

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**JEOLojİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KİRAZLIK (GÜMÜŞHANE) HEYELANINDAN KAYNAKLANACAK OLASI İTKİ  
DALGALARININ TORUL BARAJ GÖLÜNDEKİ YAYILIMININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Melek Betül YÜREGİR**

**NİSAN 2021  
TRABZON**



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**JEOLojİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KİRAZLIK (GÜMÜŞHANE) HEYELANINDAN KAYNAKLANACAK OLASI İTKİ  
DALGALARININ TORUL BARAJ GÖLÜNDEKİ YAYILIMININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

**Melek Betül YÜREGİR**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce**  
**"DOKTOR (JEOLojİ MÜHENDİSLİĞİ)"**  
**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 15 / 03 / 2021**

**Tezin Savunma Tarihi : 19 / 04 / 2021**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hakan ERSOY**

**İkinci Danışman Dr. Öğr. Üyesi Özgür AKTÜRK**

**Trabzon 2021**

## ÖNSÖZ

Bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsüne Doktora Tezi olarak hazırlanmış olup Gümüşhane (KD Türkiye) yöresindeki Kirazlık Heyelanından kaynaklanacak itki dalgalarının Torul (Gümüşhane) Baraj Gölündeki yayılımının ampirik yaklaşımlar ve iki boyutlu sayısal analizler ile değerlendirilmesini amaçlamaktadır.

Doktora tez çalışmamı bana öneren ve çalışmalarımın başlangıcından sonuna kadar bilgi, deneyim ve tecrübelerini benden esirgemeyen, çok kıymetli danışman hocam Prof. Dr. Hakan ERSOY'a şükranlarımı sunarım. Ayrıca eş danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Özgür AKTÜRK'e (Akdeniz Üniversitesi) teşekkür ederim. Bu tez çalışmasının her anında bilgi, tecrübe ve çok kıymetli desteği ile her zaman yanımda olan Dr. Fatih UÇAR'a teşekkürü borç bilirim. Ayrıca yol göstericiliği ile katkıda bulunan Dr. Koray KOÇ'a ve kıymetli eşi Hilal Eda KOÇ'a, uzakta olmamıza rağmen benden desteklerini esirgemeyen Araş Gör. Murat KARAHAN'a, Araş Gör. Muhammet Oğuz SÜNNETÇİ'ye ve kuzenim Jeoloji Mühendisi Özlem YÜREGİR'e teşekkür ederim.

Tüm yaşamım boyunca benden maddi manevi desteğini esirgemeyen, her zaman her zorlukta yanımda olan annem Birgül YÜREGİR'e ve babam Hüseyin YÜREGİR'e ne kadar teşekkür etsem azdır. Ayrıca varlıkları ile daima beni mutlu eden kardeşlerime ve ailemin diğer bütün üyelerine, bir aile gibi her zaman yanımda olan arkadaşlarıma sonsuz teşekkürler. Sahip olduğum en değerli varlığım, canım oğlum, Enis Berke KARSLI'ya teşekkür etmekten mutluluk duyarım.

Melek Betül YÜREGİR  
Trabzon 2021

## **TEZ ETİK BEYANNAMESİ**

Doktora Tezi olarak sunduğum “Kirazlık (Gümüşhane) Heyelanından Kaynaklanacak Olası İtki Dalgalarının Torul Baraj Gölündeki Yayılımının Değerlendirilmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Hakan ERSOY’un sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 19/04/2021

Melek Betül YÜREGİR

## İÇİNDEKİLER

|                                                                              | <b><u>Sayfa No</u></b> |
|------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| ÖNSÖZ .....                                                                  | III                    |
| TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....                                                    | IV                     |
| İÇİNDEKİLER.....                                                             | V                      |
| ÖZET .....                                                                   | VII                    |
| SUMMARY .....                                                                | VIII                   |
| ŞEKİLLER DİZİNİ .....                                                        | IX                     |
| TABLolar DİZİNİ.....                                                         | XI                     |
| SEMBOLLER DİZİNİ .....                                                       | XIII                   |
| 1. GENEL BİLGİLER.....                                                       | 1                      |
| 1.1. Giriş.....                                                              | 1                      |
| 1.2. Çalışmanın Amacı .....                                                  | 5                      |
| 1.3. Çalışma Alanının Genel Özellikleri .....                                | 6                      |
| 1.4. Literatür Özeti .....                                                   | 8                      |
| 1.4.1. Bölgesel Jeoloji .....                                                | 8                      |
| 1.4.2. Mühendislik Jeolojisi Çalışmaları .....                               | 12                     |
| 1.4.3. İtki Dalgaları ile İlgili Çalışmalar .....                            | 14                     |
| 1.4.4. İtki Dalgalarının Değerlendirilmesinde Nümerik Model Çalışmaları..... | 19                     |
| 2. ÇALIŞMADA KULLANILAN GENEL KAVRAMLAR .....                                | 23                     |
| 2.1. Heyelanlar .....                                                        | 23                     |
| 2.1.1. Heyelanların Geometrisi.....                                          | 30                     |
| 2.1.2. Heyelanların Nedenleri.....                                           | 34                     |
| 2.1.3. Heyelanların Hızı .....                                               | 37                     |
| 2.1.4. Heyelanların Aktivitesi.....                                          | 39                     |
| 2.1.5. Duraylılık Analizleri.....                                            | 42                     |
| 2.2. İtki Dalgaları.....                                                     | 46                     |
| 2.2.1. Dalga Teorisi .....                                                   | 46                     |
| 2.2.2. Dalga Tipleri.....                                                    | 53                     |
| 2.2.2.1. Stokes Dalgası .....                                                | 55                     |
| 2.2.2.2. Cnoidal Dalga.....                                                  | 55                     |
| 2.2.2.3. Tekil (Solitary) Dalga.....                                         | 56                     |

|          |                                                                                     |     |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.2.2.4. | Bore (Geniş Yutucu Delik).....                                                      | 57  |
| 2.2.3.   | Dalga Yayılım Mekanizması.....                                                      | 58  |
| 2.2.4.   | Ampirik Eşitlikler.....                                                             | 59  |
| 2.2.4.1. | Rezervuar Geometrisine (2D ya da 3D) Bağlı Olmayan Parametreler .....               | 62  |
| 2.2.4.2. | Rezervuar Geometrisine (2D ya da 3D) Bağlı Olan Parametreler .....                  | 66  |
| 2.2.4.3. | Dalganın Karşı Kıyıda İlerleme Miktarı ve Baraj Gövdesine Olan Etkisi.....          | 70  |
| 2.3.     | Barajlar .....                                                                      | 71  |
| 3.       | BULGULAR .....                                                                      | 73  |
| 3.1.     | Çalışma Alanı ve Çevresinin Jeolojik Özellikleri .....                              | 73  |
| 3.1.1.   | Çatak Formasyonu.....                                                               | 73  |
| 3.1.2.   | Kızılkaya Formasyonu .....                                                          | 74  |
| 3.1.3.   | Kaçkar Granitoyidi-I .....                                                          | 74  |
| 3.2.     | Heyelan Sahasında Yapılan Jeoteknik Çalışmalar .....                                | 78  |
| 3.2.1.   | Araştırma Çukurlarının Açılması ve Laboratuvar Deneyleri .....                      | 81  |
| 3.2.1.1. | Kayma Direnci Parametrelerinin Belirlenmesi .....                                   | 81  |
| 3.3.     | Heyelan Sahasında Yapılan Jeofizik Çalışmalar.....                                  | 81  |
| 3.3.1.   | Sismik Kırılma ve MASW Ölçümleri .....                                              | 81  |
| 3.3.2.   | Çok Elektrotlu Elektrik Tomografi Ölçümleri (ERT).....                              | 84  |
| 3.4.     | Rezervuara Kayacak Malzeme Hacminin Belirlenmesi.....                               | 86  |
| 3.4.1.   | Şev Stabilite Analizleri.....                                                       | 87  |
| 3.4.2.   | İtki Dalgalarının Oluşumunda Farklı Senaryoların Tanımlanması .....                 | 88  |
| 3.5.     | İtki Dalga Özelliklerinin Ampirik Yaklaşımlarla Modellenmesi.....                   | 91  |
| 3.6.     | İtki Dalga Özelliklerinin 2 Boyutlu Nümerik Modellerle Belirlenmesi.....            | 96  |
| 3.6.1.   | Rezervuara ve Heyelan Bölgesine ait Sayısal Yükseklik Modelinin Oluşturulması ..... | 96  |
| 3.6.2.   | Nümerik Modelin Oluşturulması ve 2 Boyutlu Dalga Yayılımının Simülasyonu            | 96  |
| 3.6.2.1. | Drift-Flux Modeli .....                                                             | 97  |
| 3.6.2.2. | RNG k-ε Türbülans Modeli.....                                                       | 97  |
| 4.       | SONUÇLAR .....                                                                      | 101 |
| 5.       | KAYNAKLAR.....                                                                      | 105 |
| ÖZGEÇMİŞ |                                                                                     |     |

Doktora Tezi

## ÖZET

### KİRAZLIK (GÜMÜŞHANE) HEYELANINDAN KAYNAKLANACAK OLASI İTKİ DALGALARININ TORUL BARAJ GÖLÜNDEKİ YAYILIMININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Melek Betül YÜREGİR

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Prof. Dr. Hakan ERSOY  
2021, 118 Sayfa

Heyelanlar ve barajlar bakımından oldukça yoğun olan Karadeniz Bölgesinin, barajların rezervuar alanlarında oluşan kütle hareketleri ve bu hareketlerin oluşturacağı itki dalgaları ile bu dalgaların yıkıcı etkileri açısından hassas olduğu ortadır. Bu doktora tezi çalışması kapsamında Gümüşhane ilinin, Torul ilçesi Kirazlık köyünde yer alan Harşit Çayı üzerine inşa edilmiş Torul Barajı'nın rezervuar alanını sınırlayan yamaçlarda meydana gelebilecek kütle hareketlerinin oluşturacağı itki dalgalarının, rezervuar alanında oluşturacağı dalga yüksekliği, oluşacak dalganın hızı ile 571 m uzaklıktaki karşı kıyıya ve 731 m uzaklıktaki baraj gövdesine ulaşma süresi ve karşı kıyıda ilerleme mesafesi gibi olası etkilerinin farklı senaryolar dikkate alınarak araştırılması ve çeşitli ampirik eşitlikler ve iki boyutlu nümerik analizler ile hesaplanması amaçlanmıştır. Paleo-heyelana yönelik DSİ 22. Bölge Müdürlüğü tarafından yapılan sondaja dayalı jeolojik ve jeoteknik çalışmalar incelenmiş, paleo-heyelan malzemesinin yatay ve düşey devamlılığının belirlenmesi ve malzeme karakterizasyonunu ortaya koymak amacıyla jeofizik ölçümler gerçekleştirilmiş, araştırma çukurlarından temin edilen örselenmiş ve örselenmemiş örnekler üzerinde deneyler yapılarak, heyelan malzemesinin indeks özellikleri ve dayanım parametreleri belirlenmiş, iki boyutlu nümerik analizlerle özellikle depremli durum için stabilite analizleri yapılarak, olası kayma dairesinin konumu ortaya koyulmuş, nümerik stabilite analizlerinden elde edilen veriler kullanılarak farklı senaryolar için rezervuara akacak malzeme kalınlığı tahmin edilmiş, rezervuarda oluşacak heyelan kaynaklı itki dalgalarının yayılımı iki ve üç boyutlu ampirik eşitlikler ve iki boyutlu nümerik analizler kullanılarak değerlendirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kütle hareketleri, paleo-heyelan, itki dalgası, ampirik eşitlikler, nümerik analiz, Kirazlık köyü, Torul Barajı

PhD. Thesis

## SUMMARY

### ASSESSMENT OF KIRAZLIK (GÜMÜŞHANE) LANDSLIDE INDUCED POSSIBLE IMPULSE WAVES PROPOGATION IN TORTUL DAM LAKE

Melek Betül YÜREGİR

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Geological Engineering Graduate Program  
Supervisor: Prof. Dr. Hakan ERSOY  
2021, 118 Pages

When the abundancy of landslide and dams in the Black Sea Region is considered, this region is susceptible as to destructive results of impulse waves induced by mass-movements in the reservoirs of those dams. In this doctorate thesis study, the investigation and calculation of wave height, arriving time to the across shore at a distance of 571 m and to the dam body at a distance 731 m of impulse waves which may occur as a result of mass-movements on the slope of the Torul Dam lake on the Harşit stream in Kirazlık village in the Torul district of Gümüşhane province under different scenario and using various empirical equations and two dimensions numerical analysis were aimed. In order to complete this study, firstly, the analysis reports included geological and geotechnical assessment of paleo-landslide drilling performed by 22nd Regional Directorate for State Hydraulic Works (DSI) results were gone through. Then, geophysical measurements were applied to determine the horizontal and vertical continuity of paleo-landslide derived materials and features of those materials. To determine the index features and strength parameters of landslide materials, disturbed and undisturbed samples collected from test pits were analysed. Stability analyses were performed by using 2 dimensions numerical analyse for especially earthquake circumstances. The location of the possible sliding circle was determined, numerical stability analysis was used to forecast the thickness of material which flow into the reservoir under different scenario conditions. Finally, the impulse waves which may occur in the reservoir were modelled by using 2D and 3D empirical equations and 2D numerical analyses.

**Key Words:** Mass movement, paleo-landslide, impulse waves, empirical equations, numerical analysis, Kirazlık village, Torul Dam



## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa No

|             |                                                                                                                                                                                                    |    |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1.  | Kirazlık paleo-heyelanı ve Torul Barajı için yer bulduru haritası .....                                                                                                                            | 6  |
| Şekil 1.2.  | Bektaş vd. (1995) tarafından bölümlenen Doğu Pontidler .....                                                                                                                                       | 11 |
| Şekil 2.1.  | Şevleri tanımlamada kullanılan terimler (Coduto, 2006) .....                                                                                                                                       | 26 |
| Şekil 2.2.  | Malzemenin türüne göre genelleştirilmiş yenilme tipleri a) düşme; b) devrilme; c) dairesel kayma; ç) ötelenmeli kayma; d) yanal yayılma; e) akma (Vallejo ve Ferrer, 2014).....                    | 28 |
| Şekil 2.3.  | Genelleştirilmiş bir toprak kaymasına ait blok diyagram (Varnes, 1978) .....                                                                                                                       | 31 |
| Şekil 2.4.  | Standart heyelan geometrisini ifade eden görünüşler (IAEG, 1990).....                                                                                                                              | 32 |
| Şekil 2.5.  | Standart heyelan boyutlarını ifade eden görünüşler (IAEG, 1990) .....                                                                                                                              | 32 |
| Şekil 2.6.  | Bir yamaçta su akış diyagramı (Prandini vd., 1977).....                                                                                                                                            | 37 |
| Şekil 2.7.  | a) Düşey dilimlere bölünmüş olan dairesel kayma yüzeyine etki eden kuvvetler, b) bir dilime etki eden kuvvetler (Duncan ve Wright, 2014) .....                                                     | 44 |
| Şekil 2.8.  | Güvenlik katsayısı değerlerinin dağılımı ve buna bağlı olarak duraysızlık ve güvenilirlik derecesi .....                                                                                           | 45 |
| Şekil 2.9.  | Kayan malzemenin suya göre durumuna bağlı gelişen itki dalgalarının oluşum tipleri a) malzemenin suya ilk temas ettiği an, b) malzemenin yarı batık olduğu an, c) malzemenin batık olduğu an ..... | 47 |
| Şekil 2.10. | İtke dalgalarının işleyiş mekanizması a) dalgayı tetikleyen evre, b) dalganın yayılım gösterdiği evre, c) dalganın sönümlendiği ya da bir engele çarptığı evre .....                               | 47 |
| Şekil 2.11. | İtke dalgalarının yayılım mekanizması a) doğrusal yayılma, b) radyal yayılma.....                                                                                                                  | 51 |
| Şekil 2.12. | İdeal bir sinüs dalgası üzerinde sunulan ana dalga parametreleri.....                                                                                                                              | 54 |
| Şekil 2.13. | Bir stokes dalgası profili ve dalga parametreleri .....                                                                                                                                            | 55 |
| Şekil 2.14. | Bir cnoidal dalga profili ve dalga parametreleri .....                                                                                                                                             | 56 |
| Şekil 2.15. | Bir solitary (tekil) dalga profili ve dalga parametreleri .....                                                                                                                                    | 57 |
| Şekil 2.16. | Bir geniş yutucu delik (bore) profili ve dalga parametreleri.....                                                                                                                                  | 57 |
| Şekil 2.17. | İtke dalgalarını kontrol eden parametrelerin gösterimi a) doğrusal yayılma, b) radyal yayılma .....                                                                                                | 58 |
| Şekil 2.18. | Hesaplama da kullanılacak parametrelerin sisteme girilmesi .....                                                                                                                                   | 59 |

|             |                                                                                                                                            |     |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 2.19. | Programın veri kontrol bölmesi .....                                                                                                       | 60  |
| Şekil 2.20. | Programın veri kontrol işlemi için bilgi (baraj/karşı kıyı) girilmesi.....                                                                 | 60  |
| Şekil 2.21. | Rezervuar tipine göre seçilen hesaplama için veri giriş ekranı.....                                                                        | 60  |
| Şekil 2.22. | Rezervuar tipine göre yapılacak hesaplamaların onay bölümü .....                                                                           | 61  |
| Şekil 2.23. | Hesaplama adımları .....                                                                                                                   | 61  |
| Şekil 2.24. | Kayan malzemenin hızının tespiti a) sabit eğimli, b) değişken eğimli<br>.....                                                              | 63  |
| Şekil 2.25. | Run-up ve dalganın baraj gövdesine olan etkisini tanımlayan<br>parametreler .....                                                          | 70  |
| Şekil 3.1.  | Bölgesel jeoloji .....                                                                                                                     | 76  |
| Şekil 3.2.  | Çalışma alanına ait jeoloji haritası .....                                                                                                 | 77  |
| Şekil 3.3.  | Çalışma alanına ait genelleştirilmiş stratigrafik kolon kesit .....                                                                        | 78  |
| Şekil 3.4.  | Çalışma alanına ait mühendislik jeolojisi haritası .....                                                                                   | 79  |
| Şekil 3.5.  | Çalışma alanına ait A-B kesiti .....                                                                                                       | 80  |
| Şekil 3.6.  | Sismik çalışmalar sonucunda oluşturulan jeolojik kesitler .....                                                                            | 83  |
| Şekil 3.7.  | ERT ölçümlerinin değerlendirilmesi sonucunda oluşturulan jeolojik<br>kesitler.....                                                         | 86  |
| Şekil 3.8.  | Nümerik tabanlı şev stabilite analiz sonuçları .....                                                                                       | 88  |
| Şekil 3.9.  | Kirazlık paleo-heyelanından kaynaklı itki dalgalarının özelliklerinin<br>belirlenmesi için temel girdi parametrelerini gösteren kesit..... | 90  |
| Şekil 3.10. | Kayan malzeme ve karşı kıyı arası A-B kesiti.....                                                                                          | 91  |
| Şekil 3.11. | Kayan malzemeyi baraj ile ilişkilendiren A-C kesiti.....                                                                                   | 91  |
| Şekil 3.12. | 0. saniyede rezervuarın durumunu gösterir sayısal model.....                                                                               | 99  |
| Şekil 3.13. | 76. saniyede rezervuarın durumunu gösterir sayısal model.....                                                                              | 100 |

## TABLÖLAR DİZİNİ

### Sayfa No

|             |                                                                                                                           |    |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablo 1.1.  | Gümüşhane iline ait 1961-2019 yılları arasındaki sıcaklık-yağış verileri (MGM, 2021) .....                                | 7  |
| Tablo 2.1.  | Yamaç hareketinin tipi ve yenilen malzemenin türüne göre yamaç hareketleri sınıflaması (Varnes, 1978) .....               | 27 |
| Tablo 2.2.  | Standart heyelan bölümlerini ifade eden tanımlamalar (IAEG, 1990) .....                                                   | 33 |
| Tablo 2.3.  | Standart heyelan boyutlarını ifade eden tanımlamalar (IAEG, 1990) .....                                                   | 34 |
| Tablo 2.4.  | Yamaç hareketi hızlarının sınır değerleri ve tanımları (Cruden ve Varnes, 1996) .....                                     | 38 |
| Tablo 2.5.  | Vallejo ve Ferrer'e (2014) göre malzeme koşullarını ve yamaçları etkileyen belirleyici faktörler .....                    | 38 |
| Tablo 2.6.  | Vallejo ve Ferrer'e (2014) göre malzeme koşullarını ve yamaçları etkileyen tetikleyici faktörler .....                    | 39 |
| Tablo 2.7.  | Yamaç hareketlerinin aktiviteye göre sınıflandırılması (WP/WLI, 1993) .....                                               | 40 |
| Tablo 2.8.  | Aktivite durumlarına göre heyelanların yaş ve tanım bilgileri (Keaton ve DeGraff, 1996) .....                             | 41 |
| Tablo 2.9.  | İtki dalgalarının fiziksel özelliklerinin tayini için önerilen beş yöntem .....                                           | 49 |
| Tablo 2.10. | İtki dalgası özelliklerinin tespitinde kullanılan yöntemlerin karşılaştırması (Heller vd., 2009) .....                    | 49 |
| Tablo 2.11. | Heyelan kaynaklı itki dalgalarının fiziksel özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan yöntemlerin karşılaştırılması ..... | 50 |
| Tablo 2.12. | Dalga genliğini ve maksimum dalga yüksekliğini kontrol eden temel parametreler .....                                      | 58 |
| Tablo 2.13. | İtki dalga hesaplamalarında sınır koşullar .....                                                                          | 66 |
| Tablo 2.14. | İlerleme yüksekliği (run-up) hesaplamadaki sınır koşullar .....                                                           | 71 |
| Tablo 2.15. | Torul Barajına ait bilgiler .....                                                                                         | 72 |
| Tablo 3.1.  | Sondaj kuyu numaraları ve koordinat değerleri .....                                                                       | 80 |
| Tablo 3.2.  | Çalışmada kullanılan sondajlara ait veriler .....                                                                         | 80 |

|             |                                                                                                                        |    |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablo 3.3.  | Heyelan malzemesine ait kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri .....                                               | 81 |
| Tablo 3.4.  | Sismik çalışmalardan (sismik kırılma ve MASW) elde edilen sonuçlar .....                                               | 83 |
| Tablo 3.5.  | Sismik çalışmalardan elde edilen veriler kullanılarak hesaplanmış zemin parametreleri .....                            | 84 |
| Tablo 3.6.  | Stabilite analizlerinde kullanılan girdi parametreleri.....                                                            | 87 |
| Tablo 3.7.  | Farklı senaryolar için dalga özelliklerini kontrol eden girdi parametreleri .....                                      | 89 |
| Tablo 3.8.  | Dalga özelliklerinin belirlenmesi için çarpma bölgesinde, karşı kıyıda ve barajda kullanılan girdi parametreleri ..... | 89 |
| Tablo 3.9.  | Baraj için gerçekleştirilen hesaplamalarda heyelan kaynaklı itki dalgalarının özellikleri .....                        | 92 |
| Tablo 3.10. | Karşı kıyı için gerçekleştirilen hesaplamalarda heyelan kaynaklı itki dalgalarının özellikleri .....                   | 93 |
| Tablo 3.11. | Senaryo 1 için ampirik formüllerin bu çalışma için kullanım sınırlamaları .....                                        | 94 |
| Tablo 3.12. | Senaryo 2 için ampirik formüllerin bu çalışma için kullanım sınırlamaları .....                                        | 94 |
| Tablo 3.13. | Senaryo 3 için ampirik formüllerin bu çalışma için kullanım sınırlamaları .....                                        | 95 |
| Tablo 3.14. | Senaryo 4 için ampirik formüllerin bu çalışma için kullanım sınırlamaları .....                                        | 95 |
| Tablo 3.15. | Simülasyona dayalı 2 boyutlu nümerik analiz için girdi parametreleri ve basitleştirilmiş sınır koşulları .....         | 98 |

## SEMBOLLER DİZİNİ

|                |                                                                                                          |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2D             | : İki Boyutlu                                                                                            |
| 3D             | : Üç Boyutlu                                                                                             |
| a              | : Yatay Yer İvmesi                                                                                       |
| $a_w$          | : Dalga Genliği                                                                                          |
| $a_i$          | : Daire Merkezi ile Dilimin Orta Noktası Arasındaki Yatay Mesafe                                         |
| $A_i$          | : Akış Alanı                                                                                             |
| AÇ             | : Araştırma Çukuru                                                                                       |
| AFAD           | : Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı                                                                 |
| $b_K$          | : Kret Genişliği                                                                                         |
| b              | : Kayan Malzemenin ya da Rezervuarın Genişliği                                                           |
| B              | : Göreceli Heyelan Genişliği                                                                             |
| c              | : Kohezyon                                                                                               |
| $c_w$          | : İtki Dalgasının Hızı                                                                                   |
| CBS            | : Coğrafi Bilgi Sistemleri                                                                               |
| D              | : Göreceli Heyelan Yoğunluğu                                                                             |
| DES            | : Düşey Elektrik Sondajı                                                                                 |
| DSİ            | : Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü                                                                       |
| $E_i, E_{i+1}$ | : Komşu Dilimlerden Etkiyen Kuvvetler                                                                    |
| f              | : Dalga Payı                                                                                             |
| $f_i$          | : Akışkan İvmesi                                                                                         |
| $F_w$          | : Froude Sayısı                                                                                          |
| F              | : Malzeme kuvveti                                                                                        |
| F              | : Güvenlik Katsayısı                                                                                     |
| FEM-SSR        | : Finite Element Analysis - Shear Strength Reduction<br>Sonlu Elemanlar Yöntemi - Kayma Dayanımı Azaltma |
| FEM            | : Finite Element Analysis<br>Sonlu Elemanlar Yöntemi                                                     |
| g              | : Yer Çekimi İvmesi ( $\approx 9,81 \text{ m/s}^2$ )                                                     |
| $G_i$          | : Katı Tane İvmesi                                                                                       |

|                 |                                                                                                                                |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| GPS             | : Global Positioning System<br>Küresel Konumlama Sistemi                                                                       |
| GWh             | : Gigawatt Saat ( $10^9$ Watt Saat)                                                                                            |
| h               | : Serbest Su Derinliği                                                                                                         |
| hm <sup>3</sup> | : Hektometreküp                                                                                                                |
| H               | : Dalga Yüksekliği                                                                                                             |
| H <sub>M</sub>  | : Maksimum Dalga Yüksekliği                                                                                                    |
| IAEG            | : International Association for Engineering Geology and The Environment<br>Uluslararası Mühendislik Jeolojisi ve Çevre Derneği |
| kN              | : KiloNewton (= $10^3$ kg·m/s <sup>2</sup> )                                                                                   |
| kPa             | : KiloPascal (= $10^3$ N/m <sup>2</sup> )                                                                                      |
| K               | : Kuzey                                                                                                                        |
| K               | : İki Fazın Etkileşimi ile İlgili Sürüklenme Katsayısı                                                                         |
| KD              | : Kuzeydoğu                                                                                                                    |
| km              | : Kilometre                                                                                                                    |
| km <sup>2</sup> | : Kilometrekare                                                                                                                |
| L               | : Dalga Boyu                                                                                                                   |
| L <sub>M</sub>  | : Maksimum Dalga Boyu                                                                                                          |
| LDS             | : Laser Distance Sensors                                                                                                       |
| m               | : Metre                                                                                                                        |
| m <sup>2</sup>  | : Metrekare                                                                                                                    |
| m <sup>3</sup>  | : Metreküp                                                                                                                     |
| mm              | : Milimetre                                                                                                                    |
| m/s             | : Metre / Saniye                                                                                                               |
| M               | : Göreceli Heyelan Kütlesi                                                                                                     |
| MASW            | : Multi-Channel Analysis of Surface Wave<br>Çok-Kanallı Yüzey Dalgası Yöntemi                                                  |
| MGM             | : Meteoroloji Genel Müdürlüğü                                                                                                  |
| MPa             | : MegaPascal (= $10^6$ N/m <sup>2</sup> )                                                                                      |
| Mw              | : Depremin Moment Büyüklüğü                                                                                                    |
| n               | : Kayan Malzemenin Gözenekliliği                                                                                               |
| N               | : Normal Kuvvet                                                                                                                |
| ohm.m           | : Ohm-Metre (= volt-metre / amper) ( $\Omega$ m)                                                                               |

|             |                                                                                                     |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $p$         | : Basınç                                                                                            |
| $P$         | : İtke Üretim Parametresi                                                                           |
| PIV         | : Particle Image Velocimetry                                                                        |
| $r$         | : Üç Boyutlu Analizler için Radyal Mesafe                                                           |
| $R$         | : Göreceli Yayılma Mesafesi (üç boyutlu)                                                            |
| $s$         | : Kayan Malzemenin Kalınlığı                                                                        |
| $S$         | : Göreceli Heyelan Kalınlığı                                                                        |
| $S, S_i$    | : Kaydırma Kuvvetleri                                                                               |
| SI          | : Uluslararası Birimler Sistemi                                                                     |
| SK          | : Sondaj Kuyusu                                                                                     |
| SRF         | : The Stress Reduction Factor<br>Dayanım Azaltma Faktörü                                            |
| $t$         | : Zaman                                                                                             |
| $T$         | : Dalga Periyodu                                                                                    |
| $T_M$       | : Maksimum Dalga Periyodu                                                                           |
| $u$         | : Gözenek Suyu Basıncı                                                                              |
| $u_{1,2}$   | : Sürekli ve Dağınık Fazların Mikroskobik Ölçekte Hızları                                           |
| $u_i$       | : Hız                                                                                               |
| $u_r$       | : Dağınık ve Sürekli Fazlar Arasındaki Nispi Hız Farkı                                              |
| $V_f$       | : Akış Hacmi                                                                                        |
| $V_S$       | : Kayan Malzemenin Çarpma Anındaki Hızı                                                             |
| $V_{SNK}$   | : Kayan Malzemenin Eğimin Değiştiği Noktadaki Hızı                                                  |
| $\forall$   | : Göreceli Heyelan Hacmi                                                                            |
| $\forall_S$ | : Kayan Malzemenin Hacmi                                                                            |
| $W, W_i$    | : Kayan Kütlenin / Dilimin Ağırlığı                                                                 |
| WMO         | : World Meteorological Organization<br>Dünya Meteoroloji Örgütü                                     |
| WP/WLI      | : UNESCO Working Party on World Landslide Inventory<br>UNESCO Dünya Heyelan Envanteri Çalışma Grubu |
| $x$         | : İki Boyutlu Analizler için Doğrudan Mesafe                                                        |
| $x_M$       | : Maksimum Dalga Genliğinin Çarpma Bölgesine Olan Uzaklığı                                          |
| $X$         | : Göreceli Yayılma Mesafesi (iki boyutlu)                                                           |
| $X_M$       | : Maksimum Göreceli Yayılma Mesafesi                                                                |

|                                 |                                                         |
|---------------------------------|---------------------------------------------------------|
| %                               | : Yüzde                                                 |
| °                               | : Derece                                                |
| °C                              | : Derece Selsiyus (Santigrat)                           |
| $\alpha, \alpha_N$              | : Kayan Malzemenin Yüzey ile Yaptığı Açısı (alfa)       |
| $\alpha_i$                      | : Dilimin Orta Noktasına Teğet Olan Doğrunun Eğimi      |
| $\beta$                         | : Run-up Açısı (beta)                                   |
| $\delta, \delta_N$              | : Dinamik Yatak Sürtünme Açısı (delta)                  |
| $\Delta Z_{SC}, \Delta Z_{SCN}$ | : Kayan Kütlenin Ağırlık Merkezinin Düşme Yüksekliği    |
| $\phi$                          | : İçsel Sürtünme Açısı (fi)                             |
| $\pi$                           | : Matematiksel Sabit (pi) ( $\approx 3,14$ )            |
| $\rho$                          | : Akışkan Yoğunluğu ( $\rho_o$ )                        |
| $\rho_s$                        | : Kayan Malzemenin Yoğunluğu ( $\rho_o$ )               |
| $\rho_w$                        | : Suyun Yoğunluğu ( $\rho_o$ )                          |
| $\gamma$                        | : Üç Boyutlu Analizler için Dalga Yayılma Açısı (gamma) |
| $\tan \delta$                   | : Şev Oranı (tanjant delta)                             |



## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Dünyada nüfus artışının son derece hızlı ve kontrolsüz olması var olan kaynakların hızla tüketilmesine ve dolayısıyla kaynak açığına yol açmaktadır. 19. yüzyıl başında 1 milyar olan dünya nüfusu günümüzde 7 milyarı geçmiş bulunmaktadır. Yapılan çalışmalar (Bahar, 2005; Turan, 2006; Koç ve Şenel, 2013) bu yüzyıl içerisinde önemli kaynak problemlerinin oluşacağını ön görmekte, en önemli kaynak probleminin ise kullanılabilir su ve enerjide meydana geleceğini göstermektedir. Bu problemler ile başa çıkmada yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ön plana çıkmakta (Yüksel ve Kaygusuz, 2011; Yılmaz, 2012; Seydioğulları, 2013) ve günümüz teknolojisinde yenilenebilir enerji konusunda barajlar hâlâ önemli yer tutmaktadır.

Günümüzde en çok enerji elde etmek amacı ile inşa edilse de tarihten bu yana çeşitli amaçlara yönelik ve bulunduğu yörenin coğrafi, ekonomik ve sosyal şartlarına göre baraj inşa edildiği bilinen bir gerçektir. Enerji üretmek, yerleşim yerlerine içme suyu sağlamak, taşkın önlemek, sulama ve son yıllarda madencilikte üretim sırasında akıp giden cevheri tutmak ve çevrenin kirlenmesini önlemek amacı ile barajlar yapılmaktadır. Jeoloji biliminin mühendislik işlerine en çok uygulandığı ve inşaat mühendisliği ile jeoloji mühendisliğinin en çok iş birliği yaptığı alanlardan biri olan baraj yapımında ayrıntılı jeolojik, jeoteknik ve depremsellik incelemeleri yapılmakta, baraj yeri, rezervuar alanı, baraj yapımında kullanılan malzeme, yağış ve çevre sorunları ayrıntılı olarak değerlendirilerek elde edilen olumlu sonuçlar neticesinde baraj inşasına başlanmaktadır. Gelişen teknoloji ile baraj inşasında her geçen gün daha ileriye gidilmektedir. Ancak her ne kadar baraj inşasında gelişim sağlansa da bir barajın yıkılması sonucunda yaşanan felaketlerin önüne geçilememektedir. Barajlarda yıkıma yol açan önemli sebeplerin başında depremler ve rezervuar sularının baraj yapısında oluşturdukları bozulmalar gelmekte, taşkınlar ise bir diğer önemli etkin faktörü temsil etmektedir. Taşkınlar baraj gövdesini aşabildiği gibi, rezervuar yamaçlarında da su yükselmesi meydana getirebilmekte, bu durum hem yamaçlarda tehlike oluşturmakta hem de suyun yamaçları da aştığı durumlarda bölgede bulunan yaşam alanlarını tehlikeye sokmaktadır. Taşkınlar aşırı yağış nedeniyle olabildiği gibi suyun yüksekliğini beklenenden fazla seviyede artıran rezervuara kütle düşmesi gibi sebeplerle de meydana gelebilmektedir.

Dünyada yaşanan baraj felaketleri sebebiyle barajların inşa edileceği yerlerde bulunan heyelanlar daha detaylı araştırılmaktadır. Sadece baraj gövdesinin bulunduğu alandakiler değil baraj rezervuar alanında bulunan heyelanlar da dikkatli bir şekilde incelenmeye başlanmıştır. Heyelan kaynaklı baraj felaketleri göz önüne alındığında, etkin olmayan paleo-heyelanların yeniden aktif hale gelmesi durumunda doğuracağı sonuçların yıkıcılığı hakkında bilgi sahibi olunabilmekte ve böylece durumun önemi ortaya çıkmaktadır. Ülkemizde baraj rezervuarında bulunan bir paleo-heyelanın yeniden aktif hale gelmesi durumunda rezervuarda oluşacak itki dalgalarının baraj gövdesine ve rezervuar kıyısına vereceği hasarların tahminine yönelik çalışmalar son derece kısıtlıdır. Deprem kaynaklı tsunami dalgalarının yayılımı ve oluşum mekanizmaları üzerinde son 50 yıl içerisinde çok sayıda çalışma yapılmasına karşın heyelan kaynaklı dalgalar üzerine yapılan çalışmalar dünyada son 25 yılda (Ramsden, 1996; Fritz vd., 2004; Heller, 2007; Kaczmarek vd., 2015; Yin vd., 2015) ülkemizde ise son 10 yılda önem kazanmıştır (Akgün, 2011; Akgün vd., 2017; Karahan vd., 2017, 2020a, b; Ersoy vd., 2019, 2020).

Artan iklim değişikliği ile birlikte ülkemizde fosil yakıt tüketimini azaltmak ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artırılması hedeflenmektedir. Bu amaçla güneş enerjisi ve sudan hidroelektrik santralleri ile üretilen enerji sistemlerine geçişin yaygınlaşması için çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar kapsamında Çoruh Nehri Havzası Rehabilitasyon Projesine başlanarak havzadaki şiddetli erozyon sebebiyle meydana gelebilecek sorunların çözümüne yönelik çalışmalar tamamlanmıştır ve inşaatı devam eden ve yapılması planlanan barajların rezervuarlarının kısa sürede dolma ve ekonomik ömürlerinin azalması riskinin bertaraf edilmesi amaçlanmaktadır. Aşağı Çoruh Havzasının içinde Artvin ilinde Muratlı, Borçka ve Deriner Barajları; Orta Çoruh Havzasının içinde Artvin ilinde Artvin ve Yusufeli Barajları ile Yukarı Çoruh Havzasının içinde Erzurum ilinde Arkun, Aksu, Güllübağ, İspir ve Laleli Barajları bu proje içerisinde yer almaktadır. Çoruh Nehri üzerinde bulunan bu barajlardan en önemlileri, Türkiye'nin en yüksek, dünyanın ise altıncı yüksek barajı olan Deriner Barajı ile yapımı devam eden ve 2022 yılında elektrik üretimine geçmesi planlanan, tamamlandığında da kendi kategorisinde Türkiye'nin en yüksek, dünyanın ise üçüncü yüksek barajı olacak olan Yusufeli Barajı'dır.

Bölgede akarsu sayısının fazla olması ve yüksek topoğrafyanın hâkim olması gibi jeomorfolojik özellikler sebebiyle Doğu Karadeniz Bölgesinde çok sayıda baraj bulunmaktadır. Bu açıdan Karadeniz Bölgesi baraj yapımı için elverişli olmasının yanı sıra sahip olduğu iklimin, toprak yapısının, bitki örtüsünün ve bunlara ek olarak jeolojik ve

jeomorfolojik özellikleri sebebiyle de heyelan olaylarının sık yaşandığı bir bölge olarak göze çarpmaktadır. Bölgenin bitki örtüsünün bozulması ve bu alanların yerleşim yeri ya da tarım arazisi olarak kullanılması heyelan oluşumunu tetiklemektedir (Bulut vd., 1995). Engebeli arazi yapısı, bol yağışlı iklim özellikleri, kayaçların ayrışma özellikleri ile bölgedeki doğal bitki örtüsünün kaldırılarak bu alanların drenajı olmayan çay ve fındık bahçelerine dönüştürülmesi, bölgede kırsal yerleşim birimlerinin dağınık yapılaşması ve bu dağınık yapılaşmaya paralel düşük standartlı ulaşım ağı sistemi ile ulaşım ağının drenaj sisteminin bulunmaması heyelanların oluşumunu hazırlayan ve tetikleyen faktörlerin başında gelmektedir (Pervanlar, 2016). Yağış rejimi, eğim miktarı ve toprak yapısının yanı sıra bakı ve topoğrafya gibi doğal etkenler ile birlikte tetikleyici unsur olarak insan kaynaklı etkenler de heyelanlara sebep olabilmekte ve bu heyelanlar genellikle akma veya dairesel kayma şeklinde olurken kayan malzeme de sığ derinlikte ve küçük ölçekli olmaktadır. Ancak yanlış yer seçimi, akarsu yataklarına yakınlık gibi durumlar telafi edilemeyen sonuçlara yol açabilmektedir (Pervanlar, 2016).

İnsan eliyle yapılan müdahaleler sonucunda morfolojide, gerilme şartlarında ve doğal dengede değişimler meydana gelmektedir (Alemdağ vd., 2014). Dünyada ve Türkiye’de çoğu zaman önemli ekonomik kayıplarla birlikte can ve mal kayıplarına da neden olan kütle hareketleri yaygın olarak görülen doğal afetlerden biridir (Alemdağ vd., 2015a.). Türkiye’de jeolojik, jeomorfolojik, sismolojik ve iklim şartları nedeniyle şiddetli yağışlarla ve depremlerle tetiklenen heyelanlarla karşılaşmak mümkündür (Ocakoğlu vd., 2002; Duman vd., 2005; Gökçeoğlu vd., 2005). Doğu Karadeniz Bölgesi yakından incelendiğinde baraj sayısının fazlalığı ve bölgede meydana gelen heyelanların çokluğu, baraj rezervuar alanlarında heyelan meydana gelmesi olasılığını arttırmakta ve bu olasılık önemli bir tehlike arz etmektedir. Ne tür bir iklimsel şartta ve sismik ortamda meydana geldiği bilinmeyen paleo-heyelanların analizi zordur ve analizi için çeşitli yüksek kaliteli veri gerektirir (Ocakoğlu vd., 2009). Su üzerinde meydana gelen heyelanlar daha yıkıcıdır. Çünkü malzeme eğimli bir yüzey boyunca kayma esnasında önemli ölçüde hızlanır (Bregoli vd., 2017). Heyelan ile harekete geçen kütlenin baraj rezervuarındaki su kütlesinin yerini, baraj gölünde dalgalar oluşturacak şekilde değiştirme potansiyeli vardır. Heyelan kaynaklı bu tür itki dalgalarının karakteristikleri baraj mühendisliği ve rezervuar planlaması açısından çok önemlidir (Ataie-Ashtiani ve Yavari-Ramshe, 2011). Oluşan bu itki dalgalarının, baraj gölüne düşen kütlenin fiziksel özelliklerine bağlı olarak baraj gövdesini aşması dahi söz konusu olabilir. Dalgaların baraj gövdesini aştığı durumlarda ya da aşındırdığı durumlarda

barajlarda yıkıcı etkinin meydana gelmesi kaçınılmaz olmaktadır. 1959 yılında İtalya’da Pontesei Rezervuarında meydana gelen ve 5 milyon metreküp hacimli bir heyelanın ürettiği itki dalgaları bir kişinin ölümüne neden olmuştur. Baraj gövdesi bu olaydan zarar görmese de rezervuarın kapasitesi yaklaşık %50 oranında düşmüştür (Semenza, 2002). 1963 yılında İtalya’nın kuzeyindeki Vajont bölgesinde yer alan bir beton barajı aşan dalgalar da itki dalgalarına bir örnek olarak gösterilebilmektedir. 1961 yılında kullanıma açılan Vajont Barajı 850 metre uzunluğunda ve 262 metre yüksekliğindedir. Baraj inşaatı tamamlandıktan sonra bölgede küçük çaplı heyelanlar olsa da bunlar maalesef pek dikkate alınmamıştır. Baraj çevresinde toprak koruma gereksinimleri yerine getirilmemiş ve su seviyesi emniyet düzenlemelerinin üzerine çıkarılmıştır. Büyük kireçtaşı kütlelerinin altındaki geçirimsiz ince kil tabakasının altında oluşan basınç tespit edilememiştir. Nihayetinde Toc Dağının tepesinden yaklaşık 300 milyon metreküplük kaya koparak baraj gölüne çarpmış, 250 metre yüksekliğinde ve 50 milyon metreküp hacminde bir dalga vadinin çevresindeki köyleri yok etmiştir (Panizzo vd., 2005a).

İtki dalgaları sadece baraj rezervuar alanlarında değil göl, fiyort ve körfez gibi doğal su rezervuarlarında da gelişmektedir Dünyada buna en çarpıcı örnek 1958 yılında Alaska’da meydana gelen ve dünya üzerinde en büyük dalga olarak kayıtlara geçen itki dalgasıdır. Alaska fayının kırılması ile meydana gelen deprem, Lituya Körfezi’nin kuzeydoğusunda bulunan 40 milyon metreküplük kaya kütlelerinin koparak 950 metre yükseklikten körfez sularına düşmesine neden olmuş ve bunun sonucunda 524 metre yüksekliğindeki itki dalgası ana kaya üzerindeki toprak örtüsünü kazıyarak milyonlarca ağacın yerinden sökülmesine yol açmıştır. Diğer taraftan, heyelan ile baraj gölüne ulaşan malzemenin oluşturduğu bu büyük dalgalar kıyıya ulaşarak ve kıyıda ilerlemeye devam ederek can ve mal kayıplarına neden olmaktadır. Anderson ve Riemer (1995) bu heyelanların genel olarak depremin etkisiyle oluşabildiğini ayrıca ani ve şiddetli yağışlara ve rezervuarlardaki ani su değişimlerine bağlı olarak gelişebildiğini söylemektedir.

Karadeniz Bölgesinin barajlar ve heyelanlar açısından bolluk durumu göz önüne alındığında, bölgedeki barajların rezervuar alanlarında oluşan kütle hareketleri ve bu hareketlerin oluşturacağı itki dalgaları ile bu dalgaların yıkıcı etkileri açısından hassas bir bölge olduğu ortadır. Bu tez çalışması ile Gümüşhane ilinde, Harşit Çayı üzerindeki Torul Barajı sahilinde yer alan Kirazlık paleo-heyelanının yeniden aktif hale gelmesi durumunda baraj rezervuarında oluşturacağı itki dalgalarının ve bu dalgaların olası etkilerinin incelenmesi planlanmıştır.

## 1.2. Çalışmanın Amacı

Bu tez çalışması kapsamında Gümüşhane ilinin, Torul ilçesi Kirazlık köyünde yer alan Harşit Çayı üzerine inşa edilmiş Torul Barajı'nın rezervuar alanını sınırlayan yamaçlarda meydana gelebilecek kütle hareketlerinin oluşturacağı itki dalgalarının, rezervuar alanında oluşturacağı dalga yüksekliği, oluşacak dalganın hızı ile karşı kıyıya ve baraj gövdesine ulaşma süresi ve karşı kıyıda ilerleme mesafesi gibi olası etkilerinin araştırılması ve çeşitli ampirik eşitlikler ve iki boyutlu nümerik analizler ile değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Torul Barajı'nın rezervuar alanının sol sahilini sınırlayan yamaçta olduğu bilinen paleo-heyelanın yeniden aktif hale gelmesi durumunda, meydana gelebilecek kütle hareketinden kaynaklı itki dalgalarının 731 metre uzaklıktaki baraj gövdesine ve 571 metre uzaklıktaki karşı kıyıya etkileri farklı senaryolar dikkate alınarak değerlendirilmiştir.

Çalışma kapsamında;

- (1) Baraj inşa edilmeden önce baraj gölünde bulunan paleo-heyelanlara yönelik DSİ 22. Bölge Müdürlüğü tarafından yapılan sondaja dayalı jeolojik ve jeoteknik çalışmalar incelenmiş,
- (2) Paleo-heyelan malzemesinin yatay ve düşey devamlılığının belirlenmesi ve malzeme karakterizasyonunu ortaya koymak amacıyla jeofizik ölçümler gerçekleştirilmiş,
- (3) Araştırma çukurlarından temin edilen örselenmemiş örnekler üzerinde deneyler yapılarak, heyelan malzemesinin dayanım parametreleri belirlenmiş,
- (4) İki boyutlu (2D) nümerik analizlerle özellikle depremli durum için stabilite analizleri yapılarak, olası kayma dairesinin konumu ortaya koyulmuş,
- (5) Nümerik stabilite analizlerinden elde edilen veriler kullanılarak farklı senaryolar için rezervuara akacak malzemenin uzunluğu ve kalınlığı tahmin edilmiş,
- (6) Rezervuarda oluşacak heyelan kaynaklı itki dalgalarının yayılımı iki (2D) ve üç (3D) boyutlu ampirik eşitlikler ve iki boyutlu (2D) nümerik analizler kullanılarak modellenmiştir.

Şekil 1.1. Kirazlık paleo-heyelanı ve Torul Barajı için yer bulduru haritası

| 1961-2019                               | AYLAR |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | YILLIK |
|-----------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
|                                         | I     | II    | III   | IV    | V     | VI    | VII   | VIII  | IX    | X     | XI    | XII   |        |
| A                                       | -1.90 | -0.50 | 3.60  | 9.20  | 13.50 | 17.00 | 19.90 | 20.10 | 16.30 | 11.10 | 4.90  | 0.30  | 9.50   |
| B                                       | 11.10 | 10.50 | 12.50 | 13.50 | 15.40 | 10.30 | 3.90  | 3.70  | 5.40  | 9.40  | 9.90  | 11.30 | 116.90 |
| C                                       | 35.60 | 31.40 | 43.70 | 58.90 | 69.00 | 47.60 | 12.50 | 13.70 | 21.40 | 43.90 | 41.90 | 42.00 | 461.60 |
| A: Ortalama Sıcaklık (°C)               |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |
| B: Ortalama Yağışlı Gün Sayısı          |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |
| C: Toplam Yağış Miktarı Ortalaması (mm) |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |

## 1.4. Literatür Özeti

### 1.4.1. Bölgesel Jeoloji

Ülkemizin jeolojisi açısından önemli yer tutan ve orojenik kuşaklar ile birbirinden ayrılan tektonik birimleri Ketin (1966) tarafından yapılan çalışma ile kuzeyden güneye doğru pontidler, anatolidler, toridler ve kenar kıvrımları olmak üzere dört ana grupta toplanmaktadır. Bu gruplar arasındaki litolojik farklılıklardan dolayı Ketin ve Canitez (1972) tarafından bir düzenleme yapılmış, pontid tektonik birliği doğu pontidler ve batı pontidler olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. Torul Barajını da içine alan çalışma alanı Ketin ve Canitez (1972) sınıflamasına göre doğu pontidler içerisinde yer almaktadır. Doğu pontidlerdeki Üst Kretase yaşlı birimler kuzey ve güney bölgelerinde farklılıklar gösterdikleri için çeşitli yazarlar tarafından güney (iç) ve kuzey (dış) olmak üzere bölünmektedir (Akın, 1979; Gedikoğlu vd., 1979; Özsayar vd., 1981). Bu bölünmeye göre çalışma alanını da içine alan kuzey bölümde Üst Kretase yaşlı kayalar çeşitlilik göstermektedir. Harşit yöresi incelendiğinde, bölgedeki birimler tabanda cevherli dasit adı verilen piritli dasidik kayalar ile başlamakta ve üste doğru bu dasitler yer yer volkano-tortul seri ile örtülmektedir (Aslaner vd., 1982).

Pontid orojenik kuşağının en tipik özelliklerinden olan ve belirgin olarak Liyas ile başlayan ayrıca tüm Mesozoyik-Senozoyik boyunca devam eden çekme gerilmesinin kısa süreli sıkışmalar ile ardalanma özelliği gösterdiği belirtilmektedir (Bektaş, 1985). Mesozoyik-Senozoyik dönemleri boyunca devam eden çekme gerilmesi ve kısa süreli sıkışmaların sonucunda pontidlerin güneyinde birden fazla rift havzasının oluştuğu ve bölgede okyanus tabanı yayılması gibi olayların geliştiği de vurgulanmaktadır (Bektaş vd., 1987). Yay bölgelerinde doğrultu atımlı fayların, yay gerisi bölgelerinde ise doğrultu atımlı faylar ile normal fayların oluşması; pontidlerin kuzeyindeki yatay basınç gerilmelerinin güneye doğru azalması ile ayrıca Alt-Üst Kretase arası, Üst Kretase sonu ve Eosen sonu dönemlerinde sıkışmanın hâkim olduğu yay bölgelerinde doğrultu atımlı fayların ve ters fayların gelişmesi ile ilişkilendirilmektedir.

Doğu Karadeniz güney zonunda Paleozoyik yaşlı kayalardan olan kristalen şistler ve granitler egemen iken (Zankl, 1961, 1962; Açar, 1977; Gedikoğlu, 1978) bu kayalar Doğu Karadeniz kuzey zonunda seyrek olarak görülmektedir (Arita ve Nishiie, 1985; Boynukalın, 1990). Temeli oluşturan metamorfik kayalar ise Liyas öncesinde Paleozoyik yaşlı



granitoyidik kayaçlar tarafından kesilmektedirler (Çoğulu, 1975). Granitoyidik kayaçlar, Gümüşhane yöresinde ve Gümüşhane-Köse arasında büyük plütonik kütleler halinde (Tokel, 1972; Çoğulu, 1975; Yılmaz, 1976; Özdoğan, 1992), Giresun'un güneyinde ise metamorfik kayaçlar ile birlikte küçük mostralara halinde görülmektedir (Schultze-Wetsrum, 1961).

Schultze-Westurm (1961), Doğu Karadeniz kuzey zonunda Liyas ile başlayıp Alt Kretase'nin sonuna kadar devam eden bazik volkanizmanın ürünlerini alt bazik seri olarak adlandırmaktadır. Bu seri kısmen Eosen'de de devam ederek üst bazik seriyi oluşturmaktadır. Malm-Alt Kretase yaşlı Berdiga kireçtaşları, Liyas yaşlı volkanik kayaçlar üzerine uyumlu olarak gelmektedir. Konglomera, kumtaşı, kireçtaşı, marn ve volkanitlerden oluşan Liyas yaşlı volkano-tortul kayaçlar, Gümüşhane bölgesinde Paleozoyik yaşlı Gümüşhane granitoyidi üzerine aşınma uyumsuzluğu ile gelmektedir.

Güven (1993), doğu pontid kuzey zonunda, tabanda, kumtaşı, silttaşı, marn, tuf ara katkılı bazalt-andezit ve piroklastlarından oluşan Üst Kretase yaşlı Çatak formasyonunun yaşını içindeki kırmızı-bordo renkli killi kireçtaşlarından saptadığı Globotruncana Lapparenti Brotzen, Globotruncana Limneiana, Globotruncana sp., Marginatruncana sp., Globigerinella sp., Globigerinelloides sp., Gümbelina sp., Hedbergella sp., fosil türlerine göre Turoniyen-Koniasiyen-Santoniyen olarak belirtmektedir. Çatak formasyonunun yaşı başka çalışmalar tarafından da Üst Kretase olarak saptanmaktadır (Gedikoğlu, 1978; Taslı, 1984; Arita ve Nishiie, 1985; Bulut, 1989; Yalçınalp, 1992).

Güven (1993), Doğu Karadeniz bölümünün 1/25000 ölçekli haritasını hazırlamış, bölgede yapılan eski çalışmaları yeniden derleyerek Doğu Karadeniz orojenik kuşağını kuzey zon ve güney zon olarak iki zona ayırmıştır. Buna göre; kuzey zonda Alt Kretase yaşlı kayaçlar üzerine Üst Kretase yaşlı kayaçlar uyumlu olarak gelmektedirler. Üst Kretase, tabanda kumtaşı, silttaşı, marn, tuf ara katkılı bazalt-andezit ve piroklastların oluşturduğu Çatak formasyonu ile başlamakta ve bunun üzerine uyumlu olarak yine Üst Kretase yaşlı riyodasit-dasit ve piroklastlarından oluşan Kızılkaya formasyonu gelmektedir. Riyolit-riyodasitik ve piroklastlarından oluşan Üst Kretase yaşlı Çayırbağ formasyonu tarafından uyumlu olarak üzerlenen, Üst Kretase yaşlı kumtaşı, marn, killi kireçtaşı ve tuf ara katkılı bazalt, andezit ve piroklastlarından oluşan Çağlayan formasyonu da Kızılkaya formasyonu üzerine uyumlu olarak yerleşmektedir. Doğu pontid orojenik kuşağının güney zonunda kumtaşı, marn, killi kireçtaşı, şeyl ve tuf aralanmalı, Üst Kretase yaşlı Mescitli formasyonu, Üst Jura-Alt Kretase yaşlı Berdiga formasyonu üzerine uyumlu olarak yerleşirken, Eosen

yaşlı, kumtaşı, kumlu kireçtaşı, marn ara katkılı andezit-bazalt ve piroklastlarından oluşan Kabaköy formasyonu ise tüm bu birimler üzerine uyumsuz olarak gelmektedir.

Jura-Kretase-Paleosen granitoidleri yitimle ilişkili volkanik veya volkanoklastik kayalarla dokanak halindedir (Arita ve Nishiie, 1985; Gedik vd., 1992; Köprübaşı, 1993, Yılmaz ve Boztuğ, 1996; Güngör vd., 1997, 1998; Kaygusuz, 2000; Köprübaşı vd., 2000; Boztuğ vd., 2002; Şahin vd., 2004). Eosen ve sonrası granitler daha sınırlı alanda olmakla birlikte yer yer tüm serileri kesmiş olarak görülmektedirler (Gedik vd., 1992; Yılmaz ve Boztuğ, 1996; Aslan vd., 1999; Boztuğ vd., 2002; Topuz vd., 2002, Arslan ve Aslan, 2006).

Bektaş vd. (1995), doğu pontidleri kuzey zon, güney zon ve eksen zonu olmak üzere üç bölüme ayırmaktadır. Kuzey zonun Mesozoyik ve Senozoyik yaşlı volkanik ve sokulum kayalarından; güney zonun Hersiniyenin temelini oluşturan metamorfik ve ultramafik kayalardan, eksen zonun ise peridotitler, gabrodiyoritler, Kretase yaşlı kırmızı kireçtaşları ve radyolarit gibi derin deniz pelajik sedimanter kayalardan oluştuğunu söylemektedir (Şekil 1.2).

Güven (1998), Trabzon civarında 1/100000 ölçekli jeoloji haritası hazırlayarak doğu pontidleri iki ayrı litostratigrafik bölüme ayırmaktadır. Bu bölümleri magmatizma ile ilişkilendirmekte, magmatizmanın yoğun olduğu bölümü kuzey zonu, magmatizmanın daha az etkin olduğu, tortul havza çökeliiminin aktif olduğu bölümü ise güney zonu olarak isimlendirmektedir.

Çalışma alanı doğu pontidlerin kuzey zonunda bulunmakta ve bu alanda Mesozoyik ve Senozoyik birimler yer almaktadır. Üst Kretase yaşlı bazik karakterli bazalt-andezit ve piroklastlardan oluşan Çatak formasyonu (Güven, 1993) ve Eosen yaşlı Kaçkar granitoidi bölgede egemendir.



Şekil 1.2. Bektaş vd. (1995) tarafından bölümlenen Doğu Pontidler

Çalışma alanının kuzeydoğu ve güneydoğu bölümlerinde riyodasit-dasit ve piroklastlarından oluşan Kızılkaya formasyonunun yaşı Güven (1993) tarafından Turoniyen-Koniasiyen-Santoniyen yaşlı Çatak formasyonu üzerine uyumlu olarak gelmesi ve Kampaniyen-Mestriştiyen yaşlı Çağlayan formasyonu tarafından uyumlu olarak örtülmesi nedeniyle Santoniyen olarak belirtilmektedir. Gedikoğlu (1978), Gülibrahimoğlu (1985), Arita ve Nishiie (1985), Korkmaz ve Gedik (1988), Bulut (1989), Boynukalın (1990), Yalçınalp (1992), Köprübaşı (1992) ise doğu pontid kuzey zonunda yaptıkları çalışmalarda Kızılkaya formasyonunun yaşını Üst Kretase olarak tanımlamaktadırlar.

Çalışma alanının güneyinde ve güneybatısında bulunun Eosen yaşlı Kaçkar granitoyidi (Güven, 1993) farklı araştırmacılar tarafından farklı isimlendirilmektedir. Birim, Arita ve Nishiie (1985) tarafından Sarıosman granodiyoriti, Çoğulu (1975) tarafından Rize graniti adı altında incelenmektedir. Doğu Karadeniz Bölgesindeki Üst Kretase yaşlı birimleri kesen ve Eosen yaşlı birimler tarafından uyumlu olarak üzerlenen granitoidler Kaçkar granitoyidi-I (Kk1), Eosen yaşlı birimler içerisine sokulum yapan intruzif kayalar ise Kaçkar granitoyidi-II (Kk2) olarak tanımlanmaktadır (Güven, 1993).

Eyüboğlu vd. (2017), coğrafi olarak Anadolu'nun kuzey bölümünde yer alan Doğu Pontid Orojenik Kuşağının, Alp-Himalaya sisteminin temel parçalarından birini oluşturduğunu ve çok çeşitli kaya türleri içerdiğini belirtmiştir. Kuşağın kuzey bölümü Geç Mesozoyik ve Senozoyik yaşlı volkanik kayalar ve ekonomik mineralizasyonlara (volkanojenik masif sülfid, epitermal altın-gümüş, porfir bakır-molibden ve skarn tipi ve kromit) ev sahipliği yapmaktadır (Eyüboğlu vd., 2014).

#### **1.4.2. Mühendislik Jeolojisi Çalışmaları**

Tüdeş (2001), çalışmasında Gümüşhane ilinin yerleşime uygunluğunu irdlemiştir. Şehrin eğim, jeoloji ve mühendislik jeolojisi ve arazi kullanım potansiyelini değerlendirmek amacıyla yerleşime uygunluk haritalarını hazırlamayı amaçlamış ve bu doğrultuda yerleşim yerindeki kaya ve zeminlerin jeoteknik özelliklerini belirlemiş, şehrin merkezinden geçen Harşit Çayının taşkın durumunu incelemiş ve depremsellik üzerine çalışmıştır. Elde ettiği tüm verileri Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ile analiz etmiş ve şehrin ve yakın çevresinin yerleşime uygunluk haritasını elde ederek yerleşime uygun olmayan, düşük derecede yerleşime uygun, orta derecede yerleşime uygun, iyi derecede yerleşime uygun, çok iyi derecede yerleşime uygun bölgeleri belirlemiştir.

Ceryan vd. (2008), Giresun ili, Doğankent ilçesi yakınlarında Harşit Çayı boyunca, 40 km<sup>2</sup>'lik bir alanda Üst Kretase-Eosen yaşlı granitik intrüzyonlarında hidrotermal alterasyon ve ayrışma ile meydana gelen mineralojik ve kimyasal değişimler sonucu kayaların fiziko-mekanik karakteristiklerini değerlendirdiği çalışmasında jeoteknik ve kimyasal testler yaparak aralarındaki istatistiksel ilişkiyi açıklamıştır. Çalışma alanındaki granitik kayaların jeoteknik özelliklerini değerlendirmek için en önemli ölçümün P dalga hızı olduğu sonucuna varmıştır.

Özdoğan (2010), Torul Barajının sağ ve sol sahilinde yer alan yamaçların duraylılığını incelemiştir. Yamaçların jeolojik kesitlerini hazırlayarak muhtemel kayma yüzeylerini ortaya çıkarmış, Basitleştirilmiş Bishop Janbu yöntemlerine göre bilgisayar destekli stabilite hesapları ile güvenlik katsayısı değerleri elde etmiştir. Elde edilen değerlere göre sağ ve sol yamaçta herhangi bir stabilite sorunun oluşmayacağı, ancak zeminin suyla doygun hale gelmesi halinde güvenlik katsayısının düşmesine bağlı olarak küçük ölçekli heyelanların olabileceği, Kirazlık köyü Omal Mahallesinin bu harekettten olumsuz

etkilenebileceği, riskli alanın üzerinde kalan Baş Mahallesinin ise bu hareketten etkilenmeyeceği sonucuna varmıştır.

Dağ vd. (2011), yaptığı çalışmada heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesinde kullanılan yöntem ve parametrelere ilişkin genel bir değerlendirmede bulunmuştur. Bu çalışmada, heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesinde kullanılan yöntemler ile ilgili yapılan değerlendirme çalışmalarından elde edilen verileri referans almış, sonraki çalışmaları da ekleyerek bu çalışmaları güncellemiş ve ulaştığı 118 çalışmayı kullanılan yöntem ve parametreler açısından değerlendirmiştir. Yamaç eğimi, litoloji ve ayrışma, bakı, arazi örtüsü, yükseklik, drenaj ağı ve ana faylara yakınlığın heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanmasında diğer parametrelere oranla daha sık kullanılan parametreler olduğu belirtilen çalışmada bu parametreler kullanılarak heyelan duyarlılık haritalarının hazırlandığı önceki çalışmalar değerlendirilmiştir. Buna göre; çakıştırma yönteminin ilk başlarda kullanıldığını, zamanla yapay zekâ (bulanık mantık ve yapay sinir ağları) yönteminin giderek önem kazandığını, araştırmacılar tarafından parametrelerin kullanımı hususunda henüz bir görüş birliği sağlanamadığını vurgulamıştır.

Alemdağ vd. (2014), 2008 yılında, Gümüşhane ilinde konut alanı oluşturmak için yapılan kazı sonrasında meydana gelen ve 1 hafta süre ile trafiğin durmasına ve ondan fazla evin yıkılmasına neden olan bir düzlemsel kayma yenilmesinin (Mordut heyelanının) mekanizmasını irdelediği çalışmada yenilme öncesi ve yenilme sonrası için kinematik, limit denge ve nümerik analizler yapmışlardır. Yapılan kinematik analizler ile düzlemsel kaymanın kontrol edildiği fay düzleminin ve yamacın yönelimi ortaya konulmuştur. Yenilme öncesi için limit denge ve sayısal analizler şevin duraysızlığına neden olan kritik koşullara sahip olduğunu göstermektedir. Şevin kazı ve patlatmadan etkilendiğini ve duraysızlığı üzerinde etkisi olduğunu savunmuşlardır.

Alemdağ vd. (2015a) yaptıkları çalışmada Gümüşhane ili'ne bağlı Bağlarbaşı-Tekke yerleşim alanları arasında, Gümüşhane granitoyidi içerisinde açılmış olan karayolu şevlerinde süreksizliklere bağlı olarak gelişecek yenilme türlerini ve güvenli şev yönelimlerini belirlemek amacıyla kinematik ve limit denge analizleri yapmış, yapılan çalışmalar sonucunda kaya şevlerinin duraylılığının belirlenmesinde kinematik analiz gibi olasılık analizlerinin optimum şev tasarımları için yeterli olmayacağını, kinematik analizlerden elde edilen sonuçların mutlaka limit denge analizleri ile kontrol edilmesi gerektiğini vurgulamıştır.

Alemdağ vd. (2015b) yaptıkları çalışmada Gümüşhane ilinin, Özkürtün ilçesinde, 1989 yılında afet bölgesi olarak ilan edilmiş Kalebaşı Bölgesinde yerleşim yerinde bulunan yamaç döküntüsü üzerinde jeolojik, jeoteknik ve laboratuvar çalışmaları yapmış, duraylılığını belirlemek amacıyla limit denge ve sayısal analiz yöntemleri kullanmıştır. Yapılan analizler sonucu tüm olumsuz koşullarda yamacın duraylı olacağı sonucuna varılmıştır.

Kaya vd. (2016), Gümüşhane ilinde, Gümüşhane İmam Hatip Lisesi ve yurdu yakınlarında yer alan kazı şevlerinde, farklı boyut ve bileşimde materyal ihtiva etmesi nedeniyle farklı mühendislik özelliklerine sahip yamaç akıntısının yenilme mekanizmasının belirlenmesi ve şev duraylılık analizlerinde detaylı jeoteknik çalışmalarının önemine vurgu yapmak amacıyla duraylılık analizi için limit denge analiz yöntemini kullanmıştır. Limit denge analizleri, en kötü koşullar ve depremsellik hesaba katılarak kazı öncesi ve kazı sonrası için değerlendirilmiştir. Çalışmada önerilen destek türünün olası heyelanları önleyerek şevi duraylı ve istikrarlı hale getireceği belirtilmiştir.

Alkan ve Dağ (2018), Gümüşhane ili merkezinde yüzeyleyen andezit ve monzogranit bileşimli magmatik kayaların fiziko-mekanik ve elastik özelliklerini belirlemek amacıyla laboratuvar deneyleri yapmış, bu deneyler sonucu elde edilen verileri basit regresyon analizi kullanarak istatistiksel olarak değerlendirmiştir. Bu değerlendirmelere göre korelasyon katsayısı yüksek olan ve istatistiksel olarak anlamlı bulunan ilişkilerin çalışma açısından önemli olduğunu vurgulamıştır.

#### **1.4.3. İtki Dalgaları ile İlgili Çalışmalar**

Synolakis (1987), düz ve eğimli plajlarda tekil dalgaların ilerleme yükseklikleri üzerinde çalışmıştır. Laboratuvar ortamında oluşturulan modellemeler ile yaptığı çalışmasında iki tür teori geliştirmiştir. Bu teoriler kırılmayan başka bir ifade ile kesintiye uğramayan dalgaların maksimum ilerleme yüksekliklerini tahmin etmekte, doğrusal teorelin maksimum ilerleme yüksekliğini net bir şekilde tanımladığını vurgulamıştır. Doğrusal olmayan teoriden türetilen yüzey profilleri tekil bir dalganın eşit dağılım ile iyi bir tırmanış sergilediğini açıklamaktadır. Tekil bir dalganın eğimli bir plaja tırmanırken kırılıp kırılmayacağını belirlemek için bir kırılma kriteri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar yükselme ilişkileri için ampirik hesaplamalarda kullanılmıştır.

Schuster ve Wiecezorek (2002), kütle hareketlerinin birçok nedenini ortaya koymuşlardır. Deprem ve yoğun yağış gibi klasik senaryolara ek olarak baraj su tutmaya başladığı esnada rezervuarda su seviyesinin ani değişimine neden olan 46 durum tanımlamışlar ve bu kütle hareketlerinin çok ender olarak önlenemediğini belirtmişlerdir. Bunlardan birisi de Yeni Zelanda'da Clyde rezervuarında meydana gelmiştir (MacFarlane ve Jenks, 1996). Çalışmada, kayma tehlikesinin olduğu bir durumda ampirik denklemler kullanarak erken risk değerlendirmesinin potansiyel tehlikeyi belirlemeye yardımcı olacağından, pratikte hızlı ve kolay uygulanan bu tür genel eşitliklerin dalga yüksekliği, baraj gövdesinde ilerleme yüksekliği gibi dalganın en önemli özellikleri için ilk tahminleri sağladığından ve itki dalgaları ile ilgili elde edilen bu bilgilerin de başka önleyici tedbirler alınırken yardımcı olabileceğinden bahsedilmiştir. Bu eşitlikler rezervuarın geometrisini hesaba katmadığı için sadece ilk tahminleri sağlamaktadır. Ancak itki dalgalarının rezervuar bölgesinin geometrisinden ve suyun derinliğinden büyük ölçüde etkilendiği de belirtilmektedir.

Walder vd. (2003), volkanik kökenli kütle akışlarından etkilenmesi muhtemel olan göl ve rezervuarlardaki dalgaların tehlikelerine dikkat çekmiş ve yanardağların etraflarının genellikle büyük ölçekli ve gevşek malzemelere ev sahipliği yaptığını ve patlama esnasında kütle akışlarının oluşabileceğini vurgulamıştır. Deniz altı kütle akışlarından kaynaklanan tsunamileri yaygın olarak tehlikeli olaylar olarak kabul edilen çalışmada, deniz altı kaynaklı ve su ile termal olarak etkileşime girmeyen kütle akışlarının yarattığı dalgalar yakınındaki dalga özelliklerine dikkat ederek incelenmiştir.

Fritz vd. (2004) heyelan kaynaklı itki dalgalarının ilk evresini Froude benzerliğine dayanan iki boyutlu laboratuvar modelinde incelemiştir. Gözlemlenen bu doğrusal ve kararlı olmayan itki dalgaları Froude sayısına göre sınıflandırılmıştır. Bunlar; doğrusal olmayan zayıf salınımlı dalgalar, doğrusal olmayan geçiş dalgaları, tek ve aynı dalgalar, yutucu geçiş deliğidir. Üretilen itki dalgalarının çoğu orta su derinliğinde oluşan dalga rejiminde yer almakta ve kinematik dalga enerjisinin %4-%50'si dalga hattından dışarı doğru yayılmaktadır. Klasik doğrusal olmayan dalga teorilerinin heyelan kaynaklı itki dalgalarına uygulanabilirlik aralıklarını belirlemiş ve dalganın ana karakteristiklerinin dalganın oluşmasını etkileyen heyelan parametreleri ile ilgili olduğunu ortaya koymuştur. Tüm sonuçlar 1958 yılında Alaska'da Lituya Bay Körfezi'nde bir deprem sonrası meydana gelen dev kaya yenilmesinin oluşturduğu ve karşı kıyıya vuran dalgalar ile karşılaştırılmıştır.

Panizzo vd. (2005a) laboratuvar deneyleri sonucunda çok sayıda fiziksel parametrenin bir fonksiyonu olarak heyelan kaynaklı itki dalgalarının özelliklerini belirleyen formüller elde etmiştir. Bu formülleri kullanarak 22 Mart 1959'da İtalya'da Pontesei rezervuarında, 4 Kasım 1960'ta ve 9 Ekim 1963'te Vajont vadisinde meydana gelen heyelanlardan üretilen itki dalgalarının özelliklerini tahminlere dayalı olarak belirlemiştir. Buna göre kullanılan ampirik formüller ile hem maksimum dalga yüksekliğinin hem de ilerleme yüksekliğinin başarılı bir biçimde tahmin edildiğini belirtmiştir.

Heller (2007), okyanuslarda, körfezlerde, göllerde ve rezervuarlarda; heyelanlar, kaya düşmeleri, kıyı duraysızlığı, çığ ve buzul devrilmeleri sonucu oluşan dalgaları itki dalgaları olarak tanımlamıştır. İtki dalgaları yer çekimi dalgaları olarak sınıflandırılmakta ve bu dalgaların barajları aşması sonucu büyük felaketler oluşabilmektedir. Vadi yamaçlarının eğiminin yüksek oluşu, yüksek hıza ulaşabilecek ve kayma potansiyeli olan malzeme hacminin fazla olması ayrıca çok sayıda rezervuara ev sahipliği yapması nedeni ile Alpler'in bu gibi olaylar açısından büyük risk altında olduğunu belirtmiştir. Çalışmasında dikdörtgen bir dalga kanalında taneli ve blok malzeme içerikli heyelanlar oluşturarak itki dalgaları üretmiş, deneyler sonucu elde ettiği ampirik eşitlikler yardımı ile dalgaların barajlar üzerindeki etkilerini irdelemiştir.

Di Risio ve Sammarco (2008), konik bir adanın kıyı kesiminde oluşan heyelanlardan kaynaklanan tsunamilerin fiziksel modellemelerini yapmıştır. Kıyı şeridi boyunca tsunami ilerleme yüksekliği için her bir dalganın rolü ve gelişimi ile ilgili detaylı analizleri sunan özel göstergeler kullanmıştır. Konik adanın kıyı kesiminde yapay olarak oluşturulan heyelana yakın alanda dalga akışının fazla olduğunu ve yaklaşık heyelanın büyüklüğünün iki katı mesafede azalmaya başladığını tespit etmiştir. İlk dalganın sadece heyelana en yakın alanda maksimum ilerleme yüksekliğine ulaştığını ve üçüncü dalga maksimum ilerleme yüksekliğine ulaştığında ise çok küçük bir duruma geldiği sonucuna varmıştır.

Wieczorek ve Snyder (2009), heyelan tehlike ve risklerinin gelişmesine neden olan yamaç hareketlerini izleyen farklı metotları tanıttıkları çalışmalarında heyelanı tetikleyen en önemli faktörlerin başında jeolojik, morfolojik, fiziksel ve insan faktörünün geldiğini vurgulamışlardır. Çalışmada şev hareketinin izlenmesinde heyelanın türünün belirlenmesi, heyelanı tetikleyen olayların gözlemlenmesi, heyelanın jeolojisinin belirlenmesi, hareketin ölçülmesi, heyelan tehlike ve risklerinin bölgesel değerlendirilmesi gibi beş temel unsurdan ve bu unsurları belirleyen yöntemlerden ayrıntılı bir biçimde bahsedilmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlar göstermiştir ki yamaç hareketinin tahmin edilmesi güç olsa da elde edilen



sonuçlar potansiyel tehlike arz eden bölgelerle doğrudan ilişkilidir. Ayrıca, heyelanların etkili biçimde izlenmesinin yürütülmesi için devlet ve üniversitelerin iş birliği içerisinde çalışması gerektiğini vurgulamışlardır.

Fritz vd. (2009), 10 Temmuz 1958 tarihinde Alaska'nın güney kıyısında Lituya Körfezinde meydana gelen bir deprem tarafından tetiklenen büyük bir heyelanının neden olduğu, maksimum yüksekliği 524 metre olan, devasa tsunaminin Froude sayısına dayalı, 1/675 ölçeğinde iki boyutlu laboratuvar modelini tasarlamıştır. Ayrıca bir tsunami jeneratörü tasarlayarak Lituya Körfezi heyelanının 1/400 ölçeğinde üç boyutlu fiziksel modellemesini yapmıştır. İki boyutlu analizlerde yüksek hızlı, taneli zemin heyelanları oluşturan pnömatik heyelan jeneratörleri kullanmış ve Particle Image Velocimetry (PIV), Laser Distance Sensors (LDS) gibi ölçüm teknikleri ile yüksek hızlı, taneli zeminlerin etkisi, yüksek hız dereceleri, akma yayılımı, hava formu, dalga üretimi ve ilerleme yüksekliği özellikleri belirlenmiştir. Kayma etkisinin karakteristikleri, dalga üretimi ve enerji dönüşümü gibi özellikleri belirlemek için üç boyutlu analizler kullanılmıştır.

Heller vd. (2009), günümüzde heyelan kaynaklı itki dalgalarının fiziksel özelliklerini belirlemede kullanılan genel formülleri kullanarak basit bir hesaplama aracı formüle eden bir kılavuz üzerinde çalışmıştır. Hesaplama araçları ve tablolar ile bu hesaplamaları kolaylaştırarak kullanıcıların daha hızlı ve etkin sonuçlar almasını sağlamıştır.

Heller ve Hager (2010), prizmatik bir dalga kanalında, Froude benzerliğine dayalı, taneli heyelan malzemesi ile itki dalgaları üreterek 211 adet deney yapmış ve bu deneylerde 7 adet temel parametre (sabit su derinliği, heyelanın hızı, heyelanın kalınlığı, heyelanın hacmi, heyelan malzemesinin yoğunluğu, kayma yüzeyi açısı, tane çapı) test edilmiştir. Bu deneyler sonucu elde edilen ampirik eşitlikler itki üretim parametresinin (P) bir fonksiyonu olarak ortaya çıkmıştır. Eşitliklerin doğruluğu 223 kez test edilmiş ve elde edilen sonuçlardan dalga yüksekliği ve genliği ile ilgili denklemlerin 1958 yılında Lituya Körfezinde meydana gelen olay ile kıyaslandığında uyumlu sonuçlar elde edildiği belirtilmiştir.

Kaczmarek vd. (2015) tarafından yapılan çalışmada, Polonya'nın kuzeyinde, Dobrozyn Kasabasında, Vistula Nehri zerinde, Wloclawek rezervuarı kıyısında düz bir arazide yer alan ve rezervuar inşa edilmeden önce 1970'li yıllarda aktif olan 20000 m<sup>2</sup>'lik bir alanı kapsayan ve 160000 m<sup>3</sup> hacme sahip bir heyelanın dinamiği araştırılmıştır. Son 40 yıl içerisinde üç kez aktif hale geçen bu heyelanın ilk hareketi rezervuarın dolmaya başladığı dönemde meydana gelmiştir. Barajın dolmaya başlaması ile meydana gelen hidrolojik ve

morfolojik değişimlere bağlı olarak heyelanın dinamiğinde artış meydana geldiği vurgulanmıştır. 2010 yılı yaz ve sonbaharında yoğun yağışlar ve karların erimesi ile meydana gelen iklimsel değişiklikler sonucu oluşan son heyelanın kayda geçen heyelanların en büyüğü olduğu, 2011 yılı mart ayından bu yana herhangi bir hareketin gözlenmediği belirtilmiştir.

Akgün vd. (2017), Doğankent'in (Giresun) karşısındaki yamaçta bulunan paleo-heyelan malzemesinin olası hareketinin Aslancık Barajına ve Doğankent ilçesine olan etkilerini araştırmış, iki boyutlu analizler kullanarak hareket edecek olan heyelan kütlesinin hacmini, hareket sonucu oluşacak olan dalganın boyunu, hızını ve ilçeye doğru ilerleme mesafesini hesaplamış ve buna göre olası bir harekette Aslancık Barajının ve Doğankent ilçesinin olumsuz yönde etkilenebileceğini belirtmiştir.

Karahan vd. (2017), Tersun Barajı (Gümüşhane) memba kısmı sol sahilinde baraj gövdesine 1.5 km uzaklıkta bulunan paleo-heyelanın, akma ve kabarma bölgelerinin, barajın işletme seviyesine ulaşması neticesinde sular altında kalacağını belirtmiştir. Heyelan malzemesinin yeniden aktif hale gelmesi durumunda baraj göl alanına blokların dolması ile birlikte su seviyesinin yaklaşık 8 metre yükseleceğini, 24.5 m/s hızla suya ęarpan blokların yüksekliği 33 metre, hızı 22 m/s olan dalgalar oluşturacağını hesaplamıştır. Ayrıca dalgaların karşı kıyı için ilerleme yüksekliğinin 30 metre, baraj gövdesine ulaşma süresinin 68 saniye ve gövdeye ulaştığında itki dalgalarının boylarının 10 metre olacağını ampirik eşitlikler kullanarak belirlemiştir. Bunun sonucu olarak da bu dalgaların baraj gövdesine, karayoluna ve Tersun Barajı mansabında bulunan Gökçeler köyü'ne zarar verebileceğini öngörmüştür.

Tessema vd. (2019), bir rezervuarın uzun eksenine dik bir heyelanın rezervuara ęarpması sonucu oluşan itki dalgalarının barajı aşması olayını üç boyutlu olarak açıklamıştır. Çalışmada heyelanlar tarafından üretilen itki dalgalarının barajı aşması olayı üç boyutlu fiziksel modeller kullanılarak irdelenmiştir. Deneylerin sonuçlarına bakıldığında barajı aşan su kütlesinin hacmi ile heyelanın hacmi, heyelanın düşme yüksekliği, heyelan malzemesinin hızı, su derinliği ve barajın yüzünün yamaca eğimi arasında boyutsuz ampirik bir ilişki ortaya çıkmıştır. Barajı aşan su kütlesinin hacmi için tahmin edilen ilişkiler spesifik modelleme yapılarak sunulmuş ve sonuçlar daha önce meydana gelmiş bir olay ile kıyaslanmıştır. Dalgaların barajı aşması sürecinin önemli bir durum olduğunu, bu olayın zaman ve mekandaki farklılıklara göre değişkenlik arz edebileceğini ve bu durumda barajı aşan su kütlesinin hacminin de değişeceğini belirtmiştir. Bu nedenle barajın güvenliği için üç boyutlu modellemenin önemli olduğunu vurgulamıştır.

Ersoy vd. (2020), Artvin iline bağlı Borçka ilçesinde n yüzü beton kaplamalı kaya dolgu baraj olan Borçka Baraj rezervuarında baraj gövdesine 4 km uzaklıkta bulunan paleo-heyelan malzemesinin yeniden aktif hale geçmesi durumunda rezervuarda oluşacak itki dalgalarının etkilerinin ampirik eşitlikler kullanılarak belirlenmesini amaçlamışlardır. Üç farklı senaryo geliştirdikleri çalışmalarında heyelan kaynaklı itki dalgalarının rezervuarın geometrisi baz alındığında radyal (dairese) olarak yayılacağını belirlemiş, dalga özellikleri üç boyutlu ampirik eşitlikler kullanılarak değerlendirilmiştir. Her bir senaryo için dalga hızları, en yüksek ve en düşük dalga hızı değerleri için dalga yükseklikleri ve karşı kıyıda ilerleme yükseklikleri belirlenmiştir. Rezervuar boyunca ilerleyerek baraj gövdesine ulaşacak olan dalganın, barajda bırakılan dalga payı dikkate alındığında herhangi bir olumsuz etki oluşturmayacağı kanaatine varılmıştır. Basit rezervuar geometrileri ve kısa mesafeler için ampirik eşitliklerin kullanılması önerilirken karmaşık geometriye sahip rezervuarlarda üç boyutlu nümerik modellerin kullanılması, heyelan hacminin yamaç stabilize analizleri uygulanarak hesaplanması gerekliliği vurgulanmıştır.

#### **1.4.4. İtki Dalgalarının Değerlendirilmesinde Nümerik Model alışmaları**

Ataie-Ashtiani ve Yavari-Ramshe (2011), İran'ın kuzeyinde Maku kasabasının güneyinde Zangmar Nehri üzerinde bulunan Maku Barajı ve İran'ın Gilan Bölgesinin batısında Rezvan Shahr şehrine 4 km uzaklıkta bulunan Astara Fayına 1 km uzaklıkta sismik olarak oldukça aktif bölgede yer alan Shafa-Roud Barajı rezervuarında heyelan kaynaklı oluşacak itki dalgalarının karakteristiklerini araştırmak için sayısal model kullanmışlardır. Heyelan kaynaklı dalga simülasyonlarını 4 aşamada oluşturmuşlardır. Bunlar dalganın üretimi, yayılımı, barajı aşma durumu ve ilerleme yüksekliğidir. Yazarlar tarafından dalga üretimini, yayılımını ve ilerleme yüksekliğini simultane eden Boussinesq tipli LS3D model geliştirilmiştir. Modeli doğrulamak için bir dizi üç boyutlu deneysel veri kullanılmıştır. Çalışmaların sonucunda Maku Rezervuarında iki farklı senaryo simultane edilmiş ve heyelan kaynaklı dalgaların barajı aşmayacağı, Shafa-Roud Rezervuarında geliştirilen üç farklı senaryoda ise dalgaların konutlara ve tarım arazilerine zarar verebileceği belirtilmiştir.

Mohammed ve Fritz (2012), Amerika Birleşik Devletleri'ne bağlı Oregon Eyaletinde bulunan Oregon Eyalet Üniversitesi Deprem Mühendisliği Simülasyon Ağının tsunami dalga havzasında gerçekleştirdikleri çalışmada su üstünde ve su altında meydana gelen heyelan hareketleri, tsunami dalga üretimi, dalga yayılımı ve dalganın kıyıda yanal

ilerleyişini araştırmış, doğal heyelan malzemesi kullanarak modellenen heyelanlar ile tsunami dalgaları üretilerek fiziksel modellemeler yapmışlardır. Çalışmacılar tarafından farklı su derinliklerinde, çeşitli heyelan parametreleri ile dalga üretimi ve dalga yayılımı incelenmiştir. Dalga üretiminin Froude sayısı, heyelanın kalınlığı, genişliği ve uzunluğu gibi parametrelerden etkilendiği belirlenmiştir. Ayrıca üç boyutlu dalga üreticilerinin iki boyutlu üreticilere oranla daha az verimli olduğu, bunun nedeninin ise üç boyutta heyelan deformasyonundaki artış, heyelanın yayılması ve enerjinin radyal olarak dağılması gösterilmiştir.

Zhao vd. (2014), Alaska'nın kuzeyinde 1958 yılında Gilbert Dağından kopan yaklaşık 3 milyon m<sup>3</sup> hacminde kaya bloklarının Lituya Körfezine olan etkisini modellemişlerdir. Çalışmacılar, 1/675 ölçeğinde iki boyutlu fiziksel modelleme ve sayısal modelleme ile heyelanın etkisini gösteren yoğunluk görüntü dizisi elde ederek, heyelan kaynaklı itki dalgalarının temel sürecini ortaya koymuşlardır.

Smith vd. (2016), sonlu elemanlar yöntemi (Fluidity) kullanarak su altında oluşan heyelanlar tarafından üretilen dalgaları modellemiştir. Sediment model (sediment, su ve serbest yüzey) yaklaşımının yanında iki malzemeli (serbest yüzey ile kayma ve su) ve üç malzemeli (kayma, su ve hava) yaklaşımı kullanmıştır. Tüm durumlarda kayma olayı sıvı gibi davranmıştır. Çalışmada her yaklaşımın avantajları ve dezavantajlarının olduğu ortaya çıksa da kayma geometrisi, deformasyon ve dinamiklerin öneminin gelecekteki çalışmalar için yarar sağlayacağı belirtilmiştir.

Bregoli vd. (2017), büyük depremler ile harekete geçen blokların herhangi bir heyelan etkisi ile harekete geçen blok boyutundan çok büyük olmasına karşın, yakın alana veya kapalı bir havzaya etki eden heyelanlar sonucu meydana gelen yüksek dalga ilerlemeleri veya dalganın barajı aşması durumu daha muhtemel olduğundan bahsetmiştir. Çalışmada, su altı heyelanlarına göre daha yıkıcı etkiye sahip su üstü heyelanlarının tetiklemesi neticesinde oluşan tsunami sonucu meydana gelebilecek tehlikeyi ölçebilen ampirik eşitlikler nümerik simülasyonlar ile oluşturulmuştur. Barselona'da Sediment Transport Research Group Laboratuvarında kurulan düzenek ile heyelan ve dalga arasındaki ampirik eşitlikleri tanımlamak için 41 adet deney gerçekleştirilmiştir. Bu eşitlikler 2007 yılında Canada'da 3 milyon m<sup>3</sup> malzemenin Chehalis Gölü'ne düşmesi sonucu meydana gelen tsunami üzerinde test edilmiştir. Bu gerçek olayla benzerlik elde etmek için heyelanın yüksek hıza, dolayısıyla yüksek bir Froude sayısına ulaşması hedeflenmiştir. Bu hızlanmayı sağlayacak heyelan parametrelerinin de ölçülebildiği bir sistem geliştirilmiştir. Çalışmalar

sonucunda heyelan ve tsunami arasındaki enerji dönüşümünün etkisinin düşük olduğu, heyelanın enerjisinin yutucu etmenler ile düştüğü belirlenmiştir. Ölçülen ve tahmin edilen değerler arasında yüksek korelasyon saptanmıştır.

Bazykina vd. (2018), Ukrayna'ya bağlı Kırım Özerk Cumhuriyetinin güney sahilinde, Karadeniz'e kıyısı bulunan Yalta şehrinin 30 km doğusunda, 12 Eylül 1927 tarihinde meydana gelen depremin yol açtığı tsunaminin etkilerini nümerik simülasyon kullanılarak araştırmıştır. Elips şeklinde bir denizde meydana gelen tsunaminin halka şeklinde ve tüm deniz boyunca yayılan dalgalar oluşturacağı öngörüsü ile, yazarlar, tüm Karadeniz Bölgesinde bu tsunami kaynağından gelen dalgaların evrimini incelemişlerdir. Modelleme sonuçları mareograf kayıtları ile karşılaştırılmıştır. Dalgaların etkisine en duyarlı alanların tsunami bölgesine yakın alanlar olduğu, ayrıca Yalta Bölgesinde deniz seviyesini aşan dalgalar oluşturduğu tespit edilmiştir. Özellikle daha yıkıcı etkiye sahip dalga yayılımlarının olduğu güney Kırım Bölgesinde yapılan detaylı incelemelerde tsunaminin ilerleme yüksekliğinin 2 metre olduğu, bazı noktalarda ise denizin 3 metre düşebildiği belirlenmiştir.

Ersoy vd. (2019) Artvin Barajı'nın (KD Türkiye) 2015 yılının Eylül ayında su tutmaya başlaması ile rezervuar alanında bulunan paleo-heyelanın topuk kısmının su altında kalması sonucunda heyelan malzemesinin yeniden aktif hale gelmesi ile oluşacak itki dalgalarının etkilerini ampirik yaklaşımlar ve simülasyon tabanlı üç boyutlu sayısal analizler kullanarak belirlemişlerdir. Jeoteknik modeli belirlemek için 21 adet sondaj çalışması ile 20 farklı profilin elektrik öz direnç ve sismik yansıma çalışmaları yapılmıştır. Paleo-heyelan malzemesinin olası hareketi sonucu karşı yamacı etkileyecek dalgaların 27.6 metre yüksekliğe ulaşacağını, bu dalgaların yayılma hızının 31 m/s olacağını ve baraj gövdesine ulaşınca kadar sönümlenerek 2.5 m/s hızına düşeceğini, Yusufeli Baraj inşaatına ulaşınca kadar ise 1.5 m/s hızına düşeceğini ön görmüşlerdir. Artvin Baraj gövdesine ulaşan itki dalgalarının baraj gövdesinde bırakılan dalga payından büyük olamayacağından ötürü bu dalgaların olumsuz bir etki oluşturmayacağını belirtmişlerdir. Ampirik yaklaşımlar ile üç boyutlu sayısal analiz sonuçları karşılaştırıldığında sonuçların birbiri ile aynı olmamasını ise topoğrafyanın etkisinin ampirik eşitliklerde ihmal edilmesine bağlamışlardır. Bu eşitliklerde rezervuar ve yüzey geometrisinin hesaba katmanın gerekli olduğunu belirtmiş ayrıca Artvin Barajı örneğinde olduğu gibi dalga yayılımının çok uzak olduğu durumlarda itki dalgalarının etkilerini ortaya koymak için üç boyutlu sayısal analizlerin tercih edilmesini önermişlerdir.

Zhang vd. (2020), Çin'in Yangtze Nehrinde heyelan kaynaklı itki dalgaları nedeni ile ciddi kayıplar yaşanan Three Gorges Rezervuarının kıyıları boyunca rezervuar geometrisinin dalga üzerindeki etkisini araştırmak üzere Tsunami Square modeli kullanarak 14 adet sayısal modelleme yapmıştır. Çalışmacılar genişleyen rezervuar modelinde açının artması ile rezervuar geometrisinin itki dalgaları üzerindeki etkisinin zayıfladığını, dalga yükseklikleri ve dalga genliklerinin rezervuarın genişlemesi ile azaldığını belirlemiştir. Daralan rezervuarlarda ise dalga genliklerinin rezervuar geometrisinden çok az etkilendirken dalga boyları ve başlama zamanının daha fazla etkilendiğini ortaya koymuştur. Daralan rezervuarlarda genişleyen rezervuara kıyasla dalga bozunma hızındaki fark daha küçüktür. Bu da dalga bozunumunun genişleyen hazne geometrisinden daha fazla etkilendiğini gösterdiğini belirtmiştir.

Karahan vd. (2020a), heyelan kaynaklı itki dalgalarında ölçek etkisi ve hareket eden kütlelerin suya çarpma hızlarını farklı yöntemler kullanılarak modellemişlerdir. Çalışma kapsamında tasarlanan bir hidrolik model üzerinde fiziksel deneyler yaparak elde ettikleri sonuçları, FLOW-3D programı kullanılarak yapılan nümerik analizlerle karşılaştırmışlardır. Basit rezervuarlar ve kısa mesafeler için ölçek etkisinin önemsiz olduğunu ve hesaplamalarda ampirik ilişkilerin yeterli olabileceğini savunmuşlardır.

Karahan vd. (2020b), Tersun Barajı rezervuarında bulunan paleo-heyelanların oluşturacağı itki dalgalarının tahminine yönelik 2017 yılında yapmış olduğu çalışmaya ek olarak üç boyutlu simülasyonlara dayalı nümerik analizlerin kullanıldığı çalışmalar da gerçekleştirmiştir.

## 2. ÇALIŞMADA KULLANILAN GENEL KAVRAMLAR

### 2.1. Heyelanlar

Dünyamız, etkilendiği jeodinamik süreçlerin sonucunda farklı hız ve büyüklükteki kütle hareketleri ile sürekli olarak şekillenmekte, geçmiş oldukları jeolojik ve iklimsel süreçlerin tamamı yamaçların jeomorfolojisini belirlemektedir. Yamaçlar doğal bir açı ile dengede kalabilmekte ancak bu dengenin bozulması ile yamaçlar duraylılıklarını yitirmekte ve kütle hareketleri meydana gelmektedir. Yamaç dengesinin bozulmasının, malzemenin hareketlenmesindeki en önemli sebep olduğu bilinmektedir (Waltham, 2006). Denge durumunu bir kez yitiren yamaçlar aynı koşullar ile tekrar dengede kalamazlar. Bu sebeple yamaçların farklı bir denge durumuna ulaşabilmesi için var olan yer biçimini (jeomorfolojisini) değiştirmesi gerekmektedir. Dolayısıyla kütle hareketleri, değişiklik gösteren koşullar altında yamacın denge durumuna tekrar ulaşması için meydana gelen yer hareketleri ya da yer düzenlemeleri olarak tanımlanabilmektedir (Vallejo ve Ferrer, 2014).

Literatürde doğal eğimli bölgeler yamaç olarak tanımlanırken özel bir amaç için eğimlendirilen bölgeler ise şev olarak adlandırılmaktadır. Yamaçlar, var olan topoğrafyanın bir parçası olup doğal eğime sahip yüzeyler ile tanımlanmaktadır (Coduto, 2006). Şevler, kara yolları için kalıcı veya maden ocakları için geçici olarak tasarlanabilmektedir. Bu ifadelerin yanı sıra çeşitli çalışmalarda mühendislik uygulamaları için oluşturulan şevler; dolgu şevi, yarma şevi, kazı şevi ya da yapay şev olarak adlandırılmakta, doğal olarak kendiliğinden oluşmuş yamaçlar ise doğal şev olarak tanımlanabilmektedir (Keskin, 2008). Bir kazı gerçekleştirilerek meydana getirilen eğimli bölgeler yarma/kazı şevi terimleri ile belirtilmekte ve kazı öncesinde gömülü olan zemin yarma şevleri sonucunda açığa çıkmaktadır. Dolgu şevi terimi ise yarma şevlerinden farklı olarak bölgeye malzeme eklenmesi ile oluşturulan eğimli bölgeleri ifade etmektedir.

Yamaçlar, içerdikleri malzeme bütünlüğünün içsel sürtünme açısından ( $\phi$ ) daha fazla eğimli olan bölgelerde, tutuculuğunu kaybederek yenilme göstermektedir. Farklı jeolojik malzemeler için farklı bir denge açısı olduğu örneğin killerin ya da kil ağırlıklı birimlerin  $10^\circ$ 'den büyük eğimlerde duraysız davrandığı ve kaymaya elverişli oldukları bilinmektedir (Waltham, 2006). Yamaç duraylılığı malzemenin sadece içsel sürtünme açısına bağlı olmamakla birlikte jeolojik malzemenin çeşitli dış etkenler ile zamana bağlı olarak ayrışması

ve bozuşması da malzemenin dayanımını azaltmaktadır. Bunun sonucunda yer çekimi kuvvetinin de etkisiyle malzemeler zayıflık gösteren zonları boyunca duraysız davranmakta ve tekrar duraylı olabilmek için hareketlenmektedir. Yağış gibi doğal dış uyaranların etkisiyle malzemenin zayıflık gösteren bölgeleri etkilenmekte, malzeme kaymaya elverişli hale gelmekte ayrıca depremler ile de yamaç hareketleri doğrudan tetiklenmektedir. Bu kütle hareketleri, ayrışma ve bozuşma ile meydana gelen zeminlerin veya kaya parçalarının yer çekimi kuvveti sebebiyle yamaç aşağı sürüklenmesi, düşmesi, kayması şeklinde gerçekleşebilmekte veya kimi zaman çökme olarak da meydana gelebilmektedir. (Vallejo ve Ferrer, 2014). Kayma gerilmesinde ani bir yükselime sebep olan ya da kayma dayanımını azaltan yağış, deprem, yer altı suyu seviyesindeki değişiklik gibi doğal olaylar ile veya insan kaynaklı her türlü yapay olaylar sebebiyle jeolojik malzeme tetiklenebilmekte ve malzemede hareketlenme gözlenebilmektedir (Guzzetti vd., 1999; Dai vd., 2002). Kütle hareketleri eğimli topoğrafyalarda gözlenmekte, hareket halindeki malzeme bir vadiye, akarsu yatağına, deniz veya göl ortamına ulaşarak hareketini sonlandırmaktadır. Heyelanların hareket mekanizmasının çok yavaş veya çok hızlı (ani) ölçekte değerlendirilebildiği ve kütle hareketlerinin yeryüzünün jeomorfolojik olarak şekillenmesinde etkili oldukları bilinmektedir (Rahn, 2015).

Yamaç yenilmeleri çok ciddi seviyelerde can ve mal kaybına neden olabileceği gibi, insan etkinliğinin olmadığı alanlarda meydana gelen çok ciddi boyutlardaki yamaç yenilmeleri de sadece tekil birer doğal olay olarak kalabilmektedir. Bu yenilmeler doğrudan veya dolaylı olarak alt ve üst yapıları, canlı yaşamını etkiledikleri aynı zamanda ekonomik kayıplara ve sosyal hasara neden oldukları için çeşitli riskleri de barındırmaktadır. Bu risklerden uzak durmak için heyelanların yenilme mekanizmalarının ve karakteristiklerinin, bu heyelanları kontrol eden ve heyelanların hareketine neden olan etkenlerin incelenmesi gerekmektedir. Bu sebeple, hareket edecek olan jeolojik malzemenin (zemin/kaya) jeoteknik, jeolojik, hidrojeolojik niteliklerinin bilinmesi, mekanik davranışlarının belirlenmesi ve ilgili birimlerin hareketini tetikleyen tüm uyaranların araştırılması gerekmektedir (Vallejo ve Ferrer, 2014). Zaman zaman duraysız yamaçlarda veya yakınında da bir mühendislik projesinin uygulanması gerekli olabilmektedir. Bu durumlarda yamaçların yakınında gerçekleştirilen projelerin de meydana gelecek yenilmelerden etkileneceği aşîkardır. Kimi zaman karşılıklı olarak birbirini tetikleyerek meydana gelen yıkıcı yamaç yenilmeleri olabildiği gibi, tek başına meydana gelen bir yamaç yenilmesi de yıkıcı etkiye sahip olabilmektedir (Coduto, 2006). Mühendislik dahilinde yeterince doğru



tasarlanmadan inşa edilen yapılar, yakınlarında bulunan yamaçların duraylılığına olumsuz etki etmektedir. Örnek olarak herhangi bir yol yapımı çalışması, yakınında bulunan bir kaya biriminin süreksizlik düzlemlerine etki ederek kayayı zayıflatabilmekte ve malzemenin yenilmesine neden olabilmektedir (Coduto, 2006). Gerçekleşmesi beklenen bütün bu sorunlardan dolayı yamaçların üzerine veya yakınına yapı inşa edilirken öncelikle mühendislik jeologlarına ve jeoteknik mühendislerine başvurmak önemlidir. Yamaçlar üzerinde yapılması planlanan mühendislik yapılarına ait ön çalışmalar sonucu elde edilen verilerin analizi ile yamaca uygun inşa çalışmaları yapılması gerekmekte ve bu sayede olası yamaç duraysızlığı ile başa çıkılabilmektedir. Her zaman, iyileştirme için harcanan zaman ve maliyet, önleme çalışmaları için harcanan zaman ve maliyetten çok daha fazladır.

Coduto (2006) standart bir şevi tanımlayabilmek amacıyla bazı terimler belirlemiştir. Şev oranı, şev tepesi, şev topuğu, şev yüzeyi, şev yüksekliği ve seki olarak belirlenen bu terimler şematik olarak Şekil 2.1’de gösterilmiştir. Şevi üst ve alt kısımlarından kesen düz yüzeyler, şevin başlangıç ve bitiş yüksekliklerini ifade etmektedir. Şev ile üst yüzeyin kesişimi şev tepesi, alt yüzeyin kesişimi ise şev topuğu noktalarını belirlemektedir. Şev yüzeyi ise bu iki yükseklik arasındaki eğimli yüzeylerin bir ifadesidir. Seki (palye), yarma veya dolgu şevlerde meydana getirilen dar ve düz alanları tanımlamakta, yüzey drenajı bileşenlerini yerleştirmek için kullanılmaktadır. Şevin yüksekliği ise tepe ve topuk arasındaki dikey yükseklik farkıdır. Son olarak şev oranı ( $\tan\delta$ ) bir yamacın diklik durumunu belirten bir ifadedir. Aksi belirtilmedikçe yatay:düşey oranı olarak tanımlanmaktadır. Örneğin ikiye bir (2:1) olarak tanımlanan bir şev, bir düşeye karşılık iki yatay eğimi ifade etmekte ve geleneksel olarak düşey değer daima bir (1) olarak sabitlenmektedir. 1:1’den dik şevlerin ifadesi ise, düşey sabit yine bir olarak ele alınarak, ½:1 gibi kesirli ifadeler ile belirtilmektedir.

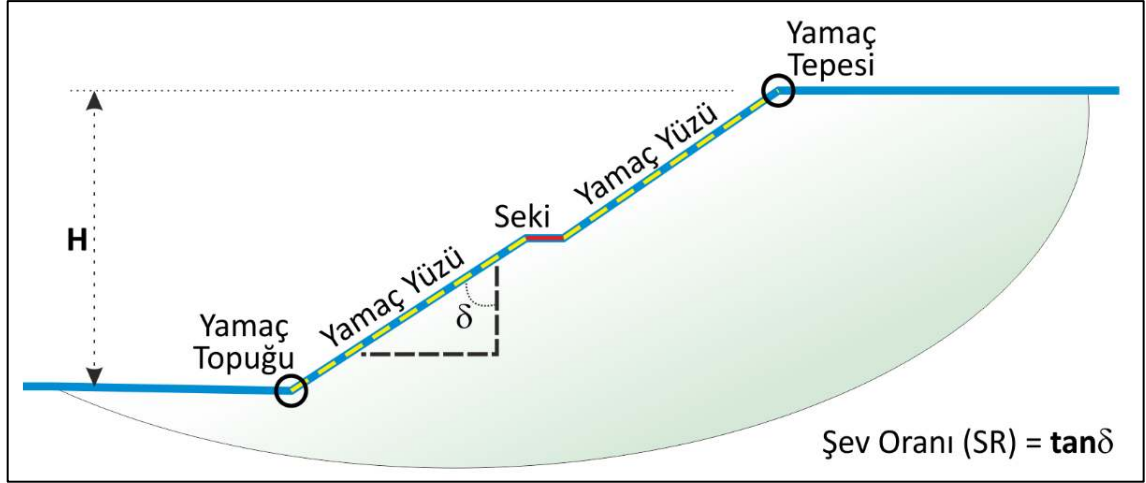
Yamaç hareketleri, meydana geldiği ortamdaki jeolojik birimlere bağlıdır ve bunlar kaya veya zemin olabilmektedir. Zeminler ince veya kaba taneli olarak gözlenebilmekte, kaya birimler ise çatlak, fay, şistozite, tabakalanma gibi süreksizlik düzlemleri ile öne çıkmaktadır. Kayalardaki bu yapısal özellikler yamaç hareketleri analizinde kullanılan önemli birer parametredir. Bölgedeki yer altı suyunun varlığı da yamaç hareketlerinde önemli bir unsur olarak dikkate alınmaktadır.

Yamaçlarda meydana gelen yenilmeleri sınıflandırmak amacıyla birçok çalışma yapılmış ve bu sınıflandırmalar meydana gelen hareketin incelenmesini ve yenilme gösteren malzemenin anlaşılmasını sağlamaktadır (Varnes, 1958, 1978, 1984; Hutchinson, 1988;

Cruden ve Varnes, 1996; Dikau vd., 1996). Her ne kadar kütle (yamaç) hareketlerini tanımlamak amacıyla birçok sınıflama geliştirilmiş olsa da gerçekte hiçbir sınıflama mükemmel değildir. (Rahn, 2015). Bir yamaç hareketini sınıflayabilmek adına Cruden ve Varnes (1996) tarafından yedi temel ölçüt (kıstas) belirlenmiştir.

Bunlar;

- (1) Hareketin Tipi
- (2) Yenilen Malzemenin Türü
- (3) Kayma Yüzeyi ile Yenilen Malzemenin Geometrilere
- (4) Hareketin Hızı
- (5) Tetiklenme Mekanizmaları
- (6) Jeolojik Yapı
- (7) Etkinlik (Aktivite) Durumu



Şekil 2.1. Şevleri tanımlamada kullanılan terimler (Coduto, 2006)

Tablo 2.1’de görüldüğü gibi yenilen malzemenin türü ve hareketin tipi önemli birer parametredir ve bu nedenle yamaç hareketleri malzemenin türü ve hareketin tipine göre sınıflandırılmaktadır (Varnes, 1978). Bu sınıflandırma sisteminde hareketin tipi düşme, devrilme, kayma, yayılma, akma olarak beş sınıfa ayrılmakta ve bunlara, iki ya da daha fazla hareket türünün birlikte olması durumunu ifade eden karmaşık hareketler tanımı da eklenerek, yamaç hareketleri toplamda altı sınıfta ele alınmaktadır. Yenilen malzemenin türü ise kaya ve zemin olmak üzere iki ana başlık altında toplanmaktadır. Zeminler ise kaba ve ince taneli olmak üzere kendi içinde ikiye ayrılmakta ve kaba taneli zeminler moloz, ince

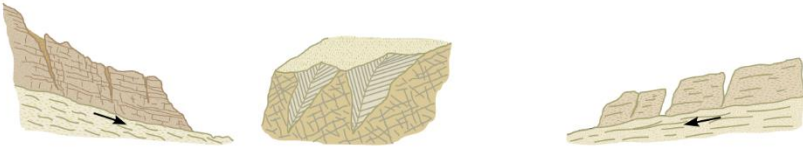
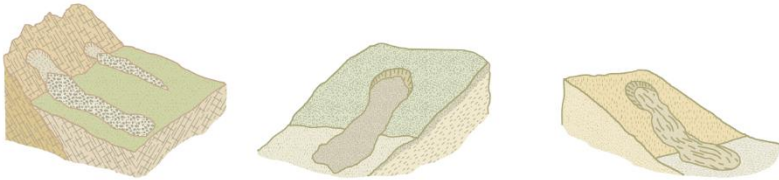
taneli zeminler ise toprak olarak değerlendirilmektedir. (Coduto, 2006). Vallejo ve Ferrer (2014) ise kütle hareketlerinin düzlemsel ve dairesel hareketler gibi farklı geometride, farklı hız ve yayılım özelliğinde gelişebildiğini belirtmektedir (Şekil 2.2).

Tablo 2.1. Yamaç hareketinin tipi ve yenilen malzemenin türüne göre yamaç hareketleri sınıflaması (Varnes, 1978)

| Yamaç Hareketinin Tipi |            | Yenilen Malzemenin Türü                                    |                                |                   |
|------------------------|------------|------------------------------------------------------------|--------------------------------|-------------------|
|                        |            | Kaya                                                       | Zemin                          |                   |
|                        |            |                                                            | Kaba Taneli                    | İnce Taneli       |
| Düşme                  |            | Kaya Düşmesi                                               | Moloz Düşmesi                  | Toprak Düşmesi    |
| Devrilme               |            | Kaya Devrilmesi                                            | Moloz Devrilmesi               | Toprak Devrilmesi |
| Kayma                  | Dairesel   | Kaya Kayması                                               | Moloz Kayması                  | Toprak Kayması    |
|                        | Ötelenmeli |                                                            |                                |                   |
| Yanal Yayılma          |            | Kaya Yayılması                                             | Moloz Yayılması                | Toprak Yayılması  |
| Akma                   |            | Kaya Akması<br>(Derin Krip)                                | Moloz Akması<br>(Zeminde Krip) | Toprak Akması     |
| Karmaşık               |            | İki veya daha fazla hareket tipi bir arada gözlenmektedir. |                                |                   |

Süreksizlik düzlemleri (tabaka, çatlak, kırık vs.) kayalarda zayıflık zonu olarak bilinmektedir (Varnes, 1978). Bu süreksizlik düzlemleri boyunca kaya kütlelerinin ana kütlelerden koparak hızlı ve serbest hareketi de düşme olarak tanımlanmaktadır (Vallejo ve Ferrer, 2014). Başka bir ifade ile yamaç molozundan, kayalardan veya zeminlerden ayrılan blokların yer çekimi etkisi ile herhangi bir makaslama dayanımı olmaksızın hareket etmesi ile düşme olayı meydana gelmektedir (Ulusay, 2010). Çok hızlı ve aniden meydana gelen düşme olayları ölümcül sonuçlar doğurabilmektedir (Coduto, 2006).

Yalnızca dik yamaçlarda meydana gelen ve doğrudan bükülme hareketi olarak değerlendirilen devrilme hareketi özellikle şist ve sleytlerde daha sık görülmektedir (Coduto, 2006). Devrilme, düşey süreksizliklerle bölünmüş kaya birimlerinin yer çekimi etkisi ile bükülme göstermesi olarak tanımlanmaktadır (Ulusay, 2010).

|     |                                                                                                                                     |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (a) |  <p>Kaya</p> <p>Zemin</p>                         |
| (b) |  <p>Kaya</p> <p>Zemin</p>                         |
| (c) |  <p>Kaya</p> <p>Zemin</p>                         |
| (ç) |  <p>Kaya</p> <p>Zemin</p>                       |
| (d) |  <p>Kaya Blokları</p> <p>Zemin</p>              |
| (e) |  <p>Kaya Blokları</p> <p>Moloz</p> <p>Zemin</p> |

Şekil 2.2. Malzemenin türüne göre genelleştirilmiş yenilme tipleri a) düşme; b) devrilme; c) dairesel kayma; ç) ötelenmeli kayma; d) yanal yayılma; e) akma (Vallejo ve Ferrer, 2014)

Cruden (1991) heyelanları kaya veya zemin malzemesinin akma, kayma gibi hareketleri olarak tanımlamaktadır ancak heyelanlar Varnes (1978) tarafından tek ya da birden fazla bloğun belirgin bir kayma yüzeyi boyunca aşağı doğru kayma hareketi olarak değerlendirilmektedir. Tek başına bir yenilme düzleminin ya da birbiri ile ilişkili yenilme düzlemlerinin makaslama birim deformasyonu sonucu kayma yenilmeleri meydana gelmektedir (Ulusay, 2010). Kayma türünde yenilmeler dairesel kayma yenilmeleri ve ötelenmeli kayma yenilmeleri olarak ikiye ayrılmaktadır.

Dairesel kayma yenilmeleri en genel ifade ile kaşık şeklinde bir kayma yüzeyi üzerinden meydana gelmektedir. Bu şekilde bir kayma yüzeyi üzerinde meydana gelen hareket sonucu yamaç üzerinde bulunan ağaç veya herhangi türden bir yapı geriye doğru yatık bir şekilde görülmektedir. Bu tür yenilmeler çok fazla ayrılmış kaya kütlelerinde, akarsu yataklarında, zeminlerde açılmış şevlerde ve ileri derecede eklemli başka bir ifade ile zemin gibi davranış gösteren kaya kütlelerinde meydana gelmektedir (Ulusay, 2010). Zaman zaman basamak görünümünde olan yenilmeler ilerleyen heyelanlar veya birleşik heyelanlar olarak da isimlendirilmektedir (Cronin, 1992).

Ötelenmeli kayma yenilmelerinde ise malzeme dairesel kaymada olduğu gibi geriye yatma meydana gelmeden düzlemsel veya kıvrımlı bir kayma yüzeyi üzerinden hareket etmektedir (Ulusay, 2010). Fay, çatlak, tabakalanma, makaslama zonu gibi süreksizlikler tarafından kontrol edilen bir yenilme türü olup düzlemsel, kama ve moloz kayması olarak üç alt başlığa ayrılmaktadır (Ulusay, 2010).

Düzlemsel kaymalar bir süreksizlik düzlemi boyunca oluşan makaslama yenilmesi sonucunda meydana gelmektedir. Bu tür yenilmeler ile yamaç tepesinde gerilme çatlakları meydana gelebilir (Ulusay, 2010). Süreksizlik yüzeyinin yatay ile yaptığı açının şevin eğimine eşit veya bundan büyük olması durumunda kayma meydana gelmez. Ancak aksi durumda bu iki değer de kayan malzemenin içsel sürtünme açısından büyük olması durumunda malzeme yenilir yani kayma meydana gelmektedir.

Kama türü yenilmeler birden fazla süreksizlik düzleminin kesişimi sonucu meydana gelmektedir (Ulusay, 2010). Süreksizliklerin kesişim hattının yatayla yaptığı açının şevin eğiminden küçük olması ve her iki açının da malzemenin içsel sürtünme açısından büyük olması durumunda kama türü yenilme meydana gelmektedir. Moloz kayması ise kohezyonu düşük malzemenin dönerek veya burularak aşağı doğru hareket etmesi olarak ifade edilmektedir.

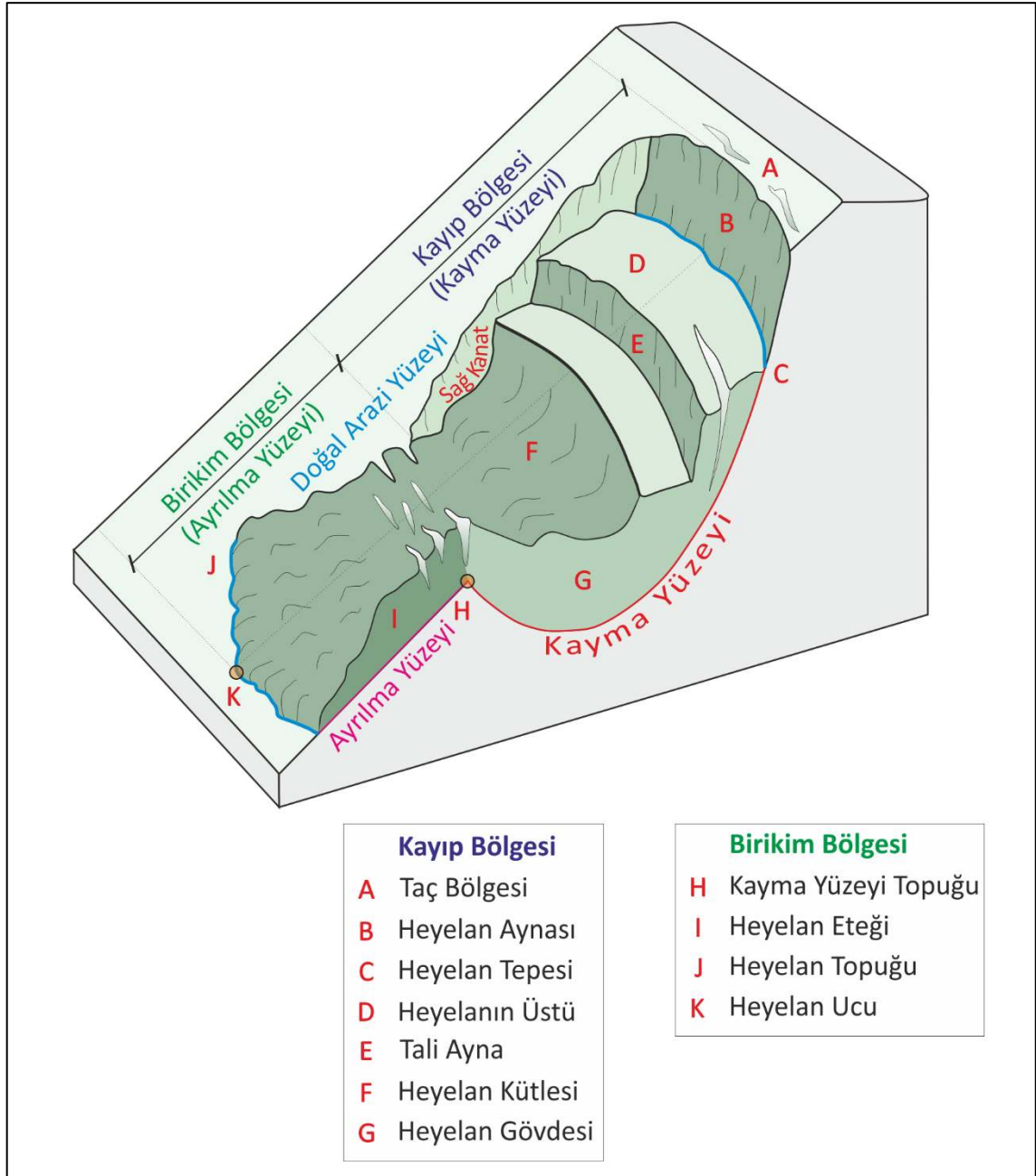
Yanal yayılma genellikle kil yoğunluğu fazla olan malzemenin üzerine yük binmesi durumunda zemin kütlesinin yatay yönde hareket etmesi olarak tanımlanmaktadır (Vallejo ve Ferrer, 2014). Gözenek suyu basıncının yüksek olması da yanal yayılmanın gelişmesine neden olmaktadır. Kaya kütleleri killi malzeme üzerinde devamlılığı yüksek olan süreksizlikler boyunca yanal yönde kilometrelerce ilerleyebilmektedir (Ulusay, 2010). Kaya bloklarının yatay yönde hareket etmesi yanal kaya yayılması olarak ifade edilmektedir. Düşük eğimli yamaçlarda kaya blokları altında bulunan malzemeyi hareket ettirmeye zorlamakta ve bu malzeme harekete geçtiği esnada içinde bulunan irili ufaklı kaya parçalarını da sürüklemektedir (Vallejo ve Ferrer, 2014). Bu kaya blokları kil gibi plastik özellikli bir zemin içinde ve eğimi düşük bir yamaçta hareket etmekteyse buna yanal zemin yayılması denilmektedir (Ulusay, 2010).

Suya doygun halde bulunan zemin türünden malzemenin, molozun, fazla ayrılmış kaya bloklarının sıvı gibi hareket etmesi akma olarak tanımlanmaktadır (Vallejo ve Ferrer, 2014). Su içeriği fazla, konsolide olmamış malzemenin hızlı bir biçimde yamaç aşağı hareketine de akma denilmektedir (Ulusay, 2010). Bu türden bir hareket birden fazla makaslama yüzeyi boyunca meydana geldiğinden belirgin kayma yüzeyleri görülememektedir (Vallejo ve Ferrer, 2014). Çok ince taneli malzemeler hızlı akma özelliğine sahip olmakta ve saniyede metrelerce ilerleyebilmektedir. İçerisinde kum boyutunda ve bu boyuttan büyük malzeme içeren moloz türünden malzeme akmaları toprak akmalarından farklı olarak değerlendirilmektedir. Kaya akmaları genelde yavaş ve yer çekimi etkisi altında gerçekleşmekte ve akma neticesinde kıvrımlanma ve kabarma gibi şekiller gözlemlenmektedir (Ulusay, 2010). Akmanın çok yavaş ve düşük derinlikte meydana gelmesi durumu krip olarak ifade edilmektedir (Vallejo ve Ferrer, 2014).

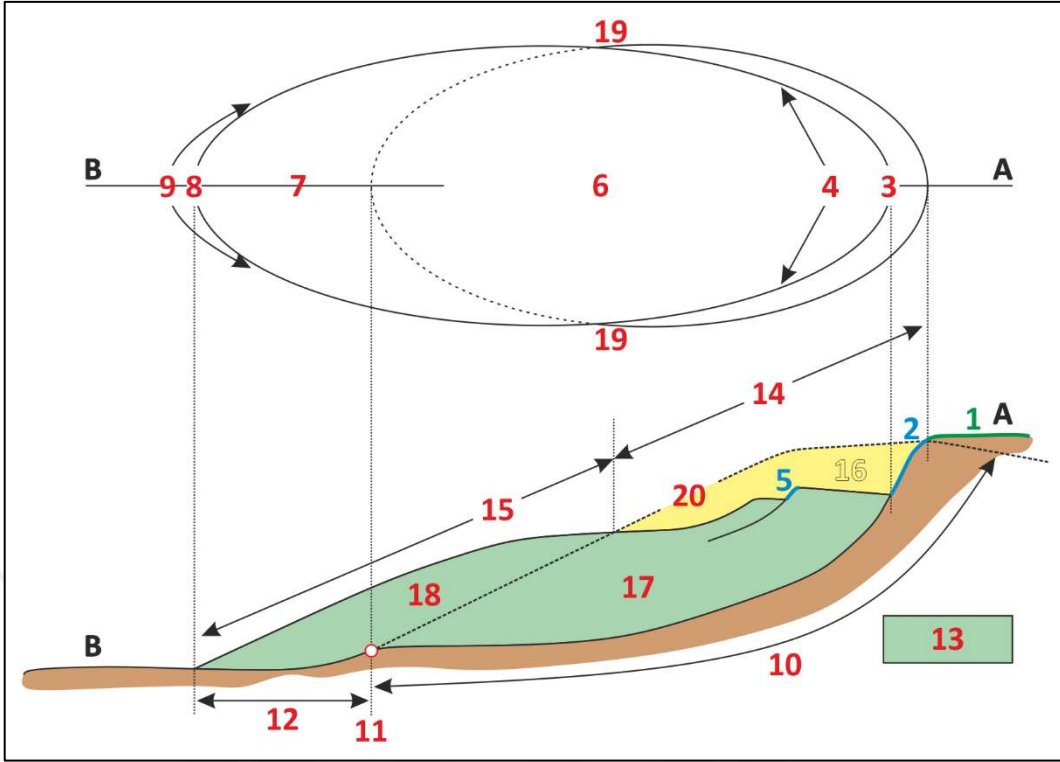
### **2.1.1. Heyelanların Geometrisi**

Genelleştirilmiş bir toprak kaymasına ait blok diyagram Varnes (1978) tarafından Şekil 2.3'teki gibi gösterilmektedir. Daha önce de ifade edildiği gibi Varnes (1978) tarafından oluşturulan sınıflama sisteminde, iyi belirlenmiş kayma yüzeyleri boyunca yamaç aşağı hareket eden blokları içeren kütle hareketleri heyelan olarak tanımlanmaktadır. Bir heyelan geometrisini oluşturan elemanlar (Şekil 2.4), Uluslararası Mühendislik Jeolojisi ve Çevre Derneği (IAEG, 1990) tarafından belirlenmiştir (Tablo 2.2). IAEG (1990) tarafından yapılan sınıflamada genel olarak Varnes (1978) sınıflamasına bağlı kalınmış olmakla

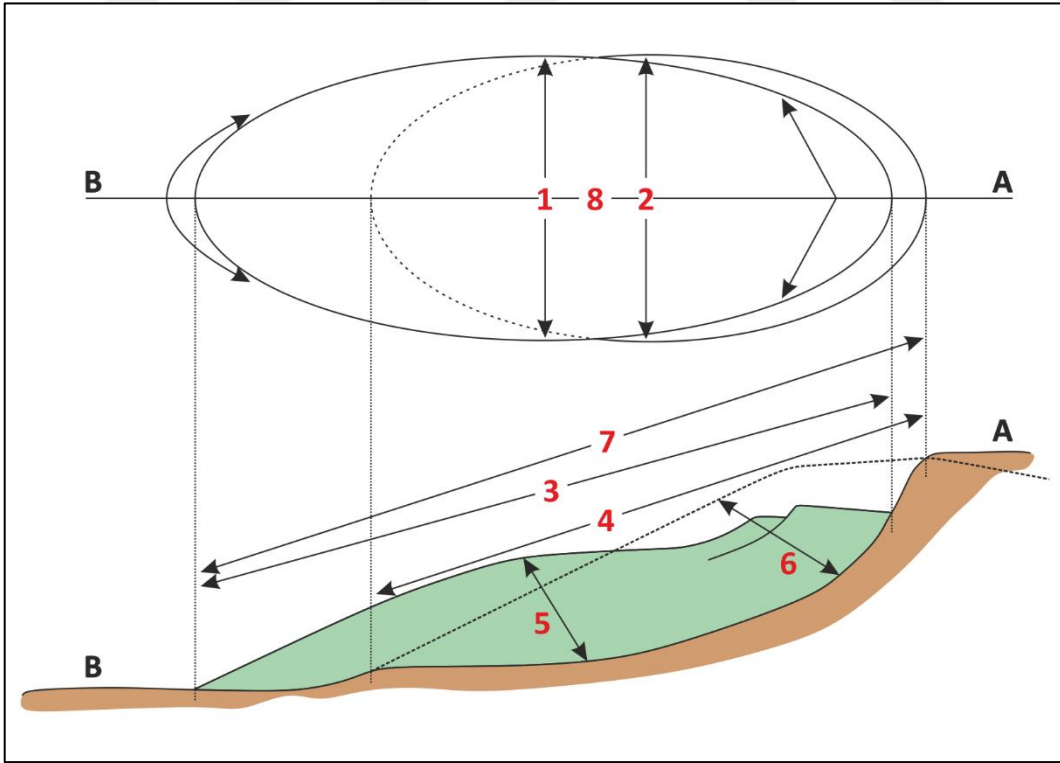
birlikte, Varnes (1978) sınıflamasına ek olarak kayıp, kayıp kütlesi, birikim gibi farklı ve açıklayıcı terimler de kullanılmıştır. Standart bir heyelanın boyutları (Şekil 2.5) yine IAEG (1990) tarafından tanımlanmıştır (Tablo 2.3).



Şekil 2.3. Genelleştirilmiş bir toprak kaymasına ait blok diyagram (Varnes, 1978)



Şekil 2.4. Standart heyelan geometrisini ifade eden görünüşler (IAEG, 1990)



Şekil 2.5. Standart heyelan boyutlarını ifade eden görünüşler (IAEG, 1990)



Tablo 2.2. Standart heyelan bölümlerini ifade eden tanımlamalar (IAEG, 1990)

| #  | Terim               | Tanım                                                                                                                                                                                     |
|----|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | Taç Bölgesi         | Hareket etmeyen malzemenin yerini belirtmekte ve heyelan aynasının en yüksek bölümünde gözlenmektedir.                                                                                    |
| 2  | Heyelan Aynası      | Heyelan kütlelerinin taç bölgesinden ayrılmasıyla oluşan ve düşeye yakın olarak gözlenen yüzeydir ve kayma yüzeyinin görünen bölümünü temsil etmektedir.                                  |
| 3  | Heyelan Tepesi      | Heyelan kütlelerine göre yüksek, heyelan aynasına göre düşük kotta yer almakta ve bu ikisinin kesişim bölgesinin en yüksek noktasını ifade etmektedir.                                    |
| 4  | Heyelanın Üstü      | Heyelan tepesi ile başlayan ve heyelan kütlesi ile heyelan aynasının kesişimi boyunca devam eden bölgeyi belirtmektedir.                                                                  |
| 5  | Tali Ayna           | Genellikle heyelan aynasına paralel olarak gelişen, heyelan kütlesi içindeki farklı hareketler ile oluşmuş düşeye yakın yüzeyleri ifade etmektedir.                                       |
| 6  | Heyelan Gövdesi     | Kayma yüzeyinin üzerinde ve heyelan aynası ile kayma yüzeyi topuğu arasında kalan heyelan kütlelerini belirtmektedir.                                                                     |
| 7  | Heyelan Eteği       | Kayma yüzeyi topuğunun ötesine hareket eden heyelan kütlelerinin doğal arazi yüzeyine yerleşmiş kısmını belirtmektedir.                                                                   |
| 8  | Heyelan Ucu         | Heyelanın tepesinden heyelanın topuğuna doğru çizildiği varsayılan en uzun mesafenin heyelanın topuğuna dokunduğu nokta olarak belirtilmektedir.                                          |
| 9  | Heyelan Topuğu      | Heyelan kütlelerinin eğri şekilde olan alt ucunu ifade etmektedir. Bu uç nokta heyelan aynasından en uzak mesafedeki noktayı temsil etmektedir.                                           |
| 10 | Kayma Yüzeyi        | Doğal arazi yüzeyinin altında kalmış olan ve heyelan kütlelerini alttan sınırlayan yüzeyi ifade etmektedir.                                                                               |
| 11 | Kayma Yüzeyi Topuğu | Heyelanın kayma yüzeyinin alt bölümü ile doğal arazi yüzeyinin kesişim noktasını belirtmektedir. Kayıp ve birikim bölgelerini birbirinden ayırmakta ve gömülü bir şekilde gizlenmektedir. |
| 12 | Ayrılma Yüzeyi      | Doğal arazi yüzeyinin heyelan eteğinin altında kalan ve heyelan kütlelerini alttan sınırlayan yüzeyi ifade etmektedir.                                                                    |
| 13 | Heyelan Kütleleri   | Yamaç hareketlerinin sonucunda doğal yerinden ayrılmış olan malzemeyi belirtmekte ve bir heyelandaki kayıp ve birikim kütlelerinin tamamını kapsamaktadır.                                |
| 14 | Kayıp Bölgesi       | Yamaç hareketi sonucunda doğal arazi yüzeyinin altında kalan heyelan kütlelerini belirtmektedir.                                                                                          |
| 15 | Birikim Bölgesi     | Yamaç hareketi sonucunda doğal arazi yüzeyinin üstünde kalan heyelan kütlelerini belirtmektedir.                                                                                          |
| 16 | Kayıp               | Üstten doğal arazi yüzeyi ile, alttan kayıp kütle ile ve yanıl anlamda heyelan aynası ile sınırlanan boşluğu ifade etmektedir.                                                            |
| 17 | Kayıp Kütleleri     | Yamaç hareketi sonucunda başlangıçtaki doğal arazi yüzeyinin altında ve kayma yüzeyinin üstünde kalan heyelan kütlelerini belirtmektedir.                                                 |
| 18 | Birikim             | Yamaç hareketi sonucunda başlangıçtaki doğal arazi yüzeyinin üzerine yükselen heyelan kütlelerini belirtmektedir.                                                                         |
| 19 | Kanatlar            | Kayma yüzeyinin iki yanında kalan ve hareket etmemiş malzemeyi belirtmektedir. Hareketin akış yönüne göre sağ-sol olarak adlandırılmaktadır.                                              |
| 20 | Doğal Arazi Yüzeyi  | Yamaç hareketi öncesindeki yüzeyi belirtmektedir.                                                                                                                                         |

Tablo 2.3. Standart heyelan boyutlarını ifade eden tanımlamalar (IAEG, 1990)

| # | Simge    | Terim                        | Tanım                                                                                                                                                                     |
|---|----------|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | $W_d$    | Heyelan Kütlesinin Genişliği | Heyelan kütlesinin uzunluğuna ve kayma yönüne dik olarak çizildiği varsayılan en uzun yatay mesafedir.                                                                    |
| 2 | $W_r$    | Kayma Yüzeyinin Genişliği    | Heyelanın her iki kanadı arasındaki en uzun mesafedir.                                                                                                                    |
| 3 | $L_d$    | Heyelan Kütlesinin Uzunluğu  | Heyelanın tepesiyle ucu arasındaki gerçek mesafedir.                                                                                                                      |
| 4 | $L_r$    | Kayma Yüzeyinin Uzunluğu     | Heyelan aynasından kayma yüzeyi topuğuna kadar olan gerçek mesafedir.                                                                                                     |
| 5 | $D_d$    | Heyelan Kütlesinin Derinliği | Heyelanın genişliğini ve uzunluğunu içeren düzleme dik olarak ölçülen mesafedir. Heyelan kalınlığının en büyük olduğu mesafeyi temsil etmektedir.                         |
| 6 | $D_r$    | Kayma Yüzeyinin Derinliği    | Kayma yüzeyinin genişliğini ve uzunluğunu içeren düzleme dik olarak ölçülen mesafedir. Kayma yüzeyi ile doğal arazi yüzeyi arasındaki en uzun mesafeyi temsil etmektedir. |
| 7 | $L$      | Toplam Uzunluk               | Heyelanın taç bölgesinden heyelan ucuna kadar olan gerçek mesafedir.                                                                                                      |
| 8 | $L_{cl}$ | Merkez Çizgisinin Uzunluğu   | Heyelanın taç bölgesinden heyelan ucuna kadar olan yatay (iz düşümü) mesafedir.                                                                                           |

### 2.1.2. Heyelanların Nedenleri

Yamaç hareketlerine neden olan belirleyici faktörler, geometrik, jeolojik ve jeomekanik, hidrojeolojik olarak değerlendirilmektedir. Şev yüksekliği ve şev açısı geometrik faktör, malzemenin zayıflık zonları jeolojik faktör, suyun varlığı hidrojeolojik faktör, dayanım ve geçirgenlik değerleri jeomekanik faktörlere örnek verilebilmektedir (Vallejo ve Ferrer, 2014).

Jeolojik yapı, stratigrafi, litoloji, hidrojeoloji, fiziksel dayanım parametreleri ve gerilmeler yamacın hareketine neden olabilecek özellikleri barındırmaktadır ve hareket için belirleyici özelliktedirler. Bunlar ayrıca hareketin türünü de belirlemektedir. Malzemenin duraysızlığına neden olan ve yamaç hareketini başlatan etkenler belirleyici etkenler olup ve statik ve dinamik yükler, hidrojeolojik durumdaki değişimler, iklimsel etkenler, şev geometrisinin değişmesi ve dayanım özelliklerinin azalması gibi etkenlerdir (Vallejo Ferrer 2014). Şevin eğim açısı yamaç hareketlerinde önemli bir faktördür. Yamaç eğimi arttıkça

üzerinde bulunan kaydırıcı kuvvetlerin etkisi de artmaktadır (Keller, 2006). Eğimin fazla olması yamaç hareketi için tetikleyici bir faktördür ancak toprak ve çamur akmaları için çok düşük eğim değerleri de hareket için yeterli olmaktadır (Vallejo ve Ferrer, 2014). Yamacın dikliği her zaman yenilme olacağı anlamına gelmemekle birlikte doygunluğu yüksek olan malzeme içeren eğimli yamaçlarda toprak, moloz kaymaları görülebilmektedir. Eğimi yüksek olup duraylı malzeme içeren bir yamaç, düşük eğimli ve duraysız malzeme içeren bir yamaca göre daha stabil bir davranış sergileyebilmektedir (Varnes, 1984).

Bir bölgede daha önceden meydana gelmiş bir heyelanın varlığı gelecekteki davranışların belirlenebilmesi açısından önemli bir rehberdir. Tarihsel bilgilerin, heyelan duyarlılığının oluşturulmasında ve değerlendirilmesinde yararlı olduğu düşünülmektedir (Guzzetti vd., 1994; Ibsen ve Brunsden 1996; Glade, 1998).

Kaya ve zeminlerin arazi ve laboratuvar deneylerinden yenilmeye karşı duraylı olup olmayacakları, tetikleyen etkenlere karşı dayanım dereceleri belirlenmektedir (Vallejo ve Ferrer, 2014). Malzemenin fiziksel ve kimyasal davranışını içeren tüm özellikleri kapsayan jeolojik yapı, stratigrafi ve litolojik faktörler zemin ve kaya kütlelerinin hareket potansiyelini belirlemektedir (Varnes, 1984). Tabaka düzlemleri, şistlerdeki yapraklanmalar, eklem ve çatlaklar yamaç malzemesinde yer alan zayıflık düzlemlerine örnek olarak verilebilmektedir (Keller, 2006). Tortul kayaçların önemli özellikleri arasında tane boyu dağılımı, tanelerin şekli, taneler arası bağlayıcının türü ve miktarı yer almaktadır. İnce taneli tortul kayaçlardaki kil mineralinin miktarı, su içeriği ve kimyası duraylılığı etkileyen faktörlerdendir. Su içeriğinin artması ile killi malzemeler kaymaya karşı dayanımını kaybetmekte ve kil mineralinin türüne göre malzemenin davranışı değişmektedir (Varnes, 1984).

Jeomekanik faktörler kesme dayanımını kontrol etmektedir. Homojen zeminler analiz açısından kolay olmakla birlikte çok sayıda kırık ve çatlak içeren kayacın mekanik davranışını analiz etmek bu karmaşıklık nedeniyle zorlaşmaktadır (Varnes, 1984).

Hidrojeolojik faktörler bölgenin iklimsel özellikleri ile doğrudan ilintilidir. Yamaçta suyun varlığı malzemenin efektif gerilmesinin düşmesine neden olmakta, duraysızlığa etki eden faktörleri artırmakta ve yamaç yenilmelerine neden olmaktadır. Yamaç özelinde su bulunması; boşluk suyu basıncı nedeniyle kesme dayanımının azalmasına, bazı zeminlerin yumuşamasına, çekme çatlağı ile kaydırıcı etkenlere katkı sağlaması nedeniyle yamacın duraylılığının azalmasına neden olmaktadır. Çekme çatlağında var olan su burada bir basınca neden olmakta ve yamacı duraysızlığa zorlamaktadır. Süreksizliklerde donan su nedeniyle

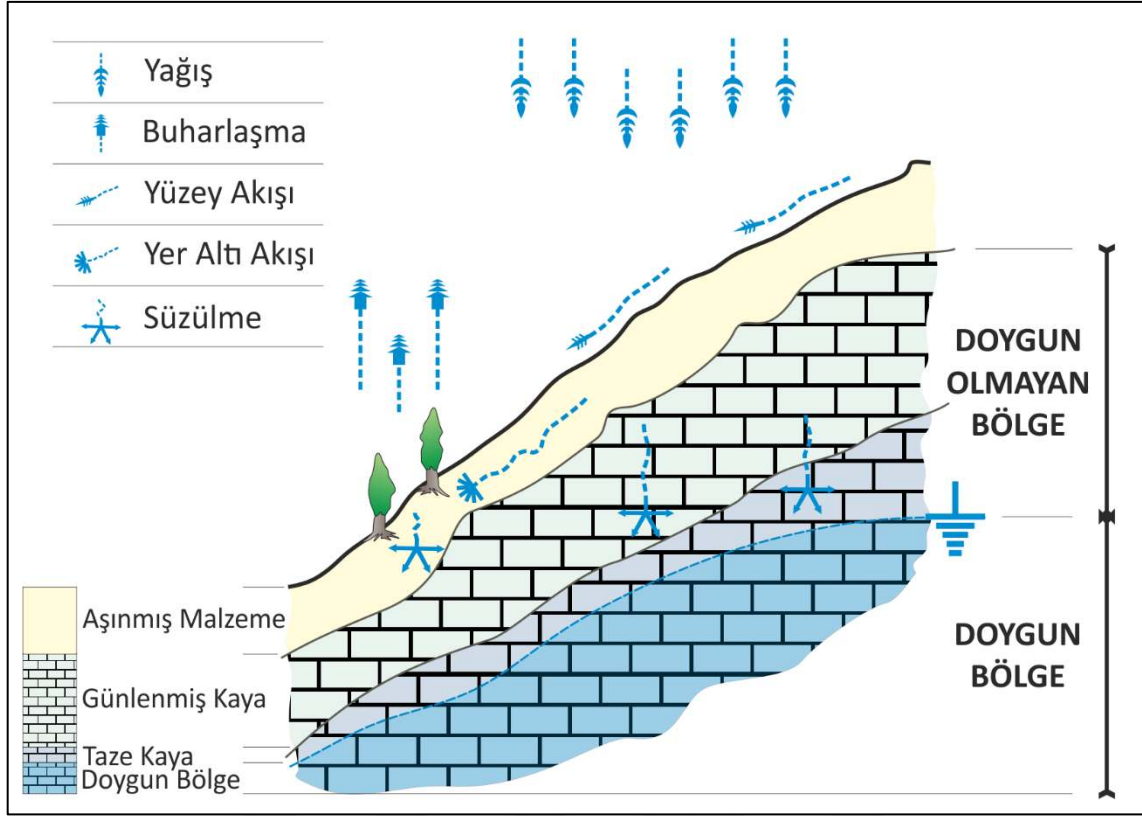
süreksizliklerde açılma meydana gelmekte ve doymunluktan dolayı da malzemenin ağırlığı artmaktadır (Vallejo ve Ferrer, 2014).

Bir bölgenin ikliminin yamaç yenilmeleri üzerinde büyük bir etkisi vardır ve iklim sadece hava sıcaklığı ve yağış miktarı olarak düşünülmemelidir (Keller, 2006). Dünya Meteoroloji Örgütüne (WMO) göre bir bölgede meydana gelen sıcaklık, yağış, nem ve atmosferik basınç gibi tüm hava olaylarının 30 yıl süreli uzun dönem ortalaması iklim olarak tanımlanmaktadır. İklim, yağışların miktarını ve zamanını kontrol etmekte ve bu yağış miktarı ile yağış dağılımı yamaç yenilmelerini tetikleyebilmektedir.

Yamaç yenilmelerinin iklimsel faktörlere verdiği tepki anlık olabildiği gibi zamanla da gelişebilmektedir (Vallejo ve Ferrer, 2014). Yani çok fazla miktarda bir yağış aniden yenilme oluşturabildiği gibi belli bir zaman sonrasında da yenilmeyi tetikleyebilmektedir. Yamaçta suyun varlığı doğrudan veya dolaylı olarak yenilmeye etki etmektedir. Yüzeysel kaymalar şiddetli yağışlar sonrasında aniden meydana gelebilirken, bu şiddetli yağışlar sırasında veya sonrasında yamaç derinliklerine sızan su etkisini aylar hatta yıllar sonra da göstererek dairesel kaymalara neden olabilmektedir. Yamacın topuğuna kadar sızan su topuğu aşındırabilmekte ve yamacın duraylılığını azaltabilmektedir (Keller, 2006).

Yağışlar sonucu malzemenin doymun hale gelmesi ile ağırlık artmakta ve gerilme durumunu değiştirebilen basınçlar üreten yer altı suyunu beslemekte ve dolaylı yollardan duraysızlığa neden olabilmektedir. Yağmur sularının yamaçlarda derinliklere doğru sızması ile yüzeyin altında akışlar meydana gelmekte, doymamış bölgelerde su içeriği artmakta ve suya doymun bölgede yer altı suyu seviyesinin artmasına neden olabilmektedir. Yüzeyden ne kadar su sızacağı malzemenin türüne, bölgenin morfolojisine ve bitki örtüsüne bağlıdır (Vallejo ve Ferrer, 2014) (Şekil 2.6).

Bitki örtüsünün yamaç duraylılığı üzerinde olumlu ve olumsuz etkileri bulunmaktadır. Bitki örtüsü sayesinde iklimin olumsuz etkilerinden kütlenin korunduğu ve güneşin, rüzgârın ve yağmurun olumsuz etkilerinin azaldığı savunulmaktadır (Prandini vd., 1977). Bitki, yaprakları, dalları ve gövdesi sayesinde suyun buharlaşarak uzaklaşmasına yardımcı olmakta ve kökleri ile yamaçta bulunan malzemenin kohezyonunu artırmakta ve böylece yenilmeye karşı direnci artırmaktadır. Ancak yamaçta bulunan bitki örtüsü ağırlığı sebebi ile altında bulunan malzeme üzerinde baskı oluşturmakta ve kaydırıcı kuvvetlerin artmasına sebep olabilmekte (Keller, 2006), ağaçlar sayesinde rüzgârın etkisinin toprağa ulaşmasına yol açabilmektedir (Varnes, 1984). Ayrıca daha önceden bahsedildiği gibi ağaçların geriye doğru yatık olması bölgede geçmişte hareket olduğunun göstergesi olabilir (Varnes, 1984).



Şekil 2.6. Bir yamaçta su akış diyagramı (Prandini vd., 1977)

### 2.1.3. Heyelanların Hızı

Yamaç hareketlerinin hız sınıflaması 1958 yılında Varnes tarafından oluşturulmuş ve aynı ölçek yine Varnes (1978) tarafından eş değer SI birimleri eklenerek güncellenmiştir. Cruden ve Varnes (1996), Varnes (1978) tarafından yapılan yamaç hareketi hızı ölçeklendirmesini yeniden ele almış ve ölçeğin üst sınırında değer yükseltmesi, alt sınırında ise bir azaltma gerçekleştirerek, ölçeği 100'ün katları olarak anlamlı bir şekilde artmaya ayarlamıştır. Aynı zamanda ilgili hız aralıkları için olası hasarları da tanımlamışlardır (Tablo 2.4).

Hareketin tipini belirleyen etkenler stratigrafi, litoloji, jeolojik yapı, hidrojeolojik koşullar, fiziksel dayanım parametreleri, şekil değiştirme özellikleri ile arazi gerilmeleri olarak sıralanabilmektedir ve bu etkenler malzemenin doğal yapısına ve morfolojisine bağlıdır. Hareketi tetikleyen etkenler ise malzemenin duraysızlığını artıran ve hareketi başlatan etkenlerdir. Bunlar statik ve dinamik yükler, hidrojeolojik koşullardaki değişimler, iklim, yamacın geometrisindeki değişimler ve dayanım parametrelerindeki azalma olmakla

birlikte genellikle hareketin hızından ve boyutundan sorumludurlar (Vallejo ve Ferrer, 2014) (Tablo 2.5, Tablo 2.6).

Tablo 2.4. Yamaç hareketi hızlarının sınır değerleri ve tanımları (Cruden ve Varnes, 1996)

| Tanım       | Hız (mm/s)           | Olası Hasar                                                                       |
|-------------|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Aşırı Hızlı | $> 5 \times 10^3$    | Felaket. Yıkıcı.<br>Yapılarda yıkılma olur, çok sayıda can kaybı olur.            |
| Çok Hızlı   | $> 5 \times 10^1$    | Hız, kaçışa olanak sağlamayacak kadar büyüktür.<br>Can kaybı olur.                |
| Hızlı       | $> 5 \times 10^{-1}$ | Kaçmak mümkündür.<br>Yapılarda yıkılma, bozulma olur.                             |
| Orta Hızlı  | $> 5 \times 10^{-3}$ | Bazı duyarsız yapılar geçici olarak korunabilir.                                  |
| Yavaş       | $> 5 \times 10^{-5}$ | Düzeltilici önlemler uygulanabilir.<br>Yapılar bakım çalışmaları ile korunabilir. |
| Çok Yavaş   | $> 5 \times 10^{-7}$ | Yapılarda hasar olmayabilir.                                                      |
| Aşırı Yavaş | $< 5 \times 10^{-7}$ | Aletsiz izlenmelerde algılanmaz.<br>Önlem olarak yapı inşaat mümkün.              |

Tablo 2.5. Vallejo ve Ferrer'e (2014) göre malzeme koşullarını ve yamaçları etkileyen belirleyici faktörler

| Belirleyici Faktörler           | Etkiler                                                                              |
|---------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Rölyef (Eğim, Geometri)         | Zemin Ağırlığının Dağılımı                                                           |
| Litoloji (Bileşim, Doku)        | Birim Hacim Ağırlığı<br>Dayanım<br>Hidrojeolojik Davranış                            |
| Jeolojik Yapı ve Gerilme Durumu | Dayanım<br>Şekil Değiştirebilirlik<br>Zayıf Zonlar                                   |
| Jeomekanik Özellikler           | Hidrojeolojik Davranış<br>Boşluk Basıncı Gelişimi                                    |
| Ağaç Kesimi                     | Hidrolojik Dengede Değişim<br>Aşınma                                                 |
| Bozuşma                         | Fiziksel ve Kimyasal Değişimler<br>İçsel ve Dışsal Aşınma<br>Zayıf Zonların Gelişimi |

Tablo 2.6. Vallejo ve Ferrer'e (2014) göre malzeme koşullarını ve yamaçları etkileyen tetikleyici faktörler

| Tetikleyici Faktörler             | Etkiler                                                                                                             |
|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Yağış ve Süzülme                  | Boşluk Basıncı ve Zemin Ağırlığında Değişim<br>Zemin Doygunluğu<br>Aşınma                                           |
| Hidrojeolojik Koşullarda Değişim  |                                                                                                                     |
| Statik Yüklerin Uygulanması       | Malzemenin Gerilme Durumunda Değişimler<br>Malzemenin Ağırlık Dağılımında Değişimler<br>Boşluk Basıncında Artışlar  |
| Dinamik Yüklerin Uygulanması      |                                                                                                                     |
| Yamaç Morfolojisindeki Değişimler | Ağırlıktan Dolayı Kuvvetlerin Değişimi<br>Gerilme Durumunda Değişim                                                 |
| Topukta Aşınma ve Alt Oyulması    | Yamaç Geometrisinde Değişim<br>Malzemenin Gerilme Durumunda Değişimler<br>Malzemenin Ağırlık Dağılımında Değişimler |
| İklim Etkisi (Donma, Çözülme)     | Yer Altı Suyu Durumunda Değişim<br>Çekme Çatlağı ve Zayıflık Düzlemleri Gelişimi<br>Dayanım Özelliklerinde Azalım   |

#### 2.1.4. Heyelanların Aktivitesi

Heyelanların aktivite kavramı, Dünya Heyelan Envanteri Çalışma Grubu (WP/WLI) tarafından yapılan çalışmalar ile sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflamalar aktivite durumu, aktivite dağılımı ve aktivite tipi olarak üç temel başlık altında incelenmekte ve bunlar da farklı alt başlıklar ile tanımlanmaktadır (WP/WLI, 1993) (Tablo 2.7).

WP/WLI (1993) sınıflamasında aktivite durumları temelde dört alt başlık ile sadeleştirilmekte ve bunlar etkin, duraklamış, uyanmış ve etkin olmayan heyelanlar olarak adlandırılmaktadır. Etkin olmayan heyelan sınıfı ise kendi içinde gizli, bitmiş, kontrollü ve kalıntı heyelanlar olarak sınıflandırılmakta ve bu şekilde heyelanların aktivite durumları WP/WLI (1993) sınıflamasına göre yedi bölüme ayrılmaktadır.

Bu sınıflamaya göre etkin sınıfına dahil olan heyelanlar, arazideki hareketinin güncel olarak devam ettiği ve kayma belirtilerinin rahatlıkla gözlenebildiği heyelanları ifade etmektedir. Son yıllarda hareket ve kayma göstermiş fakat güncel anlamda hareket etmediği gözlenen heyelanlar ise duraklamış olarak isimlendirilmekte ve bunların taç kesimlerinde çatlamlar gözlenebilmektedir (Varnes, 1978). Etkinliğini yitirdiği varsayılan ancak yıllar

sonra tekrar hareket gösteren heyelanlar ise uyanmış heyelanlar olarak ifade edilmekte ve bu tür heyelanlarda gözlenen kayma dayanımı parametreleri artık (Skempton, 1970) veya nihai (Krahn ve Morgenstern, 1979) değerlere ulaşabilmekte ayrıca hareket daha önceki makaslama düzlemleri üzerinde gerçekleşmektedir. Yenilme sonrasında duraylı hale gelerek durgunlaşan malzeme, daha önce kaymaya dahil olmayan başka bir kütlenin hareketlenmesinden de etkilenebilmekte ve dayanım parametrelerini kaybedip duraysız hale gelerek tekrar hareketlenebilmektedir.

Bu sınıflamadaki etkin olmayan heyelanlar ise genel olarak uzun süre öncesinde meydana gelmiş olan heyelanları tanımlamakta ve kendi içinde etkin olmama süreçleri göz önüne alınarak bölümlere ayrılmaktadır. Hareket göstermeyen ancak önceki yamaç hareketine ait belirtilerin gözlenebildiği heyelanlar, uyanmış heyelanların bir önceki safhasını ifade etmekte ve gizli (uykuda) heyelanlar olarak tanımlanmaktadır. Gizli heyelanların duraklamış heyelanlardan farkı, hareket göstermiş olan malzemenin üzerinde bitki örtüsünün oluştuğunun gözlenmesidir. Önceki yamaç hareketini başlatan tetikleme mekanizmalarının oluşması halinde yeniden hareketlenebilecek heyelanlar bu sınıfta incelenmektedir. Yamaç hareketini oluşturan etkenlerin doğal bir şekilde sıfırlandığı ve harekete neden olan etkenlerin kendiliğinden kaybolduğu heyelanlara bitmiş heyelanlar denilmektedir (Hutchinson ve Gostelow, 1976). Eğer malzeme yapay iyileştirici önlemler ile hareket etmeye karşı korunmuş veya hareketi meydana getiren etkenlerden kaçınılarak heyelan engellenmiş ise bu tür heyelanlara kontrollü heyelanlar denilmektedir. Bitmiş heyelanlarda yenilmenin gerçekleştiği vadi yön değiştirmiş olabilmekte, kontrollü heyelanlarda ise yamaç topuğuna yapay destek eklenerek hareket sonlandırılabilmekte ve heyelanlar duraylı hale getirilebilmektedir. Kalıntı heyelanlar ise bölgede önceden baskın olarak görülen iklimsel ve jeomorfolojik koşullardan tamamen arınmış ve farklı koşullara ulaşmış heyelanları ifade etmektedir. Kalıntı heyelanlar kimi zaman fark edilememekte ve kara yolu vb. mühendislik çalışmaları başlatıldığında on bin yıllık heyelanların bile yeniden hareketlenmesi olası hale gelmektedir (Skempton ve Weeks, 1976).

Bu sınıflamadan farklı olarak Keaton ve DeGraff (1996) tarafından heyelanların aktivite durumları için, etkin olduğu yıllara ve gösterdikleri arazi belirtilerine göre farklı bir sınıflama önerilmektedir. Bu sınıflamaya göre heyelanlar etkin ve gizli olmak üzere iki başlıkta incelenmekte ve gizli heyelanlar ise arazi belirtileri esas alınarak genç, olgun ve yaşlı şeklinde yeniden sınıflandırılmaktadır (Tablo 2.8).

Tablo 2.7. Yamaç hareketlerinin aktiviteye göre sınıflandırılması (WP/WLI, 1993)



| Aktivite Durumu |                          | Aktivite Dağılımı |                                           | Aktivite Tipi |                      |
|-----------------|--------------------------|-------------------|-------------------------------------------|---------------|----------------------|
| #               | Sınıflama                | #                 | Sınıflama                                 | #             | Sınıflama            |
| (a)             | Etkin (Active)           | (a)               | İleriye Doğru Gelişen Heyelan (Advancing) | (a)           | Karmaşık (Complex)   |
| (b)             | Duraklamış (Suspended)   | (b)               | Geriye Doğru Gelişen Heyelan (Retreating) | (b)           | Bileşik (Composite)  |
| (c)             | Uyanmış (Reactivated)    | (c)               | Genişleyen Heyelan (Widening)             | (c)           | Ardışık (Successive) |
| (ç)             | Etkin Olmayan (Inactive) | (ç)               | Büyüyen Heyelan (Enlarging)               | (ç)           | Tek (Single)         |
| (d)             |                          | (d)               | Yayılan Heyelan (Moving)                  | (d)           | Çoklu (Multiple)     |
| (e)             |                          | (e)               | Sınırlı Heyelan (Confined)                |               |                      |
| (f)             |                          | (f)               | Tükenen Heyelan (Diminishing)             |               |                      |

Tablo 2.8. Aktivite durumlarına göre heyelanların yaş ve tanım bilgileri (Keaton ve DeGraff, 1996)

| Sınıflama       |                                      | Yaş              | Belirti                                                           |
|-----------------|--------------------------------------|------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Etkin (Active)  |                                      | < 100 yıl        | Halihazırda hareket var.                                          |
| Gizli (Dormant) | Etkin Olmayan [Genç] (Dormant Young) | 100 – 5000 yıl   | Halihazırda hareket yok.                                          |
|                 | Fosil [Olgun] (Dormant Mature)       | 5000 – 10000 yıl | Binlerce yıldır etkin değil. Morfolojik özelliklerinden tanınır.  |
|                 | Kalıntı [Yaşlı] (Dormant Old)        | > 10000 yıl      | Binlerce yıldır etkin değil. Morfolojik özelliklerinden tanınmaz. |

Heyelanlarda aktivite dağılımları hareket eden malzeme ile sınırlı kalabilmekte veya kayma yüzeyi malzemenin hacmine göre genişleyebilmektedir. Yenilme yüzeyinin hareket yönüne doğru geliştiği durumlarda ilerleyen heyelan, yenilme yüzeyinin hareketin aksi yönde geliştiği durumlarda gerileyen heyelan ifadeleri kullanılmaktadır. Yenilme yüzeyinin heyelan kanatlarının birinde veya her ikisinde ilerlediği durumlarda genişleyen heyelan terimi, yenilme yüzeyinin her iki yönde gelişme eğiliminde olduğu yani heyelanın hem ilerleyen hem de gerileyen özellik gösterdiği durumlarda da büyüyen heyelan terimi kullanılmaktadır. İlerleyen ve gerileyen heyelanlar tek yönde gerçekleşen heyelan tipini tanımlarken, büyüyen heyelanlar ise her iki yöndeki hareketi ifade etmek için kullanılmaktadır (Varnes, 1978). Hareket eden malzemenin hacminde ve yenilme yüzeyinde

bir değişim gözlenmediği hareketler yayılan heyelanlar olarak nitelendirilmektedir. Hareket eden malzemenin topuğunda kayma yüzeyinin gözlenmediği heyelanlar sınırlı heyelanlar olup yer değiştiren malzeme nedeniyle heyelan topuğunda sıkışma ve kabarma gözlenebilmektedir (Hutchinson, 1988). Yer değiştiren malzeme hacminin zamanla azaldığı heyelanlar ise tükenen heyelanlar olarak isimlendirilmektedir.

Aktivite tipleri karmaşık, birleşik, çoğul, tekil ve ardışık şeklinde sıralanmaktadır (Varnes, 1978). En az iki farklı türdeki yamaç hareketinin birbirini izleyerek oluşması ile karmaşık heyelanlar meydana gelmektedir. Devrilme sonrasında vadiye dolan malzeme bozuşmanın da etkisiyle bir süre sonra kayma göstermekte ve ikincil bir heyelan meydana gelmektedir. (Giraud vd., 1990). Daha öncesinde karmaşık olarak tanımlanarak yer değiştirme gösteren malzemenin farklı bölgelerinde eş zamanlı en az iki farklı hareket türünün meydana geldiği heyelanlar ise birleşik heyelanlar olarak sınıflanmaktadır (Prior vd., 1968). Ardışık heyelanlarda aynı kayma yüzeyini paylaşmayan aynı türdeki yamaç hareketleri gözlenmektedir. Ardışık kaymalar sığ derinlikte gözlenen tekil kaymaların bir araya gelmesi ile oluşmakta (Skempton ve Hutchinson, 1969) ve bir mozaik gibi görülen düzensiz hareketler şeklinde gözlenmektedir (Hutchinson, 1967). Yer değiştiren malzemenin kesintisiz bir şekilde geliştii hareketler tekil heyelanlar, aynı türdeki hareketin heyelanın farklı kısımlarında tekrarlı olarak geliştii heyelanlar ise çoklu heyelanlar olarak tanımlanmaktadır.

### **2.1.5. Duraylılık Analizleri**

Kesme dayanımı bir zeminin dayanabileceği maksimum kesme gerilmesidir. Şev duraysızlığı zeminin kesme dayanımının azalması veya denge için gerekli kesme gerilmesinin artması ile oluşmaktadır. Duraysızlığının temel nedeni zeminin kesme dayanımının denge için gerekli kesme gerilmesinden küçük olmasıdır. Zeminin kesme dayanımındaki azalma boşluk basıncının artması (efektif gerilmenin azalması), çatlakların oluşması, şişme (boşluk oranında artış), kayma çiziklerinin gelişimi, killi kaya dolguların bozuşması, devamlı yükler altında yavaş akma, yıkanma, birim deformasyon yumuşaması, bozuşma, tekrarlı yüklemekten kaynaklı olabilmektedir. Kil mineralleri içeren zeminlerin varlığı da şev yenilmelerine eşlik etmektedir. Kesme gerilmesinin artmasına şevin tepesindeki yükler, şev tepesinde oluşan çatlaklardaki suyun basıncı, su içeriğinin artması

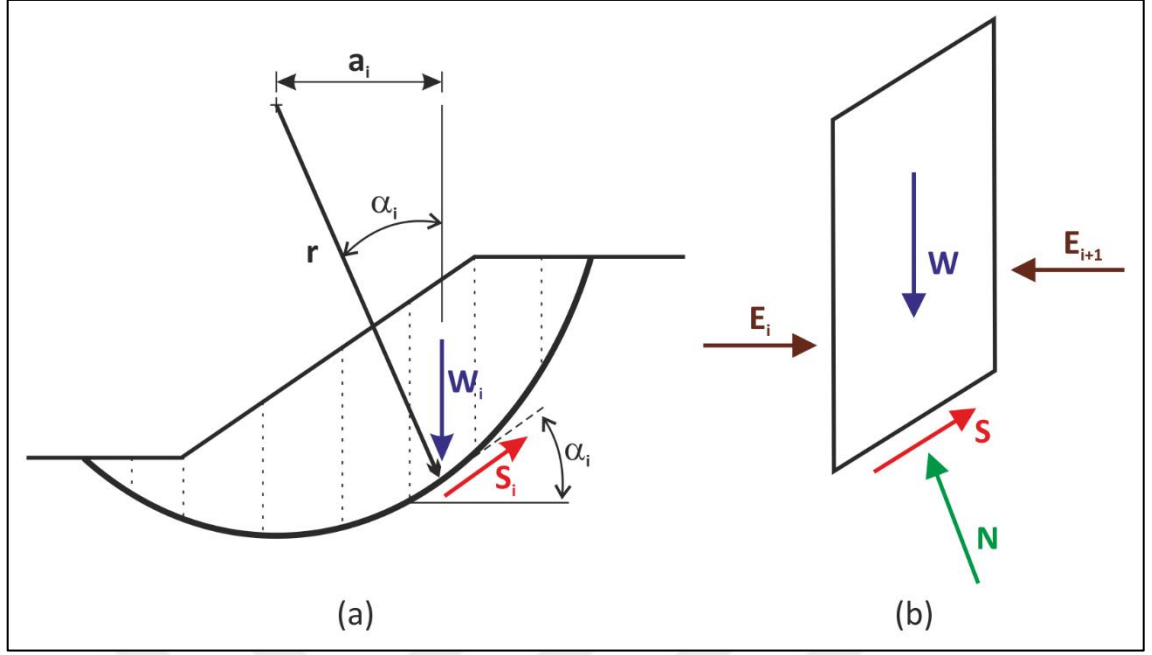
ile zemin ağırlığının artması, şev tabanında yapılan kazı, şev tabanında su seviyesinde düşüş ve depremler neden olmaktadır.

Belirli bir yüzey boyunca kaydırıcı kuvvetlerin aynı yüzey düzlemi üzerinde bulunan ve kaymayı engelleyen kuvvetler ile karşılaştırılması ve duraysızlığın analiz edilmesi için, kinematik analiz, limit denge analizi, nümerik analiz ve olasılığa dayalı analiz olmak üzere dört farklı yöntem kullanılmaktadır.

Kinematik analiz yöntemi, duraylılığı yapısal özellikler tarafından denetlenen eklemlili kaya kütlelerinden oluşan şevlerde uygulanır. Ancak kohezyon, kayan bloğun ağırlığı, şevin geometrisi, su basıncı, sismik ivme ve dış kuvvetleri dikkate almayarak sadece şev aynası ile süreksizliklerin yönelimlerini ve süreksizlik yüzeylerinin içsel sürtünme açısını dikkate alması nedeniyle doğrudan bir tasarım yöntemi olmayıp, kritik duraysızlıkların belirlenmesi için yapılacak ayrıntılı analizlere yol gösterici bir ön analiz yöntemidir.

Hem tasarım hem de iyileştirme (duraysızlaştırma) amacıyla kullanılan en yaygın yöntemler limit denge analiz yöntemleridir. Bu yöntemlerde kayan kütlenin ağırlığı ( $W$ ), malzemenin makaslama dayanımı ( $c, \phi$ ), gözenek suyu basıncı ( $u$ ), şevin geometrisi, yer ivmesi (sismik koşullar), tansiyon çatlağı durumu ve dış yükler dikkate alınır. Bu yöntemlerin bazılarında denge denklemleri tek serbest cisim için çözülürken, bazılarında zemin kütlesi belirli sayılarda dilimlere ayrılmak suretiyle denge denklemleri yazılır ve her bir dilim için denge denklemi çözülür. Yöntemler, incelenen şev için en küçük güvenlik katsayısının hesaplanması temeline dayanmaktadır (Şekil 2.7). Hesaplanan güvenlik katsayısı sadece incelenen yenilme yüzeyi için geçerlidir ve güvenlik katsayısının ( $F$ ) en düşük değeri belirlenene kadar hesaplamalara devam edilir. Elde edilen en küçük  $F$  değeri incelenen duraysızlık türü için o şevin güvenlik katsayısı olarak kabul edilir.

Şevlerin tasarlanması aşamasında kullanılan tüm duraysızlık analizi yöntemlerinde bazı varsayımların ve basitleştirmelerin yapılması, veri yetersizliği gibi nedenlerle sonuçların gerçek durumu ne kadar yansıttığı konusunda bazen belirsizlikler yaşanmaktadır. Limit denge analiz yöntemleri genellikle deterministik esastır ve analizlerde kullanılan dayanım parametreleri genellikle deneyler ve ölçümler neticesinde elde edilmektedir. Duraysızlığın varlığı halinde geriye dönük analizlerde makaslama dayanımı parametrelerinin ( $c, \phi$ ) belirlenmesinde girdi parametrelerinin önemi büyük rol oynamaktadır. Bu durum ekonomik açıdan olumsuzluk yaratabilmekte, aksi bir seçimde ise duraysızlık riski artırılmış olabilmektedir.



Şekil 2.7. a) Düşey dilimlere bölünmüş olan dairesel kayma yüzeyine etki eden kuvvetler, b) bir dilime etki eden kuvvetler (Duncan ve Wright, 2014)

Burada;  $W$  ve  $W_i$  kayan kütlenin veya dilimin ağırlığını;  $N$ , normal kuvvetleri,  $S$  ve  $S_i$ , kaydırma kuvvetlerini göstermekte,  $E_i$  ve  $E_{i+1}$  kuvvetleri ise komşu dilimlerden gelen kuvvetleri temsil etmekte olup analizlerde genellikle ihmal edilmektedir.  $r$ , daire merkezi ile dilim arasındaki mesafeyi (yarıçap);  $a_i$ , daire merkezi ile dilimin orta noktası arasındaki yatay mesafeyi;  $\alpha_i$ , ise dilimin orta noktasına teğet olan doğrunun eğimini ifade etmektedir.

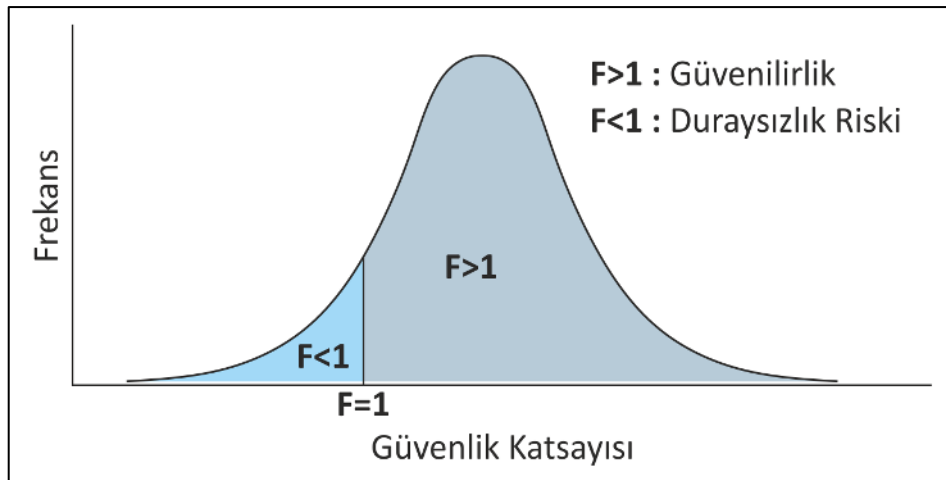
Çok yaygın olmamakla birlikte, mühendislik açıdan belirli bir riskle çalışılmasına yol açabilecek durumlarda (örneğin bir cevherin kısa sürede üretilmesi gibi) riskin seviyesi belirlenerek istatistik ve olasılık hesaplama yöntemlerinin kullanıldığı olasılığa dayalı duraylılık analiz yöntemi kullanılmaktadır.

Olasılığa dayalı analizlerde girdi parametreleri rastgele değişkenler olarak kabul edilmekte ve bunların olasılık dağılım modellerinden normal dağılım modeline uygun dağılım gösterdikleri kabul edilmektedir. Buna bağlı olarak bu analizlerde değişkenlik gösteren parametrelerin dağılımları dikkate alınarak birden fazla güvenlik katsayısı hesaplanmaktadır. Whittlestone vd. (1995), olasılığa dayalı yaklaşımla ve girdi parametrelerinin dağılımını göz önünde bulundurarak gerçekleştirdikleri şev duraylılık analizlerinden elde ettikleri sonuçları güvenlik katsayısının birden küçük olan kısmının olasılığı ile belirlemişlerdir. Buna göre güvenlik katsayısının birden büyük olan kısmın alanı da güvenilirlik (duraysızlığın gerçekleşme olasılığı) derecesini ifade etmektedir (Şekil 2.8).

Özetle, iki boyutlu limit denge analiz yöntemlerine dayanan ve olasılık yaklaşımını da dikkate alan bu analiz türüyle, herhangi bir şevde başlıca girdi parametrelerinin ortalama değerlerden sapmasına bağlı olarak duraylılığın hangi düzeyde hassas olacağı araştırılmaktadır. Ancak, bir tür kar-zarar hesabı yapılarak, herhangi bir olasılık seviyesi seçilerek belirlenecek olan şev geometrisine göre tasarım yapılması ve daha sonrasında şevin yenilmesi durumunda üretimde ve ulaşımda ortaya çıkacak aksamalara bağlı oluşacak ekonomik kayıplar ile şevin bu şekilde tasarımı yapılması durumunda kazı maliyeti açısından elde edilecek kazançlar karşılaştırılmalıdır. Açık işletmelerdeki kritik bölgeler, duraysızlığa izin verilmemesi gereken karayolu şevleri, dolgu barajlar gibi mühendislik yapılarında, içerdiği riskler nedeniyle bu yöntem pek tercih edilmemektedir.

Şevi oluşturan malzemenin yenilmesine bağlı olarak değişen gerilme dağılımı ve deformasyonlar sonucu ilerleyici karakterde duraysızlık meydana gelir. Ayrıca malzemenin özelliklerine bağlı olarak gerilme dağılımı da şevde deformasyonları, hareketi ve yenilme zonunun gelişimini kontrol eder. Kısacası, şevlerde gerilme ve deformasyon ilişkisinin belirlenmesi de gerekmektedir. Bunun için, çalışmanın da konusunu oluşturan, nümerik analiz yöntemlerinden yararlanılmaktadır. Bu yöntemler arasında en yaygın olarak kullanılan yöntem sonlu elemanlar yöntemidir (Finite Element Analysis, FEM).

Sonlu elemanlar yöntemi ile kaya ve toprak zemin kütlelerinin kırılma ve plastisite gibi doğrusal olmayan davranışları, süreksizliklerin etkisi, ilerleyici karakterli yenilme ve gerilme dağılımı ve ayrıca ilksel tektonik gerilme sisteminin etkisi değerlendirilebilmektedir.



Şekil 2.8. Güvenlik katsayısı değerlerinin dağılımı ve buna bağlı olarak duraysızlık ve güvenilirlik derecesi

## 2.2. İtki Dalgaları

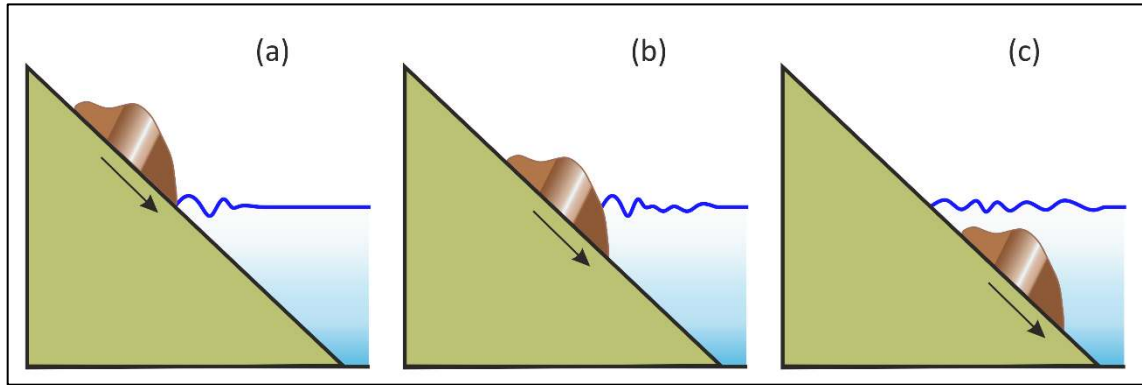
### 2.2.1. Dalga Teorisi

Heyelan, buzul hareketleri, çığ oluşumları, kaya düşmeleri vb. kütle hareketlerinin, doğal göl gibi su kütlelerinde ya da baraj göl alanlarında darbe etkisiyle oluşturdukları dalgalara itki dalgaları denilmektedir. İtki dalgalarına neden olan bu kütle hareketleri ise deprem veya iklimsel etkenler ile tetiklenebilmektedir (Anderson ve Riemer, 1995). Göl gibi göreceli olarak küçük su kütlelerinde büyük ölçekte ve şiddetli hissediliyor olsa da deniz, okyanus gibi büyük su kütlelerinde meydana gelen itki dalgaları düşük seviyede oluşmakta, başka bir deyişle deniz ve okyanustaki dalgaların etkisi göllere nazaran daha az hissedilmektedir. Kütle hareketlerinin oluşturduğu itki dalgalarının baraj göllerinde yıkıcı etkiler yarattığı da bilinmektedir (Panizzo vd., 2005b).

Genellikle çok güvenli yapılar olarak bilinen barajlarda yenilmeler meydana gelmekte ve bu yenilmelerin %10'unda rezervuar alanlarında meydana gelen heyelanların sonucunda oluşan dalgalar etkili olmaktadır (Ertunç, 2003; Ersoy vd., 2015). Baraj gölünün dolmaya başladığı aşamanın, baraj rezervuarı çevresindeki heyelan duraylılığı açısından en tehlikeli an olduğu, bu tipteki heyelanların %85'inin, baraj inşaatının tamamlanması ve baraj gölünün dolmasından itibaren iki yıl içerisinde gerçekleştiği bilinmektedir (Anderson ve Riemer, 1995). Genel olarak depremlerin etkisiyle ya da baraj rezervuarlarındaki ani gelişen su seviyesi değişimlerine bağlı olarak gelişen kütle hareketleri, büyük baraj yıkılmalarına sebep olmuştur (Anderson ve Riemer, 1995). Heyelanlardan kaynaklı olarak baraj rezervuar alanlarında gelişmiş itki dalgalarının tarihte çok daha yıkıcı etkilere sebep olduğu bilinmektedir (Tezel, 2015).

İtki dalgalarının yıkıcı etkileri ve bu dalgalardan kaynaklı olarak görülen birçok felaketten dolayı bu dalgaların nasıl oluştuğu incelenmeye başlanmakta; dalgaların oluşumundan önce, dalgayı meydana getirecek etkinin incelenmesi gerekliliği olduğundan kayan malzemenin su ile ilişkisi irdelenmektedir. Kayan malzemenin su ile ilk temas ettiği an (Şekil 2.9a), kayan malzemenin kısmen batık olduğu an (Şekil 2.9b) veya kayan malzemenin tamamen suyun altında olduğu an (Şekil 2.9c) olmak üzere üç farklı durum için farklı çözümlemeler kullanılmaktadır. Bu çalışmadaki analizler, heyelan malzemesinin su ile ilk temas an (Şekil 2.9a ve Şekil 2.10a) baz alınarak yapılmıştır. Oluşan itki dalgalarının işleyiş mekanizması ise üç ayrı aşamaya ayrılmakta (Şekil 2.10), dalgaların etkilerinin

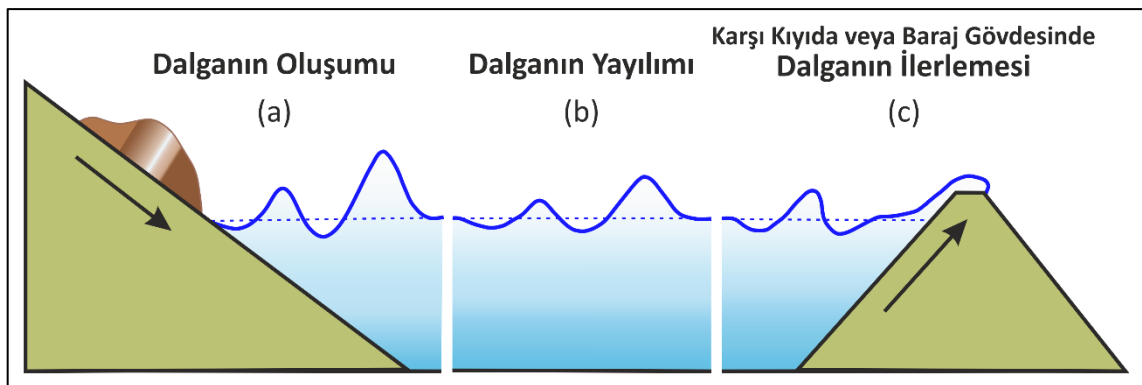
belirlenmesinde bu aşamalar (oluşum-yayılım-ilerleme) birlikte ele alınmakta fakat dalgaların yaratacağı etkiler blok (Russell, 1837), piston (Miller, 1960), granüler kayma (Slingerland ve Voight, 1982) ve darbe (Prins, 1958) gibi farklı modellerle analiz edilebilmektedir.



Şekil 2.9. Kayan malzemenin suya göre durumuna bağlı gelişen itki dalgalarının oluşum tipleri a) malzemenin suya ilk temas ettiği an, b) malzemenin yarı batık olduğu an, c) malzemenin batık olduğu an

İtki dalgalarının işleyiş mekanizması şu şekilde sıralanmaktadır:

- (1) Heyelan vb. kütle hareketlerinin etkisiyle itki dalgalarının oluşumu, (Şekil 2.10a)
- (2) Oluşan itki dalgalarının rezervuar boyunca yayılımı, (Şekil 2.10b)
- (3) İtki dalgalarının baraj gövdesine ya da bir yüzeye çarpması ve yüzeyde ilerlemesi (Şekil 2.10c)



Şekil 2.10. İtki dalgalarının işleyiş mekanizması a) dalgayı tetikleyen evre, b) dalganın yayılım gösterdiği evre, c) dalganın sönmüldüğü ya da bir engelle çarptığı evre

Oluşan itki dalgalarının fiziksel özellikleri; dalga yüksekliği, dalga genişliği, dalga yönü ve dalga hızı olarak sıralanmaktadır. Dalganın yayılımı ve ilerlemesi tamamıyla bu fiziksel özelliklere bağlı olmakla birlikte, meydana gelen bir heyelan sebebiyle oluşan itki dalgalarının fiziksel özellikleri de öncelikle suya çarparak dalga oluşumunu tetikleyen malzemenin miktarına ve dalga öncesindeki su yüksekliğine bağlıdır. Malzemenin miktarından sonra malzemenin suya çarpma hızı önemli bir parametre olup, çarpma hızı da malzemenin kaydığı yüzeyin eğimi ile ilişkilidir. Özetle, heyelan gibi kütle hareketlerinin sonucunda oluşacak darbenin etkisi heyelan malzemesinin hacmine, yamaç eğimine ve darbe hızına bağlıdır. Bu nedenle çalışmaların temelini heyelan malzemesinin hacminin belirlenmesi oluşturmakta, bu amaç doğrultusunda heyelanın yanal ve düşey devamlılığının belirlenmesi gerekmektedir. Dalganın yayılımının ve etkisinin gerçeğe yakın bir şekilde modellenebilmesi, jeolojik ve jeoteknik verilerin doğruluğuna son derece bağlıdır. Bu sebeple de sahanın jeolojik-jeoteknik çalışmasının titizlikle yapılması büyük öneme sahiptir.

İtki dalgasının oluşum-gelişim-yayılım aşamaları heyelan malzemesinin darbe etkisine olduğu kadar rezervuar şekline, derinliğine ve dalganın yayılım istikametine bağlıdır. İtki dalgalarının rezervuar kıyısında veya baraj gövdesindeki etkisi ise su derinliğine, dalga hızına, dalga yüksekliğine, karşı kıyı ve/veya baraj gövde eğimine bağlı olarak değişmektedir.

Dünya ölçeğinde heyelan etkisiyle oluşan itki dalgalarının oluşum mekanizmasının incelenmesi amacıyla, kayan malzemenin fiziksel özellikleri dikkate alınarak dört farklı oluşum modeli önerilmiştir.

Bu modeller şu şekilde sıralanmaktadır:

1. Blok Modeli (Russell, 1837)
2. Piston Modeli (Miller, 1960)
3. Granüler Kayma Modeli (Slinger ve Voight, 1982)
4. Darbe Modeli (Prins, 1958)

Ayrıca bu dalgaların fiziksel özelliklerinin belirlenmesine yönelik olarak da beş farklı yaklaşım önerilmektedir (Heller vd., 2009). Bu yaklaşımlar; arazi çalışmalarından elde edilen ampirik denklemlerin kullanılması (Fritz, 2002; Quecedo vd., 2004), verilerin analitik olarak değerlendirilmeleri (Di Risio, 2005), numuneler üzerinde yapılan laboratuvar deneylerinden elde edilen ampirik denklemlerin kullanımı (Hughes, 1993; Heller vd., 2008),



prototip özel modeller üzerinde yapılan deneyler ve nümerik simülasyonlara dayalı modeller (Grilli vd., 2002; Montagna vd., 2011; Gabl vd., 2015) şeklinde sıralanabilir (Tablo 2.9).

Tablo 2.9. İtki dalgalarının fiziksel özelliklerinin tayini için önerilen beş yöntem

| Yöntem No  | Yöntem Adı                                        | Bu Çalışma |
|------------|---------------------------------------------------|------------|
| Yöntem (1) | Model Testlerden Elde Edilen Ampirik Denklemler   | <b>X</b>   |
| Yöntem (2) | Prototip Özel Modeller Üzerinde Yapılan Deneyler  |            |
| Yöntem (3) | Nümerik Simülasyonlara Dayalı Modelleme           | <b>X</b>   |
| Yöntem (4) | Arazi Verilerinden Elde Edilen Ampirik Denklemler |            |
| Yöntem (5) | Analitik Değerlendirmeler                         |            |

Heyelanlardan kaynaklı olarak oluşan itki dalgalarının özelliklerinin tahmininde kullanılan bu beş farklı yöntem; elde edilen sonuçların kalitesi, yöntemde harcanan zaman, yöntem için yapılan maliyet, yöntemlerin kullanıcıları ve yöntemlerde girdi olarak kullanılan parametrelerin önemi açısından karşılaştırılmış (Heller vd., 2009) ve ölçütlerin önem derecesine göre ilgili çalışmalarda kullanım tercihinin sunulmuştur (Tablo 2.10).

Tablo 2.10. İtki dalgası özelliklerinin tespitinde kullanılan yöntemlerin karşılaştırması (Heller vd., 2009)

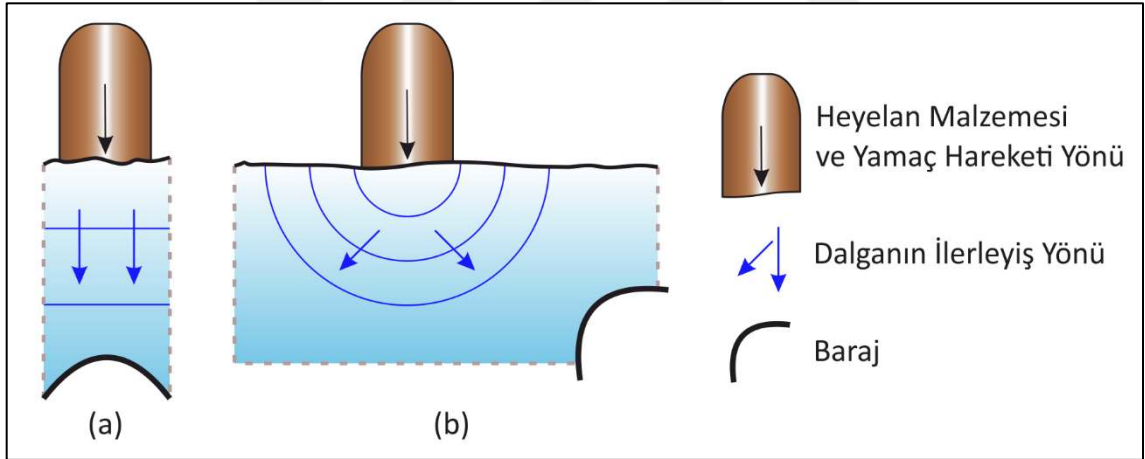
| Yöntemler                  | Yöntem (1) | Yöntem (2) | Yöntem (3)        | Yöntem (4)  | Yöntem (5)  |
|----------------------------|------------|------------|-------------------|-------------|-------------|
| Ölçütler                   |            |            |                   |             |             |
| <b>Sonuçların Kalitesi</b> | Tahmin     | Kesin      | Tahmin Kesin      | Kaba Tahmin | Kaba Tahmin |
| <b>Harcanan Zaman</b>      | Az         | Çok Fazla  | Fazla Çok Fazla   | Az          | Az          |
| <b>Maliyet</b>             | Az         | Çok Yüksek | Yüksek Çok Yüksek | Düşük       | Düşük       |
| <b>Kullanıcı</b>           | Mühendis   | Mühendis   | Uzman             | Mühendis    | Mühendis    |
| <b>Anlaşılabilirlik</b>    | Orta       | Yüksek     | Düşük             | Orta        | Düşük       |
| <b>Girdilerin Önemi</b>    | Orta       | Fazla      | Fazla             | Orta        | Orta        |

Bu çalışmada heyelan kaynaklı olarak gelişen itki dalgalarının değerlendirilmesi, arazi verilerinden elde edilen ampirik denklemlere ve iki boyutlu sayısal analizlere dayandırılmaktadır. Bu yöntemlerin olumlu ve olumsuz yönlerinin irdelenmesi ve kullanılmasının uygunluğunun anlaşılabilmesi için diğer yöntemlerinde de değerlendirilmesi gerekmektedir (Tablo 2.11).

Tablo 2.11. Heyelan kaynaklı itki dalgalarının fiziksel özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan yöntemlerin karşılaştırılması

| #   | +/- | Avantaj +/- Dezavantaj                                                                                                                                                                                                              |
|-----|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (1) | +   | Elde edilen sonuçlar prototip-özel bir model ya da nümerik simülasyonlar kullanarak daha fazla araştırmanın gerekip gerekmediğine karar verilmesine yardımcı olur.                                                                  |
|     | -   | Çok küçük modellerde ölçek etkisi ihmal edilemez ve geometrik değişikliklerden kaynaklanan yansıma, kırılma, kırınım vb. prototip model etkileri görülür.                                                                           |
|     |     | Denklemler basit geometriye sahip rezervuar alanları ile sınırlıdır, bu nedenle özel şartlara sahip alanlarda önerilmez.                                                                                                            |
|     |     | Hughes, 1993; Heller vd., 2008                                                                                                                                                                                                      |
| (2) | +   | ...                                                                                                                                                                                                                                 |
|     | -   | Çok küçük modellerde ölçek etkisi ihmal edilemez.                                                                                                                                                                                   |
|     |     | Geometrik sadeleştirmelerde model etkileri görülür.                                                                                                                                                                                 |
|     |     | Müller ve Schurter, 1993                                                                                                                                                                                                            |
| (3) | +   | Gelişen teknoloji ile daha da önem kazanacaktır.                                                                                                                                                                                    |
|     | -   | Heyelan kaynaklı itki dalgalarında kalibrasyon ve doğrulama verilerine ihtiyaç vardır. Bu veriler genellikle hidrolik model testlerinden elde edilir.                                                                               |
|     |     | Hesaplama zamanını kabul edilebilir sınırlar içinde tutmak için Navier-Stokes denklemlerinin basitleştirilmesinin yanı sıra rezervuarın bir bölümünde sınırlandırma veya kaba bir hesaplama ızgarasının kullanılması da gereklidir. |
|     |     | Grilli vd., 2002; Montagna vd., 2011; Gabl vd., 2015                                                                                                                                                                                |
| (4) | +   | Ölçek etkisi yoktur.                                                                                                                                                                                                                |
|     | -   | Ölçümlerden ziyade çoğunlukla tahmini arazi verilerine dayanmaktadır.                                                                                                                                                               |
|     |     | Girdi parametreleri sadece tahminlere dayanmaktadır.                                                                                                                                                                                |
|     |     | Ataie-Ashtiani ve Malek Mohammadi'nin (2007) geliştirdiği denklemler sadece dalga genliğinin hesaplanmasını sağlamakta, diğer dalga parametrelerinin belirlenmesi için bilinen bir çalışma bulunmamaktadır.                         |
|     |     | Fritz, 2002; Quecedo vd., 2004                                                                                                                                                                                                      |
| (5) | +   | Ölçek etkisi yoktur.                                                                                                                                                                                                                |
|     | -   | Dalgaların oluşmasına etki eden mekanizmayı analitik olarak tanımlamak karmaşıktır. Bu nedenle uzak arazilerde yapılan çalışmalarda tahminler basit başlangıç koşullarına dayanabilir.                                              |
|     |     | Sonuçları takip etmek zordur.                                                                                                                                                                                                       |
|     |     | Sadeleştirmeye ve basitleştirmeye ihtiyaç vardır.                                                                                                                                                                                   |
|     |     | Di Risio, 2005                                                                                                                                                                                                                      |

İtki dalgalarının yayılım mekanizması doğrusal ve radyal (dairese) olmak üzere iki farklı şekilde gerçekleşebilmektedir (Heller, 2009). Yayılım tipini belirleyen parametre heyelan malzemesinin genişliği ile rezervuarın genişliği arasındaki ilişkidir. Şöyle ki, heyelan malzemesinin yayılım genişliği rezervuarınkinden büyük ise, yani rezervuar alanı malzemeye göre daha dar ise heyelan malzemesi dar rezervuar boyunca doğrusal yayılım göstermektedir. Böyle bir koşulda heyelan malzemesi yan kısımlara açılmayacağından yanal yayılma oluşmayacaktır (Şekil 2.11a). Eğer ki tam tersi bir durum söz konusu olur ise, yani rezervuar genişliği heyelan malzemesinin yanal yayılımına izin verecek kadar geniş ise, bu durumda itki dalgaları darbenin olduğu noktadan rezervuarın yanlarına doğru da ilerleyecektir. Bu durumda rezervuar boyunca -bir yarım daire şeklinde- dairese (radyal) yayılım gerçekleşmiş olacaktır (Şekil 2.11b). Dolayısıyla itki dalgalarının yayılımı rezervuarın geometrisi ile doğrudan ilgili olup, her iki yayılım tipi için de itki dalgalarının fiziksel özellikleri ve dalgaların yaratacağı etkiler farklı modeller ile çözümlenebilmektedir.



Şekil 2.11. İtki dalgalarının yayılım mekanizması a) doğrusal yayılma, b) radyal yayılma

İtki dalgaları geleneksel olarak ampirik formüller ile değerlendirilmektedir. Fakat özellikle son 20 yıl zarfında nümerik analizlere dayalı iki boyutlu modellemeler de sıkça kullanılmaktadır. Teknoloji gelişimine paralel olarak nümerik analizlerden üç boyutlu simülasyonlar da elde ediliyor olsa da bunlar itki dalgaları için çok fazla kullanılmamakta, bu simülasyonlar genellikle baraj dolu savak tasarımlarında, rüzgâr türbinlerinin modellemelerinde veya enerji tabanlı projelerde kullanılmaktadır (Kırkgöz vd., 2010; Xiao vd., 2014; Hwang Ahn vd., 2017). İtki dalgaların etkisinin üç boyutlu nümerik modellemelerle analiz edildiği çalışmalar literatürde çok kısıtlıdır.

Çalışmalar, rezervuar alanını sınırlayan vadi yamaçlarındaki boşluk suyu basınçlarının ani değişimleri sebebiyle heyelanların oluştuğunu ya da paleo-heyelanların aktif hale geldiğini göstermiştir (Banach, 1985; Levkevic ve Lopuh, 2003; Wang vd., 2004, 2005; Kaczmarek vd., 2015). Bu baraj yıkılmalarına en çarpıcı örnek olarak İtalya'daki Vajont Barajı verilmektedir. 1963 yılında gerçekleşen yıkılma, rezervuar alanında meydana gelen bir heyelan sebebiyle oluşmuştur. Vadi yamacındaki hidrostatik su basıncının ani değişimlerinin neden olduğu bu heyelan, baraj gölünde 250 metre yüksekliğe ulaşan bir dalga oluşturmuş ve oluşan dalga barajı aşarak mansap tarafında bulunan birçok kasabayı etkileyerek yaklaşık 2000 kişinin hayatını kaybetmesine neden olmuştur (Kilburn ve Petley, 2003).

İtki dalgalarının meydana getirdiği felaketler sebebiyle 1960'lı yıllardan itibaren bu konuda daha hassas davranılmış, barajların yapılacağı bölgelerdeki olası kütle hareketlerinin oluşum mekanizmasının ve duraylılığının incelendiği ve araştırıldığı çalışmalar önem kazanmıştır. Baraj gövdesinin yer alacağı alanlarda gerçekleştirilen analizlere ek olarak baraj rezervuar alanını sınırlayan vadilerdeki olası heyelanların da ayrıntılı incelenmesine başlanmıştır. Her ne kadar duraylılık analizi yapılıyor olsa da bu analizler yamaç duraylılığının tespitinden öteye geçememekte, ilk kez oluşan heyelanın ya da aktif hale gelen paleo-heyelanın yaratacağı itki dalgasının ve bu dalganın rezervuar kıyısına ya da baraj gövdesine yapacağı etkilerin analizi es geçilmektedir. Son 50 yıllık süreçte, doğrudan depremden kaynaklı olarak meydana gelen tsunamilerin oluşum mekanizması ve yayılım şekli üzerine pek çok araştırma yapılmış olsa da depremlerden kaynaklı olarak oluşan heyelanların ya da tetiklenerek aktif hale gelen paleo-heyelanların meydana getireceği itki dalgalarının analizi son 25 yılda önem kazanmaya başlanmıştır (Müller, 1995; Ramsden, 1996; Fritz vd., 2004; Heller, 2007; Akgün, 2011; Kaczmarek vd., 2015; Yin vd., 2015; Ersoy vd., 2019). Ülkemiz açısından rezervuar alanlarında gerçekleşecek kütle hareketlerinden kaynaklanacak itki dalgalarının etkileri üzerine yapılan araştırmalar da maalesef son derece azdır. Ülkemizdeki çalışmaların çoğunluğu deprem kaynaklı tsunami dalgaları üzerine yapılmış olup bu çalışmalar da Marmara depremlerinden sonra (17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi, Mw=7.4; 12 Kasım 1999 Düzce Depremi, Mw=7.2) önem kazanmıştır (Altınok vd., 1999; Altınok ve Ersoy, 2000; Yalçın vd., 2002; Alpar vd., 2003; Gazioğlu, 2017). Heyelan etkisiyle oluşan itki dalgaları üzerine çalışmalar yapılmış olsa da (Gazioğlu vd., 2005; Didenkulova vd., 2010) bunlar deprem sonrası su altında gelişen heyelanlar ile ilgilidir.

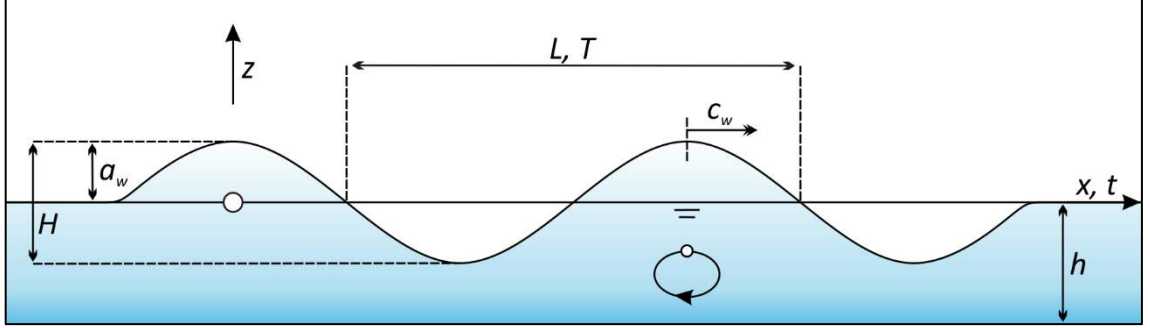
Heyelan kaynaklı itki dalgalarının özelliklerinin belirlenmesine yönelik birçok denklem geliştirilmiştir (Chow, 1960; Synolakis, 1987; Müller, 1995; Huber ve Hager, 1997; Panizzo vd., 2005b; Heller vd., 2009). Bu denklemlerden hangisi kullanılırsa kullanılsın dalga yüksekliği, hızı, periyodu ve uzunluğu gibi fiziksel özelliklerin belirlenmesi esnasında sınır koşulların ve kullanılan girdi parametrelerinin doğru bir biçimde tanımlanması gerekmektedir. Denklemler rezervuarın geometrisine bağlı olarak dalganın doğrusal ve radyal (dairese) yayılımına göre değişse de hemen hemen her denklemde kullanılan girdi parametreleri benzerlik arz etmektedir.

Baraj ve gölet sayısı en fazla olan bölgelerimizden olan Doğu Karadeniz Bölgesinde bulunan birçok heyelan rezervuar içerisinde kalmıştır. Bu heyelanlarda yapılan çalışmaların çoğunluğu ise bu kütle hareketlerinin duraylılığı veya oluşum mekanizması üzerinedir. Baraj rezervuar alanlarında bulunan heyelanların etkisiyle oluşacak itki dalgalarından kaynaklı risklerin değerlendirilmesine yönelik çalışmalar ise birkaç araştırma ile sınırlıdır (Akgün, 2011; Akgün vd., 2017; Ersoy vd., 2017, 2018, 2019, 2020; Karahan vd., 2017, 2020a, b).

### 2.2.2. Dalga Tipleri

Heyelan gibi kütle hareketlerinden etkilenecek oluşan itki dalgaları temel olarak yer çekimi dalgaları başlığı altında incelenmektedir. Başka bir ifade ile yer çekimi bu dalgaların oluşumunda öncelikli olarak etkilidir. Bu itki dalgalarına ait parametreler, x-z düzlemi esas alınarak bir sinüs dalgası üzerinde Şekil 2.12'deki gibi gösterilmektedir. Fakat sinüs dalgası gibi davranan itki dalgalarının dar ( $H/h < 0,03$ ) ve düz ( $H/L < 0,006$ ) olduğu durumlarda, bu itki dalgaları sinüs dalgası yerine doğrusal dalga gibi davranmaktadırlar. Burada, serbest su derinliği  $h$  ile gösterilirken, dalganın en derin noktası ile tepe noktası arasındaki düşey mesafe olan dalga yüksekliği ise  $H$  ile sembolize edilmektedir. Dalga genliği ise serbest su yüzeyinden dalga tepesine kadar olan mesafe olmakta ve  $a$  ile gösterilmektedir ki ideal bir sinüs dalgası için dalga genliği, dalga yüksekliğinin yarısına eşittir ( $a_w = H/2$ ). Dalga boyu ifadesi ise  $L$  ile sembolize edilmekte ve bir dalga tepesinden peşindeki ilk dalganın tepesine olan veya bir dalganın en derin noktasından peşindeki ilk dalganın en derin noktasına olan ya da Şekil 2.12'deki gibi iki düğüm noktası arasında kalan mesafe olarak tanımlanmaktadır.  $T$  ile gösterilen dalga periyodu ise birbirini izleyen iki dalganın sırasıyla tepelerinin, düğümlerinin veya oluklarının sabit bir noktadan geçmesi için geçen süreyi ifade etmektedir. İdeal bir sinüs dalgası için  $T$  periyodu dalga boyunun dalga hızına oranı ( $T=L/c_w$ ) şeklinde

hesaplanmakta, burada  $c$  ise dalganın hızını ifade etmektedir ve (2.1) eşitliğindeki gibi hesaplanmaktadır.



Şekil 2.12. İdeal bir sinüs dalgası üzerinde sunulan ana dalga parametreleri

Meydana gelen itki dalgaları, ideal sinüzoidal dalgalar gibi davranmakta fakat daha önce de belirtildiği gibi küçük boyutlarda oldukları zaman ( $H/h < 0,03$  ve  $H/L < 0,006$ ) doğrusal bir dalga görünümü vermektedirler (Dean ve Dalrymple, 1991).

$$c_w^2 = \frac{g \cdot L}{2 \cdot \pi} \cdot \tanh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot h}{L}\right) \quad (2.1)$$

|                              |                                  |
|------------------------------|----------------------------------|
| $c_w$ : İtke dalgasının hızı | m/s                              |
| $g$ : Yer çekimi ivmesi      | $m/s^2$ ( $\approx 9,81 m/s^2$ ) |
| $L$ : Dalga boyu             | m                                |
| $h$ : Serbest su derinliği   | m                                |
| $\pi$ : Matematiksel sabit   | - ( $\approx 3,14$ )             |

Hem kuramsal açıdan hem de deneysel olarak göreceli olarak iyi çalışılmış birkaç doğrusal olmayan su dalgasının varlığı da bilinmektedir (Heller, 2009). Heyelan kaynaklı itki dalgaları doğrusal olmayan bu dalga tiplerinden biri ile de temsil edilebilmektedir.

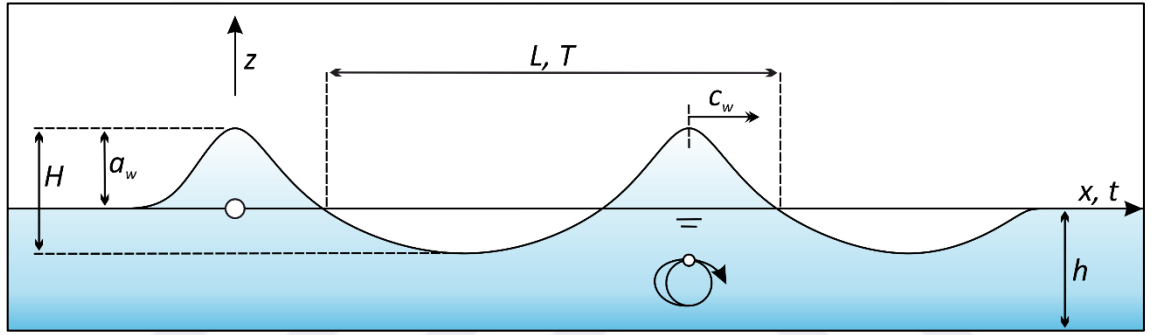
Bunlar;

- Stokes Dalgası,
- Cnoidal Dalga,
- Tekil (Solitary) Dalga ve
- Geniş Yutucu Delik (Bore) olarak isimlendirilmektedir.

### 2.2.2.1. Stokes Dalgası

Stokes dalgaları sinüzoidal dalgalardan daha dik görünüme sahip olmakla birlikte dalganın en derin noktası olan dalga oluğu, dalga tepesinden biraz daha düz ve daha uzun görünmektedir (Şekil 2.13). Dalga parçacıkları kapalı bir yörünge tarzında hareket etmez ve sonuç olarak sıvı kütlelerinin taşınması hafifçe gerçekleşmektedir.

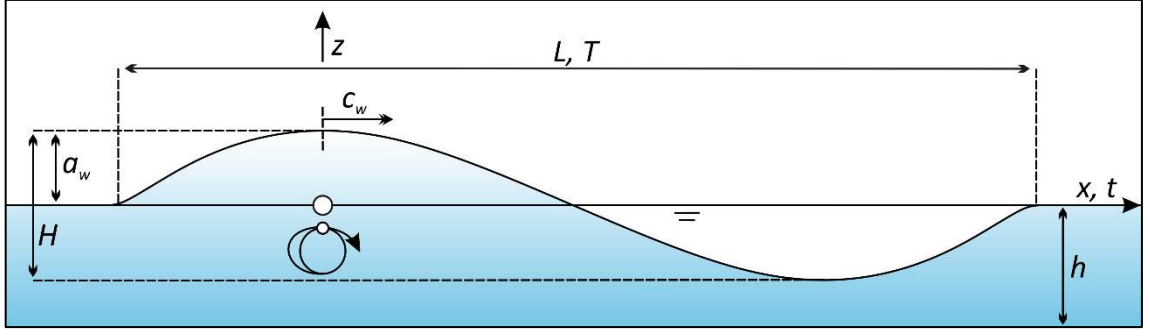
Düşey bir baraj yüzeyindeki yansıma nedeniyle yaklaşan ve yansıyan dalgalar pratik olarak aynıdır ve düğümler arasındaki alan aşağı yukarı hareket etmekte ve dalga düğümleri aynı konumda kalmaktadır. Bu durum dalgaların baraja doğru ilerlemesine neden olur.



Şekil 2.13. Bir stokes dalgası profili ve dalga parametreleri

### 2.2.2.2. Cnoidal Dalga

Cnoidal dalgalar sığ sularda periyodik bir dalga olarak gözlenmekte, rüzgâr kaynaklı dalgalar bu teori ile açıklanabilmektedir. Cnoidal dalga teorisi  $1/50 < h/L < 1/10$  olduğu zamanlarda geçerli olmaktadır (Şekil 2.14). Bununla birlikte bu aralıkta bazı kısımlarda hem Stokes hem de Soliter (tekil) dalga teorileri de geçerli olabilmektedir. Cnoidal dalga esas olarak salınımlı bir karaktere sahiptir fakat aynı zamanda açık su parçacık yörüngeleri ve dolayısıyla sıvı kütlelerinin taşınmasını da göstermektedir.



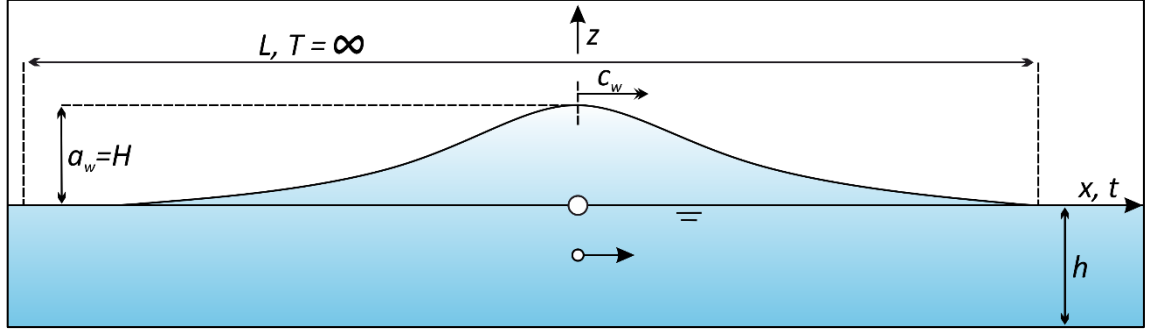
Şekil 2.14. Bir cnoidal dalga profili ve dalga parametreleri

### 2.2.2.3. Tekil (Solitary) Dalga

Salınım yapan bir dalga sığlaşan suda ilerledikçe dalga genliği artan bir şekilde büyümektedir. Aynı zamanda dalga çukuru uzayıp düzleşirken, dalga tepesi kısalıp dikleşmektedir. Bu koşullar altında dalga karakteristikleri dalga boyu ve periyodundan bağımsız olarak, derinlik ve dalga yüksekliğinin fonksiyonu olarak tanımlanabilmektedir (Şekil 2.15). Tektonik gelişen levha hareketlerinden kaynaklanan tsunamiler genellikle bu dalga teorisi ile tanımlanmaktadır. Dalga genliği dalga yüksekliğine ( $a_w = H$ ) eşit duruma gelmekte, buna ek olarak dalga uzunluğu sonsuz olarak ( $L = \infty$ ) ifade edilmekte ve dalga sığ su dalgası ( $L/h > 20$ ) olarak sınıflandırılmaktadır.

Su parçacıklarının hareketi yatay olduğundan büyük sıvı kütesinin taşınması söz konusudur. Teorik olarak yatay bir yatak üzerindeki dörtgen bir kanalda, tekil dalga türünün yüksekliği azalmaz ise dalga herhangi bir şekil değişikliği olmaksızın sınırsız mesafelerde yayılabilmektedir. Gerçekte okyanus veya göl yatağında meydana gelen türbülans, dalga yüksekliğinin bir miktar azalmasına neden olmakta ancak yine de bu azalma diğer dalga türlerinden daha düşük seviyede olmaktadır. Tekil dalga teorisi, dalga periyodunun sonsuz olduğu ( $T = \infty$ ) bir cnoidal dalga teorisinden geliştirilmiştir. Tekil dalgaların dalga hızları (2.2) denklemindeki gibi ifade edilmektedir.





Şekil 2.15. Bir solitary (tekil) dalga profili ve dalga parametreleri

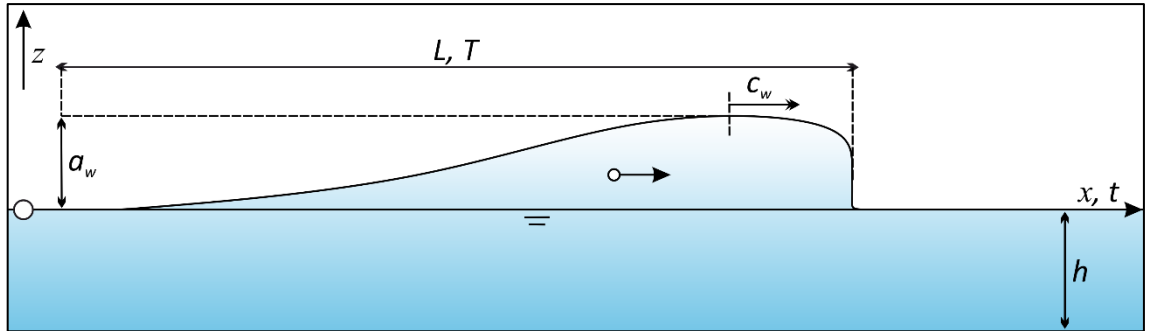
$$c_w^2 = [g \cdot (h + a_w)] \quad (2.2)$$

|                              |                                  |
|------------------------------|----------------------------------|
| $c_w$ : İtke dalgasının hızı | m/s                              |
| $g$ : Yer çekimi ivmesi      | $m/s^2$ ( $\approx 9,81 m/s^2$ ) |
| $h$ : Serbest su derinliği   | m                                |
| $a_w$ : Dalga genliği        | m                                |

#### 2.2.2.4. Bore (Geniş Yutucu Delik)

Dalga tepesinin kıvrılarak kıyıya yakın bir yerde dalganın kırılması ile oluşmaktadır. Yatay partikül hareketine sahip bir sıg su dalgasıdır ve bu sayede büyük sıvı kütlelerini taşımaktadır. Dalganın hareket yönüne göre ön tarafı dik olarak görünmekte ve dalga arkaya doğru hafifçe eğimli görünüm ile karakterize edilmektedir (Şekil 2.16).

Yatay bir yatağın üzerindeki tekil bir dalganın genliği, serbest su derinliğinin 0.78 katını ( $0.78 \cdot h$ ) geçerse dalga kırılır ve bir delik olarak hareket eder (Heller vd., 2009).



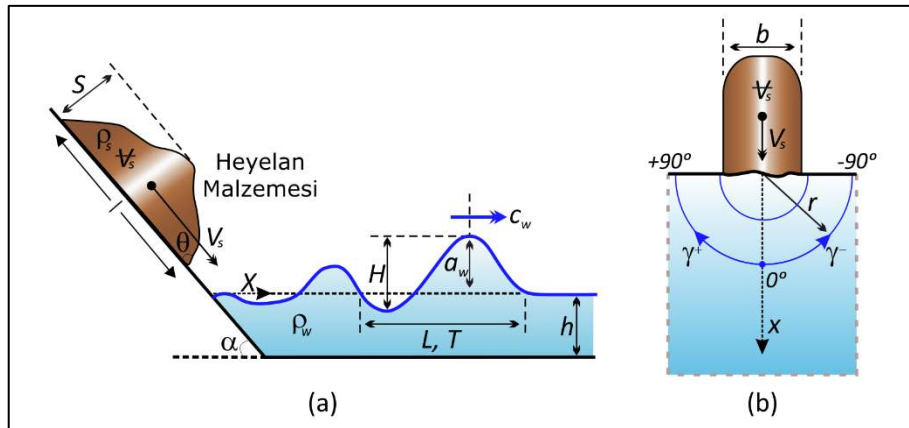
Şekil 2.16. Bir geniş yutucu delik (bore) profili ve dalga parametreleri

### 2.2.3. Dalga Yayılım Mekanizması

İtki dalgaları Şekil 2.11’de gösterildiği gibi doğrusal (iki boyutlu, 2D) veya radyal (üç boyutlu, 3D) yayılma şeklinde gözlenebilmektedir. Uzunlamasına bir rezervuarda kayan kütlelenin genişliği rezervuara eşit ya da rezervuardan büyük olabilir. Böyle bir rezervuarda oluşan itki dalgalarının hareketi rezervuar boyunca sınırlıdır ve yanlamasına yayılmaya fırsat bulamaz (Şekil 2.11a). Kayan kütlelenin genişliğinin rezervuarın genişliğinden düşük olduğu durumlarda itki dalgası radyal bir biçimde yayılır ve çarpma zonundan itibaren serbesttir (Şekil 2.11b). Doğrusal (2D) veya radyal (3D) yayılım olmasına bağlı olmaksızın, başka bir ifade ile rezervuar geometrisine bağlı olmaksızın, heyelan kaynaklı itki dalgalarının özelliklerinin tahmin edilmesinde kullanılan denklemlerde temel girdi parametreleri Tablo 2.12’deki gibi sıralanabilmekte, ayrıca Şekil 2.17’de sunulmaktadır.

Tablo 2.12. Dalga genliğini ve maksimum dalga yüksekliğini kontrol eden temel parametreler

| Simge      | Açıklama                                     | Birim    |
|------------|----------------------------------------------|----------|
| $V_s$      | Kayan Malzemenin Hızı                        | m/s      |
| $\nabla_s$ | Kayan Malzemenin Hacmi                       | $m^3$    |
| $s$        | Kayan Malzemenin Kalınlığı                   | m        |
| $b$        | Kayan Malzemenin ya da Rezervuarın Genişliği | m        |
| $\rho_s$   | Kayan Malzemenin Yoğunluğu                   | $g/cm^3$ |
| $n$        | Kayan Malzemenin Gözenekliliği               | -        |
| $\alpha$   | Kayan Malzemenin Yüzey ile Yaptığı Açı       | $^\circ$ |
| $h$        | Serbest Su Derinliği                         | m        |



Şekil 2.17. İtki dalgalarını kontrol eden parametrelerin gösterimi a) doğrusal yayılma, b) radyal yayılma

#### 2.2.4. Ampirik Eşitlikler

Heller (2009) tarafından heyelan kaynaklı itki dalgalarının etkilerini belirlemek için bir hesaplama programı geliştirilmiştir. Hem kanal (2D) hem de havza şeklindeki (3D) rezervuarlar için literatür çalışmalarına göre bölümlere ayrılmış bu program sayesinde dalga üretim ve yayılım parametreleri, dalganın ilerleme yüksekliği, barajı aşma miktarı ve baraja uygulayacağı kuvvet belirlenmektedir (Şekil 2.17).

İlk olarak hesaplama programına Tablo 2.11’de yer alan ve dalga üretimini kontrol eden parametreler, rezervuar geometrisine bağlı olarak, iki boyutlu (2D) rezervuarlar için doğrudan mesafe (x) veya üç boyutlu (3D) rezervuarlar için radyal mesafe (r) ve dalga yayılma açısı ( $\gamma$ ) manuel olarak girilir. Dalganın barajdaki ilerleme yüksekliğini (run-up) ve barajı aşma durumunu yöneten ve baraj önünden ölçülen serbest su derinliği (h), run-up açısı ( $\beta$ ), dalga payı (f) ve kret genişliği ( $b_K$ ) değerleri de sisteme girildikten sonra (Şekil 2.18) kontrol bölmesinden (Input control) verilerin doğruluğu kontrol edilir (Şekil 2.19). Kontrol bölmesine baraj için “1”, karşı kıyı için “2” değeri girilerek ikinci aşama olan hesaplama sürecine geçilir (Şekil 2.20).

| Landslide generated impulse waves in reservoirs - Basics and computation<br>Spread sheets |           |                                                  |       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|--------------------------------------------------|-------|
| Project name                                                                              |           | Operator                                         |       |
| Computational point                                                                       |           | Date                                             |       |
| Governing parameters                                                                      |           |                                                  |       |
| Wave generation (Subsection 3.2.2)                                                        |           |                                                  |       |
| Slide impact velocity $V_s$ [m/s]                                                         | 12        | Bulk slide density $\rho_s$ [kg/m <sup>3</sup> ] | 1.600 |
| Bulk slide volume $V_s$ [m <sup>3</sup> ]                                                 | 1.000.000 | Bulk slide porosity $n$ [%]                      | 35    |
| Slide thickness $s$ [m]                                                                   | 18        | Slide impact angle $\alpha$ [°]                  | 30    |
| Slide or reservoir width $b$ [m]                                                          | 150       | Still water depth $h$ [m]                        | 95    |
| Wave propagation (3D or 2D) (Subsection 3.2.2)                                            |           |                                                  |       |
| Wave basin (3D)                                                                           |           | Wave channel (2D)                                |       |
| Radial distance $r$ [m]                                                                   | 731       | Streamwise distance $x$ [m]                      | -     |
| Wave propagation angle $\gamma$ [°]                                                       | 80        |                                                  |       |
| Wave run-up and overtopping (Subsection 3.3.2)                                            |           |                                                  |       |
| Still water depth $h$ [m]                                                                 | 117       | Freeboard $f$ [m]                                | 5     |
| Run-up angle $\beta$ [°]                                                                  | 90        | Crest width $b_K$ [m]                            | 10    |

Şekil 2.18. Hesaplama da kullanılacak parametrelerin sisteme girilmesi

|                  |                                              |
|------------------|----------------------------------------------|
| Input control    | Delete all                                   |
| Prepare to print | Delete all governing parameters              |
|                  | Delete all governing parameters except slide |

Şekil 2.19. Programın veri kontrol bölmesi

Microsoft Excel

The input is correct if no error message is reported after this input box. Would you like to compute the effects of the impulse wave on a dam or a shore? Please enter 1 for dam and 2 for shore:

OK Cancel

Şekil 2.20. Programın veri kontrol işlemi için bilgi (baraj/karşı kıyı) girilmesi

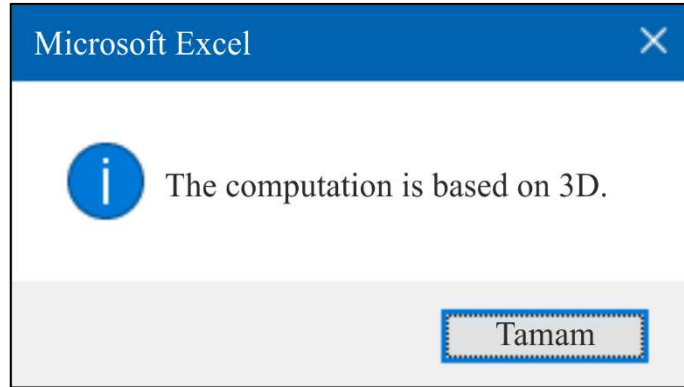
Rezervuar geometrisine bağlı olarak dalganın doğrusal yayıldığı kabul edildiğinde iki boyutlu (2D), radyal yayıldığı kabul edildiğinde ise üç boyutlu (3D) denklemler ile hesaplamalar yapılır (Şekil 2.21, Şekil 2.22). 2D için denklemler Zweifel (2004) ve Fritz'e (2002) ait çalışmalar baz alınarak, 3D için denklemler ise Huber ve Hager'e (1997) ait çalışmalar baz alınarak geliştirilmiştir (Şekil 2.23).

Microsoft Excel

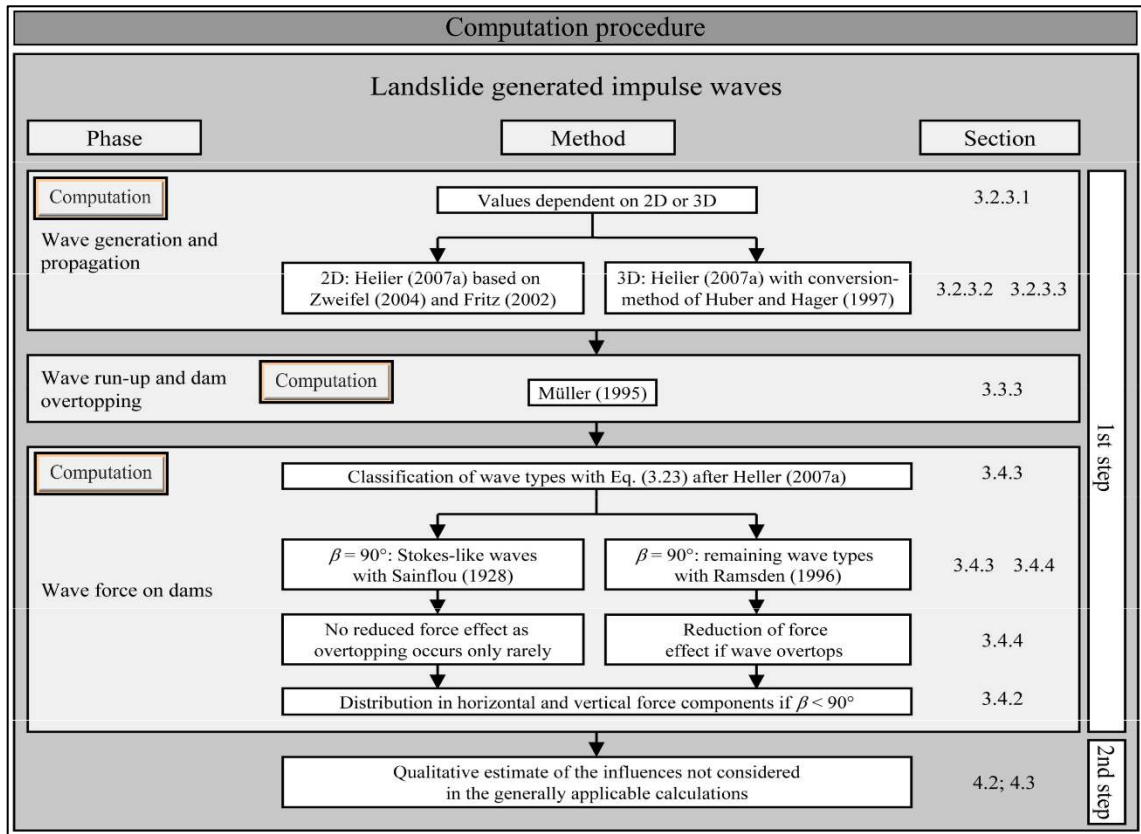
Would you like to compute 2D or 3D? Please enter 2 for 2D or 3 for 3D:

OK Cancel

Şekil 2.21. Rezervuar tipine göre seçilen hesaplama için veri giriş ekranı



Şekil 2.22. Rezervuar tipine göre yapılacak hesaplamaların onay bölümü



Şekil 2.23. Hesaplama adımları

Hesaplamalardan sonra ise dalga yayılımını kontrol eden parametrelerin sınır koşulları kontrol edilir (Tablo 2.13, Tablo 2.14). Program, değerlerin anlamlılık ve anlamsızlığının yanı sıra 2D ve 3D rezervuarlardaki toplam değerler içinden anlamsız değerlerin sayısını da vermektedir.

### 2.2.4.1. Rezervuar Geometrisine (2D ya da 3D) Bağlı Olmayan Parametreler

Yatay bir rezervuarda üretilen itki dalgalarındaki değişimler, kanal şeklinde ya da havza şeklinde geometri; x mesafe (2D), r radyal mesafe (3D) ve  $\gamma$  dalga yayılma açısı (3D) ile ifade edilir (Şekil 2.17). Kanal şeklinde rezervuarda (2D, Şekil 2.17a), itki dalgası değişimleri yalnızca x mesafesine bağlıdır. Havza şeklindeki rezervuarlarda ise (3D, Şekil 2.17b.), hem r radyal mesafesine hem de  $\gamma$  dalga yayılma açısına bağlıdır.

Dalga hızı ( $c_w$ ) ve dalga genliği ( $a$ ) her iki rezervuar geometrisi için aynıdır (Şekil 2.17). Heyelan kaynaklı bir dalganın hızı ( $c$ ) (2.3) eşitliğinden, dalga genliği ( $a$ ) ise (2.4) eşitliğinden hesaplanmaktadır.

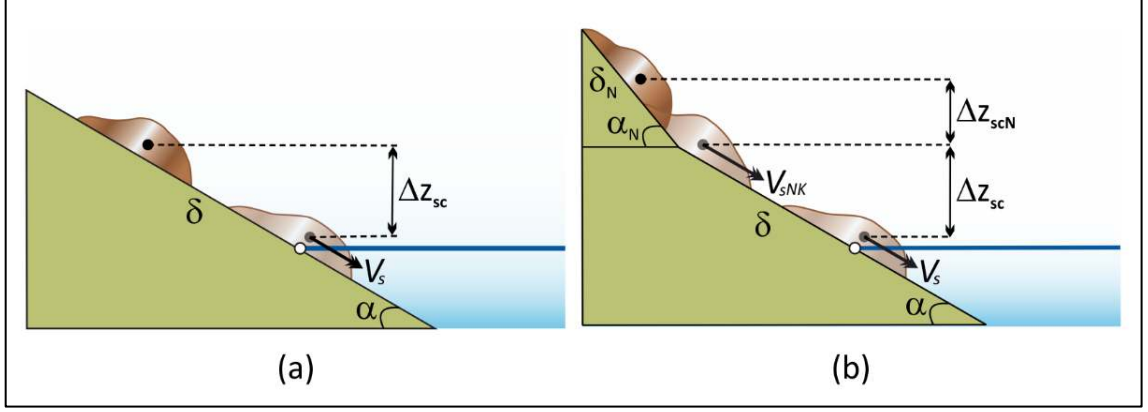
$$c_w = [g \cdot (h + a_w)]^{1/2} \quad (2.3)$$

|                                             |                  |                                     |
|---------------------------------------------|------------------|-------------------------------------|
| $c_w$ : Dalga hızı                          | m/s              | (Şekil 2.17a)                       |
| $g$ : Yer çekimi ivmesi                     | m/s <sup>2</sup> | ( $\approx 9,81$ m/s <sup>2</sup> ) |
| $h$ : Serbest su derinliği (çarpma bölgesi) | m                | (Şekil 2.17a)                       |
| $a_w$ : Dalga genliği                       | m                | (Şekil 2.25)                        |

$$a_w = \left(\frac{4}{5}\right) \cdot H \quad (2.4)$$

|                        |   |              |
|------------------------|---|--------------|
| $a_w$ : Dalga genliği  | m | (Şekil 2.25) |
| $H$ : Dalga yüksekliği | m | (Şekil 2.25) |

Doğrusal (Şekil 2.17a) ya da radyal (Şekil 2.17b) yayılım olduğuna bağlı olmaksızın dalga genliğini ve maksimum dalga yüksekliğini kontrol eden ve itki dalgalarını genel anlamda ifade eden temel parametrelerden en önemlisi kayan malzemenin hızıdır. Heyelan kütlesi, eğimin değişmediği yüzeyden (Şekil 2.24a) kayabildiği gibi arka arkaya eğimin değiştiği yüzeylerden de (Şekil 2.24b) kayabilmektedir. Sabit eğimli durumda kayan malzemenin hızı (2.5) eşitliğindeki gibi hesaplanabilmekte ancak eğimin değiştiği durumlarda tek hesap yeterli olmamakta, eğimin değiştiği noktadaki hız (2.5) denklemi ile bulunurken kayma hareketinin devam eden ikinci eğimli kısımda (2.6) denklemi ile kayan malzemenin hızı tespit edilebilmektedir. İlk eğimli bölgeden bulunan  $V_s$  değeri ikinci denklemde  $V_{sNK}$  yerine yazılarak hesaplama gerçekleştirilmektedir.



Şekil 2.24. Kayan malzemenin hızının tespiti a) sabit eğimli, b) değişken eğimli

Kayan malzemenin çarpma anındaki hızı (ya da heyelanın hızı) rezervuara etki eden heyelanların oluşturduğu dalgaların modellenmesi için gerekli temel parametrelerden biridir. Kayan malzemenin çarpma anındaki hızı kayma sırasında kayan kütlenin ağırlık merkezinin hızıdır. Bu durum kayan kütle ve yamaç arasındaki sürtünmenin hesaba katıldığı enerji denklemi ile açıklanmaktadır. Kayan malzemenin çarpma anındaki hızı kayan malzemenin yüzey ile yaptığı açıya bağlıdır. Stabilitate analizi yapılarak kayan malzemenin çarpma anındaki hızı ve kayan malzemenin yüzey ile yaptığı açı belirlenebilir. Daha sonra en düşük güvenlik katsayısına sahip kopma yüzeyi elde edilebilir.

Bu çalışmada Körner (1976) tarafından önerilen ve kayan kütlenin ağırlık merkezinin hızı olan ve heyelan kütlesi ve yamaç arasındaki sürtünmeyi de hesaba katan formül kullanılarak kayan malzemenin çarpma anındaki hızı  $V_s$  (2.5) eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır. Bu denklem sabit eğimli bir yamaç için geçerli olup kayan kütlenin ağırlık merkezinin düşme yüksekliği olan  $\Delta z_{sc}$  orijinal konumunda kayan kütlenin ağırlık merkezi ile çarpma yüzeyi arasındaki dikey mesafedir. Dinamik yatak sürtünme açısı  $\delta$ , yenilme düzlemi ile kayma yüzeyi arasındaki sürtünmedir. Bu sürtünme ne kadar büyükse  $\delta$  değeri o kadar büyük olur. Kayma açısı  $\alpha$  yamacın ortalama eğim açısıdır.

$$V_s = \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta z_{sc} \cdot (1 - \tan \delta \cdot \cot \alpha)} \quad (2.5)$$

$$V_s = \sqrt{V_{sNK}^2 + 2 \cdot g \cdot \Delta z_{sc} \cdot (1 - \tan \delta \cdot \cot \alpha)} \quad (2.6)$$

$V_s$  : Kayan malzemenin çarpma anındaki hızı m/s (Şekil 2.24)

$V_{sNK}$  : Kayan malzemenin eğimin değiştiği noktadaki hızı m/s (Şekil 2.24b)

|                 |                                                                     |          |                          |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------|----------|--------------------------|
| $g$             | : Yer çekimi ivmesi                                                 | $m/s^2$  | ( $\approx 9,81 m/s^2$ ) |
| $\Delta z_{sc}$ | : Yer değiştirme kot farkı                                          | $m$      | (Şekil 2.24)             |
| $\delta$        | : Yüzeyin sürtünme açısı (içsel sürtünme açısı $\approx 25^\circ$ ) | $^\circ$ | (Şekil 2.24)             |
| $\alpha$        | : Kayan malzemenin yüzey ile yaptığı açı                            | $^\circ$ | (Şekil 2.24)             |

Kayan malzemenin hacmi ( $V_s$ ), kalınlığı ( $s$ ) ve genişliği ( $b$ ) itki dalgasının özelliklerinin belirlenmesinde en önemli parametrelerdendir. Kayan malzemenin hacminin paleo-heyelan malzemesinin hacmine eşit olduğu düşünülse de heyelan malzemesinin tamamı rezervuara ulaşmayıp bir kısmı kayma düzleminde kalabilmektedir. Bu çalışmada paleo-heyelanın geometrisi sondaj uygulamalarından elde edilen veriler kullanılarak belirlenmiştir.

Kayan malzemenin yoğunluğu ( $\rho_s$ ) ve gözenekliliği ( $n$ ) genellikle kayan malzemenin hacmini belirlemek için kullanılır. Bu çalışmada kayan malzemenin yoğunluğu ve gözenekliliği için literatürden yararlanılmıştır.

Serbest su derinliği ( $h$ ) rezervuar geometrisinden ve dalgalardan etkilenen bölgeye bağlı olarak farklılık gösterebilir. Kaymanın etkilediği bölgedeki, karşı kıyıdaki, baraj gövdesinin arkasındaki veya herhangi bir konumdaki su derinliği olarak tanımlanabilmektedir.

İtki dalgalarının özellikleri üzerinde iki boyutlu ve üç boyutlu modeller kullanılarak çok sayıda çalışma yapılmış ve heyelan kaynaklı itki dalgalarının özelliklerini belirlemek için çeşitli denklemler elde edilmiştir. Dalga yüksekliğini belirlemek için Noda (1970), Slingerland ve Voight (1979) ve Huber ve Hager (1997) tarafından farklı ampirik ilişkiler önerilmiştir. Bu çalışmada laboratuvar deneyleri sonucu ortaya çıkan, sayısal analizler ve sınır değerler ile doğrulanan Heller (2007) tarafından önerilen formüller kullanılmıştır. Bu formüller kayan malzemenin kalınlığı, akış mesafesi, kayan malzemenin hacmi ve rezervuarın derinliği gibi göreceli değerleri de hesaba katmaktadır.

Heller (2007) ile Heller ve Hager'a (2010) göre itki üretim parametresi ( $P$ ) 2D ve 3D hesaplamalar için önemli olup  $F$ ,  $S$ ,  $M$  ve  $\alpha$  gibi boyutsuz parametreler kullanılarak (2.7) eşitliğinden hesaplanmaktadır.



$$P = F \cdot S^{1/2} \cdot M^{1/4} \cdot \left\{ \cos \left[ \left( \frac{6}{7} \right) \alpha \right] \right\}^{1/2} \quad (2.7)$$

- P : İtke üretim parametresi (2.7) -  
 F<sub>w</sub> : Froude sayısı (2.8) -  
 S : Göreceli heyelan kalınlığı (2.9) -  
 M : Göreceli heyelan kütlesi (2.10) -  
 α : Kayan malzemenin yüzey ile yaptığı açı ° (Şekil 2.24)

$$F_w = \frac{V_s}{(g \cdot h)^{1/2}} \quad (2.8)$$

- F<sub>w</sub> : Froude sayısı (2.8) -  
 V<sub>s</sub> : Kayan malzemenin çarpma anındaki hızı m/s (Şekil 2.24)  
 g : Yer çekimi ivmesi m/s<sup>2</sup> (≈ 9,81 m/s<sup>2</sup>)  
 h : Serbest su derinliği (çarpma bölgesi) m (Şekil 2.17a)

$$S = \frac{s}{h} \quad (2.9)$$

- S : Göreceli heyelan kalınlığı (2.9) -  
 s : Heyelanın kalınlığı m (Şekil 2.17a)  
 h : Serbest su derinliği (çarpma bölgesi) m (Şekil 2.17a)

$$M = \frac{\rho_s \cdot V_s}{\rho_w \cdot b \cdot h^2} \quad (2.10)$$

- M : Göreceli heyelan kütlesi (2.10) -  
 ρ<sub>s</sub> : Kayan malzemenin yoğunluğu kg/m<sup>3</sup> (Şekil 2.17b)  
 V<sub>s</sub> : Kayan malzemenin hacmi m<sup>3</sup> (Şekil 2.17a)  
 ρ<sub>w</sub> : Suyun yoğunluğu kg/m<sup>3</sup> (Şekil 2.17b)  
 b : Heyelanın genişliği m (Şekil 2.17b)

Tablo 2.13. İtki dalga hesaplamalarında sınır koşullar

| Parametre                                 | Aralık                                 | Eşitlik / Simge                                                                   |
|-------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Froude sayısı                             | $0.86 \leq F_w \leq 6.83$              | $F_w = V_s / (g \cdot h)^{1/2}$                                                   |
| Göreceli heyelan kalınlığı                | $0.09 \leq S \leq 1.64$                | $S = s / h$                                                                       |
| Göreceli heyelan kütlesi                  | $0.11 \leq M \leq 10.62$               | $M = (\rho_s \cdot V_s) / (\rho_w \cdot b \cdot h^2)$                             |
| Göreceli heyelan yoğunluğu                | $0.59 \leq D \leq 1.72$                | $D = \rho_s / \rho_w$                                                             |
| Göreceli tane yoğunluğu                   | $0.96 \leq \rho_g / \rho_w \leq 2.75$  | $\rho_g / \rho_w$                                                                 |
| Göreceli heyelan hacmi                    | $0.05 \leq V \leq 5.94$                | $V = V_s / (b \cdot h)^2$                                                         |
| Kayan malzemenin gözenekliliği            | $\% 30.7 \leq n \leq \% 43.3$          | $n$                                                                               |
| Kayan malzemenin yüzey ile yaptığı açı    | $30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$   | $\alpha$                                                                          |
| Göreceli heyelan genişliği                | $0.74 \leq B \leq 3.33$                | $B = b / h$                                                                       |
| Göreceli radyal mesafe (baraj, R)         | $5 \leq r / h \leq 30$                 | $r / h$                                                                           |
| Dalga yayılma açısı                       | $-90^\circ \leq \gamma \leq +90^\circ$ | $\gamma$                                                                          |
| Göreceli yayılma mesafesi (karşı kıyı, X) | $2.7 \leq X \leq 59.2$                 | $X = x / h$                                                                       |
| İtki üretim parametresi                   | $0.17 \leq P \leq 8.13$                | $P = F \cdot S^{1/2} \cdot M^{1/4} \cdot \{ \cos [ (6/7) \cdot \alpha ] \}^{1/2}$ |

#### 2.2.4.2. Rezervuar Geometrisine (2D ya da 3D) Bağlı Olan Parametreler

##### 2.2.4.2.1. Kanal Şeklinde Rezervuar (2D)

İtki dalgasının uzunlamasına, kenarları sınırlanmış bir rezervuarda yayılması durumunda Heller (2007) tarafından önerilen denklemler kullanılmaktadır. İtki dalgasının baraja olan etkileri değerlendirildiğinde dalga yüksekliği (H) ve dalga genliği ( $a_w$ ) özellikle önemlidir. Doğrusal dalga teorisine göre dalga hızı, dalga uzunluğu (L) ve dalga periyodu (T) ile ilintilidir (2.11). Çarpma bölgesindeki maksimum dalga yüksekliği  $H_M$  kararlı bir dalgadan çok bir su duvarı şeklindedir. Bu nedenle çarpma bölgesindeki maksimum dalga yüksekliği ( $H_M$ ) (2.12) ile yayılma bölgesindeki dalga yüksekliği (Noda, 1970) (2.13) arasındaki farkı iyi belirlemek gerekmektedir.

$$c_W = \frac{L}{T} \quad (2.11)$$

$$H_M = \left(\frac{5}{9}\right) \cdot P^{(4/5)} \cdot h \quad (2.12)$$

$$H = F_W \cdot s \quad (2.13)$$

|       |                                              |          |               |
|-------|----------------------------------------------|----------|---------------|
| $c_W$ | : Dalga hızı                                 | m/s      | (Şekil 2.17a) |
| $L$   | : Dalga uzunluğu                             | m        |               |
| $T$   | : Dalga periyodu                             | s        |               |
| $H_M$ | : Maksimum dalga yüksekliği (çarpma bölgesi) | (2.12) m | (Şekil 2.17a) |
| $P$   | : İtke üretim parametresi                    | (2.7) -  |               |
| $h$   | : Serbest su derinliği (çarpma bölgesi)      | m        | (Şekil 2.17a) |
| $H$   | : Yayılma bölgesindeki dalga yüksekliği      | (2.13) m | (Şekil 2.17a) |
| $F_W$ | : Froude sayısı                              | (2.8) -  |               |
| $s$   | : Heyelanın kalınlığı                        | m        | (Şekil 2.17a) |

Maksimum dalga genliğinin çarpma bölgesinden uzaklığı ( $x_M$ ) (2.14) eşitliğinden belirlenmektedir.

$$x_M = \left(\frac{11}{2}\right) \cdot P^{1/2} \cdot h \quad (2.14)$$

|       |                                                            |         |               |
|-------|------------------------------------------------------------|---------|---------------|
| $x_M$ | : Maksimum dalga genliğinin çarpma bölgesine olan uzaklığı | m       | (Şekil 2.17a) |
| $P$   | : İtke üretim parametresi                                  | (2.7) - |               |
| $h$   | : Serbest su derinliği (çarpma bölgesi)                    | m       | (Şekil 2.17a) |

Maksimum dalga periyodu ( $T_M$ ) (2.15) eşitliğinden hesaplanmaktadır.

$$T_M = 9 \cdot P^{1/2} \cdot \left(\frac{h}{g}\right)^{1/2} \quad (2.15)$$

|       |                                         |                  |                                     |
|-------|-----------------------------------------|------------------|-------------------------------------|
| $T_M$ | : Maksimum dalga periyodu               | (2.15) s         |                                     |
| $P$   | : İtke üretim parametresi               | (2.7) -          |                                     |
| $h$   | : Serbest su derinliği (çarpma bölgesi) | m                | (Şekil 2.17a)                       |
| $g$   | : Yer çekimi ivmesi                     | m/s <sup>2</sup> | ( $\approx 9,81$ m/s <sup>2</sup> ) |

Dalga periyodu (T) ile dalga uzunluğu (L) arasında doğrusal bir ilişki olduğu bilindiğinden (2.11), aynı eşitlik maksimum dalga periyodu ( $T_M$ ) ile maksimum dalga uzunluğu ( $L_M$ ) arasında da uygulanabilmektedir (2.16).

$$L_M = c_W \cdot T_M \quad (2.16)$$

|       |                           |     |               |
|-------|---------------------------|-----|---------------|
| $c_W$ | : Maksimum dalga hızı     | m/s | (Şekil 2.17a) |
| $L_M$ | : Maksimum dalga uzunluğu | m   |               |
| $T_M$ | : Maksimum dalga periyodu | s   |               |

Dalga ilerleme miktarı (run-up) gelişmesi için sadece çarpma bölgesindeki maksimum dalga yüksekliğinin değil baraja etkiyen dalga yüksekliğinin veya rezervuar kıyı yüksekliğinin, ayrıca nehir akış yönünde x koordinatının da bilinmesi gerekmektedir (Şekil 2.17a). Aranan dalga yüksekliği (H) çarpma bölgesinden daha uzakta olursa ( $X > X_M$ ) maksimum dalga yüksekliği ( $H_M$ ) meydana gelir ve dalga yüksekliği (H) (2.17) eşitliğinden elde edilir. Aynı koşullarda ( $X > X_M$ ) dalga periyodu  $[T(x)]$  (2.20) eşitliğinden, dalga uzunluğu  $[L(x)]$  ise doğrusal dalga teorisi ile (2.21) eşitliğinden hesaplanmaktadır.

$$H(x) = \left(\frac{3}{4}\right) \cdot \left(P \cdot X^{(-1/3)}\right)^{4/5} \cdot h \quad (2.17)$$

$$X = \frac{x}{h} \quad (2.18)$$

$$X_M = \frac{x_M}{h} \quad (2.19)$$

$$T(x) = 9 \cdot P^{1/4} \cdot X^{5/16} \cdot \left(\frac{h}{g}\right)^{1/2} \quad (2.20)$$

$$L(x) = T(x) \cdot c(x) \quad (2.21)$$

|       |                                                   |        |   |               |
|-------|---------------------------------------------------|--------|---|---------------|
| H     | : Çarpma bölgesindeki dalga yüksekliği            | (2.17) | m | (Şekil 2.17a) |
| P     | : İtke üretim parametresi                         | (2.7)  | - |               |
| X     | : Göreceli uzaklık                                | (2.18) | m | (Şekil 2.17a) |
| x     | : Dalga genliğinin çarpma bölgesine olan uzaklığı |        | m | (Şekil 2.17a) |
| h     | : Serbest su derinliği (çarpma bölgesinde)        |        | m | (Şekil 2.17a) |
| $X_M$ | : Maksimum göreceli yayılma mesafesi              | (2.19) | - | (Şekil 2.17a) |

|       |                                                            |                  |                                     |
|-------|------------------------------------------------------------|------------------|-------------------------------------|
| $x_M$ | : Maksimum dalga genliğinin çarpma bölgesine olan uzaklığı | m                | (Şekil 2.17a)                       |
| $T$   | : Dalga periyodu                                           | s                |                                     |
| $g$   | : Yer çekimi ivmesi                                        | m/s <sup>2</sup> | ( $\approx 9,81$ m/s <sup>2</sup> ) |
| $L$   | : Dalga uzunluğu                                           | m                |                                     |
| $c_w$ | : Dalga hızı                                               | m/s              | (Şekil 2.17a)                       |

#### 2.2.4.2.2. Prizmatik Rezervuar (3D)

İtki dalgasının radyal ve serbestçe yayıldığı havza şeklinde rezervuarlarda (3D) (Şekil 2.17b) denklemler, Huber ve Hager (1997) metotları ile Heller (2007) formüllerine uyarlanarak elde edilmiştir. Heyelan çarpma bölgesinde itki dalgalarının boyutlarının 2D ve 3D modeller arasındaki farkı küçüktür (Huber 1980). Çarpma bölgesindeki dalga yüksekliği (HM), bu dalganın periyodu ( $T_M$ ) ve uzunluğu ( $L_M$ ) sırasıyla (2.12), (2.15) ve (2.16) eşitliklerinden belirlenir. Dalga yüksekliği [ $H(r, \gamma)$ ],  $r/h > X_M$  koşulu için herhangi bir noktada (2.22) eşitliğinden (Huber ve Hager, 1997; Heller, 2007) hesaplanmaktadır.

$$H(r, \gamma) = \left(\frac{3}{2}\right) \cdot P^{4/5} \cdot \cos^2\left(\frac{2\gamma}{3}\right) \cdot \left(\frac{r}{h}\right)^{(-2/3)} \cdot h \quad (2.22)$$

|          |                                             |          |               |
|----------|---------------------------------------------|----------|---------------|
| $H$      | : Dalga yüksekliği                          | (2.22) m | (Şekil 2.17a) |
| $r$      | : Dalga yayılma mesafesi                    | m        | (Şekil 2.17b) |
| $\gamma$ | : Dalga yayılma açısı                       | °        | (Şekil 2.17b) |
| $P$      | : İtki üretim parametresi                   | (2.7) -  |               |
| $h$      | : Serbest su derinliği ( $\gamma=0^\circ$ ) | m        | (Şekil 2.17a) |

$r/h > X_M$  koşulu için dalga yüksekliğine  $H(r, \gamma)$  karşılık gelen dalga periyodu [ $T(r, \gamma)$ ] (2.23) eşitliğinden, dalga uzunluğu [ $L(r, \gamma)$ ] ise doğrusal dalga teorisi ile (2.24) eşitliğinden hesaplanmaktadır.

$$T(r, \gamma) = 15 \cdot \left(\frac{H}{h}\right)^{1/4} \cdot \left(\frac{h}{g}\right)^{1/2} \quad (2.23)$$

$$L(r, \gamma) = T(r, \gamma) \cdot c(r, \gamma) \quad (2.24)$$

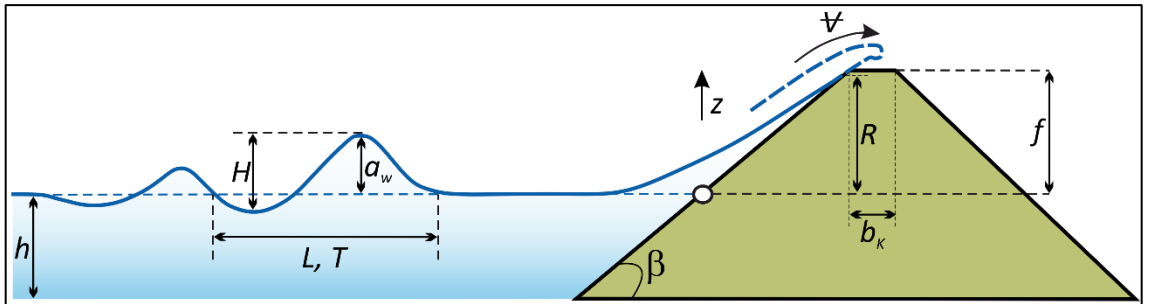
|     |                    |          |               |
|-----|--------------------|----------|---------------|
| $T$ | : Dalga periyodu   | s        |               |
| $L$ | : Dalga uzunluğu   | m        |               |
| $H$ | : Dalga yüksekliği | (2.22) m | (Şekil 2.17a) |

|          |                                             |                  |                                     |
|----------|---------------------------------------------|------------------|-------------------------------------|
| $h$      | : Serbest su derinliği ( $\gamma=0^\circ$ ) | m                | (Şekil 2.17a)                       |
| $r$      | : Dalga yayılma mesafesi                    | m                | (Şekil 2.17b)                       |
| $\gamma$ | : Dalga yayılma açısı                       | °                | (Şekil 2.17b)                       |
| $g$      | : Yer çekimi ivmesi                         | m/s <sup>2</sup> | ( $\approx 9,81$ m/s <sup>2</sup> ) |
| $c_w$    | : Dalga hızı                                | m/s              | (Şekil 2.17a)                       |

#### 2.2.4.3. Dalganın Karşı Kıyıda İlerleme Miktarı ve Baraj Gövdesine Olan Etkisi

Heyelan kütlelerinin baraj gölünde ürettiği itki dalgaları karşı kıyıda yıkıcı etkiler oluşturmaktadır. Baraja ulaşan itki dalgalarının baraj gövdesine hasar vererek baraj gövdesini yıkmaya ya da baraj gövdesini aşarak barajın mansap tarafında bulunan yerleşim alanlarına zarar verme riski vardır. Buradan da anlaşılacağı üzere itki dalgalarının barajlar üzerinde olumsuz bir etkisi olmaktadır ve bu etkiyi tahmin etmek zordur. Bugüne kadar yapılan modellemelerde aynı türden dalgaların etkisi ölçüldüğünde bile sonuçların net olmadığı görülmüştür. Walkden (1999) yaptığı denemelerde 330 adet aynı türden dalga üretmiş, ancak maksimum gücün ortalama değerinin %100 üzerinde veya %50 altında olabildiğini saptamıştır. Bu değişim barajın ön yüzüne etki eden kuvvetler için daha küçük olabilmektedir.

İtke dalgalarının baraj önündeki maksimum yükseklik ile rezervuarın serbest su seviyesi arasındaki yükseklik farkı, ilerleme yüksekliği olarak bilinir (Şekil 2.25). Bu nedenle baraj gövdesine ulaşan itke dalgalarının ilerleme yüksekliğinin hesaplanması gerekmektedir. Bu hesaplamada Müller (1995) tarafından önerilen (2.25) denklem kullanılmaktadır. Karşı kıyıdaki ilerleme yüksekliğinin hesaplanmasında Synolakis (1987) tarafından önerilen (2.26) eşitliği kullanılmaktadır.



Şekil 2.25. Run-up ve dalganın baraj gövdesine olan etkisini tanımlayan parametreler

$$R = 1,25 \cdot \left(\frac{H}{h}\right)^{5/4} \cdot \left(\frac{H}{L}\right)^{(-3/20)} \cdot \left(\frac{90}{\beta}\right)^{1/5} \cdot h \quad (2.25)$$

$$\frac{R}{h} = 2,831 \cdot (\cot \beta)^{0,5} \cdot \left(\frac{H}{h}\right)^{1,25} \quad (2.26)$$

|         |                                                   |          |               |
|---------|---------------------------------------------------|----------|---------------|
| R       | : Run-up yüksekliği                               | m        | (Şekil 2.25)  |
| H       | : Dalga yüksekliği                                | (2.22) m | (Şekil 2.17a) |
| h       | : Serbest su derinliği ( $\gamma=0^\circ$ )       | m        | (Şekil 2.17a) |
| L       | : Dalga uzunluğu                                  | m        |               |
| $\beta$ | : Baraj ön yüzünün eğim açısına eşit run-up açısı | °        | (Şekil 2.25)  |

Tablo 2.14. İlerleme yüksekliği (run-up) hesaplamadaki sınır koşullar

| Parametre                 | Aralık                         |
|---------------------------|--------------------------------|
| Göreceli dalga yüksekliği | $0.011 \leq H / h \leq 0.521$  |
| Dalga basamağı            | $0.001 \leq H / L \leq 0.013$  |
| Göreceli açı              | $1.0 \leq 90 / \beta \leq 4.9$ |

### 2.3. Barajlar

Barajlar, amacına göre, kullanılan malzemeye göre, yüksekliklerine göre ve su hacmine göre sınıflandırılmaktadır. Amaca göre barajlar ne için yapıldıkları göz önüne alınarak sınıflandırılmakta, tek bir amaç için kullanılabildiği gibi birden çok amaç için de barajlardan yararlanılabilmektedir. Örneğin enerji elde etmek için üretilen bir baraj sulama amacı ile de kullanılabilmektedir. Kullanılan malzemeye ve yapılış şekline göre barajlar beton, toprak, kaya dolgu, kaya-toprak karışığı gibi çeşitlere ayrılmakta ve bu türlerin seçiminde önce emniyet sonra maliyet göz önünde bulundurulmaktadır. Topoğrafya, jeoloji (litoloji ve yapısal özellikler), hidroloji, kullanılacak malzemeyi sağlama olanakları, ekonomik durum, iklim, baraj yüksekliği baraj yapımına etki eden faktörlerin başında gelmektedir.

Bu tez çalışmasında incelenen Torul Barajı, Gümüşhane İli, Harşit Nehri üzerinde, enerji elde etmek amacıyla, ön yüzü beton kaplı kaya dolgu tipinde inşa edilmiştir. 2008 yılında işletmeye alınan baraj sayesinde yıllık 322.28 GWh elektrik enerjisi üretilmektedir.

Ön yüzü beton kaplı kaya dolgu barajlar günümüzde daha yaygın ve daha güvenilir bir şekilde kullanılmaktadır. Kaya dolgu barajlar genelde merkezde kil çekirdekli veya eğimli kil çekirdekli olarak inşa edilmektedir. Ancak geçirimsiz malzeme bulmada yaşanan zorluklar, çevre ve iklim koşulları nedeniyle, inşaat süresi ve ekonomi gibi nedenlerle geçirimsizliğin memba yüzünde veya kilden başka malzemelerle sağlanması yoluna gidilmiştir. Bu nedenle ön yüzü beton kaplı kaya dolgu baraj kavramı ortaya çıkmıştır.

Ön yüzü beton kaplı kaya dolgu barajlar, mambadan mansaba doğru inceden iriye çok iyi derecelenmiş ve sıkıştırılmış kaya dolgu gövdeden, ön yüzde kalınlığı krete doğru azalan beton kaplamadan ve beton topuk plağından oluşmaktadır. Bu tür barajlar inşa edilirken kullanılan kaya dolgu malzemesinin iyi derecelenmiş, aşırı oturmalara neden olmayacak sağlam kaya niteliğinde olması gerekmektedir. Kaya dolgu gövde inşa edildikten sonra oturmalarını alması için yaklaşık bir sezon beklenmektedir. Daha sonra topuktan başlayarak krete doğru kalınlığı azalan beton kaplama uygulanmaktadır. Bu tür barajlar diğer kaya dolgu barajların inşa edildiği her yerde inşa edilebilirler ancak topuk plağının sağlam zemine oturmasına özen gösterilmektedir. Çalışmada incelenen Torul Barajına ait bilgiler Tablo 2.15'te verilmiştir.

Tablo 2.15. Torul Barajına ait bilgiler

| Kurum                  |                 | DSİ Genel Müdürlüğü            |
|------------------------|-----------------|--------------------------------|
| Yapım Yılı             |                 | 2008                           |
| Akarsu                 |                 | Harşit                         |
| Yeri (İl)              |                 | Gümüşhane                      |
| Yapım Amacı            |                 | Enerji                         |
| Rezervuar Alanı        | km <sup>2</sup> | 3.62                           |
| Toplam Rezervuar Hacmi | hm <sup>3</sup> | 168                            |
| Aktif Hacim            | hm <sup>3</sup> | 83.3                           |
| Baraj Tipi             |                 | Ön Yüzü Beton Kaplı Kaya Dolgu |
| Baraj Gövde Hacmi      | hm <sup>3</sup> | 4.6                            |
| Kret Kotu              | m               | 922                            |
| Kret Uzunluğu          | m               | 320                            |
| Kret Genişliği         | m               | 10                             |
| Dalga Payı             | m               | 5                              |
| Temelden Yükseklik     | m               | 142                            |
| Talvegden Yükseklik    | m               | 137                            |



### **3. BULGULAR**

#### **3.1. Çalışma Alanı ve Çevresinin Jeolojik Özellikleri**

Doğu Karadeniz Bölgesi geçirdiği jeolojik evrime bağlı olarak gelişen volkanik kayaçların egemen olduğu bir jeolojiye sahiptir. İnceleme alanı, Doğu Karadeniz orojenik kuşağının kuzey zonunda yer almakta ve bu bölümün tipik özelliklerini yansıtmaktadır. Çalışma alanının büyük bölümünde volkanik kökenli kayaçların (tuf, aglomera) yer aldığı, çok az bir bölümünde ise bu volkanitlerle yer yer uyumlu yüzeylenen tortul kayaçların olduğu gözlemlenmektedir (Şekil 3.1).

İnceleme alanının çevresinde yer alan birimler incelendiğinde, Üst Kretase yaşlı Bazalt-Andezit ve piroklastlarından oluşan Çatak Formasyonunun ve Eosen yaşlı Kaçkar Granitoyidi-I biriminin yer aldığı gözlenmektedir (Şekil 3.2). Bölgede, bütün bu birimleri uyumsuz olarak örten güncel yamaç molozu ve çökellerin de olduğu bilinmektedir.

##### **3.1.1. Çatak Formasyonu**

Doğu Karadeniz orojenik kuşağının kuzey zonunda, Üst Kretase boyunca aktif bir volkanizma hâkimdir. Bu volkanizma sonucu bazik ve asidik karakterli lavlar düzenli olarak ardalanarak bir volkano-tortul istif oluşturmaktadırlar (Şekil 3.3). Bu volkano-tortul istifin bazik kökenli kayaçları Maçka İlçesinin Çatak köyü civarında yüzeylendiği için Çatak Formasyonu olarak isimlendirilmiştir (Güven, 1993) (Şekil 3.1). İnceleme alanının tamamına yakın bir bölümünde yaygın olan formasyonun yaşı Gedikoğlu (1978), Taslı (1984), Arita ve Nishiie (1985), Bulut (1989) ve Yalçınalp (1992) tarafından yapılan çalışmalarda Üst Kretase olarak belirtilmektedir. Bu istif Üst Kretase yaşlı Kızılkaya Formasyonu tarafından uyumlu olarak üzerlenmektedir (Şekil 3.3). Çatak Formasyonu, tabanda kumtaşı, silttaşı, marn, şeyl ve kırmızı-bordo renkli killi kireçtaşı, tuf ara katkılı olup ağırlıklı olarak bazalt-andezit ve piroklastlarının ardalanmasından oluşmaktadır. Birimin andezit-bazalt, tuf ve breşlerden oluşan volkanik seviyeleri koyu gri, yer yer siyah, ayrıştığında kahve renkli görünmekte, volkanik kayaçların ayrışmış ve kloritleşmiş olduğu gözlenmektedir. Çalışmanın konusu olan paleo-heyelan bu volkano-tortul serinin tamamen ayrışmış bölümünde meydana gelmiştir.

### 3.1.2. Kızılkaya Formasyonu

Espiye'nin (Giresun) güneyinde yer alan Kızılkaya yöresinde tipik olarak yüzeylenen riyodasit-dasit ve piroklastlarından oluşan birim ilk olarak Güven (1993) tarafından yörenin adı kullanılarak Kızılkaya Formasyonu olarak tanımlanmıştır. Doğu Karadeniz orojenik kuşağının kuzey zonunda yer alan birim Üst Kretase yaşlı Çatak Formasyonunu uyumlu olarak örtmekte ve inceleme alanının yakınında gözlenmeyen yine Üst Kretase yaşlı Çağlayan Formasyonu tarafından uyumlu olarak üzerlenmektedir (Şekil 3.3). Kızılkaya Formasyonu, içerisinde fosil içeren tortul seviyelere rastlanmadığından göreceli olarak yaşlandırılmış olup, formasyonun yaşı altındaki ve üstündeki birimlerden faydalanılarak Üst Kretase olarak belirlenmektedir (Güven, 1993). Ayrıca, Gedikoğlu (1978), Gülbirahimoğlu (1985), Arita ve Nishiie (1985), Korkmaz ve Gedik (1988), Bulut (1989), Boynukalın (1990), Yalçınalp (1992), Köprübaşı (1992) tarafından yapılan çalışmalar ile de formasyonun yaşı Üst Kretase olarak belirlenmektedir (Şekil 3.3).

### 3.1.3. Kaçkar Granitoyidi-I

Çalışma alanının güneyinde ve güneydoğusunda bulunan granodiyorit birimler farklı araştırmacılar tarafından farklı isimlendirilmektedir. Birim Arita ve Nishiie (1985) tarafından Sarıosman Granodiyoriti, Çoğlu (1975) tarafından Rize Graniti adı altında incelenmekte, bu çalışma kapsamında ise Kaçkar Granitoyidi (Güven, 1993) olarak kullanılmaktadır. Doğu Karadeniz Bölgesindeki Üst Kretase yaşlı birimleri uyumsuz olarak kesen formasyon, Eosen yaşlı birimler tarafından uyumlu olarak üzerlendiğinden Eosen olarak yaşlandırılmaktadır (Şekil 3.2). İnceleme alanında Üst Kretase yaşlı Çatak Formasyonunu keserek gözlenmektedir (Şekil 3.1, Şekil 3.2, Şekil 3.3).

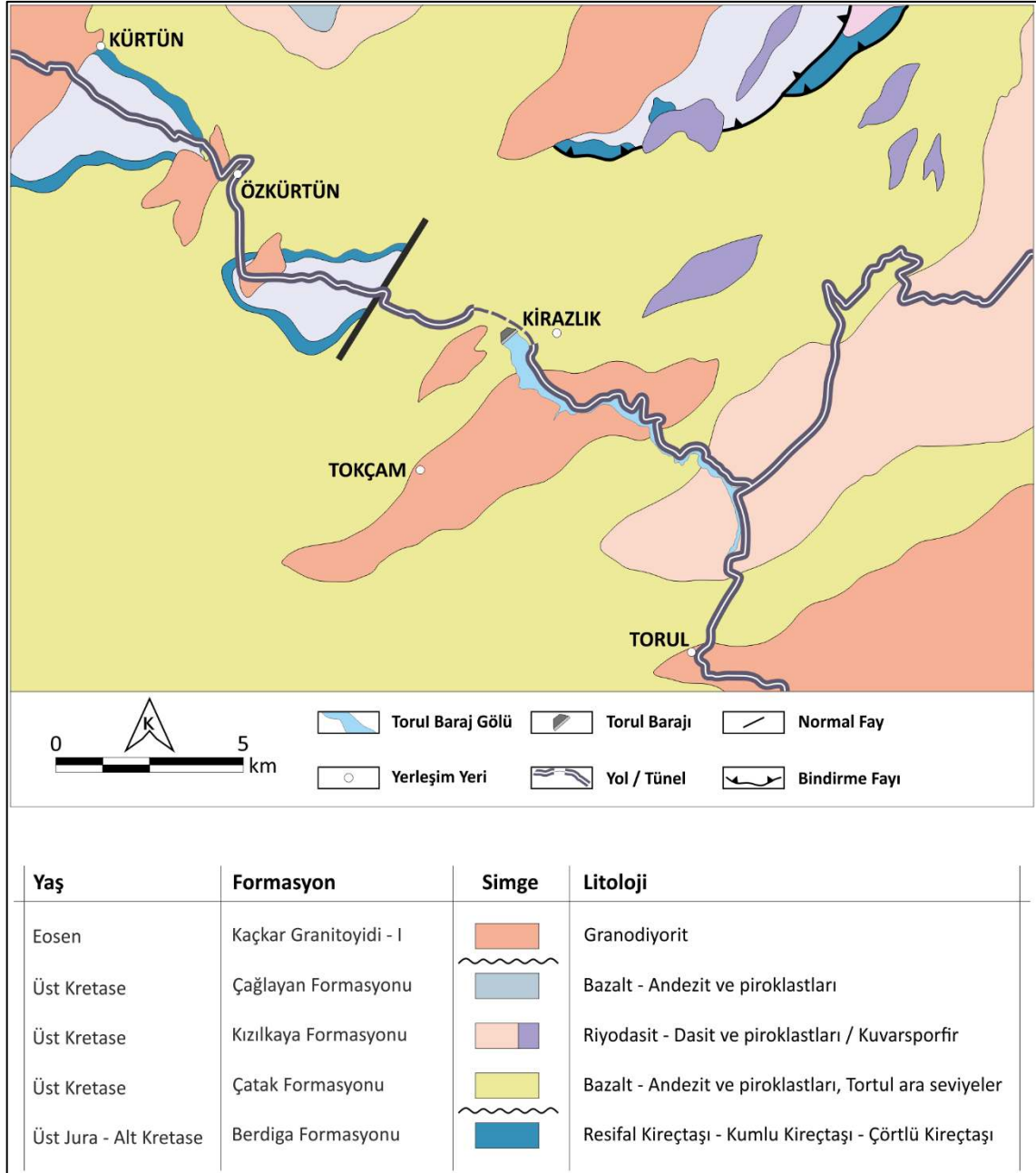
Üst Kretase yaşlı bazik karakterli bazalt-andezit ve piroklastlardan oluşan Çatak formasyonu (Güven, 1993), bu birim üzerine uyumlu olarak gelen Üst Kretase yaşlı asidik karakterli riyodasit, dasit ve piroklastlardan oluşan Kızılkaya formasyonu (Güven, 1993) ve Eosen Kaçkar granitoyidi bölgede egemendir.

Güven (1993), doğu pontid kuzey zonunda, tabanda, kumtaşı, silttaşı, marn, tuf ara katkılı bazalt-andezit ve piroklastlarından oluşan Üst Kretase yaşlı Çatak formasyonunun yaşını içindeki kırmızı-bordo renkli killi kireçtaşlarından saptadığı Globotruncana Lapparenti Brotzen, Globotruncana Limneiana, Globotruncana sp., Marginatruncana sp.,

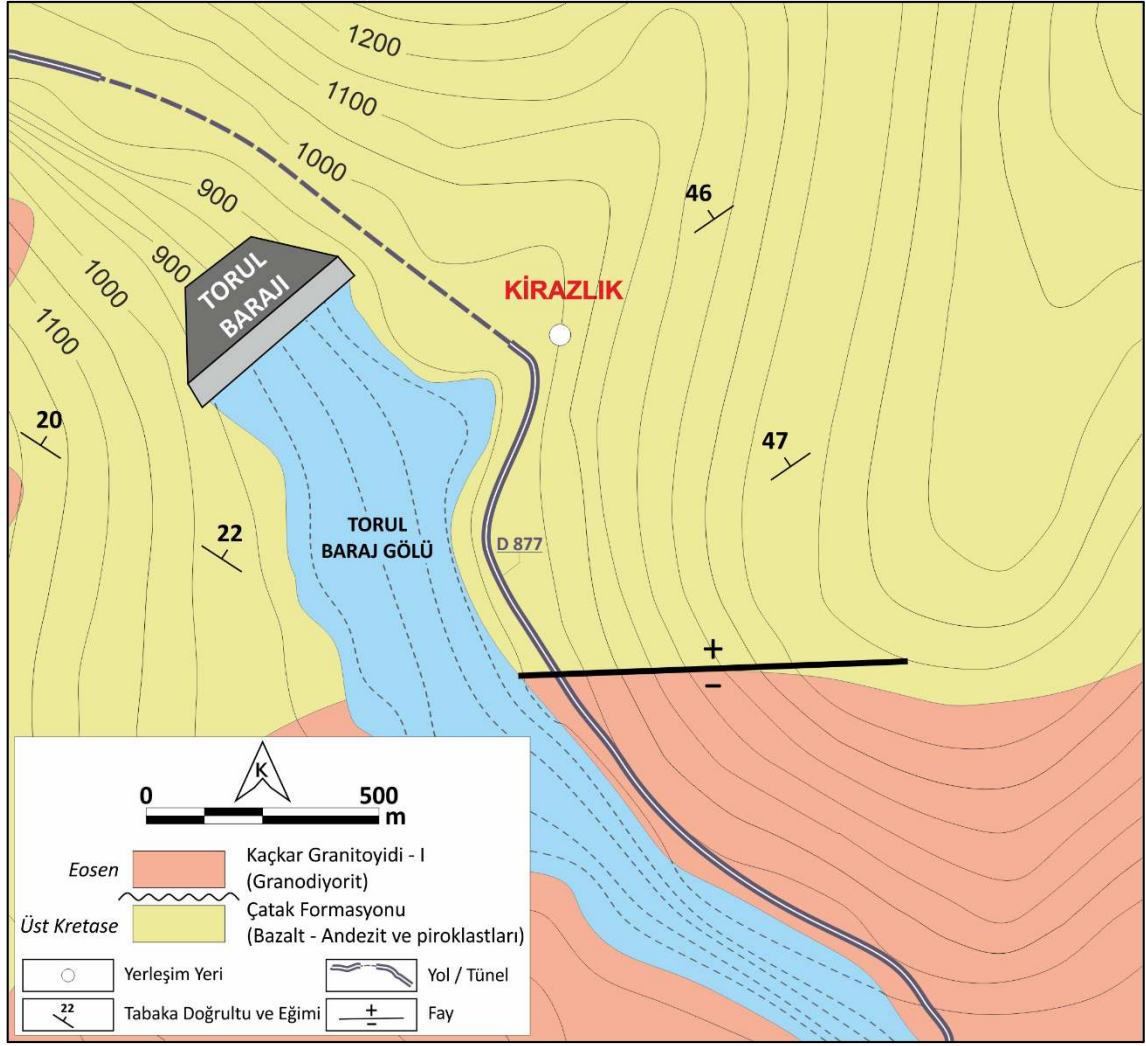
*Globigerinella* sp., *Globigerinoloides* sp., *Gümbelina* sp., *Hedbergella* sp., fosil türlerine göre Turoniyen-Koniasiyen-Santoniyen olarak belirtmektedir. Çatak formasyonunun yaşı başka çalışmalar tarafından da Üst Kretase olarak saptanmaktadır (Gedikoğlu, 1978; Taslı, 1984; Arita ve Nishiie, 1985; Bulut, 1989, Yalçınalp, 1992).

Çalışma alanının kuzeydoğu ve güneydoğu bölümlerinde riyodasit-dasit ve piroklastlarından oluşan Kızılkaya formasyonunun yaşı Güven (1993) tarafından Turoniyen-Koniasiyen-Santoniyen yaşı Çatak formasyonu üzerine uyumlu olarak gelmesi ve Kampaniyen-Mestriştiyen yaşı Çağlayan formasyonu tarafından uyumlu olarak örtülmesi nedeniyle Santoniyen olarak belirtilmektedir. Gedikoğlu (1978), Gülibrahimoğlu (1985), Arita ve Nishiie (1985), Korkmaz ve Gedik (1988), Bulut (1989), Boynukalın (1990), Yalçınalp (1992), Köprübaşı (1992) ise doğu pontid kuzey zonunda yaptıkları çalışmalarda Kızılkaya formasyonunun yaşını Üst Kretase olarak tanımlamaktadırlar.

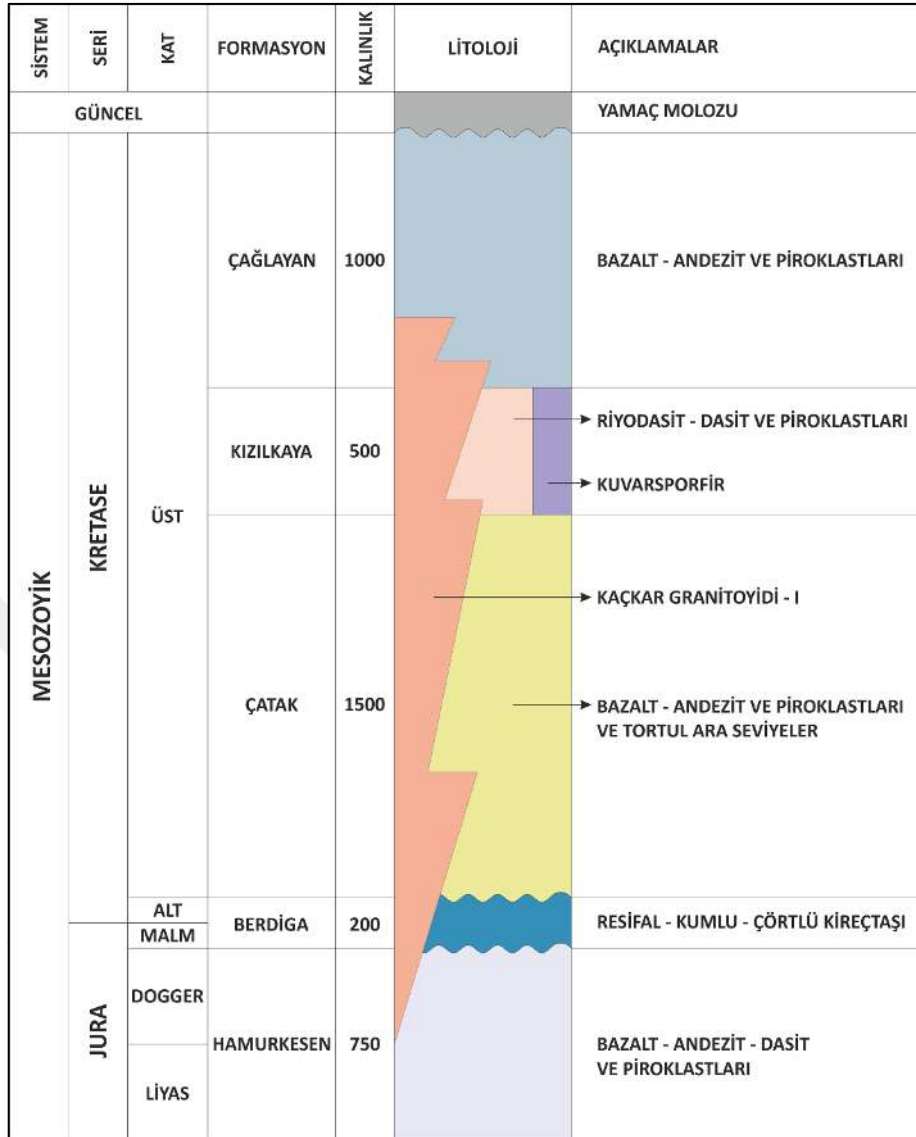
Çalışma alanının güneyinde ve güneybatısında bulunun Eosen yaşı Kaçkar granitoyidi (Güven, 1993) farklı araştırmacılar tarafından farklı isimlendirilmektedir. Birim, Arita ve Nishiie (1985) tarafından Sarıosman granodiyoriti, Coğulu (1975) tarafından Rize graniti adı altında incelenmektedir. Doğu Karadeniz Bölgesindeki Üst Kretase yaşı birimleri kesen ve Eosen yaşı birimler tarafından uyumlu olarak üzerlenen granitoidler Kaçkar granitoyidi-I (Kk1), Eosen yaşı birimler içerisine sokulum yapan intruzif kayalar ise Kaçkar granitoyidi-II (Kk2) olarak tanımlanmaktadır (Güven, 1993).



Şekil 3.1. Bölgesel jeoloji



Şekil 3.2. Çalışma alanına ait jeoloji haritası

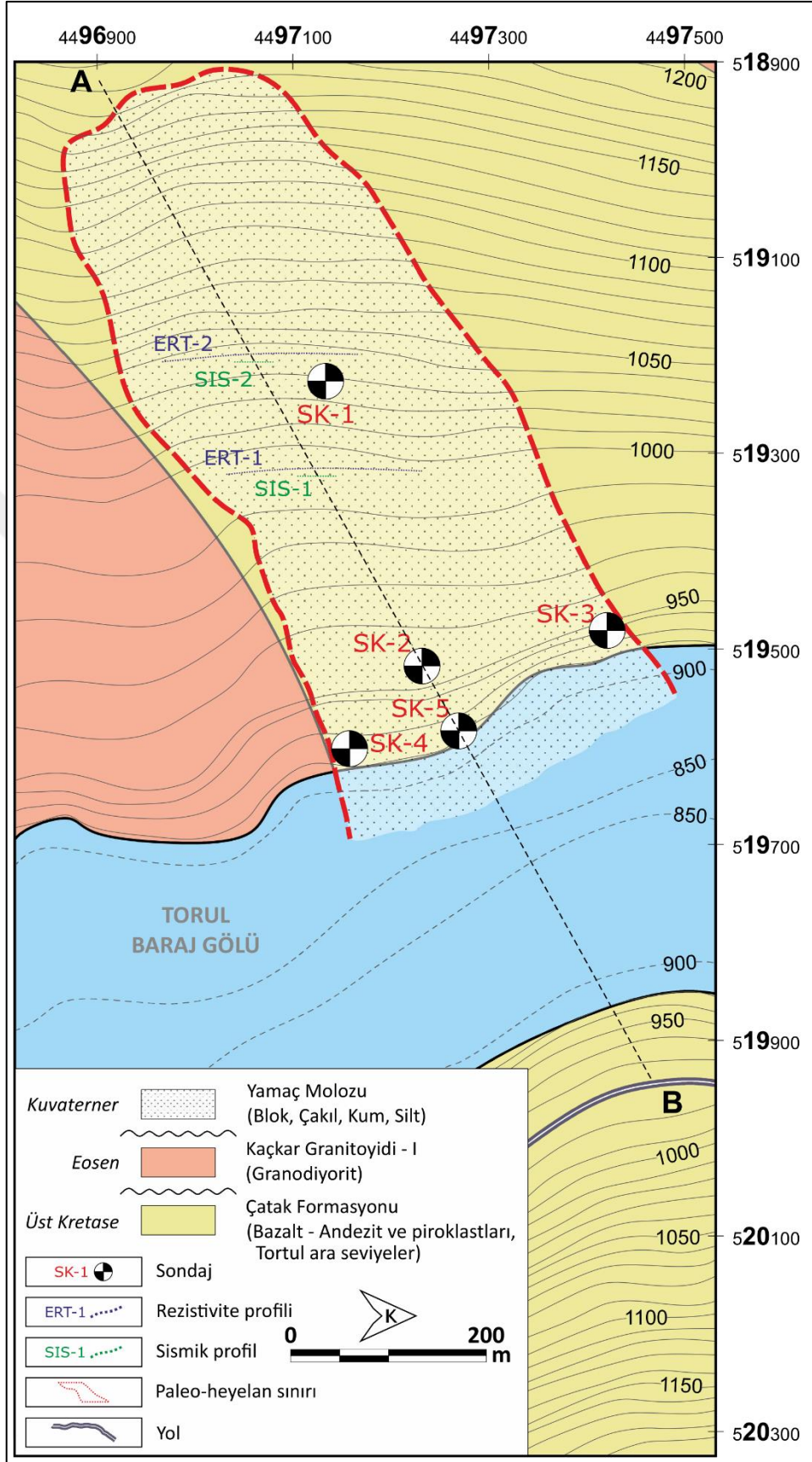


Şekil 3.3. Çalışma alanına ait genelleştirilmiş stratigrafik kolon kesit

### 3.2. Heyelan Sahasında Yapılan Jeoteknik Çalışmalar

Çalışma alanında baraj inşa edilmeden önce DSİ 22. Bölge Müdürlüğü tarafından baraj gölünde bulunan paleo-heyelanların jeolojik ve jeoteknik özelliklerini incelemek amacı ile açılan sondajlardan, çalışma konusu paleo-heyelanın fiziksel özelliklerini ve heyelanın kayma yüzeyini araştırmak üzere yararlanılmıştır. Her ne kadar DSİ 22. Bölge Müdürlüğü tarafından Harşit Çayı'nın sağ ve sol sahilinde toplam 13 adet sondaj yapılmış olsa da bunlardan bazıları baraj su tutmaya başladıktan sonra göl alanının altında kalması nedeniyle bu çalışmada paleo-heyelan sınırı içerisinde kalan 5 adet toplam 303 metre sondaja ait veriler kullanılmıştır (Tablo 3.1, Tablo 3.2; Şekil 3.4, Şekil 3.5).

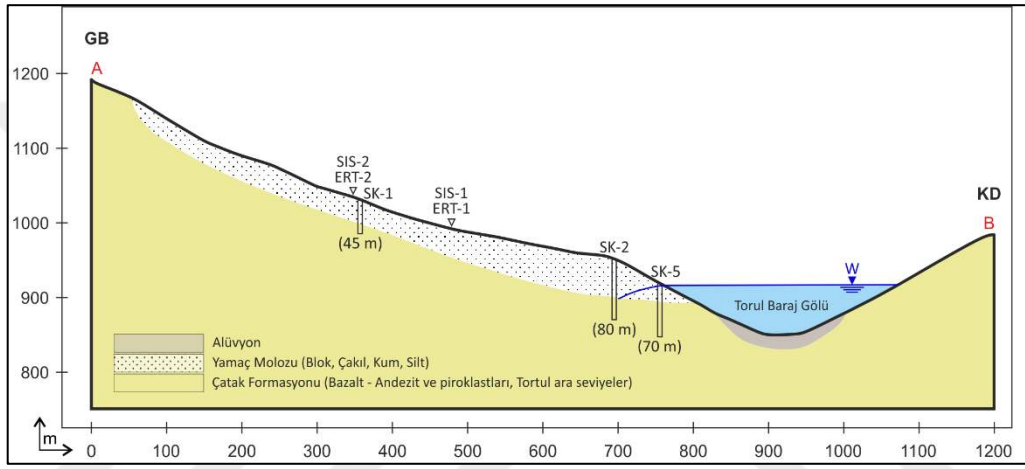




Şekil 3.4. Çalışma alanına ait mühendislik jeolojisi haritası

Tablo 3.1. Sondaj kuyu numaraları ve koordinat değerleri

| Sondaj No | Kot (m) | Derinlik (m) |
|-----------|---------|--------------|
| SK-1      | 1045.00 | 45.00        |
| SK-2      | 938.00  | 80.00        |
| SK-3      | 927.00  | 60.50        |
| SK-4      | 910.00  | 47.50        |
| SK-5      | 905.00  | 70.00        |



Şekil 3.5. Çalışma alanına ait A-B kesiti

Tablo 3.2. Çalışmada kullanılan sondajlara ait veriler

| Sondaj No | Derinlik (m) | Litoloji                                                                                                        |
|-----------|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| SK-1      | 0.00-23.00   | Kırmızı renkli kireçtaşı ve gri renkli spilit kökenli çakıl ve bloklarıyla birlikte kil içeren yamaç molozu     |
|           | 23.00-45.00  | Orta derecede ve çok ayrılmış, yer yer sağlam yapılı, mevcut çatlakları kalsit dolgulu tuf, kireçtaşı ve spilit |
| SK-2      | 0.00-52.00   | Spilit ve granit kökenli blok, çakıl ve kil içeren yamaç molozu                                                 |
|           | 52.00-80.00  | Gri renkli, sert, çok çatlaklı, az ve orta derecede ayrılmış kireçtaşı                                          |
| SK-3      | 0.00-9.00    | Spilit, kireçtaşı, çakıl, blok ve kil içeren yamaç molozu                                                       |
|           | 9.00-60.50   | Sarımsı, yeşilimsi renkte olup orta ve ileri derecede ayrılmış tuf ve spilit                                    |
| SK-4      | 0.00-12.00   | Kireçtaşı, spilit, tuf kökenli blok, çakıl ve kil içeren yamaç molozu                                           |
|           | 12.00-47.50  | Az, orta ve yer yer tamamen ayrılmış kireçtaşı ve spilit                                                        |
| SK-5      | 0.00-30.00   | Spilit, tuf ve kireçtaşı kökenli blok, çakıl ve kil içeren yamaç molozu                                         |
|           | 30.00-70.00  | Az ve orta derecede ayrılmış ve çok çatlaklı kireçtaşı ve spilit                                                |



### 3.2.1. Araştırma Çukurlarının Açılması ve Laboratuvar Deneyleri

#### 3.2.1.1. Kayma Direnci Parametrelerinin Belirlenmesi

Bu çalışma kapsamında stabilite analizlerinde girdi parametrelerinden biri olan kayma direnci parametrelerini belirlemek amacıyla 3 metre derinliğindeki 4 farklı araştırma çukuru tabanından örselenmemiş örnekler temin edilmiştir. Kayma direnci parametrelerinin tespiti için, konsolidasyonsuz-drenajsız direkt kesme deneyi uygulanmış ve deneyde ASTM D3080 standartları kullanılmıştır. Deneyde, 6X6 cm boyutlarındaki kare kutu içerisine yerleştirilen zemin örneğinin düzgün yüzeyli bir cisimle üstü düzeltilmiş ve kutu deney düzeneği içerisine yerleştirilmiştir. Deney düzeneğinde yük ve deformasyonların okunabildiği saatler bulunmaktadır. Bu düzenekler vasıtasıyla, uygulanan sabit düşey yükler ile her yük için örneğin kesildiği kayma gerilmesi okunmuş ve sonuç olarak zemin örneğine ait kayma direnci parametreleri ( $c$  ve  $\phi$ ) hesaplanmıştır. Tablo 3.3'te her bir numuneye ait kohezyon ( $c$ ) ve içsel sürtünme açısı ( $\phi$ ) değerleri yer almaktadır.

Tablo 3.3. Heyelan malzemesine ait kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri

| Araştırma Çukuru No | Derinlik (m) | Örnek Derinliği (m) | Kohezyon (kPa) | İçsel Sürtünme Açısı (°) | Birim Hacim Ağırlık (kN/m <sup>3</sup> ) |
|---------------------|--------------|---------------------|----------------|--------------------------|------------------------------------------|
| AÇ-1                | 3            | 2.30                | 18             | 29                       | 19                                       |
| AÇ-2                | 3            | 2.50                | 21             | 22                       | 21                                       |
| AÇ-3                | 3            | 3.00                | 22             | 25                       | 21                                       |
| AÇ-4                | 3            | 2.50                | 20             | 25                       | 20                                       |

### 3.3. Heyelan Sahasında Yapılan Jeofizik Çalışmalar

#### 3.3.1. Sismik Kırılma ve MASW Ölçümleri

Bu çalışma kapsamında heyelan malzemesinin yanal ve düşey devamlılığını belirlemek, jeoteknik özelliklerini ortaya çıkarmak amacıyla sismik kırılma yöntemi ve yüzey dalgalarının çok kanallı analiz yöntemi kullanılmıştır.

Sismik yöntemlerin temeli yer içinde elastik empedans değişimi olan yüzeylerden kırılarak ya da doğrudan seyahat eden elastik dalgaların kırılma ve yansıma prensiplerine dayanmaktadır. Çalışmalarda genel olarak, yer yüzeyinde yapay bir kaynak (balyoz, ağırlık düşürme, dinamit vs.) vasıtasıyla oluşturulan boyuna (P-dalgaları) ve enine (S-dalgaları) dalgaların yüzeydeki alıcılar (jeofonlar) tarafından zamanın fonksiyonu olarak kaydedebilmektedir. Kaydedilen bu ilk varışlar analiz edilerek, yer altının yapısal özellikleri, yer içine ait P ve S dalgası hızları ve bu hızlara bağlı olarak yerin sarsınım ve dayanım özellikleri hesaplanarak yer altı yapısının jeoteknik değerlendirilmesi yapılmaktadır. Yöntemde, kaydedilen sismik veri üzerinde ilk varış zamanları okunmakta, bu okunan zaman değerleri uzaklığın fonksiyonu olarak çizilmekte (x-t grafiği), x-t grafiğinden elde edilen doğruların eğiminin tersinden yer altındaki tabakaların hızları elde edilmekte ve yer altı yapısı ortaya çıkarılmaktadır.

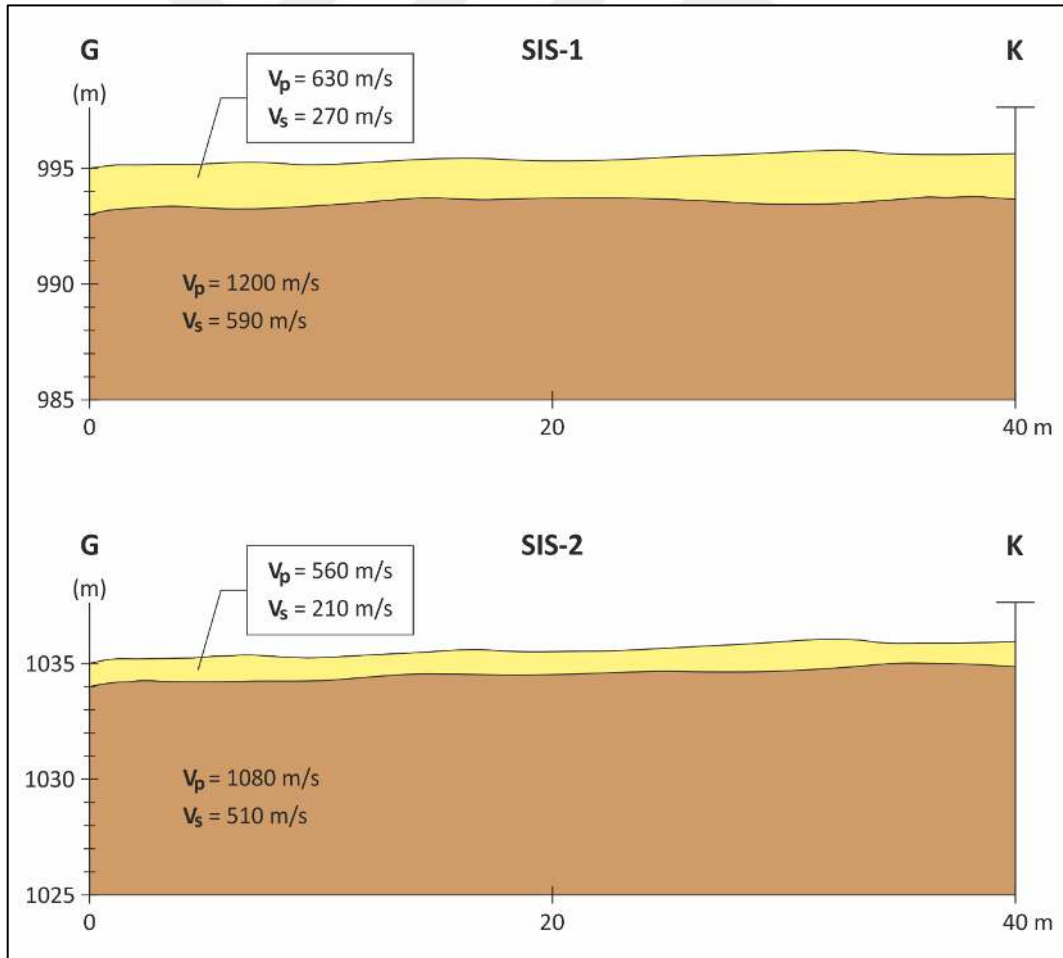
Son yıllarda geleneksel sismik kırılma yöntemi yerine, yüzey dalgalarının çok kanallı analiz yöntemi (MASW) kullanılarak yer altı yapılarının enine (S) dalgası hız değişimleri daha güvenilir ve daha fazla derinliklere kadar belirlenebilmektedir. MASW yöntemi ile efektif olarak ilk 30 metre derinliğe kadar yer altının enine dalga hızları belirlenebilmektedir. MASW yönteminin temeli tabakalı ortamda seyahat eden Rayleigh dalgalarının dispersif özelliklerine dayanır (Park vd., 1999a, Xia vd., 1999). MASW yönteminde alıcı sayısının fazla olması durumunda Rayleigh dalgaları temel modu dışında kalan diğer modlar, cisim dalgaları ve gürültülerin etkin bir şekilde ayırt edilebileceklerini göstermişlerdir. MASW verisinin değerlendirilmesi ile S dalgası hız yapısının elde edilmesi üç adımda gerçekleştirilir. İlk olarak sismik atış kaydı araziden toplanır, ikinci adımda ise yüzey dalgası verisinden dispersiyon eğrisi elde edilir. Dispersiyon eğrisinin elde edilmesi, zaman-uzaklık ortamında kaydedilen verinin Fourier dönüşümü almak suretiyle frekans ortamına aktarılması şeklindedir (McMechan ve Yedlin, 1981). Daha sonra bu veriye integral dönüşümü uygulamak suretiyle faz hızı-frekans eğrisi elde edilebilir (Park vd., 1999a, b). Son olarak ise dispersiyon eğrisine doğrusal olmayan en küçük kareler yöntemini temel alan ters çözüm tekniğinin uygulanmasıyla derinliğe bağlı olarak S dalgası hız yapısı edilir (Hayashi, 2003).

İnceleme alanında belirlenen 2 hat üzerinde P dalgaları için karşılıklı atış, aynı hat üzerinde ara atışlar ve MASW kaydı olacak şekilde kanal sayısı 24, ofset mesafesi 12 m, jeofon aralıkları 3 m ve toplam hat uzunluğu 93 m olmak üzere “Sismik Kırılma Tomografisi-MASW (Multi-Channel Analysis of Surface Wave)” çalışması yapılmıştır.

Çalışmada,  $P_{düz}$ ,  $P_{ters}$  ölçüleri alınarak ilk varış okumaları yapılmış, ilk varış okumalarına bağlı olarak zaman-uzaklık (x-t) grafiği oluşturulmuş, aynı profil üzerinde yapılan MASW ölçüsü dispersiyon eğrisi oluşturulmuş, buna bağlı olarak da  $V_s$  hesaplanmıştır. Ölçümler sonucunda elde edilen kesitler Şekil 3.6'da ve Tablo 3.4'te sunulmuştur.

Tablo 3.4. Sismik çalışmalardan (sismik kırılma ve MASW) elde edilen sonuçlar

| Hat   | Tabakalar | P Dalga Hızı (m/s) | S Dalga Hızı (m/s) | Tabaka Kalınlığı (m) | Litoloji                        |
|-------|-----------|--------------------|--------------------|----------------------|---------------------------------|
| SIS-1 | 1. Tabaka | 630                | 270                | 0-2 m                | Gevşek silt, kum, az oranda kil |
|       | 2. Tabaka | 1200               | 590                | 2-10 m               | Blok, çakıl ve kum, sıkı kil    |
| SIS-2 | 1. Tabaka | 560                | 210                | 0-1 m                | Gevşek silt, kum, az oranda kil |
|       | 2. Tabaka | 1080               | 510                | 1-10 m               | Blok, çakıl ve kum, sıkı kil    |



Şekil 3.6. Sismik çalışmalar sonucunda oluşturulan jeolojik kesitler

Elde edilen veriler kullanılarak heyelan malzemesinin yoğunluğu, Poisson oranı ve elastik modül değerleri Tezcan vd. (2006) tarafından önerilen denklemlere göre hesaplanmıştır (Tablo 3.5).

$$\nu = [(V_P/V_S)^2 - 2] / 2[(V_P/V_S)^2 - 1] \quad (3.1)$$

$$E = \mu (3 V_P^2 - 4 V_S^2) / (V_P^2 - V_S^2) \quad (3.2)$$

$$\mu = \rho V_S^2 / 100 \quad (3.3)$$

$$\rho = 0.44 V_S^{0.25} \quad (3.4)$$

|        |                                |                    |
|--------|--------------------------------|--------------------|
| $\nu$  | : Poisson oranı                | -                  |
| $E$    | : Elastisite modülü            | kg/cm <sup>2</sup> |
| $\mu$  | : Kayma modülü                 | kg/cm <sup>2</sup> |
| $\rho$ | : Yoğunluk                     | g/cm <sup>3</sup>  |
| $V_P$  | : P (birincil) dalgasının hızı | m/s                |
| $V_S$  | : S (ikincil) dalgasının hızı  | m/s                |

Tablo 3.5. Sismik çalışmalardan elde edilen veriler kullanılarak hesaplanmış zemin parametreleri

| Derinlik<br>(m) | P Dalga<br>Hızı<br>(m/s) | S Dalga<br>Hızı<br>(m/s) | Elastisite<br>Modülü<br>(MPa) | Poisson<br>Oranı | Yoğunluk<br>(g/cm <sup>3</sup> ) |
|-----------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------|------------------|----------------------------------|
| 0-2             | 595                      | 240                      | 280                           | 0.40             | 1.73                             |
| 2-              | 1140                     | 550                      | 1737                          | 0.35             | 2.13                             |

### 3.3.2. Çok Elektrotlu Elektrik Tomografi Ölçümleri (ERT)

Sığ yapıların araştırılmasında genellikle yatay rezistivite taraması olarak adlandırılan profillemeye ölçüm tekniği kullanılır. Bu teknikte; seçilen elektrot diziliminin türüne bağlı olarak her bir derinlik düzeyi için yapılan ölçümlerle yer altının görünür rezistivite yapma kesiti (pseudo-section) elde edilir. Bu tür bir ölçümün tek kanallı bir rezistivite cihazıyla yapılması oldukça büyük bir zaman alır. Oysa sığ yapıların araştırılmasında hızlı, duyarlı ve

kısa sürede ölçüm yapacak cihazlara gereksinim vardır. Tanımlanan özelliklere sahip olarak üretilen çok kanallı (multi-electrode) cihazlar, bu amaçlar doğrultusunda son yıllarda oldukça yaygın biçimde kullanılmaktadır.

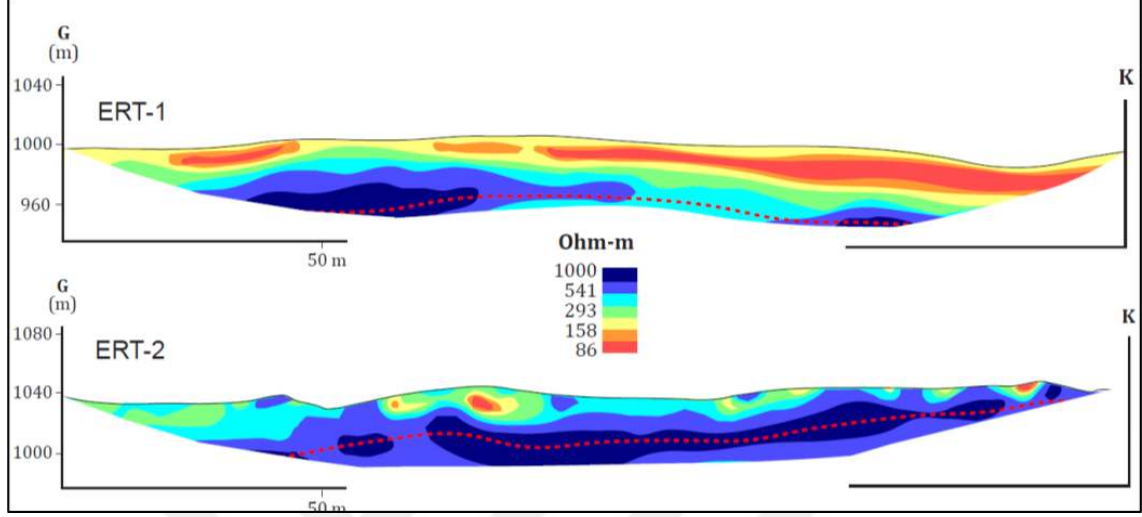
Elektrik özdirenç yöntemi, yakın yüzey yer altı araştırmalarında en çok kullanılan jeofizik yöntemlerden birisidir (Telford vd., 1990; Reynolds, 2011). Elektrik özdirenç yöntemi, yapay bir kaynak vasıtasıyla bir çift akım elektrotu ile yere verilen akımın yer altında yayılırken yer altı malzemelerinin elektrik akımına karşı direnç özelliklerine göre oluşan potansiyel farkın değişiminin bir çift potansiyel elektrotu ile ölçülmesi esası üzerine geliştirilen bir yöntemdir. Yöntemde temel hedef yer altı su seviyesinin, su akış rejiminin ve temel kayaç topoğrafyasındaki değişimin belirlenmesidir. Ayrıca, sismik yöntemlerle karşılaştırma yapma açısından temel kaya derinliği ve topoğrafyası, yanal ve düşey yöndeki litolojik değişim, fay ve çatlak sistemleri gibi kırıklı yapıların tespitinde de kullanılabilir.

Elektrik özdirenç yöntemi arazide üç şekilde uygulanabilmektedir:

- (1) Düşey elektrik sondajı (DES); bu uygulamada akım elektrotları merkezi bir noktaya göre açılarak toplanan ölçülerden derine doğru yer altının özdirenç değişimi hesaplanır.
- (2) Elektrik özdirenç profili; burada elektrotlar sabit elektrot aralığı ile bir doğrultu boyunca eşit mesafelerde hareket ettirilerek ölçümler alınır ve yanal yönde özdirenç değişimi elde edilir.
- (3) Elektrik özdirenç tomografi; bu ölçüm yönteminde ise çok sayıda elektrot çiftleri kullanılarak yer altının iki boyutlu özdirenç değişimi elde edilmiş olunur. Bu yöntem özellikle yanal ve düşey yöndeki değişimlerinin, yer altı suyu varlığı ve seviyesinin, nemlilik, tuzluluk, boşluk ve kayaçların ayrışma derecelerinin belirlenmesinde çok etkin ve yaygın kullanılan bir yöntemdir.

Bu çalışma kapsamında, Wenner dizilim türü uygulanmış, elektrot aralığı 10 metre olarak belirlenmiş, 20 elektrot kullanılmış ve toplam hat uzunluğu 200 metre olarak elde edilmiştir. Arazi çalışması esnasında her bir elektrot için kot değerleri GPS yardımı ile hassas olarak okunmuş, veri işlem aşamasında data ZondRes2D programı kullanılarak değerlendirilmiş, topoğrafik etkiler kesitlere eklenmiştir. Kesitler elde edilen özdirenç (ohm.m) değerlerine göre ayrılmış, tabaka sınırları belirlenmiş, litoloji ile

ilişkilendirilmiş ve yaklaşık olarak 40-50 metre derinlik incelenmiştir. Sonuçlar Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.7. ERT ölçümlerinin değerlendirilmesi sonucunda oluşturulan jeolojik kesitler

### 3.4. Rezervuara Kayacak Malzeme Hacminin Belirlenmesi

İtki dalgalarının oluşmasında en önemli parametre rezervuara kayacak malzemenin hızı ve hacmidir. Rezervuara kayacak malzemenin hacmini, heyelan olmadan tam olarak belirlemek mümkün değildir. Ancak gerçekte meydana gelmeyecek bir senaryonun modellenmesi de çalışmanın sonuçlarının doğruluğu açısından problemlere yol açabilir. Bu nedenle, bir heyelan olması durumunda rezervuara kayacak malzeme hacmi özellikle nümerik stabilite analizleri sonucunda belirlenen kayma yüzeyleri ve heyelan geometrisi dikkate alınarak tahmin edilebilir. Nümerik analizler deformasyonun en fazla olduğu bölgeleri (olası kayma yüzeyini) verir. Buradan heyelanın uzunluğu ve kalınlığı hakkında bilgi elde edilebilse de kesin bir kayma yüzeyi belirlenemediği için uzunluğu ve kalınlık değerleri nümerik analizin verdiği boyutlar doğrultusunda değiştirilebilir. Bu nedenle çalışmalarda farklı senaryolar modellenir ve nümerik analizler heyelanın uzunluğu ve kalınlığı hakkında bilgi verip genişliği hakkında bilgi vermediğinden farklı genişlik için hacim senaryoları oluşturularak analizler tekrarlanır. Bu çalışma kapsamında rezervuar yamacında bir heyelan olması durumunda, rezervuarda meydana gelecek itki dalgalarının karşı kıyıda ve baraj gövdesinde oluşturacağı etkiler nümerik stabilite analizlerden elde

edilen veriler kullanılarak 4 farklı senaryo modellenerek araştırılmıştır. 0.25, 0.50, 0.75 ve 1 milyon metreküp malzemenin kayacağı kurgulanarak modelleme yapılmıştır.

#### 3.4.1. Şev Stabilite Analizleri

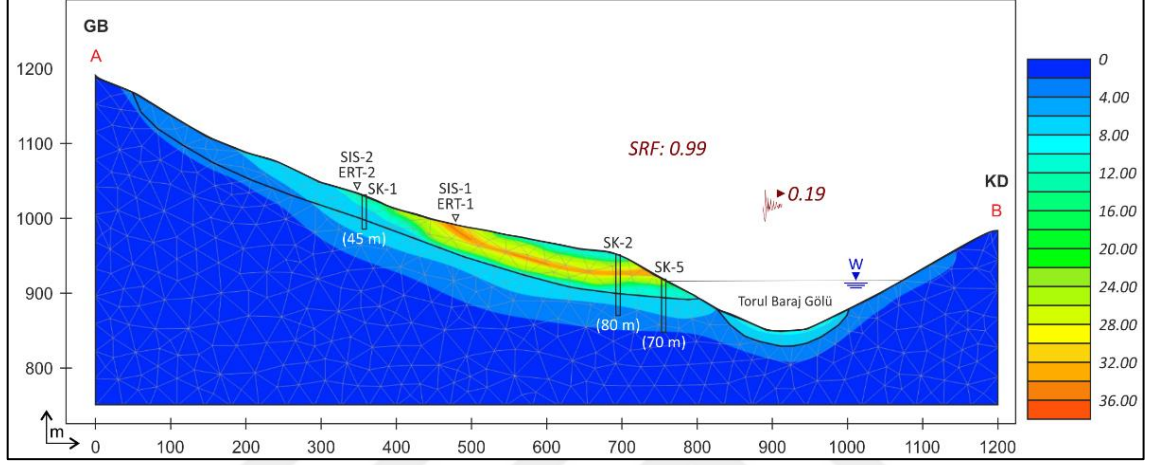
Şev stabilite analizleri için birçok yöntem bulunmasına rağmen, heyelan malzemesinin türü ve özelliklerine bağlı olarak limit denge ve nümerik analizler en çok tercih edilen stabilite yöntemleridir. Bu çalışmada, Kirazlık paleo-heyelanının stabilitesi nümerik analiz teknikleri (FEM) kullanılarak değerlendirilmiştir (Şekil 3.8). FEM tabanlı iki boyutlu analizler RS2 v9.0 (Rocscience Inc. 2016a) yazılımları kullanılarak uygulanmıştır. Analizlerde girdi parametresi olarak tanımlanan ve heyelan malzemesine ait özellikler Tablo 3.6’da özetlenmiştir. Ana kaya ise sonsuz dayanımlı (infinite strength) olarak kabul edilmiştir.

Tablo 3.6. Stabilite analizlerinde kullanılan girdi parametreleri

|                              | <b>Kırılma Kriteri</b> | <b>Kohezyon<br/>(kPa)</b> | <b>Sürtünme<br/>Açısı<br/>(°)</b> | <b>Birim<br/>Hacim<br/>Ağırlık<br/>(kN/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Poisson<br/>Oranı</b> | <b>Elastisite<br/>Modülü<br/>(MPa)</b> |
|------------------------------|------------------------|---------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------|----------------------------------------|
| <b>Heyelan<br/>Malzemesi</b> | Mohr-Coulomb           | 20                        | 25                                | 20                                                        | 0.35                     | 1737                                   |
| <b>Ana Kaya</b>              | Sonsuz Dayanım         |                           |                                   |                                                           |                          |                                        |

Bilgisayar teknolojisindeki hızlı gelişmeler nedeniyle, FEM-SSR (sonlu elemanlar yöntemi-kayma dayanımı azaltma) yöntemine dayalı programlar geçmişe göre daha sık kullanılmaktadır. FEM-SSR tekniğinde, heyelan malzemesine ait elastik parametreler ve etkiyen kuvvetler limit denge yönteminden farklıdır. FEM-SSR yönteminde güvenlik katsayısı “Dayanım Azaltma Faktörü” (SRF) ile temsil edilir. Kayma dayanımı parametreleri, stabilite sınırına ulaşılan kadar ölçeklenir. SRF değeri, stabilite sınırında gerçek ve model dayanımı arasındaki orandır. SSR yönteminin faydalarından biri, tek bir kayma yüzeyi yerine, deformasyonların geliştiği bölgeleri göstermesidir.

Bu çalışmada da deprem durumu dikkate alınarak nümerik tabanlı stabilite analizleri (FEM-SSR) kullanılmış, yatay yer ivmesi değeri “AFAD 2018 Türkiye Deprem Tehlikesi Haritasından” temin edilmiştir ( $a=0.19g$ ). Depremlı durum için belirlenen  $SRF=0.99$  değeri, bu koşul için heyelan malzemesinde kritik dengein söz konusu olduğunu göstermektedir (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Nümerik tabanlı şev stabilite analiz sonuçları

### 3.4.2. İtki Dalgalarının Oluşumunda Farklı Senaryoların Tanımlanması

Bu çalışmada, Kirazlık paleo-heyelanının yeniden tetiklenmesi durumunda Torul Baraj rezervuarında oluşturacağı itki dalgalarının özellikleri, karşı kıyı ve baraj gövdesine olası etkileri araştırılmaktadır (Şekil 3.9, Şekil 3.10, Şekil 3.11). Bu sebeple stabilite analizleri yapılarak Şekil 3.8’de görüldüğü gibi kritik kayma yüzeyi belirlenmiş ve olası heyelan malzemesine ait farklı kalınlık ve genişlik değerleri dikkate alınarak 0.25 ile 1 milyon metreküp arasında değişen hacimlerde malzemenin rezervuara akma durumu için 4 farklı senaryo öngörülmüştür (Tablo 3.7).

Heyelan kaynaklı itki dalgalarının özelliklerinin belirlenmesi için temel girdi parametreleri dalga yayılma mesafesi ( $x, r$ ), yayılma açısı ( $\gamma$ ), serbest su derinliği ( $h$ ) ve karşı kıyı veya barajın gövde eğimidir ( $\beta$ ). Çalışma alanına ait bu veriler Tablo 3.8’de verilmiştir.

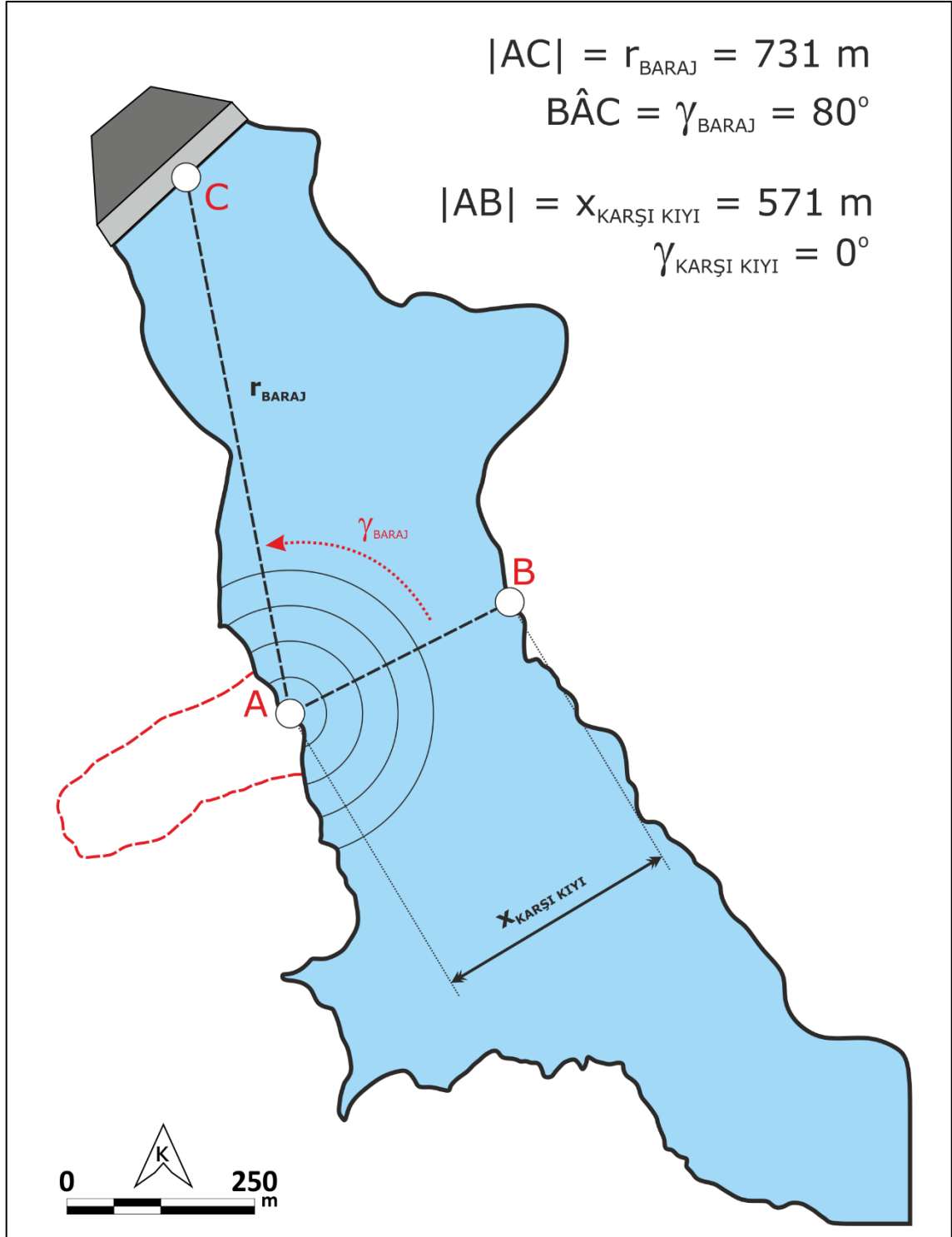


Tablo 3.7. Farklı senaryolar için dalga özelliklerini kontrol eden girdi parametreleri

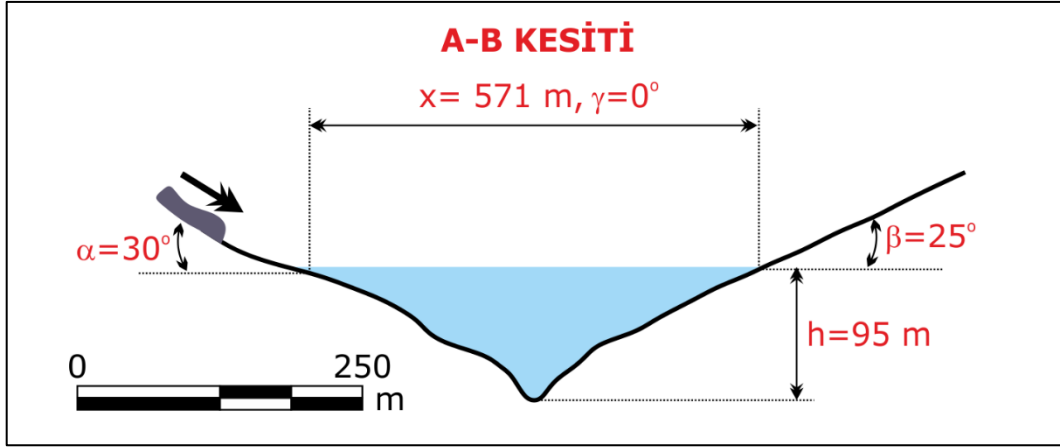
| Sınır Koşullar                                               | Senaryo 1 | Senaryo 2 | Senaryo 3 | Senaryo 4 |
|--------------------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Heyelanın hızı ( $V_s$ ) (m/s)                               | 12        | 12        | 12        | 12        |
| Çarpma Bölgesinde Heyelan Kalınlığı (s) (m)                  | 9         | 12        | 15        | 18        |
| Heyelan Genişliği (b) (m)                                    | 75        | 100       | 125       | 150       |
| Yer Değiştirme Kot Farkı ( $\Delta Z_{sc}$ ) (m)             | 40        | 40        | 40        | 40        |
| Heyelanın Hacmi ( $V_s$ ) (m <sup>3</sup> )                  | 250.000   | 500.000   | 750.000   | 1.000.000 |
| Kayma açısı ( $\alpha$ ) (°)                                 | 30        | 30        | 30        | 30        |
| Kayan Malzemenin Yoğunluğu ( $\rho_s$ ) (kg/m <sup>3</sup> ) | 1.600     | 1.600     | 1.600     | 1.600     |
| Kayan Malzemenin Gözenekliliği (n) (-)                       | 35        | 35        | 35        | 35        |

Tablo 3.8. Dalga özelliklerinin belirlenmesi için çarpma bölgesinde, karşı kıyıda ve barajda kullanılan girdi parametreleri

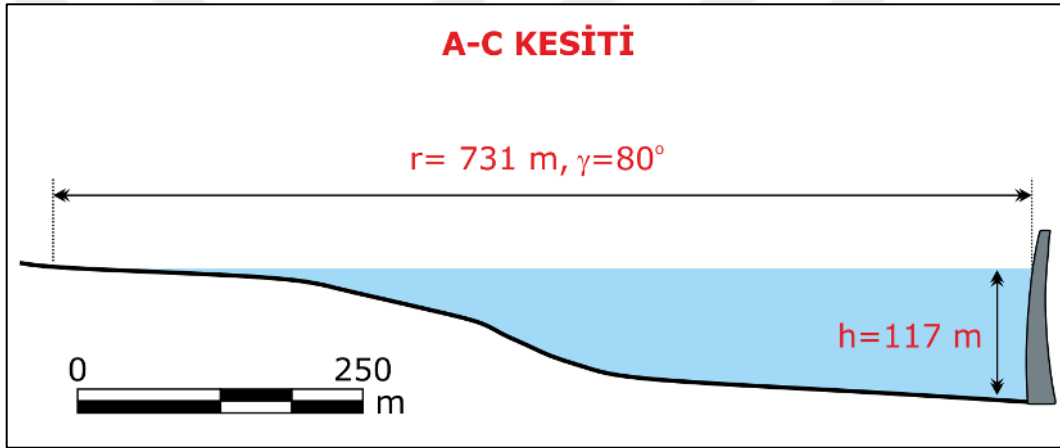
| Girdi Parametreleri               | Çarpma Bölgesi | Karşı Kıyı | Baraj |
|-----------------------------------|----------------|------------|-------|
| Yayılma Mesafesi (x, r) (m)       | 0              | 571        | 731   |
| Yayılma Açısı ( $\gamma$ ) (°)    | 0-90           | 0          | 80    |
| Serbest Su Derinliği (h) (m)      | 95             | 95         | 117   |
| Karşı Kıyı Eğimi ( $\beta$ ) (°)  | -              | 25         | -     |
| Baraj Gövde Eğimi ( $\beta$ ) (°) | -              | -          | 90    |
| Dalga Payı (f) (m)                | -              | -          | 5     |
| Kret Genişliği ( $b_K$ ) (m)      | -              | -          | 10    |



Şekil 3.9. Kirazlık paleo-heyelanından kaynaklı itki dalgalarının özelliklerinin belirlenmesi için temel girdi parametrelerini gösteren kesit



Şekil 3.10. Kayan malzeme ve karşı kıyı arası A-B kesiti



Şekil 3.11. Kayan malzemeyi baraj ile ilişkilendiren A-C kesiti

### 3.5. İtki Dalga Özelliklerinin Ampirik Yaklaşımlarla Modellenmesi

Barajın güvenliği ve karşı kıyıda meydana gelecek riskler göz önüne alındığında itki dalgalarının yükseklik, hız vs. gibi özellikleri önemli rol oynamaktadır. Heyelan malzemesinin çarpma hızı bu riskli durumlar değerlendirildiğinde en etkin parametre olarak kabul edilmektedir (Ersoy vd., 2019). Bu çalışmada, Tablo 3.7 için girdi parametrelerinden biri olan rezervuara kayacak malzeme hızı (heyelanın çarpma anındaki hızı) Körner (1976) tarafından önerilen (2.5) eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır.

$$V_s = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 40 (1 - \tan 25 \cdot \cot 30)} = 12 \text{ m/s}$$

Bu çalışma kapsamında Heller (2009) tarafından geliştirilen hesaplama programı kullanılmıştır. Bu programa göre karşı kıyı için dalgaların doğrusal yayılacağı kabul edilmiş ve Zweifel (2004) ve Fritz (2002) tarafından üretilen ve Heller (2007) tarafından 2D prototip deneyler kullanılarak geliştirilen (Şekil 2.17a); baraj için itki dalgalarının radyal yayılacağı kabul edilmiş ve Huber ve Hager (1997) tarafından üretilen ve Heller (2007) tarafından 3D prototip deneyler kullanılarak geliştirilen (Şekil 2.17b) ampirik eşitlikler kullanılmıştır. Çalışmada, dalga ilerleme yüksekliği Müller (1995) (2.25) tarafından önerilen eşitlikler yardımıyla hesaplanmıştır.

Özellikle erken uyarı sistemlerinin geliştirilmesi için dalga yayılım mesafesi kadar dalga hızının da belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada 1800'li yılların başlarında geliştirilen dalga hızının belirlenmesi için Heller (2007) tarafından önerilen (2.3) denklem kullanılmıştır.

Her bir senaryo için Huber ve Hager (1997) tarafından önerilen ve Heller (2007) tarafından geliştirilen denklemlerden elde edilen sonuçlar Tablo 3.9, ve Tablo 3.10'da görülmektedir.

Tablo 3.9. Baraj için gerçekleştirilen hesaplamalarda heyelan kaynaklı itki dalgalarının özellikleri

| Hesaplamalar                                                                  | Senaryo 1 | Senaryo 2 | Senaryo 3 | Senaryo 4 |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Heyelanın Hacmi ( $V_s$ ) (m <sup>3</sup> )                                   | 250.000   | 500.000   | 750.000   | 1.000.000 |
| İtke Üretim Parametresi (P) (-) (2.8)                                         | 0.10      | 0.13      | 0.15      | 0.17      |
| Maksimum Dalga Genliğinin Çarpma Bölgesine Olan Uzaklığı ( $x_M$ ) (m) (2.14) | 165.8     | 187.4     | 202.7     | 215       |
| Dalga Yüksekliği ( $H, H_M$ ) (m) (2.17) ( $r/h > x_M$ )                      | 2.1       | 2.5       | 2.9       | 3.1       |
| Dalga Genliği ( $a_w, a_M$ ) (m) (2.4)                                        | 1.7       | 2.0       | 2.3       | 2.5       |
| Dalga Periyodu ( $T, T_M$ ) (s) (2.15) ( $r/h > x_M$ )                        | 18.9      | 19.9      | 20.5      | 21        |
| Dalga Hızı ( $c_w$ ) (m/s) (2.3)                                              | 34.1      | 34.2      | 34.2      | 34.2      |
| Dalga Uzunluğu [Radyal Yayılım] ( $L, L_M$ ) (m) (2.16)                       | 645.2     | 678.7     | 701.1     | 718.5     |
| Run-up Yüksekliği (R) (m) (2.25)                                              | 2.2       | 2.8       | 3.2       | 3.6       |

Tablo 3.10. Karşı kıyı için gerçekleştirilen hesaplamalarda heyelan kaynaklı itki dalgalarının özellikleri

| Hesaplamalar                                                                  | Senaryo 1 | Senaryo 2 | Senaryo 3 | Senaryo 4 |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Heyelanın Hacmi ( $V_s$ ) ( $m^3$ )                                           | 250.000   | 500.000   | 750.000   | 1.000.000 |
| İtke Üretim Parametresi (P) (-) (2.8)                                         | 0.10      | 0.13      | 0.15      | 0.17      |
| Maksimum Dalga Genliğinin Çarpma Bölgesine Olan Uzaklığı ( $x_M$ ) (m) (2.14) | 165.8     | 187.4     | 202.7     | 215       |
| Dalga Yüksekliği ( $H$ , $H_M$ ) (m) (2.17) ( $r/h > X_M$ )                   | 7.0       | 8.6       | 9.7       | 10.7      |
| Dalga Genliği ( $a_W$ , $a_M$ ) (m) (2.4)                                     | 5.6       | 6.9       | 7.8       | 8.5       |
| Dalga Periyodu ( $T$ , $T_M$ ) (s) (2.15) ( $r/h > X_M$ )                     | 27.6      | 29.4      | 30.6      | 31.5      |
| Dalga Hızı ( $c_W$ ) (m/s) (2.3)                                              | 31.4      | 31.6      | 31.8      | 31.9      |
| Dalga Uzunluğu [Radyal Yayılım] ( $L$ , $L_M$ ) (m) (2.16)                    | 868.2     | 928.7     | 970.2     | 1002.9    |
| Run-up Yüksekliği (R) (m) (2.25)                                              | 12.2      | 15.3      | 17.7      | 19.7      |

İtke dalgalarının özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan denklemler laboratuvar deneyleri sonucunda ortaya çıktığından ve laboratuvar çalışmalarında belirlenen sınır koşullara uyulması gerekmektedir (Tablo 2.12). Bu çalışmada her bir senaryo için hesaplanan değerler ile ampirik denklemler için öngörülen sınır koşullar karşılaştırılmıştır (Tablo 3.11, Tablo 3.12, Tablo 3.13, Tablo 3.14).

Tablo 3.11. Senaryo 1 için ampirik formüllerin bu çalışma için kullanım sınırlamaları

| Özellik                                      |            | Değer | Sınır Değerler (Heller vd., 2009)                                             | Anlamlılık |
|----------------------------------------------|------------|-------|-------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Froude Sayısı<br>(F <sub>w</sub> ) (-) (2.8) |            | 0.39  | $0.86 \leq F_w = V_s / (g \cdot h)^{1/2} \leq 6.83$                           | Hayır      |
| Göreceli Heyelan Kalınlığı<br>(S) (-) (2.9)  |            | 0.09  | $0.09 \leq S = s / h \leq 1.64$                                               | Evet       |
| Göreceli Heyelan Hacmi<br>(Ψ) (-)            |            | 0.37  | $0.05 \leq \Psi = \Psi_s / (b \cdot h)^2 \leq 5.94$                           | Evet       |
| Heyelan Açısı<br>(α) (°)                     |            | 30    | $30 \leq \alpha \leq 90$                                                      | Evet       |
| Göreceli Heyelan Kütlesi<br>(M) (-) (2.10)   |            | 0.59  | $0.11 \leq M = (\rho_s \cdot \Psi_s) / (\rho_w \cdot b \cdot h^2) \leq 10.62$ | Evet       |
| Göreceli Yayılma Mesafesi<br>(R) (-)         | Karşı Kıyı | 6     | $2.7 \leq X = x / h \leq 59.2$                                                | Evet       |
|                                              | Baraj      | 7.7   | $5 \leq R = r / h \leq 30$                                                    | Evet       |

Tablo 3.12. Senaryo 2 için ampirik formüllerin bu çalışma için kullanım sınırlamaları

| Özellik                                      | Değer      | Sınır Değerler (Heller vd., 2009)                                             | Anlamlılık                     |      |
|----------------------------------------------|------------|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|------|
| Froude Sayısı<br>(F <sub>w</sub> ) (-) (2.8) | 0.39       | $0.86 \leq F_w = V_s / (g \cdot h)^{1/2} \leq 6.83$                           | Hayır                          |      |
| Göreceli Heyelan Kalınlığı<br>(S) (-) (2.9)  | 0.13       | $0.09 \leq S = s / h \leq 1.64$                                               | Evet                           |      |
| Göreceli Heyelan Hacmi<br>(Ψ) (-)            | 0.55       | $0.05 \leq \Psi = \Psi_s / (b \cdot h)^2 \leq 5.94$                           | Evet                           |      |
| Heyelan Açısı<br>(α) (°)                     | 30         | $30 \leq \alpha \leq 90$                                                      | Evet                           |      |
| Göreceli Heyelan Kütlesi<br>(M) (-) (2.10)   | 0.89       | $0.11 \leq M = (\rho_s \cdot \Psi_s) / (\rho_w \cdot b \cdot h^2) \leq 10.62$ | Evet                           |      |
| Göreceli Yayılma Mesafesi<br>(R) (-)         | Karşı Kıyı | 6                                                                             | $2.7 \leq X = x / h \leq 59.2$ | Evet |
|                                              | Baraj      | 7.7                                                                           | $5 \leq R = r / h \leq 30$     | Evet |

Tablo 3.13. Senaryo 3 için ampirik formüllerin bu çalışma için kullanım sınırlamaları

| Özellik                                      |            | Değer | Sınır Değerler (Heller vd., 2009)                                             | Anlamlılık |
|----------------------------------------------|------------|-------|-------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Froude Sayısı<br>(F <sub>w</sub> ) (-) (2.8) |            | 0.39  | $0.86 \leq F_w = V_s / (g \cdot h)^{1/2} \leq 6.83$                           | Hayır      |
| Göreceli Heyelan Kalınlığı<br>(S) (-) (2.9)  |            | 0.16  | $0.09 \leq S = s / h \leq 1.64$                                               | Evet       |
| Göreceli Heyelan Hacmi<br>(Ψ) (-)            |            | 0.66  | $0.05 \leq \Psi = \Psi_s / (b \cdot h)^2 \leq 5.94$                           | Evet       |
| Heyelan Açısı<br>(α) (°)                     |            | 30    | $30 \leq \alpha \leq 90$                                                      | Evet       |
| Göreceli Heyelan Kütlesi<br>(M) (-) (2.10)   |            | 1.06  | $0.11 \leq M = (\rho_s \cdot \Psi_s) / (\rho_w \cdot b \cdot h^2) \leq 10.62$ | Evet       |
| Göreceli Yayılma Mesafesi<br>(R) (-)         | Karşı Kıyı | 6     | $2.7 \leq X = x / h \leq 59.2$                                                | Evet       |
|                                              | Baraj      | 7.7   | $5 \leq R = r / h \leq 30$                                                    | Evet       |

Tablo 3.14. Senaryo 4 için ampirik formüllerin bu çalışma için kullanım sınırlamaları

| Özellik                                      | Değer                 | Sınır Değerler (Heller vd., 2009)                                             | Anlamlılık                     |      |
|----------------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|------|
| Froude Sayısı<br>(F <sub>w</sub> ) (-) (2.8) | 0.39                  | $0.86 \leq F_w = V_s / (g \cdot h)^{1/2} \leq 6.83$                           | Hayır                          |      |
| Göreceli Heyelan Kalınlığı<br>(S) (-) (2.9)  | 0.19                  | $0.09 \leq S = s / h \leq 1.64$                                               | Evet                           |      |
| Göreceli Heyelan Hacmi<br>(Ψ) (-)            | 0.74                  | $0.05 \leq \Psi = \Psi_s / (b \cdot h)^2 \leq 5.94$                           | Evet                           |      |
| Heyelan Açısı<br>(α) (°)                     | 30                    | $30 \leq \alpha \leq 90$                                                      | Evet                           |      |
| Göreceli Heyelan Kütlesi<br>(M) (-) (2.10)   | 1.18                  | $0.11 \leq M = (\rho_s \cdot \Psi_s) / (\rho_w \cdot b \cdot h^2) \leq 10.62$ | Evet                           |      |
| Göreceli Yayılma Mesafesi                    | Karşı Kıyı<br>(X) (-) | 6                                                                             | $2.7 \leq X = x / h \leq 59.2$ | Evet |
|                                              | Baraj<br>(R) (-)      | 7.7                                                                           | $5 \leq R = r / h \leq 30$     | Evet |

### **3.6. İtke Dalga Özelliklerinin 2 Boyutlu Nümerik Modellerle Belirlenmesi**

#### **3.6.1. Rezervuara ve Heyelan Bölgesine ait Sayısal Yükseklik Modelinin Oluşturulması**

Bu çalışma kapsamında Torul Barajı rezervuarının bulunduğu bölgeyi kapsayan 1.6 km uzunluğunda, 1.2 km genişliğinde bir alana ait 1/10000 ölçekli topoğrafik haritalar (eş yükselti eğrileri 5 metrede 1 adet) Harita Genel Komutanlığından sayısallaştırılmış vektör veri olarak temin edilmiştir. Elde edilen bu verilerle ArcGIS yazılımı kullanılarak sayısal arazi modeli (DEM) oluşturulmuştur. Bu veriler NetCAD programı ile X, Y, Z koordinatlı nokta bulutuna (txt formatında) dönüştürülerek, arazinin katı modelinin oluşturulması için tüm veriler değerlendirilmiştir. Bu şekilde oluşturulmuş txt formatındaki veri FLOW-3D programına aktararak arazinin koordinatlı katı modeli oluşturulmuş, Solid programı kullanılarak baraj gövdesi ve heyelan malzemesi STL formatında hazırlanmıştır. Araziye ait koordinatlı katı model FLOW-3D programına aktarıldıktan sonra, koordinatları tanımlanmış olan baraj gövdesi, heyelan malzemesi (3 boyutlu olarak) ve rezervuar suyu (maksimum su seviyesi) hazırlanmış katı model üzerine yerleştirilmiştir.

#### **3.6.2. Nümerik Modelin Oluşturulması ve 2 Boyutlu Dalga Yayılmının Simülasyonu**

Çalışma kapsamında simülasyona dayalı 2 boyutlu nümerik model, FLOW-3D yazılımı (Flow Science Inc. 2017) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) yazılımı olan FLOW 3D, akışkan hareket denklemlerini çözmek için özel olarak geliştirilmiş sayısal analizler kullanmaktadır (Yin vd., 2015). Çalışmada, heyelan malzemesini simüle etmek için “Drift-Flux Model” modülü tercih edilirken, dalga oluşumunu simüle etmek için “volume of fluid (VOF) model” modülü ile birlikte Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes denklemlerini temel alan serbest yüzey modelleme tekniği kullanılmıştır. İki boyutlu katı model oluşturulurken Stereo Litografi (STL) dosyaları kullanılmış, modelin değerlendirilmesi sırasında oluşturulan simülasyonun hareket hızından dolayı, itke dalgası modelini oluşturmak için Drift-flux modeli ve Renormalize Grup (RNG) bazlı k-ε türbülans modeli uygulanmıştır.



### 3.6.2.1. Drift-Flux Modeli

Farklı yoğunluklara sahip (akışkan/parçacıklar vb.) çoklu bileşenlerden oluşan akışkanlarda, bileşenler için farklı akış hızları söz konusudur. Bu farklılıklar genel olarak çok belirgin olabilir ve yoğunluk farklılıklarına bağlı olarak üniform olmayan tanecik kuvvetleri nedeniyle ortaya çıkabilir. Bununla birlikte, göreceli hızlar, pek çok şart altında bir bileşenden diğerine “drift (sürüklenme)” olarak tanımlanacak kadar küçüktür. “Drift (sürüklenme)”, sürekli bir bileşen içinde hareket eden dağınık bir bileşenin eylemsizliğinin önemli olup olmadığı ile ilgilidir. Göreceli hareketin ataleti göz ardı edilemezse ve nispi hız, basınç yönü ile bileşenler arasındaki zıt sürtünme kuvveti arasındaki dengeye indirgenirse, “drift-flux” yaklaşımı geçerli olmaktadır. Sürüklenme hızları temel olarak kütle ve enerjinin taşınması ile ilgilidir. Bu durum bazen momentum ile de gerçekleşebilir, ancak bu genellikle oldukça küçüktür. Bu nedenle çalışma kapsamında kurulan modelde ihmal edilmiştir. Sürüklenme tahminindeki göreceli hızın formülasyonu aşağıdaki gibi kabul edilmiştir. İki bileşenli bir akışkanın akışı için  $u = f_1.u_1 + f_2.u_2$  tanımlanırken, bir karışım oluşturan iki bileşenin parçalarının hacmi,  $f_1$  ve  $f_2$  ile belirtilmiştir (burada  $f_1 + f_2 = 1$ ).

Dağınık faz için ise 3.5 formülü kullanılmaktadır.

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} + u_2 \bar{V} u_2 = -\frac{1}{\rho_2} \bar{V} P + F - \frac{K}{(1-f)\rho_2} u_r \tilde{V} \quad (3.5)$$

- $u_1$  ve  $u_2$  : Sürekli ve dağınık fazların mikroskobik ölçekte hızları  
 $f$  : Sürekli faz hacim oranı  
 $F$  ve  $K$  : Malzeme kuvveti, iki fazın etkileşimi ile ilgili sürüklenme katsayısı  
 $u_r (u_2 - u_1)$  : Dağınık ve sürekli fazlar arasındaki nispi hız farkı

### 3.6.2.2. RNG k-ε Türbülans Modeli

RANS denklemlerine bağlı olarak sıkıştırılamaz nitelikteki sıvı akışı için kütle ve momentum denklemleri aşağıda belirtilmiştir (3.6, 3.7).

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (u_i A_i) = 0 \quad (3.6)$$

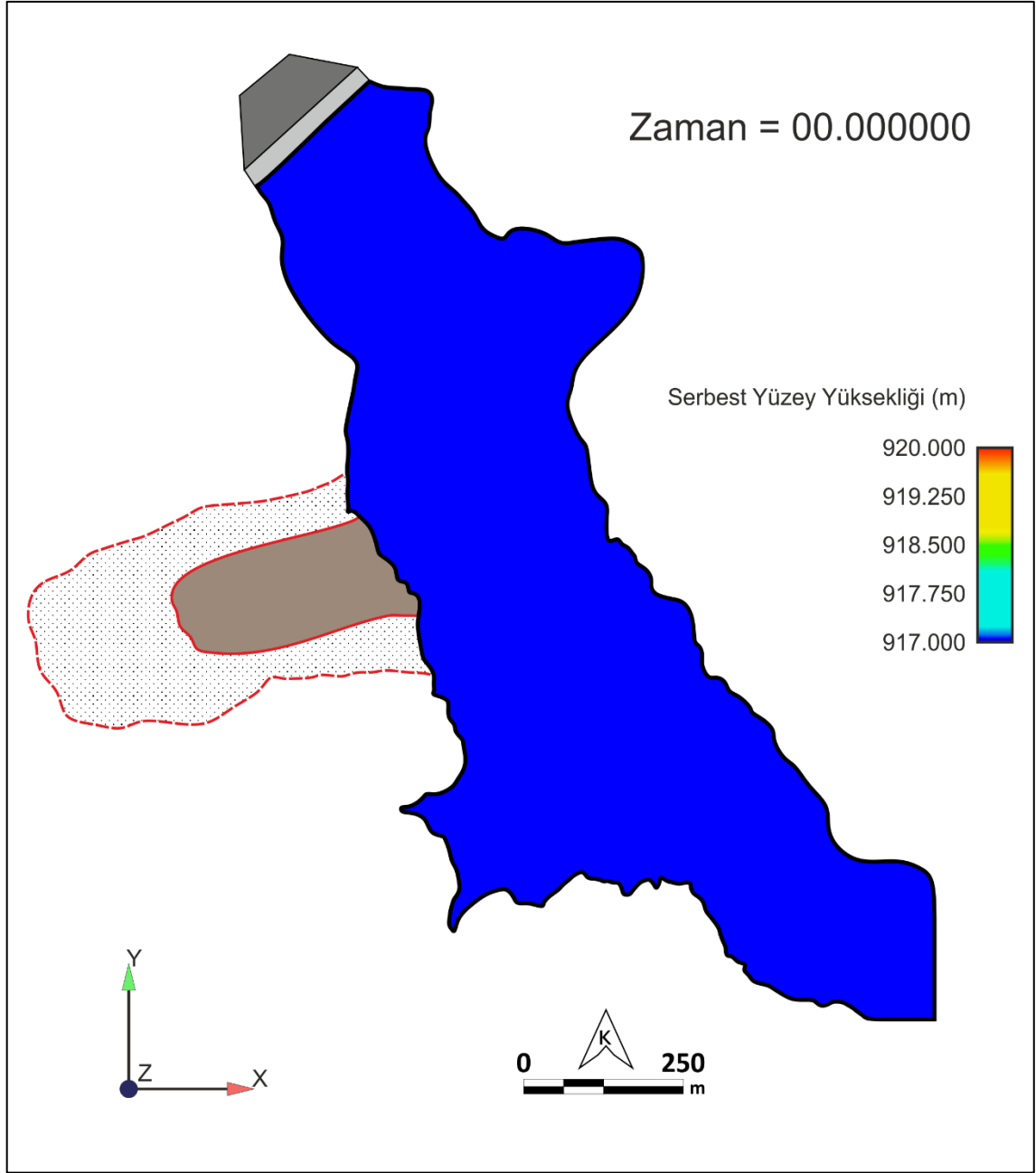
$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( u_j A_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + G_i + f_i \quad (3.7)$$

- $x$  ve  $u_i$  : Koordinat ve hız  
 $A_i$  ve  $t$  : Akış alanı ve zaman  
 $V_f$  ve  $p$  : Akış hacmi ve basınç  
 $P$  ve  $G_i$  : Akışkan yoğunluğu ve katı tane ivmesi  
 $f_i$  : Akışkan ivmesi

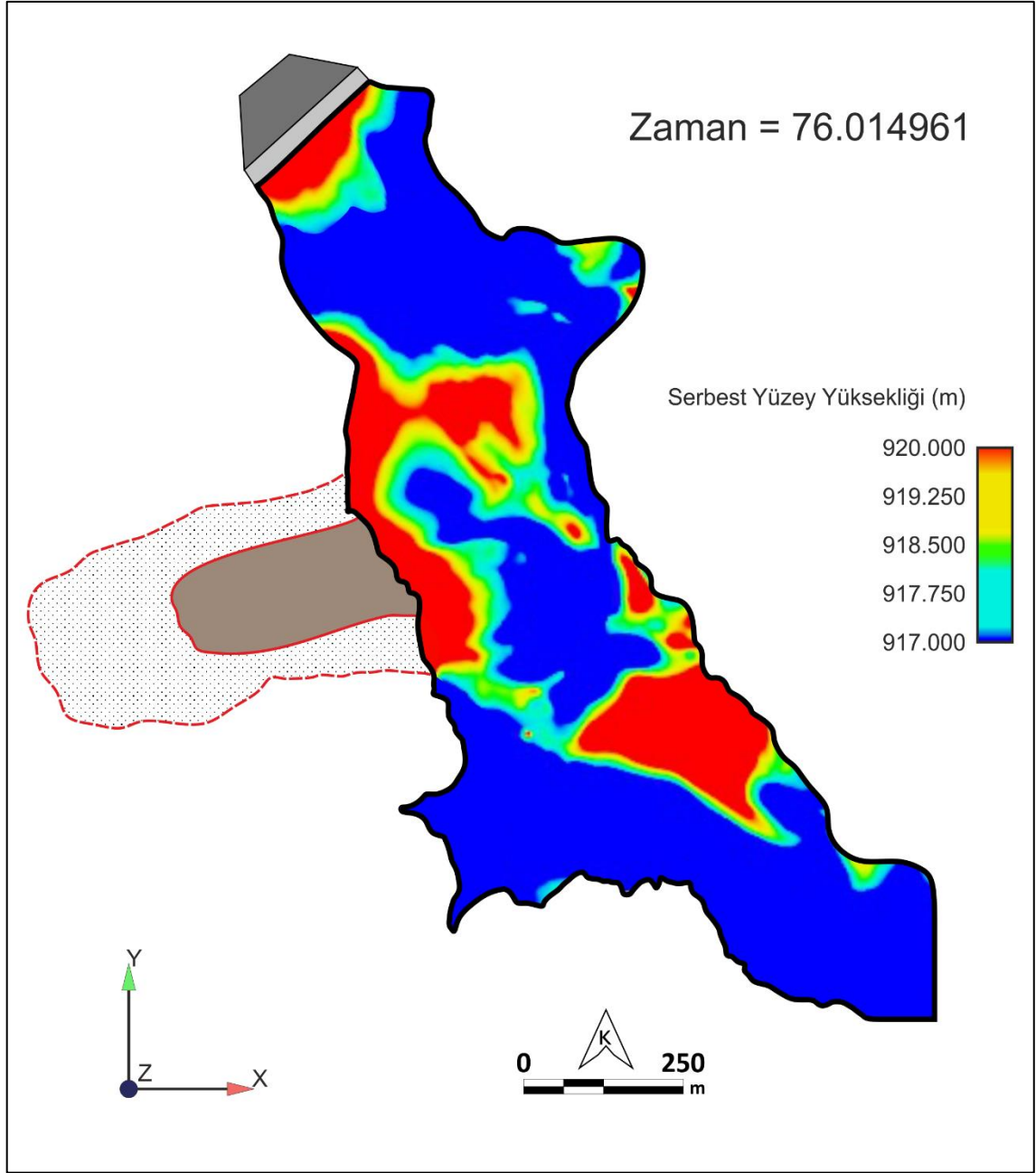
Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde türbülans viskozitesini belirlemek için çok sayıda türbülans modeli (Kocaman ve Özmen-Cagatay, 2015) kullanılabilse de bu çalışma kapsamında, Navier-Stokes denklem tabanlı RNG k-ε türbülans modeli tercih edilmiştir. Çalışmada model oluşturulurken Tablo 3.15'te verilen sınır koşullar kullanılmıştır.

Tablo 3.15. Simülasyona dayalı 2 boyutlu nümerik analiz için girdi parametreleri ve basitleştirilmiş sınır koşulları

|                            |                                                                                    |
|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Genel Özellikler           | Simülasyon Süresi: 150 saniye                                                      |
|                            | Akışkan Sayısı: Tek Akışkan                                                        |
|                            | Simülasyon Birimi: SI                                                              |
|                            | Sıcaklık Birimi: Santigrat                                                         |
| Fizik                      | Yer Çekimi İvmesi: -9.81 m/sn <sup>2</sup>                                         |
|                            | Akışkanın Viskozite Türü: Renormalized Group (RNG)                                 |
|                            | Model: two-equation (k-e) model                                                    |
|                            | Drift-Flux Modu Aktive edildi                                                      |
| Akışkan                    | Akışkan Tipi: 20°C'deki Su                                                         |
|                            | Yoğunluklar;                                                                       |
|                            | Göl Alanındaki Su için 1000 kg/m <sup>3</sup>                                      |
|                            | Heyelan Kütlesi için 2130 kg/m <sup>3</sup>                                        |
| Hücre ve Model Özellikleri | Toplam Hücre Sayısı: 66 034 800                                                    |
|                            | Hücre Boyutu: 5 m                                                                  |
|                            | Hücre Tipi: Non-conforming                                                         |
|                            | Sınır Koşullar:                                                                    |
|                            | Xmin = Açık<br>Xmax = Simetri<br>Ymin = Açık<br>Ymax = Simetri                     |
|                            | Su Seviyesi: 917 Metre<br>Çözüm dosyası boyutu: 234 GB<br>Çözüm süresi: 520 Dakika |



Şekil 3.12. 0. saniyede rezervuarın durumunu gösterir sayısal model



Şekil 3.13. 76. saniyede rezervuarın durumunu gösterir sayısal model

#### 4. SONUÇLAR

Heyelanlar ve barajlar bakımından oldukça yoğun olan Karadeniz Bölgesinde heyelanların baraj rezervuarlarındaki etkisi kaçınılmazdır. Heyelanın gerçekleşmesi durumunda rezervuara akacak malzemenin rezervuarda oluşturacağı itki dalgalarının etkisinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu nedenle Gümüşhane ili, Torul ilçesi, Kirazlık köyü çalışma alanı olarak seçilmiş, Kirazlık paleo-heyelanının yeniden aktif hale gelmesi durumunda rezervuara kayacak malzemenin oluşturacağı itki dalgalarının özellikleri (oluşumu, yayılımı ve ilerlemesi) farklı senaryolar dikkate alınarak çeşitli ampirik eşitlikler ve iki boyutlu nümerik analizler ile modellenerek araştırılmıştır.

DSİ 22. Bölge Müdürlüğü tarafından baraj gölünde bulunan paleo-heyelanların jeolojik ve jeoteknik özelliklerini incelemek amacı ile açılan sondajlardan, çalışma konusu paleo-heyelanın fiziksel özelliklerini ve heyelanın kayma yüzeyini araştırmak üzere yararlanılmış, 5 adet toplam 303 metre sondaja ait veriler kullanılmıştır.

Bilindiği üzere yamaç molozu, irili, ufaklı ve yer yer blok boyutunda malzeme içerebilmektedir. Yamaç molozunun kayma direnci parametrelerini belirlemek için çok kapsamlı arazi deneyleri gerekmektedir. Bu nedenle yamaç molozunun kayma direnci parametrelerini belirlemek günümüzde pek mümkün değildir. Kaba taneli malzemeler sık, ince taneli malzemeler daha büyük kayma yüzeyleri vermesi nedeni ile bu çalışmada yamaç molozunda açılan 3 metre derinliğinde 4 farklı araştırma çukurlarında siltli killi seviyelerinden alınan örnekleri üzerinde konsolidasyonsuz-drenajsız direkt kesme deneyi uygulanarak kayma direnci parametreleri belirlenmiştir.

Heyelan malzemesinin yanal ve düşey devamlılığını belirlemek, jeoteknik özelliklerini ortaya çıkarmak amacıyla sismik kırılma yöntemi ve yüzey dalgalarının çok kanallı analiz yöntemi kullanılmıştır. İnceleme alanında belirlenen 2 hat üzerinde P dalgaları için karşılıklı atış, aynı hat üzerinde ara atışlar ve MASW kaydı olacak şekilde kanal sayısı 24, ofset mesafesi 12 metre, jeofon aralıkları 3 metre ve toplam hat uzunluğu 93 metre olmak üzere “Sismik Kırılma Tomografisi (Multichannel Analysis of Surface Wave, MASW)” çalışması yapılmıştır. Çalışmada,  $P_{düz}$ ,  $P_{ters}$  ölçüleri alınarak ilk varış okumaları yapılmış, ilk varış okumalarına bağlı olarak zaman-uzaklık (x-t) grafiği oluşturulmuş, aynı profil üzerinde yapılan MASW ölçüsü dispersiyon eğrisi oluşturulmuş, buna bağlı olarak da  $V_s$  hızı

hesaplanmıştır. Elde edilen veriler kullanılarak heyelan malzemesinin yoğunluğu, Poisson oranı ve elastik modül değerleri hesaplanmıştır.

Çok elektrotlu elektrik tomografi ölçümleri yer altı su seviyesinin, su akış rejiminin ve temel kayaç topoğrafyasındaki değişimin belirlenmesi, ayrıca, sismik yöntemlerle karşılaştırma yapma açısından temel kaya derinliği ve topoğrafyası, yanal ve düşey yöndeki litolojik değişim, fay ve çatlak sistemleri gibi kırıklı yapıların tespit edilmesi amacıyla kullanılmakta olup, bu çalışmada Wenner dizilim türü uygulanmış, elektrot aralığı 10 metre olarak belirlenmiş, 20 elektrot kullanılmış ve toplam hat uzunluğu 200 metre olarak elde edilmiştir. Arazi çalışması esnasında her bir elektrot için kot değerleri GPS yardımı ile hassas olarak okunmuş, veri işlem aşamasında data ZondRes2D programı kullanılarak değerlendirilmiş, topoğrafik etkiler kesitlere eklenmiştir. Kesitler elde edilen öz direnç (ohm.m) değerlerine göre ayırılmış, tabaka sınırları belirlenmiş, litoloji ile ilişkilendirilmiş ve yaklaşık olarak 40-50 metre derinlik incelenmiştir.

İtki dalgalarının oluşmasında en önemli parametrelerden biri heyelan malzemesinin hacmidir. Ancak heyelan olmadan bu hacmi belirlemek pek mümkün değildir. Rezervuara kayacak malzeme hacmi, nümerik stabilite analizlerinden elde edilen uzunluk ve kalınlık verilerinden yola çıkılarak 4 farklı genişlik için hacim (0.25, 0.50, 0.75 ve 1 milyon metreküp) senaryoları oluşturularak modellenmiştir.

Kirazlık paleo-heyelanının stabilite analizleri FEM tabanlı iki boyutlu RS2 v9.0 (Rocscience Inc. 2016a) yazılımları kullanılarak nümerik analiz teknikleri ile yapılmış ve olası kayma yüzeyi belirlenmiştir. Laboratuvar ve arazi deneylerinden elde edilen, malzemenin kohezyonu (20 kPa), içsel sürtünme açısı ( $25^\circ$ ), birim hacim ağırlığı ( $20 \text{ kN/m}^3$ ), Poisson oranı (0.35), Elastisite modülü (1737 MPa) değerleri bu analizlerde girdi parametresi olarak kullanılmıştır. Depremleri için nümerik tabanlı stabilite analizleri (FEM-SSR) kullanılmış, SRF değeri 0.99 olarak tespit edilmiştir. SRF:0.99 değeri bu koşul için heyelan malzemesinde kritik dengenin söz konusu olduğunu göstermektedir.

Deprem, rezervuarda su seviyesindeki değişimler, aşırı yağışlar heyelanı tetikleyen faktörler arasında yer almaktadır. Bugüne kadar yapılan çalışmalar göz önüne alındığında en etkin faktörün deprem olduğu bilinmektedir.

Bu çalışma kapsamında, deprem koşulunda en fazla hacimde malzemenin kayacağı veya en düşük güvenlik katsayısının oluşacağı düşünülerek, hacmi tahmin etmeye yönelik kayma yüzeyinin durumunun belirlenmesi amaçlanmıştır. Aksi takdirde tüm koşullar tek tek

denenerek güvenlik katsayısının elde edilmesi daha çok heyelanın önlenmesine yönelik yapılan çalışmalar kapsamındadır.

Heyelan kaynaklı itki dalgalarının özelliklerinin belirlenmesinde temel girdi parametreleri olan yayılma mesafesi (karşı kıyı 571 m, baraj 731 m), yayılma açısı (karşı kıyı  $0^\circ$ , baraj  $80^\circ$ ), serbest su derinliği (karşı kıyı 95 m, baraj 117 m), karşı kıyı ve barajın gövde eğimi ( $25^\circ$ ,  $90^\circ$ ) belirlenmiştir. Rezervuara kayacak malzeme hızı  $V_s=12$  m/s olarak hesaplanmıştır.

İtki dalgalarının özelliklerinin (oluşum, yayılım ve ilerlemesi) belirlenmesi için Heller (2009) tarafından geliştirilen hesaplama programı kullanılmıştır. Bu programa göre karşı kıyı için dalgaların doğrusal yayıldığı kabul edilmiş ve Zweifel (2004) ve Fritz (2002) tarafından üretilen ve Heller (2007) tarafından 2D prototip deneyler kullanılarak geliştirilen, baraj için itki dalgalarının radyal yayılacağı kabul edilmiş ve Huber ve Hager (1997) tarafından üretilen ve Heller (2007) tarafından 3D prototip deneyler kullanılarak geliştirilen ampirik eşitlikler kullanılmıştır. Bu program ile her bir senaryo için itki üretim parametresi (P), maksimum dalga genliğinin çarpma bölgesine olan uzaklığı ( $x_M$ ), dalga yüksekliği (H), dalga genliği ( $a_w$ ), dalga periyodu (T), dalga hızı ( $c_w$ ), dalga uzunluğu (L) ve dalganın ilerleme miktarı (Run-up yüksekliği, R) değerleri baraj ve karşı kıyı için ayrı ayrı elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan ampirik formüllerin her bir senaryo için kullanım sınırlamaları değerlendirilmiştir.

Tüm bu verilerden yola çıkarak her bir senaryo için dalgaların, en kötü koşulda dahi 3.1 m yükseleceğinden, dalga payı 5 m olan baraj gövdesini aşmayacağı, senaryo 1 için yüksekliği 7 m, hızı 31.4 m/s ve ilerleme mesafesi 12.2 m, senaryo 2 için yüksekliği 8.6 m, hızı 31.6 m/s, ilerleme mesafesi 15.3 m, senaryo 3 için yüksekliği 9.7 m, hızı 31.8 m/s, ilerleme mesafesi 17.7 m, senaryo 4 için yüksekliği 10.7 m, hızı 31.9 m/s, ilerleme mesafesi 19.7 m olan dalgaların 571 m mesafede olan karşı kıyıda hasara yol açabileceği sonucuna varılmıştır.

Heyelan kaynaklı itki dalgalarının yayılımının değerlendirilmesinde güvenilir ve hızlı sonuca ulaşmak için ilk etapta sınırlı jeoteknik çalışmalar gerçekleştirilir. Bu çalışmalardan elde edilen veriler kullanılarak en kötü koşul (rezervuara kayacak maksimum malzeme hacmi) değerlendirilir. Bu değerlendirme sonucunda baraj için herhangi bir risk öngörülüyorsa çalışmaları devam ettirmeye gerek duyulmaz. Baraj veya herhangi bir yapı için bir problem olacağının düşünülmesi durumunda çok detaylı jeoteknik çalışmalara başlanır.

Bir heyelanın hareket mekanizmasını ortaya koymak için gerekirse karelej yolu ile sondaj yapmak, gerekli boşluklara sismik ve özdirenç çalışmaları yaparak heyelanın üç boyutlu modelini ortaya çıkartmak gerekmektedir.

Ancak itki dalgalarına yönelik çalışmalarda zaman ve maliyet göz önünde bulundurularak jeoteknik çalışmalar sınırlı bir şekilde tamamlanır, gerekirse en kötü koşul değerlendirilir, bu en kötü koşulda bir problem olmayacağı sonucunun elde edilmesi durumunda çalışmalar tamamlanır, en kötü koşulda bir problem oluşacağı sonucunun düşünülmesi durumunda detaylı jeoteknik çalışmalar gerçekleştirilir.

Bu çalışmada da sınırlı jeoteknik çalışmalar ile itki dalgalarının yayılımı değerlendirilmiş, en kötü koşulda (senaryo 4) dahi baraj için bir problem olmayacağı değerlendirildiğinden heyelan kütleinde detaylı bir jeoteknik çalışmaya gerek duyulmamıştır.

Torul Barajı rezervuarının bulunduğu bölgeyi kapsayan alana ait koordinatlı katı model oluşturularak baraj gövdesi, heyelan malzemesi (üç boyutlu olarak) ve rezervuar suyu (maksimum su seviyesi) bu katı model üzerine yerleştirilmiştir. Simülasyona dayalı 2 boyutlu nümerik model, FLOW-3D yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Heyelan malzemesini simule etmek için “Drift-Flux Model” modülü, dalga oluşumunu simule etmek için “Volume Of Fluid (VOF) Model” modülü ile birlikte Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes denklemlerini temel alan serbest yüzey modelleme tekniği kullanılmıştır. İtke dalgası modelini oluşturmak için Drift-flux modeli ve Renormalize Grup (RNG) bazlı k- $\epsilon$  türbülans modeli uygulanmıştır. Heyelanın baraj gölüne darbe anından itibaren baraj gövdesine olan etkisini modellemek amacı ile oluşturulan bu sayısal modelde en kötü senaryo şartları (1 milyon metreküp hacim) baz alınmış ve heyelanın rezervuara darbesi ile oluşan itki dalgalarının 76. saniyede baraj gövdesine vurması sonucu oluşan su sütununun yüksekliğinin 3 m olacağı hesaplanmıştır. Bu en kötü koşulda dahi 5 m.lik dalga payının güvenli olduğu görülmüştür. Baraj gövdesi için ampirik eşitlikler ile dalganın en kötü koşulda 3.1 m, nümerik model ile yine en kötü koşulda 3 m yükseleceği hesaplanmış ve her iki model ile elde edilen sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Bu sonuç, jeoteknik model doğru kurgulandığında doğru sonuçlar elde edileceğini de kanıtlar niteliktedir.



## 5. KAYNAKLAR

- Ağar, Ü., 1977. Demirözü (Bayburt) ve Köse (Kelkit) Bölgesinin Jeolojisi, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Fakültesi, İstanbul, 59s.
- Akgün, A., 2011. Assessment of Possible Damaged Areas Due to Landslide-Induced Waves at A Constructed Reservoir Using Empirical Approaches: Kurtun (North Turkey) Dam Reservoir Area, Natural Hazards and Earth System Sciences, 11,5, 1341-1350.
- Akgün, A., Karahan, M., Ersoy, H. ve Taflan, A., 2017. Süttaşlı Heyelanının (Giresun/Doğankent) Aslancık Barajına ve Doğankent İlçesine Etkilerinin Araştırılması, Ulusal Mühendislik Jeolojisi-Jeoteknik Sempozyumu (MÜHJEO2017), Ekim, Adana, Bildiriler Kitabı: 300-307.
- Akın, H., 1979. Geologie, Magmatismus und Lagerstättenbildung im ostpontischen Gebirge/Türkei aus der Sicht der Plattentektonik, Geologische Rundschau, 68,1, 253-283.
- Alemdağ, S., Akgün, A., Kaya, A. ve Gökçeoğlu, C., 2014. A Large and Rapid Planar Failure: Causes, Mechanism and Consequences (Mordut, Gumushane, Turkey), Arabian Journal of Geosciences, 7,3, 1205-1221.
- Alemdağ, S., Gürocak, Z. ve Özkirişçi Oktay, C., 2015a. Bağlarbaşı-Tekke (Gümüşhane) Karayolundaki Kaya Şevlerinin Kinematik ve Limit Denge Yöntemleri ile Değerlendirilmesi, Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 1,1-2, 1-10.
- Alemdağ, S., Kaya, A., Karadağ, M., Gürocak, Z. ve Bulut, F., 2015b. Utilization of The Limit Equilibrium and Finite Element Methods for The Stability Analysis of The Slope Debris: An Example of The Kalebasi District (NE Turkey), Journal of African Earth Sciences, 106, 134-146.
- Alkan, F. ve Dağ, S., 2018. Gümüşhane Yöresinde Yüzeyleyen Magmatik Kökenli Bazı Kayaların Jeomekanik Özellikleri Arasındaki İlişkilerin Araştırılması, Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 23,2, 203-216.
- Alpar, B., Altınok, Y., Gazioğlu, C. ve Yücel, Z., Y., 2003. Tsunami Hazard Assessment in İstanbul, Turkish J. Marine Sciences, 9,1, 3-29.
- Altınok, Y. ve Ersoy, Ş., 2000. Tsunamis Observed on and Near Turkish Coast, Natural Hazards, 21,2-3, 185-205.
- Altınok, Y., Alpar, B., Ersoy, Ş. ve Yalçiner, A., C., 1999. Tsunami Generation of The Kocaeli Earthquake (August 17th 1999) in The İzmit Bay: Coastal Observations, Bathymetry and Seismic Data, Turkish J. Marine Sciences, 5,3, 131-148.
- Anderson, S., A. ve Riemer, M., F., 1995. Collapse of Saturated Soil Due to Reduction in Confinement, Journal of Geotechnical Engineering, 121,2, 216-220.

- Arita, K. ve Nishiie, M., 1985. The Republic of Turkey Report on The Cooperative Mineral Exploration of Gümüşhane Area, Phase 1, MTA Maden Analizleri ve Teknoloji Dairesi Başkanlığı, Rapor No: 7800, Ankara.
- Arslan, M. ve Aslan, Z., 2006. Mineralogy, Petrography and Whole-Rock Geochemistry of The Tertiary Granitic Intrusions in The Eastern Pontides, Turkey, Journal of Asian Earth Sciences, 27,2, 177-193.
- Aslan, Z., Arslan, M ve Şen, C., 1999. Doğu Pontidlerin kuzey ve güney zonlarında yüzeylenen Eosen yaşlı granitik sokulumların karşılaştırılmalı jeolojik, petrografik ve jeokimyasal özellikleri, 52. Türkiye Jeoloji Kurultayı, Ankara, Bildiriler Kitabı: 223-230.
- Aslaner, M., Gedikoğlu, A. ve Tülümen, E., 1982. Harşit Polimetallik Mineralizasyonlarının Ayrıntılı Araştırılması, TÜBİTAK Matematik, Fiziki ve Biyolojik Bilimler Araştırma Grubu, Proje No: TBAG 390, Ankara.
- ASTM D3080/D3080M-11, 2011. Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions.
- Ataie-Ashtiani, B. ve Malek-Mohammadi, S., 2007. Near field amplitude of subaerial landslide generated waves in dam reservoirs, Dam Engineering, XVII,4, 197-222.
- Ataie-Ashtiani, B. ve Yavari-Ramshe, S., 2011. Numerical simulation of wave generated by landslide incidents in dam reservoirs, Landslides, 8,4, 417-432.
- Bahar, O., 2005. Türkiye’de Enerji Sektörü Üzerine Bir Değerlendirme, Muğla Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 14, 35-59.
- Banach, M., 1985. Geodynamika zbrocza doliny Wisły w Dobrzyniu, Polish Geographical Review, 57,4, 527-551.
- Bazykina, A., Yu., Mikhailichenko, S., Yu. ve Fomin, V., V., 2018. Numerical Simulation of Tsunami in the Black Sea Caused by the Earthquake on September 12, 1927, Physical Oceanography, 25,4, 295-304.
- Bektaş, O., 1985. Paleostress Trajectories and Polyphase Rifting in Arc-Backarc of Easternpontides, Bulletin of the Mineral Research and Exploration, 103-104, 1-15.
- Bektaş, O., Van, A. ve Boynukalın, S., 1987. Doğu Pontidler’de (Kuzeydoğu Türkiye) Jura volkanizması ve jeotektoniği, Türkiye Jeoloji Bülteni, 30,2, 9-18.
- Bektaş, O., Yılmaz, C., Tash, K., Akdağ, K. ve Özgür, S., 1995. Cretaceous Rifting of the Eastern Pontide Carbonate Platform (NE Turkey); The Formation of Carbonate Breccias and Turbidites as Evidence of a Drowned Platform, Giornale di Geologia, 57,1-2, 233-244.
- Boynukalın, S., 1990. Dereli (Giresun) Baraj Yeri ve Göl Alanının Mühendislik Jeolojisi ve Çevre Kayaçlarının Jeomekanik Özellikleri, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 255s.

- Boztuğ, D., Wagner, G., A., Erçin, A., İ., Göç, D., Yeğingil, Z., İskenderoğlu, A., Kuruçelik, M., K., Kömür, İ. ve Güngör, Y., 2002. Sphene and Zircon Fission-track Geochronology Unravelling Subduction- and Collision-Related Magma Surges in The Composite Kaçkar Batholith, Eastern Black Sea region, Turkey. First International Symposium of the Faculty of Mines (ITU) on Earth Sciences and Engineering, May, İstanbul, Abstracts: 121-121.
- Bregoli, F., Bateman, A. ve Medina, V., 2017. Tsunamis Generated by Fast Granular Landslides: 3D Experiments and Empirical Predictors, Journal of Hydraulic Research, 55,6, 743-758.
- Bulut, F., 1989. Çambaşı (Trabzon-Çaykara) Barajı ve Uzungöl Hidroelektrik Santral Yerlerinin Mühendislik Jeolojisi Açısından İncelenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 183s.
- Bulut, F., Boynukalın, S., Tarhan, F. ve Ataoğlu, E., 1995. Fındıklı İlçesi (Rize) Doğu Yöresindeki Heyelanların Nedenleri, II. Ulusal Heyelan Sempozyumu, Ekim, Adapazarı, Bildiriler Kitabı: 143-152.
- Ceryan, S., Tudes, S. ve Ceryan, N., 2008. A new quantitative weathering classification for igneous rocks, Environmental Geology, 55,6, 1319-1336.
- Chow, V., T., 1960. Open channel hydraulics, McGraw-Hill, New York.
- Coduto, D., P., 2006. Geoteknik Mühendisliği İlkeler ve Uygulamalar, Çeviri: Mollamahmudoğlu, M. ve Kayabalı, K., Gazi Kitabevi, Ankara, 759s.
- Cronin, V., S., 1992. Compound landslides: Nature and Hazard Potential of Secondary Landslides Within Host Landslides, In: Slosson, J. E., Keene, A. G. and Johnson, J. A. (Eds), Landslides/Landslide Mitigation, Geological Society of America Reviews in Engineering Geology, 9, 1-9.
- Cruden, D., M. ve Varnes, D., J., 1996. Landslide Types and Processes, In: Turner, A. K. and Schuster, R. L. (Eds.), Landslides Investigation and Mitigation. Transportation Research Board Special Report, Issue Number 247, 36-75.
- Cruden, D., M., 1991. A simple definition of a Landslide, Bulletin of The International Association of Engineering Geology, 43, 27-29.
- Çoğulu, E., 1975. Gümüşhane ve Rize Granitik Plütonlarının Mukayeseli Petrojeolojik ve Jeokronometrik Etüdü, Doçentlik Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, İstanbul, 112s.
- Dağ, S., Bulut, F., Alemdağ, S. ve Kaya, A., 2011. Heyelan Duyarlılık Haritalarının Üretilmesinde Kullanılan Yöntem ve Parametrelere İlişkin Genel Bir Değerlendirme, Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 1,2, 151-176.
- Dai, F., C., Lee, C., F. ve Ngai, Y., Y., 2002. Landslide risk assessment and management: an overview, Engineering Geology, 64,1, 65-87.

- Dean, R., G. ve Dalrymple, R., A., 1991. Water wave mechanics for engineers and scientists, Advanced Series on Ocean Engineering: 2, 368s.
- Di Risio M. ve Sammarco P., 2008. Analytical Modeling of Landslide-Generated Waves, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 134,1, 53-60.
- Di Risio, M., 2005. Landslide generated impulse waves: generation, propagation and interaction with plane slopes, PhD Thesis, Third University of Rome, Rome.
- Didenkulova, I., Nikolkina, I., Pelinovsky, E. ve Zahibo, N., 2010. Tsunami Waves generated by Submarine Landslides of Variable Volume: Analytical solutions for A Basin of Variable Depth, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 10,11, 2407-2419.
- Dikau, R., Brunsden, D., Schrott, L. ve Ibsen, M., L., 1996. Landslide Recognition: Identification, Movement and Causes, John Wiley&Sons, 274s.
- Duman, T., Y., Çan, T., Emre, Ö., Keçer, M., Doğan, A., Ateş, Ş. ve Durmaz, S., 2005. Landslide inventory of northwest Anatolia, Turkey, Engineering Geology, 77,1-2 99-114.
- Duncan, J., M., Wright, S., G., and Brandon, T., L., 2014. Soil Strength and Slope Stability, 2nd Edition, John Wiley & Sons Inc., New Jersey, 317s.
- Ersoy, H., Gelişli, K., Bayraktar, A., Öztürk, H., H., Seçkin, A., C., Karaibrahimoğlu, G., Sağır, G., Özen, M., Tezel, B., Yüregir, B. ve Kul Yahşi, B., 2015. Havuzlu Paleo-Heyelanının (Yusufuli, Artvin) Mühendislik Jeolojisi Açısından İncelenmesi, Ulusal Mühendislik Jeolojisi Sempozyumu (MÜHJEO2015), Eylül, Trabzon, Bildiriler Kitabı: 90-97.
- Ersoy, H., Karahan, M. ve Öztürk, H., H., 2020. Baraj Rezervuarlarında Heyelanlardan Kaynaklanacak İtke Dalga Özelliklerinin Ampirik İlişkilerle Değerlendirilmesi: Borçka Barajı Örneği, Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 6,2, 248-257.
- Ersoy, H., Karahan, M., Akgün, A. ve Tezel, K., 2017. Artvin Baraj Gölü Heyelanının Oluşturacağı Olası Dalga Etkisinin Ampirik Yaklaşımlarla İrdelenmesi, Ulusal Mühendislik Jeolojisi-Jeoteknik Sempozyumu (MÜHJEO2017), Adana, Bildiriler Kitabı: 82-87.
- Ersoy, H., Karahan, M., Gelişli, K., Akgün, A., Anılan, T., Sünnetci, M., O. ve Kul Yahşi, B., 2019. Modelling of The Landslide-induced Impulse Waves in The Artvin Dam Reservoir by Empirical Approach and 3D Numerical Simulation, Engineering Geology, 249, 112-128.
- Ersoy, H., Karahan, M., Sünnetci, M., O., Akgün, A., Anılan, T., Fırat Ersoy, A., Tezel, K., Kul Yahşi, B. ve Öztürk, H., H., 2018. Assessment of Landslide Generated Impulse Waves In Dam Reservoirs, 5th International Symposium on Dam Safety, October, İstanbul, Proceedings 1: 409-421.
- Ertunç, A., 2003. Mühendislik Jeolojisi, SDÜ Yayınları, Isparta, 179s.

- Eyüboğlu, Y., Dudas, F., O., Thorkelson, D., Zhu, D-C., Liu, Z., Chatterjee, N., Yi, K. ve Santosh, M., 2017. Eocene Granitoids of Northern Turkey: Polybaric Magmatism in An Evolving Arc-slab Window System, Gondwana Research, 50, 311-345.
- Eyüboğlu, Y., Santosh, M., Yi, K., Tuysuz, N., Korkmaz, S., Akaryalı, E., Dudas, F., O. ve Bektas, O., 2014. The Eastern Black Sea-type Volcanogenic Massive Sulfide Deposits: Geochemistry, Zircon U-Pb Geochronology and An Overview of The Geodynamics of Ore Genesis, Ore Geology Reviews, 59, 29-54.
- Fritz, H., M., 2002. Initial phase of landslide generated impulse waves, Minor, H-E. (Eds.), Mitteilungen 178, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Zürich.
- Fritz, H., M., Hager, W., H. ve Minor, H., E., 2004. Near Field Characteristics of Landslide Generated Impulse Waves, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 130,6. 287-302.
- Fritz, H., M., Mohammed, F. ve Yoo, J., 2009. Lituya Bay Landslide Impact Generated Mega-Tsunami 50th Anniversary, Pure and Applied Geophysics, 166,1-2, 153-175.
- Gabl, R., Seibl, J., Gems, B. ve Aufleger, M., 2015. 3-D Numerical Approach to Simulate the Overtopping Volume Caused by An Impulse Wave Comparable to Avalanche Impact in A Reservoir, Natural Hazards and Earth System Sciences, 15,12, 2617-2630.
- Gazioğlu, C., 2017. Assessment of Tsunami-related Geohazard Assessment for Coasts of Hersek Peninsula and Gulf of İzmit, International Journal of Environment and Geoinformatics, 4,2, 63-78.
- Gazioğlu, C., Yücel, Z., Y. ve Doğan, E., 2005. Morphological Features of Major Submarine Landslides of Marmara Sea Using Multibeam Data, Journal of Coastal Research, 21, 4, 664-673.
- Gedik, A., Ercan, T., Korkmaz, S. ve Karataş, S., 1992. Rize-Fındıklı Çamlıhemşin Arasında (Doğu Karadeniz) Yer Alan Magmatik Kayaçların Petrolojisi ve Doğu Pontidlerdeki Bölgesel Yayılımları, Türkiye Jeoloji Bülteni, 35,1, 15-38.
- Gedikoğlu, A., 1978. Harşit Granit Karmaşığı ve Çevre Kayaçları, Doçentlik Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Yer Bilimleri Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Trabzon, 161s.
- Gedikoğlu, A., Pelin, S. ve Özsayar, T., 1979. The Main Lines of Geotectonic Development of The East Pontids in The Mesozoic Era, First Geological Congress of the Middle East (GEOCOME-I), September, Ankara, Proceedings: 555-580.
- Generated by Landslides Impinging Perpendicular to a Reservoir's Longitudinal Axis, Journal of Marine Science and Engineering, 7,7, 221, 1-19.
- Giraud, A., Rochet, L. ve Antoine, P., 1990. Processes of slope Failure in Crystallophyllian Formations, Engineering Geology, 29,3, 241-253.

- Glade, T., 1998. Establishing the Frequency and Magnitude of Landslide-triggering Rainstorm Events in New Zealand, Environmental Geology, 35,2-3, 160-174.
- Gökçeoğlu, C., Sönmez, H., Nefeslioğlu, H., A., Duman, T., Y. ve Can, T., 2005. The 17 March 2005 Kuzulu Landslide (Sivas, Turkey) and Landslide-susceptibility Map of Its Near Vicinity, Engineering Geology, 81,1 65-83.
- Grilli, S., T., Vogelmann, S. ve Watts, P., 2002. Development of A 3D Numerical Wave Tank for Modeling Tsunami Generation by Underwater Landslides, Engineering Analysis with Boundary Elements, 26,4, 301-313.
- Guzzetti, F., Cardinali, M. ve Reichenbach, P., 1994. The AVI Project: A Bibliographical and Archive Inventory of Landslides and Floods in Italy, Environmental Management, 18,4, 623-633.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M. ve Reichenbach., P., 1999. Landslide Hazard Evaluation: A Review of Current Techniques and Their Application in A Multi-scale Study, Central Italy, Geomorphology, 31, 181-216.
- Gülibrahimoğlu, İ., 1985. Trabzon-Maça Güneyi Maden Jeolojisi Raporu. MTA Genel Müdürlüğü, Rapor No: 7895, Ankara.
- Güngör, Y., Boztuğ, D. ve Yılmaz, O., 1997. Kaçkar Batoliti Altıparmak Dağı-Soğanlı Dağı Arası (GD Çamlıhemşin-Rize) Kesiminin Petrografik, Jeokimyasal ve Petrojenetik İncelenmesi, Çukurova Üniversitesinde Jeoloji Mühendisliği Eğitiminin 20. Yılı Sempozyumu, Nisan - Mayıs, Adana, Bildiriler Kitabı: 223-224.
- Güngör, Y., Boztuğ, D. ve Yılmaz, O., 1998. Kaçkar Batoliti Altıparmak Dağı-Soğanlı Dağı Arası (GD Çamlıhemşin-Rize) Kesiminin Petrografik, Jeokimyasal ve Petrojenetik İncelenmesi, Geosound Yerbilimleri, 30 b, 637-665.
- Güven, İ., H., 1993. Doğu Pontidlerin Jeolojisi ve 1/250000 Ölçekli Kompilasyonu. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Güven, İ., H., 1998. 1/100000 Ölçekli Açınsama Nitelikli Türkiye Jeoloji Haritaları, MTA Genel Müdürlüğü, No: 59, Ankara.
- Hayashi, K., 2003. Data Acquisition and Analysis of Active and Passive Surface Wave Methods. Sageep 20 Short Course.
- Heller, V. ve Hager, W., H., 2010. Impulse Product Parameter in Landslide Generated Impulse Waves, Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering, 136,3, 145-155.
- Heller, V., 2007. Landslide Generated Impulse Waves: Prediction of Near Field Characteristics, PhD Thesis, Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zurich.
- Heller, V., 2009. Landslide Generated Impulse Waves-Experimental Results, 31st Coastal Engineering Conference, Hamburg, Proceedings 2: 1313-1325.

- Heller, V., Hager, W., H. ve Minor, H-E., 2008. Scale Effects in Subaerial Landslide Generated Impulse Waves, Experiments in Fluids, 44,5, 691-703.
- Heller, V., Hager, W., H. ve Minor, H-E., 2009. Landslide Generated Impulse Waves in Reservoirs - Basics and computation, Boes, R. (Eds.), Mitteilungen 211, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), Zürich.
- Huber, A. ve Hager, W., H., 1997. Forecasting Impulse Waves in Reservoirs. In: Dix-neuvieme Congres des Grands Barrages, Florence, Commission Internationale des Grands Barrages, 993-1005.
- Hughes, S., A., 1993. Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering, Advanced Series on Ocean Engineering: 7, 588s.
- Hutchinson, J., N. ve Gostelow, T., P., 1976. The Development of An Abandoned Cliff in London Clay at Hadleigh, Essex, Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 283,1315, 557-604.
- Hutchinson, J., N., 1967. The Free Degradation of London Claycliffs, Geotechnical Conference on Shear Strength of Natural Soils and Rocks, Norwegian Geotechnical Institue, Oslo, Proceedings: 113-118.
- Hutchinson, J., N., 1988. General Report: Morphological and Geotechnical Parameters of Landslides in Relation to Geology and Hydrogeology, In: Bonnard, C. (Eds.), Proceedings of the Fifth International Symposium on Landslides, pp. 3-35, 10-15 July, Lausanne, Switzerland.
- IAEG (Commission on Landslides), 1990. Suggested Nomenclature for Landslides, Bulletin of The International Association of Engineering Geology, 41, 13-16.
- Ibsen, M. ve Brunsden, D., 1996. The Nature, Use and Problems of Historical Archives for The Temporal Occurence of Landslides, With Specific Reference to The South Coast of Britain, Ventnor, Isle of Wight, Geomorphology, 15,3-4, 241-258.
- Kaczmarek, H., Tyszkowski, S. ve Banach, M., 2015. Landslide Development at The Shores of A Dam Reservoir (Włocławek, Poland), Based on 40 Years of Research, Environmental Earth Sciences, 74,5, 4247-4259.
- Karahan, M., Ersoy, H. ve Akgün, A., 2020b. A 3D Numerical Simulation-based Methodology for Assessment of Landslide-generated Impulse Waves: A Case Study of The Tersun Dam Reservoir (NE Turkey), Landslides, 17, 2777-2794.
- Karahan, M., Ersoy, H. ve Anılan, T., 2020a. İtke Dalgalarının Oluşumunda Ölçek Etkisi, Hareket Süresi ve Çarpma Hızının Model Deneyler ve 3 Boyutlu Nümerik Simülasyonlarla Değerlendirilmesi, Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 10,2, 514-525.
- Karahan, M., Ersoy, H., Akgün, A., Sünnetci, M., O., Taflan, A. ve Peker, S., 2017. Tersun (Gümüşhane/Şiran) Barajı Göl Alanındaki Paleo-Heyalandan Kaynaklanacak Dalga Etkisinin Ampirik Eşitlikler Kullanılarak Araştırılması, Ulusal Mühendislik Jeolojisi-Jeoteknik Sempozyumu (MÜHJEO2017), Ekim, Adana, Bildiriler Kitabı: 74-81.

- Kaya, A., Alemdag, S., Dag, S. ve Gürocak, Z., 2016. Stability Assessment of High-Steep Cut Slope Debris on a Landslide (Gumushane, NE Turkey), Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 75,1, 89-99.
- Kaygusuz, A., 2000. Torul ve Çevresinde Yüzeyleyen Kayaçların Petrografik ve Jeokimyasal İncelenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 253s.
- Keaton, J., R. ve Degraff, J., V., 1996. Surface Observation and Geologic Mapping, In: Turner, A. K. and Schuster, R. L. (Eds), Landslides Investigation and Mitigation. Transportation Research Board Special Report, Issue Number 247, 178-230.
- Keller, E., A., 2006. Çevre Jeolojisine Giriş, Çeviri: Akyol, E. ve Kayabalı, K., Gazi Kitabevi, Ankara, 547s.
- Keskin, M., Ö., 2008. Çukurova Yöresi Kuvarsit İşletmelerinde Bilgisayar Destekli Şev Dizaynı ve Şev Stabilitate Analizleri, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana, 288s.
- Ketin, İ. ve Canitez, N., 1972. Yapısal Jeoloji, İTÜ Matbaası, No: 869, İstanbul, 520s.
- Ketin, İ., 1966. Anadolu'nun Tektonik Birlikleri, MTA Dergisi, 66, 20-34.
- Kilburn, C., R., J. ve Petler, D., N., 2003. Forecasting giant, catastrophic slope collapse: lessons from Vajont, Northern Italy, Geomorphology, 54, 1-2, 21-32.
- Kocaman, S. ve Ozmen-Cagatay, H., 2015. Investigation of Dam-break Induced Shock Waves Impact on A Vertical Wall, Journal of Hydrology, 525, 1-12.
- Koç, E. ve Şenel, M., C., 2013. Dünyada ve Türkiye'de Enerji Durumu - Genel Değerlendirme, Mühendis ve Makina Dergisi, 54,639, 32-44.
- Korkmaz, S. ve Gedik, A., 1988. Rize-Fındıklı-Çamlıhemşin Arasında Kalan Bölgenin Jeolojisi ve Petrol Oluşumları, Jeoloji Mühendisliği, 32-33, 5-15.
- Köprübaşı, N., 1992. Aşağı Harşit Bölgesinin Mağmatik Petrojenezi ve Masif Sülfidlerde Jeokimyasal Hedef Saptama Uygulamaları, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 129s.
- Köprübaşı, N., 1993. Tirebolu-Harşit (Giresun) Arası Jura-Kretase Yaşlı Magmatik Kayaçların Petrolojisi ve Jeokimyası, Türkiye Jeoloji Bülteni, 36,2, 139-150.
- Köprübaşı, N., Şen, C. ve Kaygusuz, A., 2000. Doğu Pontid Adayayı Granitoidlerin Karşılaştırılmalı Petrografik ve Kimyasal Özellikleri, Uygulamalı Yerbilimleri, 1, 111-120.
- Körner, H., J., 1976. Reichweite und Geschwindigkeit von Bergstürzen und Fliessschneelawinen, Rock Mechanics and Rock Engineering, 8, 225-256.



- Krahn, J. ve Morgenstern, N., R., 1979. The ultimate frictional resistance of rock discontinuities, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 16,2, 127-133.
- Levkevic, V., E. ve Lopuh, P., S., 2003. Conceptual and Theoretical Assumptions of The Development of Contemporary Coastal Processes on Reservoirs of Belarus, In: Theoretical and Applied Problems of Contemporary Limnology. Proc of Int Conference, October, Minsk, 111-121.
- Macfarlane, D., F. ve Jenks, D., G., 1996. Stabilisation and Performance of No. 5 Creek Slide, Clyde Power Project, New Zealand, In: Sennest, K. (Eds.), Proceedings of the 7th International Symposium on Landslides, 3, 1739-1746.
- McMechan, G., A. ve Yedlin, M., J., 1981. Analysis of Dispersive by Wave Field Transformation, Geophysics, 46,6, 869-874.
- MGM (Meteoroloji Genel Müdürlüğü). Gümüşhane İline Ait Sıcaklık-Yağış Verileri. <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m=GUMUSHANE> 11 Ocak 2021
- Miller, D., J., 1960. Giant waves in Lituya Bay, Alaska, Geological Survey Professional Paper 354-C, United States Government Printing Office, Washington, 51-86.
- Mohammed, F. ve Fritz, H., M., 2012. Physical Modeling of Tsunamis Generated by Three-dimensional Deformable Granular Landslides, Journal of Geophysical Research, 117,C11015, 1-20.
- Montagna, F., Bellotti, G. ve Risio, M., D., 2011. 3D Numerical Modeling of Landslide-Generated Tsunamis Around a Conical Island, Natural Hazards, 58,1, 591-608.
- Müller, D. ve Schurter, M., 1993. Impulse waves generated by an artificially induced rockfall in a Swiss lake, 25th Congress of International Association for Hydraulic Research, Proceedings: 209-216.
- Müller, D., R., 1995. Auflaufen und Überschwappen von Impulswellen an Talsperren, In: Vischer, D. (Eds.), VAWMitteilung 137, ETH Zurich.
- Noda, E., 1970. Water Waves Generated by Landslides, Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division, 96,4, 835-855.
- Ocakoğlu, F., Açıklın, S., Gökçeoğlu, C., Karabacak, V. ve Cherkinsky, A., 2009. A Multistory Gigantic Subaerial Debris Flow in An Active Fault Scarp in NW Anatolia, Turkey: Anatomy, Mechanism and Timing, Holocene, 19,6, 955-965.
- Ocakoğlu, F., Gökçeoğlu, C. ve Ercanoğlu, M., 2002. Dynamics of A Complex Mass Movement Triggered by Heavy Rainfall: A Case Study From NW Turkey, Geomorphology, 42,3-4 329-341.
- Özdoğan, K., 1992. Karadağ (Torul-Gümüşhane) ve Yakın Çevresinin Jeolojisi-Mineralojisi-Petrografisi ve Maden Zuhurlarının Jenetik İncelenmesi, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

- Özdoğan, Ş., 2010. Torul Barajı (Torul-Gümüşhane) Göl Alanı Sağ ve Sol Sahillerinin Duraylılığının Mühendislik Jeolojisi Açısından İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 100s.
- Özsayar, T., Pelin, S. ve Gedikoğlu, A., 1981. Doğu Pontidler'de Kretase, Karadeniz Teknik Üniversitesi Yerbilimleri Dergisi, 1, 65-114.
- Panizzo A., De Girolamo P. ve Petaccia A., 2005b. Forecasting Impulse Waves Generated by Subaerial Landslides, Journal of Geophysical Research: Oceans, 110,C12, C12025, 1-23.
- Panizzo, A., De Girolamo, P., Di Risio, M., Maistri, A. ve Petaccia, A., 2005a. Great Landslide Events in Italian Artificial Reservoirs, Natural Hazards and Earth System Sciences, 5,5, 733-740.
- Park, C., B., Miller, R., D. ve Xia, J., 1999a. Multi-channel Analysis of Surface Waves (MASW), Geophysics, 64, 800-808.
- Park, C., B., Miller, R., D., Xia, J., Hunter, J., A. ve Harris, J., B., 1999b. Higher mode observation by the MASW Method, The Society of Exploration Geophysicists, Expanded Abstracts: 524-527.
- Pervanlar, E., A., 2016. Heyelan Duyarlılık, Tehlike ve Risk Çalışmaları Kapsamı, Ulusal Heyelan Sempozyumu, Nisan, Ankara, Bildiriler Kitabı: 75-84.
- Prandini L., Guidicini G., Bottura J., A., Ponçano W., L. ve Santos, A., R., 1977. Behavior of the vegetation in slope stability: A Critical Review, Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 16, 51-55.
- Prins, J., E., 1958. Characteristics of Waves Generated by a Local Disturbance, Transactions, American Geophysical Union, 39,5, 865-874.
- Prior, D., B., Stephens, N. ve Archer, D., R., 1968. Composite mudflows on the Antrim coast of Northeast Ireland, Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography, 50,2, 65-78.
- Quecedo, M., Pastor, M. ve Herreros, M., I., 2004. Numerical modelling of impulse wave generated by fast landslides, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 59,12, 1633-1656.
- Rahn, P., H., 2015. Mühendislik Jeolojisi Çevresel Bir Yaklaşım, Çeviri: Akyol, E. ve Kayabalı, K., Gazi Kitabevi, Ankara, 658s.
- Ramsden, J., D., 1996. Forces on a Vertical Wall due to Long Waves, Bores, and Dry-Bed Surges, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 122,3, 134-141.
- Reynolds, J., M. 2011. An Introduction to Applied and Environmental Geophysics, John Wiley&Sons, 696p.

- Russell, J., S., 1837. Report of the committee on waves, Report of the 7th Meeting of the British Association for the Advancement of Science Liverpool, Murray, London 7: 417-496.
- Schultze-Westrum, H-H., 1961. Giresun Civarındaki Aksu Deresinin Jeolojik Profili, Kuzeydoğu Anadolu'da, Doğu Pontus Cevher ve Mineral Bölgesinin Jeolojisi ve Maden Yatakları ile İlgili Mütalaalar, MTA Dergisi, 57, 63-71.
- Schuster, R., L. ve Wiczorek, G., F., 2002. Landslide Triggers and Types, In: Rybář, J., Stemberk, J., Wagner, P. (Eds.), Landslides, First European Conference on Landslides, June, Prague, Czech Republic, Proceedings: 59-78.
- Semenza, E., 2002. La storia del Vajont, raccontata dal geologo che ha scoperto la frana, Tecomproject, Ferrara.
- Seydioğulları, H., S., 2013. Sürdürülebilir Kalkınma için Yenilenebilir Enerji, Planlama Dergisi, 23,1, 19-25.
- Skempton, A., W. ve Hutchinson, J., N., 1969. Stability of natural slopes and embankment foundations, 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico, Proceedings 3: 291-340.
- Skempton, A., W. ve Weeks, A., G., 1976. The Quaternary history of the Lower Greensand escarpment and Weald Clay vale near Sevenoaks, Kent, Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 283,1315, 493-526.
- Skempton, A., W., 1970. First-time Slides in Overconsolidated Clays, Géotechnique, 20,3, 320-324.
- Slingerland, R., L. ve Voight, B., 1979. Chapter 9 - Occurrences, Properties, and Predictive Models of Landslide-Generated Water Waves, In: Voight, B. (Eds.), Developments in Geotechnical Engineering, 14, B, 317-394.
- Slingerland, R., L. ve Voight, B., 1982. Evaluating hazard of landslide-induced water waves, Journal of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Division, 108,4, 504-512.
- Smith, R., C., Hill, J., Collins, G., S., Piggott, M., D., Kramer, S., C., Parkinson, S., D. ve Wilson, C., 2016. Comparing Approaches For Numerical Modelling of Tsunami Generation by deformable Submarine Slides, Ocean Modelling, 100, 125-140.
- Synolakis, C., E., 1987. The Runup of Solitary Waves, Journal of Fluid Mechanics, 185, 523-545.
- Şahin, S., Y., Güngör, Y. ve Boztuğ, D., 2004. Comparative Petrogenetic Investigation of Composite Kaçkar Batholith granitoids in Eastern Pontide Magmatic Arc-Northern Turkey, Earth, Planets and Space, 56,4, 429-446.
- Taşlı, K., 1984. Hamsiköy (Trabzon) Yöresinin Jeolojisi, Karadeniz Üniversitesi Dergisi, 3,1-2, 69-76.

- Telford, W., M., Geldart, L., P. ve Sheriff, R., E., 1990. Applied Geophysics, Cambridge University Press, 744p.
- Tessema, N., N., Sigtryggssdóttir, F., G., Lia, L. ve Jabir, A., K., 2019. Case Study of Dam Overtopping from Waves.
- Tezcan, S., Keçeli, A. ve Özdemir, Z., 2006. Kayma Dalgası Hızı Yardımı ile Zemin Emniyet Gerilmesi Tayini, Şantiye (İnşaat, Makine ve Mimarlık Dergisi), 214, 102-105.
- Tezel, K. 2015. Havuzlu Heyelanının (Yusufeli, Artvin) Mühendislik Jeolojisi Açısından İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 87s.
- Tokel, S., 1972. Stratigraphical and Volcanic History of the Gümüşhane Region (Turkey), PhD Thesis, University College, London, 189p.
- Topuz, G., Eyüboğlu, Y. ve Dokuz, A. 2002. Petrology of the Saraycık granodiorite from the Pulur Massif, NE Turkey: Primary Results, 1st International Symposium of the Faculty of Mines on Earth Sciences and Engineering, May, İstanbul, Bildiriler Kitabı: 120.
- Turan, F., 2006. Su Kaynakları, Ulusal ve Bölgesel Kalkınmadaki Rolü, TMMOB Su Politikaları Kongresi, Mart, Ankara, Bildiriler Kitabı: 25-34.
- Tüdeş, S., 2001. Gümüşhane Kenti ve Yakın Çevresinin Yerleşime Uygunluk Açısından Araştırılması, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 229s.
- Ulusay, R., 2010. Uygulamalı Jeoteknik Bilgiler. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları 38, Ankara, 458s.
- Vallejo, L., I. ve Ferrer, M., 2014. Mühendislik Jeolojisi, Çeviri: Kayabalı, K., Ankara Üniversitesi Yayınevi, Ankara, 674s.
- Varnes, D., J., 1958. Landslide Types and Processes, In: Eckel, E. B. (Eds.), Landslide and Engineering Practice, Highway Research Board Special Report, 29, 20-47.
- Varnes, D., J., 1978. Slope Movement Types and Processes, In: Schuster, R. L. and Krizek, R. J. (Eds.), Landslides: Analysis and Control. Transportation Research Board Special Report, Issue Number 176, pp. 11-33.
- Varnes, D., J., 1984. Landslide Hazard Zonation: A Review of Principles and Practice, Natural Hazard Series, Issue Number 3, IAEG Commission on Landslides and Other Mass-Movements on Slopes, 63s.
- Walder, J., S., Watts, P., Sorensen, W., O. ve Janssen, K., 2003. Tsunamis generated by subaerial mass flows, Journal of Geophysical Research, 108,B5, 2236, 1-19.
- Walkden, M., J., A., 1999. Model Wave Impulse Loads on Caisson Breakwaters: Aeration, Scale and Structural Response, PhD Thesis, University of Plymouth, UK.

- Waltham, T., 2006. Mühendislik Jeolojisinin Esasları, Çeviri: Kayabalı, K., Gazi Kitabevi, Ankara, 93s.
- Wang, F., Wang, G., Sassa, K., Takeuchi, A., Araiba, K., Zhang, Y. ve Peng, X., 2005. Displacement Monitoring and Physical Exploration on the Shuping Landslide Reactivated by Impoundment of the Three Gorges Reservoir, China, In: Sassa K., Fukuoka H., Wang F., Wang G. (Eds.), *Landslides*, Springer, Berlin, Heidelberg, 313-319.
- Wang, F., Zhang, Y-M., Huo, Z-T., Matsumoto, T. ve Huang, B., 2004. The July 14, 2003 Qianjiangping landslide, Three Gorges Reservoir, China, *Landslides*, 1, 157-162.
- Whittlestone, A., P., Johnson, J., D., Rogers, M., E. ve Pine, R., J., 1995. Probabilistic risk analysis of slope stability, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 32,5, 236A.
- Wieczorek, G., F. ve Snyder, J. B., 2009. Monitoring slope movements, In: Young, R., Norby, L. (Eds.), *Geological Monitoring*, Geological Society of America, Boulder, Colorado, 245-271.
- WP/WLI (UNESCO Working Party on World Landslide Inventory), 1993. A suggested method for describing the activity of a landslide, *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 47, 53-57.
- Xia, J., Miller, R., D., Park, C., B., Hunter, J., A. ve Harris, J., B., 1999. Evaluation of the MASW technique in unconsolidated sediments, 69th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, Proceedings: 437-440.
- Yalçınalp, B., 1992. Güzelyayla (Maçka-Trabzon) Porfiri Cu-Mo Cevherleşmesinin Jeolojik Yerleşimi ve Jeokimyası, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 177s.
- Yalçınar, A., C., Alpar, B., Altınok, Y., Özbay, I. ve Imamura, F., 2002. Tsunamis in the Sea of Marmara: Historical documents for the past, models for the future, *Marine Geology*, 190,1-2, 445-463.
- Yılmaz, M., 2012. Türkiye'nin Enerji Potansiyeli ve Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Açısından Önemi, *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, 4,2, 33-54.
- Yılmaz, S. ve Boztuğ, D., 1996. Space and Time Relations of Three Plutonic Phases in the Eastern Pontides, Turkey, *International Geology Review*, 38,10, 935-956.
- Yılmaz, Y., 1976. Geochemical Study of The Gümüşhane Granite, *İst. Üniv. Fen Fak. Mec. Seri B*, 39,3-4, 173-203.
- Yin, Y., Huang, B., Chen, X., Liu, G. ve Wang, S., 2015. Numerical analysis on wave generated by the Qianjiangping landslide in Three Gorges Reservoir, China, *Landslides*, 12,2, 355-364.

- Yüksel, İ. ve Kaygusuz, K., 2011. Renewable Energy Sources for Clean and Sustainable Energy Policies In Turkey, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15,8, 4132-4144.
- Zankl, H., 1961. Magmatismus und Bauplan des Ost-Pontischen Gebiges im Querprofil des Harsit-Tales. NordOst Anatolien, Geologische Rundschau, 51,1, 218-239.
- Zankl, H., 1962. Magmatismus und Bauplan des Astpantischen Gebirges im Querprofil des Harşıt-Tales, Bayerisch Akademie der Wissenschaften, Abhandlungen, 109, 61-69.
- Zhang, Y., Li, D., Chen, L., Yin, K., Xiao, L., Fu, X., Glade, T. ve Leo, C., 2020. Numerical analysis of landslide-generated impulse waves affected by the reservoir geometry, Engineering Geology, 266, 105390, 1-15.
- Zhao, Lh., Mao, J., Liu, Xq. ve Li, Tc., 2014. Numerical simulation of landslide-generated impulse wave, Journal of Hydrodynamics, 26,3, 493-496.
- Zweifel A., 2004. Impulswellen Effekte der Rutschdichte und der Wassertiefe, Dissertation 15596, ETH Zurich.

## ÖZGEÇMİŞ

İlk, orta ve lise öğrenimini Antalya’da tamamlayarak Antalya Çağlayan Lisesinden mezun oldu. 1997 yılında girdiği Karadeniz Teknik Üniversitesi Gümüşhane Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümünden 2001 yılında mezun oldu. 2005 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı. Bir yıl süre ile Karadeniz Teknik Üniversitesi Milli Piyango Yabancı Diller Yüksekokulunda İngilizce hazırlık eğitimi gördü. 2009 yılında yüksek lisans eğitimini başarı ile tamamladı. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalında doktora eğitime başladı ve aynı zamanda Gümüşhane Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Uygulamalı Jeoloji Anabilim Dalına Araştırma Görevlisi olarak atandı. 2012 yılında kurum değişikliği yaparak Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Uygulamalı Jeoloji Anabilim Dalına Araştırma Görevlisi olarak atandı. 2014 yılında kurumlar arası naklen atama kararı ile Antalya Valiliği Yatırım İzleme ve Koordinasyon Başkanlığı Doğal Kaynaklar, Ruhsat ve Kültür Varlıkları Müdürlüğünde Jeoloji Yüksek Mühendisi olarak göreve başladı. Bir çocuk annesi olan yazar aynı zamanda C sınıfı İş Güvenliği Uzmanı olup iyi derecede İngilizce bilmektedir.

- Ersoy, H., Karslı, M., B., Çellek, S., Kul, B., Baykan, İ. Ve Parsons, R. L., 2013. Estimation of the soil strength parameters in Tertiary volcanic regolith (NE Turkey) using analytical hierarchy process, Journal Earth System Science, 122,6, 1545-1555.
- Karslı, M., 2009. Arhavi-Hopa (Artvin) arasındaki karayolu şevlerinin duraylılık açısından incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Trabzon, 101 s.
- Karslı, M., B. ve Ceryan, Ş., 2009. Stability of the slopes on Arhavi-Hopa (Artvin) Highway, In: Tamzok, M., Toka, B., (Eds) 21st International Mining Congress, 6-8 May, Antalya, Proceedings: 313-322.
- Yalçın, M., G., Aktürk, Ö., Yüregir, M., B. ve Tat, E., 2018. General Evaluation of Open Pits Which Have Forest Occupancy Permission Between The Years of 2012-2014 In The West Mediterranean Region, 9th International Symposium of the Eastern Mediterranean Geology (ISEMG 2018), 7-11 May, Antalya, Proceedings: 403-406.
- Yalçın, M., G., Aktürk, Ö., Yüregir, M., B. ve Tat, E., 2018. Rehabilitation Processes at Marble Quarries Located at The Cities of Antalya, Burdur, Isparta, 9th International Symposium of the Eastern Mediterranean Geology (ISEMG 2018), 7-11 May, Antalya, Proceedings: 454-454.