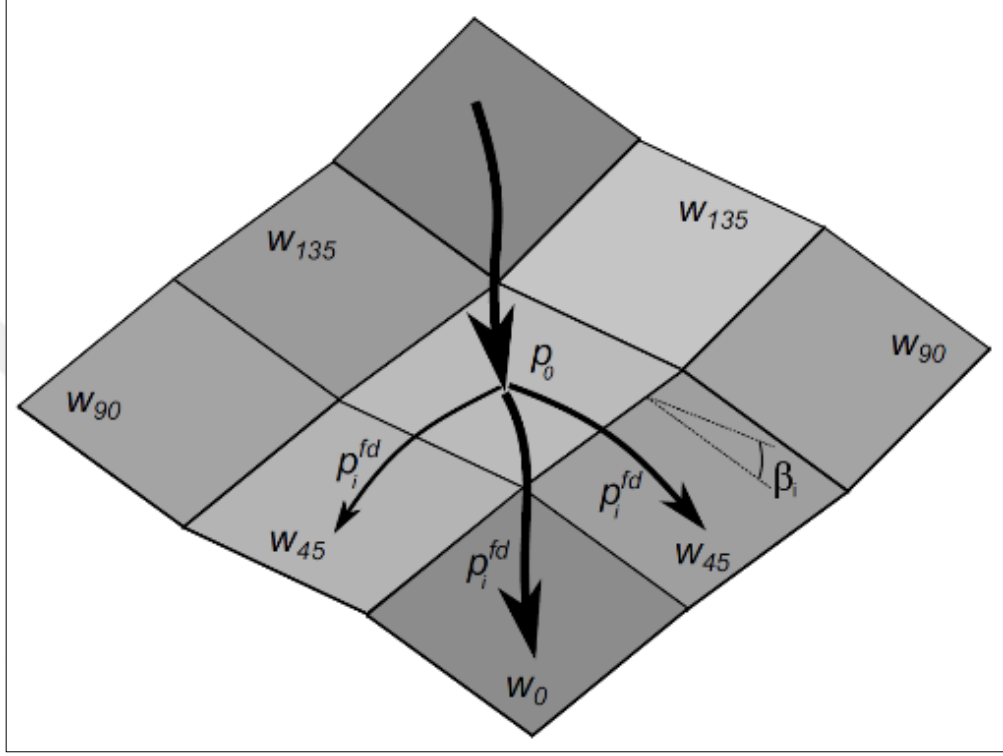
$$\begin{array}{ll}
 p_i^p = w_0 & \text{if } a_i = 0^\circ \\
 p_i^p = w_{45} & \text{if } a_i = 45^\circ \\
 p_i^p = w_{90} & \text{if } a_i = 90^\circ \\
 p_i^p = w_{135} & \text{if } a_i = 90^\circ \\
 p_i^p = 0 & \text{if } a_i = 180^\circ
 \end{array}
 \tag{3.4}$$

Burada i akış yönlerini temsil eder; p_i^p akış yönü ağırlığıdır; a_i önceki akış yönü ile merkezi hücreden i hücresine olan yön arasındaki dahil edilen açıdır ve $w_{0,45,90,135}$ ilgili yönün akış yönü ağırlığıdır. Her eylemsizlik dağılımında, geriye doğru yayılmayı önlemek ve hesaplama süresinden tasarruf etmek için akış yönünün karşısındaki hücre sıfırlanır ($w_{180} = 0$). Holmgren algoritması (3.3) ve eylemsizlik fonksiyonu (3.4) üst üste bindirildiğinde moloz akması ilerlemesinin hesaplama formülü (3.5) elde edilir:

$$\rho_i = \frac{\rho_i^{fd} \rho_i^p}{\sum_{j=1}^8 \rho_i^{fd} \rho_i^p} \rho_0
 \tag{3.5}$$

Burada i ve j akış yönleridir; p_i i yönündeki toplam başlatma olasılığıdır; p_i^{fd} akış yönü algoritmalarından hesaplanan i yönündeki başlatma olasılığıdır; p_i^p eylemsizlik fonksiyonları tarafından verilen akış yönü ağırlığıdır; ve p_0 merkezi hücrenin önceden belirlenmiş olasılık değeridir. Moloz akma ilerleme algoritması her seferinde bir

kaynak alanı (bir hücre veya bunların bağlı olduğu bir hücre dizini) dikkate alır ve bunu aktif hücreler listesine aktarır. Veri matrisindeki bu listeden, algoritma her seferinde bir hücre seçer ve bunu kullanıcı tarafından seçilen algoritmalara göre yayar (Şekil 3.6). Bu, aktif hücreler listesine eklenen yeni moloz ilerleme hücreleriyle sonuçlanır.



Şekil 3.6 : Duyarlılık değerinin komşu hücrelere yayılmasının gösterimi (Horton vd., 2013).

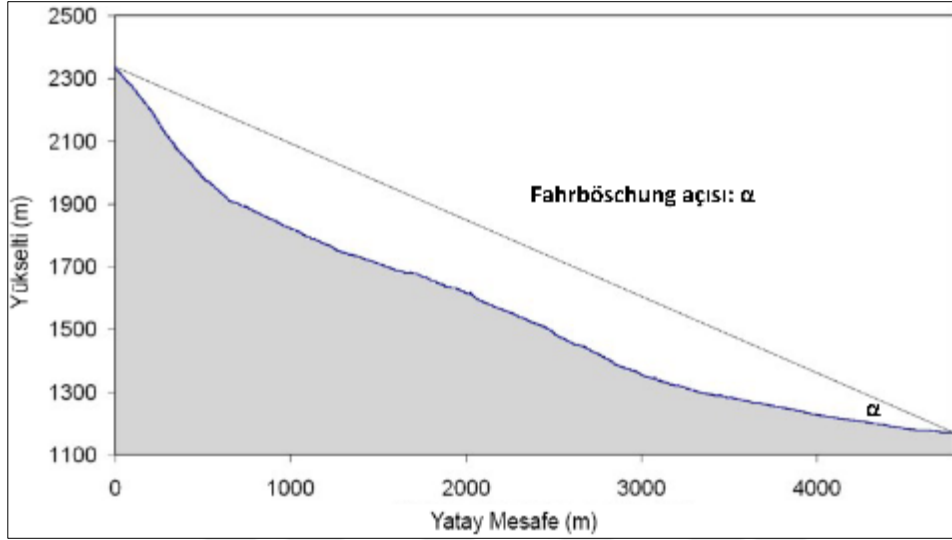
3.3.2 Erişim mesafesi algoritmaları

Ampirik yaklaşımla analiz edilen bu modelde moloz akmasının hacminin hesaba katılmadığı önceki bölümlerde belirtilmiştir. Bu nedenle, kütle hesaba katılmadığından enerjinin korunumu yasasına dayanan bir akma mesafesi yöntemi tercih edilmiştir (3.6):

$$E_{kin}^i = E_{kin}^{i-1} + \Delta E_{pot}^i - E_{loss}^i \quad (3.6)$$

Burada E_{kin}^i , hücrenin i yönündeki kinetik enerjisidir; ΔE_{pot}^i , hücrenin i yönündeki potansiyel enerjisindeki değişimdir; ve E_{loss}^i , i yönündeki hücre ile sürtünmeye bağlı enerji kaybıdır.

Basitleştirilmiş sürtünme-sınırlı model, erişim açısı (Corominas, 1996) veya Fahrböschung açısı (Heim,1932) olarak da adlandırılan minimum hareket açısı ile karakterize edilen, mümkün olan maksimum akma mesafesine dayanmaktadır (Şekil 3.7).



Şekil 3.7 : Maksimum akma mesafesine tanımlamak için modele tanımlanan erişim açısı diagramı.

Bu açı, kaynak alanını moloz akmasının yolu boyunca ulaştığı en uzak noktaya bağlayan çizginin açısıdır (3.7):

$$E_i^f = g\Delta x \tan\phi \quad (3.7)$$

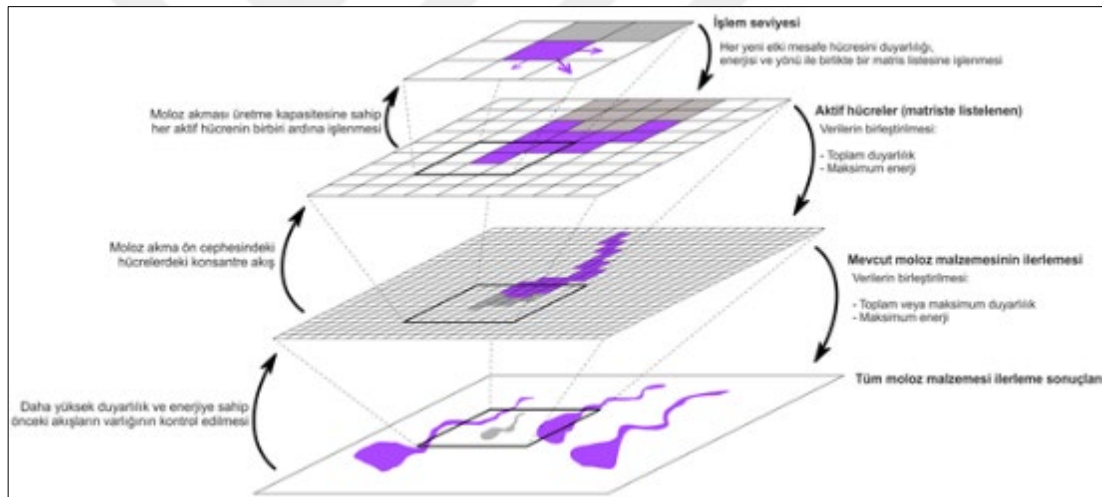
Burada E_i^f merkezi hücreden i yönündeki hücreye sürtünmeyle kaybedilen enerji, Δx yatay yer değiştirme artışı, $\tan\phi$ enerji çizgisinin eğimi ve g yerçekiminden kaynaklanan ivmedir. İsviçre Alpleri'ndeki bir dizi gözlem arasında minimum açı, kaba ve orta taneli moloz akmaları için yaklaşık 11° ve ince taneli akmalar için 7° 'dir (Zimmermann vd., 1997). Farklı çalışmalarda 11° değerinden bahsedilmesinin (Rickenmann ve Zimmermann, 1993; Bathurst vd., 1997; Huggel vd., 2002) yanı sıra, bu yaklaşım, yayılma sırasında ulaşılan gerçekçi olmayan enerji miktarları nedeniyle dik havzalarda olağanüstü akım mesafelerine neden olabilir. Enerjiyi makul bir sayısal aralıkta tutmak için, gerçekçi hızların aşılmasını sağlamak amacıyla bir maksimum eşik getirilebilir. Bu yönüyle hıza ilişkin denklem (3.8);

$$V_i = \min \left\{ \sqrt{V_0^2 + 2g\Delta h - 2g\Delta x \tan \phi}, V_{\max} \right\}$$

(3.8)

burada Δ merkezi hücre ile i yönündeki hücre arasındaki yükseklik farkı, $V_{\max}$ verilen hız sınırıdır.

İsviçre'deki moloz akmalarının gözlemlenen maksimum hızı 13 m/s ila 14 m/s olduğundan (Rickenmann ve Zimmermann, 1993), genellikle 15 m/s'lik bir sınır seçilmektedir. Bu çalışmada 6° - 14° arasındaki Fahrböschung açı değerleri ile 15 m/s ve 17 m/s hız eşikleri seçilmiştir. Moloz yayılma rutini her seferinde bir kaynak alanı (bir hücre veya bunlara bağlı bir grubu) dikkate alır ve bunu aktif hücreler listesine aktarır. Veri matrisindeki liste boş olduğunda, mevcut moloz ilerlemesi sona erer ve hepsi işlenene kadar bir sonraki kaynak alanı seçilerek rutin işlem devam eder. Şekil 3.8'te basitleştirilmiş bir şekilde gösterildiği gibi moloz malzemesine ilişkin ilerleme model yordamının gerçekleştirilmesi dört farklı matristen oluşan adıma dayanmaktadır.



Şekil 3.8 : Moloz akmasına ilişkin ilerleme algoritmasının dört farklı matris hiyerarşisindeki çalışma döngüsü (Horton vd., 2013'ten yararlanılarak oluşturulmuştur).



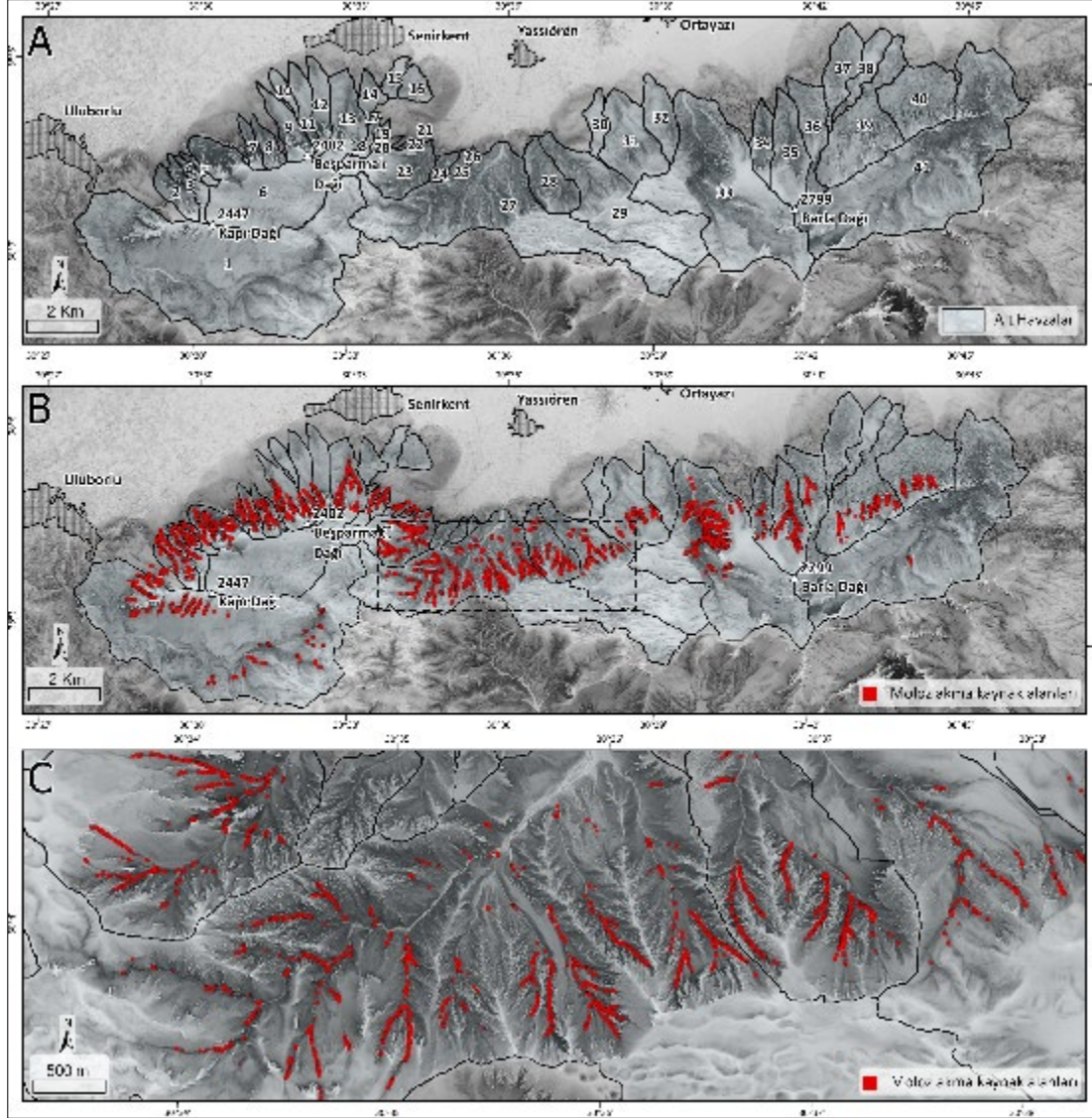
4. BULGULAR

4.1 Moloz Akma Kaynak Alanlarının Dağılımı

Barla Dağı Kuşağı'nın kuzey yamaçları boyunca çalışma alanı olarak seçilen 41 havzanın 29'unda moloz akma kaynak alanları Bölüm 3.2'deki yöntemle tespit edilmiştir (Şekil 4.1). Geçmiş yıllara ait hava fotoğraflarının ve Bölüm 3.2'deki topoğrafik parametrelerin analizleri sonucunda 12 havzadan (B10, B14, B15, B16, B17, B24, B25, B26, B30, B32, B37, B38) kaynak alanları çıkarılmıştır. Belirlenen 12887 adet kaynak alan hücresi, çalışma sahasında 0.32175 km²'lik bir alan kaplamaktadır. Senirkent yerleşiminin üzerinde kurulduğu fan-havza sisteminin de içinde bulunduğu 5 alt havzada (B13, B28, B29, B35, B36) kaynak alanlarının yoğunluğu diğer 24 havzadan daha yüksektir. Geçmişe ait hava fotoğraflarında bu 5 havzanın moloz akma etkinliği doğrulanmıştır (Şekil 4.2). Kaynak alan yoğunluğunun en düşük (0-0,006 km²) olarak gözlemlenen 16 havza (B3, B5, B10, B11, B14, B15, B16, B24, B25, B26, B30, B32, B37, B38 numaralı havzalar), geçmiş yıllara ait hava fotoğraflarının ve Bölüm 3.2'deki topoğrafik parametrelerin analizleri sonucunda çıkarılan 12 havzayı içermektedir. Arazi gözlemleri ve hava fotoğrafları gözlemleri sonucunda, kaynak alanı bulunan ancak kaynak alan yoğunluğu en düşük olan B3, B5, B11 ve B22 havzaların kolüvyal süreçlerin hakim olduğu moloz akma havzaları olduğu tespit edilmiştir.

Yamaçlarda veya kanalda başlama olasılığına sahip her moloz akması için en önemli hazırlayıcı faktörlerden biri eğim değerleridir. Akmayı sağlayan suyun moloz malzemesini harekete geçirmesi için uygun eğim koşulları sağlanmalıdır (Takahashi, 1981). Bu çalışmada tanımlanan kaynak alanları çoğunlukla 35°-45° eğim değerleri aralığında bulunmaktadır (Şekil 4.3a). Bölüm 3.2'de bahsedildiği üzere Rickenmann and Zimmermann (1993)'nın minimum eşik 15° eğim değeri bu çalışmada kullanılmıştır (Şekil 4.3a). Flow-R modelinde kanalları tanımlama amacıyla bu çalışmada analiz edilen yamaç eğriselliği, 5 m yersel çözünürlüklü Sayısal Yükselti Modeli için minimum eşik -2/100 m⁻¹ olarak belirlenmiştir. Şekil 4.3b'de gösterildiği

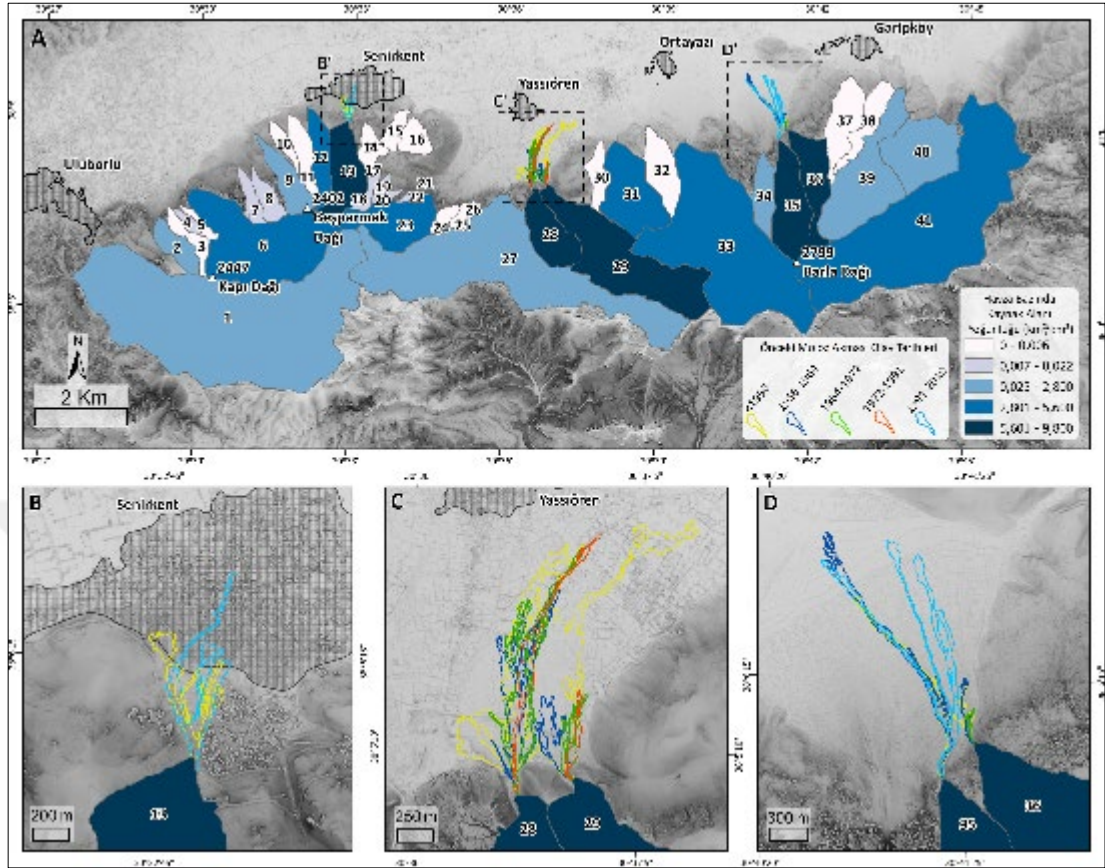
gibi kaynak alanların %65'i yamaçtaki iç bükeyliliğinin $-6/100 \text{ m}^{-1}$ 'dan daha az olduğu alanlarda yer almaktadır. Bu değer, kaynak alanların yamaçlardaki iç bükeylilik değeri olarak ifade edilen zemindeki pürüzlülüğün yüksek olduğu alanlarda yer aldığını göstermektedir.



Şekil 4.1 : Alt Havzalar (A). Moloz akma kaynak alan hücrelerinin çalışma alanındaki dağılımı (B). Kaynak alanlarının detaylı gösterimi (C).

Modelde su girdisini temsil eden parametre, akım birikim alanı ile eğim değerlerinin üstel fonksiyonuyla sağlanan değerleridir. Akım birikim alanı bir hücredeki toplam su toplama alanını ifade eder. Bölüm 3.2’de değinildiği üzere geçmişte gerçekleşen moloz akma olaylarının gözlemlenerek ortaya konulan iki farklı yaklaşım bulunmaktadır (Rickenmann ve Zimmermann, 1993; Heiniman, 1998). Şekil 4.3c’de

gösterildiği üzere 0,01 km²'den daha az akım birikim alanına sahip kaynak alanları bu çalışmadan hariç tutulmuştur.

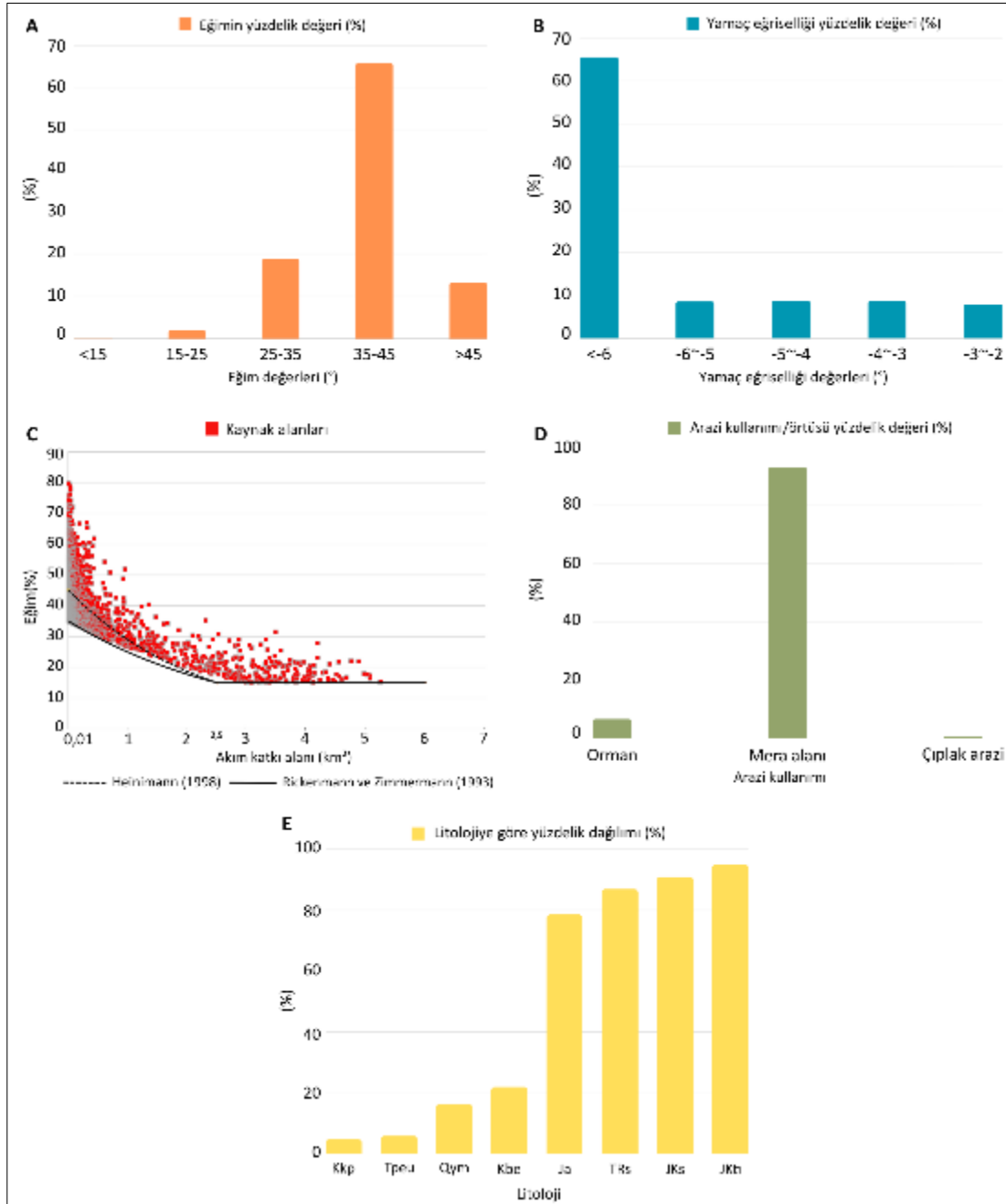


Şekil 4.2 : Kaynak alanların havza bazındaki yoğunluğu (A). Geçmiş dönemlere ait hava fotoğraflarından haritalanan moloz akmaları (B, C, D). Sarı poligon 1956'ya kadar olan moloz akma izlerini; 1956-1964 yılları arasındakileri koyu mavi; 1964-1972 yılları arasındakiler yeşil; 1972-1991 yılları arasındakiler turuncu; 1991-2010 yılları arasındaki moloz akma izleri açık mavi poligon ile gösterilmiştir.

Ekstrem olay eğrisine göre 0,01 km²'de minimum eğim 35° olmak üzere; 2,5 km² ve daha büyük alanda, 15° eğim değerine üstel bir fonksiyon kullanılarak minimum eşik değeri elde edilmiştir ve bu değerlerin altında kalan kaynak alanlar modele dahil edilmemiştir.

Bu çalışmada arazi örtüsü, Karra (2021)'in sınıflandırmasına göre ekseriyetle mera alanlarından, çıplak arazilerden ve ormanlık alanlardan oluşmaktadır (Şekil 4.3d). Arazide çoğunlukla gözlemlenen kireçtaşının fiziksel ayrışması açısından elverişli olan çıplak arazi örtüsü modele dahil edilmiştir. Çalışma alanının özellikle doğusunda yer alan sedir ormanlarının hemen üst kotlarında bulunan kaynak alanları, mevcut ormanın, moloz akmasının başlamasına veya ilerlemesine engel olma olasılığına rağmen modelden çıkarılmamıştır. Bunun nedeni; (i) geçmişteki moloz akma

aktivitesinin doğrulaması aşamasında hava fotoğraflarında ormanın yoğun olmadığı ve moloz akmalarının tespit edilmesi; (ii) orman varlığına rağmen modelin performansının test edilmesidir.



Şekil 4.3 : Barla Dağı Kuşağı'nın kuzey yamaçları boyunca tanımlanan 12887 kaynak alanının istatistikleri. Eğim (A). Yamaç eğriselliği (B). Akım katkı alanı ile eğim değerlerinin korelasyonu ve bu çalışmadaki kaynak alanları (C). Arazi örtüsü/kullanımı (D). Litoloji (E). Burada JKt: Çörtlü kireçtaşı ve kalsitürbidit, JKs: Pelajik kireçtaşı ara tabakalı oolitik kireçtaşı, TRs: Dolomit, Ja: Algli kireçtaşı, Kbe: Çörtlü kireçtaşı, Qym: Yamaç molozu ve birikinti konileri, Tpeu: Fliş, Kkp: Kalsitürbidit ve çörtlü kireçtaşını temsil etmektedir (MTA, 2011).

Arazi gözlemleri sonucunda moloz akma malzemesinin ana kaynağının Barla Dağı'nın yoğun olarak fiziksel ayrışmaya maruz kalan kireçtaşları olduğu tespit edilmiştir. Kaynak alanların %94,4'ü sahanın hakim litolojisi olan Mesozoik yaşlı kireçtaşları üzerinde; %4,1'i Şekil 2.2' haritada yamaç molozu ve birikinti konileri ile temsil edilen yamaçlarda ve kanallarda biriken Kuvaterner birimleri olan moloz malzemesi üzerinde; %1,5'i ise Üst Paleosen-Eosen yaşlı flišler üzerinde yer almaktadır (Şekil 4.3e).

4.2 Moloz Akması Mekansal Olasılık Haritası

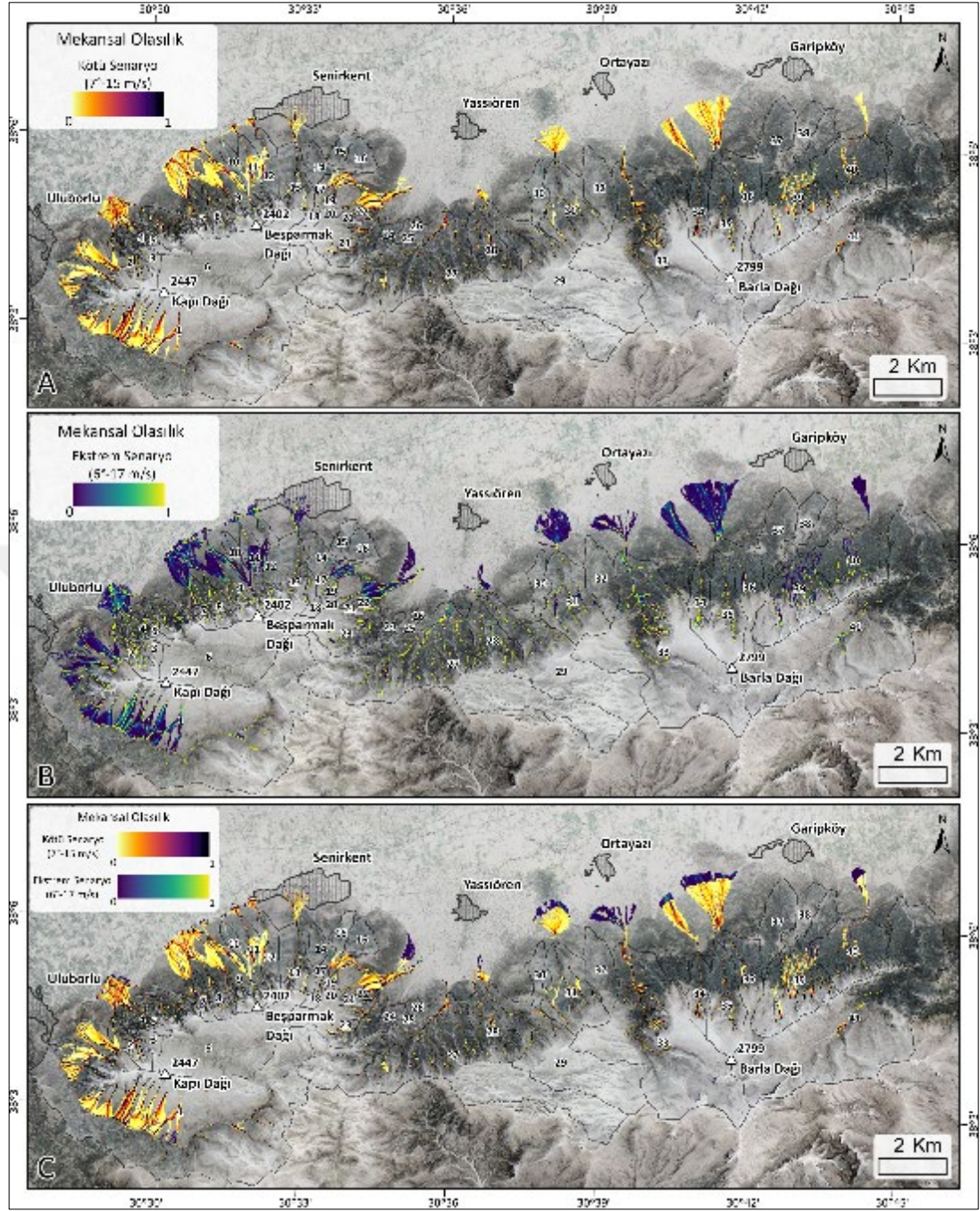
Bölgesel ölçekte moloz akması duyarlılığını hesaplamak için ampirik bir model olan Flow-R kullanılmıştır. Matlab® tabanında çalışan Flow-R modelinde moloz akmasının mekansal olasılığını hesaplamak için maksimum erişim mesafesini (Fahrböschung açısı ile) ve maksimum hız değerlerini tespit etmek gerekir. Fahrböschung açısı değerleri azaldıkça erişim mesafesi artmaktadır. Daha büyük boyutlardaki moloz akmalarını temsil etmek için daha düşük Fahrböschung açısı değerleri kullanmak gerekmektedir. İtalya, İsviçre, Fransa, ve Çin'de yapılan önceki çalışmalar, mevcut moloz akmalarını göz önüne alarak erişim açısı değerlerinin genellikle 5°-15° aralığında olduğunu göstermiştir (Blahut vd., 2010; Kappes vd., 2011; Horton vd., 2013; Pastorello vd., 2017; Giano vd., 2021). İnceleme alanında yürütülen modeller 6°-14° arasındaki maksimum erişim açısı ile 15 m/s - 17 m/s arasındaki maksimum hız değerleriyle gerçekleştirilmiştir. Bu değerler arasındaki en uygun kötü senaryo ve ekstrem durum senaryoları, daha önce gerçekleşmiş moloz akmalarının geriye dönük analizleri ile yayılma alanlarına göre belirlenmeye çalışılmıştır.

4.2.1 Flow-R ekstrem durum senaryoları

En doğru model senaryosunu geriye dönük analizlerle belirlemek için her havzadaki moloz akma etkinliğinin bilinmesi gerekmektedir. Ancak mevcut hava fotoğraflarının her havzadaki mevcudiyet durumu, zamansal ve yersel çözünürlüğü, havzalara özgün analiz için yeterli olmadığından bu çalışmada bölgesel ölçekte bir değerlendirme sunulmuştur. Bu değerlendirme sonucunda 7°-15 m/s model çıktısı kötü durum senaryosu; 6°-17 m/s model çıktısı ekstrem senaryo olarak belirlenmiştir (Şekil 4.4). Bu senaryolar, önceki bilinen moloz akması yayılımlarının tespit edildiği moloz

konilerinden, yukarıda bahsedilen neden ötürü tespit edilmesi mümkün olmayan moloz konilerine enterpole edilerek değerlendirilmiştir. Kötü durum ve ekstrem senaryolarının belirlenmesindeki geriye dönük analizler sonraki bölümlerde tartışılmıştır. Modelin sonuçları her hücre için 0-1 değeri arasında potansiyel bir moloz akmasının hareketinde hücre olasılığına dayanmaktadır. Kötü senaryoda sarı hücreler düşük, koyu kırmızı ve siyah hücreler yüksek olasılığı temsil etmektedir. Ekstrem senaryoda sarı-yeşil hücreler yüksek olasılığı, koyu mavi-lacivert hücreler düşük olasılığı temsil etmektedir.





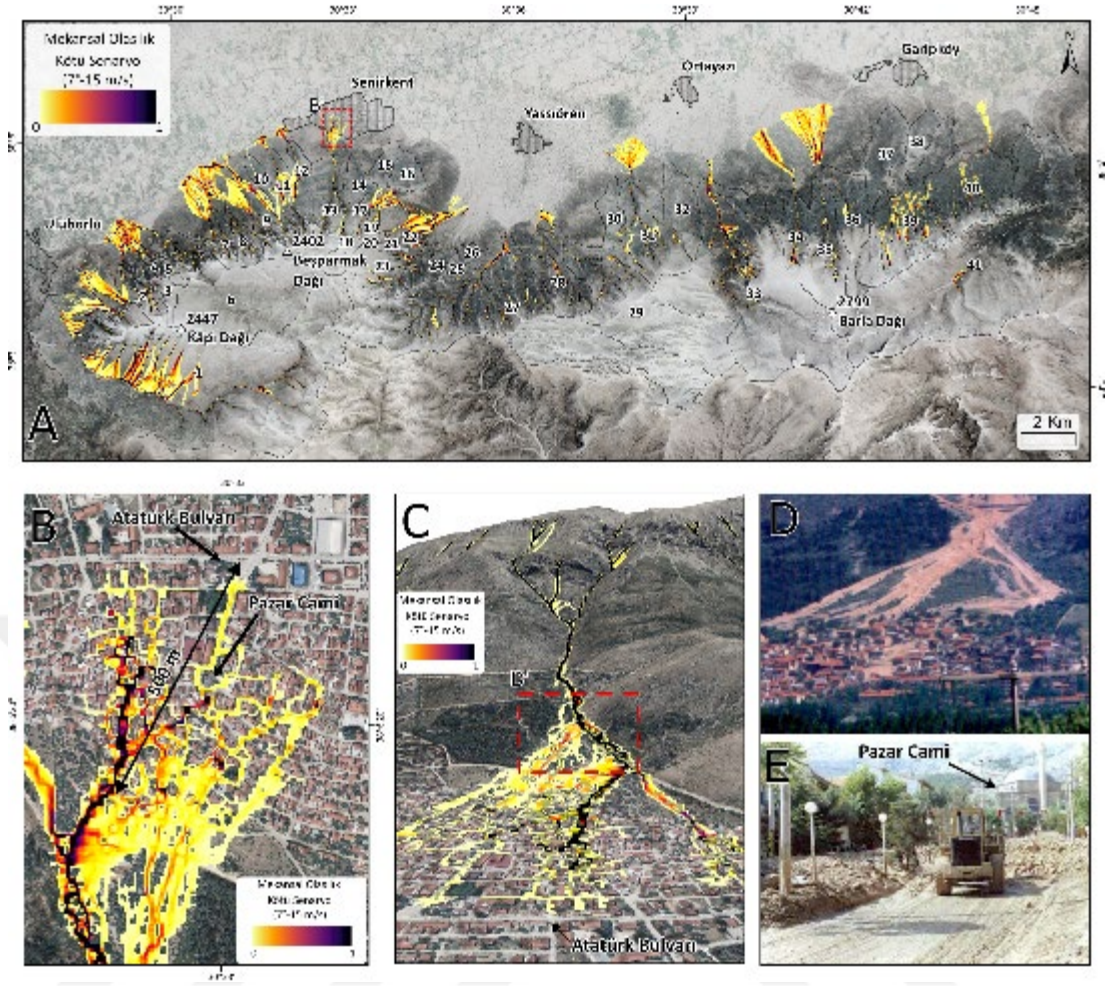
Şekil 4.4 : Flow-R modeli farklı durumları senaryolarının haritası. A, kötü senaryoyu; B, ekstrem senaryoyu; C iki senaryonun üst üste bindirilerek karşılaştırmalı haritayı göstermektedir.

4.2.1.1 Kötü durum senaryosu

Geriye dönük analizlerin yapılmasında, Senirkent'te gerçekleşen moloz akması olaylarından sonra ortaya konulan raporlardan da faydalanılmıştır. 13 Temmuz 1995'te Senirkent'te gerçekleşen moloz akması afetinden sonra dönemin Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanan "Senirkent Çamur Çıgı Etüd Raporu" isimli raporundaki gözlemlerin, 7°-15 m/s değerlerindeki model çıktısı

ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Rapora göre akım birikiminin 2250 m yükseltilerde başladığı tahmin edilmiş, 1950-1150 m seviyelerinde moloz akmasına dönüşerek gelişimini sürdürdüğü ve 1020 m seviyelerinde Senirkent'in Beşparmak Dağı'na doğru yamaçlarda kurulmuş evlere çarptıktan 500 m sonra şehrin içinde ilerleyerek 950 m yükseltilerde hareketin sonlandığı rapor edilmiştir. Ayrıca raporda akma hızının 50 km/s olduğu tahmin edildiği belirtilmiştir. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Jeoloji Etütleri Dairesi Başkanlığı'nca 18 ve 19 Temmuz 1996 tarihlerinde gerçekleşen moloz akmalarına dair hazırlanan raporda, moloz akmasının Hıdır Çelebi (Pazar) Camii civarında birikim gösterdiği buradan devam ederek Atatürk Bulvarı'na kadar ulaştığı belirtilmiştir (Toprak, 1996). Bu gözlemlerle uyumlu kötü durum senaryosunu temsil eden Flow-R modeli şekil 4.5'te gösterilmiştir.

Modelde maksimum erişim mesafesi, raporda belirtildiği gibi, yerleşimin en st kesimde evlere çarptıktan 500 m sonra hareketin sonlandığı Atatürk Bulvarı'dır (şekil 4.4b). Akmanın moloz kanalından çıkıp birçok farklı yöne ayrıldığı hareket şekil 4.4c ve şekil 4.4d karşılaştırmada gözlemlenmiştir. Pazar Cami civarında moloz birikimlerinin olduğu raporda belirtilmiştir (şekil 4.4e). Bu moloz birikimleri, iki nokta şeklinde olasılığın yoğunlaştığı alanlar, şekil 4.4b'te gösterilmiştir.

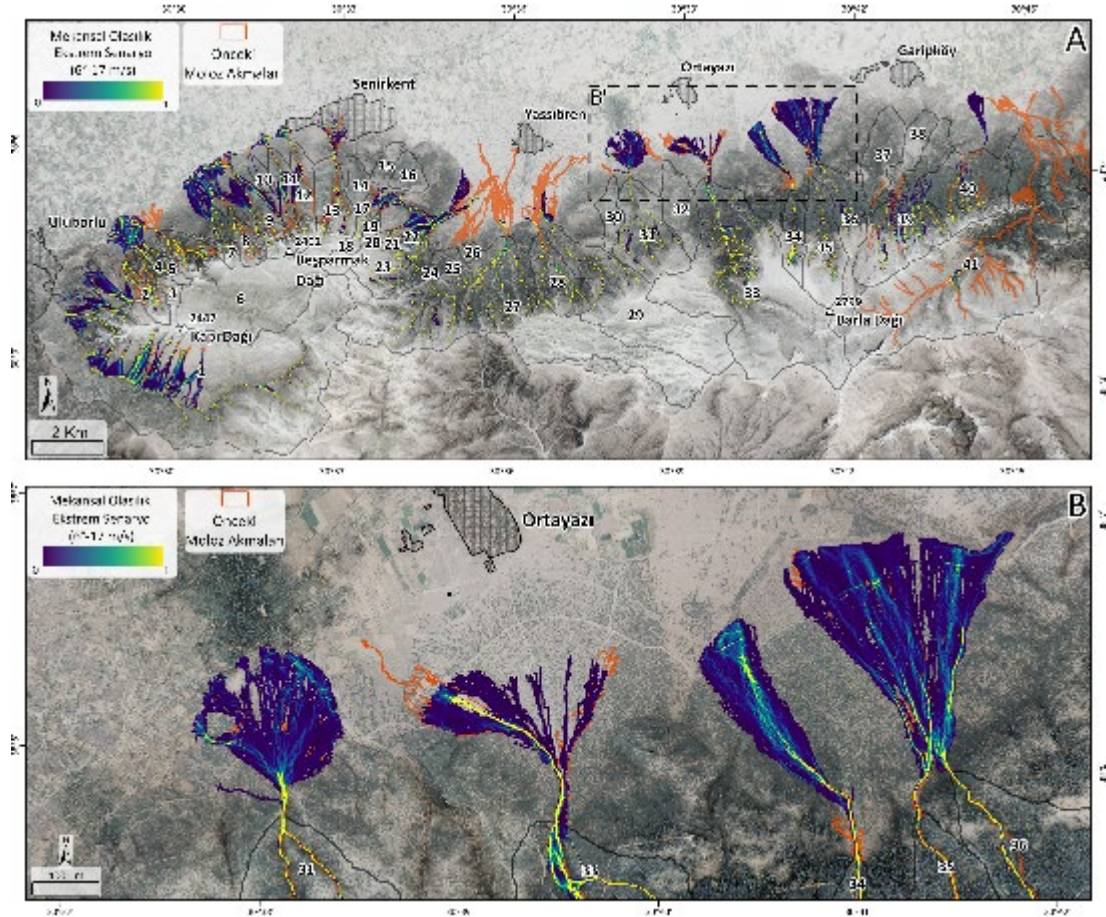


Şekil 4.5 : Kötü durum senaryosu olarak değerlendirilen Flow-R modelinin bölgesel ölçekteki haritası (A). Senirkent'teki 7° erişim açısı ve 15 m/s maksimum hız değerleriyle simüle edilen moloz akması mekansal duyarlılık haritası (B), modelin üç boyutlu gösterimi (C). 1996 yılında Senirkent'te gerçekleşen moloz akması olayı (D) ve Pazar Cami civarındaki moloz birikimi (E).

4.2.1.2 Ekstrem durum senaryosu

Flow-R modeli ile yalnızca ilksel moloz akma alanını hesaplayarak mekansal duyarlılık haritası elde edilmektedir. Yapılan analizde maksimum erişim mesafesi çoğunlukla daha önce gerçekleşmiş moloz akmalarının alanlarından küçüktür (Jiang vd., 2021). Birçok moloz konisinde, 1995-1996 Senirkent moloz akmalarına göre kötü durum senaryosu olarak ele alınan 7°-15 m/s değerlerinde bu durum gözlemlenmiştir. Bu nedenle hava fotoğraflarıyla desteklenen geriye dönük analizlerin yapıldığı önceki moloz akmalarının maksimum erişim mesafesi ekstrem moloz akma senaryosu olarak ele alınmıştır (Şekil 4.6). İki farklı modelin yayılma alanları arasında %28 oranında fark ortaya çıkmıştır. Yayılma alanları arasında en büyük fark, iki senaryonun karşılaştırmalı olarak gösterildiği haritada (Şekil 4.4c), B31, B33, B34, B35 ve B36

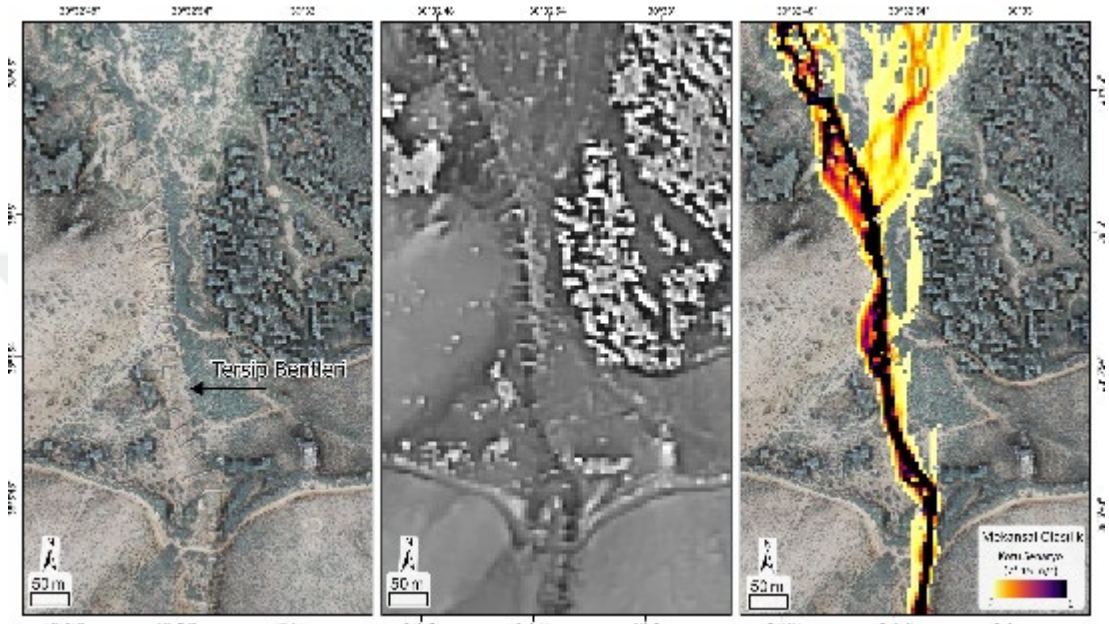
numaralı havzalara ait moloz konisinde dikkat çekmektedir. Bu nedenle ekstrem durum senaryosunun değerlendirilmesinde bu havzalara odaklanılmıştır. Bu havzalarda haritalanan önceki moloz akmalarına ait yayılma alanlarıyla karşılaştırıldığında 6°-17 m/s model çıktısı ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.6).



Şekil 4.6 : Ekstrem durum senaryosu olarak değerlendirilen Flow-R modelinin bölgesel ölçekteki haritası (A). Ortayazı yerleşiminin güneyindeki havzalara ait 6° erişim açısı ve 15 m/s maksimum hız değerleriyle simüle edilen moloz akması mekansal duyarlılık haritası (B). Turuncu poligonlar önceki moloz akmalarının tüm tarihlerdeki hava fotoğraflarıyla tespit yayılma alanlarını göstermektedir.

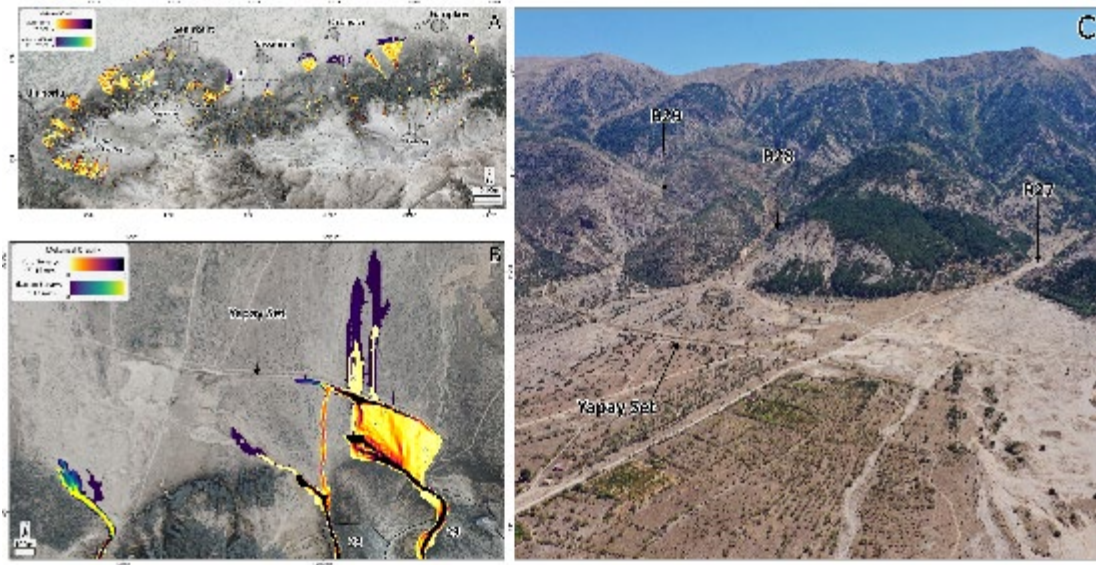
Bölgesel ölçekte gerçekleştirilen moloz akması duyarlılık analizlerinde, Flow-R modelinin küçük boyutlu insan yapılarını, duvarlarını veya engellerin etkilerini tam olarak hesaplaması güçtür (Jiang, 2021). Modelin yayılma alanlarıyla ilgili problemler genel olarak insan müdahalesinin olduğu havzalarda gözlemlenmiştir. Bu havzalar için her iki senaryoda moloz akması duyarlılık analizleri gerçekleştirilmesi için daha yüksek yersel çözünürlüğe sahip Sayısal Yükselti Modeline ihtiyaç duyulmaktadır. Örneğin tüm Flow-R modeli senaryolarında, Senirkent'teki moloz akma olaylarından

sonra önlem kapsamında yapılan tersip bentleri 5 m çözünürlüğe sahip Sayısal Yükselti Modeli'nde ihmal edilmiştir. Bu durumda model, moloz kanalında herhangi bir engelin olmadığını varsayarak ilerlemesini devam ettirmiş ve 1995-1996 moloz akması olaylarını simüle edebilmiştir (Şekil 4.7). Günümüzdeki durumu değerlendirmek için bu alanlarda daha yüksek yersel çözünürlüğe sahip Sayısal Yükselti Modeline ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 4.7 : Senirkent'in güneyindeki moloz kanalına yapılan tersip bentleri ve Flow-R modelinin yayılımını gösteren harita.

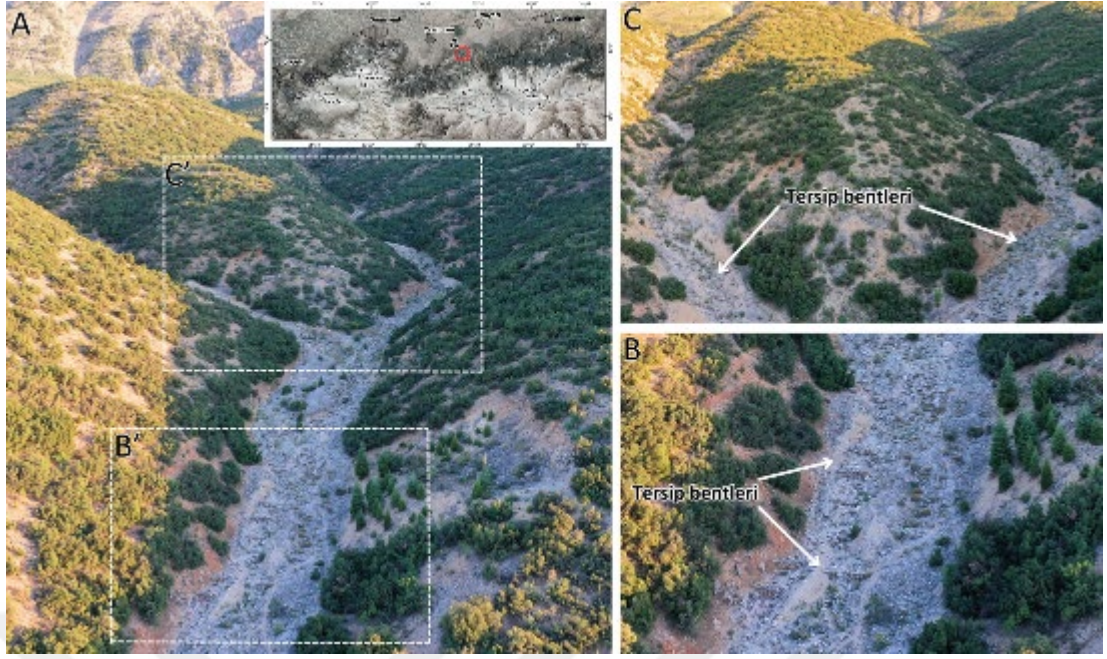
Modelin yayılma alanlarıyla ilgili kısıtlama problemlerinden bir diğeri Yassıören'in güneyinde bulunan B27, B28, B29 havzalarında olduğu gözlemlenmiştir. Bu havzalara ait moloz kanalının moloz konisine yayılma alanından itibaren modelin tüm senaryolarında mekansal olasılık değerleri üretilmediği gözlemlenmiştir (Şekil 4.8). Bunun nedeni kanal çıkışlarında moloz akması önlem çalışmaları kapsamında yapılan setler ve havuzlardır. Modele tanımladığımız 5 m yersel çözünürlüklü Sayısal Yükselti Modeli'nin sunduğu mekansal doğruluk dahilinde, bu setlerin ve havuzların kötü durum ve ekstrem senaryolarında moloz akmalarını önleme kapsamında başarılı olduğu gözlemlenmiştir. Ancak bu setlerin ve havuzların zaman içinde moloz malzemesiyle dolmaya başladığı arazi çalışmalarında tespit edilmiştir. Bu tip aktif önlem yapıların zaman içinde gelen sedimanla dolacağı gibi şiddetli bir tetikleyici yağış ile birlikte tek seferde dolarak işlevini yitirebileceği göz önünde bulundurulmalıdır (Hung, 2005).



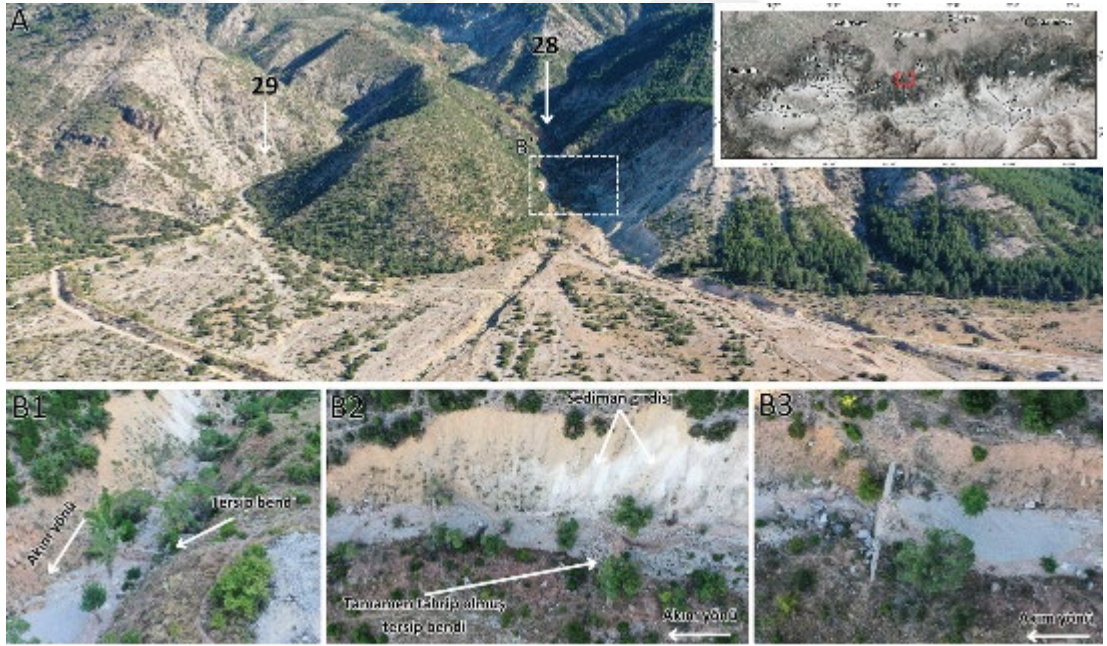
Şekil 4.8 : Kötü durum ve ekstrem senaryolarının gösterildiği moloz akması duyarlılık haritası (A). Yassıören'in güneydeki havzalara ait moloz akması modellerinin detaylı gösterimi (B). Moloz akması önlem çalışmaları kapsamında yapılan settin insansız hava aracı ile çekilmiş görüntüsü (C).

Model çıktısını etkileyebilecek insan yapısı engellerden bir diğeri kanal içlerine yapılan tersip bentleridir. Nitekim 41 havzanın 10'unda önlem çalışmaları kapsamında tersip bentleri inşa edilmiştir. 5 m yersel çözünürlükteki Sayısal Yükselti Modeli ile gerçekleştirilen model çıktısında tersip bentlerinin engel niteliği ihmal edilmiştir. Bentlerdeki havuzlar yamaçlarda ayrışarak biriken sediman ve gerçekleşmiş moloz akmalarının malzemesiyle dolmuştur. Bentlerde biriken malzeme kanaldaki basamaklı yapının ortadan kalkmasına neden olmuştur. Bu bağlamda model kanalda herhangi bir engelle karşılaşmadan ilerlemeye devam etmiştir.

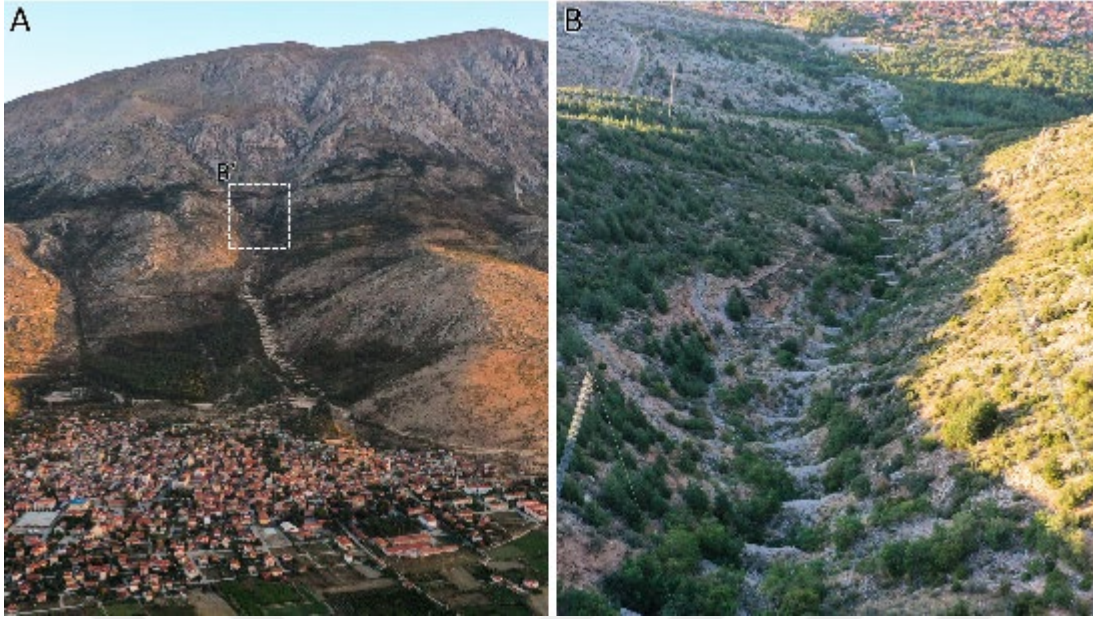
Bentlerdeki havuzlarda birikmiş olan bu malzemenin, gelecek dönemlerde gerçekleşecek ekstrem bir yağışla normalden daha büyük bir hacime ulaşabilecek bir moloz akmasının tetiklemesi potansiyelini taşımaktadır. Yapılan arazi gözlemlerinde işlevini yitirmiş ve önceki moloz akmaları ile hasar görmüş tersip bentleri Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'de gösterilmiştir. Senirkent'teki özellikle 1370-1450 m yükseltilerdeki tersip bentlerindeki havuzların yamaçlarda ayrışan malzeme ile dolmaya başladığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.11).



Şekil 4.9 : Ortayazı'nın güneyindeki B31 numaralı havzanın moloz kanalında inşa edilmiş tersip bentleri.

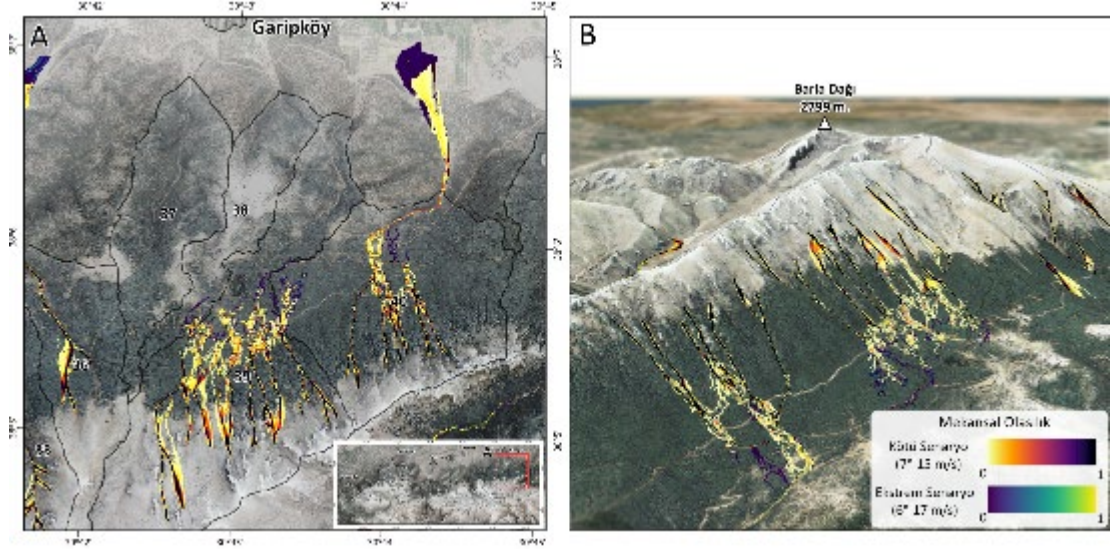


Şekil 4.10 : Yassıören'in güneyinde bulunan B28 numaralı havzada tersip bentlerinin moloz akmasıyla havuzların dolması ve tahrip olmasını gösteren hava fotoğrafları (B1 oblik, B2 ve B3 nadir görüntülerdir).



Şekil 4.11 : Senirkent yerleşimi ve güneyindeki moloz kanalında inşa edilmiş tersip bentleri (A). 1370-1450 metre yükseltilerde dolmaya başlamış olan bentlerin havuzları (B).

Çalışma sahasının doğusundaki Garip yerleşiminin güneyindeki yamaçlarda bulunan sedir ormanı Bölüm 2’de açıklanmıştı. Orman varlığının, moloz akmalarının enerjilerine ve hacminin artmasına karşı direnç sağlayarak etkilerini azaltıcı bir rol oynadığı çeşitli çalışmalarda ele alınmıştır. (Hungar vd., 2005; Wang vd., 2017; Zhou vd., 2023). Orman üst sınırının üzerinde başlayan moloz akması modeli ormanlık alana ulaştığında, 40 numaralı havzadaki bir moloz kanalı hariç, Sayısal Yükselti Modelinin sunduğu çözünürlük seviyesindeki pürüzlülüğe göre mekansal olasılık hücrelerinin saçılarak enerjisini yitirdiği gözlemlenmiştir (Şekil 4.12).



Şekil 4.12 : Flow-R modelinin mekansal olasılık hücrelerinin ormanlık alanda saçılarak durmasını gösteren harita (A) ve üç boyutlu gösterimi (B).

4.3 Flow-R model sonuçlarının doğrulanması

Doğal tehlikelerin değerlendirilmesi, duyarlılık analizlerin yapılması çalışmalarında kullanılan modellerin doğrulanması, modelin doğruluğunu ve tahmin gücünü değerlendirmek açısından önem arz etmektedir (Begueri, 2006). Bu çalışmada, hava fotoğraflarından tespit edilebilen 7 havzanın moloz akmaları için Flow-R modelinin kötü durum senaryosuna ait sonuçları konfüzyon matrisi (*ing.confusion matrix*) uygulanarak değerlendirilmiştir. Matris doğru pozitif (DP), yanlış pozitif (YP), doğru negatif (DN) ve yanlış negatif değerlerinin hesaplanmasıyla gerçekleştirilmiştir. Burada hücre bazında değerlendirilen DP, moloz akmasını moloz akması olarak kabul eden hücreler için; DN, moloz akması olmayan hücrelere moloz akması olarak kabul etmeyen hücreler için; YP, moloz akması olmayan hücrelere moloz akması olarak kabul etmeyen hücreler için; YN, moloz akması olan hücrelere moloz akması olarak kabul etmeyen hücreler için değerlendirilmiştir. Bu matrisler Beguria (2006)'daki çalışmasında öne sürdüğü doğruluk, hassasiyet ve pozitif tahmin gücü indisleri ile değerlendirilmiştir (Çizelge 4.1).

Çizelge 4.1 : Konfüsyon matrisine dayalı sonuçların duyarlılığı.

Toplam hücre sayısı (THS) (1096233 hücre)	Önceki moloz akmalarının yayılma alanı (53395 hücre, %4,87)	
Simüle edilmiş moloz akmalarının yayılma alanı (149383 hücre, %13,62)	Evet	Hayır
Evet	DP (34415 hücre, %3,13)	YP (114968 hücre, %10,78)
Hayır	YN (18980 hücre, %1,73)	DN (927871 hücre, %84,64)
Doğruluk	(DP+ DN)/THS	%87,78
Hassasiyet	DP/(DP+YN)	%64,45
Pozitif tahmin gücü	DP/(DP+YP)	%23,03

Modelin doğruluğunu temsil eden indis %87,78 seviyesinde ölçülmüştür. Bu sonuç 1096233 hücreden 962286 hücrenin doğru bir şekilde sınıflandırıldığını göstermektedir. Modelde moloz akması olarak değerlendirilen hücrelerin gerçekte ne kadarının moloz akması olduğunu temsil eden hassasiyet değeri %64,45 olarak ölçülmüştür. İhmal edilen %35,46'lık alan, önceki moloz akmalarının geçmiş dönemlere ait siyah beyaz hava fotoğraflarından tespit edilme aşamasında moloz kanallarına düşen gölge alanlardaki piksel kaybından kaynaklanmaktadır. Pozitif tahmin gücü, pozitif tahminlerin toplamı içindeki gerçek pozitiflerin oranıdır. Simüle edilen moloz akmalarının yayılma alanlarındaki doğru oranı temsil etmektedir. Bu çalışmada %23,03 olarak ölçülmüştür. Mevcut moloz akması yayılma alanlarının, 0-1 aralığındaki mekansal duyarlılık değerlerine göre 0,0007-0,4 değerlerinde dağılmış hücrelerle uyum sağladığı nedeniyle %23,03 ölçülmüştür.

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışması ile geçmiş moloz akma olaylarına ilişkin kısıtlı mekansal bilgi içeren Barla Dağı Kuşağı'nın kuzey yamaçlarında moloz akması duyarlılık analizi yapılmıştır. Bu analiz, moloz akması gibi karmaşık, fiziksel çevre değişkenlerinin ve kaotik etkilerinin olduğu tehlikeler için minimum seviyede veri girdisi ile bölgesel ölçekte hızlı bir şekilde duyarlılık analizi gerçekleştirilmesini sağlayan Flow-R aracılığıyla mekansal ampirik dağılım modeli esas alınarak gerçekleştirilmiştir.

Çalışma kapsamında tespit edilen kaynak alanları ve moloz akmalarının erişim mesafeleri (yayılma alanları), daha önceki moloz akmalarıyla ilgili spesifik arazi koşulları bilgileri olmadan, 5 m yersel çözünürlüklü Sayısal Yükselti Modeli kullanarak farklı bölgelerde geliştirilen ampirik ilişkilerin ve parametrelendirmenin uygulanmasıyla ve sonrasında arazi kullanım koşulları ve litoloji gözetilerek belirli eliminasyonlardan geçirildikten sonra oluşturulan moloz kaynak alanları kullanılarak çalışma alanına ait moloz akma duyarlılık haritası üretilmiştir. Sonuçlar geçmiş hava fotoğrafları ile haritalanan moloz akmaları aracılığıyla konfüsyon matrisi ile değerlendirilmiştir. En fazla moloz akması kaynak alanı yoğunluğu B13, B28, B29, B35 ve B36 numaralı havzalarda tespit edilmiştir. Bu havzalarda moloza kaynaklık eden litolojilerin önemli ölçüde bu frekans ve duyarlılık konusunda etkin olduğu, saha gözlemlerimiz ve önceki çalışmalar aracılığıyla da ortaya çıkarılmıştır (örn. Tunusluoğlu vd., 2007).

13 Temmuz 1995, 18-19 Temmuz 1996 tarihlerinde Senirkent'te gerçekleşen moloz akmalarına uyumlu model sonucunun 7° -15m/s olduğu belirlenmiştir. B31, B33, B34, B35, B36 numaralı havzalarda geçmiş hava fotoğraflarından haritalanan moloz akmalarına uyumlu model çıktısının ise 6° -17m/s olduğu tespit edilmiştir. Flow-R modelinin duyarlılık doğrulaması sonuçlarına göre doğruluk, hassasiyet ve pozitif tahmin gücü sırasıyla %87,78, %64,45 ve %23,03 olarak ölçülmüştür. Hava fotoğrafları kullanılarak geriye dönük yapılan bu değerlendirmede; model doğrulama analizlerine göre %64,45 hassasiyet seviyesinde 7° erişim açısına sahip 15m/s modelinin nispeten yüksek doğruluğa ve bölge için kullanılabilir olduğu sonucuna

ulaşılmıştır. Buna karşın moloz akmalarındaki en büyük belirsizliklerden birisi olan sürüklenim ile birlikte moloz girdi kapasitesinin, dolayısıyla moloz hacminin olay esnasında giderek artması bu tip ampirik modellerde göz ardı edilmektedir. Bu tip belirsizliklerin giderilmesi açısından ampirik mekansal olasılık modellerinin daha küçük ölçeklerde çalışan dinamik modellerle iş birliği yapılarak geliştirilmesi önlem çalışmaları aşamasında yapılacak tasarımlar için büyük bir öneme sahiptir. Bunun yanı sıra, 1995 Senirkent moloz akması olayında da gözlemlendiği gibi daha lokal ekstrem yağışların ve bölge içinde moloz akmalarının büyük tetikleyicilerinden birisi olan ani yağışların kestirimine yönelik meteorolojik gözlem ağlarının ve bunlardan hesaplanacak ekstrem yağışlara ilişkin dönüş periyotlarının detaylı bir şekilde hesaplanması ve burada ortaya koyduğumuz moloz akma modelleri ile birlikte bu kestirimlerin dikkate alınması gerekmektedir.

Modelde SYM çözünürlüğünün etkili olduğu ve modelin ilerlemesinde havzalardaki mevcut tersip bentlerinin etkisinin göz ardı edildiği ortaya çıkarılan bir diğer sonuçtur. Arazi gözlemleri sırasında tespit edilen, tersip bentlerinin moloz ile dolan havuzlarının da bu bulguyu destekler nitelikte olduğunu ortaya koyulmuştur. Bu yönüyle, 1995 yılı öncesi ve 1995 yılı sonrası, sırasıyla Devlet Su İşleri (DSİ), Orman Bakanlığı ve Dünya Bankası fon ve desteği ile yapılan tersip bentlerinin neredeyse %85'inin işlevini yitirdiği, bu bakımdan fonksiyonlarını kaybettikleri belirlenmiştir. Söz konusu bentlerin onarılması ve havuz alanlarının temizlenerek bakımlarının yapılması bölgede moloz akma riskinin birer parçası olan insanlar ve insana ait diğer yapılar için büyük önem arz etmektedir.

KAYNAKLAR

- Altınay, O., Sarıkaya, M. A., Çiner, A., Žebre, M., Stepišnik, U., Yıldırım, C., Yetemen, Ö., Wilcken, K. M. (2022). Cosmogenic ^{36}Cl surface exposure dating of glacial landforms on Mt. Barla (SW Turkey). *Geomorphology*, 416, 108424.
- Avcı, M. (1993). Göller Yöresi Batı Kesiminde Bitki Toplulukları ve Dağılımları. *İstanbul Üniversitesi Edebiyat Fakültesi Coğrafya Bölümü Coğrafya Dergisi*, 4, 227-264
- Avcı, M. (1993). Göller Yöresi Batı Kesiminde İklim ile Bitki Örtüsü Arasındaki İlişkiler. *İstanbul Üniversitesi Edebiyat Fakültesi Coğrafya Bölümü Coğrafya Dergisi*, 4, 143-215.
- Aydın, T., & Çelik, M. A. (2019). 6-7 Ağustos 2018'de Elmalı İlçesinde Meydana Gelen Sel Afetinin Tarım Alanları Üzerine Etkisi. *Doğu Coğrafya Dergisi*, 24(42), 91-102.
- Badoux, A., Graf, C., Rhyner, J., Kuntner, R., & McArdell, B. W. (2009). A debris-flow alarm system for the Alpine Illgraben catchment: design and performance. *Natural hazards*, 49, 517-539.
- Bağırsakçı, S. (1996). Senirkent (Isparta) İlçesinde Meydana Gelen Zemin Akması Olayına İlişkin Etüt Raporu. (Rapor No: 9911) MTA, Jeoloji Etütleri Dairesi Başkanlığı, Ankara.
- Bathurst, J. C., Burton, A., & Ward, T. J. (1997). Debris flow run-out and landslide sediment delivery model tests. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(5), 410-419.
- Baum, R. L., & Godt, J. W. (2010). Early warning of rainfall-induced shallow landslides and debris flows in the USA. *Landslides*, 7, 259-272.
- Baumann, V., Wick, E., Horton, P., & Jaboyedoff, M. (2011). (2011, October). Debris flow susceptibility mapping at a regional scale along the National Road N7, Argentina. In *Proceedings of the 14th Pan-American conference on soil mechanics and geotechnical engineering (2-6)*. Canadian Geotechnical Society.
- Beguería, S. (2006). Validation and evaluation of predictive models in hazard assessment and risk management. *Natural Hazards*, 37, 315-329.
- Bierman, P. R., & Montgomery, D. R. (2014). *Key concepts in geomorphology*. New York, NY: W.H Freeman and Company Publishers: A Macmillan Higher Education Company
- Biricik, A. S. (1997). Senirkent'te Sel Afetleri (13 Temmuz 1995- 18,19 Temmuz 1996). *Marmara Coğrafya Dergisi*, 1, 9-30.

- Blahut, J., Horton, P., Sterlacchini, S., & Jaboyedoff, M.** (2010). Debris flow hazard modelling on medium scale: Valtellina di Tirano, Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(11), 2379-2390
- Casermeyro, M. A., Molina, J. A., De la Cruz Caravaca, M. T., Costa, J. H., Massanet, M. H., & Moreno, P. S.** (2004). Influence of scrubs on runoff and sediment loss in soils of Mediterranean climate. *Catena*, 57(1), 91-107.
- Chen, X., Cui, P., You, Y., Chen, J., & Li, D.** (2015). Engineering measures for debris flow hazard mitigation in the Wenchuan earthquake area. *Engineering Geology*, 194, 73-85.
- Corominas, J.** (1996). The angle of reach as a mobility index for small and large landslides. *Canadian Geotechnical Journal*, 33(2), 260-271.
- Costa, J. E.** (1984). Physical geomorphology of debris flows. In *Developments and applications of geomorphology* (268-317). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Costard, F., Forget, F., Mangold, N., & Peulvast, J. P.** (2002). Formation of recent Martian debris flows by melting of near-surface ground ice at high obliquity. *Science*, 295(5552), 110-113.
- Cruden, D. M., & Varnes, D. J.** (1996). Fundamentals of Geomorphology. *Proceedings of Research, relevance and rigour: coming of age: 18th Australasian Conference on Information Systems*. Toowoomba, Australia: University of Southern Queensland.
- Cruden, D. M., & Varnes, D. J.** (1996). Landslides: investigation and mitigation. Chapter 3-Landslide types and processes. (Rapor No. 247). Transportation research board special report.
- David-Novak, H. B., Morin, E., & Enzel, Y.** (2004). Modern extreme storms and the rainfall thresholds for initiating debris flows on the hyperarid western escarpment of the Dead Sea, Israel. *Geological Society of America Bulletin*, 116(5-6), 718-728
- Decaulne, A., Sæmundsson, Þ., & Petursson, O.** (2005). Debris flow triggered by rapid snowmelt: a case study in the Gleisfjall Area, Northwestern Iceland. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 87(4), 487-500.
- Delmonaco, G., Leoni, G., Margottini, C., Puglisi, C., & Spizzichino, D.** (2003). Large scale debris-flow hazard assessment: a geotechnical approach and GIS modelling. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3 (5), 443-455.
- Dowling, C. A., & Santi, P. M.** (2014). Debris flows and their toll on human life: a global analysis of debris-flow fatalities from 1950 to 2011. *Natural hazards*, 71, 203-227.
- Ertek, T.** (1995). Senirkent seli (13 Temmuz 1995-Isparta). *Türk Coğrafya Dergisi*, 30, 127-141.
- Fidan, S., Görüm, T.** (2020). Türkiye’de ölümcül heyelanların dağılım karakteristikleri ve ulusal ölçekte öncelikli alanların belirlenmesi. *Türk Coğrafya Dergisi*, (74), 123-134.

- Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley.** (2012). Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Field et al., (eds.). Cambridge University Press: Cambridge.
- Fischer, L., Rubensdotter, L., Sletten, K., Stalsberg, K., Melchiorre, C., Horton, P., & Jaboyedoff, M.** (2012). Debris flow modeling for susceptibility mapping at regional to national scale in Norway. In *Proceedings of the 11th international and 2nd North American symposium on landslides* (3-8).
- Gamma, P.** (2000). *dfwalk-Ein Murgang-Simulationsprogramm zur Gefahrenzonierung*. Verlag des Geogr, Switzerland: Geographisches Institut der Universität Bern.
- Giano, S. I., Pescatore, E., Siervo, V.** (2021). Morphometry and Debris-Flow Susceptibility Map in Mountain Drainage Basins of the Vallo di Diano, Southern Italy. *Remote Sensing*, 13(16), 3254.
- Gürel, N., Bağırakçı, S., Tüfekçi, K.** (1995). Senirkent İlçesi (Isparta) Zemin (Çamur) Akması Olayı Etüt Raporu. (Rapor No: 9821) MTA, Jeoloji Etütleri Dairesi Başkanlığı, Ankara.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., & Reichenbach, P.** (1999). Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, 10 (1-4), 181-216.
- He, J., Zhang, L., Fan, R., Zhou, S., Luo, H., & Peng, D.** (2022). Evaluating effectiveness of mitigation measures for large debris flows in Wenchuan, China. *Landslides*, 19(4), 913-928.
- Heim, A.** (1932). Bergsturz und Menschenleben. *Beiblatt zur Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zurich*. 77, 1–217.
- Heinimann, H., Hollenstein, K., Kienholz, H., Krummenacher, B., Mani, P.** (1998). *Methoden zur Analyse und Bewertung von Naturgefahren: eine risikoorientierte Betrachtungsweise*. Umwelt-Materialien Nt. 85, Naturgefahren. Hrsg.: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL)
- Holmgren, P.** (1994). Multiple flow direction algorithms for runoff modelling in grid based elevation models: an empirical evaluation. *Hydrological processes*, 8(4), 327-334.
- Horton, P., Jaboyedoff, M., Bardou, E.** (2008). Debris flow susceptibility mapping at a regional scale. In *Proceedings of the 4th Canadian Conference on Geohazards: From Causes to Management*. Presse de l'Université Laval, Québec.
- Horton, P., Jaboyedoff, M., Rudaz, B. E. A., & Zimmermann, M.** (2013). Flow-R, a model for susceptibility mapping of debris flows and other

- gravitational hazards at a regional scale. *Natural hazards and earth system sciences*, 13(4), 869-885.
- Huebl, J., & Fiebigler, G.** (2005). Debris flow mitigation measures. In Jakob, M., Hungr, O., *Debris-flow hazards and related phenomena*, 445-487. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, ISBN 3-540-20726-0
- Huggel, C., Kääb, A., Haeblerli, W., Teyssie, P., Paul, F.** (2002). Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: a case study in the Swiss Alps. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(2), 316-330.
- Hugget, R.** (2011). *Fundamentals of Geomorphology*. Taylor & Francis.
- Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L.** (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11, 167-194.
- Hungr, O., Evans, S.G., Bovis, M.J., Hutchinson, J.N.** (2001). Landslides of the Flow Type. *Environmental & Engineering Geoscience*, 7(3), 221-238.
- Jakob, M., Hungr, O.** (2005). *Debris-flow hazards and related phenomena (Vol. 739)*. Berlin: Springer.
- Jiang, N., Su, F., Li, Y., Guo, X., Zhang, J., & Liu, X.** (2021). Debris Flow Assessment in the Gaizi-Bulunkou Section of Karakoram Highway. *Frontiers in Earth Science*, 9, 660579.
- Jiang, N., Su, F., Li, Y., Guo, X., Zhang, J., Liu, X.** (2021). Debris Flow Assessment in the Gaizi-Bulunkou Section of Karakoram Highway. *Frontiers in Earth Science*, 9, 660579.
- Kang, S., & Lee, S. R.** (2018). Debris flow susceptibility assessment based on an empirical approach in the central region of South Korea. *Geomorphology*, 308, 1-12.
- Kappes, M. S., Malet, J. P., Remaître, A., Horton, P., Jaboyedoff, M., & Bell, R.** (2011). Assessment of debris-flow susceptibility at medium-scale in the Barcelonnette Basin, France. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(2), 627-641.
- Karra, K., Kontgis, C., Statman-Weil, Z., Mazzariello, J. C., Mathis, M., Brumby, S. P.** (2021). Global land use/land cover with Sentinel 2 and deep learning. In *2021 IEEE international geoscience and remote sensing symposium IGARSS* (4704-4707). IEEE
- Michellini, T., Bettella, F., & D'Agostino, V.** (2017). Field investigations of the interaction between debris flows and forest vegetation in two Alpine fans. *Geomorphology*, 279, 150-164.
- Michoud, C., Derron, M. H., Horton, P., Jaboyedoff, M., Baillifard, F. J., Loye, A., Nicolet, P., Queyrel, A.** (2012). Rockfall hazard and risk assessments along roads at a regional scale: example in Swiss Alps. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(3), 615-629.
- Özgül, N.** (1976). Toroslar'm bazı temel jeoloji özellikleri. *Bulletin of the Geological Society of Turkey*, 19, 65-78.
- Pastorello, R., Michellini, T., D'Agostino, V.** (2017). On the criteria to create a susceptibility map to debris flow at a regional scale using Flow-R. *Journal of Mountain Science*, 14, 621-635.

- Rickenmann, D., & Zimmermann, M.** (1993). The 1987 debris flows in Switzerland: documentation and analysis. *Geomorphology*, 8 (2-3), 175-189.
- Pierson, T. C., & Scott, K. M.** (1985). Downstream dilution of a lahar: transition from debris flow to hyperconcentrated streamflow. *Water resources research*, 21(10), 1511-1524.
- Phillips, R. J., Armstrong, R. C., Brown, R. A., Graham, A. L., & Abbott, J. R.** (1992). A constitutive equation for concentrated suspensions that accounts for shear-induced particle migration. *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, 4(1), 30-40.
- Rosenfeld, C. L.** (1994). The geomorphological dimensions of natural disasters. *Geomorphology*, 10, 27-36.
- Skilodimou, H., & Bathrellos, G.** (2016). Debris flow: categories, characteristics, hazard assessment, mitigation measures. Report, Erasmus Programme of the European Union. Available at: https://eclass.uoa.gr/modules/document/file.php/GEOL312/Landslides/McAgenda_Text_debris_flow_final.pdf
- Takahashi, T.** (1981). Debris flow. Annual review of fluid mechanics, 13(1), 57-77.
- Tarboton, D. G.** (1997). A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water resources research*, 33(2), 309-319.
- Thayyen, R. J., Mishra, P. K., Jain, S. K., Wani, J. M., Singh, H., Singh, M. K., & Yadav, B.** (2022). Hanging glacier avalanche (Raunthigad–Rishiganga) and debris flow disaster on 7 February 2021, Uttarakhand, India: a preliminary assessment. *Natural Hazards*, 114(2), 1939-1966.
- Toprak, F.** (1995). Senirkent Çamur Çıgı Etüd Raporu 1. (Rapor No: 230031). Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Basılmamış rapor, Ankara.
- Toprak, F.** (1995). Senirkent Çamur Çıgı Etüd Raporu 2. (Rapor No: 230032). Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Basılmamış rapor, Ankara.
- Tunusluoğlu, C.** (2007). *Barla-Besparmak-Kapı Dağlarının Kuzey Yamaçlarındaki Moloz Oluşumunu Etkileyen Faktörlerin Ve Moloz Akma Koşullarının Araştırılması*. (Doktora tezi). Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Vagnon, F.** (2020). Design of active debris flow mitigation measures: a comprehensive analysis of existing impact models. *Landslides*, 17(2), 313-333.
- Vallance, J. W.** (2005). Volcanic debris flows. In *Debris-flow hazards and related phenomena* (247-274). Praxis Chichester.
- Varnes, D. J.** (1979). Slope movement types and processes. (Rapor No: 176)). Special report.
- Wang, S., Meng, X., Chen, G., Guo, P., Xiong, M., & Zeng, R.** (2017). Effects of vegetation on debris flow mitigation: A case study from Gansu province, China. *Geomorphology*, 282, 64-73.

Wang, S., Meng, X., Chen, G., Guo, P., Xiong, M., & Zeng, R. (2017). Effects of vegetation on debris flow mitigation: A case study from Gansu province, China. *Geomorphology*, 282, 64-73.

Zhou, G., Lyu, L., Xu, M., Ma, C., Wang, Y., Wang, Y., ... & Stoffel, M. (2023). Assessment of check dams and afforestation in mitigating debris flows based on dendrogeomorphic reconstructions, field surveys and semi-empirical models. *Catena*, 232, 107434.

Yeşilkaya, Y., Tetik, M., Cengiz, N. (1996). Senirkent Taşkınları, Nedenleri ve Alınmakta olan Önlemlere İlişkin Rapor. *Batı Akdeniz Araştırma Enstitüsü Yayınları*, 2, 1-11.

Url-1 <<http://www.aa.com.tr>>, erişim tarihi 02.12.2023.

Url-2 <<https://www.haber32.com.tr>>, erişim tarihi 02.12.2023



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Furkan Karabacak

ÖĞRENİM DURUMU:

Lisans : 2019, İstanbul Üniversitesi, Edebiyat Fakültesi, Coğrafya Bölümü

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

2023- yılı itibariyle ELTEMTEK A.Ş. bünyesinde jeomorfolog olarak çalışmaktadır.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

Görüm, T., Tanyas, H., Karabacak, F., Yılmaz, A., Girgin, S., Allstadt, K. E., ... & Burgi, P. (2023). Preliminary documentation of coseismic ground failure triggered by the February 6, 2023 Türkiye earthquake sequence. *Engineering Geology*, 327, 107315.