

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

JEOLJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

HEYELANLARIN BARAJ GÖLLERİNDE OLUŞTURACAĞI DALGALARIN
FİZİKSEL VE 3 BOYUTLU MATEMATİKSEL MODELLERLE
SİMÜLASYONU: HARDISAĞIR HEYELANI ÖRNEĞİ

DOKTORA TEZİ

Murat KARAHAN

AĞUSTOS 2023
TRABZON



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

JEOLojİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**HEYELANLARIN BARAJ GÖLLERİNDE OLUŞTURACAĞI DALGALARIN
FİZİKSEL VE 3 BOYUTLU MATEMETİKSEL MODELLERLE
SİMÜLASYONU: HARDISAĞIR HEYELANI ÖRNEĞİ**

Murat KARAHAN

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

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 18/07/2023
Tezin Savunma Tarihi : 21/08/2023**

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hakan ERSOY

Trabzon 2023

ÖNSÖZ

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora Tezi olarak hazırlanmıştır.

Öncelikle ve özellikle, doktora tez çalışmasının her aşamasında konuya olan ilgisi, bilgi birikimi ve tecrübesiyle yön veren ve bu doktora tezinin ortaya çıkmasında maddi ve manevi açıdan en çok katkısı olan Prof. Dr. Hakan ERSOY'a sonsuz minnet ve şükran duygularımı sunarım.

Tez kapsamında FKD-2018-7675 kodlu projeyi destekleyen Karadeniz Teknik Üniversitesi BAP Koordinasyon Birimine, 121Y327 numaralı projeyi (1002-Hızlı Destek Programı) destekleyen TÜBİTAK'a ve Hardısağır heyelanı ile ilgili tüm verileri paylaşan DSİ 22. Bölge Müdürlüğü'ne teşekkürü bir borç bilirim.

Doktora çalışmamın tez izleme komitesinde bulunan ve tezin şekillenmesinde önemli katkıları olan değerli hocalarım Prof. Dr. Fikri BULUT ve Prof. Dr. Ömer YÜKSEK hocalarıma, laboratuvar deneylerinde ve projelerde yardımlarını esirgemeyen sevgili dostum Arş. Gör. Dr. Muhammet Oğuz SÜNNETÇİ'ye ve Arş. Gör. Dr. Serkan İNAL'a ve jeoloji Mühendisi Adnan TAFLAN'a çok teşekkür ederim.

Maddi ve manevi olarak her an yanımda olan desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Eşim Hilal KARAHAN ve her an varlığı ile bana bir motivasyon kaynağı olan güzel kızım Duru KARAHAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Murat KARAHAN
Trabzon, 2023

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Heyelanların Baraj Göllerinde Oluşturacağı Dalgaların Fiziksel ve 3 Boyutlu Matematiksel Modellerle Simülasyonu: Hardısağır Heyelanı Örneği” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Hakan ERSOY’un sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda 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. 21/08/2023

Murat KARAHAN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
SEMBOLLER DİZİNİ	XV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Açık Deniz Tsunamileri.....	4
1.2.1. Dünyada Tsunami Vakaları	6
1.2.2. Türkiye’de Tsunami Vakaları.....	9
1.3. İtki Dalgaları (Lokal Tsunamiler).....	13
1.3.1. İtki Dalgalarının Oluşumu ve Yayılımı	15
1.3.2. İtki Dalgalarının Fiziksel Özelliklerinin Tespit Edilmesinde Kullanılan Yöntemler	18
1.4. Tsunami ve İtki Dalgalarının Modellenmesi	23
1.4.1. Tahmin Modelleri	23
1.4.2. Taşkın Yayılım Modelleri	24
1.5. Çalışmanın Amacı ve Özgün Değeri	25
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	29
2.1. Mevcut Çalışmaların Derlenmesi	30
2.2. Genel Jeolojik ve Stratigrafik Çalışmalar.....	31
2.3. İHA Ölçümleri ve 3 Boyutlu Sayısal Arazi Modellerinin Oluşturulması	32
2.4. Batimetrik Ölçümler	36
2.5. Mühendislik Jeolojisi Çalışmaları	39
2.5.1. Araştırma Çukuru Açılması ve Örnek Temini.....	39
2.5.2. Jeofizik Ölçümler.....	41
2.5.3. Jeoteknik Laboratuvar Deneyleri.....	42
2.6. Laboratuvar Ölçeğinde Hidrolik Model Deneylerin Yapılması	43

2.5.1.2.	Siltlenme Etkisi.....	50
2.7.	Rezervuara Kayacak Malzeme Hesabı ve 3 Boyutlu Limit Denge Analizleri	56
2.8.	Heyelan Kaynaklı İtki Dalgalarına Ait 3 Boyutlu Simülasyona Dayalı Nümerik Modelin Kurulması ve Sınır Koşullarının Tanımlanması	58
2.6.3.	İtki Dalgalarına Yönelik Ampirik Yaklaşımlar	62
3.	BULGULAR.....	71
3.2.	Çalışma Alanı ve Çevresinin Jeolojisi.....	72
3.3.	Çalışma Alanı ve Çevresinin Depremselliği.....	77
3.4.	Mühendislik Jeolojisi Çalışmaları	79
3.4.1.	Sondaj Çalışmaları Araştırma Çukurlarının Açılması ve Jeofizik Ölçümler	79
3.4.2.	Paleo-Heyelan Malzemesinin Fiziksel ve Dayanım Özelliklerinin Tayini.....	86
3.5.	Sayısal Arazi Modellerinin Oluşturulması	87
3.6.	Rezervuara Kayacak Malzeme Hesabı ve Yamaç Stabilite Analizleri.....	89
3.7.	Siltlenme Etkisinin Belirlenmesi ve Güncel Taban Topografyasının Oluşturulması.....	94
3.8.	3 Boyutlu Nümerik Yaklaşımlarla İtki Dalgalarının Modellenmesi	97
3.8.1.	İlksel taban Topografi İçin 3 Boyutlu Nümerik Model	97
3.8.2.	Güncel Taban Topografyası İçin 3 Boyutlu Nümerik Model.....	100
3.9.	Nümerik Modelin Geçerliliği ve Hassasiyeti	102
3.9.1.	Laboratuvar Model Deneylerle Ölçek Etkisinin Belirlenmesi	102
3.9.2.	Laboratuvar Model Deneylerle Çarpma Hızının ve Süresinin Belirlenmesi.....	104
3.9.3.	Ampirik Yaklaşımlarla İtki Dalgası Özelliklerinin Tayini	110
4.	TARTIŞMA.....	112
5.	SONUÇLAR.....	117
6.	KAYNAKLAR.....	122
ÖZGEÇMİŞ		

Doktora Tezi

ÖZET

HEYELANLARIN BARAJ GÖLLERİNDE OLUŞTURACAĞI DALGALARIN FİZİKSEL VE 3 BOYUTLU MATEMATİKSEL MODELLERLE SİMÜLASYONU: HARDISAĞIR HEYELANI ÖRNEĞİ

Murat KARAHAN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Hakan ERSOY
2023, 139 Sayfa

Doktora tezi kapsamında, Kürtün Barajı göl alanında bulunan Hardısağır Heyelanının hareketi sonucu oluşacak itki dalgaları simülasyona dayalı 3 boyutlu nümerik analizler kullanılarak modellenmiş, barajın inşa edildiği tarihten itibaren göl tabanında biriken silt malzemesinin dalga özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Nümerik modellerin kalibrasyonu ve hassasiyeti laboratuvarda kurulan hidrolik modeller üzerinde yapılan deneylerle test edilmiş, bu kapsamda hidrolik modellerdeki ölçek etkisi 3 boyutlu nümerik simülasyonlarla araştırılmıştır. Heyelan malzemesinin geometrisinin belirlenmesi ve 3 boyutlu analizler için gerekli verilerin toplanması, insansız hava araçları ile yapılan ölçümler ve batimetrik ölçümler ile sağlanmış, laboratuvar ve arazi deneylerinden elde edilen veriler kullanılarak heyelan malzemesinin jeoteknik özellikleri belirlenmiştir. Kalibrasyon analizleri için laboratuvar ortamında kurulan hidrolik model deneylerden yararlanılmıştır. Yapılan 3 boyutlu limit denge analizleri ile olası bir kütle hareketi sonucunda 875.240 m³ lük malzemenin rezervuara akacağı modellenmiştir. Barajın kurulduğu andaki ilksel rezervuar taban topografyası verileri dikkate alındığında 97 metrelik su derinliği için yapılan analizlerde çarpma zonunda oluşan maksimum dalga yüksekliği 30 m, baraj gövdesine ulaşan dalga yüksekliği 2.5 m, itki dalgasının baraj gövdesine çarpma hızı 22 m/sn ve dalganın baraj gövdesine ulaşma süresi 93 sn olarak belirlenmiştir. Yapılan batimetrik çalışmalarda sediment kalınlığının 1 ile 38 metre arasında değiştiği tespit edilmiş, güncel taban topografyası dikkate alınarak yapılan 3 boyutlu analizlerde çarpma zonunda oluşan maksimum dalga yüksekliği 35 m, baraj gövdesine ulaşan dalga yüksekliği 4.5 m, itki dalgasının baraj gövdesine çarpma hızı 16 m/sn ve dalganın baraj gövdesine ulaşma süresi 126 sn olarak belirlenmiştir. Görüldüğü gibi rezervuar taban topografyasında zamana bağlı olarak meydana gelen değişim etkisiyle çarpma zonunda oluşan ve baraj gövdesine ulaşan dalga yüksekliği artmış, dalga hızı azalmıştır. Elde edilen bu sonuçlar heyelan kaynaklı itki dalgalarının özelliklerinin belirlenmesine yönelik çalışmalarda değişen rezervuar taban topografyasının dikkate alınması gerektiğini net olarak göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Kürtün Barajı, İtki Dalgası, Sedimentasyon, Heyelan, Tsunami, 3 Boyutlu Nümerik Simülasyon

PhD. Thesis

SUMMARY

SIMULATION OF LANDSLIDE-INDUCED IMPULSE WAVES IN DAM LAKES USING PHYSICAL AND 3 DIMENSIONAL MATHEMATICAL SIMULATIONS: THE CASE OF HARDISAĞIR LANDSLIDE

Murat KARAHAN

Karadeniz Technical University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Geological Engineering
Supervisor: Prof. Dr. Hakan ERSOY
2023, 139 Pages

Within the scope of the doctoral thesis, the impulse waves that will occur as a result of the movement of the Hardisağır Landslide in the Kürtün Dam Lake area were modeled using simulation-based 3D numerical analyzes, and the effects of the silt material accumulated on the lake floor since the construction of the dam on the wave properties were investigated. Calibration and precision of numerical models were tested with experiments on hydraulic models established in the laboratory, and in this context, the scale effect on hydraulic models was investigated with 3D numerical simulations. The determination of the geometry of the landslide material and the collection of necessary data for 3D analysis were provided by measurements made with unmanned aerial vehicles and bathymetric measurements, and the geotechnical properties of the landslide material were determined using the data obtained from laboratory and field tests. Hydraulic model experiments established in the laboratory environment were used for calibration analyses. With the 3D limit equilibrium analysis, it was modeled that 875.240 m³ of material would flow into the reservoir as a result of a possible mass movement. Considering the initial reservoir floor topography data at the time the dam was built, the maximum wave height formed in the impact zone is 30 m, the wave height reaching the dam body is 2.5 m, the impact velocity of the wave is 22 m/sec, and the time the wave reaches the dam body is 93 seconds in the analyzes made for the water depth of 97 meters. In bathymetric studies, it has been determined that the sediment thickness varies between 1 and 38 meters, and in the 3D analyzes made considering the current bottom topography, the maximum wave height formed in the impact zone is 35 m, the wave height reaching the dam body is 4.5 m, the velocity of the impulse wave hitting the dam body is 16 m/s and the time of the wave to reach the dam body was determined as 126 seconds. As can be seen, with the effect of time-dependent change in the reservoir bottom topography, the wave height in the impact zone and reaching the dam body has increased, and the wave velocity has decreased. These results clearly show that the changing reservoir bottom topography should be taken into account in studies to determine the characteristics of landslide-induced impulse waves.

Key Words: Kürtün Dam, Impulse Wave, Sedimentation, Landslide, Tsunami, 3-Dimensional Numerical Simulation

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.	Tsunami dalgasının oluşumundan kıyı bölgesine ulaşana kadar geçen süreç	5
Şekil 2.	26 Aralık 2004 Hint Okyanusu Depremi sonucunda oluşan tsunaminin yayılımı ve etkilenen ülkeler	7
Şekil 3.	2011’de Japonya’da meydana gelen depremin ardından meydana gelen tsunamiden arda kalanlar (a ve b). Fukuşima Nükleer Santrali ve dalgakıranların tsunamiden önceki durumu (c) ve tsunaminin nükleer santrali vurmasından sonraki görünüm (d).....	9
Şekil 4.	KRDAE-BDTİM tarafından gönderilen tsunami uyarı mesajının harita ekleri.....	11
Şekil 5.	Karadeniz ve yakın çevresinde 100 yıl içerisinde tsunami oluşumuna neden olan deprem odak noktaları	12
Şekil 6.	Vajont Barajı rezervuarında 1963 yılında meydana gelen heyelanın günümüzdeki görünümü (a ve b) ve dalgadan etkilenmeyen baraj gövdesinin arkasını bütünüyle doldurmuş heyelan malzemesi (c).....	15
Şekil 7.	İtki dalgalarını oluşturan kütlelerin konumları.....	16
Şekil 8.	Yatay bir göl alanında bir itki dalgasına ait üç ayrı aşama (i: heyelan darbesi ile dalganın oluşumu, ii: dalganın göl alanındaki yayılımı, iii: itki dalgasının karşı kıyıda ve/veya baraj gövdesi üzerinde ilerlemesi).....	16
Şekil 9.	Heyelan tetikli itki dalgalarının yayılım doğrultusu ve fiziksel özellikleri (a: dar ve uzun rezervuarda doğrusal (lineer) dalga yayılımı, b: geniş rezervuarda dairesel (radyal) dalga yayılımı, c: heyelan malzemesinin ve meydana gelen dalganın fiziksel özellikleri, d: karmaşık geometriye sahip rezervuarlarda dairesel (radyal) ve doğrusal (lineer) dalga yayılımı)	18
Şekil 10.	Taşkın dalgalarının mühendislik yapıları üzerindeki etkilerinin belirlenmesi için hazırlanan fiziksel prototip modeller.....	21
Şekil 11.	Salomende Barajı dolu savak yapısında taşkın etkisinin araştırılması amacıyla hazırlanan prototip ve nümerik model	22
Şekil 12.	Laboratuvar ortamında oluşturulan heyelan rampası ve rezervuara ait fiziksel modelin plan (Fritz 2002) ve gerçek modeli	22
Şekil 13.	Baraj yıkılma senaryosu oluşacak dalgaların etkilerinin araştırılması (3 boyutlu topografik modelin oluşturulması ve barajın yenilmesi)	23
Şekil 14.	Yer bulduru haritası.....	28
Şekil 15.	Gölalanı-çevresinde bulunan ve DSİ 22. Bölge Müdürlüğü tarafından çalışılmış heyelanlar	31
Şekil 16.	Harita Genel Komutanlığından ve insansız hava araçları (İHA) kullanılarak ölçüm yapılan alanlar	33

Şekil 17.	Kürtün barajı göl alanındaki yamaç duraysızlıklarına örnekler	37
Şekil 18.	Batimetrik ölçümlerin yapıldığı alan.....	37
Şekil 19.	Batimetrik ölçümlerden genel görüntüler	38
Şekil 20.	Araştırma çukurlarının açıldığı yerler	40
Şekil 21.	Araştırma çukuru fotoğrafları.....	40
Şekil 22.	Jeofizik ölçüm hatları	41
Şekil 23.	İtki dalgasının oluşum mekanizması ve kütlenin rezervuardaki suya çarpma hızının hesaplanmasında kullanılan parametreler	43
Şekil 24.	Hidrolik modelin farklı açılardan görüntüleri	44
Şekil 25.	(a) Nümerik modellerde kullanılan deney düzeneğinin katı modeli, (b) hidrolik modellerde kullanılan havuz ve yükleme rampası ve (c, d) yüksek hızlı kamera.....	46
Şekil 26.	Çarpma hızının tespit edilmesi için kurulan hidrolik model	48
Şekil 27.	20 derece (a), 25 derece (b) ve 30 derecelik (c) rampa acılarında suyun çarpma hızının tespit edilmesi için kurulan nümerik ve hidrolik modeller.....	48
Şekil 28.	Başlangıç aşaması (a), çarpma anı ve dalganın oluşumu (b), dalganın ilerlemesi (c) ve dalganın rampadan geri tırmanmasının (d) modellenmesi.	49
Şekil 29.	Serbest su seviyesi ile su sütunu kalınlığının görünümü.....	50
Şekil 30.	Sedimentasyon etkisinin araştırılmasında kullanılan hidrolik modelden genel görüntüler.....	51
Şekil 31.	0 (a), 2.5 (b), 5 (c), 7.5 (d), 10 (e) ve 15 cm (f) sediment kalınlıklarında yapılan hidrolik model deneyler.....	52
Şekil 32.	0, (a), 2.5 (b), 5 (c), 7.5 (d), 10 (e) ve 15 cm (f) sediment kalınlıklarında yapılan 3 boyutlu nümerik analiz	54
Şekil 33.	Heyelan kütlesi içinde hareket eden kısmın gösterimi (Hardısağır heyelanı tabanı)	56
Şekil 34.	Arazinin 3 boyutlu katı modeli.....	57
Şekil 35.	FLOW-3D programı kullanılarak heyelan kaynaklı itki dalgalarının simülasyona dayalı 3 boyutlu yayılımının farklı zamanlardaki görünümü	58
Şekil 36.	3 boyutlu itki dalgası için kurulan nümerik model	61
Şekil 37.	İksel taban topoğrafyasına güncel taban topoğrafyasının entegre edilmesi	61
Şekil 38.	Su dalgasının fiziksel özellikleri (H: dalga yüksekliği, a: dalga genliği, L: dalga uzunluğu, c: dalga hızı, h: durgun su derinliği, x ve t: seyahat mesafesi ve zamanıdır).....	63
Şekil 39.	Sığ (a), orta (b) ve derin su (c) dalgaları (Heller, 2009).....	65

Şekil 40.	Stokes dalgası.....	65
Şekil 41.	Cnoidal dalga.....	66
Şekil 42.	Solitary Dalga.....	66
Şekil 43.	Bore Dalgası.....	67
Şekil 44.	Kütlenin rezervuardaki suya çarpması, dalganın oluşması, dalganın ilerlemesi ve barajın gövdesine çarpması.....	67
Şekil 45.	Hareket eden kütlenin çarpma hızında kullanılan parametreler.....	68
Şekil 46.	DSİ 22 Bölge Müdürlüğü tarafından detaylı bir şekilde çalışılan ve jeolojik-jeoteknik etüdü hazırlanan 4 heyelanın konumu	72
Şekil 47.	Çalışma alanı ve çevresinin jeoloji haritası.....	75
Şekil 48.	Göl alanı ve çevresinin jeoloji haritası	76
Şekil 49.	30.12.2022 tarihi itibarıyla son bir ay içerisinde proje sahası yakın çevresine ait deprem etkinliği	77
Şekil 50.	Heyelan malzemesinin hareket yönüne dik alınan ERT ölçümü sonucu hazırlanan kesitler	80
Şekil 51.	Sismik kırılma ile ölçülen değerlerden hesaplanan Vs(30) (a) ve Vp hız değerleri (b) (Sismik hat-2 için)	81
Şekil 52.	Arazi çalışmaları, sondajlar ve jeofizik ölçümlerden elde edilen veriler kullanılarak hazırlanan 1/500 ölçekli mühendislik jeolojisi haritası.....	83
Şekil 53.	Arazi çalışmaları, sondajlar ve jeofizik ölçümlerden elde edilen veriler kullanılarak alınan enine jeolojik kesitler	84
Şekil 54.	Çalışma alanı ve çevresinin heyelan envanter haritası.....	86
Şekil 55.	5 Adet UD örneğin birleştirilmiş zemin sınıflamasına göre sınıflandırılması.....	87
Şekil 56.	Tüm göl alanına ait katı model (a), heyelanlı bölgeye ait katı model (b), kayması muhtemel kütleye ait katı model (c) ve güncel taban topografyasına ait katı model (d)	88
Şekil 57.	Kayması muhtemel kütleye ait katı modelin tüm göl alanına entegre edilmesi (a) ve güncel taban topografyasının tüm göl alanına entegre edilmesi (b).....	89
Şekil 58.	Çalışma alanına ait otofoto (a), DEM görüntüsü (b), Eş yükselti eğrisi haritası (c) ve nokta bulutu (d)	90
Şekil 59.	Sondajların programda loglanması (a), sondajların 3 boyutlu katı model üzerine işlenmesi (b), sondaj loglarının kesit görüntüsü (c) ve 3 boyutlu jeolojik model (d).....	91
Şekil 60.	En düşük güvenlik sayısına sahip 16 adet heyelanın alansal dağılımı	93
Şekil 61.	Yüzey güvenlik haritası (a), yüzey güvenlik haritası altında kalan kayması muhtemel alanlar (b), tespit edilen 3 riskli alan (c) ve kayması muhtemel 3 alanın katı modeli (d)	93
Şekil 62.	Batimetrik ölçümden görüntüler	94

Şekil 63.	Noktasal ölçümlerin yapıldığı yerlerin konumları	96
Şekil 64.	Batimetrik haritalardan ve noktalardan alınan kesitlerden genel görüntüler	96
Şekil 65.	Kurulan 3 boyutlu nümerik modelden genel bir görüntü	98
Şekil 66.	Çarpma zonundaki maksimum su seviyesi (a), baraj gövdesine çarpan dalga yüksekliği (b) ve baraja çarpan dalganın hızı (c)	99
Şekil 67.	Güncel taban topografyası için 3 boyutlu nümerik modelde kullanılan katı model	100
Şekil 68.	Çarpma zonundaki maksimum su seviyesi (a), baraj gövdesine çarpan dalga yüksekliği (b) ve baraja çarpan dalganın hızı (c)	101
Şekil 69.	Farklı yoğunluktaki ve ölçekteki 2 boyutlu simülasyonlar ait FLOW-3D programında yapılan çözümlemeler	103
Şekil 70.	Malzemenin çarpma hızının tespit edilmesi için kurulan 3 boyutlu laboratuvar modeli	105
Şekil 71.	Yüksek hızlı kamera görüntüleri (a) 20°, (b) 25° ve (c) 30° rampalar için suyun çarpma hızı	106
Şekil 72.	3 boyutlu simülasyon ile farklı rampa açılarına bağlı olarak (20, 25 ve 30) akan suyun havuz tabanına çarpma hızını hesaplanması	108
Şekil 73.	3 boyutlu nümerik çözümleme ile hidrolik modelde suyun yükleme rapmasından tabana doğru hareketi 20 derece (1a ve 2a), 25 derece (2a ve 2b) ve 30 derecelik (1c ve 2c) rampa açılarında	109
Şekil 74.	Veri giriş pencerelerinden genel bir görünüş	110
Şekil 75.	Baraj göl tabanında biriken sedimentin ölçeksiz kesiti	113

TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1.	Dünya tarihinde kayıtlara geçmiş tsunamiler ve oluşum sebepleri.....	1
Tablo 2.	Yıkıcı dalgaların kaynakları ve vakalar	4
Tablo 3.	Son 100 yıl içerisinde Karadeniz’de tsunami oluşumuna neden olan depremler ve kayıtlara geçen etkileri (Altınok ve Ersoy 2000, Yalçın vd. 2004, Papadopoulos vd. 2010)	12
Tablo 4.	Heyelan kaynaklı dalga özelliklerinin tahmininde kullanılan yöntemlerin karşılaştırılması (Heller vd. 2009)	19
Tablo 5.	Tsunami yayılımının değerlendirilmesinde uygulanan yöntemlerin, analizlerin ve harita ölçeklerinin karşılaştırılması	25
Tablo 6.	Doktora tezi kapsamında yapılan çalışmalar ve yapılan çalışmaların amacı	29
Tablo 7.	Araştırma çukurlarını özellikleri	41
Tablo 8.	Jeofizik ölçüm hatlarına ait bilgiler.....	42
Tablo 9.	Örselenmiş ve örselenmemiş zemin numunelerinin alındığı derinlikler.....	42
Tablo 10.	Yapılan 3 boyutlu nümerik simülasyonun girdi parametreleri.....	62
Tablo 11.	DSİ 22. Bölge Müdürlüğü tarafından açılan 7 adet sondaja ait bilgiler.....	79
Tablo 12.	Proje kapsamında yapılan sismik ölçümler sonucunda hesaplanan zemin parametreleri.....	82
Tablo 13.	5 adet UD numuneden temin edilen örnekler üzerinde yapılan laboratuvar deney sonuçları	86
Tablo 14.	Stabilite analizlerinde kullanılan malzeme özellikleri	91
Tablo 15.	Kayması muhtemel riskli alanlarda en düşük güvenlik sayısı ve kayma yüzeyi üzerinde kalan hacim	92
Tablo 16.	Ölçüm yapılan noktaların kot, koordinat ve biriken sediment kalınlığı değerleri.....	95
Tablo 17.	İlksel taban topografyası için yapılan 3 boyutlu nümerik analizden elde edilen sonuçlar.....	97
Tablo 18.	Yapılan 3 boyutlu nümerik simülasyonun girdi parametreleri.....	98
Tablo 19.	Güncel taban topografyası için yapılan 3 boyutlu nümerik analizden elde edilen sonuçlar	100
Tablo 20.	2 Boyutlu nümerik çözümlemelere ait serbest su seviyesi değerleri	102
Tablo 21.	Gerçek boyuttaki ölçeğe kıyasla normalize edilmiş değerler.....	103
Tablo 22.	Farklı açI değerleri için çarpma hızI değerleri	105
Tablo 23.	Suyun çarpma hızının laboratuvar deneyleri ile tespit edilmesi	106

Tablo 24.	Çarpma hızı değerlerinin rampa eğimlerine bağlı nümerik modellerle hesaplanmış değerleri	107
Tablo 25.	Çarpma hızı değerlerinin rampa eğimlerine bağlı nümerik, ampirik ve hidrolik olarak hesaplanmış değerleri	107
Tablo 26.	Hidrolik ve nümerik model ile rampa açısına bağlı varış sürelerinin hesaplanması	108
Tablo 27.	Ampirik eşitliklerden elde edilen değerler	111
Tablo 28.	İlksel ve güncel taban topografyası dikkate alınarak yapılan 3 boyutlu nümerik analizlerin karşılaştırılması	114
Tablo 29.	Ampirik eşitlikler kullanılarak ilksel ve güncel taban topografyası dikkate alınarak yapılan hesaplamaların karşılaştırılması.....	115
Tablo 30.	Farklı eğimdeki rampalardan akan suyun havuz tabanına çarpma hızı değerlerinin ampirik, hidrolik ve nümerik olarak hesaplanmış değerleri	115
Tablo 31.	Gerçek boyutlu ölçeğe kıyasla normalize edilmiş değerler	116

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
DSİ	: Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü
ERT	: Elektrik Özdirenç
f	: Dalga Payı
f_i	: Akışkan İvmesi
F_w	: Froude Sayısı
F	: Malzeme kuvveti
F	: Güvenlik Katsayısı
g	: Yer Çekimi İvmesi ($\approx 9,81 \text{ m/s}^2$)
G_i	: Katı Tane İvmesi
h	: Serbest Su Derinliği
HSK	: Hardısağır Sondaj Kuyusu
H	: Dalga Yüksekliği
H_M	: Maksimum Dalga Yüksekliği
kN	: KiloNewton ($= 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m/s}^2$)
kPa	: KiloPascal ($= 10^3 \text{ N/m}^2$)
K	: Kuzey
km	: Kilometre

km ²	: Kilometrekare
L	: Dalga Boyu
L _M	: Maksimum Dalga Boyu
LDS	: Laser Distance Sensors
m	: Metre
m ²	: Metrekare
m ³	: Metreküp
mm	: Milimetre
m/s	: Metre / Saniye
M	: Göreceli Heyelan Kütlesi
MASW	: Multi-Channel Analysis of Surface Wave (Çok-Kanallı Yüzey Dalgası Yöntemi)
SIS	: Sismik
MPa	: MegaPascal (= 10 ⁶ N/m ²)
M _w	: Deprem Moment Büyüklüğü
n	: Kayan Malzemenin Gözenekliliği
N	: Normal Kuvvet
ohm.m	: Ohm-Metre (= volt-metre / amper) (Ω 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 (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
ui	: 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
V	: Göreceli Heyelan Hacmi
V_S	: Kayan Malzemenin Hacmi
W, W_i	: Kayan Kütlenin / Dilimin Ağırlığı
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)
α, α_N	: Kayan Malzemenin Yüzey ile Yaptığı Açısı (alfa)
α_i	: Dilimin Orta Noktasına Teğet Olan Doğrunun Eğimi
β	: Run-up Açısı (beta)
δ, δ_N	: Dinamik Yatak Sürtünme Açısı (delta)
$\Delta Z_{SC}, \Delta Z_{SCN}$	: Kayan Kütlenin Ağırlık Merkezinin Düşme Yüksekliği
ϕ	: İçsel Sürtünme Açısı (ϕ)
π	: Matematiksel Sabit (π) ($\approx 3,14$)
ρ	: Akışkan Yoğunluğu (ρ)
ρ_s	: Kayan Malzemenin Yoğunluğu (ρ)
ρ_w	: Suyun Yoğunluğu (ρ)
γ	: Üç Boyutlu Analizler için Dalga Yayılma Açısı (gamma)
$\tan \delta$	: Şev Oranı (tanjant delta)

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Tsunamiler okyanus veya deniz tabanının sığ depremlerin etkisiyle ani olarak yer değiştirmesine bağlı olarak deniz yüzeyinde oluşan dalgalarlardır. Günümüzde heyelan, kaya düşmesi, çığ ve buzul hareketleri gibi doğa olayları sonucu deniz, göl veya baraj rezervuar alanlarında ani olarak oluşan lokal dalgalar da tsunami olarak adlandırılmaktadır. Ancak bu dalgalar genel olarak lokal tsunami veya itki dalgası olarak tanımlanmaktadır.

Çağlar boyunca birçok yerde farklı kaynaklı tsunami meydana gelmiştir. Meydana gelen bu ölümcül dalgalar yerleşim alanlarını yok ederek büyük ölçekli yıkımlara neden olmuştur. Tablo 1’de tarihi kayıtlara geçen yıkıcı dalgalar ve özellikleri özetlenmiştir.

Tablo 1. Dünya tarihinde kayıtlara geçmiş tsunamiler ve oluşum sebepleri

Vaka NO	Tarih	Yer	Nedenleri	Ölü sayısı
1	≈7000-6000 M.Ö.	Lizbon, Portekiz	Bilinmiyor	Bilinmiyor
2	≈6225-6170 M.Ö.	Norveç Denizi	Heyelan	Bilinmiyor
3	≈1600 M.Ö.	Santorini, Yunanistan	Minos volkanik patlaması	Bilinmiyor
4	479 M.Ö.	Potidaea, Yunanistan	Bilinmiyor	Bilinmiyor
5	426 M.Ö.	Malili Körfez, Yunanistan	Bilinmiyor	Bilinmiyor
6	373 BCE	Helike, Yunanistan	Deprem	Bilinmiyor
7	60 M.Ö.	Portekiz ve Galiçya	Deprem	Bilinmiyor
8	79 CE	Napoli, İtalya Körfezi	Vezüv Yanardağı patlaması	Bilinmiyor
9	115 CE	Kayseriye, İsrail	Deprem	Bilinmiyor
10	262 CE	Batı Akdeniz (Türkiye)	Batı Akdeniz depremi	Bilinmiyor
11	365 CE	İskenderiye, Güney ve Doğu Akdeniz	Girit depremi	Bilinmiyor
12	551 CE	Lübnan Sahil	Beyrut depremi	Bilinmiyor
13	684 CE	Nankai, Japonya	Hakuho Nankai depremi	Bilinmiyor
14	869 CE	Sanriku, Japonya	Jogan Sanriku depremi	1000
15	887 CE	Nankai, Japonya	Ninna Nankai depremi	Bilinmiyor
16	1293	Kamakura, Japonya	Kamakura depremi	23000
17	1303	Doğu Akdeniz	Girit depremi	4000
18	1361	Nankai, Japonya	Shohei Nankai depremi	660
19	1498	Nankai, Japonya	Nankai depremi	40000
20	1531	Lizbon, Portekiz	Lizbon depremi	60000
21	1541	Nueva Cadiz, Venezuela	Bilinmiyor	1500
22	1605	Nankai, Japonya	Nankai depremi	5000
23	1607	Bristol Kanalı, Büyük Britanya	Bristol Kanalı seli	2000
24	1693	Sicilya	Sicilya depremi	60000
25	1700	Kuzeybatı Pasifik, ABD ve Kanada	Cascadia depremi	Bilinmiyor

Tablo 1'in devamı

Vaka NO	Tarih	Yer	Nedenleri	Ölü sayısı
26	1707	Nankai, Japonya	Hoei depremi	30000
27	1741	Batı Oshima, Japonya	Volkanik püskürme	1467
28	1755	Lizbon, Portekiz	Lizbon Depremi	80000
29	1771	Yaeyama Adaları, Ryukyu	Büyük Yaeyama depremi	12000
30	1781	Pingtung, Tayvan	Bilinmiyor	40000
31	1783	Calabria, İtalya	Kalabriyen depremleri	50000
32	1792	Kyushu, Japonya	Unzen heyelanı	5000
33	1797	Sumatra, Endonezya	Sumatra depremi	Bilinmiyor
34	1806	Goldau, İsviçre	1806 Goldau heyelanı	457
35	1819	Gujarat, Hindistan	Kutch depremi	1543
36	1833	Sumatra, Hollanda Doğu Hint Adaları	1833 Sumatra depremi	Bilinmiyor
37	1854	Nankai, Tokai ve Kyushu, Japonya	Nankai depremi	3000
38	1855	Edo, Japonya	Ansei Edo depremi	10000
39	1867	Virgin Adaları	Virgin Adaları depremi	5
40	1867	Keelung, Tayvan	Deprem	Bilinmiyor
41	1868	Hawaii Adaları	Havai heyelanları	77
42	1868	Arica, Peru (Şili şimdi parçası)	Arica depremi	70000
43	1877	Iquique, Şili	Iquique depremi	2541
44	1881	Andaman ve Nikobar Adaları	Andaman Adası depremi	Bilinmiyor
45	1883	Krakatoa	Krakatoa volkanik patlaması	40000
46	1896	Sanriku, Japonya	Sanriku depremi	27000
47	1905	Loenvatnet, Norveç	Kaya Düşmesi	61
48	1906	Tumaco-Esmeraldas, Kolombiya-Ekvador	Ekvador-Kolombiya depremi	500
49	1908	Messina, İtalya	Messina Denizaltı Heyelanı	123000
50	1918	Porto Riko	San Fermin Denizaltı Heyelanı	118
51	1923	Kanto, Japonya	Kanto Depremi	100000
52	1929	Newfoundland	Grand Banks depremi	28
53	1932	Meksika	Jalisco depremleri	yok
54	1933	Sanriku, Japonya	Sanriku depremi	3068
55	1934	Tafjord, Norveç	Tafjord kaya düşmesi	40
56	1936	Loenvatnet, Norveç	Kaya Düşmesi	74
57	1944	Tönankai, Japonya	Tönankai depremi	1223
58	1945	Arap Denizi, Hint Okyanusu	Belucistan depremi	yok
59	1946	Nankai, Japonya	Nankai depremi	1400
60	1946	Aleutian Adalar	Aleut Adaları depremi	159
61	1952	Severo-Kurilsk, Kuril Adaları, SSCB	Severo-Kurilsk depremi	2336
62	1956	Amorgos, Yunanistan	Amorgos depremi	100
63	1958	Lituya Koyu, Alaska, ABD	Alaska depremi ve heyelan	5
64	1960	Valdivia, Şili, ve Pasifik Okyanusu	Valdivia deprem ya da Büyük Şili depremi	6000
65	1963	Vajont Barajı, Monte Toc, İtalya	Vajont Barajı heyelanı	2000
66	1964	Niigata, Japonya	Niigata depremi	28
67	1964	Alaska ABD ve Pasifik Okyanusu	Alaska depremi	121
68	1965	Shemya Adası, Alaska	Sıçan Adaları depremi	yok
69	1969	Portekiz, Fas	Portekiz depremi	26
70	1976	Moro Körfezi, Mindanao, Filipinler	Moro Körfez depremi	9500
71	1979	Tumaco, Kolombiya	Tumaco depremi	259

Tablo 1'in devamı

Vaka NO	Tarih	Yer	Nedenleri	Ölü sayısı
72	1980	Spirit Gölü, Washington, ABD	1980 St Helens volknaik patlaması	57
73	1983	Japon Denizi	Japonya depremi	104
74	1992	Endonezya	Endonezya depremi	1000
75	1992	Nikaragua	Nikaragua depremi	170
76	1993	Okushiri, Hokkaido, Japonya	Hokkaido depremi	250
77	1994	Java deprem	Java depremi	238
78	1994	Kuril Adaları	Japonya depremi	9
79	1994	Mindoro, Filipinler	Filipin depremi	62
80	1995	Mondorillo, Meksika	Meksika depremi	40
81	1996	Sulawesi Adası	Sulawesi Adası depremi	9
82	1996	Biak, Endonezya	Biak, depremi	161
83	1996	Peru Kıyıları	Peru depremi	12
84	1998	Papua Yeni Gine	Papua Yeni Gine deprem	2200
85	1999	Marmara Denizi	1999 depremi	150
86	2004	Hint Okyanusu	Sumatra depremi	227898
87	2006	Java Adası'nın Güney	Pangandaran depremi	300
88	2006	Kuril Adaları	Kuril Adaları depremi	yok
89	2007	Solomon Adaları	Solomon Adaları depremi	52
90	2007	Şili	aysen Fjord heyelanı	10
91	2007	British Columbia	Chehalis gölü heyelanı	yok
92	2009	Samoa	Samoa depremi	189
93	2010	Şili	Şili depremi	yok
94	2010	Sumatra	Mentawai depremi	408
95	2011	Yeni Zelanda	Christchurch depremi/Cıg	185
96	2011	Japonya'nın Pasifik kıyıları	Tōhoku depremi	16000
97	2013	Solomon Adalar	Solomon Adaları depremi	5
98	2014	İzlanda	Askja heyelanı	Yok
99	2015	Şili	Şili depremi	Yok
100	2016	Yeni Zelanda	Kaikoura depremi	Yok
101	2017	Grönland	Nuugaatsiaq depremi/Heyelan	4
102	2018	Sulawesi	Sulawesi depremi	4000
103	2019	Endonezya	Anak Krakato volkanik Patlaması	589
Toplam Ölü sayısı				1.069.898

Tablo 1 incelendiğinde kayıtlara geçen yıkıcı dalgaların sadece deprem kaynaklı tsunamilerden ibaret olmadığı, heyelan, volkanik patlama, kaya düşmesi gibi jeolojik kökenli olaylara ve çığ, sel, tropik fırtınalar gibi atmosferik kökenli olaylara bağlı da gelişebildiği anlaşılmaktadır. Hatta tarihi kayıtlar jeolojik olaylar sonrası meydana gelen itki dalgalarının deprem kaynaklı tsunamiler kadar yıkıcı etkilere sebebiyet verdiğini net olarak görülmektedir.

Kaynağı ne olursa olsun bu yıkıcı dalgalar geçmişten günümüze kadar büyük maddi kayıpların yanı sıra maalesef 1 milyonu aşan insan kaybına neden olmuştur. Tablo 2'de

yıkıcı dalgaların kaynakları, vaka sayıları ve sebep oldukları can kayıpları sınıflandırılarak özetlenmiştir.

Tablo 2. Yıkıcı dalgaların kaynakları ve vakalar

Dalga Tipi	Dalgayı Oluşturan Doğa olayı	Vaka Sayısı	Vaka (%)	Kayıp Sayısı	Kayıp (%)
İtki Dalgası	Heyelan	14	13.73	126817	11.85
	Kaya Düşmesi	3	2.94	175	0.02
	Sel	1	0.98	2000	0.19
	Çığ	1	0.98	185	0.02
Tsunami	Deprem	76	74.51	859254	80.31
	Denizaltı Volkanları	4	3.92	41467	3.88
	Tropik fırtına vd.	4	3.92	40000	3.74

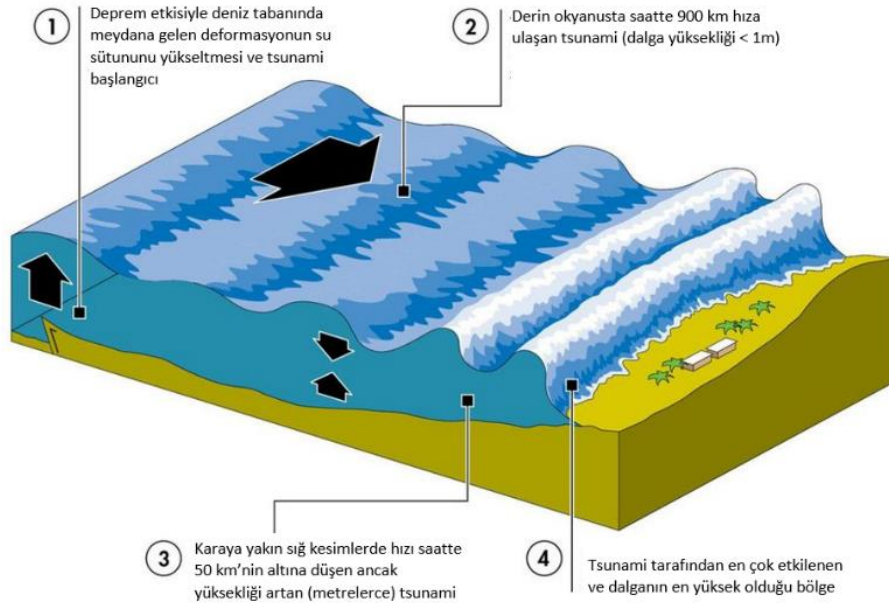
Dünya tarihinde yaklaşık 100 adet yıkıcı dalga kayıtlara geçmiştir. Bu dalgaların %82'ü açık deniz tsunamisi, %18'si lokal tsunamidir (itki dalgası). Açık deniz tsunami oluşumunun %90'ı deprem kaynaklı iken, lokal tsunamilerin %90'ında kütle hareketleri (heyelanlar, moloz akmaları ve kaya düşmeleri) etkili olmuştur. Bu doğa kaynaklı afetlerde 1 milyon 100 bin civarında can kaybı yaşanmıştır.

Çok farklı etkilerle (deprem, heyelan, çığ vb.) ve çok farklı ortamlarda (okyanus, körfez, göl, baraj rezervuarı) oluşabilen farklı tip tsunamiler mevcut olsa da bu tip dalgalar etki boyutları dikkate alınarak **(1)** açık deniz tsunamisi (tele-tsunami) ve **(2)** lokal (yerel) tsunami olarak başlıca iki farklı sınıfa ayrılmaktadır.

1.2. Açık Deniz Tsunamileri

Tsunami olayı tarihte ilk olarak MÖ 426 yılında Yunan tarihçi Thucydides tarafından, MS 365 yılında ise Romalı tarihçi Ammianus Marcellinus tarafından İskenderiye'yi yok eden olaylar dizisini anlatırken tanımlanmıştır. Ancak "Tsunami" kelimesi, 15 Haziran 1896 tarihinde Japonya'nın Sanriku şehrinde meydana gelen bir depremden kaynaklanan dalgaların şehir boyunca tüm kıyı şeridini vurmasını takiben dünya literatürüne girmiştir. Japonca kökenli bir kelime olan Tsunami, liman dalgası anlamını taşır. Genel olarak depremler sonucunda büyük denizlerde veya okyanuslarda oluşan dalgalar "tsunami" olarak adlandırılmaktadır.

Tsunamiler okyanus veya deniz tabanının sığ depremlerin etkisiyle ani olarak yer değiştirmesi ile su kütlesinde meydana gelen dikey harekete bağlı olarak deniz yüzeyinde oluşan ve enerjisinde azalma meydana gelmediği için yayılımı 1000'lerce kilometreyi bulan dalgalarlardır. Tsunami ilk aşamada tek bir dalgadır, ancak oluşumundan çok kısa bir süre sonra 5 veya 6 dalgaya bölünür. Tsunaminin hızı su derinliğinin karekökü ile doğru orantılıdır. Bu nedenle, genel olarak derin okyanuslarda oluştukları zaman hızları saatte 800 km'ye ulaşmaktadır. Bu hız değeri normal bir okyanus dalgası hızının yaklaşık 10 katıdır. Normal koşullarda okyanuslarda rüzgarlarla oluşan dalgaların arasındaki uzaklık (dalga uzunluğu) en fazla 100 m iken, dalga genliği (yüksekliği) 20 metreye ulaşmaktadır. Aynı alanda oluşan tsunami dalgaları arasındaki uzaklık ise 200 km'ye ulaşmaktadır. Ancak tsunami dalga genlikleri (yükseklik) ise 1 metre ile sınırlıdır. Oluştuklarında yükseklikleri 1 metreyi geçmeyen okyanus ötesi tsunamiler sığ sahillere ulaştıkları zaman hızları saatte 50 km'nin altına düşer ve arka kısımdan bir seri halinde gelen artçı dalgalar öndeki dalgalara erişerek yükseklikleri 10 metreye kadar ulaşan çok yüksek dalgalarının oluşmasına neden olur (Şekil 1). Çok uzak mesafelerde çok geniş kıyılar boyunca etkili olan tsunamiler rüzgâr dalgalarından çok daha fazla yıkıcıdır (Yalçiner ve Ersoy 2005).



Şekil 1. Tsunami dalgasının oluşumundan kıyı bölgesine ulaşana kadar geçen süreç (<http://auhumanitieslab.com/> alınmıştır)

1.2.1. Dünyada Tsunami Vakaları

Dünyada son 50 yıl içerisinde okyanus ötesi tsunamilere sebep olan birçok büyük yıkıcı deprem kayıtlara geçmiştir. 22 Mayıs 1960'ta Şili'nin güneyinde meydana gelen 9.5 büyüklüğündeki deprem, kaydedilmiş en büyük deprem olma özelliğini taşımaktadır. Depremin tetiklediği tsunami tüm Pasifik Okyanusu'nu kat ederek Hawaii'ye kadar ulaşmıştır. 25 m yüksekliğiyle, ölçülen en büyük yıkıcı tsunami olarak kayıtlara geçen dalga, Şili kıyılarını vurmuş ve 1260 kişinin ölümüne neden olmuştur. Deprem merkezinden binlerce km uzaklıkta bile 10.7 metreyi bulan dalga yükseklikleri ölçülmüştür (Johnston vd. 2008).

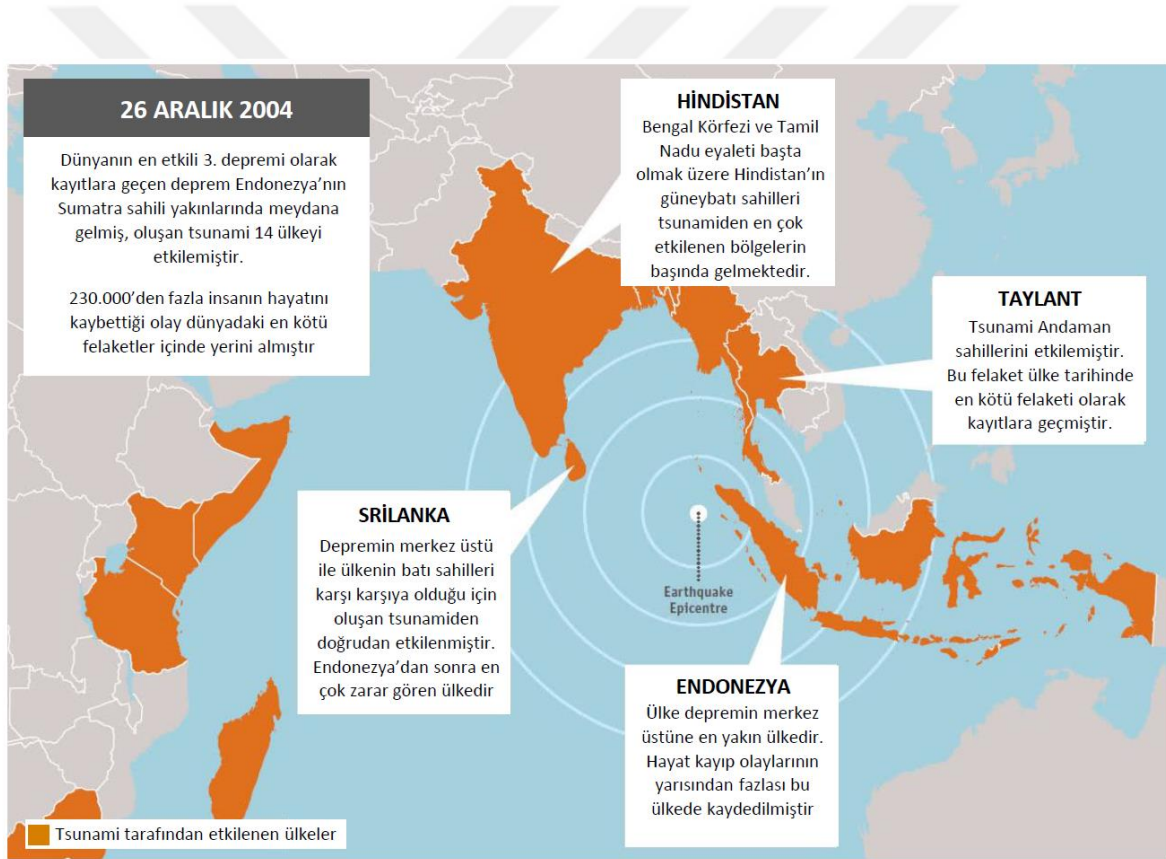
27 Mart 1964 Alaska'da gerçekleşen 9,2 büyüklüğündeki deprem kaydedilmiş en büyük 2. deprem olmasının yanı sıra 4 dakika 38 saniye sürmüştür. Deprem 970 km'lik bir fay boyunca gerçekleşmiş ve 18 metrelik bir yer değiştirme meydana gelmiştir. Depremin tetiklediği tsunami nedeniyle 20 ülkede alarm verilmiş, en büyük tırmanma yüksekliği Shroud Koyu'nda (Alaska) 67 metre olarak ölçülmüştür. Tsunami nedeniyle farklı ülkelerden 122 kişi hayatını kaybetmiştir (Lander 1996).

12 Aralık 1992'de Endonezya'nın Flores Adası civarında meydana gelen 7,8 büyüklüğündeki deprem sırasında 3,2 metre yatay, 1,3 metre düşey yer değiştirme meydana gelmiş ve oluşan tsunami dalgaları 25 metreye ulaşmıştır. 2500'den fazla insan hayatını kaybetmiş, kayıplarının yarısından fazlası tsunamiden kaynaklanmıştır.

17 Temmuz 1998'de Papua Yeni Gine'nin 25 km kadar açığında ters faylara bağlı olarak gelişen 7,0 büyüklüğündeki deprem büyük bir sualtı heyelanını tetiklemiş ve bunun sonucunda büyük bir tsunami oluşmuştur. Depremin nispeten düşük büyüklüğe sahip olmasına rağmen yeraltı heyelanının da etkisiyle yüksekliği 15 metreyi bulan tsunami dalgaları Papua Yeni Gine'yi vurmuş ve 2200'den fazla insan hayatını kaybetmiştir (Tappin vd. 2008).

29 Eylül 2009'da Pasifik Okyanusu'nun güneyinde meydana gelen 8,1 büyüklüğündeki deprem 14 metre yüksekliğe ulaşan tsunami oluşturmuş ve Samoa, Tonga ve Amerikan Samoa'sında 189 kişinin ölümüne sebep olmuştur. Hemen 1 yıl sonra 27 Şubat 2010'da Şili açıklarında meydana gelen 8,8 büyüklüğündeki deprem sonrasında 53 ülkede tsunami alarmı verilmiş ve ABD'den Japonya'ya kadar birçok ülke etkilenmiştir. En çok etkilenen ülke olan Şili'de 3 metreyi bulan tsunami nedeniyle 124 kişi hayatını kaybetmiştir (Fritz vd. 2010).

Benzer birçok örnekle birlikte bu tip tsunamilere en çarpıcı örnekler 2004 yılında Endonezya’da ve 2011 yılında Japonya’da meydana gelen tsunamilerdir. 26 Aralık 2004’te Hint Okyanusu’nda Endonezya’nın Sumatra adası yakınlarındaki meydana gelen ve son 50 yılın en büyük depremlerinden biri olarak kabul edilen Hint Okyanusu depremi tüm zamanların en ölümcül depremlerinden biri olarak tarihe geçmiştir. Yaklaşık 500-600 sn’lik süre boyunca gerçekleşen 9,1 büyüklüğündeki deprem, okyanus tabanında 1200 km’lik bir yırtılmaya neden olmuş, bu yırtılma sonucunda 5-20 metre arasında düşey hareket kaydedilmiştir (Lay vd. 2005). 14 farklı bölgede etkisini gösteren deprem ve sonrasında oluşan tsunami 230.000 kişiden fazla insanın hayatına mal olmuştur. Oluşan dalgalar Afrika kıyılarına kadar ulaşmıştır (Şekil 2).

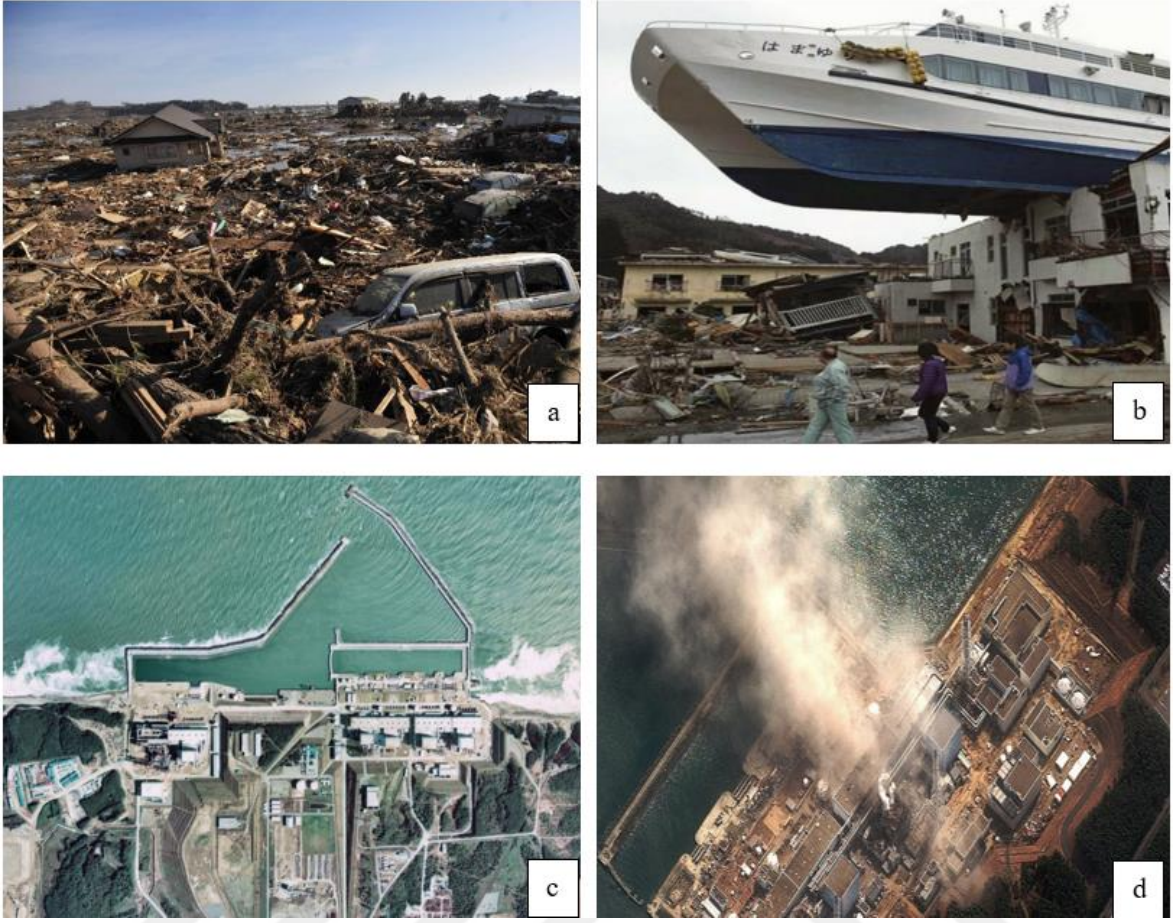


Şekil 2. 26 Aralık 2004 Hint Okyanusu Depremi sonucunda oluşan tsunaminin yayılımı ve etkilenen ülkeler (<https://t24.com.tr> değiştirilerek alınmıştır)

11 Mart 2011 tarihinde Japonya'nın doğu kıyısında deniz tabanından 24.4 km derinde meydana gelen 9.0 büyüklüğündeki deprem ülkenin tüm Pasifik kıyısı boyunca çok büyük zarara yol açan büyük bir tsunamiyi tetiklemiştir. Dalgaların yüksekliği Taro'da 37.9

m, Ofunato'da ise 23 metre olarak kaydedilmiştir. Japonya'da 15.900 kişi hayatını kaybetmiştir (Norio vd. 2011, Mimura vd 2011). Pasifik boyunca yayılan dalgalar, Güney ve Kuzey Amerika'ya, Alaska'dan Şili'ye kadar olan bölgeye kadar ulaşmıştır. Deprem meydana geldiği alan Şili'nin Pasifik kıyısına 17.000 kilometrelik uzaklıkta olmasına rağmen ülkede yüksekliği 2-3 metreye varan dalgalar görülmüştür. Japonya'da meydana gelen deprem etkisi ile oluşan tsunami Fukuşima Nükleer Santrali'ni vurarak nükleer bir kaza yaşanmasına neden olmuştur (Şekil 3a, b, c ve d). Santralin kıyı kesiminde 5,7 metrelik bir tsunamiye dayanabilecek şekilde inşa edilmiş duvarlar olmasına rağmen depremden hemen sonra santrale ulaşan yaklaşık 14 metrelik bir tsunami santral binasını basmış ve tesisin elektrik şebekesine ciddi hasarlar vermiştir.

Elektrik kesintisine bağlı olarak soğutma sistemleri devre dışı kalmış, santraldeki bütün ünitelerde büyük hasarlar oluşmuş, 10 km yarıçapındaki alanın tahliye edilmesine neden olan radyoaktif sızıntılar meydana gelmiştir. 11 Nisan 2011 tarihinde Japonya Nükleer Güvenlik Kurumu, Fukuşima'daki radyoaktif sızıntının tehlike derecesini "Radyolojik Durum Ölçeği" ne göre 7'ye yani Çernobil reaktör kazasıyla aynı seviyeye yükseltmiştir (Rhodes 2014, Jensen vd. 2015).



Şekil 3. 2011’de Japonya’da meydana gelen depremin ardından meydana gelen tsunamiden arda kalanlar (a ve b). Fukuşima Nükleer Santrali ve dalgakıranların tsunamiden önceki durumu (c) ve tsunaminin nükleer santrali vurmasından sonraki görünüm (d) (<https://tr.euronews.com> alınmıştır)

1.2.2. Türkiye’de Tsunami Vakaları

Ülkemizde de kayıtlara geçen birçok tsunami vakası mevcuttur. 3 Eylül 1968 tarihinde Amasra’da meydana gelen 6.6 büyüklüğündeki deprem 24 insanın hayatını kaybetmesine neden olmuş, yaklaşık 3000 ev tamamen yıkılmıştır. Deprem sonrası oluşan yaklaşık 3 metre yüksekliğindeki tsunami kıyıları vurmuş, kıyıdan yaklaşık 50-60 metre içeri kesimlerde etkili olmuştur (Altınok ve Ersoy 2000, Papadopoulos vd. 2011).

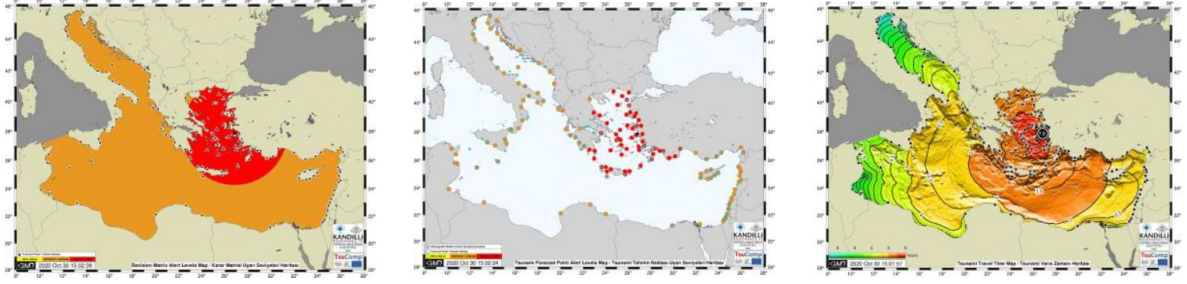
17 Ağustos 1999 tarihinde meydana gelen 7,5 büyüklüğündeki Marmara Depremi büyük çapta can ve mal kaybına neden olmuştur. Tüm Marmara Bölgesi’nde, Ankara’dan İzmir’e kadar geniş bir alanda etkili olan depremde 20.000’e yakın kişi hayatını kaybetmiştir. Depremi gece meydana gelmesi nedeniyle bir kayıt alınamamasına rağmen yapılan arazi

gözlemleri ve bilimsel çalışmalar yüksekliği 2,5 metreye varan bir tsunaminin sahil şeridini vurduğunu ortaya çıkarmıştır (Altınok vd. 2001).

Ülkemizde yaşanan tsunami vakalarına en güncel örnek 2020 yılında Ege Denizi açıklarında meydana gelen deprem sonucu oluşan tsunamidir. 30 Ekim 2020 tarihinde İzmir ilinin Seferihisar ilçesine 23 km mesafede bulunan ve merkez üssü Yunanistan'ın Sisam Adası açıkları olan bir noktada yerin 16,5 km altında meydana gelen 6,9 büyüklüğündeki deprem 16 saniye sürmüştür. Bunun sonucunda da Yunanistan ve Türkiye'nin Ege bölgesinde maddi hasarların yanı sıra can kayıpları olmuştur. Tsunami sonucunda ülkemizde 1 kişi hayatını kaybetmiştir (Kandilli Rasathanesi Basın Bülteni, 2020).

Ülkemizde de özellikle Ege Marmara ve Akdeniz açık sularında deprem etkisiyle oluşmuş veya oluşacak tsunamilerin değerlendirilmesi, etkilerinin belirlenmesi ve nümerik olarak modellenmesi üzerine birçok çalışma yapılmıştır (Özel vd. 2010, Özel vd. 2011, Necmioğlu vd. 2016, Güler vd. 2015, Ghazian vd. 2019, Söğüt ve Yalçiner 2019, Doğan vd. 2021, Sözbilir vd. 2017, Sözbilir vd. 2018, Alpar vd. 2012, Vardar vd. 2015, Öğretmen vd. 2015). Bunlara ek olarak heyelan kaynaklı lokal tsunamilerin modellendiği çalışmalarda mevcuttur (Akgün 2011, Yalçiner vd. 2014, Necmioğlu 2016, Ersoy vd. 2019, Enginar vd. 2019, Karahan vd. 2020).

Ülkemizde Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi Deprem Araştırma Enstitüsü (KRDAE) Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi (BDTİM), Kuzey-Doğu Atlantik, Akdeniz ve Bağlantılı Denizler Tsunami Erken Uyarı ve Zararlarını Azaltma Sistemi Hükümetler Arası Koordinasyon Grubu (ICG/NEAMTWS) çatısı altında, operasyonel bir merkez olarak ülkemiz ve çevresinde Doğu Akdeniz, Ege ve Karadeniz hattı boyunca gerçekleşen depremlerin tümü ve denizlerin su seviyesindeki olası değişimleri 7/24 gözlemlemektedir. BDTİM, söz konusu faaliyetleri kapsamında bu hat boyunca $M_w \geq 5.5$ büyüklüğündeki depremlerde tsunami uyarı ve bilgi mesajları üretmekte ve söz konusu mesajları ülkemizde AFAD'a, bölgemizde de sistemimize üye olan ülkelerin ilgili merkezlerine iletmektedir. Merkez 30 Ekim 2020'de Sisam Adası yakınlarında meydana gelen depremi ve ardından 11. dakikada tsunami uyarı mesajlarını AFAD'a ve sisteme üye olan ülkelerin ilgili merkezlerine iletmıştır. Uyarı mesajı eki olarak gönderilmiş olan haritalar Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. KRDAE-BDTİM tarafından gönderilen tsunami uyarı mesajının harita ekleri (Kandilli Rasathanesi Basın Bülteni, 2020)

Çok sık olmamakla beraber Karadeniz’de de deprem kaynaklı tsunamiler kayıtlara geçmiştir. Bölge, Orta Miyosen yaşlı Arap ve Avrasya plakalarının çarpışmasıyla kontrol edilmekte ve sıkıştırma rejiminin bir sonucu olarak bu tür itki oluşumu doğu-batıya doğru uzanmaktadır. Bu nedenle özellikle Karadeniz’de meydana gelen tarihi tsunamilerin etkileri ile ilgili birçok bilimsel çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların birçoğunda dalga yayılımından çok tarihi tsunamiler hakkında detaylı bilgiler verilmiştir (Altınok ve Ersoy 2000, Altınok 2005, Papadopoulos vd. 2010). Buna ek olarak farklı tarihlerde meydana gelmiş depremlerin bir sonucu olarak oluşmuş tsunamilerin yayılımı nümerik modellerle değerlendirilmiştir (Yalçiner vd. 2004, Mazova vd. 2014, Lobkovsky, 2018). Şekil 5’te son yüz yıl içerisinde Karadeniz’de tsunamiye neden olmuş depremler, Tablo 3’te de bu depremlerin yol açtığı tsunamilerin etkileriyle ilgili bilgiler özetlenmiştir.



Şekil 5. Karadeniz ve yakın çevresinde 100 yıl içerisinde tsunami oluşumuna neden olan deprem odak noktaları (Altınok ve Ersoy 2000, Yalçiner vd. 2004, Papadopoulos vd. 2010)

Tablo 3 değerlendirildiğinde özellikle farklı tarihlerde meydana gelen depremlerin Karadeniz sahillerinde 3,0 metreye varan tsunamilerin oluşmasına neden olduğu görülmektedir. Hatta Karadeniz'den yaklaşık 200 km güneyde bulunan Erzincan'da 1939 tarihinde meydana gelen deprem sonucu oluşan dalgalar 500 km'lik denizi kat ederek Rusya'nın Novorossisk bölgesinde 50 cm'ye varan tsunaminin oluşmasına neden olmuştur.

Tablo 3. Son 100 yıl içerisinde Karadeniz'de tsunami oluşumuna neden olan depremler ve kayıtlara geçen etkileri (Altınok ve Ersoy 2000, Yalçiner vd. 2004, Papadopoulos vd. 2010)

Deprem No (Şekil 5)	Deprem Tarihi	Tsunami Görülen Yer	Açıklama	Kıyıya tırmanma yüksekliği (m)
1	1901	Bulgar sınırı	Balçık bölgesinde tsunami	2.5 +
2	1905	Karadeniz'in KD sahili	Anapa (Rusya) açıklarındaki dalga bir gemiyi salladı	-
3	1909	Batı Kafkasya	Idokopas Burnu açıklarında üç adet dalga	-
4	1927	Güney Kırım	Yalta yakınlarındaki Kereh Boğazı'nda deniz seviyesi değişimi ve dalgalanma	0.3
5	1927	Güney Kırım	Balaklava'da deniz 15 metre kara içerisine ilerledi, 2 ev yıkıldı	1.0
6	1927	Güney Kırım	Balaklava'da deniz seviyesi değişti	0.3
7	1939	Türkiye sahili ve Doğu Karadeniz	Ünye'de deniz 100 m geri çekildi, gel-git ölçerler Novorossisk'te 53 cm yükseklik ölçtü	0.5

Tablo 3'ün devamı

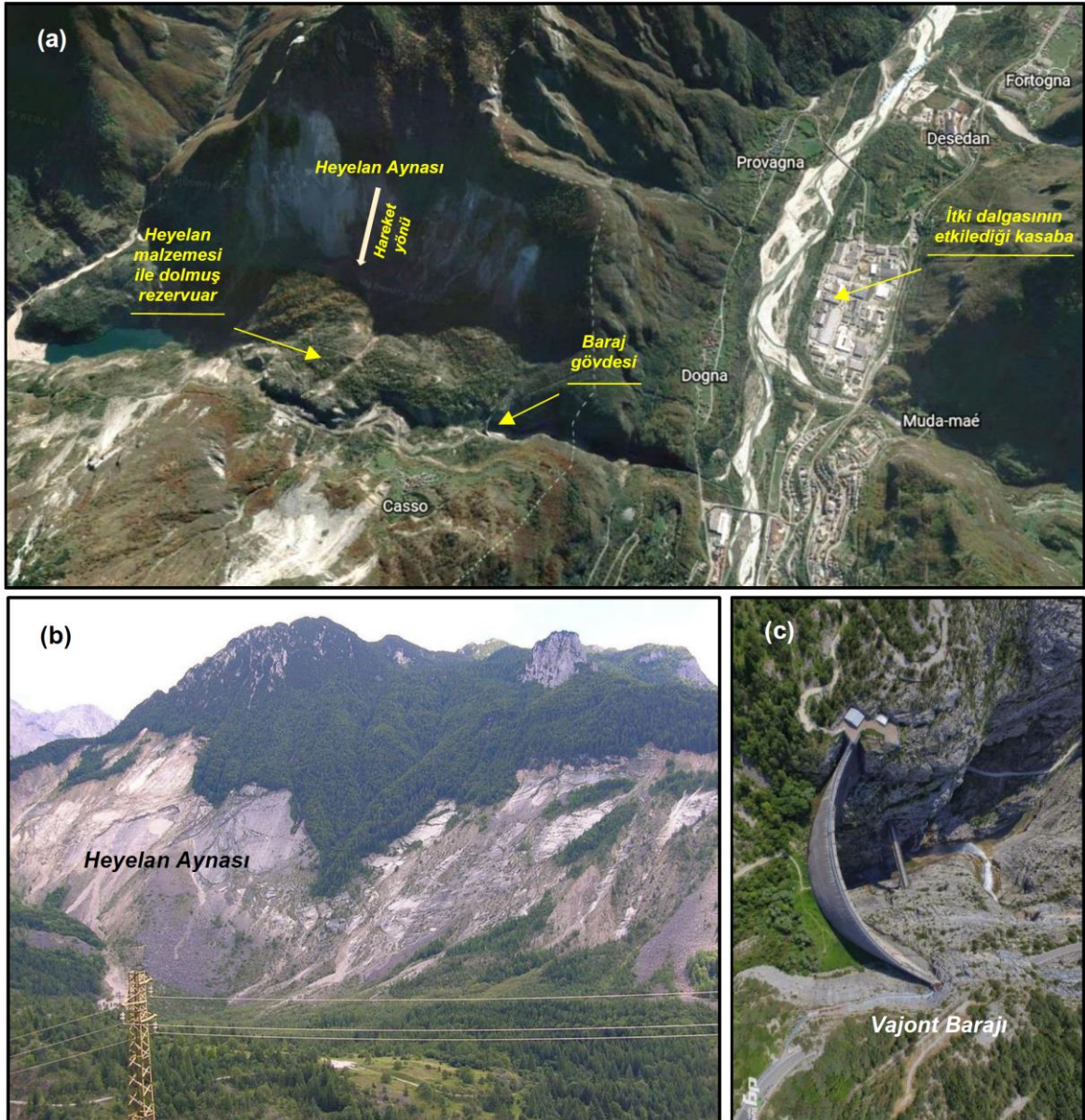
Deprem No (Şekil 5)	Deprem Tarihi	Tsunami Görülen Yer	Açıklama	Kıyıya tırmanma yüksekliği (m)
8	1966	Kırım, Anapa	Gel-git ölçerler Gelencik'te 50 cm yükseklik ölçtü	0.5
9	1968	Karadeniz'in Türkiye sahilleri	Amasra'daki Büyük Liman'da su 3 m yükseldi ve botları kıyıya sürükledi	3.0
10	1970	Doğu Karadeniz	Soçi'de 80 cm yüksekliğinde ve 3 dakika periyodunda deniz dalgalanmaları	0.8
11	1990	Azak Denizi'nin güney sahili	Ani ve kısa süreli 40 cm'lik deniz seviyesi yükselimi	0.4
12	1999	Marmara ve Karadeniz	Marmara kıyılarında birçok bina su altında kaldı	2.5
13	2007	Karadeniz'in Bulgar sahili	Tsunami Kavarna ve Balçık'ta küçük balıkçı tekneleri kıyıya vurdu	1.2

1.3. İtki Dalgaları (Lokal Tsunamiler)

İtki dalgaları (lokal tsunami); heyelanlar, kaya düşmeleri, buzul hareketleri ve çığ gibi kütlelerin hareketi sonucu yapay ve/veya doğal su birikintilerinde darbe etkisi ile oluşan dalgalarlardır. İtki dalgalarının oluşmasında etkili olan bu tür doğa olayları büyük bir oranda deprem ve iklimsel faktörler tarafından tetiklenmektedir. Okyanus ve deniz gibi büyük hacimli su kütlelerinde meydana gelen itki dalgalarının çoğunlukla küçük olmalarına bağlı etkileri hissedilmese dahi yıkıcı sonuçlarının olduğu vakaların dünya çapında kayıtlara geçtiğini de belirtmek gerekmektedir.

Heyelan kaynaklı itki dalgalarından en çarpıcı örnek 9 Temmuz 1958 tarihinde Alaska'da sınırları içinde meydana gelmiş ve dünya üzerinde oluşmuş en büyük itki dalgası olarak kayıtlara geçmiş olan dalgadır. Alaska Fayının kırılması sonucu meydana gelen bir deprem, Lituya Körfezi'nin kuzeydoğun kıyısında bulunan yamaçtan yaklaşık 40-45 milyon metreküp kaya kütlelerinin 950-960 metre yükseklikten hareketine neden olmuş ve kütlelerin suya çarpması sonucunda oluşan yaklaşık 530 metre yüksekliğindeki itki dalgası ana kaya üzerinde bulunan metrelerce kalınlıktaki toprak örtüsünü süpürerek körfez hattı boyunca milyonlarca ağacın kökten sökülmesine neden olmuştur. Yerleşim alanlarının olmadığı, doğal bir körfezde gelişen bu olayda 5 insan hayatını kaybetmiştir. Tarihi kayıtlarda baraj rezervuar alanlarında meydana gelmiş olan heyelan kaynaklı itki dalgalarının çok daha yıkıcı etkilere neden olduğu görülmektedir. Dünya genelinde kayıtlara geçmiş büyük baraj yıkılmaların yaklaşık %10'unda baraj göl alanlarındaki heyelanlar etkili meydana geldiği bilinmektedir (Ertunç ve Çetin 1999; Tezel 2015).

Çalışmalar bu tür heyelanların sıklıkla deprem etkisiyle, ani ve kuvetli yağışlara veya rezervuarlardaki su seviyesinin ani değişimlerine bağlı olarak meydana geldiğini göstermektedir (Riemer, 1995). Bu tür bir olaya en çarpıcı örnek olarak 1963 yılında İtalya’da Vajont Barajı göl alanında meydana gelen bir heyelan verilmektedir (Şekil 6). Vadi yamacındaki olağan hidrostatik su basıncındaki hızlı değişimlerin neden olduğu heyelan baraj göl alanına çarparak 250 metre yüksekliğinde bir itki dalgası oluşturmuş, oluşan bu dalga baraj gövdesini aşarak mansap tarafında bulunan birçok yerleşim alanını yok ederek yaklaşık 2000 kişinin ölümüne neden olmuştur (Zhang et al. 2010). Ülkemizde bunun gibi bir olay 02.12.2018 tarihinde Mardin’in Derik ilçesinde aşırı yağışlar sonucunda ilçe merkezine yaklaşık 24 km uzaklıkta bulunan Bayır Köyü ve çevresinde meydana gelen heyelanların toprak dolgu baraj gövdesini yıkması sonucu meydana gelmiştir. Bu olay neticesinde 3 köy ve 2 mezradaki tarım alanları tamamının zarar görmesiyle sonuçlanan olayda can kaybı yaşanmamıştır.

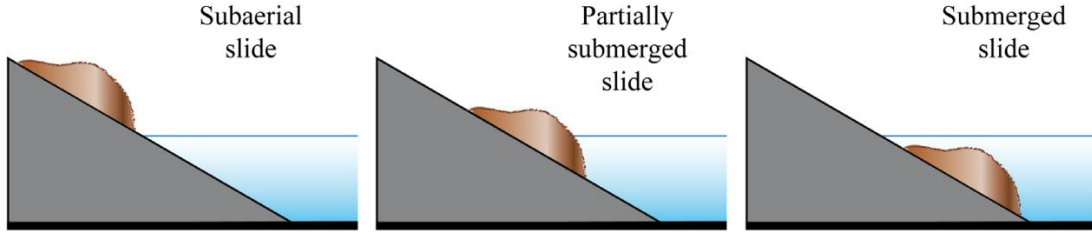


Şekil 6. Vajont Barajı rezervuarında 1963 yılında meydana gelen heyelanın günümüzdeki görünümü (a ve b) ve dalgadan etkilenmeyen baraj gövdesinin arkasını bütünüyle doldurmuş heyelan malzemesi (c)

1.3.1. İtki Dalgalarının Oluşumu ve Yayılımı

İtki dalgasının oluşumu ve yayılımı birçok faktöre bağlıdır. İtki dalgası oluşumuna neden olan kütlenin konumu oluşacak dalganın fiziksel özellikleri ve yayılımı üzerinde etkilidir. Bu nedenle çalışmalarda heyelanların konumlarının sınıflandırılması büyük önem taşımaktadır. İtki dalgalarına neden olan heyelan kütlelerinin konumları;

- (i) su seviyesinin üstünde,
- (ii) kısmen batık,
- (iii) tamamen batık şeklinde tanımlanmaktadır (Şekil 7).

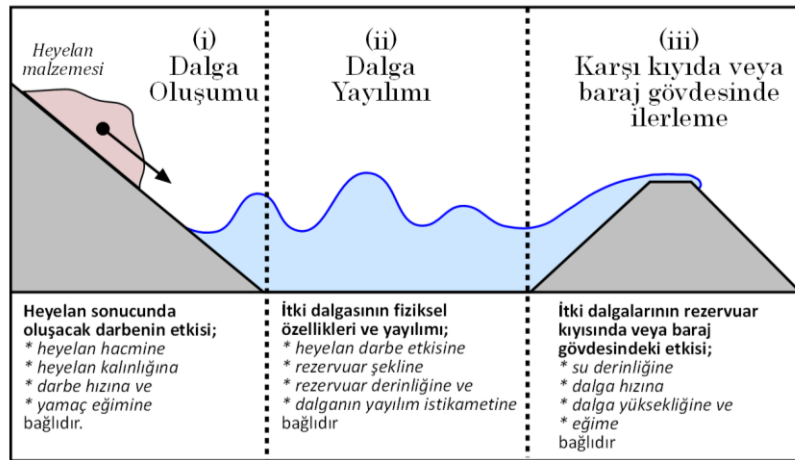


Şekil 7. İtki dalgalarını oluşturan kütlelerin konumları

Bununla birlikte itki dalgasını oluşturan heyelan kütlesi hangi konumda olursa olsun dalgalarının oluşum mekanizması 3 ayrı aşamada ele alınmaktadır (Şekil 8). Bunlar;

- (i) heyelan etkisiyle dalga oluşumu,
- (ii) dalganın rezervuarda yayılımı ve

(iii) dalganın topografik bir engelle ve/veya baraj gövdesine çarpması şeklinde sıralanmaktadır. İtki dalgalarından kaynaklanacak olumsuz etkilerin belirlenmesinde yukarıda belirtilen 3 ayrı aşama, bir bütün olarak ele alınmaktadır, fakat farklı modellerle analiz edilmektedir.



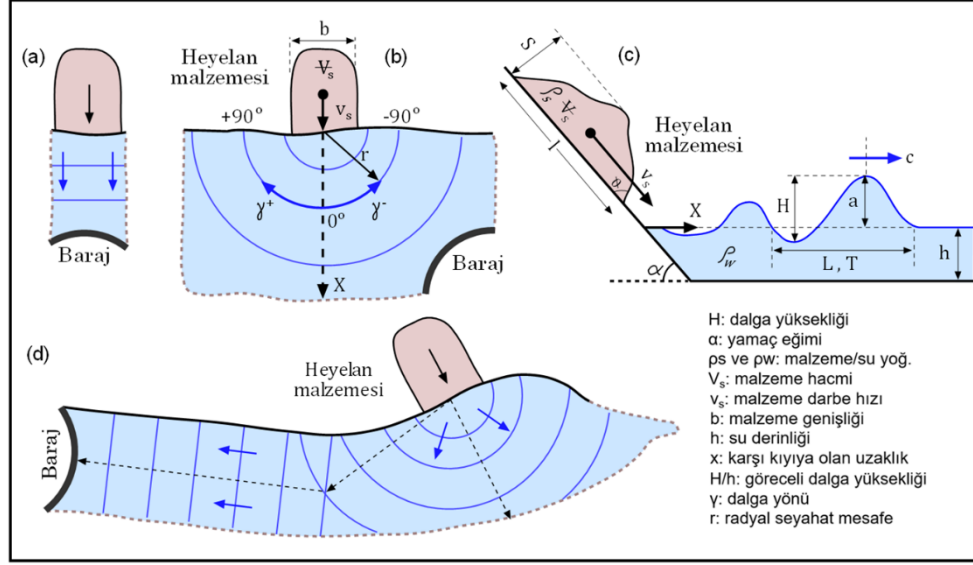
Şekil 8. Yatay bir göl alanında bir itki dalgasına ait üç ayrı aşama (i: heyelan darbesi ile dalganın oluşumu, ii: dalganın göl alanındaki yayılımı, iii: itki dalgasının karşı kıyıda ve/veya baraj gövdesi üzerinde ilerlemesi)

Heyelan/kütle hareketi sonucunda oluşacak darbenin etkisi heyelan malzemesinin kalınlığına, hacmine, kütleinin darbe hızına ve yamacın eğimine bağlıdır. Bu nedenlerden dolayı heyelan malzemesinin hacminin ve boyutlarının (yanal ve düşey devamlılığının) belirlenmesi aşaması çalışmaların temelini oluşturmaktadır. Dalga yayılımının ve etkisinin gerçeğe yakın bir şekilde modellenmesi için jeolojik ve jeoteknik verilerin doğruluğu oldukça önemlidir.

İtke dalgalarının fiziksel özellikleri ve yayılımı heyelan malzemesinin çarpma hızına, rezervuar geometrisine, su derinliğine ve dalganın yayılım doğrultusuna bağlıdır.

İtke dalgalarının rezervuar kıyısındaki veya baraj gövdesindeki etkisi ise statik su seviyesi derinliğine, dalganın ilerleme hızına, dalga yüksekliğine, karşı kıyı ve/veya baraj gövdesinin eğimine bağlı olarak değişmektedir (Şekil 8).

İtke dalgalarının rezervuardaki yayılımı genel olarak (i) doğrusal ve (ii) dairesel (radyal) olmak üzere iki başlıkta toplanmaktadır (Heller, 2009). Hareket eden heyelan kütleinin genişliği rezervuar genişliğinden daha büyük ise oluşan itke dalgaları rezervuar boyunca doğrusal olarak ilerler. Böyle bir durumda yanal yayılma söz konusu olmaz (Şekil 9a). Hareket eden heyelan kütleinin genişliği rezervuar genişliğine göre çok küçük olması durumunda dalgalar çarpma zonundan bağımsız olarak dairesel (radyal) şekilde yayılır (Şekil 9b ve d). İtke dalgalarının yayılımı direkt olarak rezervuar geometrisi ile ilişkili olup, her iki yayılım şekli itke dalgalarının fiziksel özellikleri ve dalgalardan kaynaklanacak olan etkiler farklı modellerle analiz edilmektedir.



Şekil 9. Heyelan tetikli itki dalgalarının yayılım doğrultusu ve fiziksel özellikleri (a: dar ve uzun rezervuarda doğrusal (lineer) dalga yayılımı, b: geniş rezervuarda dairesel (radyal) dalga yayılımı, c: heyelan malzemesinin ve meydana gelen dalganın fiziksel özellikleri, d: karmaşık geometriye sahip rezervuarlarda dairesel (radyal) ve doğrusal (lineer) dalga yayılımı)

1.3.2. İtki Dalgalarının Fiziksel Özelliklerinin Tespit Edilmesinde Kullanılan Yöntemler

Dünya literatüründe, heyelan kaynaklı itki dalgalarının oluşum mekanizmasının araştırılması amacıyla yapılan çalışmalarda, heyelan malzemesinin konumu ve fiziksel özellikleri dikkate alınarak 4 ayrı oluşum modeli ortaya atılmıştır. Bunlar; **(i)** blok modeli (Russell 1837), **(ii)** piston modeli (Miller 1970), **(iii)** granüler kayma modeli (Slinger and Voight 1982) (iv) darbe modeli (Prins 1958) olarak sıralanabilir. Buna ek olarak, bu dalgaların fiziksel özelliklerinin belirlenmesine yönelik 5 farklı yöntem önerilmektedir (Heller et al. 2009). Bunlar;

- (i)** arazi verilerden elde edilen ampirik eşitliklerin kullanımı (Fritz 2002, Quecedo et al. 2004),
- (ii)** analitik değerlendirmeler (Di Risio 2005),
- (iii)** laboratuvar deneylerinden elde edilen ampirik eşitliklerin kullanımı (Hughes 1993; Heller et al. 2008),
- (iv)** nümerik simülasyonlara dayalı modeller (Grilli et al. 2002, Montagna et al. 2011, Gabl et al. 2015) ve

- (v) prototip özel modeller prototip modeller ile gerçekleştirilen deneyler olarak sıralanabilir.

Tablo 4'te yöntemler çeşitli kriterlere bağlı olarak karşılaştırılmış şekilde özetlenmiştir.

Tablo 4. Heyelan kaynaklı dalga özelliklerinin tahmininde kullanılan yöntemlerin karşılaştırılması (Heller vd. 2009)

Ölçütler	Yöntem (1)	Yöntem (2)	Yöntem (3)	Yöntem (4)	Yöntem (5)
Sonuçların kalitesi	Kaba tahmin	Kaba tahmin	Tahmin	Tahmin-kesin	Kesin
Zaman	Az	Az	Az	Fazla-Çok fazla	Çok fazla
Maliyet	Az	Az	Az	Fazla-Çok fazla	Çok fazla
Kullanıcı	Mühendis	Mühendis	Mühendis	Uzman	Mühendis
Girdi parametrelerinin önemi	Orta	Az	Orta	Yüksek	Yüksek

* (1) arazi deneylerinden elde edilen ampirik eşitlikler (2) analitik değerlendirmeler (3) laboratuvar deneylerinden elde edilen ampirik eşitlikler (4) nümerik simülasyonlar (5) prototip özel model deneyler

Arazi verilerinden yararlanılarak oluşturulan ampirik eşitlikler (Yöntem 1) ve analitik değerlendirmeler (Yöntem 2) kullanılarak yapılan analizler zaman, maliyet ve girdi parametrelerinin basitliği düşünüldüğünde değerlendirme kolaylığı açısından kullanışlı yöntemlerdir. Ancak her iki yöntemde de kaba tahminden öteye gidilemediği için bu yöntemler uygulamada çok fazla tercih edilmemektedir. İki yöntemin dezavantajları aşağıda sıralanmıştır;

1. Ölçek etkisi dikkate alınmamaktadır.
2. Araziden elde edilen değerler ölçümlerden çok, geçmişte yaşanmış olayların tahmin modellerine dayanmaktadır.
3. Girdi parametrelerinin hesabı kabullere göre yapılmaktadır.
4. Geliştirilen birçok formül itki dalgalarının bütün özelliklerinden ziyade sadece birkaç özelliğini kapsamaktadır.

Günümüzde itki dalgalarının fiziksel özelliklerinin ortaya konulmasında, laboratuvar deneylerinden elde edilen ampirik eşitliklerin (Yöntem 3) kullanımı en çok tercih edilen yöntemdir (Muller 1995, Fritz 2002, Panizzo 2004, Zveifel 2004, Heller 2007). Ancak bu yöntem her ne kadar zaman ve maliyet açısından avantajlı olsa da bu yöntemde rezervuarın her noktası için bilgi edinmek mümkün değildir. Ayrıca yöntemde, rezervuar geometrisi ve yamaç topografyası gibi etkiler de ihmal edildiği için elde edilen sonuçlar sadece tahmin niteliğindedir.

Bu yöntemin dezavantajları aşağıda sıralanmıştır:

1. Elde edilen sonuçların test edilmesi amacıyla mutlaka nümerik analizlere ve/veya prototip modellerde yapılan deneylere ihtiyaç duyulmaktadır.
2. Basit geometriye sahip rezervuar alanları için uygun olduğundan özel şartlar içeren bölgelerde uygulanamaz.

Yukarıda açıklanan 3 yöntemle, baraj rezervuar geometrisinin büyük ölçekli topografik haritalarla (1/500 veya daha büyük) modellenmesi mümkün olmadığı için rezervuar boyunca dalga yayılımı 1/5000-1/10000 ölçekli verilerin işlenebildiği nümerik modellerce çözülebilmektedir (Yöntem 4). Günümüzde daha çok 2 boyutlu nümerik analizler tercih edilse de bu modeller çoğu durumda ampirik ilişkilere dayanmakta, sadece basit geometriye sahip rezervuar alanlarında tutarlı sonuçlar vermekte ve yalnızca mekânsal bilgiler içermektedir. Zamansal ve mekânsal boyutun birlikte yorumlandığı, yani yapının ve/veya doğanın mühendislik özelliğinin hangi sürede ne kadar değiştiğinin bir bütün olarak değerlendirildiği nümerik analiz tabanlı simülasyona dayalı 3 boyutlu modellemeler ise son on yılda önem kazanmaya başlamıştır. Gerek dünyada gerekse ülkemizde halen gelişmekte olan bu yöntemler, günümüzde kullanılan en bilimsel, en doğru sonuç veren ve sürekli yenilenebilen yöntemler içinde yerini almaktadır. Ancak her ne kadar itki dalgalarının değerlendirilmesinde kullanılan en güncel, bilimsel ve teknolojik yöntemlerden biri olsa da nümerik modellerde bazı sınırlamalar mevcuttur. Bunlar aşağıda sıralanmıştır;

1. Nümerik analizlerde sınır koşulların çok iyi tanımlanması gerekir. Bu nedenle bu modellerin, farklı analizlerden elde edilen sonuçlara göre kalibre edilmesi gerekebilir.
2. Nümerik analizler, modelde kullanılacak hücre boyutlarının metre ölçeğinden daha küçük olması durumunda gerçeğe çok yakın sonuçlar verebilir. Baraj rezervuar alanlarında gelişen heyelan kaynaklı itki dalgalarının yayılımının bazen kilometrelerce devam edebildiği düşünüldüğünde, bu modellerde bu denli küçük hücrelerle çözümleme yapmak mümkün olmamakta, istenilen hassasiyette sonuçlar elde edilememektedir.
3. İtki dalgasının yayıldığı rezervuarın geometrisinin büyük ölçekli topografik haritalarla (1/500 veya daha büyük) modellenmesi mümkün olmadığı için rezervuar boyunca dalga yayılımı 1/5000-1/10000 ölçekli verilerin işlenebildiği nümerik modellerce çözülebilmektedir. Bu durum nümerik hassasiyetini azaltmaktadır.

İtke dalgalarının analizinde nümerik modellerden kaynaklanan bu sınırlamaların giderilmesi, daha detaylı ve hassas (1/500 veya daha büyük) sonuçların elde edilmesi amacıyla son yıllarda 3 boyutlu prototip modeller kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde en kesin sonuçların elde edildiği (Bakınız Tablo 4) prototip modellerde kilometrelerce uzunluğa sahip rezervuarın tanımlanması mümkün olmayıp prototip modellerin kullanımında da bazı sınırlamalar mevcuttur. Bunlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

1. Büyük ölçekte uzun rezervuar geometrilerinin Prototip modellerde inşa edilmesi mümkün değildir. Meydana gelmiş vakalar üzerinde yapılan çalışmalarda çok küçük alanların prototip modelleri inşa edilebilmiştir.
2. Sadece kısa mesafeler için (1-2 km) tutarlı ve hassas sonuçlar verebilmektedir.
3. Ölçeğin küçültülmesi durumunda (itke dalgaları için 1/1000'den küçük) hassas sonuçlar elde edilememektedir.

Bilimsel literatür değerlendirildiğinde, bu yöntemler içinde en kesin sonuçların prototip modellerde yapılan deneylerde elde edildiği, ancak bu deneylerin ise çoğunlukla geometrisi önceden projelendirilmiş olan mühendislik yapıları için uygulandığı anlaşılmaktadır (Şekil 10 ve 11). Taşkın sularının dolu savak, cebri boru vb mühendislik yapılarına etkisinin araştırıldığı bu çalışmalar 3 boyutlu nümerik modellerle desteklenmektedir (Usta 2014, Ninot et al. 2015, Silva 2015, Sarkardeh et al. 2015).

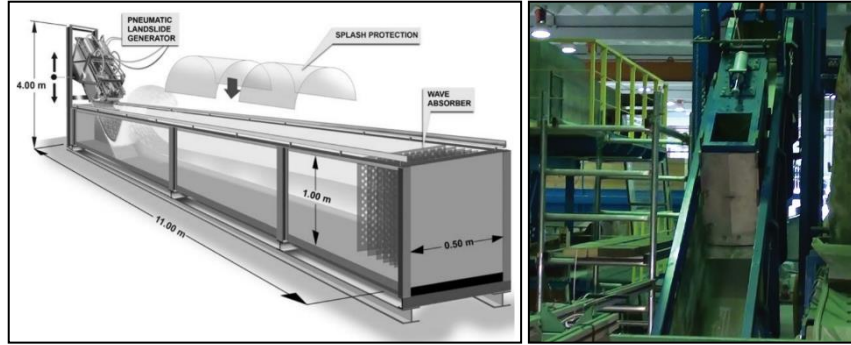


Şekil 10. Taşkın dalgalarının mühendislik yapıları üzerindeki etkilerinin belirlenmesi için hazırlanan fiziksel prototip modeller (Usta 2014, Ninot et al. 2015)



Şekil 11. Salomende Barajı dolu savak yapısında taşkın etkisinin araştırılması amacıyla hazırlanan prototip ve nümerik model (Silva 2015)

Heyelan kaynaklı itki dalgalarının değerlendirilmesi amacıyla inşa edilen prototip fiziksel modeller ise 3 boyutlu gerçek topografik arazi yüzeyini yansıtmaksızın dalga havuzlarında inşa edilen rampalardan oluşmaktadır (Fritz 2002, Panizzo et al. 2005, Heller 2009, Heller et al 2010, Fuchz et al 2010, Montagna et al. 2011, Bregoli et al 2013, Evers and Hager 2015) (Şekil 12). Bu modeller daha çok ampirik eşitliklerin üretilmesi amacıyla tercih edilmektedir. Bununla birlikte arazi modeli yansıtan prototip modellerde ise çoğunlukla baraj yenilmeleri sonucunda oluşacak taşkın dalgalarının yayılımı ve etkileri araştırılmıştır (Tayfur and Güney 2013, Haltas et al 2016) (Şekil 13).



Şekil 12. Laboratuvar ortamında oluşturulan heyelan rampası ve rezervuara ait fiziksel modelin plan (Fritz 2002) ve gerçek modeli (Montagna et al. 2011)



Şekil 13. Baraj yıkılma senaryosu oluşacak dalgaların etkilerinin araştırılması (3 boyutlu topografik modelin oluşturulması ve barajın yenilmesi) (Tayfur and Güney 2013).

1.4. Tsunami ve İtki Dalgalarının Modellenmesi

Dünya ölçeğinde yaşanan benzer birçok felaketten sonra, tsunamilerin oluşum mekanizması, yayılımı ve etkileri ile tahmin ve erken uyarı sistemlerine yönelik çalışmalar son 25-30 yıl içerisinde hızlanmış, gerek lokal tsunamiler (özellikle itki dalgaları) (Huber ve Hager 1997, Fritz vd. 2004, Panizzo vd. 2005, Heller vd. 2009, Di Risio vd. 2011, Ersoy vd. 2019, Karahan vd. 2020, Zang vd. 2020, Wang vd. 2021, Sadeghifar vd. 2022, Guo vd. 2022, Geertsema vd. 2022, Rubin vd. 2023, Xue vd. 2023) gerekse okyanus ötesi tsunamiler ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır (Ghosh vd. 2016, Sogut ve Yalciner 2019, Honarmand vd. 2020, Satake vd. 2020, Xie vd. 2023,). Tsunamiler üzerine yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde başlıca 2 farklı modelin söz konusu olduğu görülmektedir. Bunlar (1) tahmin modelleri ve (2) taşkın yayılım modelleridir.

1.4.1. Tahmin Modelleri

Bir tahmin modelinin temel amacı, bir deprem sonrası oluşacak tsunaminin etkileyeceği kıyı bölgelere varış zamanını ve bu bölgelerdeki yüksekliğini tahmin etmek ve erken uyarı sistemlerinin geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır (Watcher vd. 2012). Çok küçük ölçekli olan bu uygulamalarda açık okyanusta veya denizde bir tsunaminin gerçek zamanlı olarak yayılımı modellenir (Erduramaz 2004, Titov 2005, Consoli vd. 2014, Rabinovich 2014, De Risi ve Goca 2017, Satake vd. 2020). Bu tür çalışmalarda çok büyük

seyahat mesafeleri (1000'lerce km) modellendiği için detay batimetrik ve topografik haritalara ihtiyaç duyulmaz.

Okyanus ötesi tsunamilerde orta ve küçük ölçekli haritalar tercih edilmekte (Zhang vd. 2008, Ghosh vd. 2016, Satake vd. 2020), kıyı topografyası ayrıntılı olarak modellenmemektedir. Çünkü yüzlerce km'lik mesafeler boyunca dalga yayılımının analiz edildiği çalışmalarda yüzey ve deniz tabanı topografyasının büyük ölçekli ($>1/10.000$) ve ayrıntılı modellerle karakterize edilmesi mümkün değildir. Bu nedenle çalışmalar daha çok deprem dalgalarının kıyıya ulaşma sürelerinin ve kıyı boyunca farklı bölgelere ulaşacak dalgaların maksimum yüksekliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılmaktadır. Bu nedenle bu çalışmalarda genel olarak mevcut haritalardan yararlanılmakta, bölgeye özel büyük ölçekli harita çalışmaları yapılmamaktadır (Tablo 5). Ayrıca, nerede, hangi derinlikte, hangi büyüklükte bir depremin ne zaman meydana geleceğinin bilinmesi mümkün olmadığı için, okyanus ötesi tsunamilerin araştırıldığı çalışmalar çoğunlukla meydana gelmiş vakaların değerlendirilmesine ve modellenmesine odaklanmaktadır (Titov vd. 2005, De Risi vd. 2017).

1.4.2. Taşkın Yayılım Modelleri

Bir taşkın modelleme çalışması, etki bölgesine ulaşan tsunaminin kara içindeki yayılımını ortaya koymak amacıyla uygulanır (Sinaga vd. 2011, Cankaya vd. 2016, Ghosh vd. 2016, Farhan vd. 2017, Septiangga 2019). Dalga dinamiğini doğru olarak modelleyebilmek için bu tür çalışmalarda yüksek çözünürlüklü batimetrik ve topografik haritalar kullanılır. Bu haritalar, daha yüksek çözünürlüklü veriler elde edildikçe ve kıyı değişiklikleri meydana geldikçe güncelleme gerektirir.

Taşkın modelleme çalışmaları birden fazla tsunami senaryosunun dikkate alındığı ve kıyıların tsunami tehlikesine karşı durumunun değerlendirildiği olasılıklı yaklaşımlardır. Bu yaklaşımlarda en kötü koşul dikkate alınarak da modelleme yapılabilir. Bu çalışmalarda üretilen zamansal ve mekânsal veriler acil durum yöneticileri ve şehir planlamacıları tarafından öncelikle tahliye yolları ve hayati altyapının yerini belirlemek için kullanılabilir.

Lokal tsunamiler (İtke dalgaları) üzerine yapılan çalışmalar dalgaların kıyı kesimlere ulaşma süresinden daha çok etki alanı haritalarının (taşkın yayılım haritaları) hazırlanmasına odaklanmaktadır (Karahan vd. 2020).

Literatür değerlendirildiğinde, heyelan, çığ, kaya düşmesi gibi etkilerle oluşan lokal tsunamilerin araştırıldığı çalışmaların okyanus ötesi (veya açık deniz) tsunamilerin modellendiği çalışmalara göre çok daha ayrıntılı topografik ve batimetrik veri içerdiği (Karahan vd. 2020, Zang vd. 2020, Wang vd. 2021) ve bu çalışmalarda genel olarak fotogrametrik veya yersel ölçümler ile hazırlanmış 1/5000'den büyük ölçekte haritalar tercih edildiği görülmüştür (Ersoy vd. 2019, Zang vd. 2020, Wang vd. 2021).

Tablo 5. Tsunami yayılımının değerlendirilmesinde uygulanan yöntemlerin, analizlerin ve harita ölçeklerinin karşılaştırılması

	Parametreler	Lokal tsunami/İtki Dalgası	Okyanus ötesi tsunami/Tele-tsunami
Yöntem	Ampirik eşitlikler 2 boyutlu nümerik analizler 3 boyutlu nümerik simülasyonlar	Çok Orta Az	Az Orta Çok
Analiz Ölçeği	Küçük ölçek (< 1/1.000.000) Orta ölçek (1/1.000.000 – 1/100.000) Büyük ölçek (1/100.000 – 1/10.000) Çok büyük ölçek (>1/10.000)	- Az Orta Çok	Çok Orta Az -
Kullanılan Harita	Mevcut haritalar Fotogrametrik ölçümler Yersel Ölçümler	Çok Orta Az	Çok Orta Az -
Uygulanan Yöntemin Amacı		Kıyı bölgeleri için mekânsal taşkın yayılım haritalarının hazırlanması	Deprem dalgalarının kıyıya ulaşma sürelerinin ve yüksekliklerinin tahmini
Not: Çok, Orta ve Az kelimeleri tercih sıklığını temsil etmektedir.			

1.5. Çalışmanın Amacı ve Özgün Değeri

Dünya ölçeğinde heyelan kaynaklı oluşan itki dalgalarından dolayı yaşanan birçok felaketten sonra, barajların inşa edileceği alanlarda bulunan heyelanların fiziko-mekanik özelliklerinin, oluşum mekanizmasının ve stabilitesinin araştırıldığı çalışmalara verilen önem artmıştır. Baraj gövdesinin inşa edileceği alanlarda yapılan çalışmalara ek olarak baraj göl alanlarında bulunan heyelanlı alanlar da detaylı olarak incelenmeye başlanmıştır. Fakat, bu heyelanların olası hareketi sonucunda meydana gelecek itki dalgalarının rezervuar alanına ve baraj gövdesi üzerindeki etkilerinin tespit edilmesi amacıyla yapılması gereken çalışmalar günümüzde dahi ihmal edilmektedir.

Birçok araştırmacı tarafından yaklaşık son 50 yıl içerisinde deprem kaynaklı tsunamilerin oluşum mekanizması ve yayılımı ile ilgili araştırmalar yapılmış olsa da heyelan kaynaklı itki dalgaları üzerine yapılan çalışmalar ancak son yıllarda önem kazanmaya başlamıştır (Kaczmarek et al 2015, Yin et al. 2016, Ersoy et al. 2019, Karahan vd. 2020).

Bu çalışma kapsamında da Gümüşhane ili sınırları içerisinde ve Harşit Çayı üzerinde inşa edilen Kürtün Barajı göl alanında bulunan Hardısağır Heyelanı'nın olası bir hareketi sonucu oluşacak itki dalgaları, ölçekli laboratuvar deneyleri, ampirik yaklaşımlar ve 3 boyutlu nümerik simülasyonlarla modellenmiş, rezervuarda meydana gelen sedimantasyonun dalga oluşumu üzerindeki etkisi araştırılmıştır (Şekil-14).

Çalışma alanı seçiminde **(i)** akarsu havzasının heyelan potansiyeli açısından çok riskli bir bölgede yer alması, **(ii)** bu bölgenin ülkede en fazla deprem üreten Kuzey Anadolu Fay Zonu'na yakın olması (10-30 km arasında), **(iii)** eğimli ve dar bir topografyada akış gösteren Harşit Çayı Havzası'nda gerçekleşen yoğun erozyon nedeniyle baraj gölünde meydana gelen sedimantasyonun taban topografyasında belirgin bir değişime neden olması gibi faktörler dikkate alınmıştır. Çalışma kapsamında;

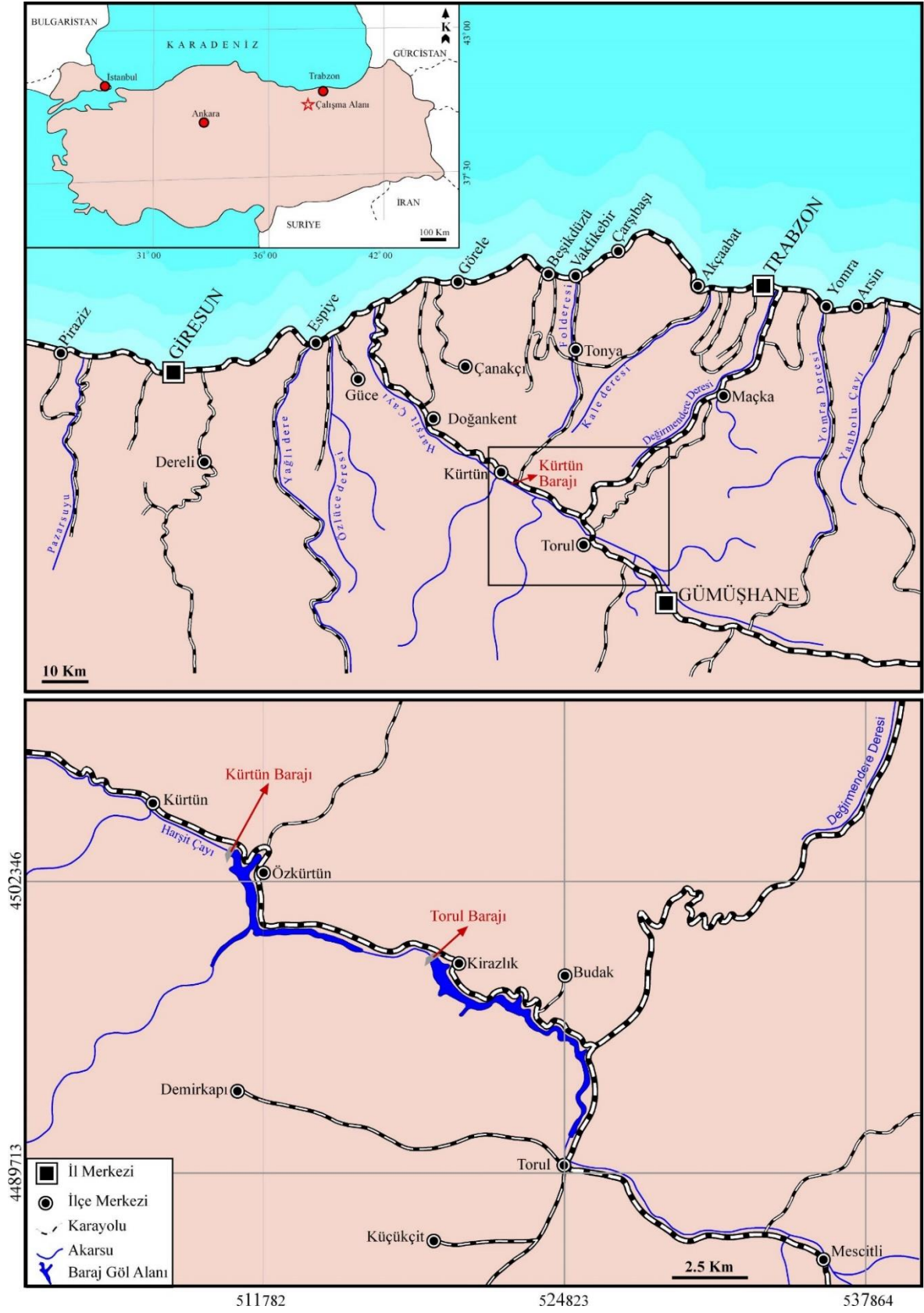
- (1) Arazi çalışmaları kapsamında göl alanında bulunan heyelanlar tespit edilerek heyelan envanter haritası hazırlanmış,
- (2) Baraj gövdesine en yakın heyelan olan Hardısağır Heyelanı'nın arazi çalışmaları ile belirlenmiş, DSİ 22 Bölge Müdürlüğü tarafından yapılan sondajlar ve tez çalışması kapsamında uygulanan elektrik öz direnç ve sismik kırılma ölçümleri kullanılarak heyelan malzemesinin yatay ve düşey devamlılığı ortaya çıkarılmış,
- (3) Heyelan sahası insansız hava araçları (İHA) kullanılarak fotogrametrik olarak değerlendirilen veriler üzerinden elde edilecek sayısal arazi modelleri (SAM) kullanılarak, rezervuar sahası ise Harita Genel Komutanlığı'ndan temin edilen 1/10000 ölçekli sayısal haritalar kullanılarak 3 boyutlu olarak modellenmiş
- (4) Açılan 5 adet araştırma çukurundan temin edilen örselenmiş ve örselenmemiş örnekler üzerinde uygulanan laboratuvar deneyleri sayesinde heyelan malzemesinin indeks ve dayanım özellikleri belirlenmiş,
- (5) Hardısağır Heyelanı'nın deprem etkisi dikkate alınarak stabilitesi araştırılmış, kurulan modeller üzerinde yapılan 3 boyutlu limit denge analizleri ile rezervuara kayacak olası malzeme miktarı tahmin edilmiş,
- (6) Arazi çalışmaları kapsamında rezervuar taban topografyasındaki değişimlerin ortaya konulması amacıyla su yüzeyinden batimetrik ölçümler alınmış
- (7) Elde edilen tüm bulgular bir bütün halinde değerlendirilerek olası bir heyelan sonrası oluşacak itki dalgalarının hareketi, yayılımı, rezervuar kıyısına ve baraj gövdesine etkisi ampirik ilişkiler ve 3 boyutlu nümerik analizlerle simüle edilmiş,

batimetrik ölçümler sonucunda oluşturulan katı model ile sedimantasyonun itki dalga yayılımı ve oluşumu üzerindeki güncel etkisi modellenmiştir.

- (8) Çalışmada son olarak nümerik modelin doğruluğun test edilmesi amacıyla laboratuvarda ölçekli deneyler uygulanmış, ölçek etkisi ve sedimantasyon etkisinin belirlenmesi amacıyla model deneylerden elde edilen veriler 3 boyutlu nümerik modellerden elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır.

Çalışma sonucunda elde edilecek çıktıların literatüre kazandıracığı en önemli özgün katkılar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır;

- (1) Ülkemizde gerek heyelan gerekse taşkınlar üzerine bilimsel birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmaların çoğunda coğrafi bilgi sistemlerinin konumsal analiz tekniklerinden yararlanılmakta ve 2 boyutlu nümerik tabanlı analizler tercih edilmektedir. Bu nedenle bu çalışmada 3 boyutlu simülasyonlar ile, yaygın olarak yapılan heyelan ve taşkın çalışmalarının aksine, baraj rezervuar alanlarında bulunan heyelanların aktif hale gelmesi durumunda oluşacak itki dalgalarının mekânsal ve zamansal yayılımı 3 boyutlu simülasyona dayalı nümerik analizlerle belirlenmiş, 3 boyutlu taşkın yayılım haritaları oluşturulmuştur.
- (2) Mevcut çalışmalardan farklı olarak göl alanındaki sedimantasyon dikkate alınmış ve rezervuarın batimetri haritası hazırlanarak güncel taban topografya oluşturulmuştur. Bu nedenle bu çalışma, sayısal yükseklik modellerinin güncel batimetrik haritalar kullanılarak oluşturulması ve oluşacak heyelan etkisinden kaynaklanacak itki dalgalarının güncel taban topografyası dikkate alınarak modellenmesi konusunda literatürdeki ilk çalışma konumundadır.
- (3) İtki dalgaları ile ilgili yapılan çalışmalarda hesaplamaların en önemli girdi parametrelerinden rezervuara kayacak kütlenin hacminin hesaplanmasıdır. Bu çalışma kapsamında 3 boyutlu limit denge analizi yapılarak hareket etmesi muhtemel kütlenin hacmi detaylı bir şekilde hesaplanmıştır. Bu yönüyle çalışma literatürde itki dalgalarının modellenmesi amacıyla yapılan ilk çalışma niteliğindedir.



Şekil 14. Yer bulduru haritası

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Kürtün Barajı rezervuarında ve baraj gövdesinden 2 km uzaklıkta sol sahilde yer alan Hardısağır Heyelanının aktif hale gelmesi durumunda meydana gelecek itki dalgalarının etkilerinin 3 boyutlu nümerik simülasyonlarla araştırıldığı bu çalışma kapsamında ilk aşamada bölgede kamu kurum ve kuruluşları tarafından yapılan çalışmalar değerlendirilmiş, sonrasında;

- Genel jeolojik ve stratigrafik çalışmalar
- İHA ölçümleri ve 3 boyutlu sayısal arazi modellerinin oluşturulması
- Batimetrik ölçümler
- Mühendislik jeolojisi çalışmaları
- Laboratuvar ölçeğinde hidrolik model deneyler
- Rezervuara kayacak malzeme hesabı ve 3 boyutlu limit denge analizleri
- Heyelan kaynaklı itki dalgalarına ait 3 boyutlu simülasyona dayalı nümerik modelin kurulması ve sınır koşullarının tanımlanması çalışmaları yapılmıştır.

Tablo 6. Doktora tezi kapsamında yapılan çalışmalar ve yapılan çalışmaların amacı

Yapılan Çalışmalar		Amaç
Önceki Çalışmaların Derlenmesi	MTA ve DSİ tarafından yapılan çalışmaların derlenmesi	Heyelanın eninin, boyunun ve kalınlığının tespit edilmesi
	Genel Jeolojik ve Stratigrafik Çalışmaların Derlenmesi	Çalışma alanı ve çevresinin jeolojisinin tespit edilmesi
Arazi çalışmaları	Arazi Gözlemleri	Heyelan sınırının, heyelan kütlesi üzerindeki gerilme çatlaklarının, araştırma çukur açılacak noktaların ve jeofizik ölçüm hatlarının tespit edilmesi
	İHA Ölçümleri	Çalışma alanı ve çevresinin sayısal yüzey modelinin oluşturulması
	Araştırma Çukurlarının açılması	Heyelan malzemesinin fiziksel ve dayanım özelliklerinin tespit edilmesi
	Jeofizik Ölçümler	Yamaç molozu kalınlığının, yeraltı suyu durumun ve formasyon sınırlarının tespiti
	Batimetrik Ölçümler	Tabandaki silt kalınlığının tespiti ve tabana ait güncel topografik haritasının çıkarılması
	Jeolojik haritaların ve kesitlerin hazırlanması	Yamaç duraylılık analizlerinin yapılması

Tablo 6'nın devamı

Yapılan Çalışmalar		Amaç
Laboratuvar Çalışmaları	Zemin Örneklerinin Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi	Stabilite analizlerinde kullanılacak girdi parametrelerinin hesaplanması
	Model Hidrolik Deneylerin Yapılması	Nümerik modellerin doğruluklarının test edilmesi
2 ve 3 Boyutlu Analizler ve Simülasyonlar	3 Boyutlu Limit Denge Analizlerinin Yapılması	Rezervuara akacak malzeme miktarının tespit edilmesi
	Dalga Yayılımının 2 Boyutlu Ampirik eşitliklerle modellenmesi	3 boyutlu nümerik ve hidrolik modellerle kıyaslanması
	Dalga Yayılımının 3 Boyutlu Nümerik Simülasyonlarla modellenmesi	İtke dalgasının olumsuz sonuçlarının tespit edilmesi
	Rezervuar sedimantasyonunun belirlenmesi	Sedimantasyonun itke dalgası üzerindeki etkisinin araştırılması
	Zamansal ve mekânsal taşkın yayılım haritalarının hazırlanması	İtke dalgası sonrası erken uyarı ve tahliye planının hazırlanması

2.1. Mevcut Çalışmaların Derlenmesi

Doktora tez çalışmaları kapsamında ilk aşamada Kürtün Barajı ve çevresinde kamu kurumları tarafından daha önceden yapılmış olan çalışmalar derlenmiştir. Çalışmada DSİ 22. Bölge Müdürlüğü tarafından hazırlanmış “Kürtün Barajı İnşaatı ve Jeoteknik Çalışmaları” başlıklı rapordan ve 4 adet heyelana ait Jeolojik-Jeoteknik raporlardan yararlanılmıştır. Raporlarda baraj yeri ve göl alanında yapılan genel jeolojik çalışmalar, mühendislik jeolojisi çalışmaları ve göl alanındaki heyelanlarıyla ilgili çalışmalar mevcuttur. DSİ 22. Bölge Müdürlüğü tarafından daha önceden çalışılan 4 adet heyelanda 3'ü göl alanında 1 tanesi ise mansapta bulunmaktadır. Söz konusu heyelanların konumları Şekil 15'te görülmektedir. Söz konusu 4 adet heyelandan çöplüce heyelanının mansap kısmında bulunduğu için itke dalgası üretme potansiyeli bulunmamaktadır. Geriye kalan 3 heyelandan Süme ve Dutluca heyelanlarında ise heyelanların aktif olduğuna dair herhangi bir arazi verisi temin edilmemiştir.



Şekil 15. Göl alanı-çevresinde bulunan ve DSİ 22. Bölge Müdürlüğü tarafından çalışılmış heyelanlar

Doktora tez çalışmasına altlık oluşturacak şekilde Devlet Su İşleri 22. Bölge Müdürlüğü tarafından yapılan çalışmalar içinde yer alan jeolojik haritalar, mühendislik jeolojisi haritaları, sondaj çalışmaları, jeofizik çalışmaları ve laboratuvar deney sonuçları incelenmiş ve gerekli veriler tezde kullanılmış, tez kapsamında yapılan çalışmalar daha önceden yapılan bu çalışmalar dikkate alınarak planlanmıştır. DSİ tarafından yapılan çalışmalar dikkate alındığında Çöplüce, Süme, Dutluca ve Hardısağır heyelanlarından en riskli olanının Hardısağır heyelanının olduğu tespit edilmiştir. Söz konusu heyelanın riskli olma nedenleri ise kısaca; göl alanındaki en büyük kütleye sahip olması, heyelanın üstünden geçen yolun devamlı deforme olması, heyelan kütlelerinin bulunduğu kot, bulunduğu lokasyondaki su derinliği, heyelan kütlelerinin topuk kısmının devamlı akması ve arazi gözlemlerinde tespit edilen gerilme çatlaklarının çok fazla sayıda olması şeklinde sıralanabilir. Bu olumsuz koşullar dikkate alındığında çalışma kapsamında tüm heyelanlar içinde Hardısağır heyelanının olası hareketinin oluşturacağı itki dalgasının çalışılması planlanmıştır.

2.2. Genel Jeolojik ve Stratigrafik Çalışmalar

Göl alanı ve çevresinde yüzeyleme veren birimlerin yayılımlarının ve stratigrafik ilişkilerinin tespit edilmesi için MTA ve DSİ 22. Bölge Müdürlüğü tarafından yapılan

alışmalar kullanılmış, arazi çalışmaları yapılmış ve insansız hava aracından elde edilen görüntülerdeki birim sınırları arazide sınırlar ile deneştirilmiştir. Yapılan alışmalar sonucunda çalışma alanı ve çevresine ait 1/10.000 ölçekli, göl alanı ve çevresine ait 1/25000 ölçekli jeoloji haritası hazırlanmıştır.

2.3. İHA Ölçümleri ve 3 Boyutlu Sayısal Arazi Modellerinin Oluşturulması

Hardısağır heyelanının olası bir hareketi sonucu oluşacak itki dalgalarının modellendiği bu çalışma kapsamında, stabilite analizlerinde, göle akacak malzeme miktarının tespitinde, itki dalga yayılım modelinin kurulmasında ve rezervuarda biriken siltin dalga yayılımı üzerindeki etkisinin araştırılmasında 3 boyutlu analizler kullanılmıştır. Tüm bu analizlerde arazinin 3 boyutlu modelinin STL (stereolithography) formatta olması gerekmektedir. Sayısal arazi modellerinin oluşturulmasında alanın büyüklüğü ve hassasiyet dikkate alınarak STL (stereolithography) format için veriler iki farklı şekilde elde edilmiştir. 8 km uzunluğunda 1.5 km genişliğinde göl alanına ait 1/10000 ölçekli topografik haritalar (eş yükselti eğrileri 5 metrede 1 adet) Harita Genel Komutanlığından sayısallaştırılmış vektör veri olarak temin edilirken, 500 m uzunluğunda ve 500 metre genişliğinde heyelan bölgesinin içinde bulunduğu alanda detaylı veri elde etmek ve bu bölge için kurulacak 3 boyutlu modeller için altlık oluşturmak amacıyla insansız hava araçları (İHA) kullanılarak fotogrametrik olarak değerlendirilen veriler (1/500 ölçekli) üzerinden sayısal yükseklik modelleri (SYM) elde edilmiştir. İHA ile ölçümlerde 80/70 bindirmeli olarak fotoğraflar çekilerek 3.5 GSD (Ground Sampling Distance) hassasiyette ölçümler yapılmıştır. Harita Genel Komutanlığından ve insansız hava araçları (İHA) kullanılarak ölçüm yapılan alanlar Şekil 16'da verilmiştir.



Şekil 16. Harita Genel Komutanlığından ve insansız hava araçları (İHA) kullanılarak ölçüm yapılan alanlar

Çalışma kapsamında İHA ile sayısal arazi modelinin (SAM) ve bölgenin ortofoto haritalarının üretilmesi süreci dört temel aşamada gerçekleştirilmiştir.

- Yer kontrol noktalarının hazırlanması ve koordinatlarının ölçülmesi,
- Uçuş ve ölçüm planlarının hazırlanması,
- Fotoğrafların çekimi,
- Fotoğrafların değerlendirilmesi

Fotogrametrik ölçümlerde uçuş planı arazinin morfolojik yapısına göre değişeceği için, uçuş aralıkları ve yönleri arazi çalışmaları sırasında belirlenmiştir. 500m*500m büyüklüğündeki bir alanda fotogrametrik ölçümler yapılacak, bu aşamaların tamamını içeren SAM ve ortofoto haritaların üretimi hizmet alımı şeklinde yapılmıştır.

- Yer kontrol noktalarının hazırlanması ve koordinatlarının ölçülmesi

YKN'ları (Yer Kontrol Noktası), hem uzaktan algılamada hem de fotogrametride fotoğrafların/görüntülerin (burada sadece "görüntü" terimi kullanılacaktır) düzeltme aşamasında görüntü koordinat sistemi ile yer koordinat sistemi arasındaki ilişkisinin kurulmasını sağlamaktadır. Bu nedenle YKN'larının doğruluğu ve dağılımı ortogörüntünün konum doğruluğunu etkilemektedir. YKN seçiminde görüntüye ait geometrik çözünürlüğü büyük bir faktördür.

Düşük çözünürlüğe sahip olan görüntülerde cisimler, yüksek çözünürlüklü görüntülere kıyasla daha az piksele sahiptirler. Bu nedenle düşük çözünürlüklü görüntüler üzerinde seçilecek olan YKN'ları da boyut olarak büyük nesneler seçilmelidir. Fakat ne boyuta sahip olursa olsun YKN olarak seçilecek cismin zamanla konumunun ve şeklinin değişmediğinden emin olunması gerekmektedir; ayrıca yeryüzü ile nesne arasında kot farkının olmaması gerekmektedir. Özellikle yüksek geometrik çözünürlüklü ($GSD \leq 1$ m) görüntüler için YKN'ları küçük ve yüksekliği yer seviyesinde olan asimetrik olmayan cisimler tercih edilmelidir. Havuz, Bina veya yol köşesinde tercih edilen YKN'ları, görüntünün radyometrik çözünürlüğünden kaynaklanan bir etki nedeninden dolayı asıl konumunda bulunmayabilir. YKN'larının miktarı ve yerleşimi çeşitli faktörlere bağlıdır. Bunlar doğrulamada kullanılacak olan matematiksel modelin türüne, nokta seçim yöntemine (arazi çalışması, haritadan okuma vb.), algılayıcı cinsi ve görüntü çözünürlüğüne, çalışma alanının topografik yapısına ve istenilen konum doğruluğu ve hassasiyetidir. Polinom dönüşümü veya DLT (Direct Linear Transformation) gibi parametrik olmayan matematiksel modeller, görüntüleme geometrisini yansıtmadıklarından dolayı, kuramsal olarak gerekenden daha fazla YKN'sına gerek duyar. Bu modeller nokta dağılımına da bağlıdır. Ancak görüntüleme geometrisi ve yörünge elemanları gibi bilgileri kullanan parametrik modeller, parametrik olmayan modellere oranla daha az YKN'sına gerek duyar ve nokta dağılımından da daha az etkilenir. Bu nedenlerden dolayı, yer kontrol noktaları ile ilgili yapılan çalışmalar, veri kalitesini doğrudan etkileyeceği için yer kontrol notalarının dağılımı ve konum seçimleri proje ekibi tarafından denetlenecektir. Kontrol noktalarının ölçüm işlemi, TUSAGA Aktif (Cors-TR) sisteminden faydalanılarak gerçek zamanlı olarak belirlenebilmektedir. GNNS alıcıları tarafından yapılacak bu işlemde ölçüm hassasiyetinin Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliğinin belirtilen asgari şartlara uygun olması gerekmektedir. Haritalama işlemi, bu kontrol noktalarını esas alarak yapılacak rektifikasyon işlemi ile gerçekleştirilecektir. Dolayısıyla konum belirleme işinin çok duyarlı yapılması gerekmektedir. Bu süreç yine proje ekibinin kontrol ve denetiminde tamamlanacaktır.

- Uçuş planının hazırlanması

İnsansız hava araçlarına istenilen çözünürlüğünde ve bindirme oranlarına göre uçuş yapılacak çalışma alanı ofis ortamında arazinin topografyasına bakılarak önceden planlanır. İHA uçuş ayakları (uçuş hatları), çalışma alanında arazi çalışmaları ile tespit edildikten sonra bu alana ait tüm fotoğrafların elde edilmesi gereken bölgeden geçecek şekilde hazırlanacaktır.

Fotoğraf çekme aşamasında, çalışma alanından geçerken önceden tespit edilen bindirme oranları ile oluşturulmuş uçuş hatları üzerinde uçuş gerçekleştirilecektir. Enine ve boyuna bindirme oranları ve ayrıca uçuş yüksekliği belirlenecektir. Uçuş planına altlık teşkil eden uçuş planı, daha sonra uçuş kumandaya yüklenecek ve insansız hava aracının uçuş planı belirlenecektir. Bu aşamada, bindirme oranlarının belirlenmesi ve uçuş yüksekliğinin tespiti gibi teknik süreçlerde proje ekibi kontrol ve denetim çalışmalarını üstlenecektir.

- Fotoğrafların çekimi

Fotoğraf çekimi, projede kullanılacak İHA sisteminin kamera özelliklerine doğrudan bağlıdır. Kameranın çözünürlüğü, distorsiyon değerleri, sensör özellikleri vb. donanımları üretilen ortofoto haritaların ve sayısal yükseklik modelinin kalitesi için çok önemlidir. Afet yönetimi amaçlı bir çalışmada beklenen hassasiyet değerleri, mevcut durumda kullanılan İHA kameraları ile kolayca sağlanmaktadır. Bu süreçte kamera seçimi ve ilgili özellikleri proje ekibi tarafından denetlenecektir.

- Fotoğrafların değerlendirilmesi

İHA platformları için veri işleme aşamasından önce verilerin kalite kontrolünün yapılması gerekmektedir. Elde edilen verilerin gerçek zamanlı kalite kontrolü, veri toplaması için kısıtlı bir sürenin olması ve her zaman tekrarının mümkün olmaması sebebi ile çalışmanın veri işleme aşaması için yapılmaktadır. Alışma ile elde edilen hava fotoğrafları koordinatlarının ve standart sapmaları ile Yer Kontrol Noktaları'na ait koordinat ve standart sapmalarının kabul edilebilir sınırlar içinde bulunması gerekmektedir. İnsansız hava aracının planlanan uçuşlarından bir vektör harita ile aynı ölçümleri sunulabilmesi elde edilen hava fotoğrafların işlenmesi ihtiyacını doğurmaktadır. Objelerin matematiksel olarak hesaplanabilmesi ve ölçülmesi için, bir referans sistemi tanımlanmalıdır. Referans sistemi tanımlanan hava fotoğraflarının koordinatları ve dönüklük bilgileri üretilir. Kullanılan kameranin özellikleri, kamera ait kalibrasyon bilgileri ve distorsiyon hataları analizlerin yapılması için gereklidir. Anlatılan aşamalardan sonra çeşitli yazılımlar kullanılarak her bir görüntüye ait koordinat ve dönüklük değerleri ile fotoğraflar 3 boyutlu uzay koordinat sistemine üzerine yerleştirilir. Programlara girilmiş olan çeşitli parametre ve veriler ile çekilen hava fotoğraflarının karşılıklı yöneltmesi yapılır ve farklı haritalar üretilir. Tüm bu çalışmalardan elde edilen verilerin doğruluğu arazi üzerinde yapılacak olan ölçümler ile denetlenecektir.

2.4. Batimetrik Ölçümler

İtke dalgası ile ilgili yapılan 2 ve 3 boyutlu gerek ampirik gerekse nümerik çözümlemelerde olsun çarpma zonundaki su derinliği dalga özelliklerini belirleyen en önemli parametrelerden biridir. Bu nedenle çarpma zonundaki su derinliğinin net bir şekilde bilinmesi gerekmektedir. Fakat çoğu çalışmada belirli bir bölgedeki su derinliği hesaplanırken baraj su tutmaya başlamadan önceki taban topografya kotundan mevcut su seviyesi kotu çıkarılarak hesaplanmaktadır. Yani zamanla rezervuarda biriken sediment miktarı dikkate alınmamaktadır. Bu durum dikkate alınmadığında su derinliği ve taban rezervuarı yanlış modellenmiş olur. Böyle bir durumda hesaplamalar gerçeği yansıtmaz. Su derinliği dalga özelliklerini etkilerken rezervuar taban topografyasında oluşan dalganın yayılım özelliklerini etkilemektedir. Bu nedenle itke dalgasının oluşum ve yayılımının gerçeğe en yakın şekilde modellenmesi için güncel rezervuar taban topografyasının bilinmesi gerekmektedir. Bu nedenle özellikle erozyonun çok olduğu bölgelerdeki göl alanlarında yapılacak analizlerde bu durumlar göz önüne alınmalıdır.

Kürtün barajı göl alanındaki yamaç eğimlerinin yüksek olması, iklim şartları nedeniyle gerek fiziksel gerekse kimyasal ayrışmanın etkili oluşu, ani-şiddetli yağışların varlığı, Kürtün baraj inşaatından sonra memba kısmında Torul barajının inşa edilmesi ve göl alanındaki heyelanlardan kaynaklı yüzey akıntılarının çok fazla olması nedeniyle göl alanındaki sedimantasyonun fazla olduğu kanaatine varılmıştır. Şekil 17’de heyelanlı bölgelerdeki yüzeysel akmalar ve yeni oluşan heyelanlar görülmektedir. Bu durum akarsuyun taşıdığı sedimentlere ek olarak göl alanında sedimantasyona neden olmaktadır.

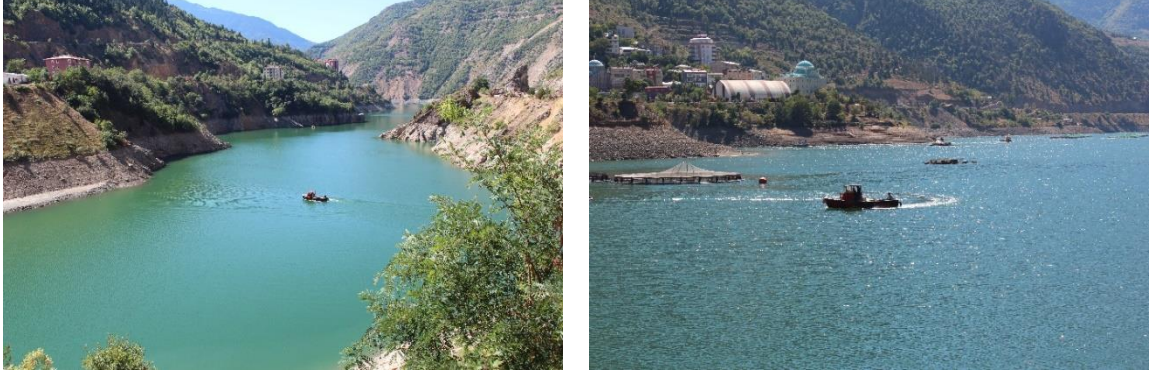
Tüm durumlar göz önüne alındığında Hardısağır heyelanının olası bir hareketi sonucu oluşacak itke dalgasının sediment birikiminden etkileneceği düşünüldüğünden göl alanında batimetrik ölçüm yapılmasına karar verilmiştir. Batimetrik ölçümlerin yapıldığı alanlar Şekil2-6 da görülmektedir. Çalışma kapsamında göl tabanına ait sayısal yükseklik modelleri oluşturulurken, eş zamanlı olarak rezervuar tabanının topografyasının 3 boyutlu olarak ortaya koyulması hedeflenmiştir. Bu amaçla göl alanında batimetrik ölçümler gerçekleştirilmiştir. Göl alanında Multibeam Echosounder sistemi kullanılarak 1/1000 ölçekli batimetrik haritası hazırlanmış, ölçümler İHO (Uluslararası Hidrografi Örgütü) standart ve yöntemlerine uygun yapılmıştır. Çalışmada kullanılan sistem ve yöntemler Seyir Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığı (SHODB) ve İHO standartlarına uygun olarak yapılmıştır (Şekil 19).



Şekil 17. Kürtün barajı göl alanındaki yamaç duraysızlıklarına örnekler



Şekil 18. Batimetrik ölçümlerin yapıldığı alan



Şekil 19. Batimetrik ölçümlerden genel görüntüler

Çalışma kapsamında sayısal yükseklik modelleri oluşturulurken, eş zamanlı olarak deniz taban topografyasının 3 boyutlu olarak ortaya koyulmuştur. Bu amaçla göl alanında yaklaşık 11 km² lik bir alanda (Şekil 18), yeşil çizgili sınır içinde kalan alan) batimetrik ölçümler gerçekleştirilecektir. Batimetrik ölçümlerdeki hatlar ve hat aralıkları su derinliğine bağlı olarak tespit edilmiştir. Çalışma sahasında “Multibeam Echosounder sistemi kullanılarak 1/1000 ölçekli batimetrik harita” hazırlanacak, ölçümler İHO (Uluslararası Hidrografi Örgütü) standart ve yöntemlerine uygun olacaktır. Uygulama aşağıda maddeler halinde açıklanmalar doğrultusunda gerçekleştirilecektir.

- Çalışmalar TUDKA'ya (Türkiye Ulusal Düşey Kontrol Ağı) dayalı olarak ITRF96 Koordinat Sisteminde yapılmıştır.
- Batimetri çalışmalarına başlamadan önce en az 2 (iki) yerde el iskandili ve barçek yöntemiyle derinlik kontrolü yapılmıştır.
- Yapılacak çalışmalarda CORS veya RTK GPS tekniklerinden biri kullanılacaktır.
- Batimetrik ölçümler yüksek çözünürlükte veri toplayabilen çok bimli (multibeam) özellikli cihazlarla gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada kullanılacak sistem ve yöntemler Seyir Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığı (SHODB) ve IHO standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Çalışma alanında Multibeam Echo Sounder ile batimetrik ölçme çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

- Multibeam Echo Sounder ile Batimetrik Ölçme Çalışmaları

Multibeam Echo Sounder sistemi Norbit iWBMS cihazı ile yapılacaktır. Ölçüm sırasında benzer ürünlere göre kıyas götürmez şekilde üstünlük sağlamaktadır. Bunun başlıca sebebi yüksek kaliteli ayarlanabilir frekansa (200-700 kHz) sahip olmasıdır. Ayrıca Kolay taşınabilen ve küçük platformlara dahi kurulabilecek şekilde küçük hacme sahip

olma kolaylığı ile sistem 0-270 metre derinliklere kadar ölçüm imkanı tanımaktadır. Multibeam batimetri verilerinin yorumlanması bütünleşmiş side scan sonar özelliği sayesinde kusursuza yakın yapılabilir. Ses Hızı profili cihazı kullanılarak sesin sudaki yayılım hızı ölçülecek ve bu sayede batimetrik ölçümlerde çok yüksek doğruluk elde edilecektir. Ses hızı profili ölçüme başlamadan önce, gün doğumu ve batımı sonrası, hava sıcaklığı ve rüzgârın aşırı değişimi sonrası durumlarda yapılacaktır.

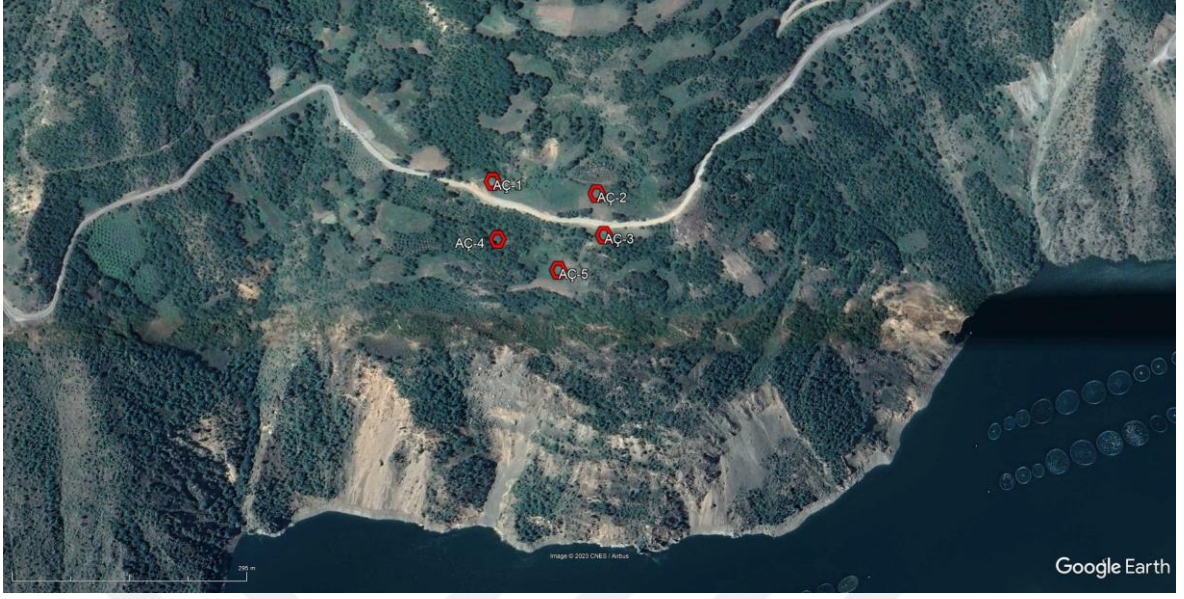
2.5. Mühendislik Jeolojisi Çalışmaları

Mühendislik jeolojisi çalışmaları kapsamında daha önceki çalışmalarda tespit edilmiş heyelanlar, tez kapsamındaki çalışmalar sonucunda tespit edilmiş heyelanlar ve baraj su tutmaya başladıktan sonra meydana gelen heyelanlar tespit edilmiş, riskli heyelanlar yerinde incelenmiş ve sonuç olarak göl alanının heyelan envanter haritası çizilmiştir. Ayrıca tez kapsamında çalışılan Hardısağır heyelanı üzerindeki gerilme çatlakları tespit edilmiş, heyelanın üzerinde geçen yol üzerindeki deformasyonlar incelenmiş ve heyelanın aktif olduğuna dair veriler derlenmiştir.

Mühendislik jeolojisi çalışmaları kapsamında DSİ 22. Bölge Müdürlüğü tarafından daha önceden yapılan sondaj çalışmaları da dikkate alınarak elektrik özdirenç ve sismik kırılma ölçümleri için jeofizik ölçüm hatları tespit edilmiştir. Heyelan kütlesi üzerinde tüm kütleyi homojen bir şekilde temsil edecek şekilde araştırma çukuru yerleri tespit edilmiştir. Son olarak ta sedimantasyonun oluşacak itki dalgası üzerindeki etkilerinin araştırılması için gerekli olan batimetrik ölçüm için sınırlar belirlenmiştir.

2.5.1. Araştırma Çukuru Açılması ve Örnek Temini

3 boyutlu limit denge analizlerinde kullanılmak üzere, heyelan malzemesinin fiziko-mekanik özelliklerin tespit edilmesi için 5 adet araştırma çukuru açılmıştır. Numunelerin alındığı yerlere ait konumlar Şekil 20’de görülmektedir. Açılan 5 adet çukurdan örselenmiş ve örselenmemiş zemin numuneleri alınmıştır (Şekil 21). Alınan örselenmiş ve örselenmemiş zemin numuneleri üzerinde elek analizi, özgül ağırlık deneyi, likit limit deneyi, plastik limit deneyi ve kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Örneklerin alındığı araştırma çukurlarına ait özellikler Tablo 7’de verilmiştir.



Şekil 20. Araştırma çukurlarının açıldığı yerler



Şekil 21. Araştırma çukuru fotoğrafları

Tablo 7. Araştırma çukurlarını özellikleri

Aç No	Koordinatlar		Derinlik (cm)	Genişlik (cm)
	Doğu	Kuzey		
Aç-1	511109	4501411	280	120
Aç-2	511123	4501542	300	120
Aç-3	511175	4501552	315	120
Aç-4	511182	4501418	300	120
Aç-5	511220	4501495	290	120

2.5.2. Jeofizik Ölçümler

DSİ 22. Bölge Müdürlüğü tarafından yapılan sondaj ve jeofizik verilere ek olarak 3 hat üzerinde elektrik öz direnç tomografi (ERT) ve 3 hat üzerinde sismik kırılma yöntemi ile ölçüler alınmıştır. Ölçüm hatları Şekil 22’de görülmektedir. Jeofizik ölçümler ile yamaç molozunun yanal-düşey devamlılığı, formasyon sınırları, olası fayların tespiti, yeraltındaki boşlukların tespiti, yeraltı suyu durumu, zeminin fiziko-mekanik özelliklerinin tespiti amacı ile yapılmıştır. Ölçüm hatlarının uzunluklar ve koordinatları Tablo 8’de verilmiştir.



Şekil 22. Jeofizik ölçüm hatları

Tablo 8. Jeofizik ölçüm hatlarına ait bilgiler

Profil İsmi	Ölçüm Tipi	Koordinatlar				Uzunluk (m)	Veri Derinliği (m)
		Başlangıç		Bitiş			
		Doğu	Kuzey	Doğu	Kuzey		
A-B	ERT	511079	4501376	511088	4501654	189	32
C-D	ERT	511111	4501486	511120	4501590	190	33
E-F	ERT	511117	4501367	511157	4501621	192	34
SİS-1	Simik	511161	4501490	511170	4501578	57	18
SİS-2	Simik	511205	4501343	511217	4501650	57	18
SİS-3	Simik	511235	4501454	511232	4501560	57	18

2.5.3. Jeoteknik Laboratuvar Deneyleri

Tez kapsamında Hardısağır heyelanı üzerinde açılan araştırma çukurlarından örselenmiş ve örselenmemiş zemin numuneleri alınmış, alınan bu zemin numuneleri üzerinde indeks ve dayanım deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar 3 boyutlu Limit denge analizlerinde kullanılmıştır. Zemin numuneleri üzerinde elek analizi, likit limit, plastik limit, özgül ağırlık ve kesme kutusu deneyleri yapılmıştır.

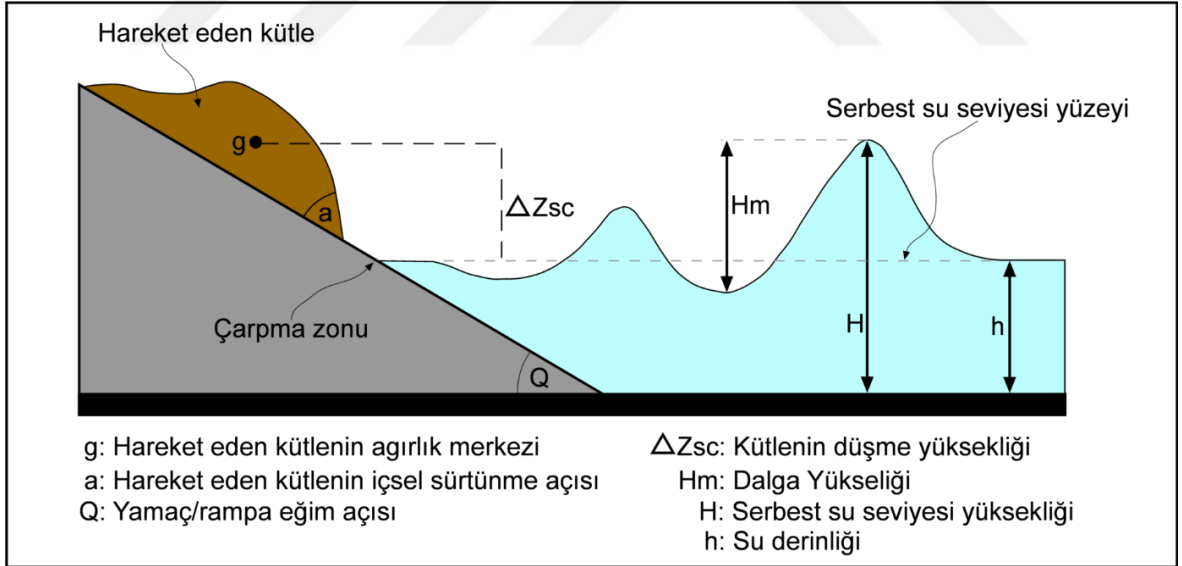
ASTM D 422-63 standardına göre elek analizi, ASTM D 854-92 standardına göre özgül ağırlık deneyi, ASTM 4318-84 standardına göre likit limit deneyi, ASTM D 4318-84 standardına göre plastik limit deneyi ve ASTM D 5321-08 standardına göre kesme kutusu deneyi yapılmıştır. Örneklerin alındığı zonlar Tablo 9’da verilmiştir.

Tablo 9. Örselenmiş ve örselenmemiş zemin numunelerinin alındığı derinlikler

Aç No	Alınan Numune Tipi			
	UD Numune	Örneğin Alındığı Derinlik	Örselenmiş Numune	Örneklerin Alındığı Derinlikler
Aç-1	1 Adet	Aç Tabanından	1500 gr	50-150-250 cm
Aç-2	1 Adet	Aç Tabanından	1500 gr	50-150-250 cm
Aç-3	1 Adet	Aç Tabanından	1500 gr	50-150-250 cm
Aç-4	1 Adet	Aç Tabanından	1500 gr	50-150-250 cm
Aç-5	1 Adet	Aç Tabanından	1500 gr	50-150-250 cm
*50-150-250 cm lik derinliklerin her bir kademesinde 500 gr toplamda 1500 gr örnek alınmıştır				

2.6. Laboratuvar Ölçeğinde Hidrolik Model Deneylerin Yapılması

Gravite dalgalarının oluşum mekanizması 3 ayrı aşamada ele alınmaktadır. Bu aşamalar; çarpma etkisiyle itki dalgası oluşumu, oluşan dalganın rezervuarda yayılımı ve dalganın topografik yüzeyde ilerlemesi ve/veya baraj gövdesine çarpması şeklinde sıralanmaktadır. Gravite dalgalarından kaynaklanacak olumsuz etkilerin belirlenmesinde yukarıda sıralanan 3 ayrı aşama, bir bütün olarak ele alınmakta, ancak farklı modellerle analizler yapılmaktadır. Kütle hareketi kaynaklı meydana gelen itki dalgasının özelliklerini etkileyen en önemli girdi parametrelerden biri kütlenin rezervuardaki suya çarpma hızıdır. Kütlenin suya çarpma hızını ise heyelan malzemesinin hacmi, kalınlığı, darbe hızı ve yamaç eğimi belirlemektedir (Şekil 23). Gravite dalgalarının fiziksel özellikleri heyelan malzemesinin darbe şiddetine, rezervuar geometrisine, derinliğine ve dalganın yayılım doğrultusuna bağlıdır. Gravite dalgalarının karşı kıyıdaki veya baraj gövdesi üzerindeki etkisi ise durgun su derinliğine, gravite dalgasının hızına, oluşan dalga yüksekliğine, karşı kıyı ve/veya baraj gövde eğimine bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 23. İtki dalgasının oluşum mekanizması ve kütlenin rezervuardaki suya çarpma hızının hesaplanmasında kullanılan parametreler

Bu çalışmada yukarıda belirtilen tüm durumlar dikkate alınarak itki dalgalarına ait kütlenin hareket süresi, oluşan dalganın yüksekliği ve suya çarpma hızı gibi fiziksel özellikler hidrolik deneyler, 3 boyutlu nümerik analizler ve ampirik ilişkiler hesaplanmış ve

hesaplardan elde edilen değerler karşılaştırılmıştır. Gravite dalgalarının oluşumunda ölçek etkisi ise sadece nümerik simülasyonlar kullanılarak araştırılmıştır. İtki dalgalarının değerlendirilmesine yönelik çalışma kapsamında; (1) hareket eden kütlesinin suya çarpma hızı, (2) kütlesinin hareket süresi, (3) lek etkisi ve (4) arpma sonrası oluşacak dalga yüksekliğinin araştırılması iki aşamada gerçekleştirilmiştir.

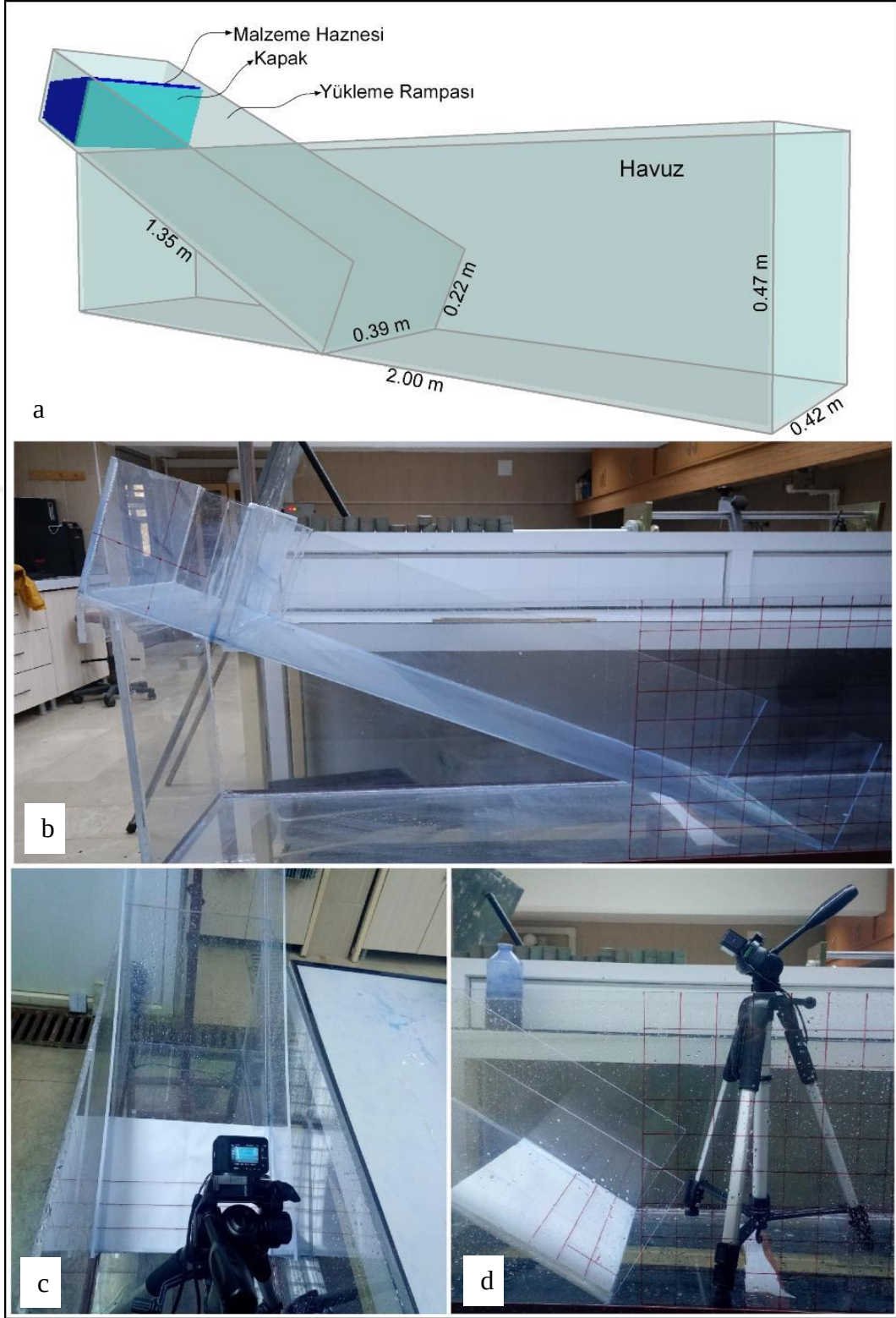
Bu aşamaların ilkinde laboratuvar ortamında farklı fiziksel koşullarda hidrolik bir model üzerinde fiziksel deneyler gerçekleştirilmiştir. Hidrolik deneylerde 200 cm x 42 cm x 47 cm boyutlarında fiberglas havuz, 135 cm x 39 cm x 22 cm boyutlarında fiberglas yükleme rampası, yüksek hızlı kayıt özelliği olan kamera ve akışkan olarak saf su seçilmiştir.

Hazırlanan hidrolik modele ait genel görüntüler şekil 24'te görülmektedir. Hidrolik modelde sıvı ile yüzey arasındaki sürtünme kuvvetini en aza indirmek amacıyla ve esnek olma özelliğine sahip olması nedeniyle yükleme rampası ve havuz 1 cm kalınlığında fiberglas malzeme kullanılarak yapılmış. Deney düzeneğinin hazırlandığı Fiber malzemenin esnememesi için kalınlık özellikle 1 cm olarak seçilmiş ve hazırlan model elik bir iskelet üzerine yerleştirilmiştir. Fiberglas deney düzeneğinin yerleştirildiği zeminin eğimli olmamasına dikkat edilmiş ve böylelikle eğimin oluşturacağı etkiler ortadan kaldırılmıştır.



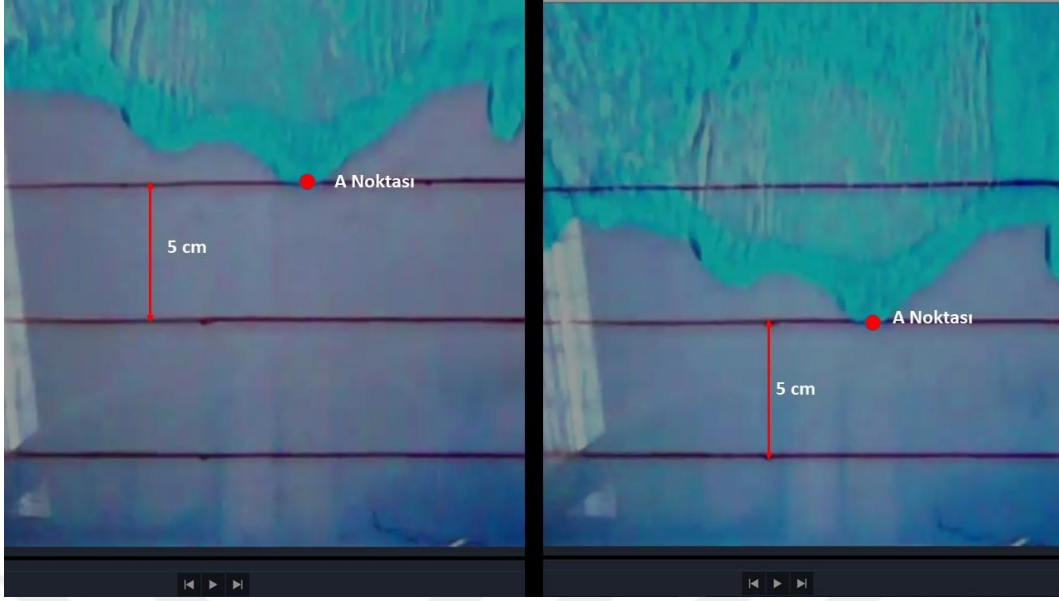
şekil 24. Hidrolik modelin farklı açılardan görüntüleri

Fiberglas deney düzeneğinin ayrıca deneyler sonrası suyun boşaltılması için bir adet tahliye vanası da bulunmaktadır. Yükleme rampası $20-60^0$ arasında eğimli olacak şekilde tasarlanmıştır. Böylece farklı çarpma acılarda akışkanın suya çarpma hızındaki değişimleri belirlemek mümkün olacaktır. Hidrolik deneylerde yüksek bir hızla hareket eden suyun hareketini detaylı bir şekilde görebilmek için görüntüyü 250 fps, 500 fps ve 1000 fps yavaşlatma özelliği bulunan yüksek hızlı kamera kullanılmıştır. Hidrolik deneylerde tüm fiziksel özelliklerinin belli olması nedeni ile akışkan olarak saf su tercih edilmiştir. İkinci aşamada ise hareket eden kütlenin suya çarpma hızı ve çarpma ile oluşan itki dalgasının yüksekliği (1) hidrolik modelle, (2) ampirik eşitlikler ve (3) 3 boyutlu numerik simülasyonlar ile hesaplanmış, ölçek etkisi ise sadece 3 boyutlu nümerik olarak modellenmiş ve değerlendirilmiştir (Şekil 25). Çalışmada, 3 boyutlu olarak numerik analiz yapabilen FLOW-3D yazılımı (Flow Science Inc. 2017) kullanılarak laboratuvarında kurulan hidrolik modeller 3 boyutlu olarak simüle edilmiştir. FLOW-3D hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) yazılımı olup, akışkan hareket denklemlerini çözmek için özel olarak tasarlanmış sayısal analizleri kullanmaktadır (Yin ve ark. 2015). Modellemelerde “Drift-Flux Model” tercih edilirken, dalga oluşumunun simüle edilmesinde Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes denklemleri ile “volume of fluid (VOF) model” modülünü temel alan serbest yüzey modeli kullanılmıştır.

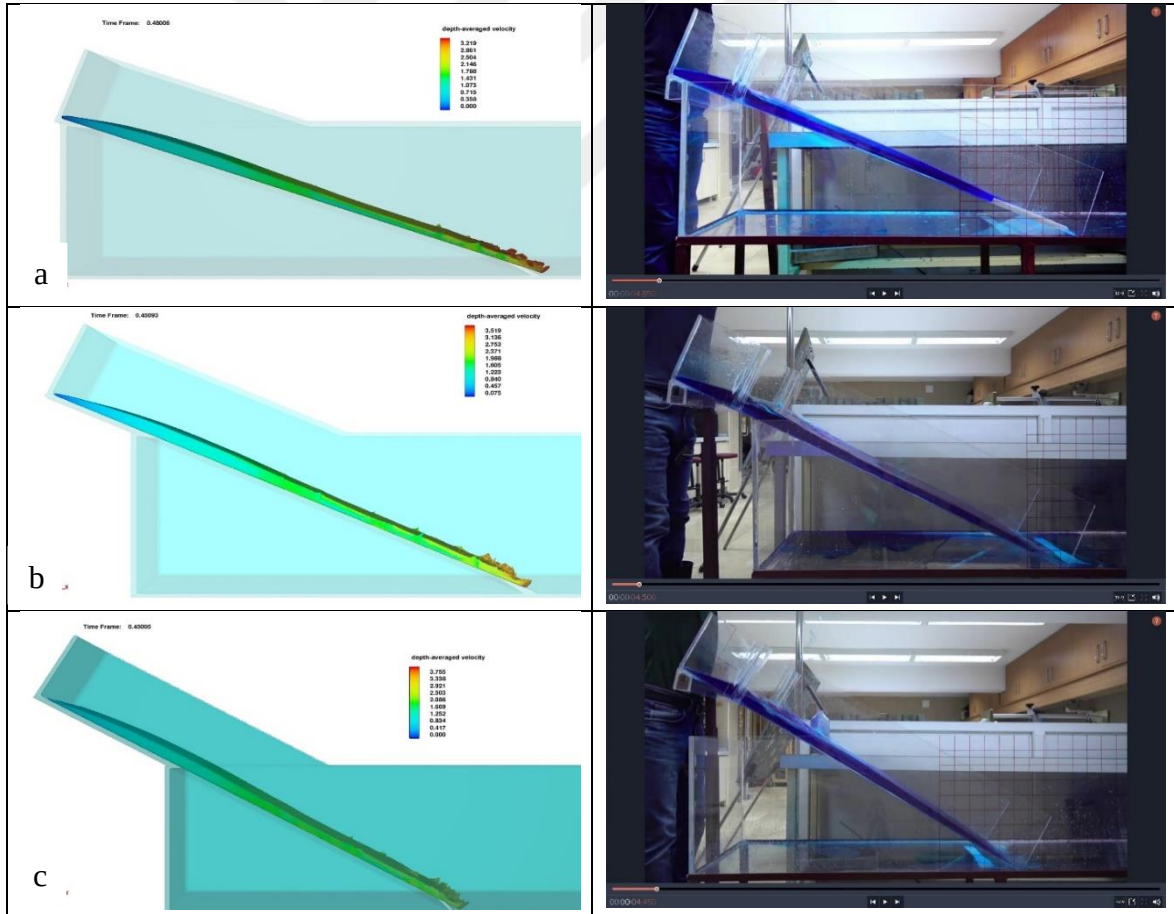


Şekil 25. (a) Nümerik modellerde kullanılan deney düzeneğinin katı modeli, (b) hidrolik modellerde kullanılan havuz ve yükleme rampası ve (c, d) yüksek hızlı kamera

Stereo Litografi (STL) dosyaları kullanılarak üç boyutlu katı model oluşturulmuş, oluşturulan modelin değerlendirilmesi esnasında oluşturulan simülasyonun hareket hızından kaynaklanan, itki dalgası modelini oluşturmak amacıyla Renormalize Grup (RNG) bazlı $k-\epsilon$ türbülans modeli ve Drift-flux modeli uygulanmıştır. Laboratuvarında yapılan deneyler gerçek ölçekli olarak bilgisayar programında modellenmiştir ve bu sayede ölçek etkisi incelenmiştir. Nümerik ve deneysel olarak kurulan modelde ölçülen serbest su seviyesi değerleri karşılaştırılarak modelin doğruluğu test edilmiştir. Daha sonra kullanılan model, nümerik model kullanılarak 0.1, 1, 10, 100 ve 1000x ölçekli olarak oluşturulmuştur. Oluşturulan modellerde yoğunlukları farklı ($800-2000\text{kg/m}^3$) akışkanlar kullanılmıştır, her yoğunluk ve her ölçek için serbest su seviyesi değerleri tespit edilmiştir. Sonrasında farklı ölçeklerde ama aynı yoğunluktaki serbest su seviyesi yüzeyleri karşılaştırılarak ölçek etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmada çarpma hızı ampirik eşitlikle, hidrolik model deneylerle ve nümerik olarak hesaplanmıştır. 3 farklı rampa açısı için (20 derece, 25 derece ve 30 derece) kütlelerin havuz tabanına çarpma hızı hesaplanmıştır (Şekil 26). Deneyde yükleme havuzuna su doldurulmuş ve eğim aşağı boş havuz tabanına çarpması sağlanmıştır, çarpma etkisi sonucu meydana gelen dalga yüksekliği 20 cm su derinliğinde ve 20, 25 ve 30°'lik rampa açıları için hesaplanmıştır. Çarpma hızı hidrolik model ile tespit edilirken farklı rampa açılarında suyun belirli bir mesafe boyunca aldığı süre tespit edilerek hesaplanmıştır. Şekil 27'de görüldüğü gibi yükleme rampasının en dip kısmına 5 cm ara ile çizilmiş olan yatay kırmızı çizgilerden suyun 5 cm mesafeyi ne kadar sürede kat ettiği görülmektedir. Belli olan mesafe ve tespit edilen süre kullanılarak suyun tabana çarpma hızı tespit edilmiştir.

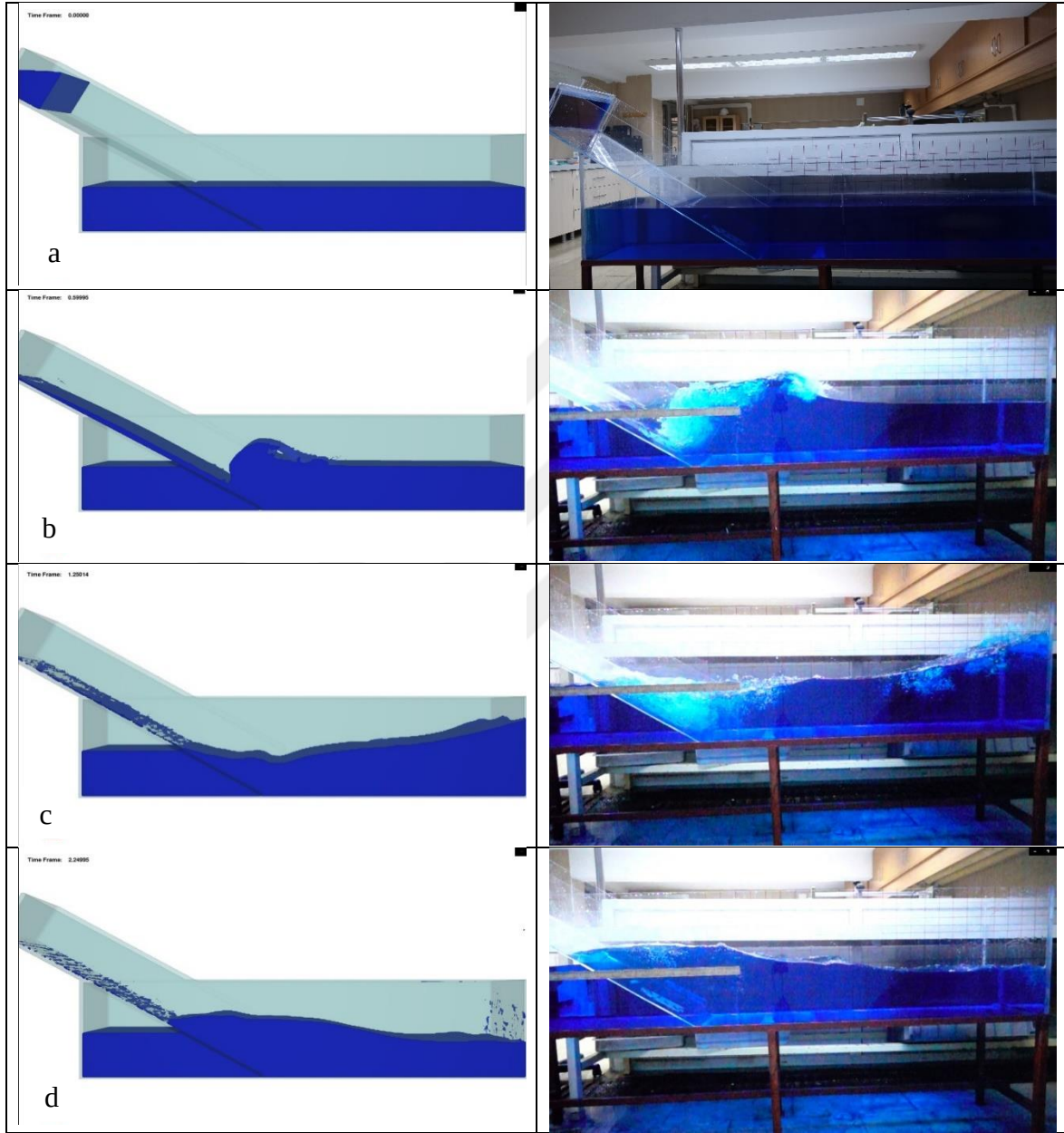


Şekil 26. Çarpma hızının tespit edilmesi için kurulan hidrolik model



Şekil 27. 20 derece (a), 25 derece (b) ve 30 derecelik (c) rampa acılarında suyun çarpma hızının tespit edilmesi için kurulan nümerik ve hidrolik modeller

Hidrolik model ve 3 boyutlu nümerik simülasyonların farklı aşamaları Şekil 28’de verilmiştir. Başlangıç aşaması, suya çarpma anı, dalganın oluşumu, dalganın ilerlemesi ve dalganın rampadan geri tırmanması modellenmiştir.



Şekil 28. Başlangıç aşaması (a), çarpma anı ve dalganın oluşumu (b), dalganın ilerlemesi (c) ve dalganın rampadan geri tırmanmasının (d) modellenmesi.

2.5.1.2. Sedimentasyon Etkisi

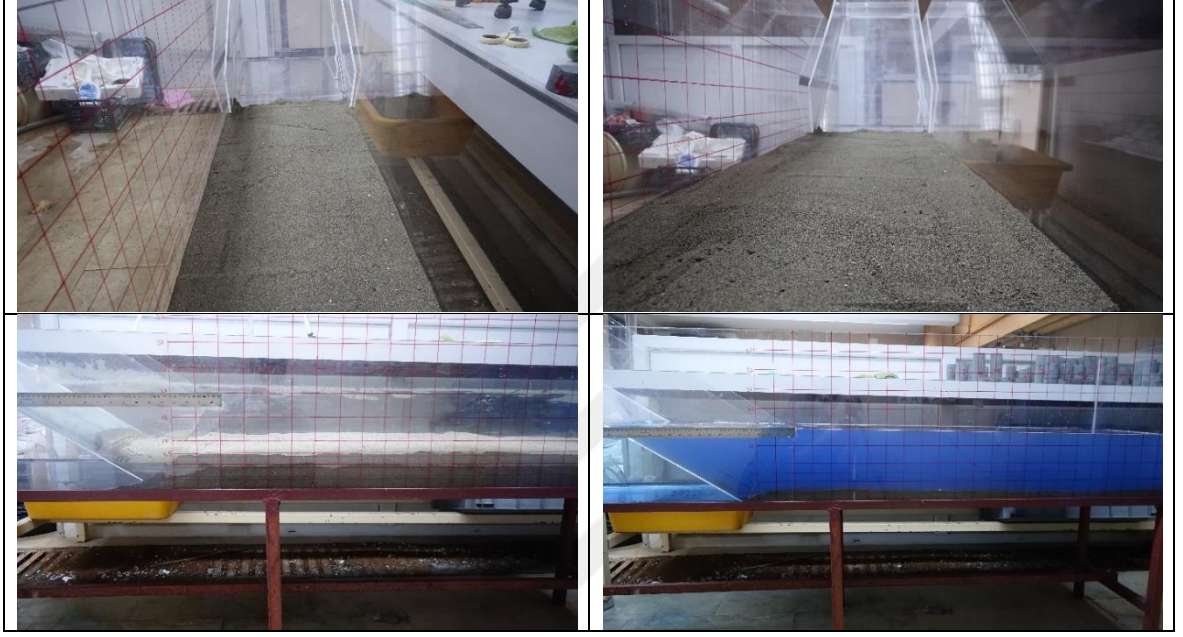
İtki dağları ile ilgili yapılan hesaplamalarda en önemli girdi parametrelerinden biri su derinliğidir. Su derinliğindeki değişim oluşan itki dalgasının tüm fiziksel özelliklerini değiştirmektedir. Bu nedenle çarpma zonundaki güncel su sütunu kalınlığının doğru bir şekilde tespit edilmesi gerekmektedir. Değişen taban topografyasının yani su sütunu kalınlığının itki dalgası üzerindeki özelliklerinin tespit edilmesi için laboratuvarında hidrolik deneyler ve 3 boyutlu nümerik simülasyonlar yapılmıştır.

Hidrolik deneyler 30 derecelik rampa açısında serbest su seviyesinin 20 cm olduğu, 0, 2.5, 5, 7.5 10 ve 15 cm sediment kalınlığı için yapılmıştır. Yapılan 3 deneyde çarpma ile oluşan itki dalgasının maksimum dalga boyu hesaplanmıştır. Şekil 29’da serbest su seviyesi ile su sütunu kalınlığı görülmektedir. Serbest su yüzeyi kotu bize her zaman çarpma zonundaki güncel su derinliğini yani su sütunu kalınlığını vermez çünkü tabanda biriken sediment ile Serbest su yüzeyi yükselmez. Barajlardaki işletme seviyeleri (Serbest su yüzeyi kotu) barajın ömrü boyunca değişmez ama taban biriken sediment ile su sütunu kalınlığı değişir.



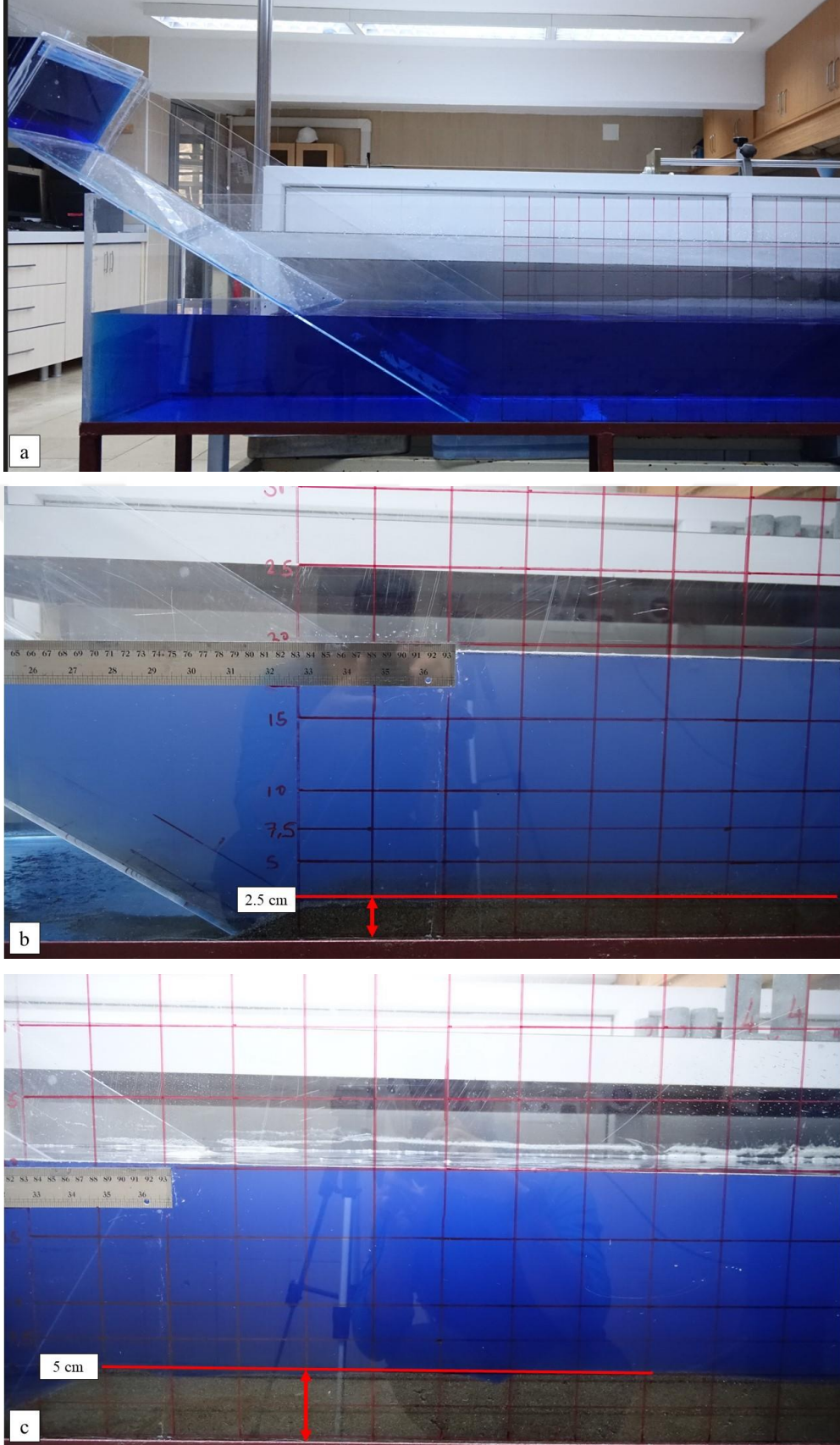
Şekil 29. Serbest su seviyesi ile su sütunu kalınlığının görünümü

30 derecelik rampa açısı değeriinde 20 cm lik serbest su seviyesi kotunda farklı sediment (su sütunu kalınlığında) kalınlıklarında hidrolik modelde deneyler yapılmıştır. Sedimentasyon etkisinin araştırılmasında kum kullanılmıştır (Şekil 30). Sedimentasyon etkisinin araştırılması için yapılan hidrolik model deneyler Şekil 31a, b, c, d, e ve f de görülmektedir.



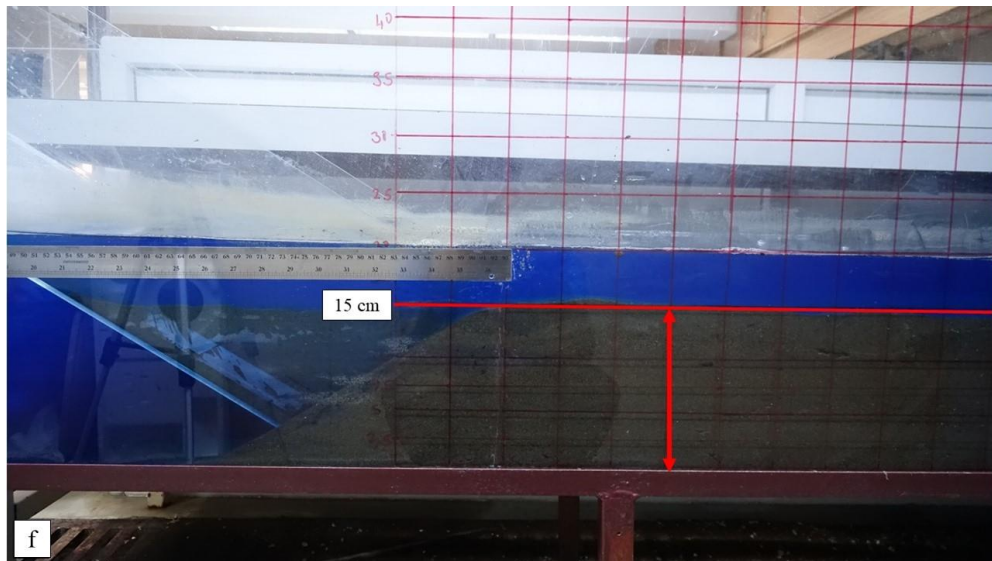
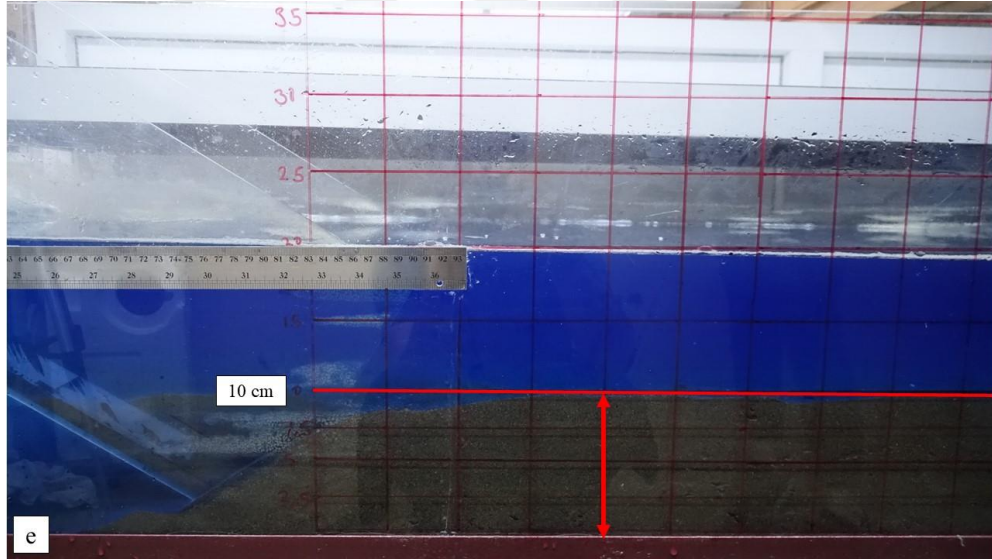
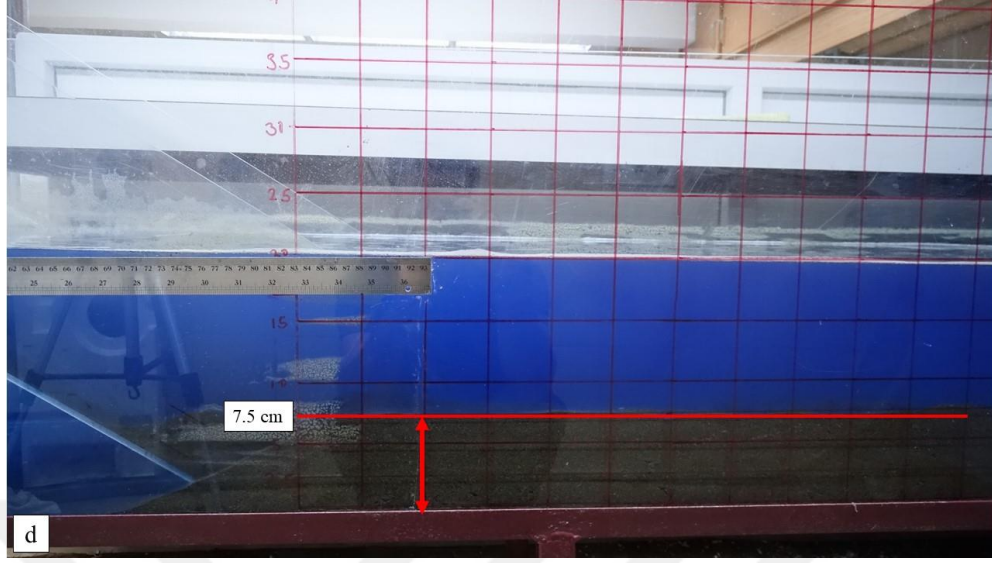
Şekil 30. Sedimentasyon etkisinin araştırılmasında kullanılan hidrolik modelden genel görüntüler

Hidrolik model bire bir ölçekli olarak 6 farklı sediment kalınlığı dikkate alınarak 3 boyutlu nümerik olarak modellenmiştir (Şekil 32a, b, c, d, e ve f). Hidrolik modelden ve 3 boyutlu nümerik analizlerden elde edilen dalga yükseklikleri karşılaştırılarak 3 boyutlu nümerik modelin doğruluğu test edilmiştir.

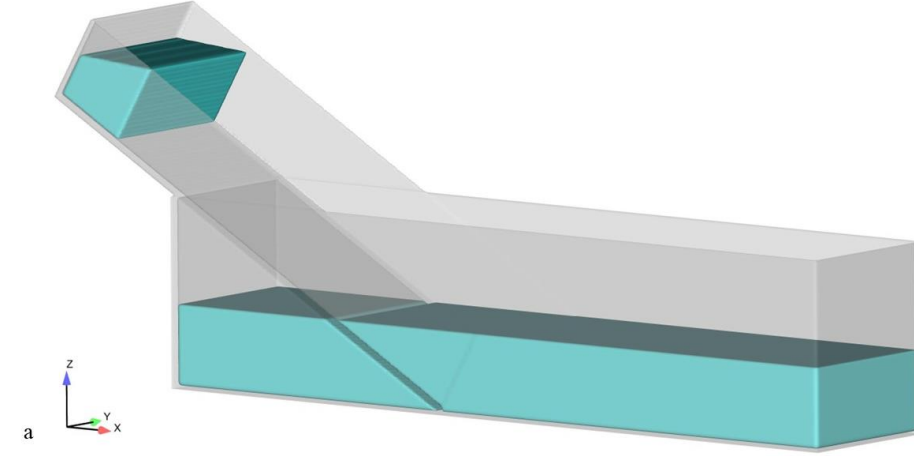


Şekil 31. 0 (a), 2.5 (b), 5 (c), 7.5 (d), 10 (e) ve 15 cm (f) sediment kalınlıklarında yapılan hidrolik model deneyler

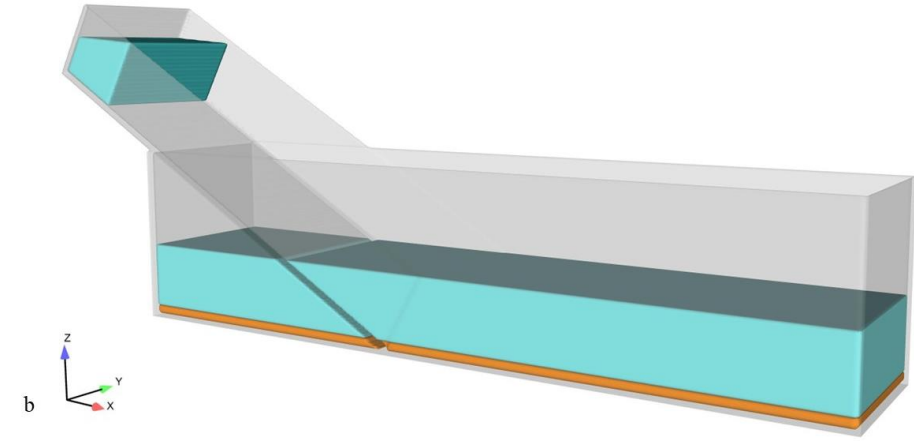
Şekil 31'in devamı



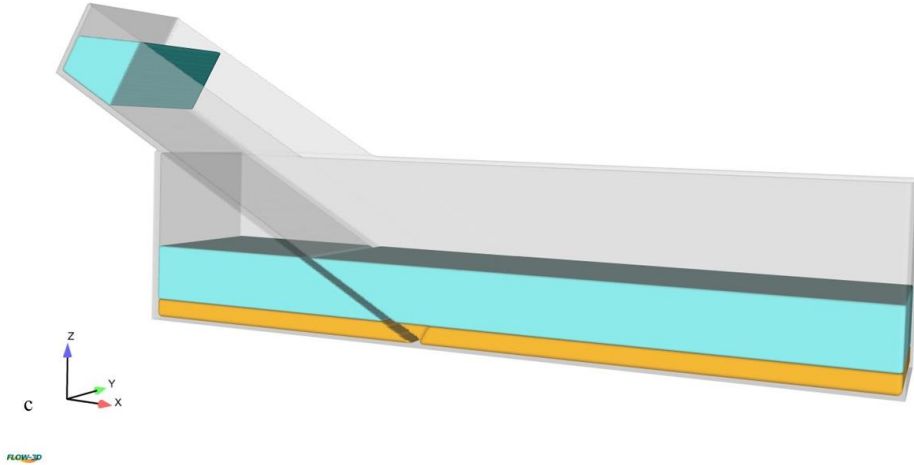
Time = 0.000



Time = 0.000



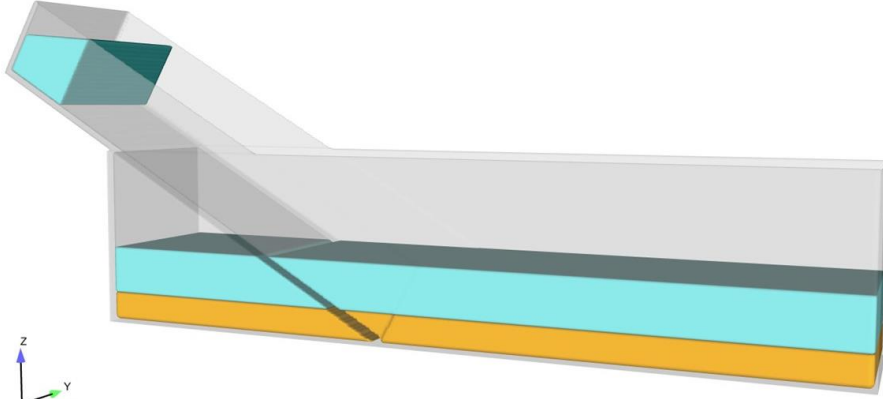
Time = 0.000



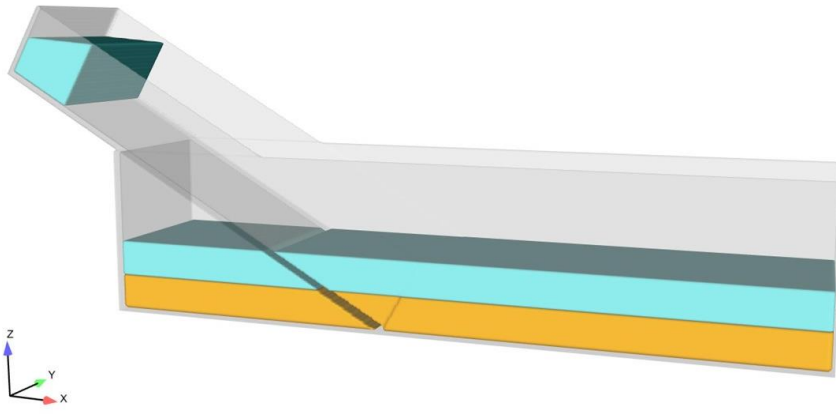
Şekil 32. 0, (a), 2.5 (b), 5 (c), 7.5 (d), 10 (e) ve 15 cm (f) sediment kalınlıklarında yapılan 3 boyutlu nümerik analiz

Şekil 32'nin devamı

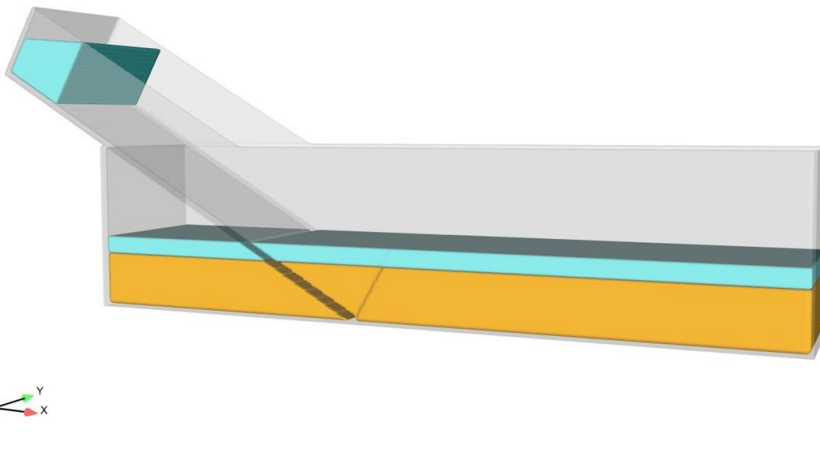
Time = 0.000



Time = 0.000



Time = 0.000



2.7. Rezervuara Kayacak Malzeme Hesabı ve 3 Boyutlu Limit Denge Analizleri

İtki yada gravite dalgası yerçekimi etkisi ile herhangi bir kütlenin (çığ, moloz akması, kaya düşmesi, heyelan, meteor vs.) su kütlesine çarpması sonucu oluşan dalgadır. Oluşan bu dalganın yıkıcı etkisi su derinliğine ve hareket eden kütlenin durgun suya çarpma hızına bağlıdır. Çarpan kütlenin hızı ise hareket eden kütlenin hacmine ve kütlenin ağırlık merkezinin serbest su yüzeyine olan düşey mesafesine bağlıdır. Bu nedenle itki dalgası analizlerinde gerek 3 boyutlu nümerik analizler olsun gerekse ampirik hesaplamalarda olsun her iki çözümlemede de hareket eden kütlenin hacmi ve düşme yüksekliği oldukça önemli bir parametredir. Hesaplamaların doğru bir şekilde yapılabilmesi için hareket edecek kütlenin hacminin kesin bir şekilde tespit edilmesi gerekmektedir.

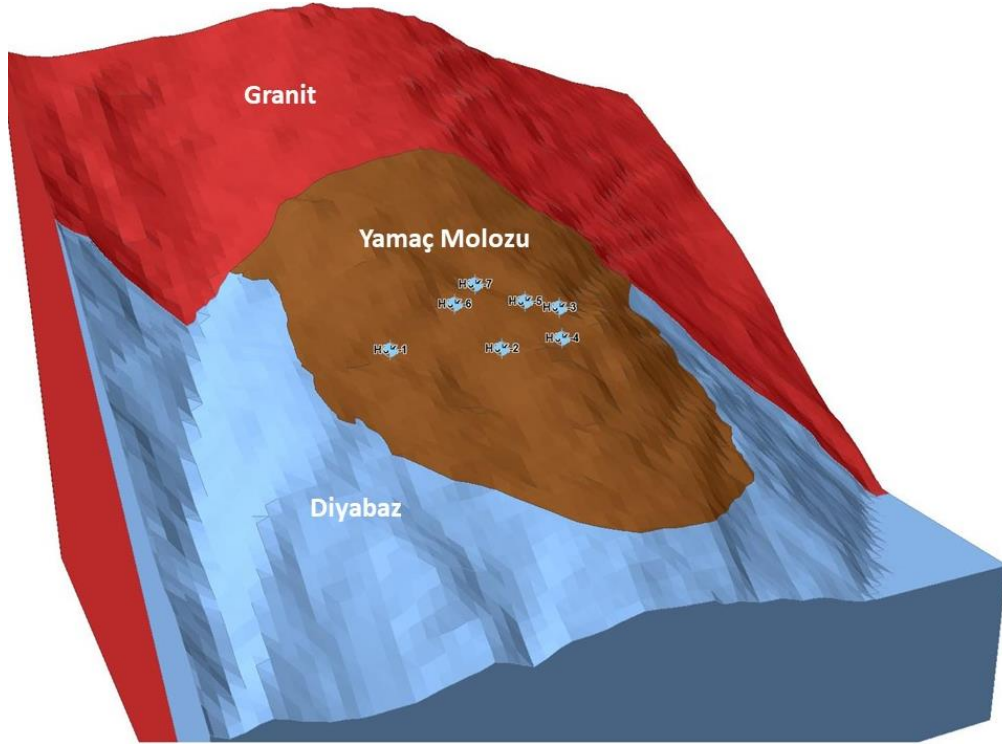
Burada asıl önemli olan heyelan hacminin yada sınırlarının belirlenmesi değil, olası bir hareket sonucu kayacak kütlenin hacminin ve sınırlarının bilinmesi olmalıdır. Çünkü paleo-heyelan malzemesinin farklı koşullar etkisinde yeniden tetiklenmesi durumunda tüm heyelan malzemesinin harekete geçmediği birçok vakada görülmüştür. Bu durum aşağıdaki Şekil 33'te paleo-heyelan malzemesinin sadece topuk noktasının aktif hale gelmesi şeklinde net olarak görülmektedir.



Şekil 33. Heyelan kütlesi içinde hareket eden kısmın gösterimi (Hardısağır heyelanı tabanı)

Herhangi bir bölgedeki aktif heyelan veya paleo-heyelan kütlelerinin sınırları ve kütlesi arazi çalışmaları (arazi gözlemleri, sondaj, jeofizik, inklinometre ölçümleri vs.) ile tespit edilmektedir. Fakat tespit edilen bu heyelan kütlelerinin her zaman tamamı hareket edip dalga üretmez. Bu nedenle stabilite analizleri ile en riskli kayma dairesi dikkate alınarak akacak malzeme miktarı tespit edilmelidir. Literatürde genel olarak iki boyutlu analizler sonucunda tespit edilen kayma dairesi derinliği ve kayma dairesinin üstündeki yüzey alanı verileri kullanılarak hareket edecek kütlelerin hacmi hesaplanmaktadır.

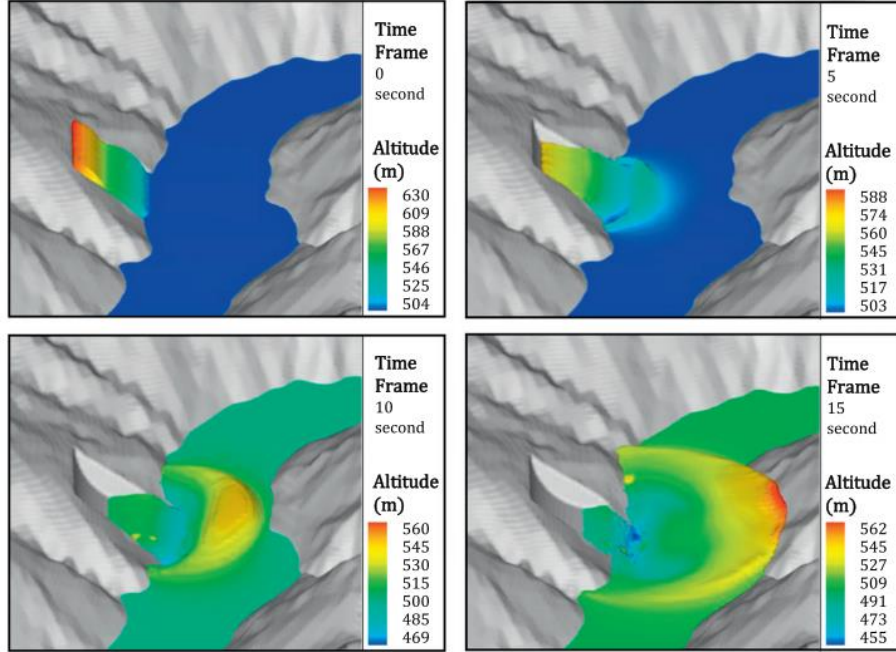
Doktora tez çalışmasında literatürden farklı olarak 3 boyutlu limit denge analizler ile olası bir depremde rezervuara akacak malzeme miktarı tespit edilmiştir. 3 boyutlu analizlerle rezervuara akacak malzeme tahmininin yapıldığı bu çalışma, heyelan kaynaklı itki dalgalarının etkisinin 3 boyutlu stabilite analizleri ile araştırıldığı ilk çalışma niteliğindedir. Çalışmada ortamının özellikleri de dikkate alınarak, dairesel kayma yüzeyleri gelişebileceği gibi taban topografyasına bağlı dairesel-düzlemsel kayma yüzeylerinin gelişebileceği dikkate alınarak Bishop (1955) ve Janbu (1973) yöntemleri kullanılarak yamaç stabilite analizleri yapılmış ve bulunan güvenlik sayısı değerleri yorumlanmıştır. 3 boyutlu model kurulurken harita alımları sonucu oluşturulan arazinin sayısal katı modeli, DSİ tarafından yapıla sondajlar, jeofizik ölçümler ve laboratuvar deney sonuçları kullanılmıştır (Şekil 34).



Şekil 34. Arazinin 3 boyutlu katı modeli

2.8. Heyelan Kaynaklı İtki Dalgalarına Ait 3 Boyutlu Simülasyona Dayalı Nümerik Modelin Kurulması ve Sınır Koşullarının Tanımlanması

Kürtün barajı göl alanında bulunan Hardısağır Heyelanının olası bir hareketi sonucu göl alanında oluşturacağı itki dalgasının 3 boyutlu nümerik çözümlemesi 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 ve ark. 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 tekniğini kullanılacaktır. Üç boyutlu katı model oluşturulurken Stereo Litografi (STL) dosyaları kullanılacak, itki dalgası modelini oluşturmak için ise Renormalize Grup (RNG) bazlı k- ϵ türbülans modeli ve Drift-flux modeli uygulanacaktır. Bunun sebebi ise modelin değerlendirilmesi sırasında oluşturulan simülasyonun hareket hızıdır. Şekil 35’te k- ϵ türbülans modeli kullanılarak hazırlanmış heyelan kaynaklı itki dalgası yayılımı modeli görülmektedir.



Şekil 35. FLOW-3D programı kullanılarak heyelan kaynaklı itki dalgalarının simülasyona dayalı 3 boyutlu yayılımının farklı zamanlardaki görünümü (Ersoy ve diğ. 2019)

- Drift-Flux modeli

Çoklu birleşenlerden oluşan akışkanlarda farklı yoğunluklara sahip (parçacıklar / akışkanlar vb.) içerikler bulunmasından ötürü bileşenler açısından farklı akış hızları bulunmaktadır. Bu farklılıklar üniform olmayan tanecik kuvvetlerinin yoğunluk farklarına bağlı olarak oluşumu ile ortaya çıkabilir ve genel olarak belirgin olabilir. 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. Drift-flux yaklaşımı ise bileşenler arasındaki zıt sürtünme kuvveti ile basınç yönü arasındaki dengeye indirgenerek göreceli hareketin ataletinin ihmal edilmediği durumlarda geçerlidir. Kütle ve enerjinin taşınması temeline dayanan sürüklenme hızları, bazen momentum ile gerçekleşse dahi genellikle bu değer oldukça küçüktür. Çalışma kapsamında kurulacak modelde bu sebeple ihmal edilmiştir. Göreceli hızın sürüklenme tahminindeki temel formülasyon $u = f_1 u_1 + f_2 u_2$ şeklindedir. Burada f_1 ve f_2 ile belirtilenler karışımı oluşturan iki birleşenin hacimleridir (burada $f_1 + f_2 = 1$).

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} + u_1 \bar{V} u_1 = -\frac{1}{\rho_1} \bar{V} P + F + \frac{K}{f \rho_1} u_r \tilde{V} \quad (1)$$

Dağınık faz için ise;

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} + u_2 \bar{V} u_2 = -\frac{1}{\rho_2} \bar{V} P + F - \frac{K}{(1-f)\rho_2} u_r \quad (2)$$

burada:

u_1 and u_2 : sürekli ve dağınık fazların mikroskobik ölçekte hızları

f ve F : sürekli faz hacim oranı ve malzeme kuvveti

K : iki fazın etkileşimi ile ilgili sürüklenme katsayısı

$u_r (u_2 - u_1)$: dağınık ve sürekli fazlar arasındaki nispi hız farkı

- RNG k-ε türbülans modeli

RANS denklemlerine bağlı olarak sıkıştırılamaz nitelikteki sıvı akışı için kütle ve momentum denklemleri aşağıda belirtilmiştir:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (u_i A_i) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u_j A_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + G_i + f_i \quad (4)$$

burada:

x ve u_i : koordinat ve hız

A_i ve V_F : akış alanı ve hacmi

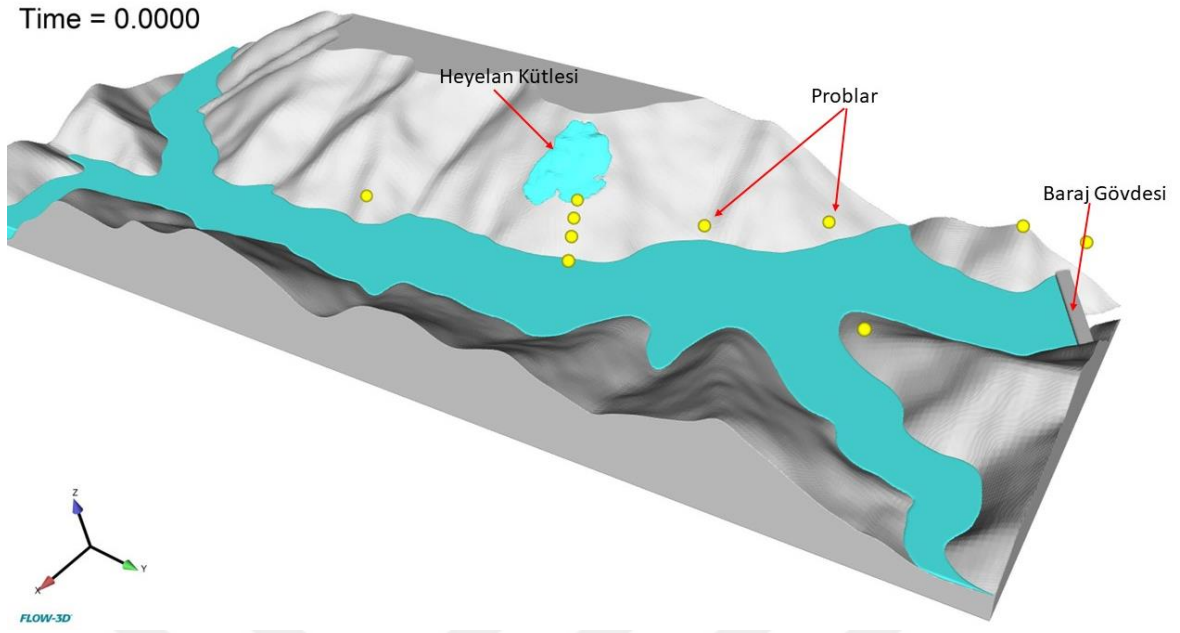
t ve p : zaman ve basınç

ρ : akışkan yoğunluğu

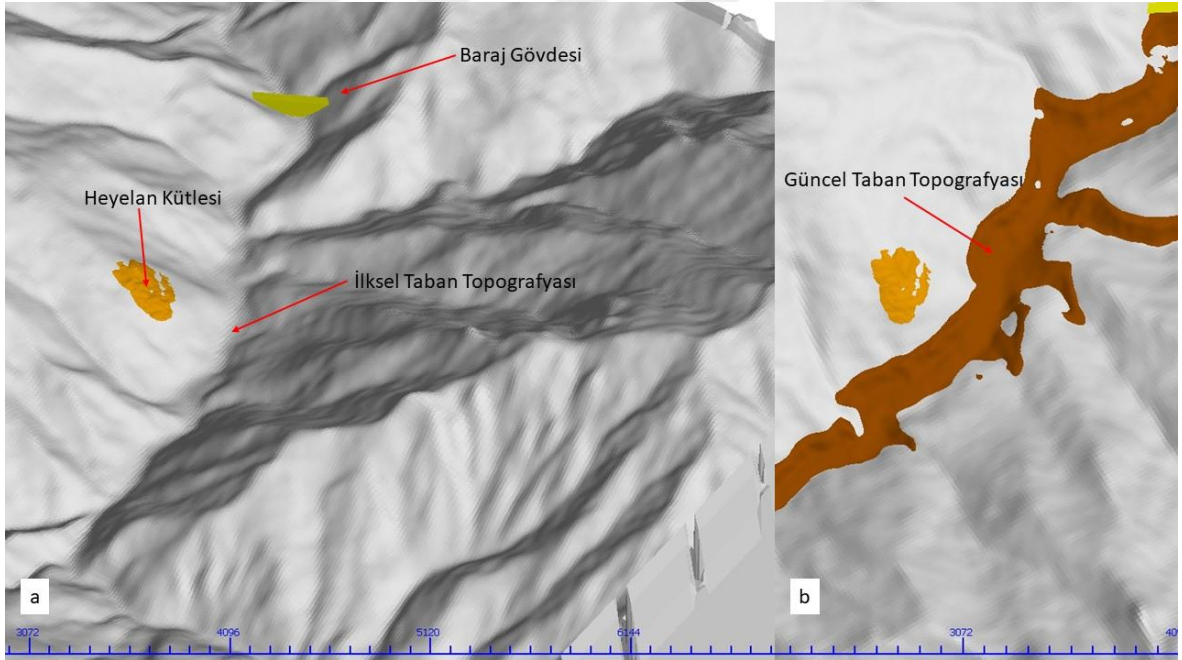
G_i ve f_i : katı tane ve akışkan ivmesi

Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde türbülans viskozitesini belirlemek için çok sayıda türbülans modeli kullanılabilse de (Kocaman ve Özmen-Cagatay H, 2015) bu çalışma kapsamında, Navier-Stokes denklem tabanlı RNG k- ϵ türbülans modeli tercih edilecektir.

3 boyutlu nümerik modelde kullanılan katı model Harita Genel Komutanlığından temin edilen Dijital Yükseklik Modelinden üretilmiştir. Katı model üzerine koordinatlı ve birebir ölçekli olarak baraj gövdesi ve heyelan kütlesi yerleştirilmiştir. Sonrasında rezervuar alanının içine su tanımlanmış ve oluşan itki dalgasının hidrolik özelliklerinin belirlenmesi için proplar yerleştirilmiştir (Şekil 36). İtki dalgası hesaplamaları iki farklı koşul göz önüne alınarak yapılmıştır. İlk koşulda göl alanının baraj su tutmaya başladığı yani sedimantasyonun olmadığı taban topografyası dikkate alınarak yapılmıştır. İkinci aşamada ise barajın güncel taban topoğrafyası yani sedimantasyon dikkate alınarak yapılmıştır. Bu model ilk model üzerine batimetrik ölçümlerden elde edilen güncel taban topografyasının entegre edilmesi ile kurulmuştur (Şekil 37). Her iki modelde tüm sınır şartlar aynı tutulmuştur. Değişen tek şey çarpma zonundaki su sütunu kalınlığıdır. Sedimantasyon ile su sütunu kalınlığı zamanla azalmaktadır. Yapılan analizler sonucunda hardısağır heyelanın olası bir hareketi sonucu oluşacak dalganın etkileri ve oluşan itki dalgasının taban topografyasından etkilenip etkilenmediği tespit edilmiş olacaktır. Çalışmada kullanılacak sınır koşulları Tablo 10'da verilmiştir.



Şekil 36. 3 boyutlu itki dalgası için kurulan nümerik model



Tablo 10. Yapılan 3 boyutlu nümerik simülasyonun girdi parametreleri

Genel Özellikler	Simülasyon Süresi:150 saniye
	Akışkan Sayısı: Tek Akışkan
	Simülasyon Birimi:SI
	Sıcaklık Birimi:Santigrat Derece
Fizik	Yerçekimi İvmesi:-9.81 m/sn ²
	Akışkanın Viskozite Türü:Renormalized Group (RNG)
	Model: two-equation (k-e) model
	Drift-Flux Modu Aktive edildi
Akışkan	Akışkan Tipi: 20 C°'deki Su
	Yogunluklar;
	Göl Alanındaki Su için 1000 kg/m ³ Heyelan Kütlesi için 1950 kg/m ³
Hücre ve Model Özellikleri	Toplam Hücre Sayısı: 66 034 800
	Hücre Boyutu:3m
	Hücre Tipi: Non-conforming
	Sınır Koşullar:
	Xmin= Açık
	Xmax=Simetri
	Ymin= Açık
Hücre ve Model Özellikleri	Ymax=Simetri
	Su Seviyesi:645 Metre
	Çözüm dosyası boyutu:209 gb
	Çözüm süresi: 1314 Dakika

2.6.3. İtki Dalgalarına Yönelik Ampirik Yaklaşımlar

Kütle hareketi sonucu oluşan itki dalgalarının fiziksel ve hidrolik özelliklerinin hesaplanmasında ampirik eşitliklerde kullanılmaktadır. Ampirik eşitlik kullanılarak 2 ve 3 boyutlu analizler yapılabilmektedir. Ampirik eşitlikler daha çok ön bir bilgi elde etme adına hızlı bir şekilde yapılan analizlerde kullanılmaktadır. Ampirik yaklaşımlar çok az bir girdi parametresi ile kısa bir sürede az bir maliyetle analiz yapmamıza imkân sağlasa da sonuçların kalitesi kabadır. Bu nedenle ön çalışmalarda genel bir bilgi vermesi adına ampirik yaklaşımlar önerilmektedir. Kütle hareketi sonrası oluşan itki dalgasının ne tür bir dalga olduğunu anlamak için su dalgası teorisine ve türlerine kısaca değinmek gerekmektedir.

• Su Dalgası Teorisi

Bu başlık altında su dalgasının özellikleri açıklanacaktır. Bir su dalgasına ait önemli parametreler Şekil-90 daki ideal sinüs dalgası üzerinde görülmektedir. Eğer bir sinüs dalgasında $H/h < 0.03$ veya $H/L < 0.006$ ise bu dalga lineer sinüs dalgası olarak tanımlanmaktadır. Şekil 38 incelendiğinde h su derinliği, H dalga yüksekliği bu değer dalganın topuğundan tepesine kadar olan mesafedir, a dalganın amplitüdü olup değer serbest

su seviyesi yüzeyi ile dalganın tepesindeki mesafedir. Dalganın bir tepesinden diğer tepesine veya bir çukurundan diğer çukuruna olan mesafe ise L yani dalganın boyudur. T değeri periyot olup sabit bir noktadan dalganın tepe veya çukurun iki defa geçinceye kadarki süre yani tekrarlanma süresidir. İdeal bir sinüs dalgasında T değeri dalga uzunluğunun dalga hızına bölünmesi ile elde edilir ($T=L/c$) c değeri dalga hızı olup liner sinüs dalgasında dalga hızı Eşitlik-5 teki gibi hesaplanır.

$$c = [(g.L/2\pi) * \tanh^*(2\pi h/L)] \quad (5)$$

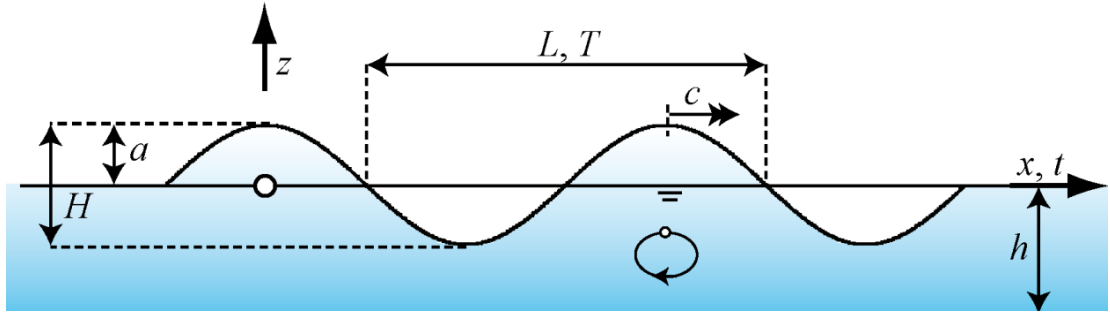
c = Dalga hızı (m/s)

g = Yerçekimi ivmesi ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$)

h = Su derinliği (m)

L = Dalga boyu (m)

$\pi = 3.14$



Şekil 38. Su dalgasının fiziksel özellikleri (H : dalga yüksekliği, a : dalga genliği, L : dalga uzunluğu, c : dalga hızı, h : durgun su derinliği, x ve t : seyahat mesafesi ve zamanıdır) (Evers vd. 2019)

Su dalgaları enerji iletimi, yayılım şekli, su derinliği, dalga uzunluğu, dalga genliği, dalga yüksekliği ve dalga adedi gibi özellikler dikkate alınarak sınıflandırılır. Farklı dalga türlerinin birbirlerinden ayırt edilebilmesi amacıyla aşağıdaki terimler kullanılmaktadır (Evers vd 2019).

Literatürdeki su dalgası çeşitleri şunlardır;

- Salınımlı (oscillatory) ve ötelemeli (translatory) dalgalar
- Sığ, orta ve derin su dalgaları

c) Periyodik ve periyodik olmayan dalgalar

d) Doğrusal ve doğrusal olmayan dalgalar

a) Salınımlı (oscillatory) ve ötelemeli (translatory) dalgalar

Salınımlı dalgası Şekil 38’te görüldüğü gibi su parçacıklarının dalga hızına bağlı olarak hareket etmediği, dalganın yayılımı sırasında su parçacığının yörüngesel hareket ettiği dalga türüdür. Salınım dalgalarında su yüzeyi dalga ile ilerliyormuş gibi görünse de su tanecikleri, dikkate alınan süre boyunca aynı pozisyonda kalır. Salınım dalgalarında su kütlesi transferi söz konusu değildir sadece enerji transferi söz konusudur. Ötelenme dalgalarında ise tam tersi durum söz konusudur. Su tanecikleri dalganın ilerleme doğrultusunda hareket ederek hem su kütlesi hemde enerji transferi meydana gelir.

b) Sığ, orta ve derin su dalgaları

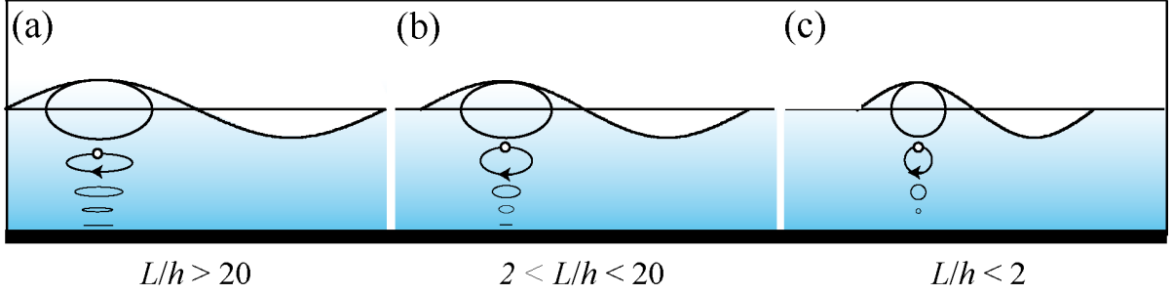
Sığ, orta veya derin su dalgasını tanımlarken kriter olarak su dalgasının boyunun su derinliğine olan oranı (L/h) bakılır. Bu üç dalga tipinde de salınımlı dalga görünmektedir. Su parçacıkları yörüngesel bir hareket göstermektedir. $L/h > 20$ olması durumunda dalga sığ dalga olarak isimlendirilir ve bu dalga türünde su parçacıkları eliptik bir yörüngesel izler. Bu eliptik hareket derine indikçe düzleşir ve küçülerek sonunda tabana paralel hareket eder. Levha hareketleri sonucu oluşan tsunami dalgası sığ su dalgasıdır çünkü $L/h > 20$ dir. $2 > L/h > 20$ olması durumunda ise orta su dalgası olarak tanımlanmaktadır. Derin su dalgalarında $L/h < 2$ olup eliptik hareket derinlik artıkça küçülmekte ve sonunda yok olmaktadır. Derin su dalgaları göl veya deniz yatağından etkilenmeyen dalga tipidir (Şekil 39a, b ve c). Açık okyanuslardaki su dalgaları derin su dalgalarıdır.

c) Periyodik ve periyodik olmayan dalgalar

Periyodik dalgalar, birkaç dalgadan oluşan bir dalga grubudur. Aksine periyodik olmayan bir dalga ise tek bir dalga ile açıklanır.

d) Lineer ve lineer olmayan dalgalar

Doğrusal olmama terimi, dalgaların matematiksel tanımından kaynaklanmaktadır. Doğrusal dalgalar bir sinüs eğrisi biçimindedir. Bu dalgalar bağlı yükseklikleri H (dalga yüksekliği) / h (durgun su derinliği) $< 0,03$ olan küçük, H (dalga yüksekliği) / L (dalga uzunluğu) < 0.006 olan düz dalgalardır (Dean and Dalrymple 2004).

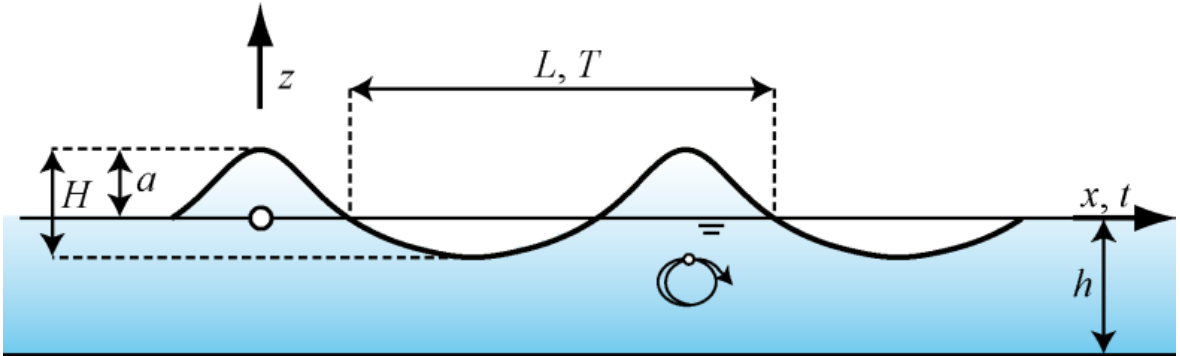


Şekil 39. Sığ (a), orta (b) ve derin su (c) dalgaları (Heller, 2009)

• Teorik Dalga Türleri

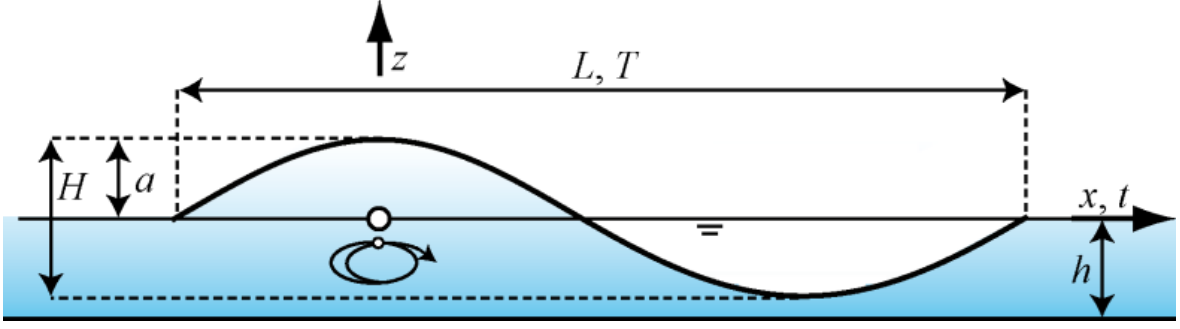
Bu başlık altında hem teorik hem de deneysel olarak iyi incelenmiş olan birkaç özel doğrusal olmayan su dalgası tanımlanmaktadır. Tanımlanacak dalgaları özelliklerine göre 4 ana başlıkta sınıflandırılmak mümkündür.

- (i) Stoke Dalgalar: Bu dalgalar genel olarak orta ve derin su dalgalarıdır. Stokes dalgası sinüzoidal dalgadan daha diktir ve dalga çukuru, dalga tepe noktasından biraz daha düz ve daha uzundur. Su parçacıkları kapalı bir yörünge biçiminde hareket etmez. Bu dalgalara en iyi örnek açık sudaki rüzgar dalgaları (derin su dalgaları) verilebilir. Su parçacıkları yörüngesel hareket etmemektedir, bunun sonucu olarak da su kütlesi zayıf bir şekilde taşınır (Şekil 40).



Şekil 40. Stokes dalgası (Heller, 2009)

- (ii) Cnoidal Dalgalar: Doğrusal olmayan bir orta veya sığ su dalgasıdır. Salınımlı (oscillatory) bir karaktere sahip olan bu dalgalar periyodik dalgalardır. Örneğin sığ suda rüzgâr tarafından üretilen dalgalar bu teori ile açıklanabilir (Şekil 41).



Şekil 41. Cnoidal dalga (Heller, 2009)

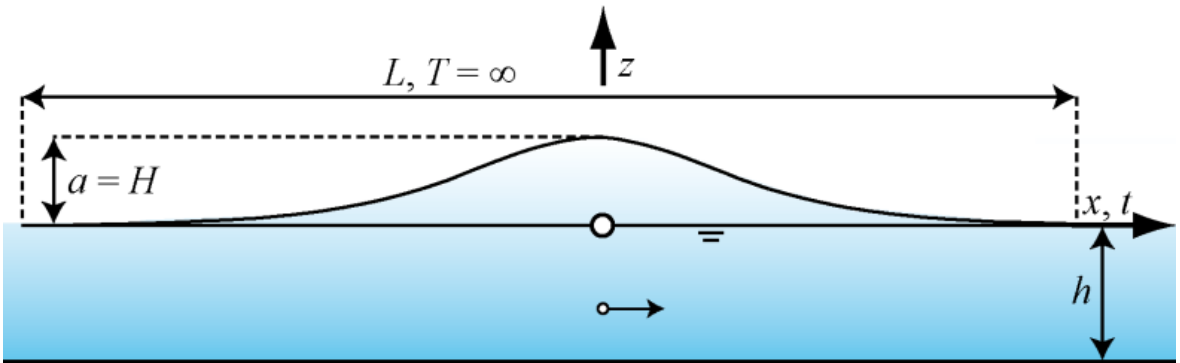
(iii) Solitary Dalgaları: Lineer olmayan sığ su dalgalarıdır. Tektonik plaka hareketinin neden olduğu bir tsunami dalgası solitary dalga olarak tanımlanır (Madsen vd. 2008). Çünkü bir tsunamiye ait dalga uzunluğu sonsuz kabul edilir ($L=\infty$) ($L/h > 20$). Bu tür dalgalarda dalga tepesi varken dalga çukuru yoktur. Yani dalga yüksekliği dalganın amplitüdüne eşittir ($a=H$). Su partiküllerinin hareketi yataydır ve bunun bir sonucu olarak büyük miktarda sıvı kütlesi taşınması söz konusudur. Gerçekte, esas olarak okyanus veya göl yatağında oluşan türbülans, dalga yüksekliğinde bir miktar düşüşe neden olur, ancak bu yine de diğer dalga türlerinde meydana gelenden daha azdır (Şekil 42). Bir solitary dalgaya ait hız $c=(g(h+a))^{1/2}$ formülü ile hesaplanmaktadır. Bu tür dalgalarda dalganın amplitüdü (a) $0.78 h$ değerini aştığı zaman dalga kırılarak bore dalgası olurlar.

a = Dalganın amplitüdü (m)

c = Dalga hızı (m/sn)

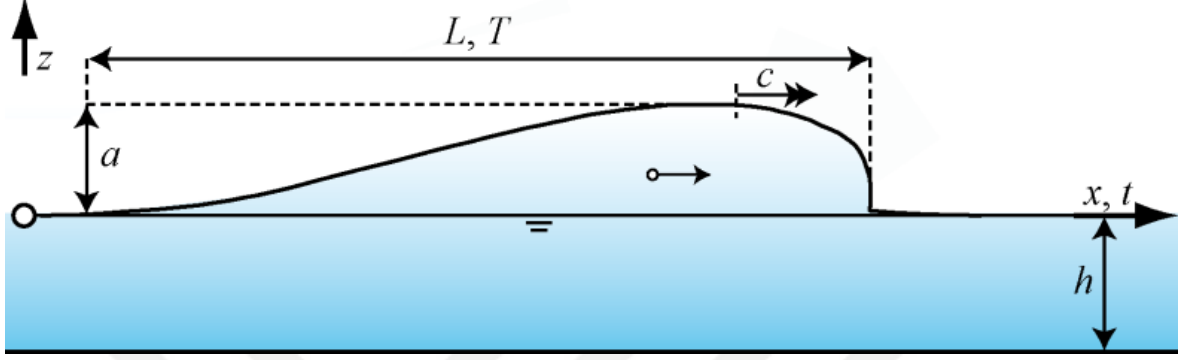
g = Yerçekimi ivmesi; $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

h = Su derinliği (m)



Şekil 42. Solitary Dalga (Heller, 2009)

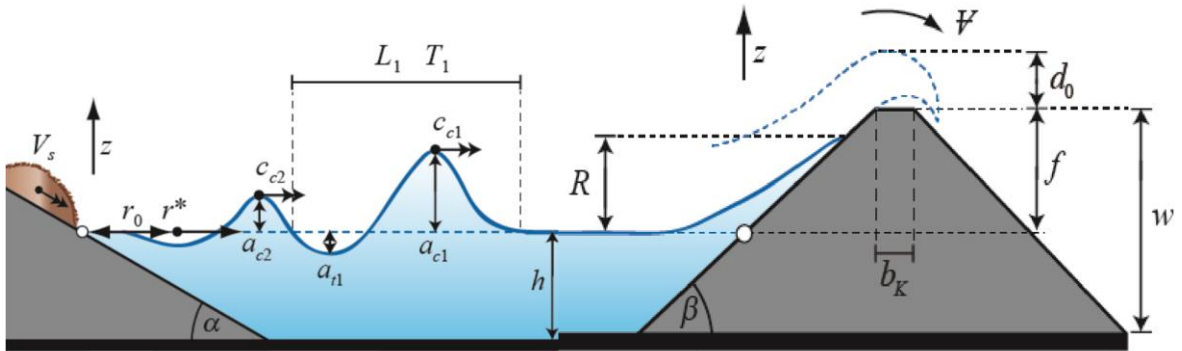
- (iv) Bore Dalgaları: Şiddetli bir darbe bölgesinde veya kıyıya yakın bir ortamda dalgaların kırılması sırasında oluşur. Bu dalgalar yatay parçacık hareketine sahip sığ su dalgalarıdır ve bu nedenle büyük su kütlelerinin hareketine neden olur. Dik bir ön kısım ve hafifçe eğimli bir arka yüzey ile karakteristiktir (Şekil 43).



Şekil 43. Bore Dalgası (Heller, 2009)

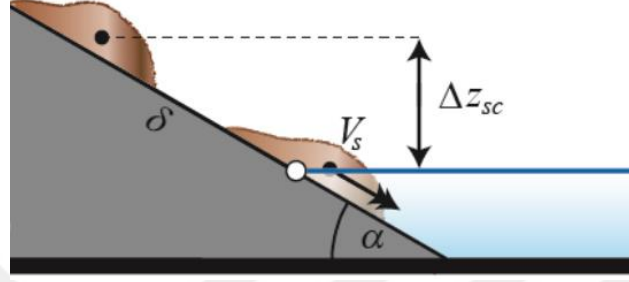
İtke dalgaları; periyodik olmayan sığ su dalgasıdır. İtke dalgası hareketinde su parçacıkları yörüngesel olarak yatayda hareket ettiği için büyük su kütlelerinin taşınmasına neden olur. İtke dalgası hareketinde hem enerji hem de kütle transferi söz konusu olduğu için bu tür dalgalar teorik olarak “Solitary dalga” olarak sınıflandırılırlar. Bu nedenle tez çalışma kapsamında yapılan tüm analizler Solitary dalga için yapılmıştır.

Ampirik Yaklaşımlar ile hareket edenin kütlenin suya çarpma hızı, çarpma ile oluşan Solitary dalganın yüksekliği, ilerleme hızı, karşı kıyıdaکی ilerleme miktarı ve baraj gövdesinin üzerine aşp aşmayacağı hesaplanmaktadır (Şekil 44).



Şekil 44. Kütlenin rezervuardaki suya çarpması, dalganın oluşması, dalganın ilerlemesi ve barajın gövdesine çarpması (Heller, 2009)

Kütlenin suya çarpma hızı; Hareket eden kütlenin suya çarpma hızı hesaplanırken yamaç eğimi, malzemenin içsel sürtünme açısı ve kütlenin düşme yüksekliği (hareket eden heyelan kütlesinin ağırlık merkezinin su yüzeyi seviyesine olan mesafesi) (Şekil 44). Kütlenin suya çarpma hızı Eşitlik 6 ile hesaplanmaktadır.



Şekil 45. Hareket eden kütlenin çarpma hızında kullanılan parametreler

$$V_s = \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta z_{sc} \cdot (1 - \tan \delta \cdot \cot \alpha)} \quad (6)$$

V_s : Kayan malzemenin çarpma anındaki hızı m/s

g : Yer çekimi ivmesi m/s^2 ($\approx 9,81 m/s^2$)

Δz_{sc} : Düşme yüksekliği (m)

δ : İçsel Sürtünme açısı

α : Yamaç eğimi

Çarpma zonundaki dalga yüksekliği: Çarpma zonundaki dalga yüksekliği yada yayılma zonundaki dalga yüksekliği maksimum dalga yüksekliğidir. Bu değer çarpma hızına, su derinliğine, hareket eden kütlenin kalınlığına ve kütleğine bağlıdır. Eşitlik 7'deki P yani itki üretimi parametresi ampirik eşitlik ile yapılan hesaplamaların hemen hemen hepsinde kullanılmaktadır. Bu değer birimsiz olup Eşitlik 8. ile hesaplanmaktadır.

$$H_M = (5/9)P^{4/5}h \quad (7)$$

H_M = Çarpma zonundaki maksimum dalga yüksekliği (m)

h = Çarpma zonundaki su derinliği (m)

P = İtki üretimi parametresi

$$P = F \cdot S^{1/2} \cdot M^{1/4} \cdot \{\cos [(6/7) \alpha]\}^{1/2} \quad (8)$$

F = Froud sayısı [$F= V_s / (gh)^{1/2}$] (V_s : çarpma hızı, g : yerçekim ivmesi, h : su derinliği)

S = Göreceli heyelan kalınlığı [$S=s/h$] (s : kayan malzemenin kalınlığı, h : su derinliği)

M = Göreceli heyelan kütlesi [$M = \rho_s \cdot V_s / \rho_w \cdot b \cdot h^2$]

ρ_s =Kayan malzemenin yoğunluğu (kg/m^3)

V_s =Kayan malzemenin hacmi (m^3)

ρ_w =Suyun yoğunluğu (kg/m^3)

b =Heyelanın genişliği (m)

İtke dalgasının rezervuarda ilerleme hızı: Çarpma zonunda oluşan itke dalgası rezervuarda belirli bir hızla ilerleyerek yol almaktadır. İlerleme hızı erken uyarı sistemleri ve yıkımın boyutu ile doğru orantılıdır. Oluşacak itke dalgasının hızı hesaplanarak zarar vermesi muhtemel yerler için erken uyarı ve tahliye planlarında kullanılacaktır. Böylece dalga o bölgeye ulaşmadan bölge boşaltılmış olacaktır. Ayrıca ilerleme hızı ne kadar fazla ile dalga o denli güçlü ve yıkıcı olacaktır. Dalganın çarpma zonundan çıkıp rezervuarda yayılma hızı Eşitlik 9 ile hesaplanmaktadır.

$$c = [g(h+a)]^{1/2} \quad (9)$$

c = Dalganın yayılma hızı (m/sn)

g =Yerçekimi ivmesi (9.81 m/s^2)

h =su derinliği (m)

a =Dalganın ampitüdü (m) [$a=(4/5)*H$ (dalganın çarpma zonundaki yüksekliği)]

İtke dalgasının karşı kıyıda ve baraj gövdesindeki Run-up yüksekliği: Çarpma zonunda oluşup ve belirli bir hız ile ilerleyen itke dalgası sonunda ya baraj gövdesi ya da topografik bir engel ile karşılaşır. Engele çarpan dalga engeli aşarak baraj gövdesinde üstten aşmaya topografik engel üzerinde ise ilerleyerek su baskınlarına neden olur. Baraj güvenliği ve taşkın riskinin değerlendirilmesi açısından Run-up değerinin hesaplanması oldukça önemlidir. Run-up değeri Eşitlik 10 ile hesaplanmaktadır.

$$R = 1,25 \cdot (H/h)^{5/4} \cdot (H/L)^{(-3/20)} \cdot (90/\beta)^{1/5} \cdot h \quad (10)$$

R : Run-up yüksekliği (m)

H : Dalga yüksekliği (m)

h : Serbest su derinliği (m)

L : Dalga uzunluğu (m)

β : Engelin ön yüzünün eğim açısı



3. BULGULAR

3.1. Çalışma Alanının Seçimi

Kürtün Barajı göl alanında ve çevresinde irili ufaklı bir çok sayıda aktif ve paleo-heyelan bulunmaktadır. Göl alanı ve çevresinde bulunan bu heyelanlardan 4 tanesi riskli bulunup DSİ tarafından çalışılmıştır. DSİ 22. Bölge Müdürlüğü tarafından çalışılan 4 büyük heyelan; Dutluca, Çöplüçe, Süme ve Hardısağır heyelanları (Şekil 46) olup, bu heyelanlara yönelik jeolojik-jeoteknik çalışmalar yapılmıştır (Kürtün Barajı İnşaatı ve Jeoteknik Çalışmaları/1991). Çalışmalarda arazi gözlemleri, sondaj çalışmaları, jeofizik çalışmalar yapılarak mühendislik jeolojisi haritaları hazırlanmış, laboratuvar deneylerinden elde edilen veriler kullanılarak 2 boyutlu stabilite analizleri yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalar sonucunda heyelanların uzunlukları, genişlikleri, derinlikleri, muhtemel kayma yüzeyleri, yeraltı suyu durumları, kaya-zeminlerin fiziko-mekanik özellikleri tespit edilmiştir. Belirlenmiş 4 adet heyelan gerek konumları (rezervuara alanına göre uzaklık ve yükseklikleri) gerek kayması muhtemel malzemenin hacmi ve çarpma zonundaki su sütunu yüksekliği dikkate alındığında yıkıcı bir itki dalgası üretecek potansiyele sahip tek heyelanın Hardısağır heyelanı olduğu tespit edilmiştir. Proje kapsamında Kürtün Barajı göl alanında olası bir kütle hareketi sonucu oluşacak itki dalgasının etkisi ve biriken sediment miktarının oluşacak dalga özellikleri üzerindeki etkisinin araştırılmasında bu heyelan kütlesi dikkate alınmıştır.



Şekil 46. DSİ 22 Bölge Müdürlüğü tarafından detaylı bir şekilde çalışılan ve jeolojik-jeoteknik etüdü hazırlanan 4 heyelanın konumu

3.2. Çalışma Alanı ve Çevresinin Jeolojisi

Çalışma ve yakın çevresinde yaşlıdan gence doğru; Liyas-Dogger yaşlı Hamurkesen Formasyonu, Geç Jura-Erken Kretase yaşlı Berdiga Formasyonu, Geç Kretase-Paleosen yaşlı Çatak Formasyonu, Geç Kretase-Paleosen yaşlı Kızılkaya Formasyonu, Geç Kretase-Paleosen yaşlı Çağlayan Formasyonu, Geç Kretase-Paleosen yaşlı Çayırbağ Formasyonu, Paleosen yaşlı Kaçkar Granitoyidi, Eosen yaşlı Kabaköy Formasyonu, Kuvaterner yaşlı yamaç molozu ve alüvyon bulunmaktadır. Çalışma alanı ve çevresinde yüzeylenen birimlere ait jeolojik harita Şekil 46’da verilmiştir.

Kürtün Barajı göl alanı ve çevresinde ise Liyas-Dogger yaşlı Hamurkesen Formasyonu, Geç Jura-Erken Kretase yaşlı Berdiga Formasyonu, Geç Kretase-Paleosen yaşlı Çatak Formasyonu, Paleosen yaşlı Kaçkar Granitoyidi, Kuvaterner yaşlı yamaç molozu ve alüvyon bulunmaktadır (Şekil 47). Göl alanı ve çevresinde yüzeyleme veren birimlerin özellikleri şöyledir;

- Hamurkesen Formasyonu

İlk olarak Açar, (1977) tarafından isimlendirilen Hamurkesen Formasyonu daha sonra Eren, (1983) tarafından Zimonköy formasyonu olarak isimlendirilmiştir. Gümüşhane graniti üzerine uyumsuz bir şekilde gelen Hamurkesen formasyonu Liyas-Dogger yaşlıdır. Bu

formasyon ağırlık olarak bazalt, andezit, dasit ve piroklastlarından oluşmaktadır. Birim volkano-tortul istif olup litolojisine ve rengine dayanarak iki farklı üyeye ayırt edilmiştir. İlk üye İkisu üyesi olup formasyon tabanda bazalt, spilitik bazalt ve piroklastikler ile dolerit ve diyabazdan oluşmaktadır. İkisu üyesini üzerine uyumlu bir şekilde gelen kumtaşı mercekleri içeren andezit, killi kireçtaşı ve piroklastiklerden oluşan Karaca volkano-tortul üyesi örtmektedir (Eyüboğlu vd., 2006). Hamurkesen Formasyonu gövdede sol sahilde Dutluca heyelanın üst kesimlerinde yüzeyleme vermektedir. Hamurkesen Formasyonu bu bölgede andezit olarak karşımıza çıkmaktadır. Birim gri renkli olup, az-orta derecede ayrılmış, masif yeryer kırıklı ve parçalı bir yapı göstermektedir. Birim içindeki kırık ve çatlaklar kalsit dolgulu olup dolgusuz kısımlar demir sıvamaıdır.

- Berdiga Formasyonu

1977 yılında ilk olarak Pelin tarafından isimlendirilen Berdiga formasyonu Hamurkesen formasyonu üzerine uyumlu bir şekilde gelmektedir. Birim taban kesimde sarı renkli kumlu kireçtaşları ile başlayıp üst kesimlere doğru kırmızı-bordo renkli kireçtaşları ve devamında ise kumtaşı-silttaşı-kiltaşı-marn ve kireçtaşı ardalanmasından oluşur. Ayrıca birim içinde yer yer tuf ara katkıları da bulunmaktadır.

Birim Geç Jura-Erken Kretase yaşlı olup baraj gövdesinin sağ sahilde yüzeyleme vermektedir. Birim bu bölgede masif, yeryer kırıklı-çatlaklı olup gri renklidir. Bölgede kireçtaşlarının yanında yer yer dolomitik seviyelerde görülmektedir.

- Çatak Formasyonu

Göl alanı ve çevresinin neredeyse tamamında yüzeyleme veren çatak formasyonu, 1993 tarihinde Güven tarafından isimlendirilmiştir. Birimin bazik kökenli kayaları Maçka İlçesinin Çatak mevkiinde yüzeylendiği için çatak formasyonu olarak isimlendirilmiştir. Çatak formasyonu volkano-tortul olup formasyon kumtaşı, şeyl, marn, silttaşı, bordo renkli kireçtaşı, andezit, bazalt, tuf ve piroklastlardan oluşmaktadır. Göl alanı ve çevresinde andezit, bazalt, tuf ve breşler yüzeyleme vermektedir. Andezit-bazalt gri-koyu gri renkli, tüflü seviyeler yeşilimsi, breşler ise kahverenkli. Göl alanı ve çevresinde yüzeyleme veren birim kırıklı ve çatlaklı olup yer yer kloritlemiştir.

- Kaçkar Granitoyidi

Göl alanının sağ sahilinde Hardısağır heyelanın bulunduğu alanda yüzeyleme veren ve sondajlar ile kesilen Kaçkar Granitoyidi ilk defa Arita ve Nishiie tarafından 1985 yılında Sarıosman granitoyidi olarak isimlendirilmiş olsa bile Güven 1993 yılında Kaçkar granitoyidi olarak isimlendirmiş ve o hali ile kullanılmaktadır. Paleosen yaşlı Kaçkar

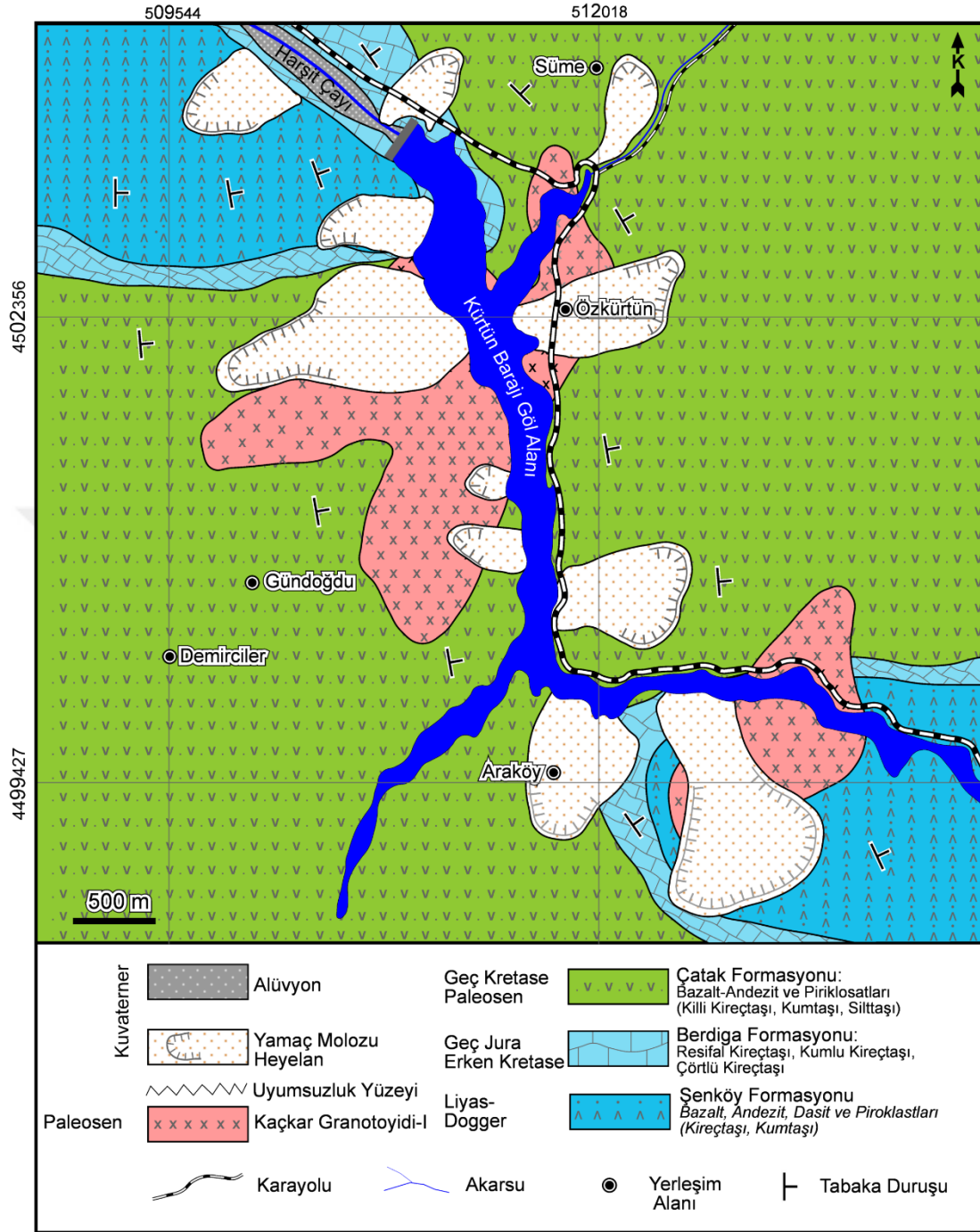
Granitoyidi Geç Kretase yaşı birimleri uyumsuz olarak kesmektedir. Çalışma alanı ve çevresinde de Geç Kretase yaşı Çatak Formasyonunu uyumsuz olarak kesmektedir. Kaçkar Granitoyidini Eosen yaşı birimler uyumlu olarak üzerlemiştir.

- Yamaç Molozu

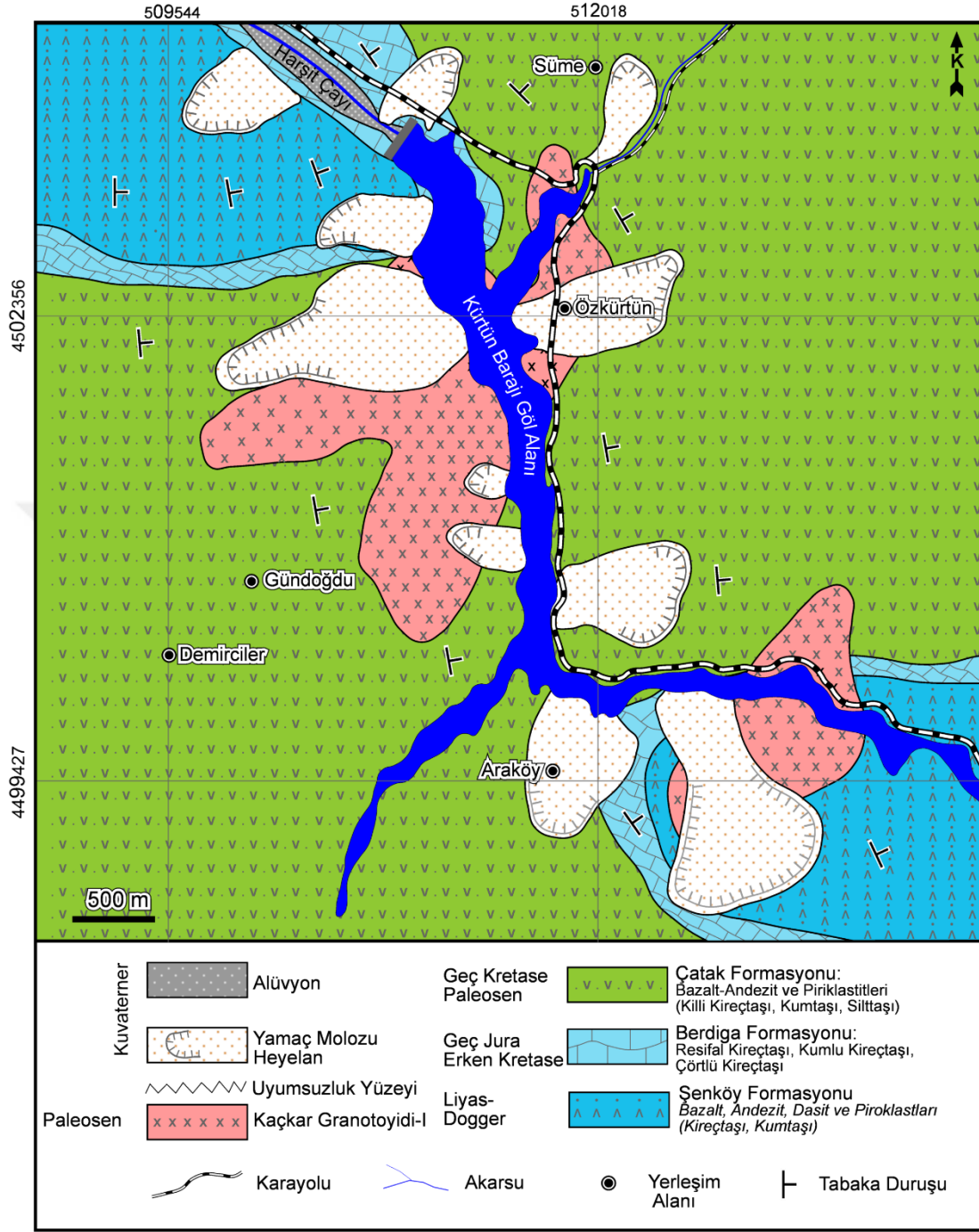
Kuvaterner yaşı yamaç molozu üst kesimlerdeki kayaçların ayrışıp taşınıp birikmesi sonucu oluşmuştur. Göl alanı ve çevresindeki heyelanları, yüzeysel akıntıların, yamaç göçmelerinin hepsi yamaç molozlarında meydana gelmiştir. Hardısağır heyelanını oluşturan yamaç molozu üzerinde yapılan sondaj, araştırma çukuru ve jeofizik çalışmalarında kil boyutundan blok boyutuna kadar malzemenin varlığı tespit edilmiştir. Ağırlıklı olarak kil ve siltten oluşan yamaç molozu gevşek bir yapıya sahiptir.

- Alüvyon

Harşit vadisi talveginde bulunan alüvyon Harşit çayının taşıdığı silt-kum-çakıl ve bloktan oluşmaktadır. Alüvyon ağırlıklı olarak kum ve çakıldan oluşmaktadır.



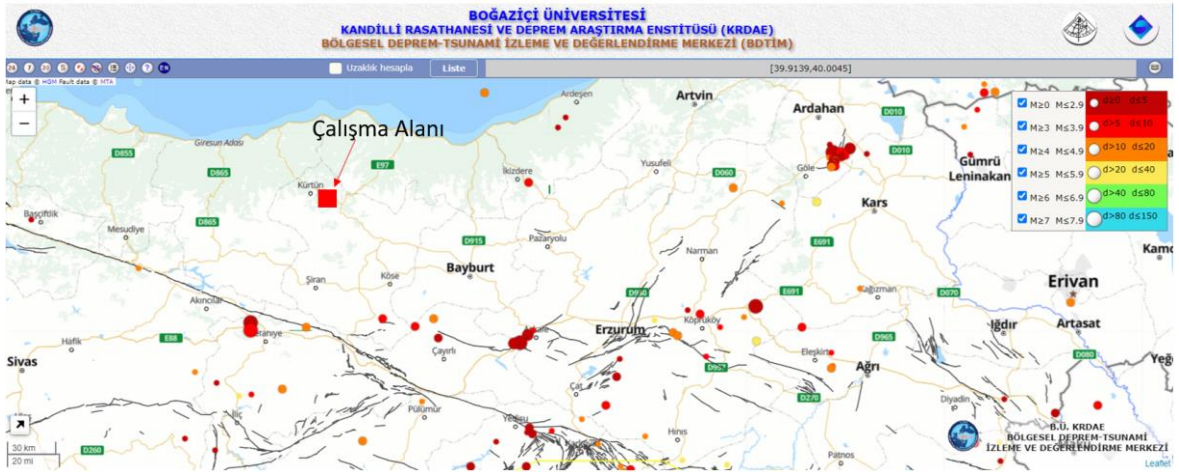
Şekil 47. Çalışma alanı ve çevresinin jeoloji haritası



Şekil 48. Göl alanı ve çevresinin jeoloji haritası

3.3. Çalışma Alanı ve Çevresinin Depremselliği

Bir bölgenin depremselliği; meydana gelen depremlerin mekanizmalarını, oluş zamanlarını, büyüklüklerini, ürettikleri hasarı ve depremin coğrafi olarak bölgenin neresinde olduğunu tanımlar. Bu konu üzerine yapılan çalışmalarda çoğunlukla bölgeye ait sismik riskin incelenmesi ve değerlendirilmesi için gerçekleştirilmektedir. İnceleme alanı olan değerlendirildiğinde ise bölgede yıkıcı özellikli olarak tanımlanabilecek aktif durumda bir faydan söz edilememekte olup, bölgeye en yakın fay sisteminin Kuzey Anadolu Fay Zonu olduğu görülmektedir. Potansiyel yıkıcı deprem üretebilecek bu fay zonu proje sahasının 50 km güneyinde bulunmaktadır (Şekil 49). Şekil 3 değerlendirildiğinde son bir ay içerisinde proje sahasına 50 km uzaklıkta büyüklüğü 3'den fazla bir çok depremin kayıt altına alındığı görülmektedir. Bu nedenle Kuzey Anadolu Fay Zonu üzerinde gelişebilecek daha büyük bir depremin baraj rezervuar alanında bulunan heyelanları tetikleme olasılığı bulunmaktadır. Bu nedenle çalışma kapsamında bu olası durum senaryo edilmiş, analizler yapılırken Hardısağır heyelanının deprem etkisi ile tetiklendiği kabul edilerek 3 boyutlu analizler depremli durum dikkate alınarak yapılmıştır. Çalışma kapsamında olası bir deprem etkisini modellemek amacıyla 2018 TBDY dikkate alınarak AFAD Türkiye Deprem Tehlike Haritasından dikkate alınmıştır.



Şekil 49. 30.12.2022 tarihi itibarıyla son bir ay içerisinde proje sahası yakın çevresine ait deprem etkinliği (<http://udim.koeri.boun.edu.tr/zeqmap/hgmmmap.asp>)

Bu durumda 2018 TBDY dikkate alınarak; “deprem yer hareketi düzeyi” **DD-1** olarak (ve 50 yılda aşılma olasılığı %2, tekrarlanma periyodu 2475 yıl), “yerel zemin sınıfı” şev

stabilite analizleri için jeofizik ölçüm verilerden elde edilen veriler doğrultusunda **ZD** olarak alınmıştır. 2018 TBDY'ne göre şevlerin duraylılık analizinde zemin cinsine uygun bir göçme modeli kabul edilerek, zemin veya kaya kütlelerinin dengesi araştırılması gerekliliği belirtilmiştir. Buna göre bir şevin toptan göçmeye karşı güvenliğinin olması için aşağıdaki eşitlikte verilen koşul sağlanmalıdır:

$$E_t \leq \frac{R_t}{\gamma_{RK}}$$

Burada, E_t göçmeye zorlayan etkiler toplamı, R_t göçmeye karşı koyan etkiler ve dirençler toplamı, γ_{RK} ise kaymaya karşı tasarım güvenlik sayısı olarak tanımlanır. Kaymaya karşı güvenlik sayısı (γ_{RK}) ardışık yaklaşımla elde edilmektedir. Özel riskler içeren durumlar hariç $\gamma_{RK} \geq 1.10$ toptan kaymaya karşı yeterli güvenlik düzeyi olarak kabul edilebilir. Yönetmeliğe göre yatay ve düşey eşdeğer deprem katsayısı değerleri (k_h ve k_v) aşağıdaki formüller kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplamada kullanılan kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı (S_{DS}), AFAD Türkiye Deprem Tehlikesi Haritası kullanılarak 1.027 olarak belirlenmiştir.

$$k_h = 0.2 \times S_{DS} = 0.2 \times 0.670 = 0.2$$

$$k_v = 0.5 \times k_h = 0.5 \times 0.2 = 0.1$$

Deprem yer hareketi spektrumları belirli bir deprem yer hareketi düzeyi esas alınarak %5 sönüm oranı için harita spektral ivme katsayılarına ve yerel zemin etki katsayılarına bağlı olarak standart biçimde sahaya özel deprem tehlikesi analizleri ile özel olarak tanımlanırlar (TBDY 2018). Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$S_{DS} = S_S \times F_S$$

F_S yerel zemin etki katsayısı, S_S harita spektral ivme katsayısı değeridir (Bu değerler 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği Tablo 2.1 ve Tablo 2.2'den ve AFAD Deprem Tehlike Haritasından temin edilebilir).

3.4. Mühendislik Jeolojisi Çalışmaları

3.4.1. Sondaj Çalışmaları Araştırma Çukurlarının Açılması ve Jeofizik Ölçümler

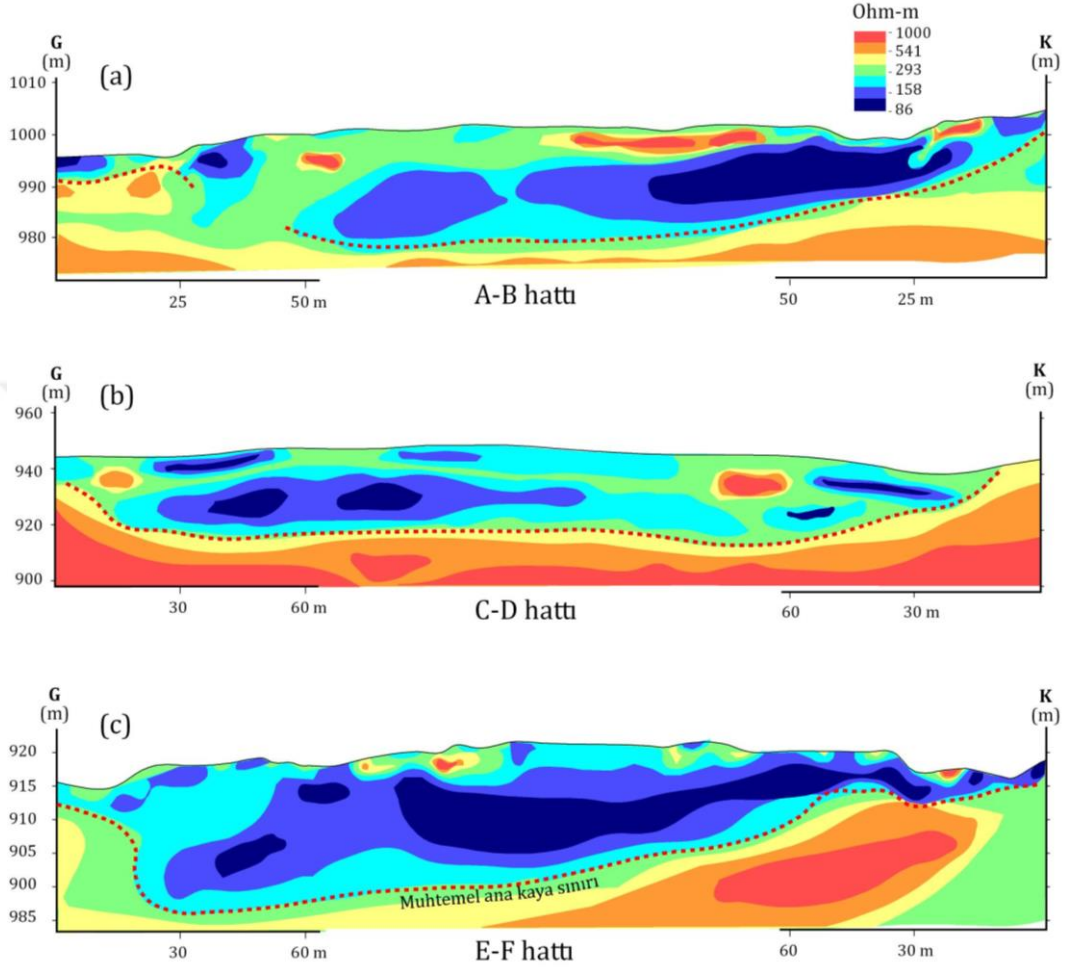
Hardısağır heyelanın jeolojik-jeoteknik özelliklerinin araştırılması kapsamında DSİ 22. Bölge Müdürlüğü tarafından toplam derinliği 305 m olan 7 adet temel araştırma sondajı yapılmıştır (Tablo 11). DSİ tarafından yapılan sondaj çalışmalarına ek olarak doktora çalışmaları kapsamında araştırma çukurları açılmış, göl alanındaki heyelanların envanteri çıkarılmış ve jeofizik ölçümler yapılmıştır. Açılan sondajlar ve yapılan jeofizik ölçümler ile heyelan kütesinin yanal-düşey devamlılığı, anakaya heyelan sınırı, heyelan malzemesinin kalınlığı ve heyelan kütesi altındaki kaya kütesinin ayrışma ve kırık çatlak durumu tespit edilmiştir. Ayrıca bu çalışmalar ile mühendislik jeolojisi haritaları ve kesitler hazırlanmıştır. Açılan araştırma çukurlarından laboratuvar deneyleri için numune alınmıştır. Hazırlanan heyelan envanter haritası ile bölgenin neden riskli olduğu ortaya koyulmaya çalışılmıştır.

Tablo 11. DSİ 22. Bölge Müdürlüğü tarafından açılan 7 adet sondaja ait bilgiler

Sondaj No	Koordinatlar			Derinlik (m)	Litoloji
	X	Y	Z		
HSK-1	4501391	511121	919	30	0.00-24.50 metreler arasında yamaç molozu 24.50-30.00 metreler arasında diyabaz
HSK-2	4501522	511159	910	50	0.00-38.00 metreler arasında yamaç molozu 38.00-50.00 metreler arasında diyabaz
HSK-3	4501627	511105	924	25	0.00-16.00 metreler arasında yamaç molozu 16.00-25.00 metreler arasında diyabaz
HSK-4	4501604	511159	907	50	0.00-28.50 metreler arasında yamaç molozu 28.50-50.00 metreler arasında diyabaz
HSK-5	4501588	511086	938	50	0.00-23.50 metreler arasında yamaç molozu 23.50-50.00 metreler arasında diyabaz
HSK-6	4501494	511077	947	50	0.00-25.50 metreler arasında yamaç molozu 25.50-50.00 metreler arasında diyabaz
HSK-7	511044	4501537	962	50	0.00-30.00 metreler arasında yamaç molozu 30.00-50.00 metreler arasında diyabaz

DSİ 22. Bölge Müdürlüğü tarafından yapılan sondaj çalışmalarına ek olarak doktora tez çalışması kapsamında çalışma alanında heyelan malzemesinin dinamik özelliklerinin ve güncel yeraltı suyu durumunun belirlenmesi amacıyla elektrik öz direnç tomografi (ERT) ve sismik kırılma yöntemi ile ölçüler alınmıştır. Şekil 50’de açılımları 250-300 metre arasında ERT ölçüm sonuçları görülmektedir. Sonuçlar değerlendirildiğinde heyelan malzemesi

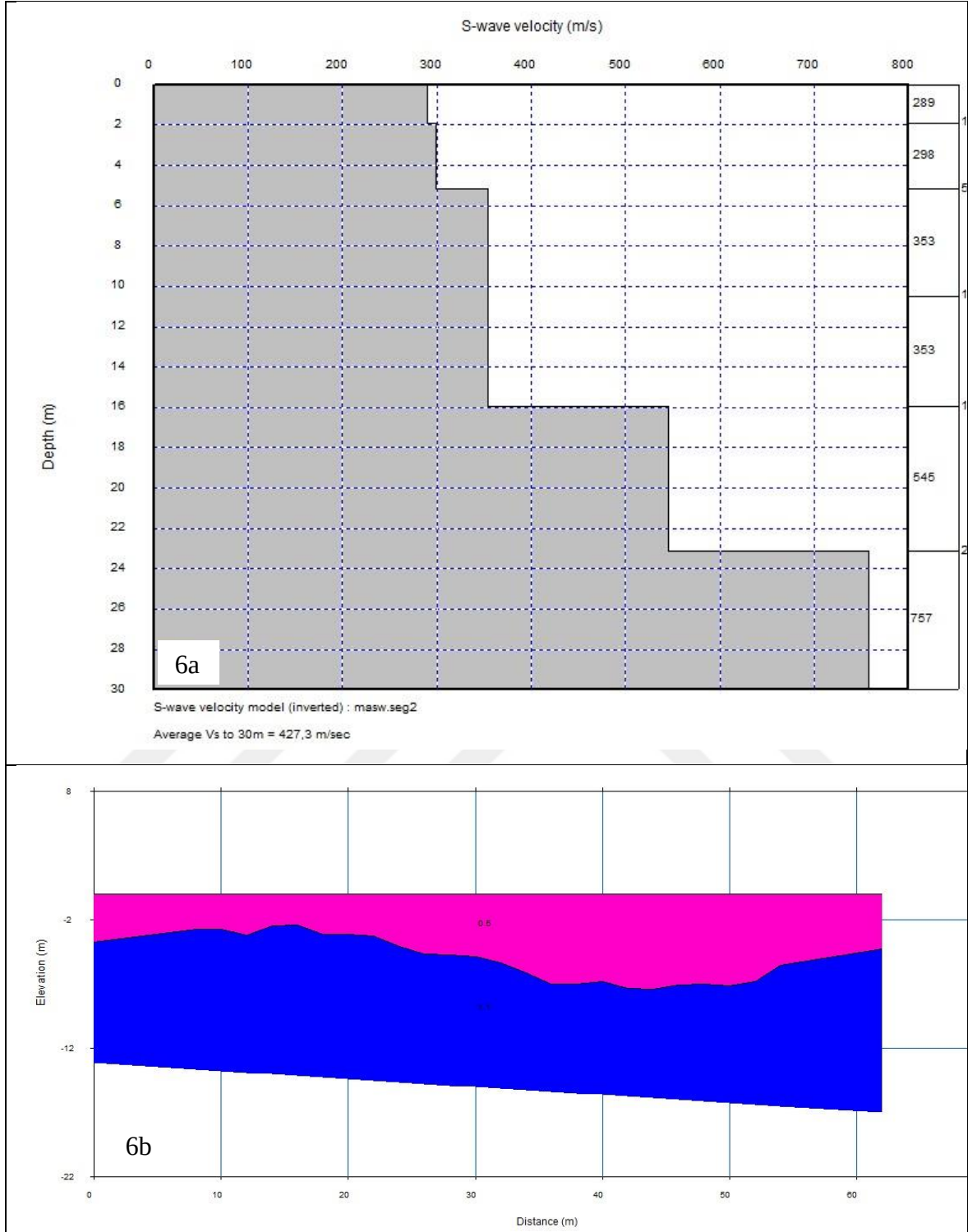
kalınlığının 20-30 metre arasında değiştiği, ortamda belirgin bir yeraltı suyu hareketinin olmadığı özdirenç değerlerinden anlaşılmaktadır.



Şekil 50. Heyelan malzemesinin hareket yönüne dik alınan ERT ölçümü sonucu hazırlanan kesitler

Sismik kırılmadan elde edilen zeminin özdirenç değeri, V_p ve V_s hızları hesaplanmıştır. Şekil 51a ve Şekil 51b incelendiğinde $V_s(30)$ ve V_p hız değerleri görülmektedir. Sonuçlar değerlendirildiğinde 30 metrelik zemin profilinde yaklaşık 20-25 metrelik kısmın yamaç molozu, son 5 metrenin ayrılmış kaya olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 12’de ampirik ilişkiler kullanılarak hesaplanan ve heyelan malzemesinin fiziksel ve dayanım özellikleri özetleyen bilgiler verilmiştir.

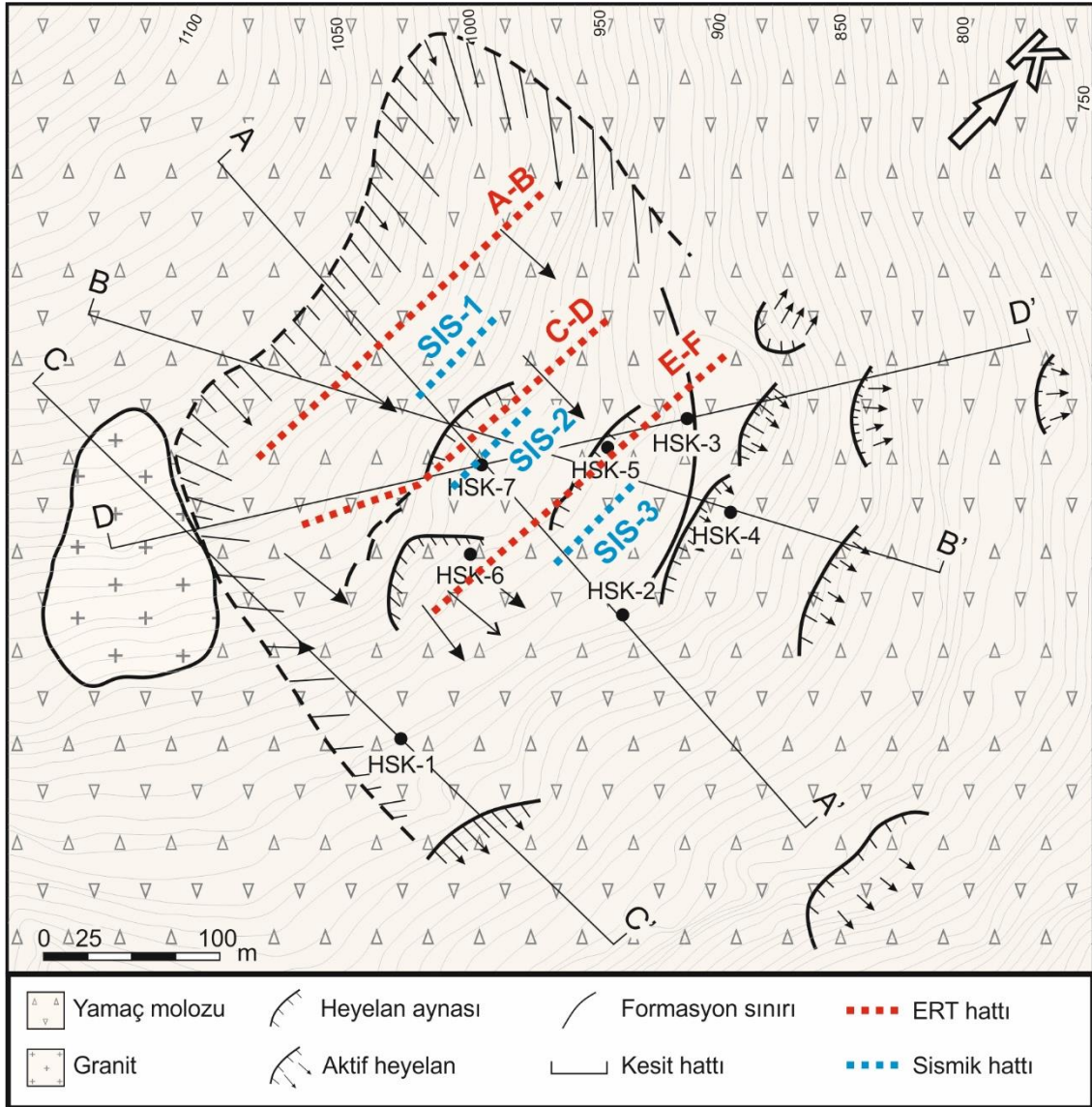


Şekil 51. Sismik kırılma ile ölçülen değerlerden hesaplanan $V_s(30)$ (a) ve V_p hız değerleri (b) (Sismik hat-2 için)

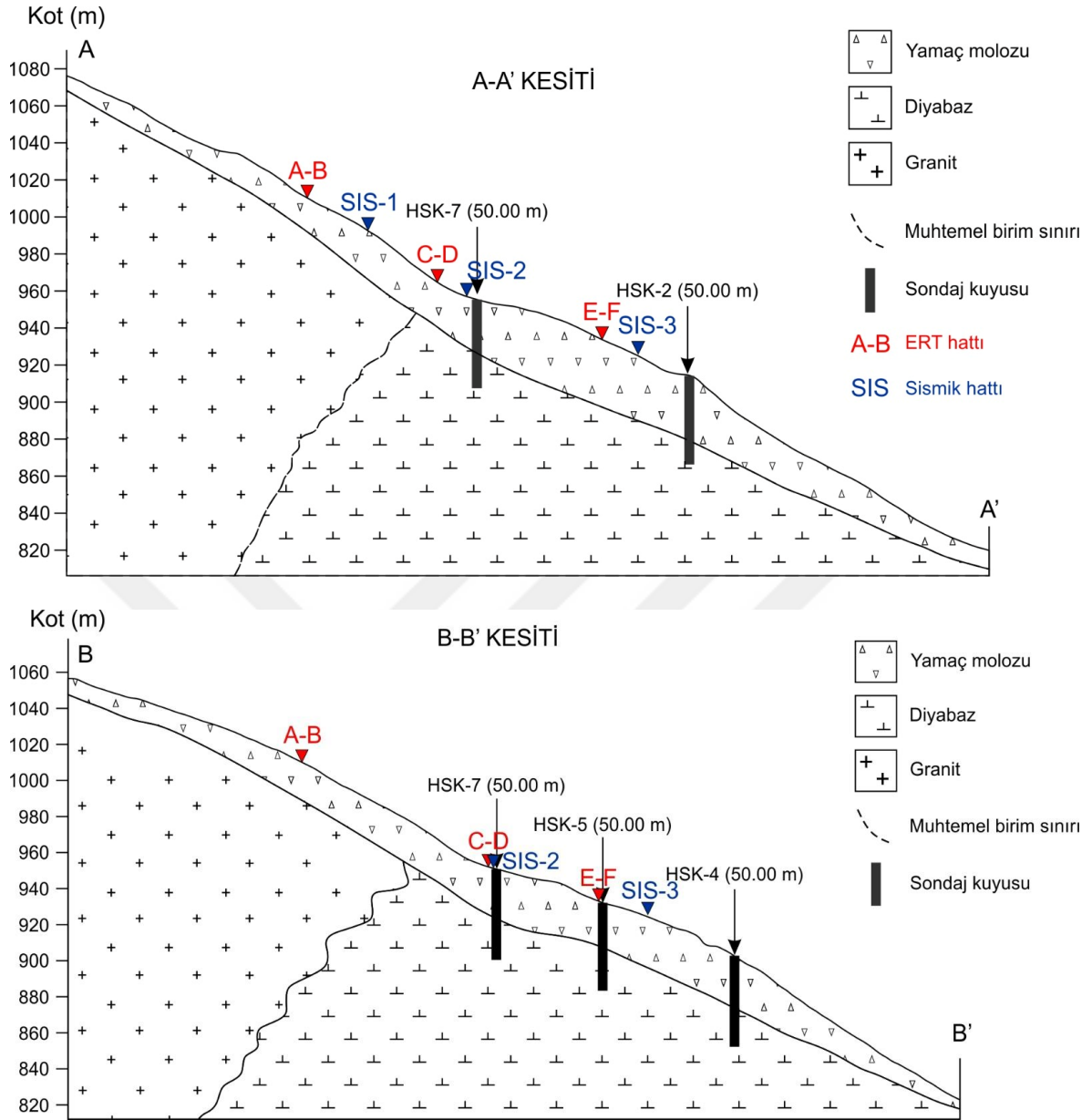
Tablo 12. Proje kapsamında yapılan sismik ölçümler sonucunda hesaplanan zemin parametreleri

Sismik Hat-1									
Tabaka No		Vp (m/sn)		Vs (m/sn)		Vp / Vs		Tabaka Kalınlığı (m)	
1		400		175		2.29		16	
2		900		220		4.09		0.00	
Yoğunluk		Poisson Oranı		Kayma Modülü		Elastisite Modülü		Bulk Modülü	
gr/cm ³	Tanımlama	-	Sıklık	kg/cm ²	Dayanım	kg/cm ²	Dayanım	kg/cm ²	Sıkışma
1.39	Düşük	0.38	Gevşek	426	Zayıf	1177	Zayıf	1656	Az
1.70	Orta	0.47	Çok Gevşek	823	Zayıf	2417	Zayıf	12673	Orta
Sismik Hat-2									
Tabaka No		Vp (m/sn)		Vs (m/sn)		Vp / Vs		Tabaka Kalınlığı (m)	
1		415		180		2.30		14.7	
2		905		223		4.05		0.00	
Yoğunluk		Poisson Oranı		Kayma Modülü		Elastisite Modülü		Bulk Modülü	
gr/cm ³	Tanımlama	-	Sıklık	kg/cm ²	Dayanım	kg/cm ²	Dayanım	kg/cm ²	Sıkışma
1.38	Düşük	0.38	Gevşek	426	Zayıf	1186	Zayıf	1659	Az
1.72	Orta	0.47	Çok Gevşek	823	Zayıf	2420	Zayıf	12670	Orta
Sismik Hat-3									
Tabaka No		Vp (m/sn)		Vs (m/sn)		Vp / Vs		Tabaka Kalınlığı (m)	
1		400		175		2.29		16.3	
2		900		220		4.09		0.00	
Yoğunluk		Poisson Oranı		Kayma Modülü		Elastisite Modülü		Bulk Modülü	
gr/cm ³	Tanımlama	-	Sıklık	kg/cm ²	Dayanım	kg/cm ²	Dayanım	kg/cm ²	Sıkışma
1.39	Düşük	0.38	Gevşek	426	Zayıf	1175	Zayıf	1672	Az
1.70	Orta	0.47	Çok Gevşek	823	Zayıf	2422	Zayıf	12685	Orta

Yapılan tüm arazi çalışmaları sonucunda çalışma kapsamında 1/500 ölçekli mühendislik jeoloji haritası hazırlanmış (Şekil 52 ve 53), yapılan sondajlardan ve jeofizik ölçümlerden elde edilen kuyu logları kullanılarak 4 farklı kesit alınmıştır. Şekil 53'teki kesitlerden de görüldüğü üzere heyelan malzemesinin kalınlığının 10 ile 30 metre arasında değiştiği tespit edilmiştir. Ayrıca yapılan sondajlarda ve jeofizik ölçümlerde heyelan malzemesi içinde büyük blokların var olduğu görülmüştür.

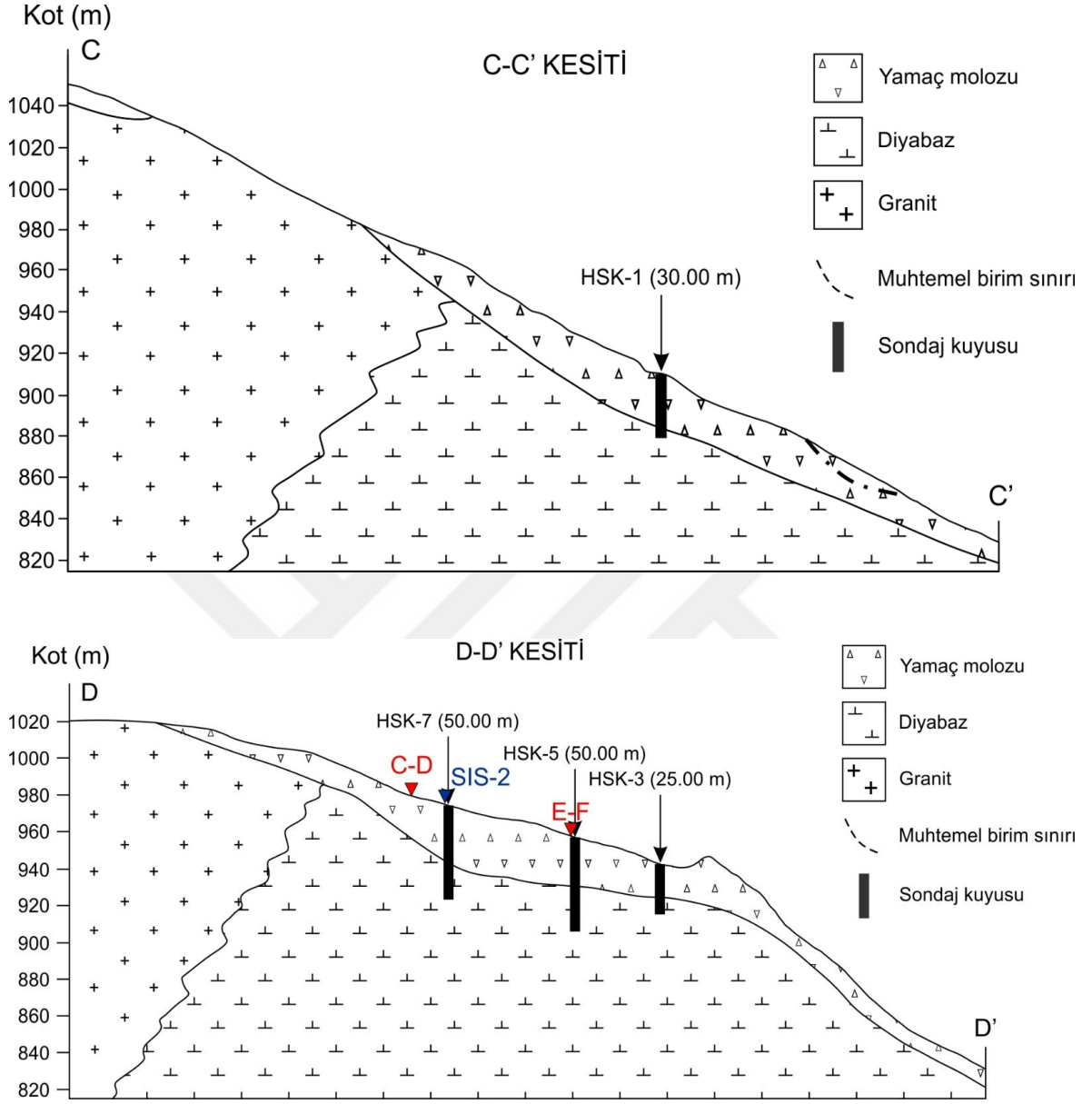


Şekil 52. Arazi çalışmaları, sondajlar ve jeofizik ölçümlerden elde edilen veriler kullanılarak hazırlanan 1/500 ölçekli mühendislik jeolojisi haritası

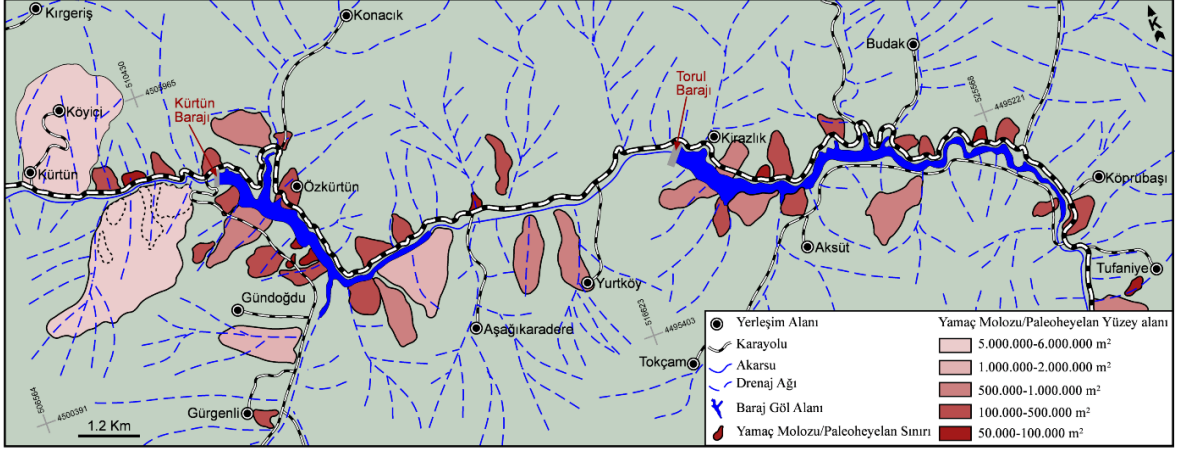


Şekil 53. Arazi çalışmaları, sondajlar ve jeofizik ölçümlerden elde edilen veriler kullanılarak alınan enine jeolojik kesitler

Şekil 53'ün devamı



Doktora tez çalışması kapsamında Kürtün Barajı göl alanının seçilmesinin iki temel sebebi vardır. Bunlar Kuzey Anadolu Fay hattına yakın olması ve Harşit vadisi boyunca iri ufaklı birçok heyelanın olmasıdır. Çalışma kapsamında göl alanı ve çevresi için hazırlanan heyelan envanter haritasından da görüldüğü üzere bölge heyelan potansiyeli açısından oldukça tehlikelidir (Şekil 54). Her bir heyelanın olası hareketi itki dalgası üretme potansiyeline sahiptir. Fakat bunlardan en riskli olanı Hardısağır heyelanıdır. Heyelan envanter haritaları kapsadıkları yüzey alanları dikkate alınarak çizilip, alansal büyüklüklerine göre kategorize edilmiştir.



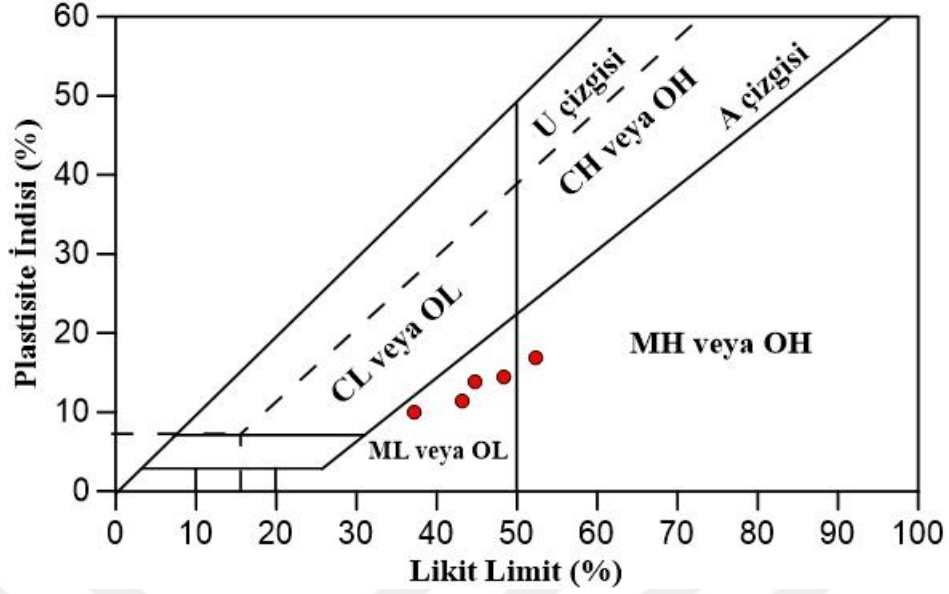
Şekil 54. Çalışma alanı ve çevresinin heyelan envanter haritası

3.4.2. Heyelan Malzemesinin Fiziksel ve Dayanım Özelliklerinin Tayini

Heyelan malzemesinin fiziko-mekanik özelliklerinin tespit edilmesi için heyelan kütlesi üzerinde 5 adet araştırma çukuru açılmış, açılan çukurlardan örselenmiş ve örselenmemiş örnekler alınmıştır. Alınan örnekler üzerinde Karadeniz Teknik Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü laboratuvarında kesme kutusu deneyi, elek analizi, hidrometre deneyi, likit limit ve plastik limit deneyi yapılmıştır. Açılan 5 adet araştırma çukuruna alınan örselenmiş ve örselenmemiş zemin numunelerine ait laboratuvar sonuçları Tablo 13'te özetlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda zeminin kohezyonunun 7.2 ile 11.4 kPa, içsel sürtünme açısının 20.4 ile 30.4 arasında değiştiği zemin birleştirilmiş zemin sınıflamasına göre ML-OL, MH-OH olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 13. 5 adet UD numuneden temin edilen örnekler üzerinde yapılan laboratuvar deney sonuçları

Örnek No	Kil (%)	Silt (%)	Kum (%)	Toplam	BHA (kN/m ³)	LL	PL	PI	Kohezyon (kPa)	İçsel Sürtünme Açısı
1	28	55	17	100	18.1	43.2	31.7	11.5	8.3	30.4
2	24	49	27	100	17.7	37.2	27.1	10.1	7.9	28.3
3	31	41	28	100	18.5	44.8	30.9	13.9	7.2	20.4
4	23	61	16	100	18.2	48.3	33.7	14.6	7.6	27
5	33	54	13	100	18.8	52.4	35.4	17	11.4	22.5



Şekil 55. 5 Adet UD örneğin birleştirilmiş zemin sınıflamasına göre sınıflandırılması (CL: Düşük plastisiteli kil, OL: Düşük plastisiteli organik kil, ML: Düşük plastisiteli silt, OL: Düşük plastisiteli organik silt, CH: Yüksek plastisiteli kil, OH: Yüksek plastisiteli organik kil, MH: Yüksek plastisiteli silt, OH: Yüksek plastisiteli organik silt)

3.5. Sayısal Arazi Modellerinin Oluşturulması

Tez çalışması kapsamında yapılmış olan 3 boyutlu stabilite ve 3 boyutlu itki dalgası analizleri için çalışma alanı ve çevresinin sayısal arazi modelleri oluşturulmuştur. Oluşturulan sayısal arazi modelleri STL (stereolithography) formatta olup çalışma alanının büyüklüğüne ve yapılan analize göre farklı boyutlarda katı modeller üretilmiştir.

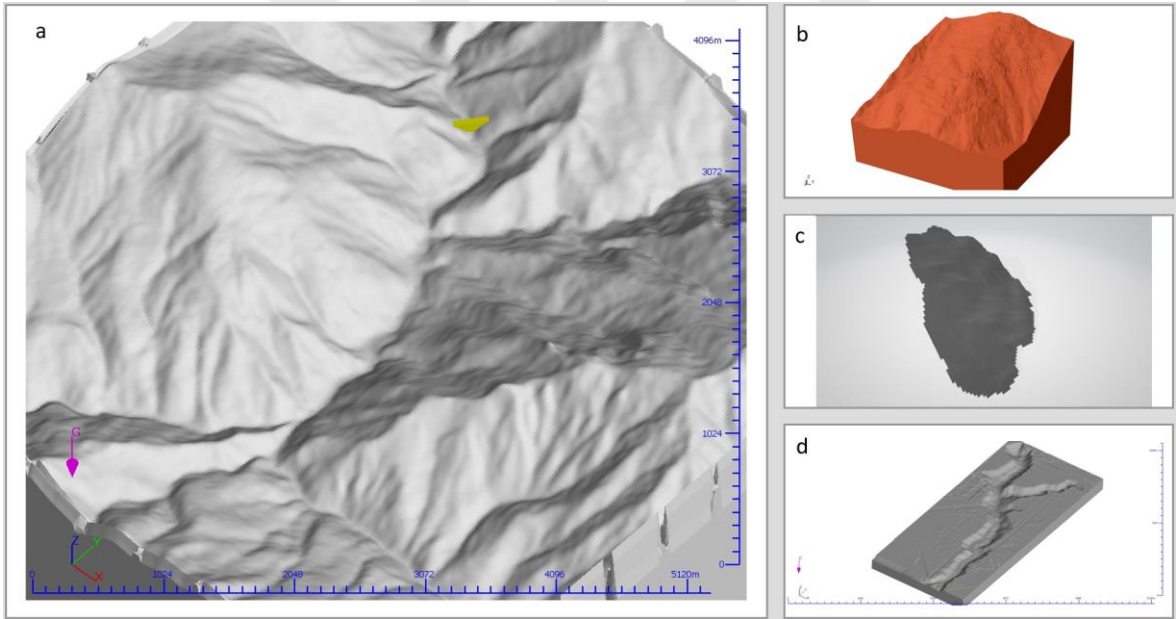
Katı modellerin üretilmesinde doktora tez çalışması kapsamında Harita Genel Komutanlığı'ndan temin edilen 5 metre çözünürlükteki ortofoto görüntülerden üretilen Dijital Yükselik Modelinden (DEM) elde edilen verileri, Hardısağır heyelanı üzerinde insansız hava aracı ile yapılan otonom uçuştan elde edilen ortofoto görüntülerin işlenmesi ile elde edilen DEM verileri ve göl alanındaki batimetrik ölçümlerde elde edilen DEM verileri kullanılmıştır.

Üç farklı şekilde üretilen DEM verilerden nokta bulutları oluşturulduktan sonra ilgili programlarda çalışma alanlarının katı modelleri üretilmiştir. İtke dalgası ile ilgili analizlerde Harita Genel Komutanlığı'ndan ve göl alanındaki batimetrik ölçümlerden elde edilen veriler kullanılarak 2 adet katı model oluşturulmuştur. Bunlardan ilki barajın sedimantasyon birikiminden önceki topografyasını içeren katı model ikincisi ise barajda sedimantasyonun

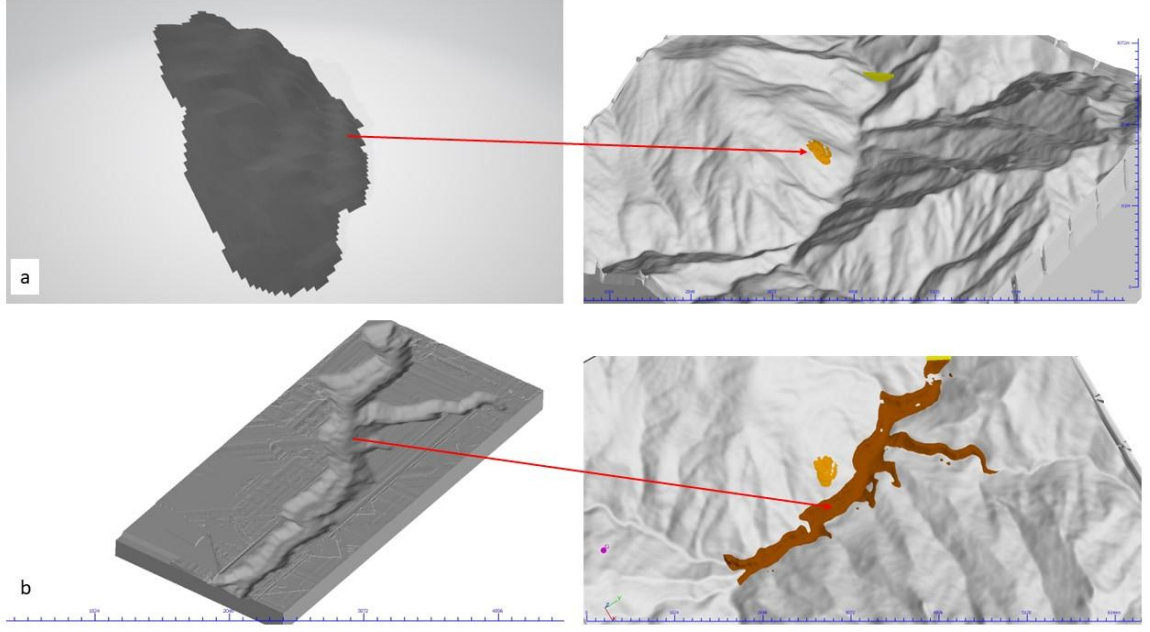
etkili olduğu topografyayı içeren katı modeldir. İkinci katı model ilk katı modele batimetrik ölçümlerden elde edilen sedimantasyon birikiminin olduğu katı modelinin entegre edilmesi ile oluşturulmuştur. Oluşturulan ikinci katı model ile güncel rezervuar topografyası üretilmiş ve tabandaki sedimantasyon dikkate alınarak itki dalgası analizleri yapılmıştır.

Rezervuara akacak heyelan malzemesinin hacminin hesabı için yapılan 3 boyutlu stabilite analizlerinde insansız hava aracı ile yapılan otonom uçuştan elde edilen veriler kullanılarak katı model oluşturulmuş ve gerekli hesaplamalar yapılmıştır. Yapılan 3 boyutlu stabilite analizlerinden sonra göl alanına akacak malzeme miktarı tespit edilmiş ve akacak malzemenin katı modeli oluşturulmuştur. Heyelanın katı modeli tüm alanı temsil eden katı model üzerine entegre edilmiştir.

Şekil 56'da heyelanlı alana, hareket etmesi muhtemel kütle, tüm göl alanına ve güncel göl taban topografyasına ait katı modeller, Şekil 57'de ise bu modellerin bir birine entegre edilmiş hali görülmektedir.



Şekil 56. Tüm göl alanına ait katı model (a), heyelanlı bölgeye ait katı model (b), kayması muhtemel kütleye ait katı model (c) ve güncel taban topografyasına ait katı model (d)

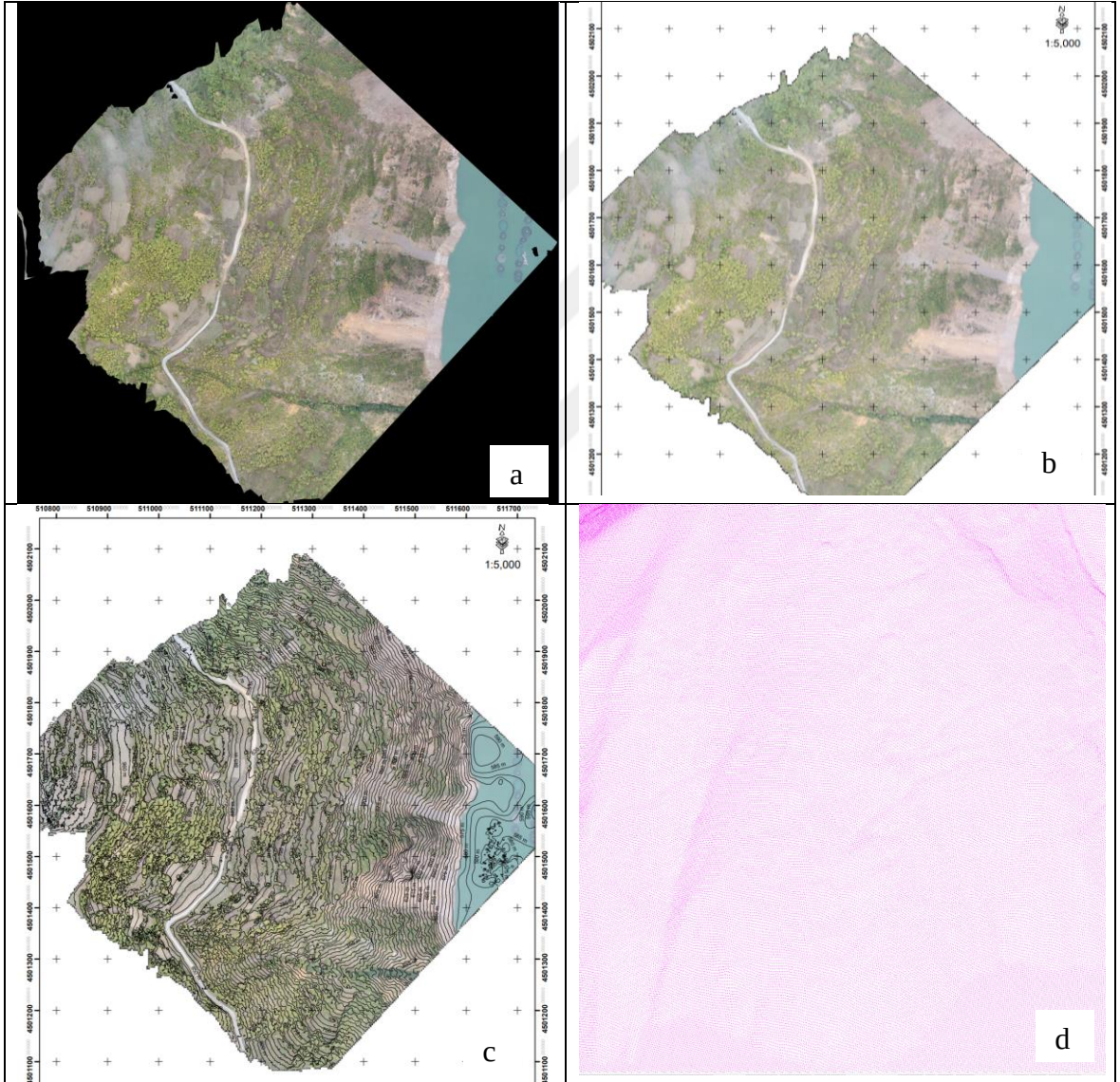


Şekil 57. Kayması muhtemel kütleyle ait katı modelin tüm göl alanına entegre edilmesi (a) ve güncel taban topografyasının tüm göl alanına entegre edilmesi (b)

3.6. Rezervuara Kayacak Malzeme Hesabı ve Yamaç Stabilite Analizleri

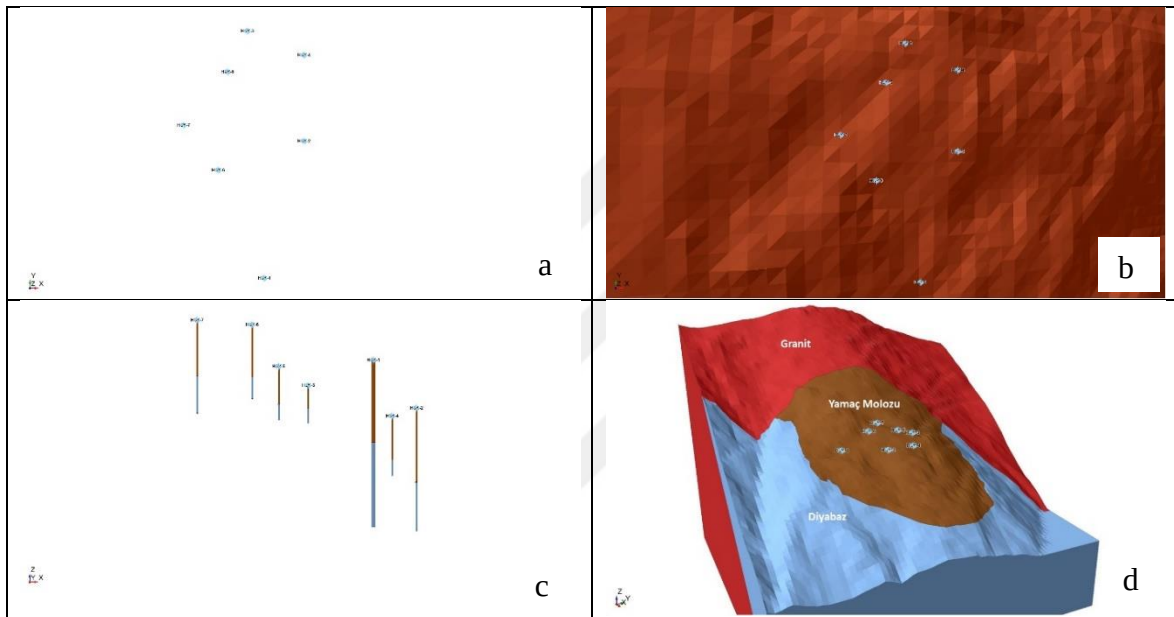
İtki dalgasının özelliklerini (dalga yüksekliği, dalga hızı, karşı kıyıda ilerleme miktarı ve barajı aşıp aşmayacağı) etkileyen 3 temel faktör vardır. Bunlar kayan malzemenin hacmi, kayan malzemenin çarpma hızı ve su sütunu yüksekliğidir. Bu 3 önemli faktörden biri olan kayan malzemenin hacmi, yüzey alanı belli olan heyelanın kayması muhtemel malzemenin ortalama derinliğinin çarpılması ile ya da 2 boyutlu limit denge analizlerinde kayma dairesi üzerine kalan alanın heyelanın ortalama genişliği ile çarpılması sonucu hesaplanmaktadır. Bu çalışmada ise literatür çalışmalarından farklı olarak 3 boyutlu limit denge analizleri ile kayma dairesi üzerinde kalan malzemenin katı modeli hazırlanmış ve hacmi doğrudan hesaplanmıştır. Hardısağır heyelanın olası hareketi sonucu kayacak malzemenin hacmi Slide3 yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır. Modelin kurulmasında insansız hava aracı ile oluşturulan ortofoto, DSİ 22 Bölge Müdürlüğü tarafından açılan sondaj kuyuları, jeofizik ölçümlerden elde edilen veriler, laboratuvar deney sonuçları ve arazi gözlemlerinden elde edilen veriler kullanılmıştır.

Heyelanlı alanın 3 boyutlu katı modelinin oluşturulması için Hardısağır heyelanı üzerinde insansız hava aracı ile otonom uçuş yapılarak çalışma alanın 253 adet %80 (ön)-%70 (yan) bindirme oranında fotoğrafları çekilmiştir. Çekilen bu fotoğraflar Agisoft programında birleştirilerek bölgenin ortofoto görüntüsü üretilmiştir (Şekil 58a). Üretilen ortofotodan çalışma alanına ait DEM (Dijital Elevation Model) üretilerek bu DEM den eş yükseklik eğrisi haritaları (1/5000) ve bölgenin nokta bulutu oluşturulmuştur (58b, c ve d). Üretilen nokta bulutu kullanılarak heyelanlı alanın katı modeli hazırlanmıştır.



Şekil 58. Çalışma alanına ait otofoto (a), DEM görüntüsü (b), Eş yükselti eğrisi haritası (c) ve nokta bulutu (d)

Oluşturulan 3 boyutlu katı model üzerine sondajlar koordinatlı bir şekilde (x,y ve z) yerleştirilmiştir. Sondajlar yerleştirilirken kuyu logu dikkate alınarak derinlikle litolojide meydana gelen değişimler dikkate alınarak kuyu logu katı model üzerine işlenmiştir. Tüm kuyular katı model üzerine yerleştirildikten sonra program aynı litolojide olan birimleri birleştirerek her birim için bir formasyon sınırı çizmiştir. Yapılan bu işlem sonucunda yamaç molozu, granit ve diyabaz için 3 boyutlu jeolojik blok model oluşturulmuştur (Şekil 59a, b, c ve d).



Şekil 59. Sondajların programda loglanması (a), sondajların 3 boyutlu katı model üzerine işlenmesi (b), sondaj loglarının kesit görüntüsü (c) ve 3 boyutlu jeolojik model (d)

Oluşturulan 3 boyutlu model üzerindeki farklı birimler tanımlanmış; yamaç molozu için kohezyon, içsel sürtünme açısı ve birim hacim ağırlık değerleri kullanılmış (Tablo 14), kaya kütleleri sonsuz dayanımlı olarak kabul edilmiştir.

Tablo 14. Stabilité analizlerinde kullanılan malzeme özellikleri

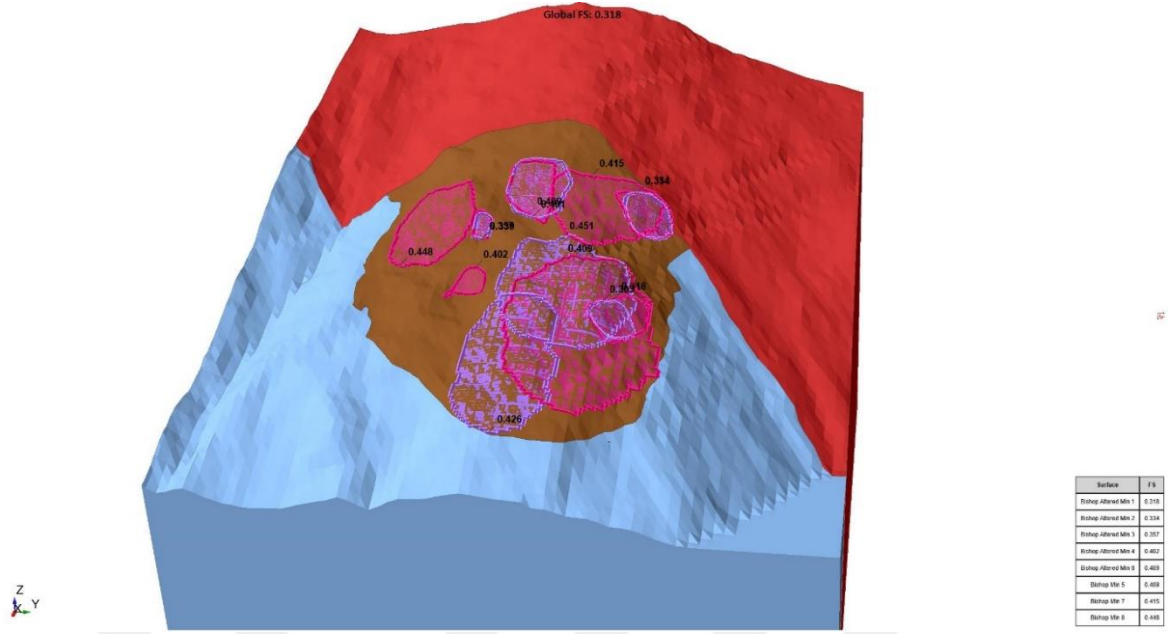
Birim	Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	Kohezyon (kPa)	İçsel Sürtünme Açısı (Ø)
Yamaç Molozu	18.26	8	25
Diyabaz	Sonsuz dayanım		
Granit	Sonsuz dayanım		

3 boyutlu model kurulduktan sonra Slide3 programında 3 boyutlu limit denge analizleri yapılarak depremli bir durum için minimum güvenlik sayısı ve göl alanına kayacak malzeme hacmi hesaplanmıştır. Hesaplamalarda metod olarak Bishop Simplified ve Janbu Simplified seçilmiştir. Yenilme kriteri olarak yamaç molozundan Mohr Coulomb, diyabaz ve granitte ise sonsuz dayanım modu kullanılmıştır. Analizlerde Kuzey Anadolu Fayında meydana gelecek bir deprem için yer ivmesi 0.2 g olarak alınmıştır. Ayrıca analizlerde yüzey seçeneklerinden 1.1'den küçük (TBDY'ye göre) güvenlik sayısına sahip olası tek bir alanın değil de birden fazla alanın tespiti sağlanmış, çoklu yenilme modu aktif hale getirilerek toplamda 16 adet riskli alan tespit edilmiştir (Şekil 60). Bu durumda en düşük güvenlik sayısı değeri 0.303 olarak hesaplanmıştır.

Analizlerde ayrıca yüzey güvenlik haritası oluşturulmuştur. Oluşturulan bu harita ile heyelanlı kütle üzerinde 1.10'den küçük en riskli bölge tespit edilerek bu riskli bölge altındaki kayması muhtemel alanlar tespit edilmiştir. Daha önceden tespit edilen 16 alandan 3 alanın bu riskli alan altında kaldığı tespit edilmiştir. Tespit edilen bu riskli alanların hacimleri hesaplanarak STL formatında kaydedilmiştir (Şekil 60a, b, c ve d). Kayması muhtemel en riskli 3 alan ait bilgiler Tablo 15'de verilmiştir. 3 alanın toplam hacmi 875.240 m³ olarak hesaplanmıştır. Stl formatında kaydedilen bu alanlar Flow3d programında kayacak olan malzeme olarak programa tanımlanmıştır.

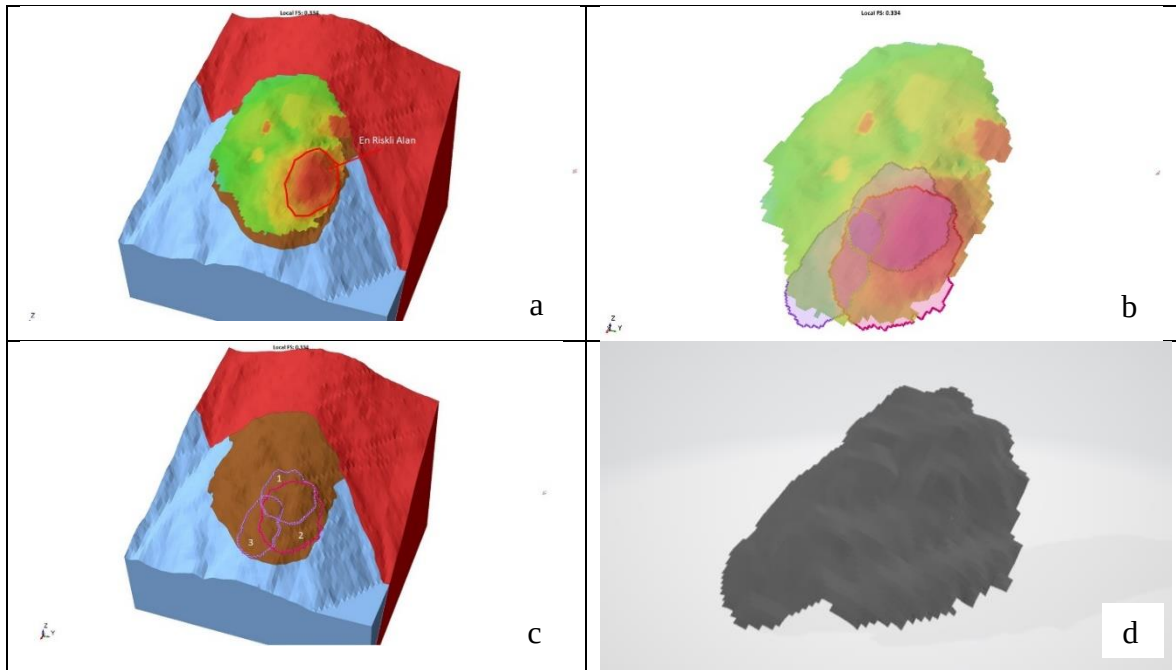
Tablo 15. Kayması muhtemel riskli alanlarda en düşük güvenlik sayısı ve kayma yüzeyi üzerinde kalan hacim

Alan No	Güvenlik sayısı	Malzeme miktarı m ³
1	0.4	422.017
2	0.45	342.273
3	0.42	110954
Toplam Malzeme Miktarı		875.240



Şekil 60. En düşük güvenlik sayısına sahip 16 adet heyelanın alansal dağılımı

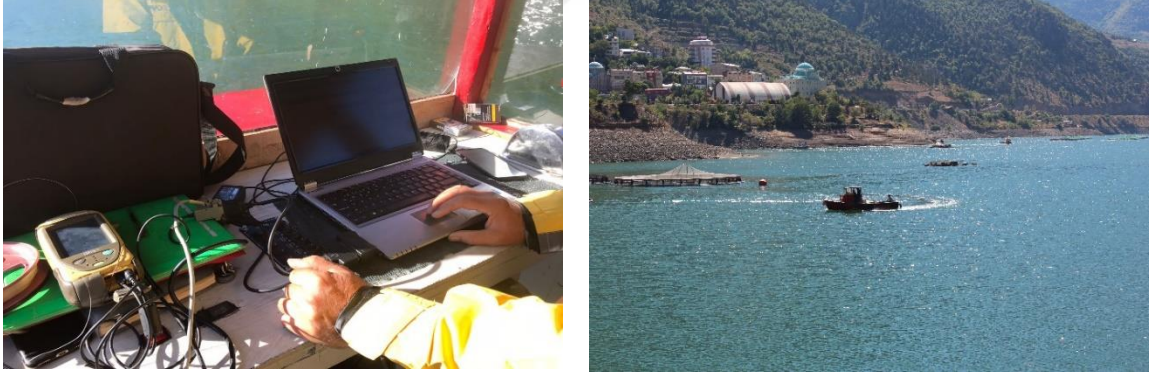
Yapılan 3 boyutlu stabilite analizleri sonucunda depremlili bir durumda 875.240 m^3 lük bir kütlemin göl alanına çarparak itki dalgası üretebileceği tespit edilmiştir.



Şekil 61. Yüzey güvenlik haritası (a), yüzey güvenlik haritası altında kalan kayması muhtemel alanlar (b), tespit edilen 3 riskli alan (c) ve kayması muhtemel 3 alanın katı modeli (d)

3.7. Sedimentasyonun Etkisinin Belirlenmesi ve Güncel Taban Topografyasının Oluşturulması

Proje kapsamında Kürtün Barajı göl alanındaki sediment birikiminin tespit edilip güncel taban topografyasını ortaya çıkarılması için göl alanında Multibeam Echosounder Ölçümleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 62). Bu proje kapsamında gerçekleştirilen hidrografik çalışmalarda, proje sahasında belirlenen hatlar üzerinde tekne hızı 3-4 knot aralığında kalacak şekilde, teknenin hat üzerinde düzgün bir biçimde ilerlemesine özen gösterilerek seyir gerçekleştirilmiştir. Seyir boyunca göl tabanındaki sedimen birikimini görüntülemek için yüksek çözünürlüklü IMAGENEX DT101 Çok Bimli İskandil Sistemi kullanılmıştır. Bu cihaz, 240 kHz olup 120° iskandil açısı ve 480 beam (ışın) özelliği ile oldukça yüksek çözünürlükte veri toplar. Veri toplama ve veri işleme işlemleri aynı yazılım ile yapılmıştır. Survey teknesi çalışma esnasında kıyıya paralel oluşturulan çalışma hatları üzerinde teknenin kaptanının marifeti ile seyretmiştir. 3 boyutlu ve 2 boyutlu haritaların oluşturulması için kullanılan veri gerçek zamanlı olarak kaydedilmiştir ve survey ekranından takip edilmiştir.



Şekil 62. Batimetrik ölçümden görüntüler

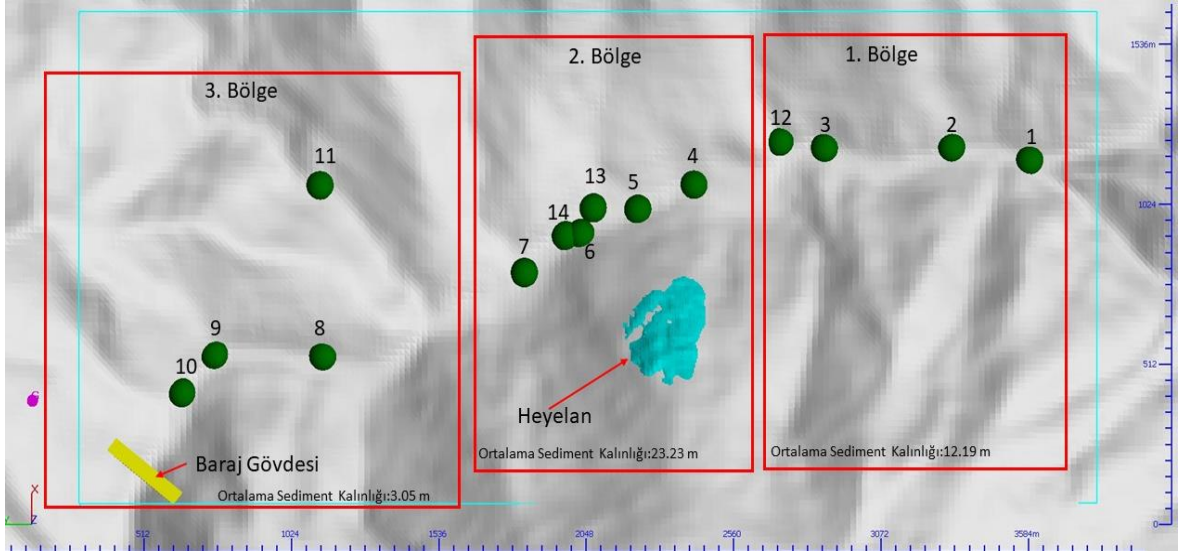
Ham veri olarak toplanan veriler “spike” adı verilen gürültülerden temizlenmiştir. Verilere su seviyesi ve ses hızı işlenerek son haline getirilmiştir. Üretilen haritalar işlenmiş bu verilerden oluşturulmuştur. Toplanan derinlik verilerinin gerçek harita datumuna (TUDKA) indirgenebilmesi için hidrografik ölçümlerle eş zamanlı olarak kaydedilen göl seviyesi değişimleri derinlik verilerine hidrografik yazılım kullanılarak uygulanmış ve

haritanın hazırlanmasında kullanılacak nihai derinlik değerleri (XYZ) elde edilmiştir. Bu projede toplanan verilerin görselleştirilmesi için Fledermause 3D programı kullanılmıştır.

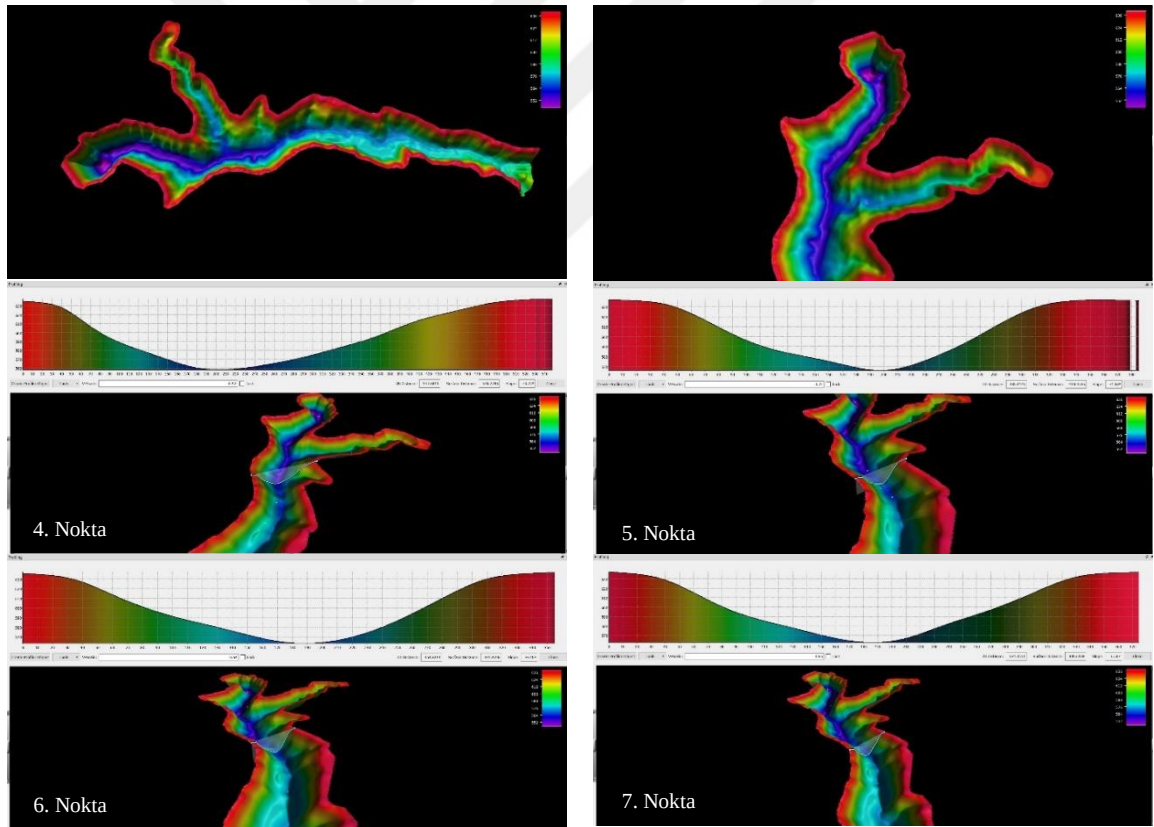
Program üzerinden her türlü mesafe ölçümleri alınabilmekle beraber, 3 boyut olarak harita üzerinde görselleştirilmesi sağlanabilmektedir. Yapılan ölçümler sonucunda göl tabanından 3.52 m ile 38.79 metreler arasında sediment biriktiği ortaya çıkmıştır. 14 noktadan alınan noktasal veriler ve kesitler incelendiğinde birikmenin homojen olmadığı düzensiz bir taban topoğrafyasının mevcut olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle göl alanı 3 bölgeye ayrılmıştır. Sediment kalınlıkları 1. bölgede 12.19 m, 2. bölgede 23.23 m ve 3. bölgede ise 3.05 metre olduğu tespit edilmiştir. Sediment kalınlığının en fazla olduğu 2. bölge heyelan ve yüzeysel akımların yoğun görüldüğü bölgedir. Noktasal ölçüm ve kesitlerin alındığı yerler Şekil 63'tür noktasal ölçüm değerleri ise Tablo 16'da da verilmiştir. Ölçümler ile elde edilen tabanın batimetrik haritası Şekil 64'te verilmiştir.

Tablo 16. Ölçüm yapılan noktaların kot, koordinat ve biriken sediment kalınlığı değerleri

Nokta No	Y	X	Eski Taban Kotu (m)	Güncel Taban Kotu (m)	Biriken Sediment Kalınlığı (m)
1	511798.83	4500376.68	566.23	583.32	17.08
2	511840.88	4500647.65	572.71	578.56	5.85
3	511839.42	4501090.12	556.95	571.73	14.78
4	511721.64	4501542.42	549.92	571.72	21.08
5	511641.54	4501737.95	545.28	584.07	38.79
6	511563.80	4501935.83	547.23	577.68	30.45
7	511439.35	4502132.42	545.38	559.42	14.04
8	511173.15	4502832.07	550.85	554.81	3.96
9	511177.97	4503209.13	554.34	558.46	4.12
10	511055.48	4503322.21	550.82	554.34	3.52
11	511719.07	4502841.27	580.01	580.61	0.6
12	511859.03	4501244.17	576.26	588.91	12.65
13	511646.82	4501893.92	550.98	562.45	11.47
14	511557.76	4501990.53	546.39	569.94	23.55



Şekil 63. Noktasal ölçümlerin yapıldığı yerlerin konumları



Şekil 64. Batimetrik haritalardan ve noktalardan alınan kesitlerden genel görüntüler

3.8. 3 Boyutlu Nümerik Yaklaşımlarla İtki Dalgalarının Modellenmesi

Heyelan kaynaklı itki dalgalarının 3 boyutlu nümerik olarak modellenmesi ve rezervuar tabanındaki değişimlerin itki dalgası üzerindeki etkinin araştırılması için 2 farklı nümerik tabanlı simülasyon gerçekleştirilmiştir. İlk simülasyonda barajın ilk su tutmaya başladığı dönemdeki rezervuar geometrisi, ikinci simülasyonda ise rezervuar alanının siltlenmiş haldeki geometrisi kullanılmıştır. Her iki nümerik simülasyonda serbest su seviyesi yüksekliği maksimum su seviyesi kotu olarak alınmıştır.

İlk modelde kullanılan rezervuar geometrisi üzerine batimetrik ölçümler ile tespit edilen sediment tabakası yerleştirilerek güncel taban topografyası yani güncel rezervuar alanı geometrisi ortaya çıkarılmıştır. Her iki simülasyonda da 3 boyutlu stabilite analizleri sonucu elde edilen 875.240 m³ lük hacme sahip malzeme göl alanına dökülerek itki dalgası üretilmiştir. Her iki analizde çarpma zonundaki maksimum dalga yüksekliği, baraj gövdesine ulaşan dalga yüksekliği ve baraj gövdesine çarpma hızları hesaplanmıştır. Her iki simülasyon ayrı ayrı irdelenerek sonuçlar karşılaştırılmıştır.

3.8.1. İlksel taban Topografi İçin 3 Boyutlu Nümerik Model

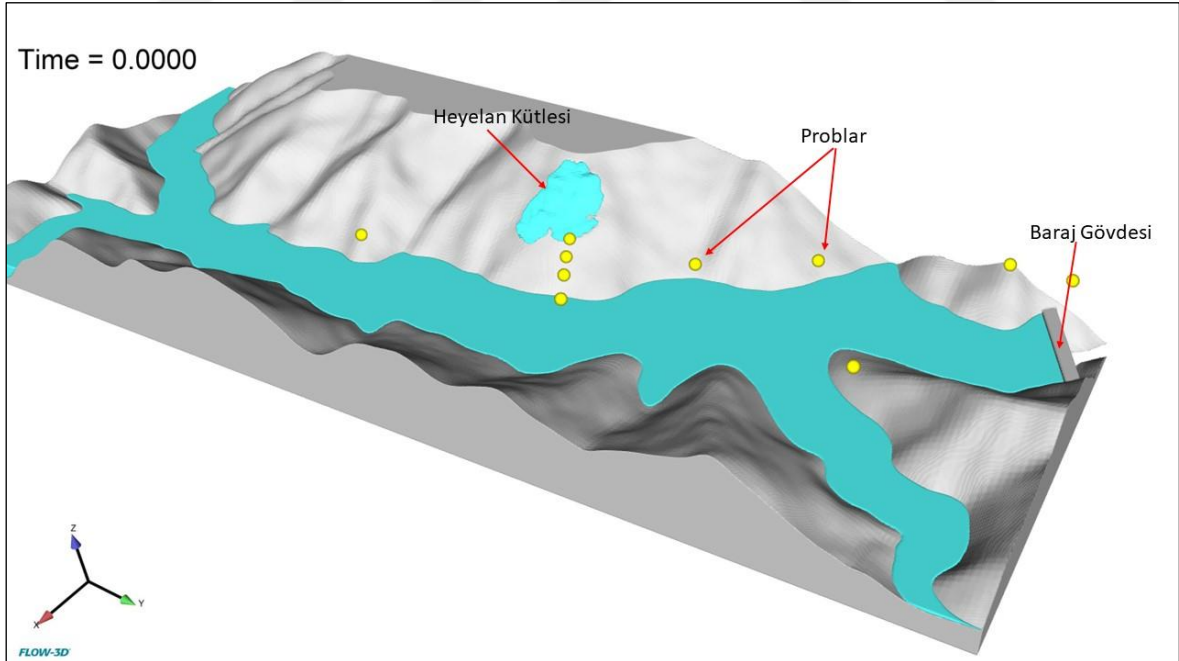
Baraj su tutmaya başladığı dönemki rezervuara ait katı model Harita Genel Komutanlığından elde edilen DEM veriler kullanılarak üretilmiştir. Üretilen katı model üzerine baraj gövdesi, heyelan malzemesi, rezervuar alanındaki su ve hidrolik ölçümler için proplar yerleştirilmiştir (Şekil 65). Nümerik modelde barajdaki su seviyesi maksimum su seviyesi olan 645 metre olarak alınarak en kötü koşullardaki şartlarda oluşacak dalga özellikleri araştırılmıştır. Yapılan her iki 3 boyutlu nümerik simülasyonun girdi parametreleri Tablo 18’de, itki dalgasının yayılım haritaları Şekil 66a, b ve c’de ve elde edilen sonuçlar Tablo 17’de verilmiştir.

Tablo 17. İlksel taban topografyası için yapılan 3 boyutlu nümerik analizden elde edilen sonuçlar

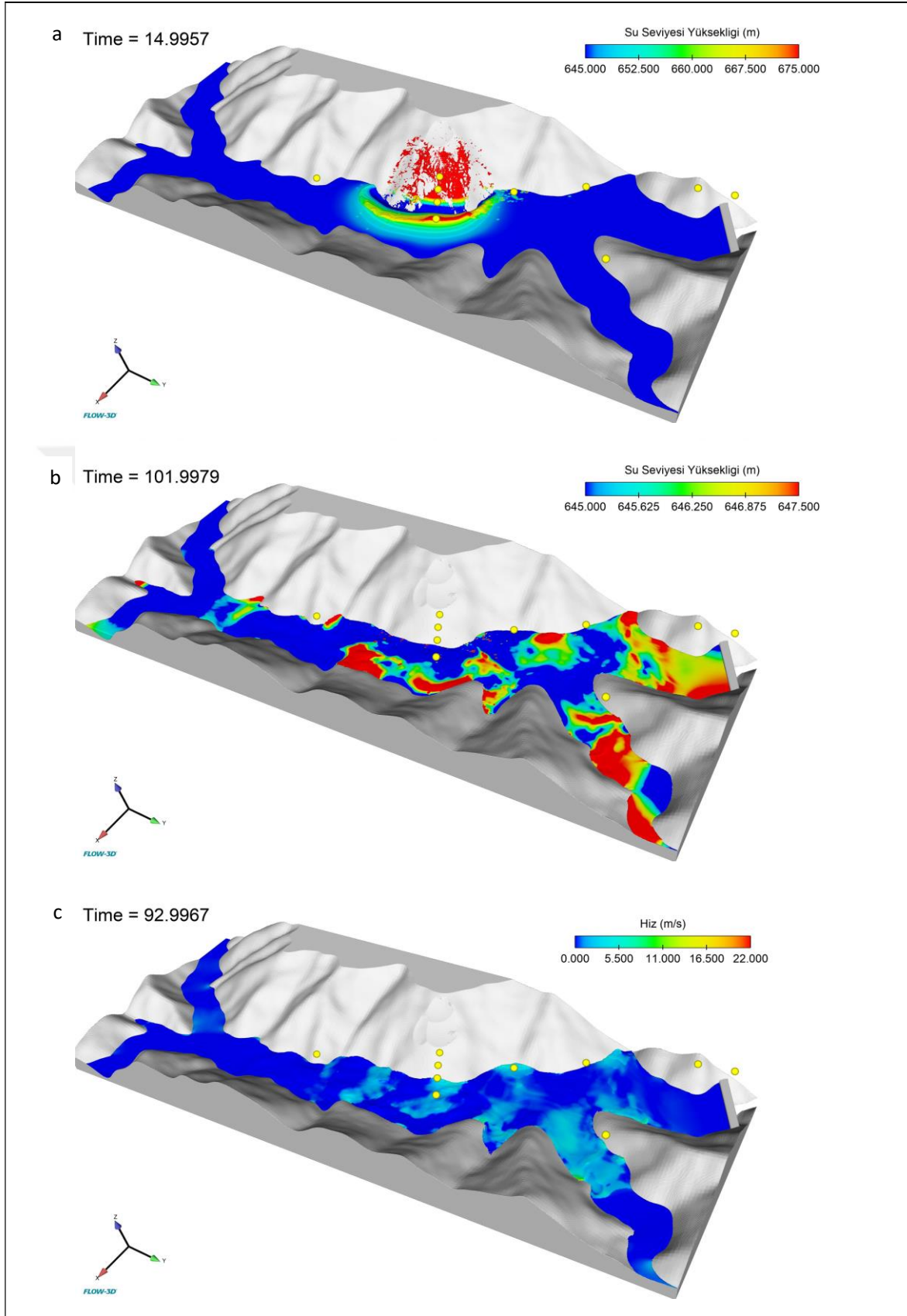
Su Derinliği (m)	97
Çarpma zonunda oluşan maksimum dalga yüksekliği (m)	30
Baraj gövdesine ulaşan dalga yüksekliği (m)	2.5
İtki dalgasının baraj gövdesine çarpma hızı (m/sn)	22
Dalganın baraj gövdesine ulaşma süresi (sn)	93

Tablo 18. Yapılan 3 boyutlu nümerik simülasyonun girdi parametreleri

Genel Özellikler	Simülasyonların Süresi:150 saniye
	Akışkanlar: Tek Akışkan
	Simülasyon Birimi:SI
	Sıcaklık Birimi:Santigrat Derece
Fizik	Yerçekimi İvmesi:-9.81 m/sn ²
	Akışkanın Viskozite Türü:Renormalized Group (RNG)
	Model: two-equation (k-e) model
	Drift-Flux Modu Aktive edildi
Akışkan	Akışkan Tipi: 20 C°'deki Su
	Yogunluklar;
	Göl Alanındaki Durağan Su için 1000 kg/m ³
	Hareket Edecek Heyelan Kütlesi için 1950 kg/m ³
Hücre ve Model Özellikleri	Toplam Hücre Adedi: 66 034 800
	Hücre Boyutu:3m
	Hücre Tipi: Non-conforming
	Sınır Koşullar:
	Xmin= Açık, Xmax=Simetri, Ymin= Açık, Ymax=Simetri
	Zmin=Kapalı, Zmax=Outflow
	Su Seviyesi:645 Metre
	Çözüm dosyası boyutu:209 gb
	Çözüm süresi: 1314 Dakika



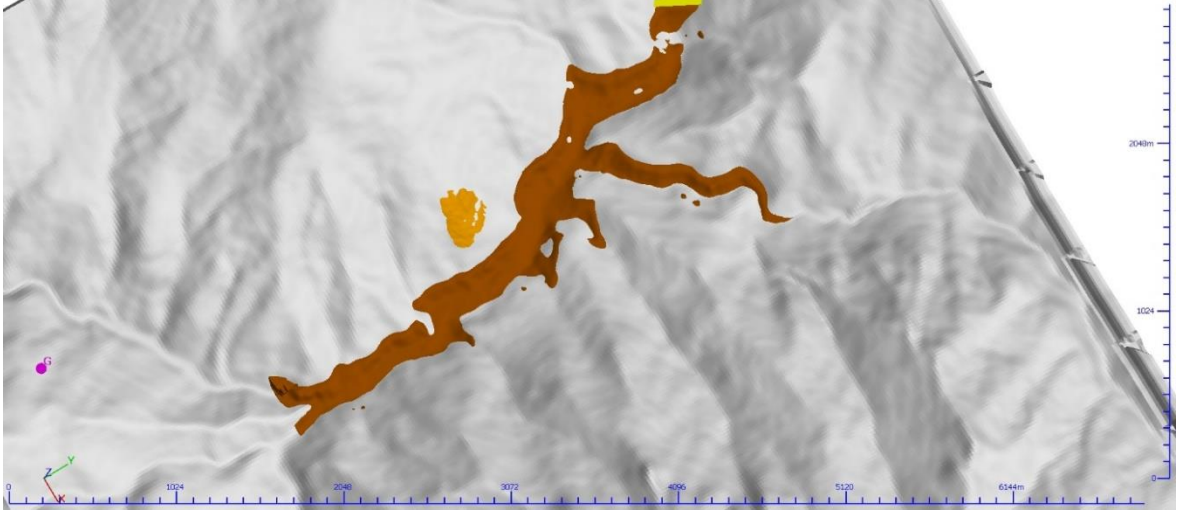
Şekil 65. Kurulan 3 boyutlu nümerik modelden genel bir görüntü



Şekil 66. Çarpma zonundaki maksimum su seviyesi (a), baraj gövdesine çarpan dalga yüksekliği (b) ve baraja çarpan dalğanın hızı (c)

3.8.2. Güncel Taban Topografyası İçin 3 Boyutlu Nümerik Model

Kürtün barajı göl alanında yapılan batimetrik ölçüm sonucu göl alanının tabanında biriken sediment kalınlığı tespit edilerek göl tabanının güncel topografik yapısı ortaya çıkarılmıştır. Çalışmalar sonucunda ortaya çıkarılan güncel taban topoğrafyası eski arazi topografyası ile entegre edilerek göl alanının güncel topografyası ortaya çıkarılmıştır (Şekil 67). İlk simülasyondaki sınır koşullar kullanılarak güncel topografyada 3 boyutlu itki dalgası analizleri yapılmıştır. Yapılan 3 boyutlu nümerik simülasyonun elde edilen sonuçlar Tablo 19’da, itki dalgasının yayılım haritaları Şekil 68a, b ve c’de verilmiştir.

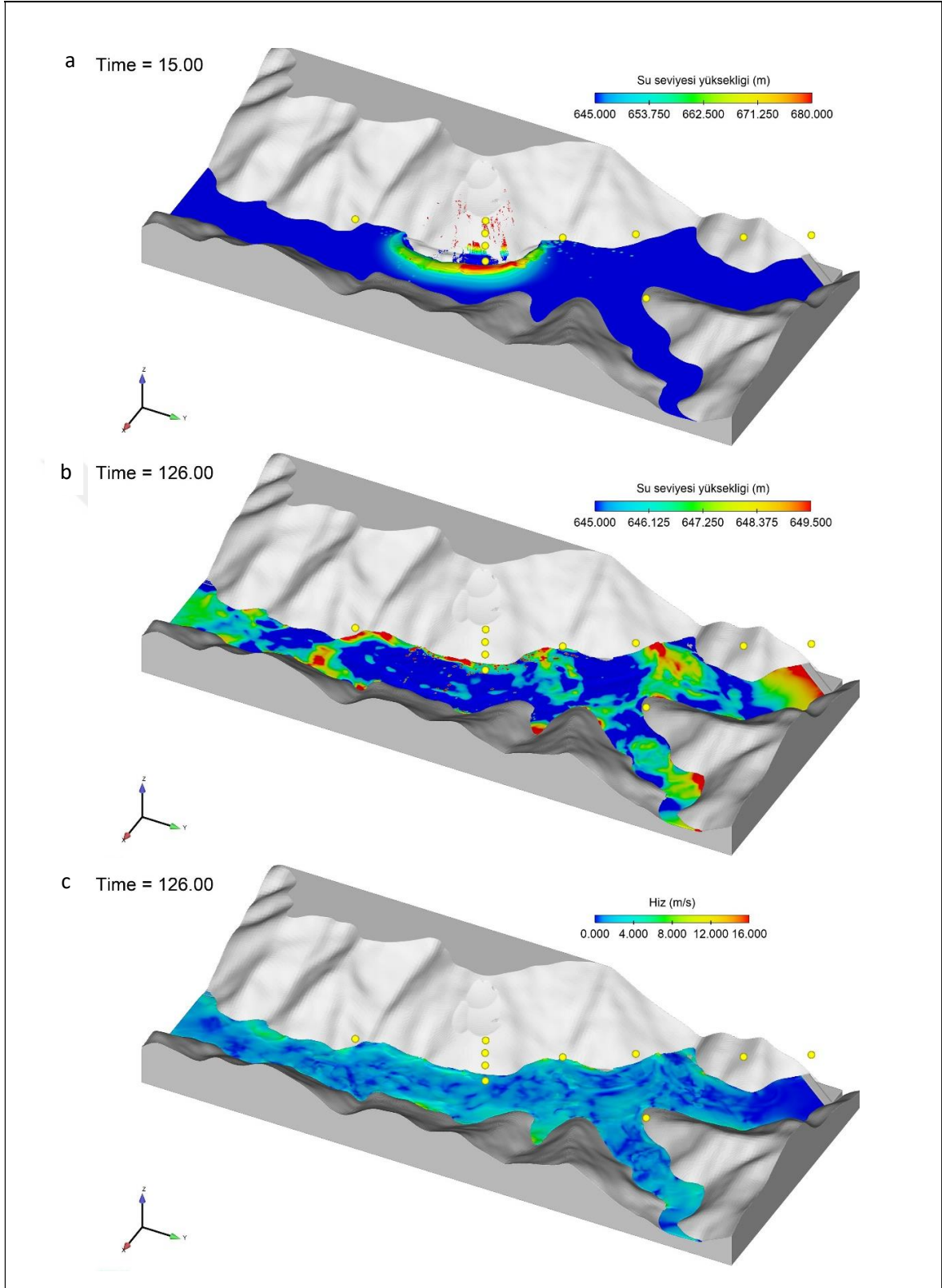


Şekil 67. Güncel taban topografyası için 3 boyutlu nümerik modelde kullanılan katı model

Tablo 19. Güncel taban topografyası için yapılan 3 boyutlu nümerik analizden elde edilen sonuçlar

Su Derinliği (m)	*
Çarpma zonunda oluşan maksimum dalga yüksekliği (m)	35
Baraj gövdesine ulaşan dalga yüksekliği (m)	4.5
İtki dalgasının baraj gövdesine çarpma hızı (m/sn)	16
Dalganın baraj gövdesine ulaşma süresi (sn)	126

*Güncel taban topografyasındaki su sütunu kalınlığı



Şekil 68. Çarpma zonundaki maksimum su seviyesi (a), baraj gövdesine çarpan dalga yüksekliği (b) ve baraja çarpan dalganın hızı (c)

3.9. Nümerik Modelin Geçerliliği ve Hassasiyeti

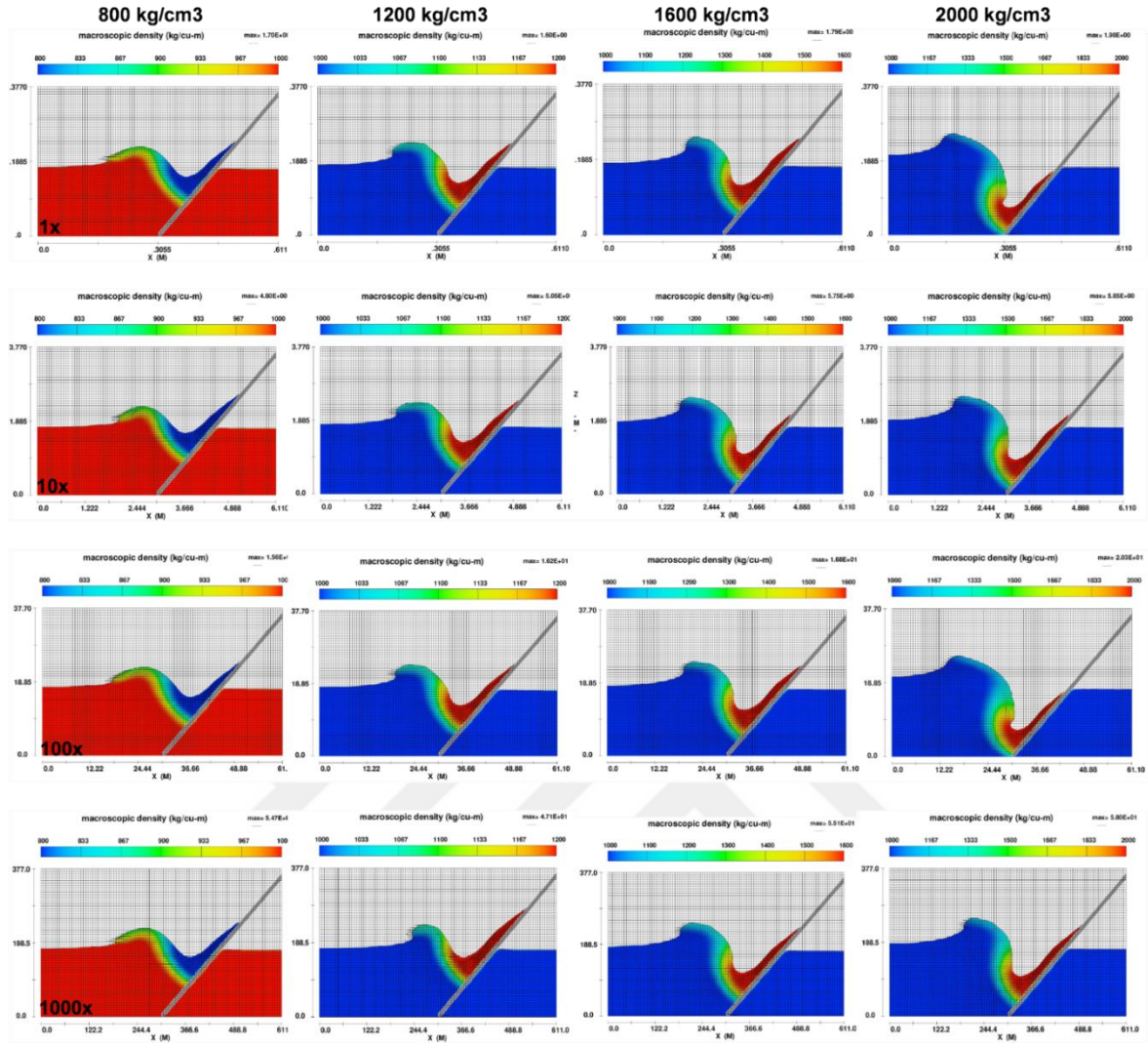
3.9.1. Laboratuvar Model Deneylerle Ölçek Etkisinin Belirlenmesi

Heyelan tetikli itki dalgalarının değerlendirmesinde, arazi verileri kullanılarak oluşturulan ampirik eşitlikler ve analitik değerlendirmeler kullanılarak yapılan analizler maliyet, zaman ve kullanılan girdi parametrelerinin basitliği düşünüldüğünde değerlendirme kolaylığı açısından kullanışlı yöntemlerdir. Fakat her iki yöntemde de ölçek etkisi dikkate alınmamaktadır. Laboratuvar deneylerinden üretilen ampirik eşitliklerin kullanımı itki dalgalarının fiziksel özelliklerinin tespitinde en çok tercih edilen yöntem olmasına rağmen (Müller, 1995; Fritz, 2002; Panizzo, 2004; Zweifel, 2004; Heller, 2007) bu yöntemde ölçek etkisi, yamaç topografyası ve rezervuar geometrisi ihmal edilmektedir. Büyük ölçekte uzun rezervuar geometrilerin inşa edilmesi ise prototip modellerde mümkün olmadığı gibi hassas sonuçlara ulaşma ihtimali de ölçek küçültme işlemi yapılması durumunda azalmaktadır. Bu sebeplerle ölçek etkisinin araştırmaları üzerinden yöntemlerin verimliliğini irdelemek için 3 boyutlu simülasyonlar kullanılmıştır.

Çalışma için imal edilen hidrolik model, farklı ölçek ve senaryolarda deney modelleri kurularak test edilmiş ve oluşan dalga özelliklerinin hidrolik model ölçeğinden etkilenme derecesi araştırılmıştır. Buna bağlı olarak rampa eğimi sabit tutularak farklı ölçeklerde (1, 10, 100, 1000x) ve farklı sıvı yoğunluklarında (800, 1200, 1600, 2000 kg/m³) simülasyonlar yapılarak serbest su seviyesinin çarpma bölgesindeki değişimi tespit edilmiştir. Elde edilen veriler serbest su seviyesi değerlerinin farklı ölçeklerdeki değişimi aynı yoğunluklar için irdelenerek ölçek etkisi kıyaslamaları yapılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar Şekil 69 ve Tablo 20’de verilmiştir.

Tablo 20. 2 Boyutlu nümerik çözümlemelere ait serbest su seviyesi değerleri

Sıvı Yoğunluğu (kg/m ³)	Serbest Su Seviyesi Değerleri (m)			
	x1	x10	x100	x1000
800	0.227	2.254	22.728	226.890
1200	0.237	2.341	23.656	233.658
1600	0.246	2.480	24.443	245.133
2000	0.253	2.520	25.784	252.714



Şekil 69. Farklı yoğunluktaki ve ölçekteki 2 boyutlu simülasyonlar ait FLOW-3D programında yapılan çözümler

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde ölçek dahilinde serbest su seviyelerinin aynı yoğunluklar için artış gösterdiği görülmüştür. Tablo 21’de açık bir şekilde görüldüğü üzere ise ölçülen serbest su seviyelerinin tüm yoğunluklar için gerçek boyutlu ölçeğe göre normalize edilmesi durumunda değerlerin yaklaşık olarak aynı olduğu belirlenmiştir.

Tablo 21. Gerçek boyuttaki ölçeğe kıyasla normalize edilmiş değerler

Sıvı Yoğunluğu (kg/m ³)	Normalize Edilmiş Serbest Su Seviyesi Değerleri		
	x10	x100	x1000
800	0.23	0.23	0.23
1200	0.23	0.24	0.23
1600	0.25	0.24	0.25
2000	0.25	0.26	0.25

3.9.2. Laboratuvar Model Deneylerle Çarpma Hızının ve Süresinin Belirlenmesi

Heyelan kütlelerinin suya çarpma hızı, dalga boyunu, dalganın yüksekliğini, hızını ve karşı kıyıdaki ilerleme miktarını etkilemektedir. Farklı hızlara sahip heyelan kütlelerinin aynı hacme sahip olsalar dahi çarpma etkisi ile meydana getirecekleri dalga yükseklikleri farklılık gösterecektir. Heyelan kütlelerinin çarpma hızının yüksek olması dalga yüksekliğini arttıracak gibi bağlı olarak dalga ilerleme hızı da bu nispette fazlalaşacaktır. Dolayısı gravite dalgaları söz konusu olduğunda heyelan kütlelerinin suya çarpma hızını mümkün olan en yakın değerde hesaplamak oldukça önemlidir. Bu sebeple de hesaplamalar yapabilmek için ampirik eşitlikler türetilmiştir. Hareket eden kütlelerin suya çarpma hızını pratik olarak hesaplamaya yönelik bu eşitlikler kullanılabilmektedir. İlaveten ise nümerik simülasyonlar ile de çözümlemeler yapmak mümkündür. Fakat nümerik tabanlı uygulamalar yapıldığında modelin kurulumunda kullanıcı kaynaklı eksik sınır koşulları tanımlamaları ile modelin genel kurulum eksiklikleri gibi ihtimallerin ortaya çıkması durumunda hatalı sonuçlarla karşı karşıya kalınmaktadır. Bu sebeple de bu gibi hataları mümkün olan en az seviyeye getirebilmek için hibrit modellerin kurulması yani hidrolik deneylerin 3 boyutlu nümerik tabanlı modellerle çözümlenmesi ve sonuçların kıyaslanması oldukça önemlidir.

Çalışma kapsamında, ampirik eşitliklerde (Körner, 1976) yer çekim ivmesi, düşme yüksekliği, rampa açısı ve içsel sürtünme açısı kullanarak hesaplamalar yapılmış olup (Şekil 69), hareketli kütlelerin çarpma hızı ayrıca 3 boyutlu nümerik simülasyonla ve hidrolik deneyler aracılığı ile hesaplanmıştır.

$$v_s = \sqrt{2g\Delta Z_{sc}(1 - \tan a \times \cot Q)} \quad (11)$$

Burada;

v_s (m/s) : kütlelerin çarpma hızı

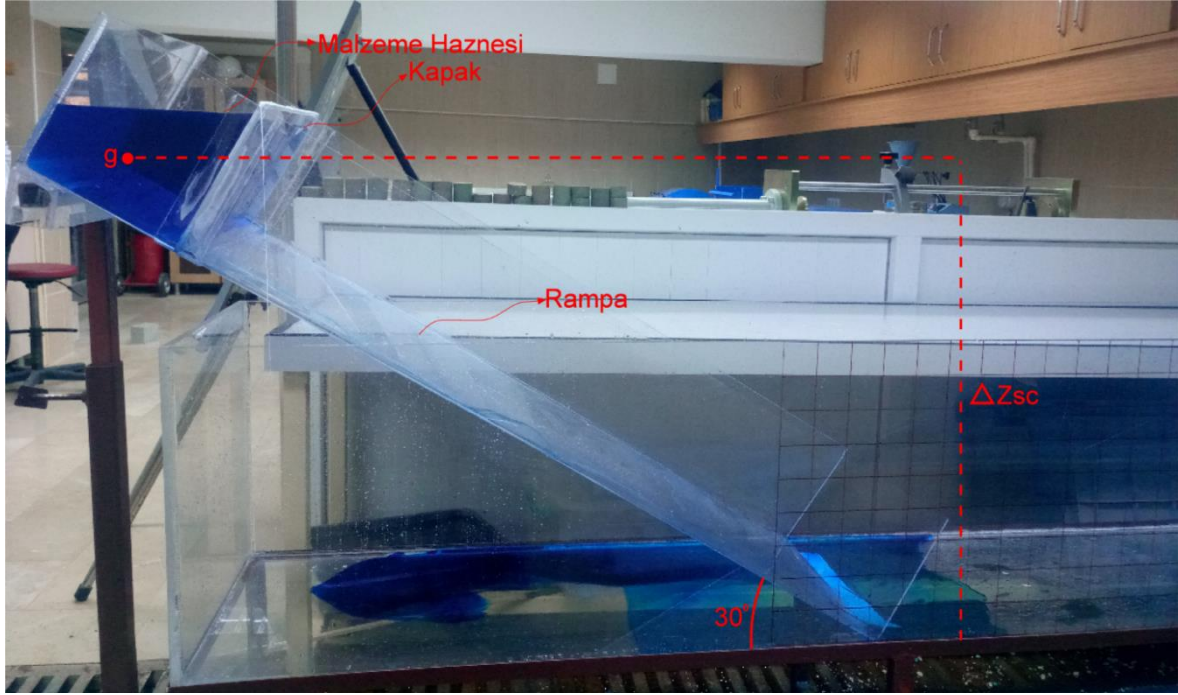
g (m/s²) : yerçekimi ivmesi (9.81 ms⁻²)

ΔZ_{sc} (m): kütlelerin düşme yüksekliği

Q (°) : yamaç/rampa eğimi

a (°) : içsel sürtünme açısı

Havuz tabanına suyun çarpma hızı Körner'in (1976) önermiş olduğu eşitlik ile 3 farklı açı değeri için hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalarda ise su ile rampa (fiberglas) arasındaki sürtünme ihmal edilmiş ve su için içsel sürtünme açısı sıfır olarak kabul edilmiştir. Arttırılan rampa açısına bağlı olarak düşme yüksekliğinde gözlenen artış aynı zamanda çarpma hızının da artması ile sonuçlanmıştır (Tablo 22).



Şekil 70. Malzemenin çarpma hızının tespit edilmesi için kurulan 3 boyutlu laboratuvar modeli

Tablo 22. Farklı açı değerleri için çarpma hızı değerleri

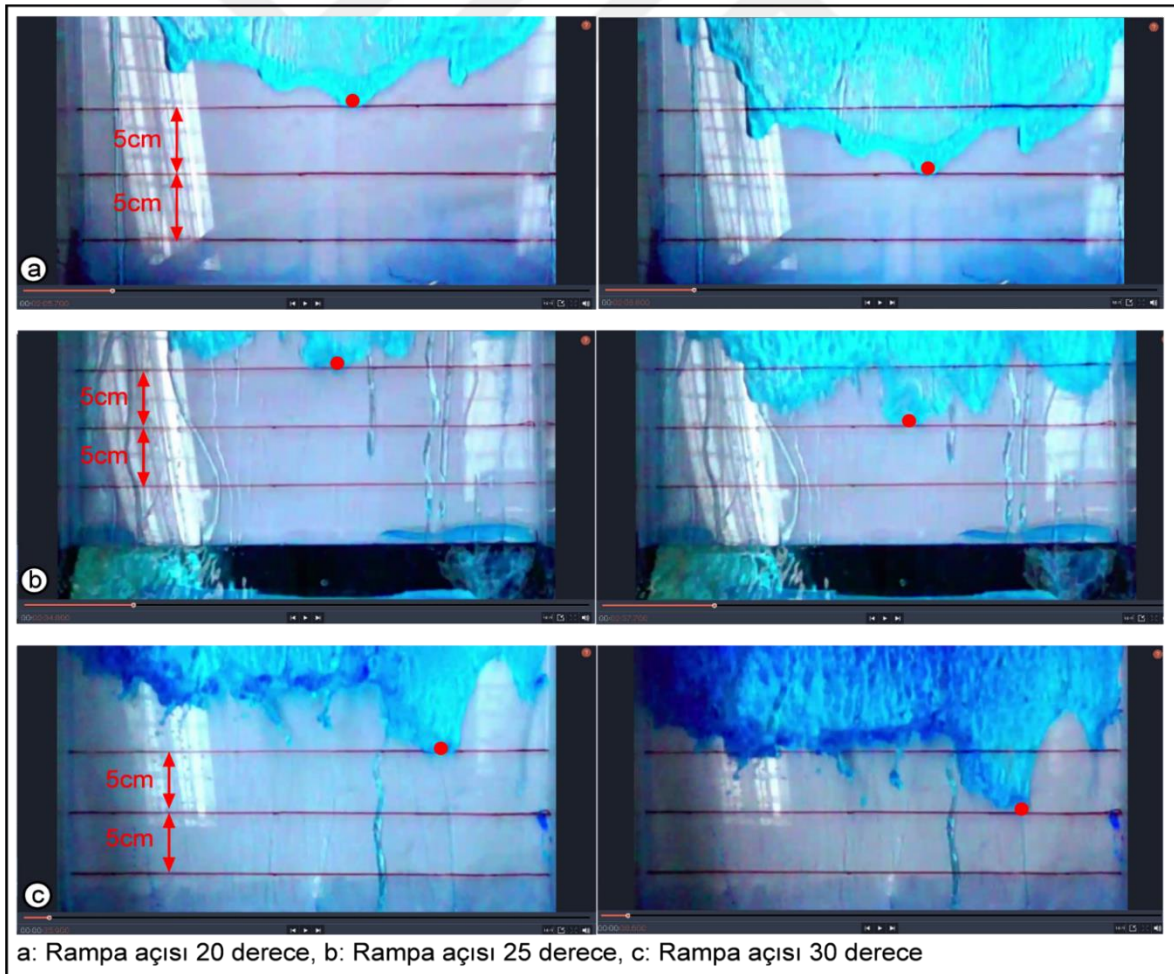
Model deney	Yamaç/rampa eğimi (°)	Yerçekimi ivmesi (ms^{-2})	Düşme yüksekliği (m)	İçsel sürtünme açısı (°)	Çarpma hızı (m/sn)
1	20	9,81	0,53	0	3,22
2	25	9,81	0,62	0	3,49
3	30	9,81	0,72	0	3,76

Hidrolik deneyler ile çarpma hızının tespit edilebilmesi için akışkan olarak renklendirilmiş su (metilen mavisi katkılı) kullanılarak yüksek hızlı kamera ile hidrolik model anlık olarak takip edilmiştir. Farklı açı değerlerinde (20,25, ve 30 °) yapılan deneyler için öncelikle rampa açısı ayarlanmış, renklendirilmiş su ile hazne dolumu gerçekleştirilmiş

ve nihayetinde ise hazne kapağı açılarak suyun yerçekimi etkisi ile hareketi sağlanmıştır. Yüksek hızlı kameranın yükleme rampasının bitiş noktasına yerleştirilmesi ile elde edilen videolar aracılığı ile de suyun çarpma hızı elde edilmiştir (Tablo 23). 200 kat yavaşlatılmış 1000 fps (20x) hızında çekilen bu videolar ile çarpma hızı hesaplamaları, yükleme rampasının 3 eşit parçaya bölündüğü 15 cm'lik kısımda her bir 5 cm'lik bölüm için geçen sürelerin değerlendirilmesi ile yapılmıştır (Şekil 71).

Tablo 23. Suyun çarpma hızının laboratuvar deneyleri ile tespit edilmesi

Rampa eğimi	Başlangıç zamanı	Bitiş zamanı	Varış süresi (200x yavaşlatılmış) (sn)	t (sn) (gerçek süre)	x (m)	v (m/sn)
20°	00:02:05.700	00:02:08.800	3,1	0,0155	0,05	3,23
25°	00:02:34.800	00:02:37.700	2,9	0,0145	0,05	3,45
30°	00:00:35.900	00:00:38.600	2,7	0,0135	0,05	3,70



Şekil 71. Yüksek hızlı kamera görüntüleri (a) 20°, (b) 25° ve (c) 30° rampalar için suyun çarpma hızı

Nümerik analiz ile çarpma hızı tespiti çalışmalarında SolidWorks (Premium, 2016) ve FLOW-3D yazılımları kullanılmıştır. Bu programlardan SolidWorks ile STL (STereoLithography) formatında tanımlanan havuzun ve yükleme rampasına ait 3 boyutlu gerçek ölçekli modeli tanımlanmıştır. FLOW-3D programı ile ise çizilen katı modeller kullanılarak hidrolik deneyler 3 farklı şekilde modellenmiştir. Çözümlemede 1000 kg/m^3 yoğunlukta ve 20°C 'de su akışkan olarak kullanılmıştır. Düşey yöndeki yer çekimi ivmesi 9.81 m/s^2 alınarak ve çözümleme ayarlaması 5 sn seçilerek, hava girişimleri suyun hareketinde tanımlanarak modelleme yapılmıştır. Çözümlemelerde 7182000 hücre kullanılmış ve mesh boyutları 0.005 m olarak seçilmiştir.

3 boyutlu nümerik çözümlemeler ile hesaplanan farklı rampa açıları için elde edilen veriler Tablo 24'te ve Şekil 72'de görülmektedir. Tam çarpma anındaki hız değerleri alınarak gerçekleştirilen çözümleme renklendirmeleri ise maksimum hız değerlerine göre yapılmıştır. Tablo 25'te 3 farklı yöntem aracılığı ile çarpma hızı hesaplamalarına bağlı değerler verilmiştir. Buradan da görüldüğü üzere tüm yöntemlerde elde edilen sonuçların uyum gösterdiği tespit edilmiştir. Çarpma hızının belirlenmesine ek olarak, belirli bir uzaklık için varış süresi hidrolik modeller ve nümerik simülasyonlar kullanılarak hesaplanmış, tüm yöntemlerde aynı sınır koşullar kullanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda her üç açı değeri için iki farklı modelde de aynı sonuçların elde edildiği tespit edilmiştir (Tablo 26 ve Şekil 73a, b ve c).

Tablo 24. Çarpma hızı değerlerinin rampa eğimlerine bağlı nümerik modellerle hesaplanmış değerleri

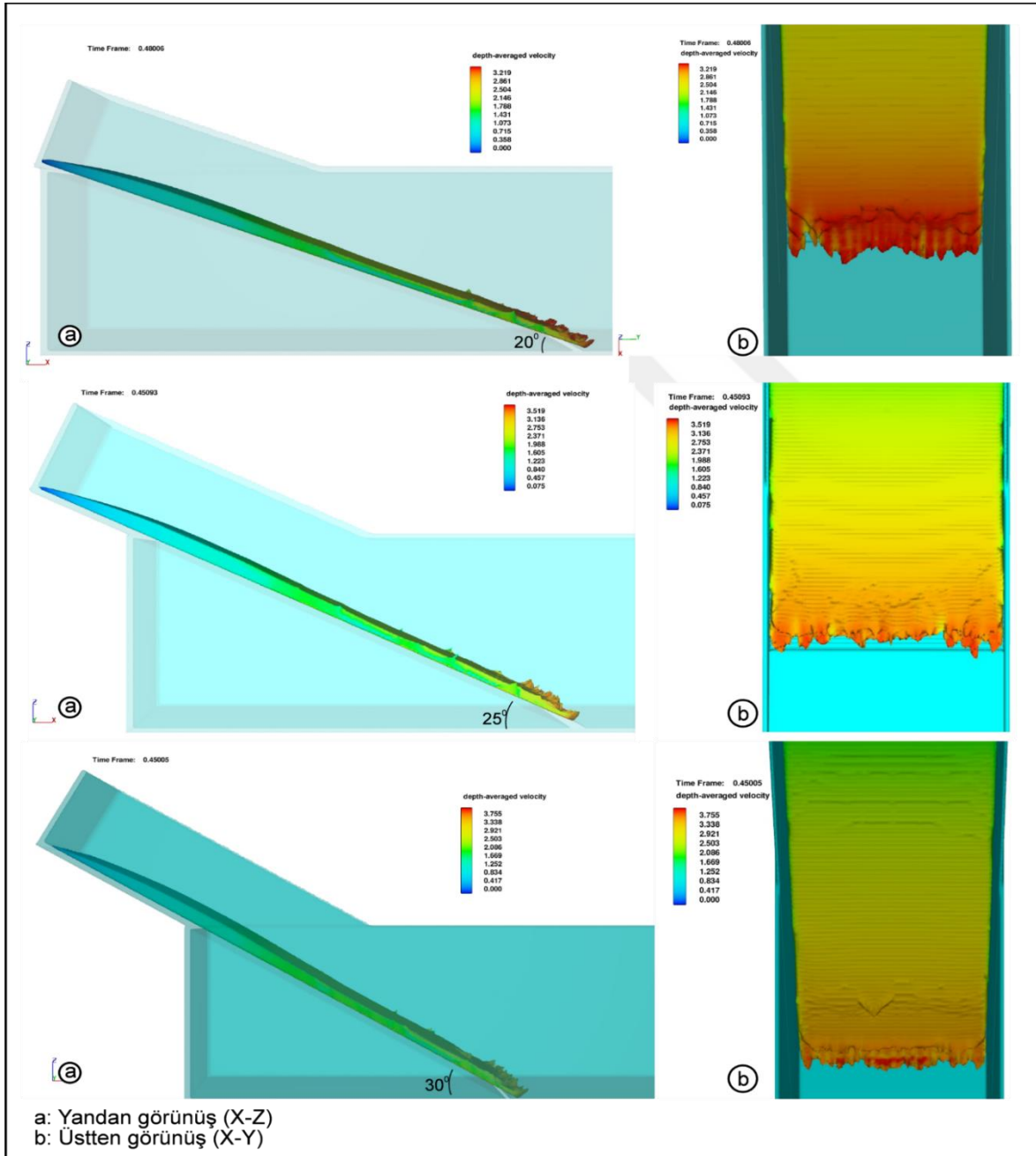
Rampa eğimi	Çarpma hızı (m/sn)
20°	3.219
25°	3.519
30°	3.755

Tablo 25. Çarpma hızı değerlerinin rampa eğimlerine bağlı nümerik, ampirik ve hidrolik olarak hesaplanmış değerleri

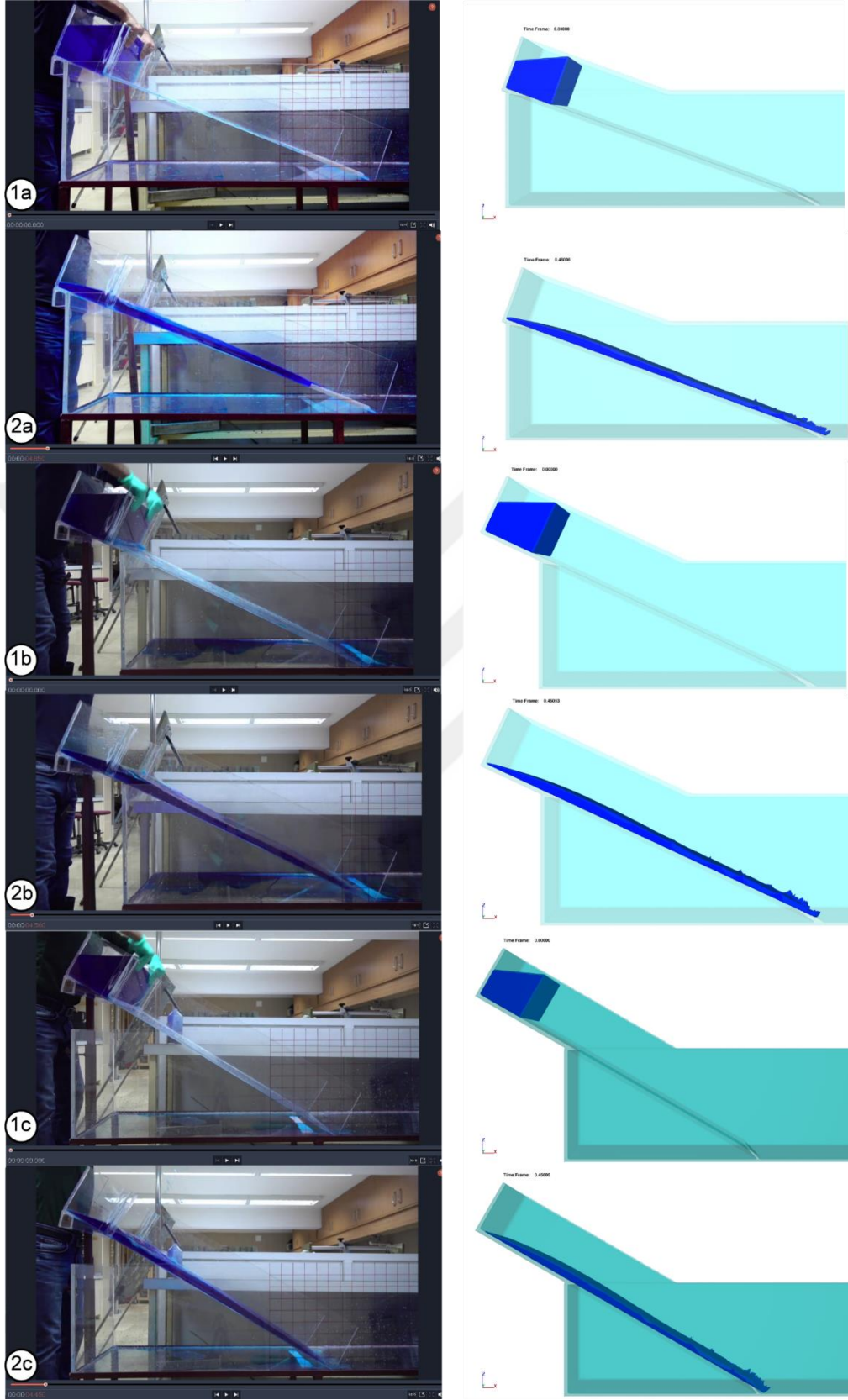
Rampa eğimi	Suyun Çarpma Hızı (m/sn)		
	Ampirik eşitlik	Hidrolik model deneyi	Nümerik simülasyon
20°	3,22	3,23	3.219
25°	3,49	3,45	3.519
30°	3,76	3,70	3.755

Tablo 26. Hidrolik ve nümerik model ile rampa açısına bağlı varış sürelerinin hesaplanması

Rampa Eğimi	Varış süresi (sn)	
	Hidrolik model	Nümerik model
20 ⁰	0.4850	0.48006
25 ⁰	0.4500	0.45093
30 ⁰	0.4450	0.4500



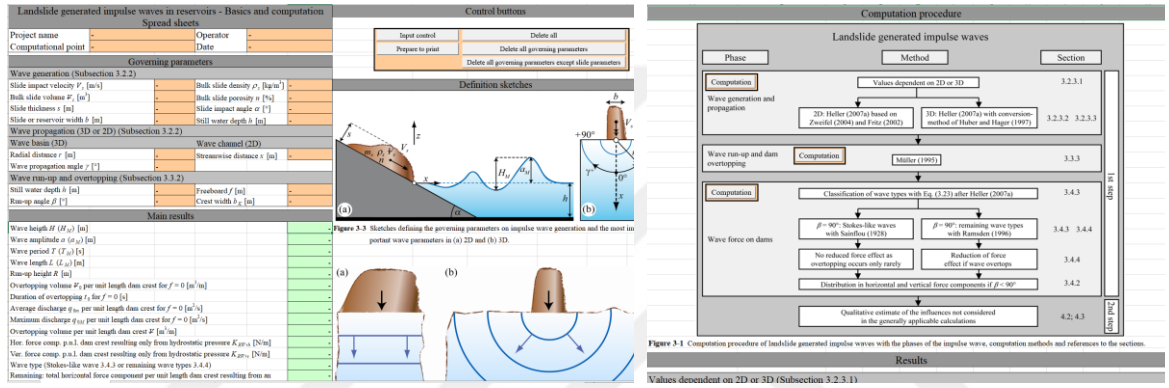
Şekil 72. 3 boyutlu simülasyon ile farklı rampa açılarına bağlı olarak (20, 25 ve 30) akan suyun havuz tabanına çarpma hızını hesaplanması



Şekil 73. 3 boyutlu nümerik çözümleme ile hidrolik modelde suyun yükleme rapmasından tabana doğru hareketi 20 derece (1a ve 2a), 25 derece (2a ve 2b) ve 30 derecelik (1c ve 2c) rampa açılarında

3.9.3. Ampirik Yaklaşımlarla İtki Dalgası Özelliklerinin Tayini

İlksel taban topografyası ve güncel taban topografyası dikkate alınarak yapılan 3 boyutlu nümerik analizlerden elde edilen sonuçlar ampirik yaklaşımlar kullanılarak sonuçlar kıyaslanmış ve sınır koşullar gözden geçirilerek nümerik modellerde gerek duyulduğu doğrultuda kalibrasyonlar yapılmıştır. Hesaplamalarda kullanılan paket programa ait ekran görüntüleri Şekil 74’te verilmiştir. Yapılan hesaplamalar eski ve güncel topografya için Tablo 27’de verilmiştir.



Şekil 74. Veri giriş pencerelerinden genel bir görünüş

Ampirik hesaplamalarda görüldüğü üzere su sütunundaki azalmaya bağlı olarak dalganın yayılma hızında ve baraja ulaşan dalga boyunda azalma meydana gelirken dalganın baraj gövdesine ulaşma süresi artmıştır. 3 boyutlu nümerik analizlerde dalganın hızının ve yüksekliğinin arttığı tespit edilmiştir. Sonuçların böyle farklı olmasının nedeni ampirik eşitliklerdeki formüllerde rezervuar geometrisindeki değişimin dikkate alınmamasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle itki dalgası riski olan rezervuar alanlarında güncel topoğrafya dikkate alınarak 3 boyutlu nümerik çözümlemeler yapmak daha gerçekçi sonuçlar verecektir (Heyelanlı bölgedeki ortalama su sütünü kalınlığı 25 metre olarak alınmıştır).

Tablo 27. Ampirik eşitliklerden elde edilen değerler

Hesaplanan Değerler	İlksel Topografya	Güncel Topografya
Su Derinliği (m)	97	72
Heyelanın Kütlesinin Çarpma Hızı (m/sn)	45.45	45.45
Baraj Gövdesine Ulaşma Süresi (sn)	72	74
Baraj Gövdesine Giden Dalga Yüksekliği (m)	3.6	2.7
Baraj Gövdesine Giden Dalganın Hızı (m/sn)	31.3	30.2

4. TARTIŞMA

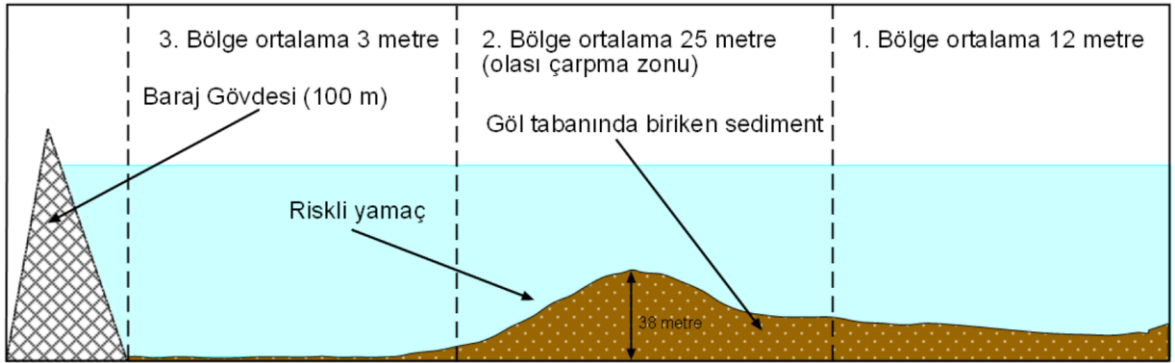
Ülkemizde yapılan çalışmalarda heyelan kaynaklı itki dalgaları genel olarak ampirik formüllerle ve 2 boyutlu analizlerle değerlendirilmektedir. Fakat bu doktora tezi kapsamında hem 2 hemde 3 boyutlu itki dalgası analizleri yapılmıştır. Son birkaç yıl içinde yapılan güncel çalışmalarda ise baraj yıkılma senaryoları veya aşırı yağışlar sonucunda gelişebilecek taşkınlar 3 boyutlu analizlerle modellenmekte, ancak bu çalışmalar ya mekânsal ya da zamansal boyutta bilgi vermektedir. Yapılan tez çalışma kapsamında ise oluşan itki dalgasının hem zamansal hemde mekânsal boyutta tüm bilgiler elde edilmiştir. Tez çalışması ile Kürtün Barajı göl alanındaki Hardısağır Heyelanının olası bir hareketi sonucu oluşacak itki dalgası, oluşan itki dalgasının göl tabanındaki sedimantasyondan etkilenip etkilenmediği ve ölçek etkisi araştırmıştır.

Dünyada son 10 sene içerisinde itki dalgalarının nümerik simülasyonlarla 3 boyutlu olarak modellenmesine yönelik çalışmalar artmış olsa da çalışmaların hemen hemen hepsinde baraj inşa edilmeden ve rezervuar suyu dolmadan önce yapılan topografik ölçümler sonucu oluşturulan 3 boyutlu katı modeller kullanılmaktadır. Oysaki baraj rezervuar alanında bulunan bir heyelanın barajın faaliyet ömrü sırasında veya sonrasında herhangi bir zamanda meydana gelme olasılığı bulunmaktadır. Dolayısıyla özellikle sedimantasyona bağlı olarak rezervuar topografyası zamana bağlı olarak değişmektedir. Bu durumlar göz önüne alınarak çalışma kapsamında ilksel ve güncel taban topografyası dikkate alınarak analizler yapılmıştır. Erozyon veya yan akarsu kollarından rezervuara taşınan sediment dışında özellikle rezervuarında paleo-heyelan bulunan baraj göllerinde sedimantasyon normal koşullara göre fazla olmakta, rezervuar taban topografyası çok kısa zaman aralıklarında ani değişim sunmaktadır. Bu durumdan rezervuardaki su sütünü yüksekliği etkilenmektedir. Su sütünü yüksekliği heyelan kaynaklı itki dalgalarının yükseklik, hız, genlik ve uzunluk gibi birçok fiziksel özelliğini etkileyen en önemli parametrenden biridir.

Bu durumlar dikkate alınıp göl alanının ilksel ve güncel taban topografyası oluşturulmuştur. İlksel taban topografyası baraj inşaa edilmeden yapılan ölçümlerden, güncel taban topografyası ise batimetrik ölçümlerden elde edilmiştir. Batimetrik ölçümlerden elde edilen verilere dikkate alınarak çalışma alanı 3 farklı bölgeye ayrılmıştır. Sediment kalınlıkları ortalama 1. bölgede 12.19 m, 2. bölgede 23.23 m ve 3. bölgede ise 3.05 metre olduğu tespit edilmiştir. 2. Bölge yani çarpma zonundaki sediment kalınlığının fazla

olması o bölgenin heyelanlı bölgeye denk gelmesinden kaynaklanmaktadır. Bu bölgede göl alanındaki en büyük aktif heyelanlardan biri bulunmaktadır. 2. bölgedeki sediment birikiminin fazla olması tamamen hareket halindeki heyelandan ve yamaç duyarsızlıklarından kaynaklanmaktadır.

Burada biriken malzeme bir set görevi görerek gövdeye doğru sediment taşınımını engellediğinden 3. Bölgede sediment birikimi beklenenin altında ölçülmüştür. Set görevi gören 2. Bölgede malzeme geriye doğru sedimentleri tutarak 1. Bölgede 13 metrelik bir sediment kalınlığı oluşmasına neden olmuştur. Bu durumda ilerleyen aşamada iki riskli durum beklenmektedir. Bunlardan ilki ilerleyen zamanda artan sediment kalınlığı ile heyelanın olası hareketi göl alanına akan malzeme etkisi ile rezervuarın tıkaması, ikincisi ise 2 bölgede biriken ve halen birikmekte olan sedimentin (akarsu tarafından taşınan ve duraysız yamaçlardan gelen) oluşturduğu yamacın yenilerek bir su altı heyelanının neden olmasıdır. Böyle bir durumda itki dalgası oluşacak ve bu durum göl alanı ve çevresine hasar verecektir. Bu durum Şekil 75 çizilerek açıklamaya çalışılmıştır.



Şekil 75. Baraj göl tabanında biriken sedimentin ölçeksiz kesiti

Baraj göl alanının tabanına ait ilksel ve güncel topografyalar elde edildikten sonra sadece taban topografyası için iki farklı 3 boyutlu nümerik analizler yapılmıştır. İlk analiz baraj su tutmaya başladığı dönem için ikincisi ile günümüzdeki taban koşulları (su sütünü yüksekliği) dikkate alınarak yapılmıştır. Yapılan analizlerin özet tablosu Tablo 28’de verilmiştir.

Tablo 28. İlkse ve güncel taban topografyası dikkate alınarak yapılan 3 boyutlu nümerik analizlerin karşılaştırılması

Ölçülen Değerler	İlkse Topografya	Mevcut Topografya
Heyelanın Kütlesinin arpma Hızı (m/sn)	45	45
Heyelan Kütlesinin arpma Süresi (sn)	9	9
Çarpma Zonunda Oluşan Maksimum Dalga boyu (m)	30	35
Karşı Kıyıdaki İlerleme Miktarı (yatay) (m)	193	218
Karşı Kıyıdaki İlerleme Miktarı (Düşey) (m)	75	97
Baraj Gövdesine Ulaşma Süresi (sn)	101	126
Baraj Gövdesine Giden Dalga Yüksekliği (m)	2.5	4.5
Baraj Gövdesine Giden Dalganın Hızı (m/sn)	22	18

Tablo 28 incelendiğinde artan sediment kalınlığı ile azalan su sütunu kalınlığı etkisi ile çarpma zonunda oluşan maksimum dalga yüksekliğinin, baraj gövdesine ulaşan dalga yüksekliğinin ve dalganın baraj gövdesine ulaşma süresi arttığı, dalganın baraj gövdesine ulaşma sresinin ise azaldığı tespit edilmiştir.

3 Boyutlu nümerik analizlerden görüldüğü üzere rezervuar tabanında meydana gelen sediment birikiminin oluşacak itki dalgasının özelliklerini değiştirdiği ve birçok değerin ilksel duruma göre arttırdığı tespit edilmiştir. Projeden elde edilen sonuçlar, itki dalgası hesaplarında ilksel taban topografyasını dikkate almak suretiyle barajın ve yerleşim alanlarının projelendirilmesi yaklaşımının doğru olmayacağını göstermektedir. İlkse taban topoğrafyası dikkate alınarak hesaplanan dalga özelliklerinin yanılıcı sonuçların vereceği bu nedenle ilerleyen yıllarda meydana gelecek sedimantasyon dikkate alınarak itki dalgası hesaplamaların yapılması gerekmektedir. Gerek baraj gövdesindeki dalga payı gerek se karşı kıyıdaki yerleşim alanlarını koruyacak yapılar tasarlanırken sedimantasyon etkisi ile değişecek taban topografyası dikkate alınarak hesaplamaların yapılması gerekmektedir. Rezervuar taban topografyasının oluşacak itki dalgasının üzerindeki değişiminin araştırılması bu doktora tezi kapsamında ilk defa araştırılmıştır ve literatüre kazandırılmıştır.

Literatürde sıklıkla kullanılan ampirik eşitliklerde kullanılarak ilksel ve güncel taban topografyası için 2 boyutlu analizler yapılmıştır. Yapılan analizler Tablo 29’da özetlenmiştir. Tablo 29 incelendiğinde azalan su derinliği ile çarpma zonunda oluşan maksimum dalga yüksekliğinin, baraj gövdesine ulaşan dalga yüksekliğinin ve dalganın baraj gövdesine ulaşma süresi azaldığı, dalganın baraj gövdesine ulaşma sresinin ise arttığı tespit edilmiştir. Bu sonuçlar 3 boyutlu nümerik analizin sonuçlarının tam tersi sonuçlardır. Sonuçların böyle farklı olmasının nedeni ampirik eşitliklerdeki formüllerde rezervuar

geometrisindeki değişimin dikkate alınmamasından kaynaklanmaktadır. Bu denli farklılıkların çıkma nedeninin araştırılması ve farklı su sütunu kalınlıklarında hidrolik model deneylerin yapılması gerekmektedir.

Tablo 29. Ampirik eşitlikler kullanılarak ilksel ve güncel taban topografyası dikkate alınarak yapılan hesaplamaların karşılaştırılması

Hesaplanan Değerler	İlksel Topografya	Güncel Topografya
Su Derinliği (m)	97	72
Heyelanın Kütlesinin Çarpma Hızı (m/sn)	45.45	45.45
Baraj Gövdesine Ulaşma Süresi (sn)	72	74
Baraj Gövdesine Giden Dalga Yüksekliği (m)	3.6	2.7
Baraj Gövdesine Giden Dalga Hızı (m/sn)	31.3	30.2

İtke dalgası ile ilgili yapılan 3 boyutlu nümerik analizlerin bir çoğunda hareket eden heyelan kütlesi olarak su olarak tanımlanmakta yani bir nevi suyu suya çarpıtma söz konudur (tanımlanan sıvı daha viskoz ve yoğundur). Bu nedenle yapılan 3 boyutlu nümerik analizde kurulan modelin doğruluğunu test etmek için laboratuvar ortamında hidrolik model deneyler yapılmıştır. Hidrolik model deneyde yükleme havuzundan farklı rampa açılarında tabana çarpan suyun çarpma hızı hesaplanmıştır. Çarpma hızı nümerik, ampirik ve hidrolik olarak hesaplanmış ve Tablo 30’da özetlenmiştir. Tablo 30 incelendiğinde 3 farklı yolla hesaplanan çarpma hızının neredeyse aynı olduğu görülmektedir. Bu durum bize kurulan 3 boyutlu nümerik modellerin doğruluğunu kanıtlamaktadır (sınır koşullar malzeme özellikleri vs).

Tablo 30. Farklı eğimdeki rampalardan akan suyun havuz tabanına çarpma hızı değerlerinin ampirik, hidrolik ve nümerik olarak hesaplanmış değerleri

Rampa eğimi	Suyun Çarpma Hızı (m/sn)		
	Ampirik eşitlik	Hidrolik model deneyi	Nümerik simülasyon
20 ⁰	3,22	3,23	3.219
25 ⁰	3,49	3,45	3.519
30 ⁰	3,76	3,70	3.755

Tez kapsamında ayrıca ölçek etkisinde araştırılmıştır. Kurduğumuz hidrolik modelin büyük ölçekli modeller ile aynı sonuçları verip vermediği değişen boyut ile sonuçların

değişip değişmediği araştırılmıştır. Ölçek etkisi sadece nümerik olarak araştırılmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 31’de verilmiştir. Tablo 31 incelendiğinde farklı yoğunluklarda ve farklı boyutlarda kurulan aynı hidrolik modelde aynı sıvı yoğunluğunda dalga boyutunun değişmediği ölçek dahilinde ölçek kadar arttığı tespit edilmiştir. Bu durum bize en doğru sonuçları veren hidrolik model deneylerde ölçek etkisinin olmadığını göstermiştir.

Tablo 31. Gerçek boyutlu ölçeğe kıyasla normalize edilmiş değerler

Sıvı Yoğunluğu(kg/cm ³)	Normalize Edilmiş Serbest Su Seviyesi Değerleri		
	x10	x100	x1000
800	0.23	0.23	0.23
1200	0.23	0.24	0.23
1600	0.25	0.24	0.25
2000	0.25	0.26	0.25

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında Kürtün Barajı rezervuar alanında bulunan Hardısağır heyelanının olası bir hareketi sonucu oluşacak itki dalgaları ve etkileri 3 boyutlu nümerik simülasyonlarla modellenmiş, oluşan bu itki dalgalarının rezervuarda biriken sedimente bağlı olarak değişen taban topografyasından etkilenip etkilenmediği araştırılmıştır. Doktora tez kapsamında yapılan tüm bu çalışmalara sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır;

1. Doktora tezi kapsamında çalışılan heyelanlı alan Gümüşhane ili, Kürtün ilçesi, Harşit Çayı üzerine kurulu Kürtün Barajı göl alanında gövdeden 2 km güneyde sol sahilde bulunmaktadır.
2. Kürtün Barajı göl alanı ve çevresinde yaşlıdan gence doğru; Liyas-Dogger yaşlı Hamurkesen Formasyonu, Geç Jura-Erken Kretase yaşlı Berdiga Formasyonu, Geç Kretase-Paleosen yaşlı Çatak Formasyonu, Paleosen yaşlı Kaçkar Granitoyidi, Kuvaterner yaşlı yamaç molozu ve alüvyon bulunduğu tespit edilmiştir.
3. Yapılan arazi gözlem ve çalışmalarında Kürtün Barajı göl alanında ve çevresinde irili ufaklı çok sayıda aktif ve paleo-heyelanın bulunduğu, bunlardan en risklilerinin Dutluca, Çöplüçe, Süme ve Hardısağır heyelanları olduğu tespit edilmiştir.
4. Gerek göl alandaki konumu gerek bulunduğu kot ve gerekse heyelan kütesinin hacmi dikkate alındığında olası bir hareketi sonucu itki dalgası üretme potansiyeli olan en riskli heyelanının Hardısağır heyelanı olduğu tespit edilmiştir.
5. Yapılan arazi çalışmalarından elde edilen sonuçlara göre Hardısağır heyelanının Geç Kretase-Paleosen yaşlı Çatak Formasyonuna ait Diyabaz ve Paleosen yaşlı Granitler üzerindeki yamaç molozları içinde geliştiği tespit edilmiştir.

6. Heyelan malzemesi üzerinde yapılan sondajlara ek olarak 3 adet elektrik özdirenç ve 3 adet sismik kırılma ölçüleri alınmış, bu sayede heyelan malzemesinin geometrisi ortaya konarak, heyelan malzemesine ait fiziksel ve dinamik parametreler belirlenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda elektrik özdirenç değerlerinin 900 ile 1010 ohm.m arasında değiştiği, boyuna dalga hızı değerlerinin 400 ile 905 m/sn ve kayma dalga hızı değerlerinin ise 175 ile 223 m/sn arasında değiştiği tespit edilmiştir.
7. DSİ 22. Bölge Müdürlüğü tarafından Hardısağır heyelanı için hazırlanan sondaja dayalı jeolojik-jeoteknik rapordan ve çalışma kapsamında yapılan arazi ölçümlerinden heyelan kütesine ait veriler temin edilmiş, elde edilen veriler doğrultusunda heyelan malzemesinin yanal ve düşey devamlılığı tespit edilmiştir. Yapılan çalışmalarda heyelan malzemesinin ortalama kalınlığının 30 metre, eni ve boyunun ise 300 metre olduğu tespit edilmiştir.
8. Arazi çalışmaları kapsamında heyelanlı bölgede 5 adet araştırma çukuru açılarak bu çukurlardan örselenmemiş zemin numuneleri alınıp bu numuneler üzerinde elek analizi, kesme kutusu deneyi, likit limit, plastik limit, hidrometre deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda zemin sınıfı, kohezyon, içsel sürtünme açısı ve birim hacim ağırlık değerleri tespit edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda zeminin birim hacim ağırlığının 17.7 ile 18.8 kN/m³, kohezyonunun 7.2 ile 11.4 kPa, içsel sürtünme açısının 20.4 ile 30.4 derece arasında değiştiği, zemin sınıfının zemin birleştirilmiş zemin sınıflamasına göre ML-OL, MH-OH olduğu tespit edilmiştir.
9. Göl tabanı topografyasını değiştiren sediment birikimini modellemek için göl alanında batimetrik ölçümler yapılmıştır. Multibeam Echosounder kullanılarak yapılan ölçümler sonucunda göl tabanının 3 boyutlu batimetrik haritası üretilmiştir. Göl tabanının çıkarılan 3 boyutlu batimetrik haritası üzerinden 14 yerden noktasal kot değerleri okunmuş ve göl tabanı biriken sediment kalınlığına göre 3 farklı bölgeye ayrılmıştır. Sediment kalınlıklarının 1. bölgede 12.19 m, 2. bölgede 23.23 m ve 3. bölgede ise 3.05 metre olduğu tespit edilmiştir.
10. Yapılan literatür taraması, arazi ve laboratuvar çalışmalarından elde edilen veriler kullanılarak ve Hardısağır heyelanının üzerinde insansız hava aracı ile yapılan uçuşlardan elde edilen verilerden üretilen 3 boyutlu katı model kullanılarak Slide3 programında 3 boyutlu limit denge analizleri yapılmıştır. Analizlerde Bishop ve

Janbu yöntemi kullanılarak depremli bir durumda göl alanına akacak malzeme miktarı tespit edilmiştir. Depremli bir durumda göl alanın akacak malzeme miktarı 875.240 m^3 olarak hesaplanmıştır.

11. 3 boyutlu limit denge analizinden elde edilen 875.240 m^3 malzemeye ait katı model Harita Genel Komutanlığından elde edilen verilerden üretilen tüm göl alanının 3 boyutlu katı modeli üzerine entegre edilerek nümerik tabanlı bir akışkanlar mekaniği yazılımı olan Flow3D programında 3 boyutlu nümerik analizler yapılmıştır. Analizler maksimum su seviyesinde ilksel ve güncel taban topografyası dikkate alınarak yapılmıştır.
12. İlksel taban topografyası dikkate alınarak yapılan analizlerde heyelanın kütlelerinin çarpma hızı 45 m/sn , heyelanın kütlelerinin çarpma süresi 9 sn , çarpma zonunda oluşan maksimum dalga boyu 30 metre , karşı kıyıdaki ilerleme miktarı (yatay) 193 m , karşı kıyıdaki ilerleme miktarı (düşey) 75 m , baraj gövdesine ulaşma süresi 101 sn , baraj gövdesine giden dalga yüksekliği 2.5 m ve baraj gövdesine giden dalganın hızı 22 m/sn olarak hesaplanmıştır. Güncel taban topografyası için yapılan analizlerde heyelanın kütlelerinin çarpma hızı 45 m/sn , heyelanın kütlelerinin çarpma süresi 9 sn , çarpma zonunda oluşan maksimum dalga boyu 35 metre , karşı kıyıdaki ilerleme miktarı (yatay) 218 m , karşı kıyıdaki ilerleme miktarı (düşey) 97 m , baraj gövdesine ulaşma süresi 126 sn , baraj gövdesine giden dalga yüksekliği 4.5 m ve baraj gövdesine giden dalganın hızı 18 m/sn olarak hesaplanmıştır. Hesaplamalarda görüldüğü üzere yapılan 3 boyutlu nümerik simülasyonlarda sedimantasyon etkisi ile oluşan itki dalgasının daha yüksek ve hızlı olduğu tespit edilmiştir.
13. İlksel ve güncel taban topografyası dikkate alınarak göl alanındaki olası bir kütle hareketi sonucu oluşacak itki dalgası ampirik eşitlikler kullanılarak da hesaplanmıştır. İlksel taban topografyası dikkate alınarak yapılan hesaplamalarda baraj gövdesine ulaşma süresi 72 sn , baraj gövdesine giden dalga yüksekliği 3.6 m ve baraj gövdesine giden dalganın hızı 31.3 m/sn olarak hesaplanmıştır. Güncel taban topografyası için hesaplamalarda baraj gövdesine ulaşma süresi 74 sn , baraj gövdesine giden dalga yüksekliği 2.7 m ve baraj gövdesine giden dalganın hızı 30.2 m/sn olarak hesaplanmıştır. Ampirik hesaplamalarda artan sediment kalınlığı ile oluşan itki dalgasının zayıflattığı tespit edilmiştir.

14. Flow3D programında kurulan 3 boyutlu nümerik modellerin kalibrasyonu için hidrolik model deneyler yapılmıştır. Hidrolik deneylerde yükleme rampasından tabana çarpan suyun tabana ulaşma süresi ve tabana çarpma hızı hesaplanmıştır. 20, 25 ve 30 derecelik rampa açılarında ampirik eşitlikler, hidrolik model deneyler ve nümerik simülasyonlar dikkate alınarak analizler yapılmıştır. Hesaplanan değerler incelendiğinde 3 farklı yöntem ile hesaplanan çarpma hızlarının birbirine çok yakın olduğu görülmüştür. Bu sonuç 3 boyutlu nümerik gerçek arazi durumunu tam olarak yansıttığı göstermektedir.
15. Büyük ölçekli arazilerin hidrolik model ile modellenmesinde ölçek etkisinin olup olmadığı ile ilgili yapılan nümerik çalışmalardan 800, 1200, 1600 ve 2000 kg/cm³ akışkanlar kullanılmıştır. Kurulan model 10, 100 ve 1000 kat büyütülerek oluşan dalga yükseklikleri hesaplanmıştır. Yapılan analizlerde ölçek dahilinde dalga yüksekliklerinin aynı olduğu tespit edilmiştir.

Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar bir bütün halinde değerlendirilmiş ve aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır;

1. Göl tabanındaki topografik değişimin oluşacak itki dalgası üzerindeki etkisinin araştırılması kapsamında yapılan 3 boyutlu nümerik simülasyon sonuçlarının ampirik hesaplamalardan farklı çıkma sebebi çok önemli ve güncel bir araştırma konusudur. 3 boyutlu nümerik simülasyonlarda sedimantasyon etkisi ile dalganın güçleneceği tespit edilmişken ampirik eşitlikler kullanılarak yapılan hesaplamalarda sedimantasyon etkisi ile dalganın zayıfladığı belirlenmiştir. Bu durumun su sütunu yüksekliği ve kayan kütleinin hacmi arasındaki bir orana bağlı olarak dalga özelliklerinin sürekli aynı eğilim göstermemesinden ve kritik bir eşik değerinden sonra ters bir eğilim göstermesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu durumun nedeninin fiziksel modeller kullanılarak araştırılması önerilmektedir.
2. Baraj rezervuar göl alanındaki itki dalgaları ile ilgili hesaplamalarda göl alanının güncel taban topografyası dikkate alınarak hesaplamaların yapılması önerilmektedir. Baraj inşası sırasında sediment birikim miktarının zamana bağlı değişimi ortaya konulması ve itki dalga etkilerinin gelecek taban topografyasına göre hesaplanması gerekmektedir. Çünkü zamanla biriken sediment göl alanındaki taban topografyasının değiştirmektedir. Bu durum oluşan itki dalgası özelliklerini etkilemektedir.

3. İtke dalgası hesaplamalarında en önemli girdi parametrelerinden biri olan göl alanına akacak malzeme miktarının 3 boyutlu analizler kullanılarak net bir şekilde hesaplanması gerekmektedir. Çünkü akması muhtemel malzeme miktarının yanlış hesaplanması tüm hesaplamaları etkilemektedir.
4. Hardısağır heyelanının ve rezervuarda bulunan tüm heyelanların depremli bir durumda hareket etmesini önlemek veya akacak malzeme miktarını azaltmak için ilgili kamu kurumlarının ivedilikle mühendislik jeolojisi ve jeoteknik çalışmalara başlaması önerilmektedir.



6. KAYNAKLAR

- Ağar, Ü., 1977. Demirözü (Bayburt) ve Köse (Kelkit) Bölgesinin Jeolojisi, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Fakültesi, İstanbul, 59s.
- Ahn, S. H., Xiao, Y., Wang, Z., Zhou, X., Luo, Y. 2017. “Numerical prediction on the effect of free surface vortex on intake flow characteristics for tidal power station”, *Renewable Energy*, 101, 617–628.
- Akgun 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 Science*, 1, 1341-1350.
- 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. Süttaşı 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 Izmit 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, Nik-Khah A. 2008. "Impulsive waves caused by subaerial landslides". Environmental Fluid Mechanics. DOI: 10.1007/s10652-008-9074-7.
- 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 zbocza 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 Eastern Pontides, 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., Taslı, 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, Medina V. 2017. “Tsunamis generated by fast granular landslides: 3D experiments and empirical predictors”. Journal of Hydraulic Research. DOI: 10.1080/00221686.2017.1289259.
- Bregoli F, Pinzon AB, Iglesias VM. Gomez Cortes DA. 2014. “Experimental studies on 3d impulse waves generated by rapid landslides and debris flows”. Italian Journal of Engineering Geology and Environment Book Series. (6) 115-122. DOI: 10.4408/IJEGE.2013-06.B-08
- 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.
- Carvalho, R.F. ve Carmo, J.S.A., 2006. “Numerical and experimental modelling of the generation and propagation of waves caused by landslides into reservoirs and their effects on dams”, *Proc. River Flow 2006*, ed. R. M. L. Ferreira, E. C. T. L. Alves, J. G. B. A. Leal and A. H. Cardoso,. Vol. 1, pp.483-492. Lisbon, Portugal.

- Ceryan, S., Tudes, S. ve Ceryan, N., 2008. A new quantitative weathering classification for igneous rocks, Environmental Geology, 55,6, 1319-1336.
- Chen, W. F., Mizuno, E. 1990. "Nonlinear analysis in soil mechanics". Amsterdam: Elsevier.
- 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., Sammarco P., 2008. Analytical modeling of landslide-generated waves. J Waterw Port Coast Ocean Eng 134(1):53–60. doi:10.1061/(ASCE)0733-950X(2008)134:1(53
- Di Risio, M. 2005. "Landslide generated impulsive waves: generation, propagation and interaction with plane slope-An experimental and analytical study".
- 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 (Yusufeli, 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 İtki 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 ImpulseWaves In Dam Reservours, 5th International Symposium on Dam Safety, October, İstanbul, Proceedings 1: 409-421.
- Ertunç, A., 2003. Mühendislik Jeolojisi, SDÜ Yayınları, Isparta, 179s.
- Ertunç, A., Çetin, H. 1999. "The geological problems of the large dams constructed on the Euphrates River (Turkey)", Engineering Geology, 51, 167-182.
- Evers FM, Hager WH. 2015. Impulse wave generation: "Comparison of free granular with mesh-packed slides". Journal of Marine Science and Engineering. DOI: 10.3390/jmse3010100.

- 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.
- Flow Science Inc. 2016. "FLOW-3D Version 11.2 Documentation", Santa Fe, Newmexico.
- Fritz H.M., 2002. Initial phase of landslide generated impulse waves. PhD Thesis Swiss Federal Institute of Technology, Zu'rich, Switzerland.
- 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.
- Fuchs H, Heller V, Hager WH. 2010."Impulse wave run-over: experimental benchmark study for numerical modelling". Exp Fluids (2011) 49:985–1004 DOI: 10.1007/s00348-010-0836-x
- 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 N, Irtem E, Kabdasli S. 2005."Laboratory investigation on tsunami run-up. Ocean Engineering". DOI: 10.1016/j.oceaneng.2004.10.013.
- 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 Crystallophylian 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.
- Güney MS, Tayfur G, Bombar G, Elçi S. 2014. "Distorted Physical Model to Study Sudden Partial Dam Break Flows in an Urban Area". J. Hydraul. Eng. 140(11): 05014006. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000926
- 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.
- Haltas I, Tayfur G, Elçi S. 2016. “Two-dimensional numerical modeling of flood wave propagation in an urban area due to Ürkmez dam-break, İzmir, Turkey”. Nat. Hazards. DOI 10.1007/s11069-016-2175-6
- Han L, Wang P, Wang M, Li X. 2018. “Physical modelling of impulsive waves generated by rock landslides in curved gorge-type reservoirs”. The 2018 World Congress on Advances in Civil, Environmental, & Materials Research, August 27-31, Incheon, Korea.
- 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.
- Huang B, Yin Y, Wang S, Chen X, Liu G, Jiang Z, Liu J. 2014. “A physical similarity model of an impulsive wave generated by Gongjiafang landslide in Three Gorges Reservoir, China”. Landslides. DOI: 10.1007/s10346-013-0453-x.
- 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. July, Lausanne, Switzerland, 3-35.
- 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. İtki 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 Stabilite Analizleri, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana, 288s.
- Kessler, M., Heller, V., Turnbull, B. 2018. “A laboratory-numerical approach for modelling scale effects in dry granular slides”. *Landslides*, 15:2145–59.
- 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.
- Kirkgoz, M. S., Aköz, M. S., Oner, A. A. 2009. “Numerical modeling of flow over a chute spillway”, *Journal of Hydraulic Research*, 47, 6, 790-797.
- 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 Yaslı 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.
- 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., and Jenks D.G., 1996. Stabilisation and performance of No. 5 Creek slide, Clyde Power Project, New Zealand. In Proceedings of the 7th International Symposium on Landslides, Trondheim. Edited by K. Sennest. A. A. Balkema, Rotterdam. Vol. 3. Pp. 1739-1746.
- 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.
- Macfarlane, H., J., 1976. Reichweite und Geschwindigkeit von Bergstürzen und Fliessschneelawinen, Rock Mechanics and Rock Engineering, 8, 225-256.
- McMechan, G., A. ve Yedlin, M., J., 1981. Analysis of Dispersive by Wave Field Transformation, Geophysics, 46,6, 869-874.
- 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., Di Risio M., 2011. 3D numerical modeling of landslide-generated tsunamis around a conical island. Nat Hazards 58, 1, 591–608.
- 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.R., 1995. Auflaufen und Überschwappen von Impulswellen an Talsperren. Mitteilungen 137, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich.
- 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.
- Nieuwkoop J.C., Van C., 2007. Experimental and numerical modelling of tsunami waves generated by landslides, Msc Thesis, Delft University of Technology.

- Ninot CG, Mendes L, Visen T, Vicent JG, Carrero AD, Gonzalez JO, Dominguez OH, Iglesias FR, Gtierrez ER. 2015. "Experimental and numerical study of a chute spillway". Dam World 2015 Second International Dam World Conference, Lisbon. 1-12
- Noda, E., 1970. Water Waves Generated by Landslides, Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division, 96,4, 835-855.
- Ocakoğlu, F., Açıkalın, 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.
- Özalp S., 2018. Tsunami: Yerkürenin Dev Dalgaları. Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni. 26, 33-39.
- 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. 2004. "Physical and numerical modelling of subaerial landslide generated waves", Doctoral Thesis, Italy: Università degli Studi di L'Aquila.
- 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.
- Riemer, W. 1995. "Landslides and reservoirs, in: Bell, D.H. (Ed.), Proceedings 6th International Symposium on Landslides", Balkema Publishers, 213-224.
- Rocscience, 2006. "Phase2 - A 2D Finite Element Program", Toronto: Rocscience Inc.
- 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.
- Salmasi F and Samadi A. 2018. "Experimental and numerical simulation of flow over stepped spillways". Applied Water Science. 8(229). DOI: 10.1007/s13201-018-0877-5
- 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 Wiecek, 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.
- Shi C.Q., An Y., Q. ve Liu Q., 2015. Landslide-generated impulse waves in deep V channel: Runup and near field characteristics. 7th International Conference on Fluid Mechanics, ICFM7. 126, 232-236.
- Shi, C., An, Y., Wu, Q., Liu, Q., Cao, Z. 2016. "Numerical simulation of landslide-generated waves using a soil-water coupling smoothed particle hydrodynamics model". Adv Water Resources. 92, 130-41
- 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.
- Sue P., 2007. Modelling of tsunami generated by submarine landslides. Doctor of Philosophy in Civil Engineering, University of Canterbury, Christchurch New Zealand.
- 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., Sigtryggisdóttir, 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.
- URL-1. http://tr.qwertyu.wiki/wiki/List_of_historical_tsunamis.
- URL-2. [http-2. http://udim.koeri.boun.edu.tr/zeqmap/hgmmap.asp](http://udim.koeri.boun.edu.tr/zeqmap/hgmmap.asp)
- 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, 176, s. 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.
- Xiao, Y., Wang, Z., Zhang, J., Zeng, C. ve Yan, Z. 2014. "Numerical and experimental analysis of the hydraulic performance of a prototype Pelton turbine", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 228(1), 46-55.
- Yalçınalp, B., 1992. Güzelyayla (Maçka-Trabzon) Porfiri Cu-Mo Cevherleşmesinin Jeolojik Yerleşimi ve Jeokimyası, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 177s.

- Yalçiner, A., C., Alpar, B., Altinok, 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.
- Yang YC, Xing HG, Yang XG, Zhou JW, Pastor M. 2016. “Determining the critical slip surface of three-dimensional soil slopes from the stress fields solved using the finite element method”. Mathematical Problems in Engineering. DOI: 10.1155/2016/7895615.
- 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 Atpantischen Gebirges im Querprofil des Harşit-Tales, Bayerisch Akademie der Wissenschaften, Abhandlungen, 109, 61-69.
- Zhang, T., Yan, E., Cheng, J. ve Zheng, Y. 2010. “Mechanism of reservoir water in the deformation of Hefeng landslide”, Journal of Earth Sciences, 21, 870–875.
- Zhang, Y., Li, D., Chen, L., Yin, K., Xiao, L. ve Fu, X. 2020. “Numerical analysis of landslide-generated impulse waves affected by the reservoir geometry”. Engineering Geology, 266
- 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 S. ve Deng L. 2018. “Analyses of embedded piles reinforced landslides using strength reduction finite element method””. International Journal of Geotechnical Engineering. 12, 389–401, DOI: 10.1080/19386362.2017.1282844.

- Zhao, Lh., Mao, J., Liu, Xq. ve Li, Tc., 2014. Numerical simulation of landslide-generated impulse wave, Journal of Hydrodynamics, 26,3, 493-496.
- Zienkiewicz, O. C. ve Taylor, R. L. 1989. The finite element method, 4th edn., vol. 1. New York.
- Zweifel A, Hager WH. ve Minor HE. 2006. "Plane Impulse Waves in Reservoirs". Journal of Waterway, Port, Coastal, And Ocean Engineering. 132:5(538). DOI:10.1061/(ASCE)0733-950X(2006)132:5(358)
- Zweifel A, Zuccalà D. ve Gatti D. 2007. "Comparison between computed and experimentally generated impulse waves". Journal of Hydraulic Engineering. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:2(208).
- Zweifel A., 2004. Impulswellen Effekte der Rutschdicke und der Wassertiefe, Dissertation 15596, ETH Zurich.

ÖZGEÇMİŞ

Lise öğrenimini Ergani Lisesi'nde (Diyarbakır) tamamladı. 2006 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Yabancı Diller Yüksekokulu'nda İngilizce yabancı dil eğitimine başladı. 2007 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü'nde başladığı lisans eğitimini 2011 yılında tamamladı. 2011 yılında yüksek lisansa başlayıp yüksek lisans süresi boyunca özel sektörde çeşitli projelerde görev aldıktan 2015 yılının nisan ayında aynı bölüme araştırma görevlisi olarak atandı ve 2015 yılında Jeoloji Yüksek Mühendisi unvanıyla yüksek lisans eğitimini tamamladı ve aynı yıl doktora eğitimine başladı. 2022 yılında KTÜ Trabzon Meslek Yüksek Okulu, İnşaat Bölümü, İnşaat Programına Öğretim Görevlisi olarak atandı. 2023 yılında yürütücüsü olduğu Tübitak Hızlı Destek (1002) projesini kapattı. "Modelling of the landslide-induced impulse waves in the Artvin Dam reservoir by empirical approach and 3D numerical simulation (H Ersoy, M Karahan, K Gelişli, A Akgün, T Anılan, MO Sünnetci, BK Yahşi)" adlı çalışmayla Mühendislik Jeolojisi Derneği'nin her yıl verdiği "Erguvanlı Mühendislik Jeolojisi Ödülleri – Uluslararası Makale" ödülünü 2020 yılında almıştır.