

T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ERZİNCAN BARAJI'NIN OLASI YIKILMA SENARYOLARININ SAYISAL
ANALİZLERLE İNCELENMESİ VE TAŞKIN ETKİLERİNİN
DEĞERLENDİRİLMESİ

DOKTORA

Akın ÜSLÜ

HAZİRAN-2024
GÜMÜŞHANE



T.C.

**GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ERZİNCAN BARAJI'NIN OLASI YIKILMA SENARYOLARININ SAYISAL
ANALİZLERLE İNCELENMESİ VE TAŞKIN ETKİLERİNİN
DEĞERLENDİRİLMESİ**

**ANALYSIS OF POTENTIAL FAILURE SCENARIOS OF THE ERZİNCAN
DAM THROUGH NUMERICAL ANALYSIS AND EVALUATION OF FLOOD
EFFECTS**

DOKTORA

Akın ÜSLÜ

**HAZİRAN-2024
GÜMÜŞHANE**



**T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ERZİNCAN BARAJI'NIN OLASI YIKILMA SENARYOLARININ SAYISAL
ANALİZLERLE İNCELENMESİ VE TAŞKIN ETKİLERİNİN
DEĞERLENDİRİLMESİ**

**ANALYSIS OF POTENTIAL FAILURE SCENARIOS OF THE ERZİNCAN
DAM THROUGH NUMERICAL ANALYSIS AND EVALUATION OF FLOOD
EFFECTS**

DOKTORA

Akın ÜSLÜ

Danışman: Prof. Dr. Salim Serkan NAS

**HAZİRAN-2024
GÜMÜŞHANE**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Doktora Tezi olarak hazırlamış olduğum “**Erzincan Barajı'nın Olası Yıkılma Senaryolarının Sayısal Analizlerle İncelenmesi ve Taşkın Etkilerinin Değerlendirilmesi**” isimli bu tezimin, tamamen kendi çalışmam olduğunu, her alıntıya kaynak gösterdiğimi, alıntı yaptığım tüm çalışmaları kaynakçada belirttiğimi ve Gümüşhane Üniversitesi'nin lisanslı kullanıcısı olduğum intihal yazılım programı ile Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün belirlediği kıstaslara uygun olarak raporladığımı taahhüt ederim. Tezimin kâğıt ve elektronik kopyalarının Gümüşhane Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü arşivinde saklanmasına izin verdiğimi onaylarım.

Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri uyarınca gereğinin yapılmasını arz ederim.

28/06/2024

.....
Akın ÜSLÜ

TEŞEKKÜR

Gümüşhane Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora Tezi olarak hazırlanan bu tez çalışmasının başarıyla tamamlanmasında birçok kişi katkı sağlamıştır.

İlk olarak, beni bu sonuca ulaştıran değerli tez danışmanım Prof. Dr. Salim Serkan NAS hocama, öneri, rehberlik ve sabırları için sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Onun değerli yönlendirmeleri ve ilgisi, bu çalışmanın ortaya çıkmasında kritik bir rol oynamıştır.

Tez izleme komitemde bulunarak değerli görüş, eleştiri ve önerileriyle yol gösteren Prof. Dr. Basri ERTAŞ ile Doç. Dr. Rahim ŞİBİL hocalarıma teşekkür ederim. Onların bilgi birikimleri ve yardımları, bu tezin gelişimine önemli katkıda bulunmuştur. Tez süreci boyunca kıymetli bilgileri ve yardımlarıyla sınırsız destek sunan Doç. Dr. Tuğçe ANILAN, Öğr. Gör. Murat KARAHAN, Öğr. Gör. Çağrı AKGÜN, Öğr. Gör. Emrah ASLAY ve Arş. Gör. Hasan Oğulcan MARANGOZ hocalarıma teşekkür ederim. Bu işbirliği ve bilgi paylaşımı, çalışmanın zenginleşmesine önemli ölçüde katkı sağlamıştır.

Aileme, hayatım boyunca verdikleri sınırsız sevgi, sabır ve katkıları için içtenlikle teşekkür ederim. Değerli Eşim Ebru'ya, bu uzun soluklu süreçteki fedakarlığı ve sürekli desteği için minnettarım. Her zaman yanımda oldu, destekleriyle beni cesaretlendirdi ve bu tez sürecindeki başarıma ortak oldu. Kızlarım Betül ve Begüm'e, bu süreçteki sabırları ve anlayışları için teşekkür ederim. Onların neşesi, bu yoğun dönemde beni motive etti ve bu tezin tamamlanmasındaki azmimde büyük bir etken oldu.

Ayrıca, çalışmamın ilerlemesi sırasında bana yardımcı olan çalışma arkadaşlarım Ali Kemal SOFUOĞLU, Mikail ÖZBEY ve Ayhan AĞSU gibi dostlarıma ve Erzincan İl Özel İdaresine teşekkür ederim. Katkıları, fikir alışverişleri ve motivasyonları benim için çok değerliydi.

Çalışmayı 21.F5110.02.01 proje kodlu GÜBAP2902 Hızlı Destek Programı ile destekleyen Gümüşhane Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne teşekkürlerimi sunarım.

Akın ÜSLÜ
GÜMÜŞHANE - 2024

ÖZET

Bu tez çalışmasında, Erzincan ilinde bulunan ve 1997 yılında tarımsal sulama amacıyla inşa edilen Erzincan Barajı'nın olası yıkılma senaryolarının incelenmesi ve taşkın etkilerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Çalışma alanı olarak Erzincan Barajı'nın seçilmesi barajın olası yıkılması ile ilgili herhangi bir belirti ya da şüpheli bir durum olmasından kaynaklanmamaktadır. Barajın olası yıkılma felaketine karşılık önlem alınması adına oluşturulan ilgili tüm senaryolar, tamamen teorik ve sayısal olarak belirlenmiştir.

Çalışma kapsamında, insansız hava araçlarıyla, havadan ölçüm ile 1,552.76 ha alanda gerçekleştirilen hava fotoğrafı ve 3B tarama verileriyle yüksek hassasiyetli sayısal yükseklik modelleri oluşturulmuştur. Baraj gövdesinde oluşması muhtemel yıkılma geddiği, en olumsuz senaryonun elde edildiği Froehlich (1995) yaklaşımına bağlı olarak trapez şekilli olarak belirlenmiştir. Ortalama gedik genişliği 102.35 m, gedik yüksekliği 61.92 m olarak elde edilmiş olup gedikin oluşum süresi de 0.35 s olarak hesap edilmiştir.

Belirlenen gedik parametrelerine, rezervuar alanı ve hacim – satıh eğrilerine bağlı olarak HEC-RAS programı kullanılarak gövde aksında meydana gelen taşkın hidrografı elde edilmiştir. Elde edilen taşkın hidrografına göre pik debi değeri 12,308.50 m³/s seviyesine kadar yükselmiştir.

Flow 3D yazılımıyla taşkının etkileri 2B ve 3B simüle edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, barajın yıkılması durumunda taşkın alanında en yüksek akım derinliği 12.30 m'ye, akım hızı ise 19 m/sn'ye ulaşmıştır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği sonuçları, yerleşim yerleri, sanayi tesisleri ve tarım arazilerinin taşkından etkilendiğini göstermiştir.

2B ve 3B analiz sonuçları karşılaştırılarak 3B analizin daha detaylı ve güvenilir sonuçlar sunduğu görülmüştür. Can kaybı olasılıkları 2B analize göre 57 kişi 3B analize göre ise 107 kişi olarak hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Baraj yıkılmaları, Erzincan Barajı, Flow 3D, Havadan ölçüm, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

SUMMARY

This thesis examines potential collapse scenarios and evaluates flood impacts of the Erzincan Dam, built in 1997 for agricultural irrigation in Erzincan province. The dam was chosen for study without any signs or suspicions of potential failure. Precautionary scenarios for dam failure were determined solely theoretically and numerically.

Within the study, unmanned aerial vehicles created high-precision digital elevation models covering 1,552.76 hectares. The potential breach in the dam, determined in a trapezoidal shape using the Froehlich (1995) approach, had an average width of 102.35 m, height of 61.92 m, and formation time of 0.35 s.

Using the HEC-RAS program, flood hydrographs on the dam axis were obtained based on breach parameters, reservoir area, and volume-surface curves. The peak discharge value in the obtained flood hydrograph reached 12,308.50 m³/s.

The Flow 3D software simulated flood effects in 2D and 3D. In the event of dam failure, the highest flow depth in the floodplain was 12.30 m, with a flow velocity of 19 m/s. Computational fluid dynamics analysis results indicated the impact on residential areas, industrial facilities, and agricultural lands.

Comparing 2D and 3D analyses, 3D analysis provided more detailed and reliable results. The probability of loss of life was 57 people in 2D analysis and 107 people in 3D analysis.

Keywords: Dam failures, Erzincan Dam, Flow 3D, Aerial measurement, Computational Fluid Dynamics

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	III
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI.....	IV
TEŞEKKÜR.....	V
ÖZET	VI
SUMMARY	VII
İÇİNDEKİLER	VIII
TABLOLAR DİZİNİ	X
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XI
EKLER DİZİNİ.....	XV
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XVI
1. GİRİŞ	1
1.1. Barajlar ile İlgili Genel Bilgiler	1
1.2. Baraj Yıkılmaları ile İlgili Genel Bilgiler	2
1.3. Barajların Yıkılma Nedenleri	7
1.4. Havadan Ölçüm Teknolojisi	12
1.5. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	13
2. YAZIN ÖZETİ.....	16
2.1. Baraj Yıkılma Parametreleri ve Amprik Yaklaşım Çalışmaları	16
2.2. Bir ve İki Boyutlu Modelleme ve Analiz Çalışmaları	23
2.3. Üç Boyutlu Modelleme ve Analiz Çalışmaları	35
2.4. Havadan Ölçümle Yapılan Modelleme ve Analizler	43
3. MATERYAL VE YÖNTEM	47
3.1. Çalışmada Kullanılan Hidrolik Yazılımlar ve Çözümleme Yöntemi	48
3.1.1. HEC-RAS Yazılımı.....	48
3.1.2. Flow 3D Yazılımı.....	51
3.1.2.1. Flow 3D Yazılımında Kullanılan Temel Eşitlikler	52
3.1.2.2. İki Boyutlu Sığ Su (Shallow Water) Eşitlikleri.....	52
3.1.2.3. Üç Boyutlu RANS Eşitlikleri.....	54
3.1.2.4. Flow 3D Yazılımında Kullanılan Türbülans Modelleri	57
3.1.2.4.1. Tek Denklemlili Türbülans Enerji Modeli (k)	58
3.1.2.4.2. İki Denklemlili k-ε Türbülans Modeli.....	58
3.1.2.4.3. Renormalized Group (RNG) Model.....	59

3.1.2.4.4. Large Eddy Simulation (LES) Model	60
3.1.2.4.5. Prandtl Karışım Uzunluğu Modeli	61
3.1.2.5. Flow 3D Yazılımında Çözüm Ağları	62
3.1.2.6. Flow 3D Yazılımında Sınır Koşulları	63
3.1.2.6.1. Serbest Yüzey Sınır Koşulları	63
3.1.2.6.2. Başlangıç ve Çözüm Ağı (Mesh) Bloğu Sınır Koşulları.....	65
3.2. Çalışma Alanı.....	66
3.3. SYM'nin Oluşturulması Amacıyla Havadan 3B Tarama Çalışmaları.....	76
3.4. Flow 3D Yazılımında Doğrulama Analizinin Modellenmesi	81
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	83
4.1. Çalışma Alanına Ait Havadan Tarama Verilerinin Elde Edilmesi	83
4.2. Sayısal Yükseklik Modeli ve Katı Cisim Modelinin Oluşturulması.....	95
4.3. Gedik Parametrelerinin Belirlenmesi.....	108
4.4. HEC-RAS Yazılımında Gedik Modelinin Oluşturulması.....	113
4.5. HEC-RAS Yazılımında Taşkın Hidrografının Elde Edilmesi	114
4.6. Flow 3D Yazılımında Sayısal Modelinin Oluşturulması	115
4.7. Flow 3D Yazılımında 2B Taşkın Yayılım Analizi	123
4.8. Flow 3D Yazılımında 3B Taşkın Yayılım Analizi	134
4.9. 2B ve 3B Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması	144
4.10. Flow 3D Yazılımından Elde Edilen Doğrulama Analizi Sonuçları	148
4.11. Muhtemel Can Kaybı Tahmini	152
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	158
KAYNAKÇA.....	162
EKLER	175
ÖZGEÇMİŞ	187

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Baraj inşasının doğrudan ve dolaylı amaçları (Weerasinghe vd., 2022).	1
Tablo 2. Dünya genelinde meydana gelen 100’den fazla insanın yaşamını kaybettiği baraj yıkılmaları (URL-1).	4
Tablo 3. Dünya genelinde son 5 yılda meydana gelen baraj yıkılmaları (URL-1).	6
Tablo 4. Baraj yıkılma nedenleri (MWR, 1993).	7
Tablo 5. Erzincan Barajı karakteristik bilgileri.....	71
Tablo 6. DJI – Phantom 4 RTK drone teknik özellikleri	77
Tablo 7. Seviye ölçüm noktaları	82
Tablo 8. Farklı gedik oluşum yaklaşımlarına göre elde edilen gedik ortalama genişlikleri	111
Tablo 9. Farklı gedik oluşum yaklaşımlarına göre elde edilen gedik oluşum süreleri .	111
Tablo 10. Taşkın etki alanında kalması muhtemel yerleşimlerin konum bilgileri.....	118
Tablo 11. 2B ve 3B analizler sonucu elde edilen akım derinlikleri ve akım hızları	148
Tablo 12. Deneysel model ve simülasyonlardan ölçülen ortalama su derinlikleri	150
Tablo 13. OMH ve HOK sapma değerleri	151
Tablo 14. Taşkın riski altında bulunan sanayi tesisleri	152
Tablo 15. Can kaybına etki eden s_i değerleri	154
Tablo 16. Tahmini can kaybı için seçilen s_i değerleri.....	154
Tablo 17. Can kaybına etki eden n_i değerleri.....	155
Tablo 18. Tahmini can kaybı için seçilen n_i değerleri	155
Tablo 19. Tahmini can kaybı için hesaplanan m_1 ve m_2 değerleri.....	156
Tablo 20. Tahmini can kaybı için hesaplanan a değerleri.....	156
Tablo 21. Tahmini can kaybı sayısı (LOL).....	156

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Türkiye yıllık ortalama dolu yağışlı gün sayısı dağılımı (MGM, 2022).....	3
Şekil 2. Baraj gövde yapısına göre yıkılma oranları (Zhang, Xu ve Jia, 2009).	7
Şekil 3. Solda taneli ve sağda koheziv dolgu barajın üstten aşma yoluyla gediklenme süreci: (a) yan görünüm, (b) aşağı akış görünümü (başlama aşaması, adımlar 1-2 ve 1-4; gelişme aşaması, adımlar 3-7 ve 5-7) (Zhang vd., 2009'dan değiştirilmiştir).....	9
Şekil 4. Solda taneli ve sağda koheziv dolgu barajın borulanma yoluyla gediklenme süreci: (a1, a2, a3) yan görünüm, (b1, b2, b3) aşağı akış görünümü (Zhang vd., 2009'dan değiştirilmiştir).....	10
Şekil 5. Barajların yıkılma nedenleri (Abay vd.dier, 2015; ICOLD, 2009).	11
Şekil 6. Taşkın modellemenin zamansal gelişimi (Moon, Parker, Boshoff ve Clohan, 2019).	12
Şekil 7. (a) Ham nokta bulutu, (b) Ham noktalar kullanılarak üretilen raster görüntü. ..	13
Şekil 8. Üçgen ve trapez şekilli gedik oluşumu	19
Şekil 9. HEC-RAS yazılımı kullanıcı ara yüzü.....	49
Şekil 10. Dikdörtgen hesaplama hücresine etkiyen parametreler	55
Şekil 11. Flow 3D yazılımında çoklu ağ bloğu örneği (Ghaderi ve Abbasi, 2021).....	63
Şekil 12. VOF yönteminde F değerleri şematik gösterimi (Nguyen-Thi, Nguyen, Pierens ve Coorevits, 2021).	64
Şekil 13. Flow 3D yazılımında mesh bloğu sınır koşulu seçim ekranı (Flow Science Inc., 2012).....	65
Şekil 14. Erzincan Ovasının havadan görüntüsü (Polat ve Altınbilek, 2021).....	67
Şekil 15. Erzincan ili siyasi haritası (Erzincan İl Özel İdaresi, 2022).	68
Şekil 16. Erzincan ili çevresi ana fay sistemleri (Tüysüz, 1993).	69
Şekil 17. Erzincan Barajı'nın konum haritası (Erzincan İl Özel İdaresi, 2022).	70
Şekil 18. Erzincan Barajı.....	71
Şekil 19. Erzincan Barajı genel yerleşim planı	73
Şekil 20. Erzincan Baraj gövdesi en kesiti.....	74
Şekil 21. Erzincan Baraj gövdesi boy kesiti	75
Şekil 22. Tahmini olarak belirlenen taşkın yayılım alanının, uydu görüntüsü	79
Şekil 23. DJI – Phantom 4 RTK drone kontrol kumandası	80
Şekil 24. Çalışmada kullanılan 2 adet DJI – Phantom 4 RTK drone	80

Şekil 25. Deney modeli ve başlangıç koşulları (Soares-Frazão, 2007).....	81
Şekil 26. Ölçüm noktası konumları (Soares-Frazão, 2007).	81
Şekil 27. Flow 3D’de oluşturulan deney modeli.....	82
Şekil 28. Çalışma alanının 1. bölümünde gerçekleştirilen uçuş planı ve elde edilen sayısal model	83
Şekil 29. Baraj gövdesinin sayısal yükseklik modeli.....	84
Şekil 30. 1. bölümünün sayısal yükseklik modeli.....	85
Şekil 31. 2. bölümünün sayısal yükseklik modeli.....	86
Şekil 32. 3. bölümünün sayısal yükseklik modeli.....	87
Şekil 33. 4. bölümünün sayısal yükseklik modeli.....	88
Şekil 34. 5. bölümünün sayısal yükseklik modeli.....	89
Şekil 35. 6. bölümünün sayısal yükseklik modeli.....	90
Şekil 36. 7. bölümünün sayısal yükseklik modeli.....	91
Şekil 37. 8. bölümünün sayısal yükseklik modeli.....	92
Şekil 38. 9. bölümünün sayısal yükseklik modeli.....	93
Şekil 39. 10. bölümünün sayısal yükseklik modeli.....	94
Şekil 40. Çalışma alanının bölüm numaraları	95
Şekil 41. Çalışma alanının sayısal yükseklik modeli	96
Şekil 42. Çalışma alanının düzensiz üçgensel ağ modeli.....	97
Şekil 43. Çalışma alanının eş yükselti eğrileri	98
Şekil 44. 1. kısmın katı cisim modeli.....	99
Şekil 45. 2. kısmın katı cisim modeli.....	100
Şekil 46. 3. kısmın katı cisim modeli.....	101
Şekil 47. 4. kısmın katı cisim modeli.....	102
Şekil 48. 5. kısmın katı cisim modeli.....	103
Şekil 49. 6. kısmın katı cisim modeli.....	104
Şekil 50. 7. kısmın katı cisim modeli.....	105
Şekil 51. 8. kısmın katı cisim modeli.....	106
Şekil 52. 9. kısmın katı cisim modeli.....	107
Şekil 53. 10. kısmın katı cisim modeli.....	108
Şekil 54. Amprik yaklaşımlarda hesaplanan gedik parametreleri (Xu ve Zhang, 2009).	109
Şekil 55. Erzincan Barajı rezervuar alanı hacim – satıh eğrisi	110
Şekil 56. Baraj gövdesi ve gedik oluşum modeli.....	113
Şekil 57. Baraj aksında oluşan yıkılma hidrografi.....	115

Şekil 58. Flow 3D yazılımına yüklenen katı cisim modeli	116
Şekil 59. Katı cisim modeli üzerinde sınırlandırılan çözümleme alanı	117
Şekil 60. Katı cisim modeli üzerine inceleme noktalarının tanımlanması.....	119
Şekil 61. Katı cisim modeli üzerine tanımlanan inceleme noktaları.....	119
Şekil 62. Katı cisim modeli üzerine tanımlanan yerleşim yeri isimleri	120
Şekil 63. Sayısal çözümleme alanına tanımlanan çözüm ağları	121
Şekil 64. Çözüm ağı hücreleri.....	122
Şekil 65. Flow 3D yazılımında analiz süresinin belirlendiği “Global” penceresi.....	123
Şekil 66. Flow 3D yazılımında yer alan physics penceresi.....	124
Şekil 67. 2B analizde taşkın başlangıç anı.....	125
Şekil 68. 2B analizde 504. saniyedeki taşkın yayılımı.....	125
Şekil 69. 2B analizde 756. saniyedeki taşkın yayılımı.....	126
Şekil 70. 2B analizde 1007. saniyedeki taşkın yayılımı.....	126
Şekil 71. 2B analizde 1116. saniyedeki taşkın yayılımı.....	127
Şekil 72. 2B analizde 1404. saniyedeki taşkın yayılımı.....	127
Şekil 73. 2B analizde 1763. saniyedeki taşkın yayılımı.....	128
Şekil 74. 2B analizde 2016. saniyedeki taşkın yayılımı.....	128
Şekil 75. 2B analizde 2519. saniyedeki taşkın yayılımı.....	129
Şekil 76. 2B analizde 3024. saniyedeki taşkın yayılımı.....	129
Şekil 77. 2B analizde 3528. saniyedeki taşkın yayılımı.....	130
Şekil 78. 2B analizde 3600. saniyedeki taşkın yayılımı.....	130
Şekil 79. 2B analizde Çatalarmut Köyü (1. probe) akım derinliği ve hız grafiği	131
Şekil 80. 2B analizde Yeşilçat Köyü (2. probe) akım derinliği ve hız grafiği.....	131
Şekil 81. 2B analizde Elmaköy Köyü (3. probe) akım derinliği ve hız grafiği.....	132
Şekil 82. 2B analizde OSB 1. inceleme noktası (4. probe) akım derinliği ve hız grafiği	132
Şekil 83. 2B analizde OSB 2. inceleme noktası (5. probe) akım derinliği ve hız grafiği	133
Şekil 84. 2B analiz sonucu elde edilen zamana bağlı su derinliği değişim grafiği.....	133
Şekil 85. 2B analiz sonucu elde edilen zamana bağlı akım hızı değişim grafiği.....	134
Şekil 86. 3B analizde taşkın başlangıç anı.....	135
Şekil 87. 3B analizde 504. saniyedeki taşkın yayılımı.....	135
Şekil 88. 3B analizde 756. saniyedeki taşkın yayılımı.....	136
Şekil 89. 3B analizde 1008. saniyedeki taşkın yayılımı.....	136
Şekil 90. 3B analizde 1116. saniyedeki taşkın yayılımı.....	137

Şekil 91. 3B analizde 1404. saniyedeki taşkın yayılımı.....	137
Şekil 92. 3B analizde 1764. saniyedeki taşkın yayılımı.....	138
Şekil 93. 3B analizde 2016. saniyedeki taşkın yayılımı.....	138
Şekil 94. 3B analizde 2519. saniyedeki taşkın yayılımı.....	139
Şekil 95. 3B analizde 3024. saniyedeki taşkın yayılımı.....	139
Şekil 96. 3B analizde 3528. saniyedeki taşkın yayılımı.....	140
Şekil 97. 3B analizde 3600. saniyedeki taşkın yayılımı.....	140
Şekil 98. 3B analizde Çatalarmut Köyü (1. probe) akım derinliği ve hız grafiği	141
Şekil 99. 3B analizde Yeşilçat Köyü (2. probe) akım derinliği ve hız grafiği	141
Şekil 100. 3B analizde Elmaköy Köyü (3. probe) akım derinliği ve hız grafiği.....	142
Şekil 101. 3B analizde OSB 1. inceleme noktası (4. probe) akım derinliği ve hız grafiği	142
Şekil 102. 3B analizde OSB 2. inceleme noktası (5. probe) akım derinliği ve hız grafiği	143
Şekil 103. 3B analiz sonucu elde edilen zamana bağlı derinlik değişim grafiği	143
Şekil 104. 3B analiz sonucu elde edilen zamana bağlı akım hızı değişim grafiği	144
Şekil 105. Elmaköy’de 2B ve 3B analiz sonucu elde edilen zamana bağlı derinlik değişim grafiği.....	145
Şekil 106. Elmaköy’de 2B ve 3B analiz sonucu elde edilen zamana bağlı akım hızı değişim grafiği.....	145
Şekil 107. OSB 1’de 2B ve 3B analiz sonucu elde edilen zamana bağlı derinlik değişim grafiği.....	146
Şekil 108. OSB 1’de 2B ve 3B analiz sonucu elde edilen zamana bağlı akım hızı değişim grafiği.....	146
Şekil 109. OSB 2’de 2B ve 3B analiz sonucu elde edilen zamana bağlı derinlik değişim grafiği.....	147
Şekil 110. OSB 2’de 2B ve 3B analiz sonucu elde edilen zamana bağlı akım hızı değişim grafiği.....	148
Şekil 111. P1 ölçüm noktasında deney ve sayısal analizler sonucu oluşan akım derinliği grafiği.....	149
Şekil 112. P2 ölçüm noktasında deney ve sayısal analizler sonucu oluşan akım derinliği grafiği.....	149
Şekil 113. P3 ölçüm noktasında deney ve sayısal analizler sonucu oluşan akım derinliği grafiği.....	150

EKLER DİZİNİ

Ek 1. 0. Saniyede 2B (a) ve 3B (b) Analizler Sonucu Oluşan Derinlik ve Hız Dağılımı	175
Ek 2. 504. Saniyede 2B (a) ve 3B (b) Analizler Sonucu Oluşan Derinlik ve Hız Dağılımı	176
Ek 3. 756. Saniyede 2B (a) ve 3B (b) Analizler Sonucu Oluşan Derinlik ve Hız Dağılımı	177
Ek 4. 1008. Saniyede 2B (a) ve 3B (b) Analizler Sonucu Oluşan Derinlik ve Hız Dağılımı	178
Ek 5. 1116. Saniyede 2B (a) ve 3B (b) Analizler Sonucu Oluşan Derinlik ve Hız Dağılımı	179
Ek 6. 1404. Saniyede 2B (a) ve 3B (b) Analizler Sonucu Oluşan Derinlik ve Hız Dağılımı	180
Ek 7. 1764. Saniyede 2B (a) ve 3B (b) Analizler Sonucu Oluşan Derinlik ve Hız Dağılımı	181
Ek 8. 2016. Saniyede 2B (a) ve 3B (b) Analizler Sonucu Oluşan Derinlik ve Hız Dağılımı	182
Ek 9. 2520. Saniyede 2B (a) ve 3B (b) Analizler Sonucu Oluşan Derinlik ve Hız Dağılımı	183
Ek 10. 3024. Saniyede 2B (a) ve 3B (b) Analizler Sonucu Oluşan Derinlik ve Hız Dağılımı	184
Ek 11. 3528. Saniyede 2B (a) ve 3B (b) Analizler Sonucu Oluşan Derinlik ve Hız Dağılımı	185
Ek 12. 3600. Saniyede 2B (a) ve 3B (b) Analizler Sonucu Oluşan Derinlik ve Hız Dağılımı	186

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	: Kesit alanı
A_i	: Hesaplama hücresinde sıvının i yönlerindeki kesit alanı
B	: Gedik genişliğinin
B_{ave}	: Ortalama gedik genişliği
B_b	: Gedik alt genişliği
B_t	: Gedik üst genişliği
C_b	: Rezervuar hacmine bağlı bir katsayı
CBS	: Coğrafi bilgi sistemleri
CORINE	: Çevresel bilginin koordinasyonu (Coordination of Information on the Environment)
Diff / DDiff	: Difüzyon dağılımı değerleri
e_{ij}	: Gerilim hızı tensör bileşenleri
F	: Çözüm ağı hücresinde sıvı tarafından işgal edilen hacmin yüzdelik dilimi
F	: Çözüm ağı hücresinde sıvı tarafından işgal edilen hacmin yüzdelik değeri
f	: Risk altında bulunan kişilerin ölüm oranı
FAVOR	: Kesit alanı / hacim oranı
f_i	: Viskoz i yönündeki ivme bileşenleri
g	: Yer çekimi ivmesi
G	: Kaldırma kuvveti
g	: Yer çekimi ivmesini,
g	: Yerçekimi ivmesi
g_i	: i yönündeki yer çekimi ivmesini,
H	: Akışkan yüzeyinin çözüm ağı tabanına göre yüksekliği
h	: Akışkanın yüksekliği
HAD	: Hesaplmalı akışkanlar dinamiği
H_b / h_b	: Gedik yüksekliği
H_d / h_d	: Baraj yüksekliği
HEC-RAS	: Hidrolojik Mühendislik Merkezi ve Nehir Analiz Sistemi
h_f	: Üstten aşma esnasında gedik üzerinden geçen su derinliği
HOK	: Hataların ortalama karekökü
H_r	: Küçük baraj sınır yükseklik değeri
h_w	: Gedik tabanı üzerindeki su derinliği

İHA	: İnsansız hava aracı
k	: Türbülansın kinetik enerjisi
k_c	: Taşınsal ivme katsayısı
k_f	: Kanal taban eğim katsayısı
k_p	: Basınç değişim katsayısı
k_t	: Yerel ivme katsayısı
L	: Çözüm ağı filtresi genişlik değeri
LES	: Büyük girdap simülasyonu (Large Eddy Simulation)
LOL	: Tahmini can kaybı sayısı
MSS	: Minimum su seviyesi
n	: Manning pürüzlülük katsayısı
NSS	: Normal su seviyesi
O	: Çıkış
OMH	: Ortalama mutlak hata
OSB	: Organize sanayi bölgesi
P	: Basıncı,
Par	: Risk altında bulunan kişi sayısı
Q	: Debi
q	: Net yanal debi
q	: Kanal boyunca birim uzunluk için net yanal debi (sızma, yağış vb.),
Q_p	: Pik çıkış debisi
RANS	: Reynolds Ortalamalı Navier Stokes (Reynolds Averaged Navier - Stokes) Denklemleri
RMSE	: Root Mean Square Error
S	: Simetri
S_0 :	: Akarsu taban eğimi
S_f	: Sürtünme kayıpları için enerji çizgisi eğimi
SWE	: Sığ su denklemleri (Shallow water equations)
SYM	: Sayısal yükseklik modeli
t	: Zaman
T_f / t_f	: Gedik oluşum süresi
TIN	: Üçgenleştirilmiş ağ modeli
TLEN	: Türbülans uzunluk ölçeği
T_r	: Zaman sabiti
u_i	: i yönündeki ortalama hız

u_i	: Sıvının koordinat eksenleri yönündeki hızı
USBR	: Amerika Birleşik Devletleri Islah Bürosu
V	: Hız
v	: Sıvının y yönündeki akım hızı
V_f	: Sıvının hesaplama hücresinde kapladığı hacim
VOF	: Akışkan hacmi yöntemi (Volume of Fluid)
W	: Duvar
x	: Yatay koordinatı
y	: Akım derinliği
Z / z	: Gedik kenar eğimi
δ_z	: z yönündeki hücre boyutu
ε	: Türbülansın sönmelenme oranı
ν_t	: Türbülansın dinamik viskozitesi
ρ	: Akışkan yoğunluğu

1. GİRİŞ

1.1. Barajlar ile İlgili Genel Bilgiler

Çağlar boyunca inşa edilmiş olan barajlar; nehirlerdeki akış sularını toplayıp depolayarak, içme ve sulama suyu temini, enerji üretimi, taşkın koruması, sulama ve rekreasyon gibi temel faydalar sağlamak için, nehir kesiti kapatılarak inşa edilen ve yaygın olarak kullanılan hidrolik yapılardır. Barajlar bunun gibi çok amaçlı işlevleriyle insan yaşamına yararlı olan yapılardır (Adityawan vd., 2023; Marsooli ve Wu, 2014; Shen vd., 2022; Simsek ve Islek, 2023). Bunlarla birlikte, taşkın kontrolü ve enerji üretiminde önemli bir rol oynamakla birlikte ulusal ve uluslararası ekonomiye önemli katkı sağlamaktadırlar. (Putri vd., 2020). Tablo 1’de baraj inşalarının doğrudan ve dolaylı amaçları listelenmiştir.

Tablo 1. Baraj inşasının doğrudan ve dolaylı amaçları (Weerasinghe vd., 2022).

Doğrudan amaçlar	İçme ve kullanma suyu temini
	Tarımsal amaçlı su temini
	Endüstriyel faaliyetler için su temini
	Taşkın kontrolü
	Su depolama
	Elektrik enerjisi üretimi
	Nehir yönünün değiştirilmesi
	Sedimentasyon kontrolü
Dolaylı amaçlar	Taşkın erozyonun önlenmesi
	Verimsiz arazileri tarıma hazırlamak
	Nehir ağzında kum ve kil biriktirmek
	Besin akışının değiştirilmesi
	Besin üretimini artırmak
	Yeni iş alanları oluşturmak
	Turizmi geliştirmek

Uluslararası Büyük Barajlar Komisyonu (ICOLD) tarafından hazırlanan veriler dünya genelinde en büyük bilgi ortamı olarak kabul görmektedir. ICOLD tarafından hazırlanan verilere göre Nisan 2020 tarihi itibarıyla dünya genelinde 61,988 adet baraj bulunmaktadır. Barajların %47'si sulama için kullanılırken, %21'si elektrik enerjisi üretimi amaçlı, %12'si su teminini, %9'i taşkın kontrolü için kullanılmakta, %6'sı seyir ve balıkçılık amacıyla ve %5 oranda da rekreasyon amaçlı kullanılmaktadır. Bu barajların

büyük çoğunluğu %67 oranla toprak dolgu ve %13 oranla kaya dolgu barajlardır. (ICOLD, 2020).

1.2. Baraj Yıkılmaları ile İlgili Genel Bilgiler

Su kaynaklarının verimli kullanımı için gerekli olan, özellikle barajlar gibi büyük hidrolik yapılar, yarı kurak iklim koşullarına sahip ve su kıtlığı yaşanan bölgeler başta olmak üzere 7,500 yıldan fazla bir süredir inşa edilmektedir. Barajların inşası sürdürülebilir su arzını güvence altına almak ve artan nüfusun su ihtiyacını karşılamak için uygulanan en iyi yöntemlerden biridir. Ancak, bu yapıların inşası çevresel riskleri de beraberinde getirdiğinden, acil eylem planlarına olan gereksinimi doğurmaktadır. Aksi takdirde yerel halk için ve özellikle barajın mansap bölgesinde yaşayan insanlar için potansiyel bir risk oluşturabilmektedirler. Baraj yıkılması nedeniyle meydana gelen taşkınlar tarih boyunca en yıkıcı afetlerin meydana gelmesine neden olmuşlardır (Bharath, Shivapur, Hiremath ve Maddamsetty, 2021; de Oliveira vd., 2022).

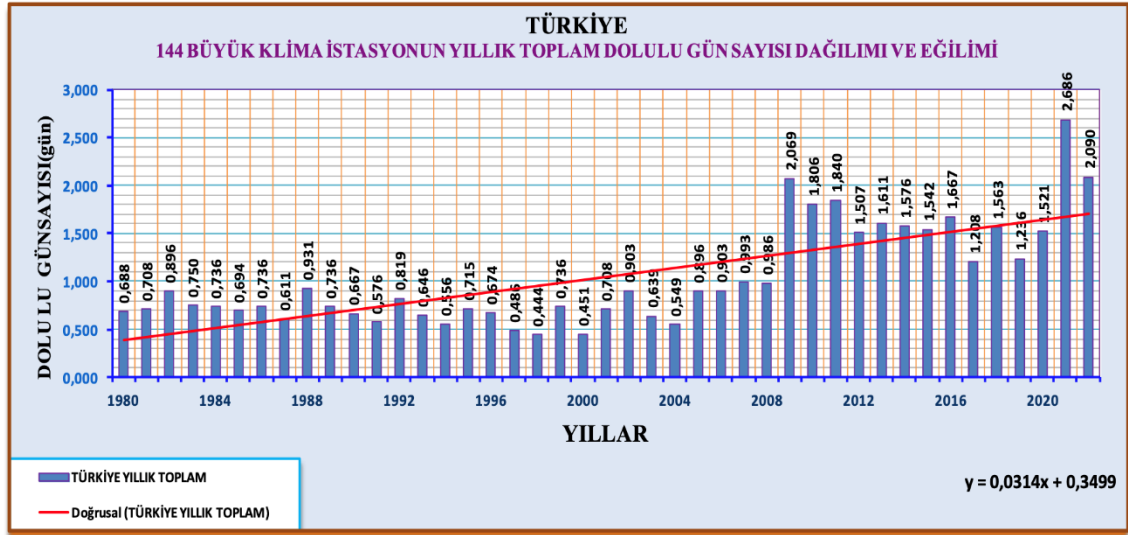
Barajlar medeniyetimize oldukça önemli katkılar sağlasalar da barajların çeşitli nedenlerle yıkılma olasılıkları bulunmaktadır. Barajların olası yıkılmaları sonucu oluşacak taşkın dalgaları, doğal taşkınlara göre çok daha yıkıcı olma potansiyeline sahiptir. Baraj yıkılmaları sonucu oluşan taşkın yayılımı; yağış kaynaklı taşkınlara göre çok hızlı bir şekilde ivme kazanarak, daha yıkıcı sel dalgaları meydana getirdiğinden çok daha büyük can ve mal kayıplarının meydana gelmesine neden olmaktadır (Chen vd., 2019; Marangoz, 2020; Zhang vd., 2016).

İklim değişikliği etkileri ile artan su taşkınları, insan faaliyetleri sonucu bilinçsiz arazi kullanımı, bilgi ve farkındalık eksikliği vb. etkilerle insanlar ve ekonomik değeri olan alanlar daha sık taşkınlara maruz kalmaktadır. Bu taşkınlar büyük ekonomik ve sosyal sonuçları olan baraj yıkılmalarını meydana getirebilmektedir. Baraj yıkılması sonucu meydana gelebilecek taşkınların önceden incelenmesi ile; insan yaşamı, kültürel miras, ekonomik faaliyetler, altyapı ve çevre için olumsuz sonuçların önlenmesi, korunması ve taşkınlara karşı hazırlıklı olunmasına imkân sağlanabilmektedir (Bonomelli vd., 2023).

İklim projeksiyonları; gelecekte sellerin büyüklüğü, sıklığı ve zamanlamasında artışlara işaret etmektedir. Dünya çapında, atmosferin ısınması atmosferin su tutma kapasitesini artıracak ve suyun atmosfer içindeki hareketini hızlandıracaktır. Bu durum, atmosfer koşullarıyla ilişkili olarak sel oluşturan süreçlerin daha sık görülme olasılığının artacağı anlamına gelmektedir. Ancak, İklim Değişikliği Hükümetler Arası Panelinin gelecekteki sel tahminleri son derece karmaşık konuları içermekte olup basit

genellemelere dayalı düşünce yapısına uymamaktadır. Isınan iklim aynı zamanda su döngüsünün diğer yönlerini de etkileyecek, bu da artan buharlaşma, değişen yağış desenleri ve yoğunluğu, suyun yüzey depolama süreçlerini değiştirecek ve kar örtüsü oluşturulması, kar erimesi, nehir buzunun kırılması ve buzul erimesi gibi süreçleri etkileyecektir. Bu süreçler, artan buharlaşma, değişen yağış rejimleri, ani kar ve buzul erimleri gibi sellere bağlı taşkınlara neden olan önemli faktörlerdir. Bu süreçlerdeki değişiklikler, sel olaylarında artışlara yol açabilir. Bununla birlikte, bu süreçler temel olarak küresel ölçekte değil, daha çok yerel düzeylerde meydana gelir, bu da gelecekteki sel desenleri hakkında geniş kapsamlı sonuçlar çıkarmayı zorlaştırıcı ve belirsiz kılar. Sellerin havza ölçeğinde gerçekleşen olaylar olduğu göz önüne alındığında, baraj havzaları özelinde yapılan taşkın analizlerine ihtiyaç bulunmaktadır. Ayrıca son zamanlarda yapılan çalışmalarda, aşırı yağış olaylarının dalgalanmasından kaynaklanan ani sellerin, daha fazla ölüm sayısına neden olduğu gösterilmektedir (Duan vd., 2016, 2019; Soriano vd., 2020; Whitfield, 2012).

Dolu yağışlarının taşkınlara yol açan önemli bir etken olduğu bilinen bir gerçektir. Ülkemizde 1980 ve 2022 yılları arasında düzenli ve doğrusal olarak artış gösterdiği Şekil 1’de gösterilen grafikten anlaşılmaktadır. Küresel iklim değişikliğinin, Ülkemiz üzerindeki olumsuz etkisini göstermesi açısından bu analiz, pek çok örnekten sadece biri olarak gösterilmektedir.



Şekil 1. Türkiye yıllık ortalama dolu yağışlı gün sayısı dağılımı (MGM, 2022).

Şimdiye kadar, toplum üzerinde farklı etkileri olan 2,000'den fazla baraj yıkılması kaydedilmiştir ve bu tür olayların çoğu, büyük hidrolik yapılara artan ihtiyaç nedeniyle

sürekli olarak baraj inşaatlarının hız kazandığı 1900 ile 2000 yılları arasında meydana gelmiştir (Singh, 1996; Zhang vd., 2016).

4 - 8 Ağustos 1975 tarihleri arasında Çin'in Henan Eyaleti'nde beş gün boyunca süren olağanüstü şiddetli bir fırtınada toplam yağış miktarı rekor seviyede meydana gelerek 1.631 mm'ye ulaşmıştır. Fırtına sırasında Banqiao ve Shimantan adlı iki büyük baraj ile Tiangang ve Zhugou adında iki orta boy baraj ve 58 küçük baraj aşırı dolma nedeniyle yıkılmış ve hasar görmüştür. Bu barajların yıkılmasıyla meydana gelen sel felaketinde, 12,000 km²'lik geniş bir alan etkilenmiştir. Afet sonucu, 26,000'i selden ve diğer 145,000'i kıtlık ve su ile ilgili hastalıklardan olmak üzere 171,000'den fazla insan hayatını kaybetmiştir. Ayrıca ekonomik etkisi de oldukça büyük olan felaket sonucu, 10 milyar Çin Yuanı aşan tutarda, yüksek bir maliyet meydana gelmiştir (Yao Xu, Zhang ve Jia, 2008).

Tarihteki tüm baraj yıkılmalarının araştırılması bu çalışmanın kapsamı dışında kalan zor bir görevdir. Baraj yıkılmaları ile meydana gelen felaketler sonucu, en ciddi ve telafi edilemez kayıp olan insan ölümleri odağında dünya genelinde 100'den fazla insanın yaşamını kaybettiği büyük baraj yıkılmaları ve nedenleri Tablo 2'de listelenmiştir.

Tablo 2. Dünya genelinde meydana gelen 100'den fazla insanın yaşamını kaybettiği baraj yıkılmaları (URL-1).

Baraj	Yıkılma Yılı	Ülke	Ölüm Sayısı	Yıkılma Nedeni
Banqiao ve Shimantan	1975	Çin	171000	Aşırı yağış sonucu üstten su aşması
Machchu-2	1979	Hindistan	5000	Aşırı yağış sonucu üstten su aşması
South Fork	1889	ABD	2208	Aşırı yağış sonucu üstten su aşması
Vajont	1963	İtalya	2000	Aşırı yağış sonucu üstten su aşması
Tigra	1917	Hindistan	1000	Temele su sızması
Panshet	1961	Hindistan	1000	Yapısal kusur
Iruka Lake	1868	Japonya	941	Aşırı yağış sonucu üstten su aşması
Puentes	1802	İspanya	608	Aşırı yağış sonucu üstten su aşması
St. Francis	1928	ABD	431+	Zemin duraysızlığı
Malpasset	1959	Fransa	423	Temel problemleri
Gleno	1923	İtalya	356	Yapısal kusur

Tablo 2. (Devamı)

Baraj	Yıkılma Yılı	Ülke	Ölüm Sayısı	Yıkılma Nedeni
El Cobre	1965	Şili	350–400	Deprem sonucu zemin sıvılaşması
Val di Stava	1985	İtalya	268	Yapısal kusur
Koshi Barrage	2008	Nepal	250	Yapısal kusur
Dale Dike	1864	İngiltere	244	Yapısal kusur
Canyon Lake	1972	ABD	238	Dolu savak yetersizliği
Kantale	1986	Sri Lanka	180	Hatalı işletme ve bakımsızlık
Tangiwai	1953	Yeni Zelanda	151	Krater gölü taşması
Vega de Tera	1959	İspanya	144	Yapısal kusur
Mill River	1874	ABD	139	Yapım aşamasında meydana gelen aşırı yağışlar
Sempor	1967	Endonezya	138	Yapısal kusur
Buffalo Creek	1972	ABD	125	Aşırı yağış sonucu üstten su aşması
Heiwaïke	1951	Japonya	117	Zemin duraysızlığı
Sella Zerbino	1935	İtalya	111	Zemin duraysızlığı
Mina Plakalnitsa	1966	Bulgaristan	107	Yapısal kusur ve işletme hatası
Walnut Grove	1890	ABD	100+	Aşırı yağış ve işletme hatası

Tablo 2’de görüldüğü üzere, dünya genelinde 100’den fazla insanın, yaşamını yitirdiği 26 baraj yıkılması gerçekleşmiştir. Sadece bu 26 barajın yıkılması sonucu en az 187,000’den fazla insan hayatını kaybetmiştir. Can kaybı yanında ekonomik, sosyolojik, psikolojik vb etkiler de dikkate alınınca oluşabilecek felaketin sonuçları çok büyük olabilmektedir.

Son yıllarda gerçekleşen bir büyük baraj yıkılması da 2021 yılında Hindistan’da bulunan Rishiganga barajında meydana gelmiştir. Çığ düşmesi, mansap yönünde büyük bir su dalgalanmasına neden olmuştur. Afet sonucu 145 kişi kaybolurken 61 kişi hayatını

kaybetmiştir. Bunun gibi çok sayıda yıkıcı örnek mevcut olmakla birlikte günümüze kadar son 5 yıl içinde dünyada gerçekleşen baraj yıkılmaları Tablo 3’de listelenmiştir. ABD, İngiltere, Çin, Hindistan, İtalya, Fransa gibi gelişmiş ülkelerin de içinde bulunduğu birçok ülkede, baraj yıkılmaları yaşanmasına nazaran, Ülkemiz baraj inşası ve baraj işletme konusunda başarılı bir tablo sergilemekte olup önemli bir baraj yıkılma olayı gerçekleşmemiştir.

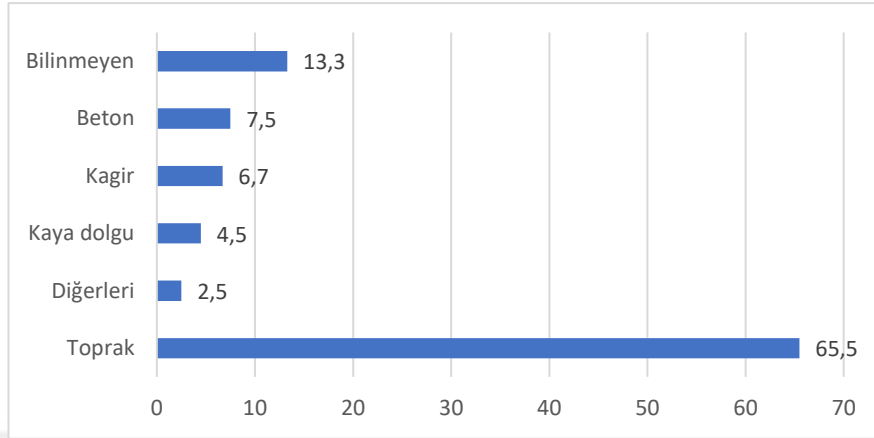
Tablo 3’de görüldüğü üzere günümüzden geriye dönük 5 yıl içinde, çoğunlukla şiddetli yağışlar nedeniyle 184 kişinin yaşamını kaybettiği baraj yıkılma vakaları meydana gelmiştir. Bu bilgiler dikkate alındığında baraj yıkılmalarının günümüze kadar devam ettiği görülmektedir. Gerekli ve yeterli önlemler alınmadığı takdirde ise yıkılmalara bağlı can ve mal kayıplarının yaşanmaya devam edebileceği beklenmelidir.

Tablo 3. Dünya genelinde son 5 yılda meydana gelen baraj yıkılmaları (URL-1).

Baraj	Yıkılma Yılı	Ülke	Ölüm Sayısı	Yıkılma Nedeni
Jagersfontein	2022	Güney Afrika	3	Yapısal kusur
Rishiganga	2021	Hindistan	61	Çığ düşmesi sonucu üstten su aşması
Edenville	2020	ABD	0	Yapısal kusur
Sanford	2020	ABD	0	Üstten su aşması
Tiware	2019	Hindistan	23	Şiddetli yağış sonucu üstten su aşması
Spencer	2019	ABD	0	Şiddetli yağış sonucu üstten su aşması
Sanford	2018	ABD	0	Şiddetli yağış sonucu üstten su aşması
Swar Chaung	2018	Myanmar	4	Dolu savakta yapısal kusur
Xe-Pian Xe-Namnoy	2018	Laos	36	Yapım aşamasında şiddetli yağış
Panjshir Valley	2018	Afganistan	10	Şiddetli yağış sonucu üstten su aşması
Patel	2018	Kenya	47	Şiddetli yağış sonucu üstten su aşması

Tablo 3’de görüldüğü üzere, bilim ve teknikteki ilerlemelere rağmen günümüzde de baraj yıkılmalarının meydana geldiği görülmektedir. Çin dışında, en fazla yıkılma

vakası gerçekleşen ülke ABD olmak üzere, Hindistan ve İngiltere gibi 50'den fazla ülkede yer alan, 900'den fazla baraj yıkılma olayı incelenmiş olup gövde yapısına göre baraj yıkılmalarının oransal dağılımı Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Baraj gövde yapısına göre yıkılma oranları (Zhang, Xu ve Jia, 2009).

Şekil 2'de görüldüğü üzere toprak dolgu barajlar %65.50 oranla en fazla yıkılma oranına sahip gövde tipidir. Bunu %7.50 oran ile beton, %6.70 kagir ve %4.50 oran ile kaya dolgu barajlar takip etmektedir.

1.3. Barajların Yıkılma Nedenleri

Tarihte inşa edilen ilk baraj ile birlikte baraj güvenliği kavramı ortaya çıkmıştır. Baraj yıkılmaları bir veya birden fazla nedenin bir araya gelmesi ile meydana gelmekte olup tarih boyunca yıkılan her barajın kendine özgü bir yıkılma karakteristiği olduğu söylenebilir. (Abay, Baykan ve Baykan, 2015). Bilimsel araştırmaların artması, gelişmesi ve tarihsel envanter sonucu baraj yıkılmalarının Tablo 4'de görülen nedenlerden birinden ya da birkaçının birleşiminden meydana geldiği söylenebilir.

Tablo 4. Baraj yıkılma nedenleri (MWR, 1993).

Üstten aşma	Yetersiz dolu savak kapasitesi
	Tasarım kriterlerini aşan taşkınlar
Kalite sorunları	Gövdede iç erozyon (gövdede borulanma)
	Barajın kayması
	Temelde iç erozyon (temelde borulanma)
	Kuyruksuyu yolunda iç erozyon
	Taşkın yolundaki kalite sorunları
	Boru geçitleri ve diğer gömülü yapılar etrafındaki iç erozyon
	Boru geçitleri ve diğer gömülü yapılar etrafındaki kalite sorunları

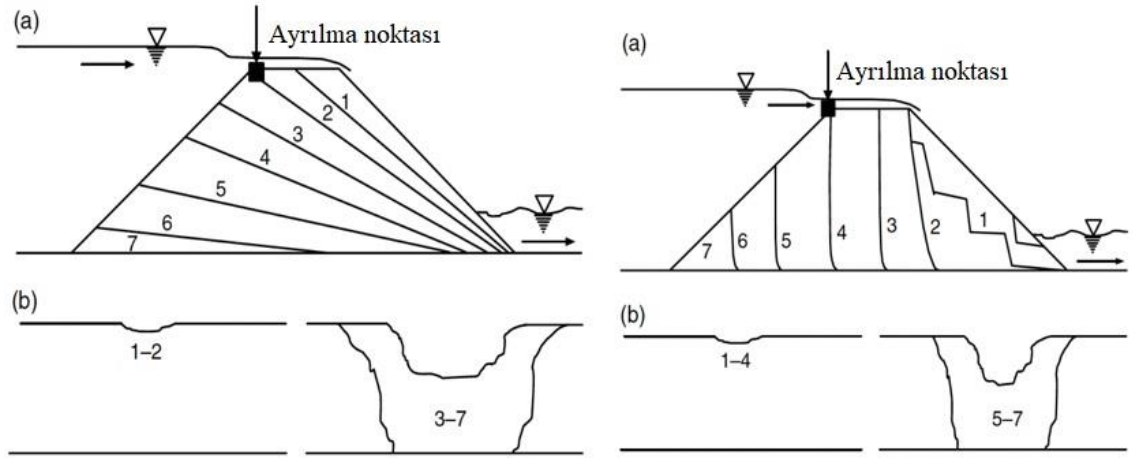
Tablo 4. (Devamı)

Kötü yönetim	Taşkın mevsimi öncesinde aşırı depolama nedeniyle rezervuar kapasitesinin kaybı
	Kötü bakım ve işletme
	Dolu savakta maksimum su kotunun zamanında düşürülmemesi Organizasyon sorunu: Baraj yönetimi için belirsiz sorumluluklar
Afetler	Depremler
	Savaşlar ve terörist saldırılar
	Rezervuar heyelanları
	Yukarıdaki barajın yıkılması Kemirgen yuvaları
Diğer	Rezervuardaki kıyı kayması nedeniyle kuyruk suyu tıkanması
	Deşaj için barajda yapılan kazı
	Kötü tasarım unsurları
	Proje düzeninin kötü planlanması

Üstten aşma olayı, genellikle bir barajın rezervuar taşıma kapasitesinin yetersiz olduğu durumlarda veya tasarım kriterlerini aşan aşırı yağış durumlarda ortaya çıkar. Gövde üzerinden aşan suyun yüzey üzerindeki etkisi nedeniyle malzeme üzerinde bir kayma kuvveti oluşur. Bu kayma kuvveti, gövde dolgu malzemesinin yerinde kalmasını sağlayan kritik bir direnci aştığında, erozyon süreci başlar.

Su akışının etkisi altında, dolgu malzemesinin zayıf noktasından erozyon başladıktan sonra, aşındırılan malzeme akışkan su tarafından taşınmaya başlanır. Bu süreçte aşındırılan malzeme, akışın yönünde taşınarak aşağı doğru ilerler.

İlk aşındırma genellikle V şeklinde bir oyulmaya yol açar. Zamanla, erozyon süreci ilerledikçe, bu taşkın daha da büyür ve sonunda ters trapezoidal bir şekil alır. Taşmanın erozyonla açtığı bu kanalın genişliği ve derinliği, taşma süresinin uzunluğuna, barajın yapısal özelliklerine ve malzeme özelliklerine bağlı olarak değişir. Kısacası, taşma erozyonunun mekanik ve morfolojik özellikleri, taşma süresi ve çevresel faktörlerle bağlantılıdır. Bu nedenle, taşma erozyonunun karmaşıklığını ve çeşitliliğini anlamak, su yapılarının güvenliğini ve dayanıklılığını değerlendirmek için hayati öneme sahiptir (Wahl, 1997; Zhang vd., 2009).

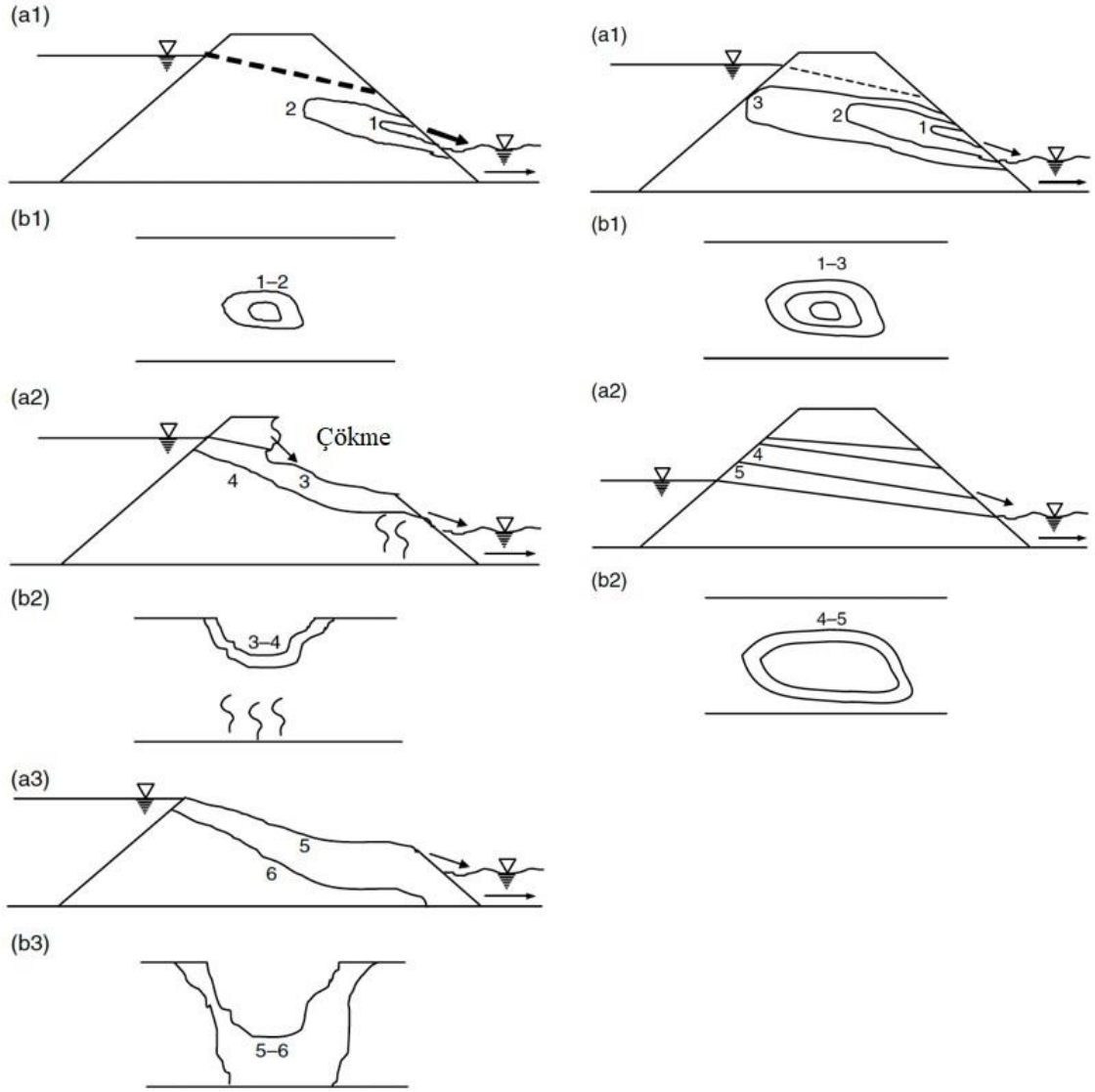


Şekil 3. Sol tarafta taneli ve sağ tarafta koheziv dolgu barajın üstten aşma yoluyla gediklenme süreci: (a) yan görünüm, (b) aşağı akış görünümü (başlama aşaması, adımlar 1-2 ve 1-4; gelişme aşaması, adımlar 3-7 ve 5-7) (Zhang vd., 2009'dan değiştirilmiştir).

Şekil 3'de erozyon özelliklerinin, taneli ve koheziv dolgu setler için farklı olduğu gösterilmektedir. Taneli dolgu setlerinde, yüzey kaymaları aşağı akış yüzeyindeki taşkın su akışı nedeniyle hızla meydana gelir; bu nedenle taneli malzemeler katman katman hızla uzaklaştırılır. Toprakta gerilme veya kayma başarısızlığı nedeniyle büyük parçaların kaymasına neden olur. Bazı durumlarda, barajın aşağı yüzeyinde bir dizi basamaklı kesim oluşur.

Dolgu barajların yaygın bir gediklenme modeli de borulanma yani içsel erozyondur. Bu durum genellikle akışkan suyun hidrodinamik kuvvetleri tarafından taşınan dolgu parçacıklarının, barajın gövde veya temelinden sürüklendiği bir olaydır.

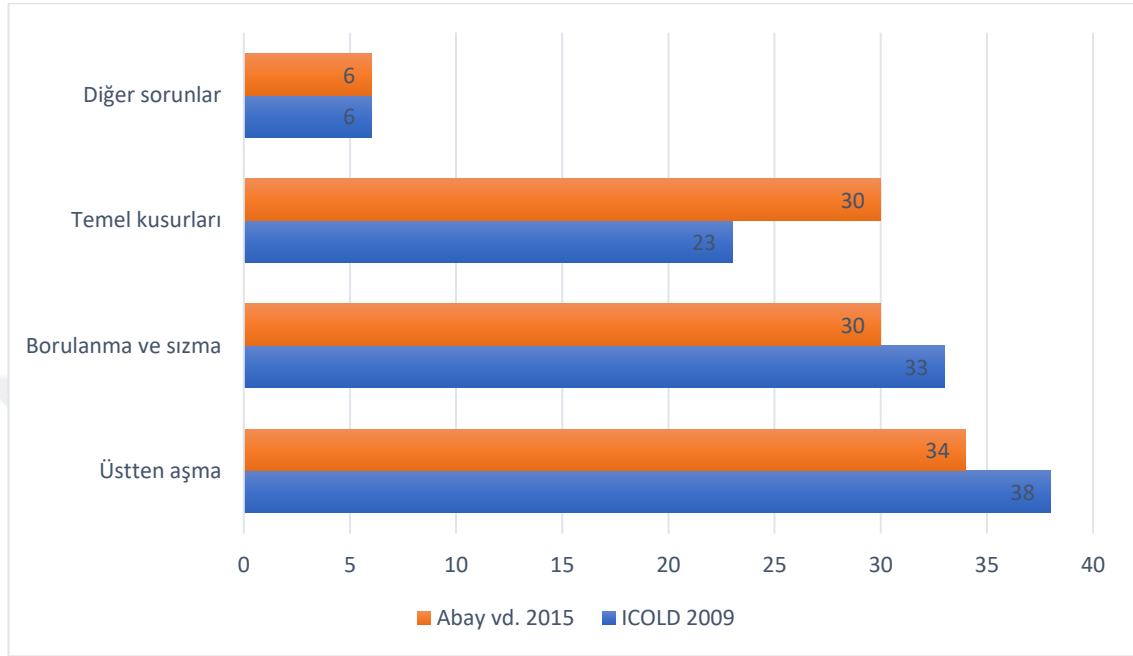
Şekil 4'de gösterildiği gibi, içsel erozyonun ilk aşamasında, toprak parçacıkları genellikle süzülen su tarafından yavaşça uzaklaştırılır. Daha sonra borulanma etkisiyle önemli miktarda malzeme taşındıktan sonra aşağı akış eğiminde oluşur. Bir kez boru formu oluştuğunda, erozyon süreci hızlanır ve boru yukarı akışa doğru ilerler. Böylece boru formunun üstündeki malzeme bölümü kararsız hale gelir ve çöker, bu durum üstten aşma durumundaki gibi benzer bir sonraki süreçle takip edilir.



Şekil 4. Solda taneli ve sağda koheziv dolgu barajın borulanma yoluyla gediklenme süreci: (a1, a2, a3) yan görünüm, (b1, b2, b3) aşağı akış görünümü (Zhang vd., 2009'dan değiştirilmiştir).

Dünya çapında birçok baraj depremlerin meydana geldiği, aktif fay hatlarına yakın bölgelerde inşa edilmektedir. Barajlar genellikle aktif deprem bölgelerinde inşa edilir. Bu bölgeler, özellikle genç dağlık arazilerdeki tektonik olarak aktif faylar boyunca uzanan uzun vadiler olduğundan, baraj inşası için olumlu topoğrafik özelliklere sahiptirler. Sulama, hidroelektrik enerji üretimi ve taşkın kontrolü gibi amaçlarla inşa edilen birçok barajın bulunduğu deprem açısından aktif bölgeler arasında; Amerika Birleşik Devletleri ve Kanada'nın Büyük Okyanus Kuzeybatısı, Çin, Hindistan, Türkiye, Meksika, İran ve Japonya bulunmaktadır. Bunlar sadece birkaç örnek olarak sunulmuş olup Dünya genelinde çok daha fazla örnek bulunmaktadır (Hale, 2019).

Baraj yıkılmalarının, büyük oranla üstten su aşması (%34 - %38), daha sonra ise borulanma (%30 - %33) ve temel kusurlarından kaynaklı problemler (%23 - %30) nedeniyle gerçekleştiği Şekil 5’de iki farklı çalışma sonuçlarına bağlı olarak görülmektedir.



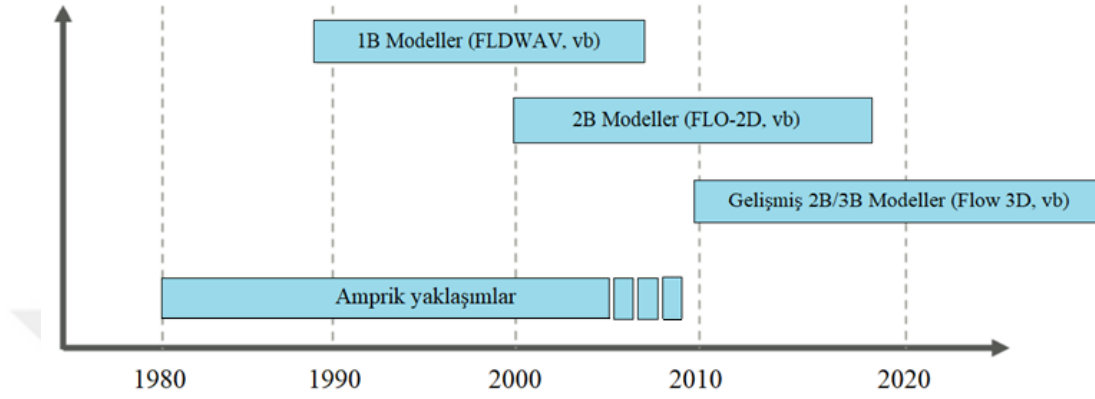
Şekil 5. Barajların yıkılma nedenleri (Abay vd., 2015; ICOLD, 2009).

Baraj yıkılma dinamikleri ve taşkının mansap bölgesinde meydana getireceği yıkıcı etki üzerine yoğunlaşarak, karmaşık ve derinlemesine araştırmalar yapılması acil ve zorunlu hale gelmiştir. Böylece; su yapılarına bağlı felaketlerin toplum için oluşturduğu riskin farkında olunması ve algılanması ile meydana gelebilecek olumsuz etkilerin azaltılması ve önlenmesine yönelik stratejilerin benimsenmesinin yolu açılmıştır (Romanescu vd., 2017).

Baraj yıkılmalarına bağlı dalga hidroliğinin anlaşılması, taşkın koruma önlemlerinin geliştirilmesi için önemlidir. Son 30 yılda dünya genelindeki taşkınların arttığı ve doğal afetlerin büyük çoğunu oluşturduğu dikkate alındığında, taşkın modellerinin geliştirilmesi ve uygulanması çalışmaları küresel bir ölçek kazanmıştır. Son yıllarda sayısal yöntemler ve hesaplama teknolojisindeki gelişmeler, taşkın önleme kontrolü için büyük bir fırsat sağlamıştır. Bu tür yaklaşımlar, mühendislere taşkın risk yönetimi ve planlaması hakkında ayrıntılı bilgi sağlamak için en çok tercih edilen yöntemler haline gelmiştir (Freer vd., 2011; Oertel vd., 2012; Teng vd., 2017).

Grafik işlem birimleri ile bulut hesaplamalarının artan hesap gücü, çalışma alanlarına ait yüksek çözünürlüklü sayısal verilerin temin edilebilme kabiliyeti, paket

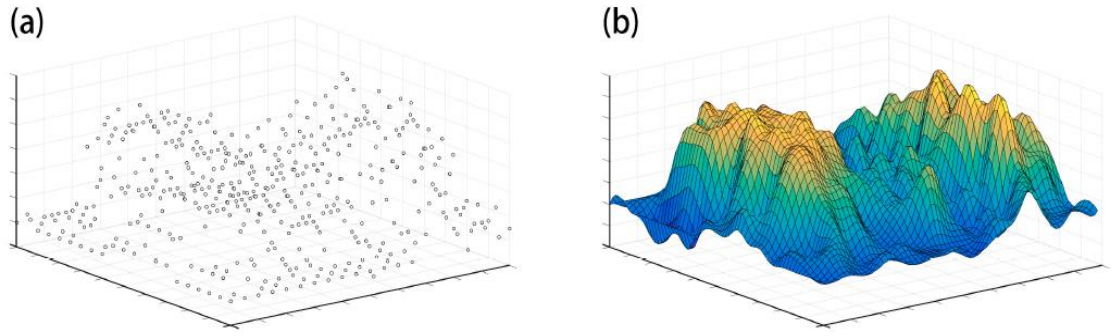
program sayısındaki artış, karmaşık modellemeler kurabilmeye izin veren gelişmiş kullanıcı ara yüzleri ve hesaplama süresini kısaltan daha verimli hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) kodlama tekniklerindeki gelişim son yıllarda önemli ölçüde ivme kazanmıştır. Şekil 6’da baraj yıkılma ve taşkın modelleme tekniklerinin tarihsel gelişimi görülmektedir.



Şekil 6. Taşkın modellemenin zamansal gelişimi (Moon, Parker, Boshoff ve Clohan, 2019).

1.4. Havadan Ölçüm Teknolojisi

Son yıllarda, havadan ölçüm tekniği çok hızlı şekilde gelişerek uzaktan algılama yöntemiyle veri elde etmede önemli bir araç haline gelmiştir. Havadan ölçüm sonucu elde edilen verilerin hem yatay hem de dikey yönde yüksek çözünürlüğe sahip olmasından dolayı, bu veriler arazi değişikliklerini izlemek, bina yapıları oluşturmak, ağaç hacimlerini analiz etmek ve 3B şehir modelleri oluşturmak için kullanılabilir. Havadan ölçüm verilerinin en temel kullanım alanı, ölçümler sonucu elde edilen nokta bulutlarının yardımıyla sayısal arazi modelleri (SAM) oluşturmaktır. SAM'lar, raster görüntüler veya üçgenleştirilmiş düzensiz ağlar (TIN) olarak düzenlenebilmektedir. Şekil 7’de nokta bulutundan, raster veri üretiminin şematik gösterimi sunulmuştur (Z. Chen, Gao ve Devereux, 2017).



Şekil 7. (a) Ham nokta bulutu, (b) Ham noktalar kullanılarak üretilen raster görüntü.

Havadan ölçüm teknolojisi, maliyet verimliliği, kolay kullanım ve hızlı ölçüm imkânı sunmanın yanı sıra, ölçümlerde metrekare başına 1 ila 10 arası yoğun nokta elde edebilme imkanına ve ± 15 cm'den daha düşük bir yükseklik hassasiyetine sahiptir. Tüm bu özellikleriyle, havadan ölçüm hassas SAM elde etmek için son derece uygun ve etkili bir yöntemdir. Ayrıca hidrodinamik sayısal simülasyonların geometrik temeli olarak kullanılır (Mandlbürger, Hauer, Höfle, Habersack ve Pfeifer, 2009).

Gelişen İHA teknolojisi ile elde edilen arazi verilerinin, yatay ve düşey yöndeki konum doğruluğu yaklaşık ± 7 cm dir. Ayrıca hassasiyetle birlikte, görsellik, zaman tasarrufu ve maliyet açısından, mühendislik analizlerinde havadan ölçüm yöntemlerinin üstün özellikleri bulunmaktadır (Ulvi, 2021).

Baraj yıkılmasına bağlı taşkın modeli geliştirme çalışmaları, doğruluğu bilinen yüksek çözünürlüklü topoğrafik veriler gerektirir. Doğru topoğrafik veriler, doğru taşkın haritalarının elde edilmesine olanak sağlar. Zeminden nokta ölçümleri ile en doğru yükseklik verileri üretilebilir. Ancak bu yöntem çok fazla zaman gerektiren ve maliyeti çok yüksek olan bir yöntemdir. Bunun yanında İHA'lar ile lazer ya da radyo dalgaları vasıtasıyla havadan yapılan ölçümler, çok daha kısa süreli ve nispeten daha düşük maliyetlidir. Ayrıca havadan ölçümler ile elde edilen nokta bulutları ve ortofoto haritaları, kolayca coğrafi bilgi sistemine (CBS) aktarılıp oldukça hassas sayısal yükseklik modelleri üretilebilmektedir (Abidin, 2015).

1.5. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Ülkemiz; coğrafi konumu, jeolojik yapısı ve iklim koşulları dikkate alındığında, sıklıkla doğal afetlere maruz kalmaktadır. Son olarak, 6 Şubat 2023 tarihinde Kahramanmaraş merkezli büyük depremler ile meydana gelen şiddetli yıkımla mücadele edilirken, bir yandan da hemen her bölgede yaşanan sel felaketleri, doğal afetlere karşı bilinçli ve hazırlıklı olmanın önemini bir kez daha göstermiştir. Ülkemizde her ne kadar baraj yıkılmaları meydana gelmemiş olsa da baraj yıkılmalarının potansiyel tehlikeleri

son derece büyüktür. Dolayısıyla baraj yıkılmalarının incelenmesi ve gerekli önlemlerin alınması büyük önem arz etmektedir.

Yaşadığımız doğal afetlerle birlikte; tarihinde büyük depremlerin meydana geldiği bir bölgede yer alan Erzincan Barajı'nın, çalışma alanı olarak seçilmesinin önemi bir kez daha ortaya çıkmıştır. Ayrıca Erzincan Barajı zonlu toprak gövde tipinde inşa edilmiş bir baraj olup oransal olarak en yüksek yıkılmaların görüldüğü gövde tipine sahiptir.

Çalışmanın amacı; Erzincan İl Merkezinde yer alan 1997 yılında yapımı tamamlanan, zonlu toprak dolgu gövdeli Erzincan Barajı'nın olası yıkılma analizinin yapılarak baraj yıkılma parametrelerinin tespiti ve bölgede risk altında bulunan alanların belirlenmesidir. Barajların yıkılması durumunda büyük oranda can ve mal kayıpları yaşanması mümkündür. Erzincan Barajı'nın yıkılma senaryosu en olumsuz durum için oluşturularak ortaya çıkacak taşkınların modellenmesiyle, mansap bölgesinde önceden belirlenen yerlerdeki taşkın debilerinin ve su yüzey kotlarının belirlenmesi, taşkın dalgasının herhangi bir bölgeye ulaşma zamanının tahmin edilmesi mümkün olacaktır. Ayrıca çalışmada, taşkın etkisi altında kalan riskli bölgelerin ve bu alanlarda bulunan yerleşim yerlerinin belirlenmesi ile gerektiğinde, insan ve diğer canlıların tahliyesi için yapılacak planlamalara yönelik değerli bir kaynak çalışması elde edilecektir.

Çalışma kapsamında; Erzincan Barajı'nın olası bir yıkılma durumunda meydana gelebilecek taşkın yayılımı; coğrafi bilgi sistemi yazılımları, bilgisayar destekli 1 ve 2 boyutlu taşkın modelleme programı olan HEC-RAS, 3 boyutlu çözümleme yapabilen HAD tabanlı paket programlarından biri olan Flow 3D kullanılarak analiz edilmiştir. Baraj gövdesi ve baraj mansap bölgesinin topoğrafik yapısının 3B sayısal modelleri, havadan algılama ve mesafe ölçme yöntemiyle oluşturulmuştur.

Literatürdeki benzer çalışmalar incelendiğinde, genellikle 1B ve 2B yıkılma ve taşkın yayılım analizlerinin yapıldığı görülmektedir. Buna rağmen baraj yıkılması sonucu oluşan taşkın davranışının belirlenmesi, çok sayıda değişkene bağlı olması bakımından, yoğun belirsizlik içeren karmaşık bir süreçtir. Arazi üzerinde gerçek bir taşkın hareketi ise üç boyutlu, zamana bağlı ve sıkışmayan serbest yüzeyli bir akış olarak karşımıza çıkmaktadır. Gelişen teknolojiyle birlikte 3B çözüm yapabilen HAD yazılımları, taşkın davranışının gerçeğe en yakın şekilde modellenbilmesine olanak sağlamıştır. Baraj hasarlarını temsil edebilen simülasyonlar oluşturulabilmektedir. Ancak baraj boyutları, rezervuar hacmi ile taşkın dalgalarının yayıldığı yatak ve havza özellikleri farklılıklar gösterdiğinden her bir baraj için farklı yıkılma simülasyonların yapılması gerekmektedir.

Bu çalışmada Erzincan Barajı için 2B (sığ su yaklaşımı) ve 3B baraj yıkılma çözümlemeleri yapılarak taşkına ait karakteristik bilgiler ve risk altındaki yerleşimler

belirlenmiştir. Topoğrafyanın havadan ölçüm teknolojisi ile taranması ve yüksek çözünürlüklü sayısal yükseklik modelleri (SYM) hazırlanması ve Flow 3D programında analiz edilmesi bir bütün olarak benzersiz bir çalışma içeriği oluşturmaktadır. Böylece çalışmanın, özgün değeri ve güncelliği sağlanarak, literatüre önemli bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Sonuç olarak simülasyonun en son teknolojik imkanlar kullanılarak 2B ve 3B olarak gerçekleştirilmesi sonucunda olası bir baraj yıkılmasının mansap bölgesinde oluşturacağı etkiler gerçeğe en yakın şekilde ortaya koyulmuştur. Yapılan analiz sonucunda taşkın dalgasının hangi zamanlarda hangi yerleşimlere ulaşacağı, yerleşimlerde meydana gelen taşkın derinlikleri ve su hızları gibi önemli bilgiler elde edilmiştir.

Çalışma konusu Erzincan Barajı inşa edildiği günden günümüze kadar sağlam ve sorunsuz bir şekilde hizmet vermektedir. Çalışma alanı olarak Erzincan Barajı'nın seçilmesi barajın olası yıkılması ile ilgili herhangi bir işaret, gösterge ya da şüpheli bir durum olmasından kaynaklanmamaktadır. Barajın olası yıkılması ile ilgili tüm senaryolar tamamen teorik ve sanal olarak düşünülmüş olup analizler sayısal ortamda gerçekleştirilmiştir.

2. YAZIN ÖZETİ

Baraj yıkılmaları ve meydana gelen taşkınlar; son derece yıkıcı, karmaşık, kapsamlı ve çoğunlukla oluşum mekanizması kesin olarak anlaşılamayan olgulardır. Ne mevcut fiziksel tabanlı modeller ne de sayısal modeller baraj yıkılma mekanizmalarını ve etkilerini tam olarak açıklayabilmektedir. Bilimsel çalışmalar; tarihsel bilgi birikimi ve deneyimler önderliğinde devam etmekte olup, gelecek araştırmalar için bir temel yapı ve ilham kaynağı teşkil etmektedir. Son yıllarda, gedik oluşum parametreleri, baraj yıkılma modellemeleri ve taşkın yayılım analizleri özelinde yapılan güncel bilimsel araştırmalar da bu çalışmaya ışık kaynağı olmuştur. Konuyla ilgili literatürde yapılan çalışmalar aşağıda verilmiştir

2.1. Baraj Yıkılma Parametreleri ve Amprik Yaklaşım Çalışmaları

MacDonald ve Langridge-Monopolis (1984), yapmış oldukları çalışmada, toprak dolgu, kaya dolgu, kil çekirdekli toprak dolgu ve yüzeyi beton kaplamalı kaya dolgu barajdan oluşan 42 adet baraj yıkılma olayının verilerini istatistiksel olarak inceleyerek gedik parametrelerinin geometrik ve zamansal özellikleri hakkında yaklaşımlar geliştirmişlerdir. Çalışmada; üçgen ve trapez şekilli gedik oluşumunda, gediğin şev eğimlerinin 2D (dikey):1Y (yatay) oranda kabul edilebileceği belirtilmiştir. Bununla birlikte toprak dolgu barajlarda gövdeden ayrılan dolgu malzemesi hacminin (V_{er}); gedik oluşum süresince gedikten geçen su miktarı (V_w) ve gedik tabanı üzerinde kalan su derinliği (h_w)'ne bağlı olarak hesaplanmıştır. Çalışmada toprak dolgu barajlar için V_{er} hesabına yönelik geliştirilen denklem (Eşitlik 1)'de gösterilmiştir. (Eşitlik 2)'de ise kil çekirdekli toprak barajlar ve kaya dolgu barajlar için gövdeden ayrılan malzeme hacminin (V_{er}) hesaplanması verilmiştir.

$$V_{er} (m^3) = 0.0261 \times (V_w \times h_w)^{0.769} \quad (\text{Eşitlik 1})$$

$$V_{er} (m^3) = 0.0261 \times (V_w \times h_w)^{0.852} \quad (\text{Eşitlik 2})$$

Çalışmada ayrıca V_{er} 'ye bağlı olarak gedik oluşum süresi (t_f) (Eşitlik 3) ve oluşabilecek pik debi (Q_{pik}) (Eşitlik 4) yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$t_f (\text{sa}) = 0.0179 \times (V_{er})^{0.364} \quad (\text{Eşitlik 3})$$

$$Q_{pik} (m^3) = 1.154 \times (V_{er} \times h_w)^{0.412} \quad (\text{Eşitlik 4})$$

Ayrıca bu eşitliklere ek olarak, barajın geometrik özelliklerine bağlı olmak üzere geliştirilen, gedik oluşumunun üst genişliği (B_t) (Eşitlik 5)'de gösterildiği şekilde hesaplanmaktadır.

$$B_t (m) = \frac{V_{er} - h_b^2 (ZW_c + \frac{Zh_b Z_3}{3})}{h_b (W_c + \frac{h_b Z_3}{2})} \quad (\text{Eşitlik 5})$$

Bu eşitlikte;

V_{er} : Gövdeden ayrılan dolgu hacmini (m^3),

h_w : gedik tabanı üzerinde kalan su derinliğini (m),

W_c : kret genişliğini (m),

Z : Gedik şev eğimini,

h_b : Gedik yüksekliğini (m),

Z_1 ortalama memba şev eğimini ($Z_1:1$),

Z_2 mansap şev eğimini ($Z_2:1$),

$Z_3 = Z_1 + Z_2$ ifade etmektedir.

MacDonald ve Langridge-Monopolis (1984), yönteminde baraj yıkılmalarında oluşabilecek tahmini gedik şev eğiminin (Z) 0.5Y:1D yan eğimlerle yamuk şeklinde olması gerektiği vurgulanmıştır.

Singh ve Snorrason (1984), çalışmalarında üstten aşmalara bağlı olarak tarihte meydana gelen toprak baraj yıkılmalarını detaylı bir şekilde incelemiş olup gedik genişliğinin (B); baraj yüksekliğinin (h_d) 2 katı ve 5 katı arasında, (Eşitlik 6)'da gösterildiği gibi yaklaşık bir değer aldığı istatistiksel olarak tahmin edilmiştir. Bununla birlikte (Eşitlik 7'de verilen, üstten aşma esnasında gedik üzerinden geçen su derinliği (h_f), 0.15 m ve 0.61 m aralığında, (Eşitlik 8)'de belirtilen gedik oluşum süresinin (t_f) ise yaklaşık 0.25 ila 1.00 saat arasında bir süre olduğu vurgulanmıştır.

$$2h_d < B (m) < 5h_d \quad (\text{Eşitlik 6})$$

$$0.15 \leq h_f (m) \leq 0.61 \quad (\text{Eşitlik 7})$$

$$0.25 \leq t_f (sa) \leq 1.00 \quad (\text{Eşitlik 8})$$

Çalışmada ayrıca küçük barajların, büyük barajlardan potansiyel olarak daha tehlikeli oldukları belirtilmiştir. Bunun nedeninin ise ani yağışların küçük rezervuar kapasitelerine sahip olan barajları, daha çabuk üstten aşma su seviyesine getirme imkânı olduğu vurgulanmıştır.

Von Thun ve Gillette (1990), çalışmalarında, Froehlich (1987) ve MacDonald ve Langridge-Monopolis (1984) tarafından hazırlanan önceki baraj yıkılma verilerinden 57 adet barajı kullanarak gedik parametrelerinin tahminine yönelik yaklaşımlar geliştirmişlerdir. Bu yaklaşımlara göre ortalama gedik genişliği (B_{ave}), (Eşitlik 9)'da görüldüğü üzere, gedik tabanı üzerindeki su derinliğine (h_w , m) ve rezervuar hacmine bağlı bir katsayıya (C_b) bağlı olarak değişmektedir.

$$B_{ave} (m) = 2.5h_w + C_b \quad (\text{Eşitlik 9})$$

B_{ave} 'nin hesaplanmasında yararlanılan C_b 'nin rezervuar hacmine (V_w) bağlı olarak dört farklı değer almakta olduğu (Eşitlik 10)'da görülmektedir.

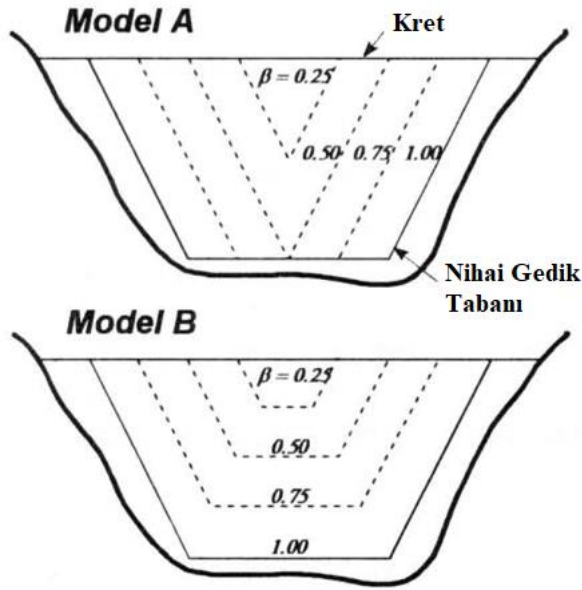
$$C_b = \begin{cases} 6.1 & \leftrightarrow & V_w < 1.23 \times 10^6 \\ 18.3 & \leftrightarrow & 1.23 \times 10^6 < V_w < 6.17 \times 10^6 \\ 42.7 & \leftrightarrow & 6.17 \times 10^6 < V_w < 1.23 \times 10^7 \\ 54.9 & \leftrightarrow & 1.23 \times 10^7 < V_w \end{cases} \quad (\text{Eşitlik 10})$$

Bununla birlikte çalışmada, gedik oluşum sürelerinin (t_f , sa) tahmin edilmesinde, baraj gövde malzemesinin (Eşitlik 11)'de gösterilen erozyona dirençli veya (Eşitlik 12)'de verilen kolay aşınabilen nitelikte olmasına göre iki yaklaşım önerilmiştir.

$$t_f = \frac{B_{ave}}{4h_w} \quad (\text{Eşitlik 11})$$

$$t_f = \frac{B_{ave}}{4h_w + 61} \quad (\text{Eşitlik 12})$$

Froehlich (1995), çalışmasında baraj yıkılmalarında meydana gelen gedik şeklini, gedik yüksekliğini, gediğin ortalama genişliğini, kenar eğimlerini ve gedik oluşumunun tamamlanma süresini tahmin edebilecek bir yöntem geliştirmek amacıyla 63 adet hasar görmüş ya da yıkılmış olan dolgu baraj üzerinde incelemeler yapmıştır. Çalışmada, üstten aşma sonucu gerçekleşen gediğin kademeli olarak üçgen ve trapez şekilli olarak gerçekleşme aşamaları Şekil 8’de gösterilmiştir.



Şekil 8. Üçgen ve trapez şekilli gedik oluşumu

Barajlardan elde edilen veriler; barajın tanımı, yıkılma anındaki rezervuar özellikleri, gedik ölçüleri ve gedik oluşum süresini içermektedir. Gedik oluşum süresi ve ortalama gedik kenar eğimi oranı parametrelerinin tahmin denklemleri, bir araya getirilen verilerin çoklu regresyon analizleriyle elde edilmiştir. (Eşitlik 13)’de gösterilen ortalama gedik genişliği (B_{ave}); (Eşitlik 14)’de gösterilen sabit katsayı (k_0) değerine, gedik oluşum anında rezervuardaki su hacmine (V_w , m^3) ve gedik yüksekliğine (h_b , m) bağlı olarak hesaplanmaktadır.

$$B_{ave} (m) = 0.1803 k_0 V_w^{0.32} h_b^{0.19} \quad (\text{Eşitlik 13})$$

$$k_0 = \begin{pmatrix} 1.4 & \text{üstten aşma için} \\ 1.0 & \text{diğer} \end{pmatrix} \quad (\text{Eşitlik 14})$$

Çalışmada toplanan verilerden elde edilen sonuçlara göre gedik yan eğim oranının (z), (Eşitlik 15)’de gösterilen değerlere yakın değerler aldığı görülmüştür.

$$z = \begin{cases} 1.4 & \text{üstten aşma için} \\ 0.9 & \text{diğer} \end{cases} \quad (\text{Eşitlik 15})$$

Bununla birlikte yine regresyon analizleri sonucu, gedik oluşumun tamamlanma süresi (t_f , sa), V_w ve h_b parametrelerine bağlı olarak (Eşitlik 16) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$t_f = 0.00254 V_w^{0.53} h_b^{-0.90} \quad (\text{Eşitlik 16})$$

Gedik tamamlanma süresinin (t_f), tutulan su hacmiyle doğru orantılı, gedik yüksekliğiyle ters orantılı olduğuna dikkat çekilmiştir.

Froehlich (2008), çalışmasında 74 adet dolgu baraj tahribatından elde edilen verileri kullanarak, trapez gedik oluşumunun yüksekliğini, taban veya ortalama genişliğini, şev eğimlerini ve gedik oluşum süresini hesap eden denklemler geliştirmiştir. Froehlich (1995) çalışmasının geliştirilmesiyle gedik oluşum süresi ve ortalama gedik kenar eğimi oranı parametrelerinin tahmin denklemleri, bir araya getirilen verilerin çoklu regresyon analizleriyle elde edilmiştir. (Eşitlik 17’de gösterilen ortalama gedik genişliği (B_{ave}); (Eşitlik 18’de gösterilen sabit katsayı (k_0) değerine ve gedik oluşum anında rezervuardaki su hacmine (V_w , m³) bağlı olarak hesaplanmaktadır.

$$B_{ave} (m) = 0.27 k_0 V_w^{1/3} \quad (\text{Eşitlik 17})$$

$$k_0 = \begin{cases} 1.3 & \text{üstten aşma için} \\ 1.0 & \text{diğer} \end{cases} \quad (\text{Eşitlik 18})$$

Çalışmada toplanan verilerden elde edilen sonuçlara göre gedik yan eğim oranının (z), (Eşitlik 19)’da gösterilen değerlere yakın değerler aldığı görülmüştür.

$$z = \begin{cases} 1.0 & \text{üstten aşma için} \\ 0.7 & \text{diğer} \end{cases} \quad (\text{Eşitlik 19})$$

Bununla birlikte yine regresyon analizleri sonucu, gedik oluşumun tamamlanma süresi (t_f , sa), V_w , h_b ve yer çekimi ivmesi (g , 9.80665 m/s²) parametrelerine bağlı olarak (Eşitlik 20)’de gösterildiği şekilde hesaplanmıştır.

$$t_f = 0.0176 \sqrt{\frac{V_w}{gh_b^2}} \quad (\text{Eşitlik 20})$$

Xu ve Zhang (2009), yapmış oldukları çalışma içerisinde; yarısı 15 m'den yüksek 182 baraj yıkılmasına ait verilere dayalı olarak, ampirik formüllerin türetilmesi için toplam ve çarpımlı regresyon analiz prosedürleri geliştirilerek, gedik yüksekliği (H_b), gedik üst genişliği (B_t), ortalama gedik genişliği (B_{ave}), pik çıkış debisi (Q_p) ve gedik oluşum zamanı (T_f) incelenmiştir. 182 baraj yıkılma vakasının bazılarında bilgi eksikliği nedeniyle, sadece yeterli bilgiye sahip 75 homojen, zonlu, çekirdek duvarlı ve yüzeyi beton kaplı dolgu barajlar çalışmaya dahil edilmiştir. Toplanan verilere göre homojen barajların yıkılma oranı tüm baraj türlerinin yarısını oluşturmaktadır. Yıkılan barajların yarısının 15 m'den yüksek olduğu ve çoğunluğunun $1.0 \times 10^8 \text{ m}^3$ 'ten az rezervuar kapasitesine sahip olduğu görülmüştür. Bununla birlikte yıkılmaların %56 oranla üstten aşma ve %36 oranla borulanma nedeniyle meydana geldiği belirtilmiştir. Çalışmada; beş farklı yıkılma parametresi için uygun kontrol değişkenleri olarak; gövde dolgusunun aşınma dayanımı (yüksek, orta, düşük), rezervuar şekli katsayısı, baraj tipi (çekirdek duvarlı, beton yüzöl, homojen veya zonlu dolgu gövdeli) ve yüksekliği ile gediklenme şekli (üstten aşma, sızıntı erozyonu, borulanma) seçilmiştir. Bunlardan, baraj gövdesi aşınma dayanımının, gedik parametrelerini etkileyen en önemli faktör olduğu sonucuna varılmıştır. Rezervuar şekli katsayısı ise gedik yüksekliğinden başka tüm gedik modellerinde önemli bir etkiye ortaya çıkarılmıştır. Bununla birlikte baraj gövde yüksekliği gedik oluşum süresi üzerinde daha etkili olurken, gediklenme şekli de ortalama gedik genişliği ve pik akış hızı üzerinde daha etkili olduğu belirlenmiştir. Baraj gövde tipinin, barajın gövde aşınma dayanımı üzerinde etkisinin olduğu tespit edilmiştir. Aynı analiz prosedürü kullanılarak, beş göçme parametresinin tümü için regresyon sonuçları elde edilmiştir. Çalışma sonucunda, (Eşitlik 21)'de gösterilen gedik yüksekliği (H_b , m), baraj yüksekliği (H_d , m), büyük – küçük baraj sınır yükseklik değeri (H_r , m), su yüksekliği (H_w , m), rezervuar su hacmi (V_w , m^3) ve zaman sabitine (T_r) bağlı olarak elde edilmektedir. Gedik tepe genişliği (B_t , m) (Eşitlik 22)'de, ortalama gedik genişliği (B_{ave} , m), (Eşitlik 23)'de, pik çıkış debisi (Q_p , m^3/sn) (Eşitlik 24)'de ve gedik oluşum süresi (T_f , sa) ise (Eşitlik 25)'de gösterilmiştir.

15 m'den yüksek barajlar büyük baraj olarak değerlendirildiğinden $H_r=15 \text{ m}$ değeri eşitliklerde kullanılabilir (ICOLD, 1988). Ayrıca regresyon analizlerinde T_r değerinin 1 saat olarak hesaplandığı belirtilmiştir.

$$\frac{H_b}{H_d} = 0.453 - 0.025 \left(\frac{H_d}{H_r} \right) + B_1 \quad (\text{Eşitlik 21})$$

Bu eşitlikte; $B_1 = a + b + c$ olmak üzere,

$a = 0.145$ (çekirdek duvarlı), 0.176 (beton yüzey kaplamalı), 0.132 (homojen/zonlu dolgu), değerlerini almaktadır.

$$\frac{B_t}{H_b} = 1.062 \left(\frac{H_d}{H_r} \right)^{0.092} \left(\frac{V_w^{1/3}}{H_w} \right)^{0.508} e^{B_2} \quad (\text{Eşitlik 22})$$

Bu eşitlikte; $B_2 = d + e + f$ olmak üzere,

$d = 0.031$ (çekirdek duvarlı), 0.088 (beton yüzey kaplamalı), -0.089 (homojen/zonlu dolgu),

$e = 0.299$ (üstten aşma) ve -0.239 (sızma/borulanma),

$f = 0.411$, -0.062 ve -0.289 (yüksek, orta ve düşük aşınma dayanımlı), değerlerini almaktadır.

$$\frac{B_{ave}}{H_b} = 0.787 \left(\frac{H_d}{H_r} \right)^{0.133} \left(\frac{V_w^{1/3}}{H_w} \right)^{0.652} e^{B_3} \quad (\text{Eşitlik 23})$$

Bu eşitlikte; $B_3 = g + h + i$ olmak üzere,

$g = -0.041$ (çekirdek duvarlı), 0.026 (beton yüzey kaplamalı), -0.226 (homojen/zonlu dolgu),

$h = 0.149$ (üstten aşma) ve -0.389 (sızma/borulanma),

$i = 0.291$, -0.14 ve -0.391 (yüksek, orta ve düşük aşınma dayanımlı), değerlerini almaktadır.

$$\frac{Q_p}{\sqrt{gV_w^{5/3}}} = e^{B_4} \left(\frac{V_w^{1/3}}{H_w} \right)^{-1.274} 0.175 \left(\frac{H_d}{H_r} \right)^{0.199} \quad (\text{Eşitlik 24})$$

Bu eşitlikte; $B_4 = j + k + l$ olmak üzere,

$j = -0.503$ (çekirdek duvarlı), -0.591 (beton yüzey kaplamalı), -0.649 (homojen/zonlu dolgu),

$k = -0.705$ (üstten aşma) ve -1.039 (sızma/borulanma),

$l = -0.007, -0.375$ ve -1.362 (yüksek, orta ve düşük aşınma dayanımlı), değerlerini almaktadır.

$$\frac{T_f}{T_r} = 0.304 \left(\frac{H_d}{H_r} \right)^{0.707} \left(\frac{V_w^{1/3}}{H_w} \right)^{1.228} e^{B_5} \quad (\text{Eşitlik 25})$$

Bu eşitlikte; $B_5 = m + n + p$ olmak üzere,

$m = -0.327$ (çekirdek duvarlı), -0.674 (beton yüzey kaplamalı), -0.189 (homojen/zonlu dolgu),

$n = -0.579$ (üstten aşma) ve -0.611 (sızma/borulanma),

$p = -1.205, -0.564$ ve 0.579 (yüksek, orta ve düşük aşınma dayanımlı), değerlerini almaktadır.

2.2. Bir ve İki Boyutlu Modelleme ve Analiz Çalışmaları

Kumar vd. (2017), çalışmalarında FLO 2D, FLDWAV, SMPDBK, MIKE 11, MIKE 2 ve HEC-RAS gibi baraj yıkılma analizlerinde kullanılan hidrodinamik modelleri incelemişlerdir. Literatür incelemesi yöntemiyle yapılan çalışma sonucunda, HEC-RAS programının baraj yıkılma çalışmalarında daha güvenilir sonuçlar veren etkili bir araç olduğu görülmüştür. Bununla birlikte simülasyon modelinden elde edilen sonuçların taşkın haritası hazırlamak amacıyla HEC-RAS yazılımının GeoRAS modülü aracılığıyla coğrafi bilgi sistemleri (CBS) platformuna rahatlıkla aktarılabilmesinin de ayrıca bir avantaj sağladığı belirtilmiştir. Ayrıca baraj yıkılma çalışmalarında uygun modelin seçiminin çok önemli olduğu, model seçiminde çalışma alanının analiz edilmesinin, baraj gedik parametrelerinin değerlendirilmesinin ve model sonuçlarının doğruluğunun incelenmesinin önemi vurgulanmıştır.

Kocaman (2019), çalışmasında Ceyhan Havzası Kahramanmaraş ilinde Kartalkaya Baraj gövdesinin çökmesi durumunda ortaya çıkabilecek taşkın yayılımı FLO-2D ve HEC-RAS 5.0.5 programlarında analiz edilmiştir. Bu yazılımlarda yüzey pürüzlülüğünü belirlemek için Avrupa Çevre Ajansı bünyesinde hazırlanan CORINE haritaları kullanılmıştır. Çalışmada kullanılacak SYM verileri ArcGIS platformu yardımıyla TIN formatına dönüştürülmüştür. HEC-GeoRAS modülü, TIN formatını, analiz katmanlarını oluştururken temel olarak kullanılmaktadır. Bu çalışma için oluşturulması gereken analiz katmanları belirlenmiştir. Arazi yüzey profilinin belirlenmesi için 50 m aralıklarla en kesit çizgileri atanarak sayısallaştırılmıştır. Simülasyonlarda 50 m ve 100 m hesaplama ızgara boyutları kullanılmıştır. Her iki yazılımda 50 m ve 100 m çözüm ağı boyutuna

sahip olan simülasyonlar hazırlanmıştır. Simülasyonlar sonucu akım derinliği, akım hızı ve mansap çıkış noktasındaki akım hidrografları karşılaştırılmıştır. Dar vadide, iki yazılım arasında akım derinlikleri ve hızlarda kayda değer farklılıklar açığa çıkmaktayken, ovada ise daha yakın değerler gözlemlenmiştir. Ayrıca HEC-RAS 5.0.5 yazılımının daha hızlı sonuç verdiği görülmüştür. Manning (n) değerleri %10, %20, %50 oranında artırılıp ve aynı oranlarda azaltılarak her iki yazılımda da sayısal çözümler gerçekleştirilmiştir. Çözümleme sonuçları karşılaştırıldığında Manning (n) değerinin dar olan vadi yapısındaki sonuçlar üzerinde daha etkili olduğu, pürüzlülük değerinin artmasıyla akım hızı büyüklüğünün azaldığı, akım derinliğinin ise arttığı gözlemlenmiştir. Akım süresinin ise pürüzlülük katsayısı artışı ile ters orantılı olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca her iki programda da Manning değerindeki azalışların akım hızları üzerinde daha çok etki meydana getirdiği tespit edilmiştir.

Danielle (2019), çalışmasında Rancho Cielito Barajı'nın yıkılma senaryosunu konu edinmiştir. Ulusal Baraj Envanteri veri tabanında yer alan barajların %85'ten fazlasının, 2029 yılına kadar 50 yaşın üzerinde olacağı, bu nedenle baraj yıkılma modelleri ve taşkın yayılım analizlerinin öneminin daha da artacağı bildirilmektedir. Çalışmada, "yüksek tehlike potansiyeline sahip" olarak sınıflandırılmış olan 1912 yılında inşa edilmiş, Kaliforniya'da yer alan toprak dolgu gövdeli barajın, yerleşim yerinde oluşturduğu riskin yanı sıra, baraj yüzeyine inşa edilmiş birçok konutun bulunduğu da dikkat çekilmiştir. Baraj yıkılma modeli, Hidrolojik Mühendislik Merkezi Nehir Analiz Sistemi (HEC-RAS) ve Altyapı Güvenliği Destek Sistemi (DSS-WISE Lite) yazılımlarında çözümlenmiştir. Çalışma hesaplama farklılıklarının karşılaştırılmasını içermekle birlikte, yıkılma senaryosunun taşkın sonuçları üzerindeki etkileri tespit edilmiştir. HEC-RAS ve DSS-WISE Lite, farklı sayısal şemalar ve hesaplama yöntemleri kullanmalarına rağmen, Rancho Cielito baraj yıkılma modelleri için, ulaşılan maksimum taşkın derinlikleri, taşkın yayılım hızları ve taşkın yayılım alanı sonuçları oldukça benzer şekilde ortaya çıkmıştır. Ancak, HEC-RAS simülasyonuna arazi değişiklikleri (otoyol ses duvarları, orta refüj, menfezler, setler vb.) dahil edildiğinde taşkın yayılım sınırları ve hızları önemli ölçüde değişmiştir. DSS-WISE Lite, hızlı çalışma süresi, kullanım kolaylığı ve daha az girdi ihtiyacı olması sebebiyle daha çok tercih edilen bir modelleme aracı olarak ön plana çıktığı vurgulanmıştır. Ancak DSS-WISE Lite tarafından otomatik olarak yüklenen arazi verilerinin yeterli olmadığı veya yıkılma parametrelerinin DSS-WISE Lite'da mevcut olan varsayımlardan geniş ölçüde farklı olması beklenen durumlarda, HEC-RAS'ın yıkılma modeli oluşturma ve taşkın yayılım analizleri için daha iyi bir seçenek olduğu tespit edilmiştir.

Khosravi vd. (2019), çalışmalarında İran'ın Gilan eyaletinde bulunan, Ülkenin ikinci en büyük nehri olan Sefid-Roud Nehri üzerine inşa edilmiş, Sefid-Roud Barajı'nın olası yıkılması sonucu meydana gelebilecek taşkın yayılımı incelenmiştir. Baraj, 106 m gövde yüksekliğine, 425.00 m kret uzunluğuna, 8 m kret genişliğine ve 1,198.00 milyon m³ rezervuar hacmine sahip beton ağırlık barajıdır. HEC-RAS hidrolik modeli kullanılarak, Sefid-Roud Barajı'nın çökmesi durumunda meydana gelebilecek taşkın sularının yayılma alanları, taşkın hızı ve taşkın süresi tahmin edilmiştir. Taşkın yayılım analizi yapılacak çalışma alanının topoğrafik bilgileri, Guilan Bölgesel Su Temin Firması tarafından sağlanan, ArcGIS 10.2'deki dijital topoğrafik haritalardan elde edilmiş ve HEC-RAS yazılımına aktarılmıştır. Toplamda 50 farklı kesit, modelde yer almıştır. Arazi kullanımı, Google Earth uydu görüntülerinden çıkarılmış ve Manning pürüzlülük katsayıları (n), arazi kullanımına dayalı olarak tahmin edilmiştir. Katsayılar sırasıyla konut bölgeleri için 0.25, bahçeler için 0.08, tarım arazileri için 0.05, ana kanal için 0.035 ve çıplak arazi için 0.025 olarak belirlenmiştir. Çalışma konusu baraj beton gövdeli olduğundan, borulanma seçeneği elenerek, üstten aşma durumu senaryosu esas alınarak modelleme yapılmıştır. Sonuçlar, mansapta yer alan yerleşim yerlerinde toplamda 3,100 kişinin yüksek taşkın riski altında olduğunu göstermiştir. Taşkın altında kalan bölgelerde su seviyeleri 2 m ile 25 m arasında ve taşkın hızı 4 m/sn ile 11 m/sn arasında değiştiği ve bu bölgedeki tüm yapılarla birlikte, Tahran-Rasht otoyolunun, pirinç tarlalarının ve zeytinliklerin tahrip olacağı tespit edilmiştir. Barajın bulunduğu konumdan, Aliabad-e-Paein, Roudbar, Dolatabad, Ganje, Joben, Rostamabad ve Totkaboun'a kadar yayılan taşkın süresi 6 dk ilâ 30 dk arasında değişmekte olup bu süre içerisinde bu bölgelerin tahliye edilmesinin mümkün olmadığı vurgulanmıştır. Ayrıca taşkın şiddeti nedeniyle oluşacak yüksek kayma geriliminin, verimli toprakların erozyona uğramasına ve nehir içindeki kirliliğin artmasına yol açacağı sonucu ortaya çıkarılmıştır. Buna bağlı olarak su kalitesi ve sucul yaşam üzerinde, baraj yıkılmasının son derece büyük olumsuz etkilere neden olacağı sonucuna varılmıştır.

Azeez vd. (2020), çalışmalarında, kurak bir bölge olan Suudi Arabistan'ın Cidde şehrinde bulunan toprak dolgu Um Al-Khair Barajında, 26 Ocak 2011 tarihinde meydana gelen aşırı yağışlar sonucu oluşan ani taşkınla, Um Al-Khair Barajı'nın yıkılma olayını incelemişlerdir. Barajda meydana gelmiş olan gedik parametrelerine ait bilgiler, barajın yıkılma sürecini gösteren video kayıtları ve yıkılma sonrasında kaydedilen fotoğraflar yardımıyla tahmin edilmiştir. Gedik parametrelerinin doğru olarak belirlenmesi, baraj yıkılma analizlerinde önemli bir unsurdur. Bu parametreler; gedik boyutu, gedik şekli, gedik yüksekliği ve gedik oluşum süresidir. Çalışmada incelenen baraj yıkılmasında

oluşan gediğin borulanma kaynaklı meydana geldiği ve taşkın esnasında su yüksekliğinin 8 m olduğu verilerden elde edilmiştir. Ayrıca gedik yüksekliğinin 12 m, ortalama gedik genişliğinin 25 m ve gedik oluşum süresinin 0.25 saat olduğu tahmin edilmiştir. Gedik parametreleri HEC-RAS yazılımına tanımlanarak taşkın hidrografi elde edilmiştir. Taşkın esnasında gözlemlenen derinlikler ile model sonucu hesaplanan derinlikler arasında makul düzeyde bir korelasyon olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlara göre, doğru saha ölçümlerinin sınırlı olduğu benzer çalışmalarda bu yöntemin kullanılması ile kabul edilebilir seviyelerde sonuçlar elde edilebileceği vurgulanmıştır. Oluşan küçük farklılıkların ise gedik parametrelerinin ölçüm yapılarak değil, video ve fotoğraflardan, yaklaşık tahminlere dayalı olarak ele alınması ile birlikte, SYM çözünürlüğü gibi çeşitli faktörlere bağlı olabileceği belirtilmiştir.

Em (2020), çalışmasında; Güneydoğu Anadolu Projesi kapsamında Fırat-Dicle Havzasında inşa edilmiş kil çekirdekli kaya dolgu barajlar olan Kralkızı ve Dicle barajlarının olası yıkılması durumunda meydana gelebilecek olumsuz senaryolar incelenmiştir. Kralkızı Barajı 1097 m kret uzunluğuna sahip, 113 m gövde yüksekliğinde olup en yüksek su seviyesinde 1,919.00 hm³ rezervuar hacmine sahiptir. Dicle Barajı ise 640 m talveg uzunluğunda ve 75 m yüksekliğinde inşa edilmiş bir baraj olup en yüksek depolama hacmi 595.00 hm³'tür. Çalışma alanının sayısal yükseklik modeli, yeterli hassasiyete sahip bir değer olan 5 m x 5 m çözünürlüğünde elde edilmiştir. Çalışma alanında yapılan gözlemler sonucu Manning (n) pürüzlülük katsayısı farklı yüzey türlerine göre maks. ve min. aralıklarda tespit edilerek hesaplamalarda girdi olarak kullanılmıştır. Üstten aşma ve borulanmaya bağlı olarak ani yıkılma sonucu oluşabilecek 9 farklı yıkılma senaryosu HEC RAS ve DHI MIKE programlarında 1B ve 2B olarak modellenmiştir. 1B modellemede taşkın yayılımını izlemek için kesit genişlikleri büyük seçilmiş ancak geniş olan kesitlerin çakışması ile hatalar ortaya çıkmıştır. Bunun yanı sıra kesitler dar seçildiğinde ise taşkın yayılımının gerçeğin dışına çıktığı görülmüştür. Karşılaşılan diğer bir sorun ise, yıkılma anında oluşan debinin, büyük olması nedeniyle programın çalışmasında oluşturduğu hatalardır. Ancak modelleme konusunda yapılan tekrarlamalar sonucu bilgi ve tecrübenin artmasıyla hatalar düzeltilmiştir. Mesh ağındaki sorunlu bölgeler de düzeltilerek sorunlar giderilmiştir. Taşkın dalgalarının Diyarbakır eski şehir merkezine ulaşmadığı ancak Mardinkapı mezarlığının bulunduğu bölgeyi etkilediği, karşı yakada ise üniversite garajının ve hastanelerin taşkın altında kaldığı tespit edilmiştir.

Gündüzalp (2020), çalışmasında Düzce'de Melen Çayı üzerinde 1974 yılında işletmeye açılmış kaya dolgu gövdeli Hasanlar Barajı'nın olası yıkılması sonucu taşkın

yayılımı HEC-RAS yazılımında 2B olarak incelenmiştir. 5 m – 30 m arasında değişken çözünürlükteki raster haritalar, Yüksel Proje Uluslararası A.Ş’den ve Opentopography sitesinden temin edilmiştir. Çalışmada kullanılacak araziye ait pürüzlülük bilgileri, CORINE (Coordination of Information on the Environment) Çevresel Bilginin Koordinasyonu projesi kapsamında oluşturulan arazi örtü sınıflandırma harita verisinden türetilmek sureti ile raster formatında elde edilmiştir. Haritanın Melen havza sınırları içinde kalan bölüm, Raster verilerin temin edilmesinin ardından, ArcGIS yazılımında yer alan “clip” komutu kullanılarak çıkarılmıştır. Çıkarılan haritadan, arazi örtü haritasından Manning pürüzlülük haritasına geçiş sağlayacak şekilde her kod için bir Manning pürüzlülük katsayısı tespit eden bir çalışmadan faydalanarak, Manning havza pürüzlülük haritası türetilmiştir. Elde edilen bu harita HEC-RAS yazılımına aktarılacak üzere SHP formatında kaydedilmiştir. 2B çözüm için HEC-RAS programına tanımlanmış olan ve tavsiye seçenek olarak Difüzyon Dalga denklem seti yer almaktadır. Bununla birlikte diğer bir seçenek olarak Tam Saint-Venant eşitlikleri sunulmaktadır. Çalışmada daha stabil sonuçlar veren pratik Difüzyon Dalga denklemleri güvenli alanda kalmak için tercih edilmiştir. 22 saat süren analiz sonucuna göre, taşkın dalgası Düzce Ovasında 11,000.00 ha genişliğinde bir alana yayılmakta olup ovanın yaklaşık %40 oranında, meydana gelen taşkından zarar göreceği sonucu ortaya çıkarılmıştır. Olası bir yıkılma durumunda 93.55 hm³ su serbest kalacak olup 19,698.00 m³/s’lik en yüksek debi ile mansap bölgesine doğru ilerleyecektir. Taşkın, 50 dakika içerisinde Düzce merkez mahallelerine, 75 dakika sonra D100 karayoluna, 140 dakika sonra TEM otoyoluna, 225 dakika sonra ise Büyük Melen Baraj gölüne ulaşacağı tespit edilmiştir. Büyük Melen Barajı’ndan büyük miktarda suyun tahliye edilmesinin gerektiği görüldüğünden, Büyük Melen Barajı’nın taşkın tahliye kapaklarının, Hasanlar Barajı’nda hasarın başladığı süreden itibaren en geç 4 saat sonra açılması gerektiği tavsiye edilmiştir.

Khalkho vd. (2020), hazırlamış oldukları çalışmada; Hindistan, Mirzapur Uttar Pradesh’ta bulunan toprak dolgu gövdeli Adwa Barajının olası bir borulanma olayı nedeniyle yıkılması durumunda meydana gelecek taşkın yayılımını incelemişlerdir. Çalışma alanının sayısal yükseklik modeli (SYM), Q-CIS yazılımıyla elde edilmiş ve HEC-RAS yazılımına aktarılmıştır. Analiz öncesinde gedik parametrelerinin Froehlich (2008) yöntemine göre hesaplanması sonucu, gedik taban genişliği 93 m ve gedik oluşum süresi 2.62 saat bulunmuştur. Analiz sonucunda taşkın haritası, HEC-RAS yazılımının bir modülü olan RAS Mapper tarafından oluşturulup, Q-GIS’e aktararak yıkılma senaryosu sonucu sular altında kalan alanlar belirlenmiştir. Çalışma ile toplamda 52 köyün taşkından

etkilendiği belirlenmiştir. Barajın yıkılmaya başlaması ile 41 dakika içinde acil tahliye işlemlerinin gerçekleşmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

Marangoz (2020), tarafından yapılmış olan çalışmada, Trabzon'da bulunan Atasü Barajı'nın yıkılma ve taşkın dalgası yayılım analizleri, üstten aşma ve borulanma ekseninde, 11 adet senaryo düşünülerek gerçekleştirilmiştir. Baraj yıkılma modeli 1B ve 2B, taşkın dalgası yayılım modeli ise 2B olarak modellenmiştir. Model ve analizler HEC-RAS yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Gedik genişliği ve yıkılma zamanı hesabı için, baraj yıkılma parametrelerinin ampirik denklemler ile elde edilmesine dayanan yaklaşımlardan olan Froehlich (1995, 2008), MacDonald ve Langridge-Monopolis (1984), Von Thun ve Gillette (1990), Xu ve Zhang, (2009) eşitliklerinden yararlanılmıştır. Yıkılma modelleri baraj depolama hacminin normal (316.50 m), en yüksek (319.05 m) ve yıkıcı (320.55 m) kotlarında olması halinde baraj aksında meydana gelen hidrografa göre test edilmiştir. En yüksek akım değerine ulaşılan senaryodan elde edilen çıkış hidrografı, taşkın yayılım modelinin giriş hidrografı olarak kullanılmış olup difüzyon ve dinamik dalga yaklaşımlarıyla mansap bölgesindeki akarsu boyunca ayrı ayrı ötelenmiştir. İki boyutlu analizlerde, kıyaslama kıstası olarak şehir merkezine 12 adet gözlem (probe) noktaları atanmıştır. Bu gözlem noktalarında ölçülen su derinliklerine göre, her iki yaklaşımın sayısal değer bakımından birbiriyle uyumu değerlendirildiğinde, minimum %8, maksimum ise %75 benzerlik oranı olduğu görülmüştür. Difüzyon dalga yaklaşımında taşkın dalgası hızı, dinamik (momentum) dalga yaklaşımına göre daha yüksektir. Dinamik dalga yaklaşımında oluşan yavaş akım, taşkın su derinliklerinde daha büyük değerler kaydedilmesine neden olmuştur. Baraj mansabının yüksek eğimli ve engebeli olmasının, iki yaklaşım arasındaki bazı parametrelerin birbirlerine kıyasla farklı çıkmasına yol açtığı belirtilmiştir. Tüm sonuçlar değerlendirildiğinde ise arazinin engebeli olmadığı, enerji kayıplarının çok daha az olduğu, geometrik model üzerinde ani değişimlerin ve ilave üst yapıların daha az olduğu ve çözüm alanının çok büyük olduğu durumlarda difüzyon dalga modelinin, dinamik dalga modeline göre daha ekonomik bir seçim olabileceği açıklanmıştır. Bu çalışmada gerçekçi sonuç vermesi sebebiyle benzer topoğrafik ve hidrolik özelliklerin yer aldığı çalışmalarda dinamik dalga yönteminin kullanılması önerilmiştir.

Ongdas vd. (2020), yapmış oldukları çalışmada Kazakistan'da yer alan İshim (Yeşil) Nehri'nde 2017 yılında meydana gelen taşkın olayını farklı mesh boyutlarında 2B olarak simüle etmek için HEC-RAS yazılımı kullanılmıştır. Astana Barajı'ndan yüksek akış tahliyelerinin simülasyonu için geliştirilmiş SYM (hava görüntülerinden elde edilen nehir batimetrisi ve arazi verilerinin dahil edilerek) ve HEC-RAS hidrodinamik modeli

kullanılmıştır. Farklı örgü boyutlarının (25 m, 50 m ve 75 m) kullanımının, model performansında önemli bir değişikliğe yol açmamasına rağmen, simülasyon süresinde önemli bir fark gözlemlenmiştir. Simülasyonların ardından 10 yıl, 20 yıl ve 100 yıl tekerrürlü yağışlar sonucu oluşan taşkın haritaları elde edilmiştir. Zhibek, Zholy ve Arnasay yerleşimlerinin tüm senaryolarda sular altında kaldığı gösterilmiştir. Volgodonovka köyünün, sadece 100 yıl tekerrürlü yağışta oluşan taşkından etkilendiği görülmüştür. Öte yandan 42 numaralı yerleşimin hiçbir senaryoda taşkından etkilenmediği ortaya çıkarılmıştır. Modellenen taşkın alanı ve uydu görüntülerindeki taşkın alanı karşılaştırıldığında, genel olarak modelin iyi bir uyum göstermiş olduğu ve gerçeğe yakın sonuçlara ulaşılabilirdiği sonucuna varılmıştır.

Pilotti vd. (2020), tarafından yapılan çalışmaya konu olan baraj, 1924 yılında, elektrik üretimi amacıyla Valtellina'da (kuzey İtalya) Adda vadisinin yukarı kesiminde inşa edilen, betonarme kemerli Cancano I Barajıdır. 1943 yılında, II. Dünya Savaşı sırasında Almanya'da felaketle sonuçlanan Moehne ve Edersee barajlarına yapılan saldırılar sonrasında, Cancano I Barajı da potansiyel bir askeri hedef olarak kabul edilmiştir. Bu nedenle De Marchi'ye bu barajın olası yıkımının etkilerinin incelenmesi için görev verilmiştir. De Marchi tarafında yapılan analiz sonuçları 1945 yılında bir makalede yayınlanmış olup bu makale, deneyimsel ve sayısal tekniklerin dağlık bölgelerdeki baraj yıkılması ve sel tehlikesini araştırmak için olağanüstü bir örnektir. De Marchi, vadinin memba kısmını (barajdan Cepina'ya kadar) 1:500 ölçekli fiziksel bir modelle ve vadinin mansap kısmını (Cepina'dan, Tirano'ya) basitleştirilmiş bir sayısal modelle incelemiştir. De Marchi, kuru yatak durumundan başlayarak, barajı temsil eden bir levhanın aniden kaldırılmasıyla ani çökme ve kısmi çökme olmak üzere iki farklı senaryoyu ele almıştır. Fiziksel deneyde rezervuar kesitleri mevcut haritalardan ve saha incelemelerinden elde edilse de muhtemelen yüksek geometrik ayrıntı seviyesine sahip olmadığı tahmin edilmektedir. Günümüzde, vadinin topoğrafyasının doğru bir temsili, 5 m çözünürlüğe sahip sayısal arazi modeli (SAM) kullanılarak elde edilmiştir. 1953 yılında, yeni ve daha yüksek Cancano II Barajı, Cancano I Barajı'nın hemen mansabında rezervuar kapasitesini artırmak için inşa edilmiştir. Cancano II Barajı'nın yapımının tamamlanmasıyla birlikte Cancano I Barajı, Cancano II Barajı'nın rezervuarı içinde tamamen su altında kalmıştır. Çalışmada; De Marchi'nin orijinal raporundan elde edilen tüm ilgili veriler (ölçülen hidrograf, kesitlerin konumu ve sular altında kalan alanlar), yeni veriler ve yeniden oluşturulan taban eğimi ile birlikte ele alınmıştır. Baraj yıkılma dalgasının yayılımı, HEC-RAS (2B) sürüm 5.0.7 kullanılarak modellenmiştir. Daha sonra De Marchi'nin (1945) deneysel verileri, TELEMAC 2D sürüm 7.0 ile gerçekleştirilen

sayısal simülasyonların sonuçları ile karşılaştırılmıştır. İki yazılım sonuçları arasında iyi bir uyum olduğu gözlemlenmiştir. Deneysel veriler ile sayısal sonuçlar arasındaki küçük farklılıkların ise özellikle vadinin üst kısmında, orijinal taban eğiminin yeniden üretilmesindeki bazı eksikliklerle ilişkili olabileceği düşünülmektedir. Sonuç olarak, HEC-RAS 2B'nin çok dik ve engebeli alanlarda bile ani sel dalgalarının yayılımını, kesin bir şekilde modelleyebilme yeteneğinin olduğu kanıtlanmıştır.

Shahrim ve Ros (2020), tarafından yapılan çalışmada, yerel nüfusa tarımsal faaliyetler için su temini ve taşkın önleme amaçlı Malezya'da yaygın olarak inşa edilen dolgu barajlardan biri olan Temenggor Barajı'nın olası yıkılma analizi 1 boyutlu ve 2 boyutlu olarak incelenmiştir. Etkili analiz sonuçları için topoğrafya verilerinin kalitesi son derece önemli olduğundan, gelişmiş kara gözlem uydularından elde edilen 30 m çözünürlüğündeki sayısal yükseklik modeli kullanılmıştır. Gedik parametreleri ise regresyon denklemleri kullanılarak belirlenmiştir. HEC-RAS programında yapılan analiz sonuçlarına göre elde edilen taşkın hidrografının, 1B'lu modelde borulanma analizinin %2.4 - %5.4 ve üstten aşma için %0.7 - %3.3 oranında, 2B'lu modelde hesaplanan taşkın hidrografından daha yüksek akım değeri verdiği görülmüştür. Ayrıca 1B'lu modelde, borulanma kaynaklı gediklenme senaryosunda, taşkın Bersia Barajı'na varış zamanının, ortalama olarak 2B'da elde edilen sonuca göre, 15 dk daha uzun olduğu gözlemlenmiştir. Diğer taraftan ise üstten aşma durumunda taşkın her iki modelde, Bersia Barajı'na neredeyse aynı varış zamanda ulaştığı bulunmuştur. 2B'lu baraj yıkılma modelleri 1B'lu baraj yıkılma modellerine göre daha hassas sonuç sunmuş olsa da 1B'lu analizlerin daha hızlı sonuç vermesi ve daha az veriye ihtiyaç duyulması yönünden, fazla hassasiyet istenmeyen durumlarda daha pratik bir uygulama olarak kullanılabileceği vurgulanmıştır.

Ashraf (2021), çalışmasında; Samsun ilinde yer alan Ondokuz Mayıs Barajı, Kocaeli ilinde bulunan İhsaniye Barajı ve Avcıdere Barajlarının yıkılma analizlerini, HEC-RAS (2B) ve FLO-2D yazılımlarında modelleyerek, gerçekleştirmiştir. Ondokuz Mayıs Barajı, kil çekirdekli kaya dolgu baraj olduğundan, gedik oluşum parametreleri 2 farklı üstten aşma ve 1 borulanma senaryosuna göre tahmin edilmiştir. İhsaniye Barajı silindirik sıkıştırılmış beton baraj olduğundan borulanma senaryosu elenerek, 3 farklı üstten aşma senaryosu ile incelenmiştir. Avcıdere Barajı ise yüzeyi beton kaplı kaya dolgu baraj olup 2 farklı üstten aşma ve 1 borulanma senaryosuna göre gedik parametreleri hesaplanmıştır. Böylece her baraj için 3 farklı gedik senaryosu kullanılarak üç farklı gedik hidrografi (S1, S2 ve S3) hesaplanmıştır. Gedik hidrografları, hem FLO-2D hem de HEC-RAS yazılımlarında modellenerek taşkın yatağı üzerinde ötelenmiştir. Çalışma konusu 3 barajda da taşkın riski bulunan alanları belirlemek için her bir gedik hidrografi için taşkın

tehlike haritaları hazırlanmıştır. Ondokuz Mayıs Barajı'nın olası yıkılması durumunda Ondokuz Mayıs İlçesinin, özellikle de Ondokuz Mayıs Mahallesi'nin yüksek tehlike seviyesinde olacağı görülmüştür. İhsaniye Barajı'nın olası yıkılması durumunda Yalakdere Beldesinin yüksek tehlike bölgesinde yer aldığı, Avcıdere Barajı için ise Yalakdere Beldesi ve Avcıköy'ün güney kesiminin yüksek tehlike seviyesi içinde kaldığı tespit edilmiştir. Her üç barajın da mansabında yaşayan nüfusun yüksek düzeyde tehlike seviyesinde olduğu göz önünde bulundurularak, acil bir uyarı sistemi ve acil eylem planının geliştirilmesi önerilmiştir. Ayrıca HEC-RAS modellerinin, FLO-2D'ye kıyasla daha kaba çözünürlük seviyesinde tutarlı sonuçlar verdiği ve gelecekteki çalışmalar için önerilebilir olduğu vurgulanmıştır.

Bharath vd. (2021), tarafınca Hindistan'ın Karnataka eyaletinde bulunan Hidkal Barajı üzerine yapılan çalışmada, baraj yıkılma analizi için Hydrologic Engineering Center River Analysis System (HEC-RAS) paket programı kullanmışlardır. HEC-GeoRAS aracı, sayısal yükseklik modeli oluşturmak, etkilenen alanlarını belirlemek ve taşkın yayılım haritaları üretmek için kullanılmıştır. Kararsız akım koşullarında, üstten aşma ve borulanma olmak üzere iki ayrı gedik senaryosu oluşturulmuştur. Yapılan analiz sonucu; borulanma için 72,085.45 m³/s ve üstten aşma için 78,454.82 m³/s'lik en yüksek akış değerleri hemen barajın mansabındaki noktada elde edilmiştir. Borulanma için 75,224.00 km² ve üstten aşma yıkılması için 79,205.00 km²'lik bir taşkın alanı elde edilmiştir. Üstten aşma problemlerinde meydana gelen pik akım değerinin, borulanmaya göre daha yüksek olduğu ve üstten aşmada daha fazla alanın taşkından etkilendiği sonucuna ulaşılmıştır. Oluşturulan taşkın haritaları, Hidkal Barajı'nın mansabında 22 km'lik nehir kenarındaki yaklaşık 20 köyün taşkından etkilendiğini göstermektedir. Bu köylerin 17'sinin çok daha ciddi şekilde etkilendiği tespit edilmiştir.

Najar (2021), çalışmada; HEC-RAS yazılımını kullanarak, Türkiye'nin batı kesiminde ve Ülkenin en büyük şehirlerinden olan İzmir ilinin şehir merkezinin yakınında bulunan İzmir'e su temin eden Tahtalı ve Ürkmez barajlarının olası yıkılması durumunda meydana gelebilecek taşkın yayılımını incelemiştir. Her iki baraj da turistik bir bölgede yer almaktadır. Ayrıca mansap bölgelerinde yoğun bir kentleşme mevcuttur. Şehir ve çevresi, son zamanlarda yaşanan ani kuraklıklar ve ardından meydana gelen ani yağışlarla dikkat çekmektedir. İzmir'de 2006 ve 2021 yıllarında yaşanan taşkınlar, yaklaşık 200 yıllık tekerrür süresine sahip yağışlar sonucu meydana gelmiştir. Bu gelişmelerin getirdiği ihtiyaç neticesinde, Tahtalı ve Ürkmez barajlarının olası bir baraj yıkılma senaryosunu değerlendirmek ve taşkın haritaları oluşturmak amacıyla modeller hazırlanmıştır. HEC-HMS hidrolojik modellerinden elde edilen taşkın hidrografi, HEC-

RAS yazılımında hidrolik modellere dönüştürülmüştür. Yapılan analizin sonuçları; Tahtalı ve Ürkmez barajlarının dolu savak kapasitelerinin, maksimum taşkın dalgasını rezervuardan tahliye edebilecek düzeyde olduğunu ortaya koymuştur. Üstten aşma gibi potansiyel bir riskin her iki baraj için de oldukça düşük olduğu, ancak yapısal kusurların neden olabileceği bir borulanma olayı sonucu oluşan bir yıkım senaryosunun ise mansapta ciddi şekilde tehlike arz ettiği sonucuna da varılmıştır. Öngörülen taşkın haritalarına göre, yüksek risk bölgesi tanımı altında etkilenen alanın %80'den fazlasında ciddi sayıda insan kayıpları ve maddi zararların meydana gelmesinin beklendiği belirtilmiştir. Ayrıca, iklim değişikliği de dikkate alındığında riskli taşkın alanlarının ilerleyen yıllarda daha da genişleyeceğine dikkat çekilmiştir.

Tilav (2021), çalışmasında İstanbul'da yer alan ve mansabında yoğun yerleşim bölgesi bulunan Darlık Barajı'nın olası yıkılma analizleri, HEC-RAS programı kullanılarak iki boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Darlık Barajı'nın yer aldığı havzanın sayısal yükseklik modeli, Harita Genel Müdürlüğü'nden 1/25,000 ölçeğinde yüksek çözünürlüklü ve 30 m x 30 m hassasiyetle temin edilmiştir. Baraj gövdesine ait nitel ve nicel bilgiler ile hacim satıh eğrileri DSİ Genel Müdürlüğü'nden temin edilmiştir. Çalışmada toplam 35 senaryo kurgulanmıştır. Çalışma kapsamında, barajın başarısızlığı durumunda meydana gelecek olan taşkın debisi, taşkın hızı ve taşkın derinliği hesaplanmıştır. En kötü senaryo olarak gözlemlenen 125 m gedik genişliği ve 0.50 saat gediklenme süresi senaryosu için taşkın haritaları oluşturulmuş, taşkın alanında kalan binalar için taşkın tehlikesi hesaplanmış ve hasar yüzdesi ile birlikte risk haritaları elde edilmiştir. Haritalara göre her bir binaya karşılık gelen su derinlikleri kullanılarak su derinliğine bağlı zarar yüzdeleri elde edilmiştir. Bu zarar yüzdeleri ile muhtemel bir zarar tahmini yapılmıştır. Bulgulara göre toplam yaklaşık 3,043 binanın hasar gördüğü gözlenmiş ve toplam 44,846,805.00 \$ zarar hesaplanmıştır.

Yıldız (2021), tarafından yapılan çalışmada, Bursa ili Karacabey İlçesi Yeşildere Mahallesi'nde çalışmanın hazırlandığı tarih itibarıyla inşası devam etmekte olan Yeşildere Barajı'nın 2 boyutlu yıkılma analizleri yapılmıştır. Baraj mansabında bulunan yerleşim yerinin taşkın riskinin belirlenmesi, taşkın haritalarının oluşturulması, taşkın su yüksekliğinin ve oluşum süresinin belirlenmesi çalışmalarında ArcGIS ve HEC-RAS paket programları kullanılmıştır. Rezervuar bilgileri barajın hacim – satıh eğrilerinden alınmış olup baraj rezervuarının tamamen dolu olduğu ve dışarıdan herhangi bir akımın olmadığı kabul edilmiştir. Gedik parametrelerinin tahmininde Von Thun ve Gillette (1990) yöntemi seçilmiştir. Taşkın yayılım durumunun daha gerçekçi sonuç verebilmesi için 6 saatlik süre seçilerek analiz yaptırılmıştır. Yeşildere Barajı yıkılma analizi

sonucunda; 5 m yüksekliğindeki taşkın dalgalarının barajın 1 km mansabında yer alan Yeşildere Mahallesi'ne 9 dk sonra ulaşacağı ve yerleşim yerinin büyük kısmının taşkın suları altında kalacağı tespit edilmiştir. Ayrıca 7 m yüksekliğindeki taşkın dalgalarının Bursa – Çanakkale otoyoluna 40 dk sonra ulaşacağı sonucu ortaya çıkarılmıştır.

Akdemir (2022), çalışmasında, Türkiye'de yer alan olası yıkım durumunda büyük tehlike oluşturabilecek yapım yılları itibarıyla 15 adet yaşlı barajın yıkılması ile meydana gelebilecek olumsuz etkileri incelemiştir. Yıkılma simülasyonları çoğunlukla en kötü durum senaryosu olan ani göçme durumu dikkate alınarak HEC-RAS yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Gedik oluşum parametreleri, HEC-RAS programında tanımlı, literatürde kabul gören ve sıkça kullanılan Froehlich (2008) yaklaşımı kullanılarak tahmin edilmiştir. Yapılan analizler, olası bir çökme durumunda oluşabilecek felaket senaryosunu tahmin etmek açısından önemlidir. Seçilen barajlar, olası bir yıkılma durumunda, geniş bir insan nüfusunun hayatını tehdit eden yaşlı barajlardır. Çalışma sonucu elde edilen sayısal analiz sonuçları da bu tahminin haklı olduğunu ve büyük yerleşim alanlarının kısa süre içerisinde taşkına maruz kaldığını ortaya çıkarmıştır.

Peker vd. (2022), yapmış oldukları çalışmada Türkiye'nin en yoğun yerleşim alanlarına sahip ili olan İstanbul'da Göksu Nehri üzerinde yer alan Elmalı 1 ve Elmalı 2 barajlarının olası yıkılması durumunda meydana gelecek taşkın yayılım analizi incelenmiştir. Analizler popüler olan ve 2B hidrolik modellemeler yapabilme yeteneği kanıtlanmış HEC-RAS programı kullanılarak yapılmıştır. Çalışma konusu barajlar aynı nehir üzerinde art arda konumlanmış olan Elmalı 1 ve Elmalı 2 Barajlarıdır. Elmalı 1 Barajı, 1907 yılında kullanıma açılmış olup 22 m yüksekliğinde ve toprak dolgu gövdeli bir barajdır. Elmalı 2 Barajı ise Elmalı 1 Barajı'nın memba bölgesinde ve 1.20 km uzağında, 1955 yılında inşa edilmiştir. Elmalı 2 Barajı ise beton payandalı gövde tipinde inşa edilmiş olup gövde yüksekliği 49 m'dir. Gedik oluşum süresi, yıkılan payanda sayısı ve Elmalı 1 Barajı'nın rezervuar hacmi oranı olmak üzere 3 farklı senaryo üzerinden analizler gerçekleştirilmiştir. Gedik oluşum süresinin (0.10 - 0.50 saat) ve zayıf payanda sayısının (6 – 11 adet), taşkın hızını, su derinliğini ve taşkın pik değere ulaşma süresini önemli ölçüde etkilediği belirlenmiştir. Bununla birlikte Elmalı 1'in rezervuar hacmi oranının sonuçlar üzerinde ciddi bir etkisinin olmadığı da tespit edilmiştir. Bu nedenle, Elmalı 1 Barajı'nın rezervuarının boş tutulması, Elmalı 2'nin olası yıkılmasının olumsuz etkilerini önlemeye yardımcı olmayabilecektir. Analiz sonuçlarına göre hazırlanan taşkın yayılım haritaları, yoğun yerleşim alanlarının, olası yıkılma durumunda ciddi şekilde taşkından etkileneceğini göstermektedir. İlk etkilenecek alan olan otoyolda meydana gelen taşkın 13 dk ila 34 dk içinde maksimum seviyesine ulaşacaktır.

Waskito vd. (2022), çalışmalarında Endonezya’da yer alan Citarum Nehri üzerinde 1986 yılında toprak dolgu gövdeli olarak inşa edilen Saguling Barajı’nın, 4 farklı senaryo dahilinde, HEC-RAS programında 2B olarak olası yıkılması durumunda oluşacak taşkın analizi konu edinilmiştir. Üstten aşma senaryosu ile birlikte borulanmanın baraj gövdesinin tepe, orta ve düşük konumunda oluşması durumları ele alınmıştır. Analiz sonuçlarına göre en yüksek taşkın yayılımı üstten aşma senaryosunda meydana gelmiş ve 19.39 km²’lik alanın sular altında kaldığı tespit edilmiştir. Diğer üç borulanma senaryosunda taşkın yayılımının birbirine çok yakın değerler aldığı ve ortalama taşkın yayılımının 17.34 km²’lik bir alanda gerçekleştiği sonucuna varılmıştır.

Eldeeb vd. (2023), yapmış oldukları çalışmada; yıkılması durumunda nehrin mansabında yer alan ülkelere etkileri endişe uyandırdığından, Büyük Etiyopya Rönesans Barajı’nın (BERB) olası yıkım senaryolarını incelemişlerdir. Çalışmada BERB’in yıkılması durumu, HEC-RAS kullanılarak modellenmiştir. Üstten aşma senaryosu üzerine iki boyutlu bir model geliştirilerek, taşkın hidrografları ve taşkın yayılım haritaları hazırlanmıştır. Analiz sonuçlarına göre, olası yıkılma durumunda akış derinliklerinin Khartum gibi bazı yerleşim bölgelerinde 3 m ilâ 10 m arasında değişebileceği sonucuna ulaşılmıştır. Bununla birlikte maksimum taşkın debisinin 325.928 m³/s’ye ulaşacağı ve baraj taşkını açısından kapasitesinin 21.50 katı olduğu tespit edilmiştir. Çalışma sonuçlarının, olası BERB yıkılmasında, karar vericilere felaketlerin önlenmesinde alternatif planlar geliştirme açısından yardımcı olabileceği vurgulanmıştır.

Sumira vd. (2023), yapmış oldukları çalışmada; 1994 yılında Endonezya’da inşa edilen 60 m yüksekliğinde, 190 m uzunluğunda, kret genişliği 8 m olan, gövdesi kil çekirdekli kaya dolgu bir baraj olan Sermo Barajı’nın olası yıkılması sonucu oluşabilecek taşkın yayılımını araştırmışlardır. İncelenen Baraj, yaklaşık 155 hektarlık bir alanı etkilemekte olup 21.21 km²’lik bir havza alanına sahiptir. Ayrıca, 25 milyon m³ rezervuar hacmine sahiptir. Barajın çevresinde birçok önemli kasaba ve tesis bulunmakla birlikte Ülkenin en büyük havaalanlarından biri olan Yeni Yogyakarta Uluslararası Havalimanı’na 15 km uzaklıkta yer almaktadır. Çalışmada, dolgu barajların yıkılma nedenleri arasında en büyük orana sahip olan üstten aşma ve borulanma senaryoları dikkate alınarak analizler gerçekleştirilmiştir. Birçok araştırma tarafından kabul gören Froehlich (2008), MacDonald ve Langridge-Monopolis (1984), Von Thun ve Gillette (1990) tarafından önerilen ampirik denklemler incelenmiş ve dolgu barajlar üzerine çok fazla çalışma içeren Froehlich (2008), yaklaşımı çalışmada gedik parametrelerinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Öncelikle üstten aşma senaryosunda 8 bölgeyi kapsayan

9,349.00 hektar alan su altında kalmaktayken, borulanma senaryosunda ise 6 bölgeyi kapsayan 5,112.00 hektarlık bir alanın taşkından etkilendiği sonucuna varılmıştır.

2.3. Üç Boyutlu Modelleme ve Analiz Çalışmaları

Kocaman (2007), yapmış olduğu çalışmada; baraj yıkılma problemini, teorik, deneysel ve sayısal olmak üzere, üç farklı açıdan incelenmiştir. Laboratuvar ortamında oluşturulan dikdörtgen kesitli bir kanalda, dikey yöndeki bir kapağın ani olarak kaldırılmasıyla baraj yıkılması ile oluşan taşkın yayılımı modellenmiştir. Oluşturulan taşkın dalgasının mansap boyunca farklı topoğrafik ve kuyruk suyu koşulları altındaki yayılımı ele alınmıştır. Bununla birlikte barajın mansabında yer alan farklı geometrik özelliklere sahip taban eşiklerinin ve akarsu yatağındaki farklı enkesit genişliğindeki değişimlerin etkileri araştırılmıştır. Elde edilen deneysel veriler Flow 3D yazılımında, 1B sığ su denklemleri (SWE - Shallow Water Equations) ile 2B ve 3B Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS - Reynolds Averaged Navier-Stokes) denklemleriyle karşılaştırılarak incelenmiştir. SWE ve RANS denklemlerinin, baraj yıkılma problemlerini sayısal olarak çözerken farklı hassasiyet düzeylerine sahip olduğu görülmüştür. Sonuçlar; RANS denklemlerinin, yüzey profillerini ve farklı noktalardaki su seviyesi değişimlerini oldukça iyi temsil ettiğini ve daha hassas sonuçlar verdiğini göstermiştir. Bunun yanında SWE denklemlerinin de yeterli benzerlikte sonuçlar sunabildiği anlaşılmıştır.

Palamut (2014), çalışmasında; İzmir'in Ödemiş İlçesinde çalışma tarihi itibarıyla inşası devam eden ön yüzü beton kaplı kum çakıl dolgu gövdeli Rahmanlar Barajı'nın olası yıkılması durumunda oluşacak taşkın yayılım analizi, 1B ve 3B olarak incelenmiştir. Mansabında 3 adet köy bulunan barajın taşkın yayılım analizi HEC-RAS programında 1B olarak incelenmiş olup 3B modeller ise Flow 3D programında analiz edilmiştir. HEC-RAS programında dinamik akım koşullarında katastrofik taşkın hidrografi memba sınır koşulu olarak tanımlanmıştır. Mansapta, normal akım derinliğine karşılık gelen taban eğimi okunarak, programa mansap sınır koşulu olarak tanımlanmıştır. HEC-RAS programında gerçekleştirilen 1B analizlerde, 1 adet üstten aşma ve 4 adet borulanma kaynaklı farklı gedik taban genişliklerinde meydana gelecek toplam 5 adet yıkılma senaryosu incelenmiştir. Gedik parametreleri belirlenirken Froehlich (2008) yaklaşımının seçilmesinde gedik şev eğimlerinin değiştirilebilme olanağı etkili olmuştur. Programda öncelikle mevcut rezervuar alanı başlangıç sınır şartı olarak tanımlanmıştır. Flow 3D modellemesinde öncelikle rezervuarda yer alan 23 hm³ su hacmi, başlangıç sınır koşulu olarak tanımlanmıştır. Yıkılma senaryosunda taşkın ilerlediği alan, 8 adet çözüm ağı

(mesh) bloğuna bölünmüştür. Ayrıca muhtemel taşkın alanı sınırlandırılıp gereksiz alanlar, hesaplamada dikkate alınmayarak, işlem yükünün azalması sağlanmıştır. Çözüm ağı bloklarına duvar (W), simetri (S) ve çıkış (O) sınır koşulları tanımlanmış ve RNG türbülans modeli analiz için seçilmiştir. Taşkın akımı, yüksek türbülansa ve sabit viskoziteye sahip Newtonyen akım olarak belirlenmiştir. 1B analiz sonucuna göre en kritik senaryo olan suyun üstten aşması durumunda oluşan gedik geometrisi, Flow 3D yazılımında, 3B olarak baraj gövdesi üzerinde modellenmiştir. Sonuç olarak 1B ve 3B analiz sonuçlarına göre taşkın yayılım haritaları hazırlanmış, kısmen de olsa yakın sonuçların ortaya çıktığı görülmüştür. Ancak gerçek topoğrafya 3B modellemede daha iyi temsil edilebilmiştir. Böylece RANS eşitliklerine dayanan 3B analizlerde taşkın yayılımının 1B analizlere göre daha doğru ve hassas olarak temsil edilebildiği vurgulanmıştır.

Tofiq (2015), çalışmasında; iklim değişikliğine bağlı olarak, dolu savak tasarım taşkın debisinin, gelecek tahminlere göre yeniden hesaplanması ve Irak'ta bulunan Dukan ve Darbandikhan Barajlarının dolusavak kapasitelerinin, hesaplanan taşkın debisi karşısındaki yeterlilikleri incelenmiştir. Hidrolojik döngüde iklim değişikliğine bağlı olarak araştırmacılar, birçok duruma göre yeniden hesaplanmış senaryolara ihtiyaç duymaktadırlar. Mevcut barajların önemli bir kısmı, şimdi geçerli olan standartlardan daha düşük standartlara göre inşa edildiği belirtilmiştir. Bu nedenle, mevcut dolu savakların hidrolojik olaylar sonucu meydana gelen baraj taşmalarını sıklıkla karşılayamadığı vurgulanmıştır. İklim tahmin çalışmalarından esinlenilerek bu çalışmada alternatif bir taşkın tahmin metodolojisi önerilmiştir. Bu yeni tekniğin, mevcut barajların güvenliğini değerlendirmede ve yeni barajların tasarım aşamasında kullanılabileceği vurgulanmıştır. Geleceğe yönelik taşkın projeksiyonları, genel olarak tasarım taşkın debisinde artış yönünde değişikliklerin olacağını göstermektedir. Çalışmada Flow 3D programında yapılan HAD analiz sonuçlarından, barajın 493.50 m rakım seviyesindeki su seviyesi için taşma kapasitesinin, tasarım taşma kapasitesi olan 11,400.00 m³/s değerinden daha düşük olduğu sonucuna varılmıştır. Bu sonuçlar ışığında, rezervuarın maksimum seviyede olduğu dönemlerde, katastrofik yağışlar sırasında dikkatli önlemler alınması, deşarj kapasitesini azaltabilecek tıkanmalara karşı savak kapaklarının periyodik olarak kontrol edilmesi, gerekli durumlarda yapısal geliştirmeler yapılması ve tasarım taşkın debisi (TTD) hesaplamalarında, muhtemel tüm iklim senaryolarının dikkate alınması yönünde görüş bildirilmiştir.

Pakniyat (2015), çalışmasında 1996 yılında inşası tamamlanan kil çekirdekli kaya dolgu gövdeli Tahtalı Barajı'nın, %100, %50 ve %25 oranında yıkılması durumunda

oluşacak taşkın yayılımı, Flow 3D programıyla sayısal olarak modellenmiştir. Baraj mansabında, Gümüldür ilçe merkezi ile birlikte sahil boyunca yer alan siteler ve tarımsal alanlar yer almaktadır. Google SketchUp ve Autocad programları yardımıyla, Flow 3D yazılımına çalışma alanının tanımlanmasında kullanılan dosya formatlarından biri olan “.stl” uzantılı olacak şekilde çalışma alanı sayısallaştırılmıştır. Gediklenmenin; baraj üzerinden su aşmasıyla birlikte, gövdenin yatay eksene göre orta bölümünden başladığı senaryosu modellenmiştir. Çalışmada farklı türbülans modellerinin hassaslığı araştırılmadığından, Flow 3D yazılımına entegre halde bulunan türbülans modellerinden olan bununla birlikte, literatürde en çok tercih edilen yöntemlerden biri olan, iki denklemlili ($k - \epsilon$) türbülans modeli tercih edilmiştir. 7 mesh bloğu tanımlanarak ortalama taşkın derinlikleri ölçülmüştür. Analizlerden edilen sonuçlar incelendiğinde; Tahtalı Barajı’nın tamamen yıkılması senaryosunda, taşkın sahildeki yerleşim alanlarına 2-3 dk içinde ulaşacağı, dolayısıyla bu durumda önlem almaya zaman bulunmadığı görülmektedir. Barajın %50 seviyesinde yıkılması durumunda taşkın 4 - 5 dk içerisinde yerleşim yerlerine ulaşacağı, ancak sahildeki insanlara nazaran, su derinliği açısından yerleşim yerindeki binaların, güvenli mekanlar olduğu sonucu ortaya çıkmıştır. %25 seviyesinde yıkılma durumunda ise dışarda olan insanların dengesinin bozulma ihtimali çok düşük olup yerleşim yerindeki insanların hiçbir şekilde tehlikede olmadığı sonucuna varılmıştır. Tahtalı Barajı ve benzer barajlar için %100 yıkılma durumunda insanlara zaman kazandırarak, can ve mal kayıplarının önüne geçebilmek için baraj mansabına taşkın şiddetini azaltıcı bir set yapılması tavsiye edilmiştir. Ayrıca gövdede meydana gelebilecek, başlangıçta küçük olan kusurlara müdahale edilerek, yıkımın geciktirilmesi ya da engellenmesinin önem arz ettiği vurgulanmıştır.

Yıldız ve Martı (2015), çalışmalarında; su tahliye kapısının etrafındaki akış ve sonrasında oluşan akım özelliklerine ait verileri elde ederek incelemek amacıyla laboratuvar da fiziksel deneyler yapmışlardır. Laboratuvar da; 4 m uzunluğunda, 0.08 m genişliğinde, 0.20 m yüksekliğinde ve 0.0001 eğime sahip plastikten yapılmış basit bir açık kanal hazırlamışlardır. Hazırlanan bu deney düzeneğiyle; akımın serbest yüzey profili, hidrolik sıçramanın yeri ve şekli ile birlikte daralma nedeniyle oluşan değişimler incelenmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlar Flow 3D yazılımında yapılan sayısal modellerle karşılaştırılmıştır. Sayısal model sonuçlarından; hidrolik sıçrama konumunu tespit etme açısından %92.5, serbest yüzey profillerinin benzerliği açısından ise %87 oranında bir uyum tespit edilmiştir. Sonuç olarak fiziksel ve sayısal model sonuçlarının birine benzer olduğu görülmüştür. Yine bununla birlikte RANS denklemlerini kullanan

Flow 3D yazılımının, bir su tahliye kapısından geçen akışı simüle etmek için yeterince gelişmiş olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Azimi vd. (2018), çalışmalarında; Fransa'da bulunan Malpasset Barajı'nın aşırı yağışlar nedeniyle, 1965 yılında beton yapısının bozulması sonucu yıkılmasını, Flow 3D yazılımında modellemişlerdir. Çalışmada baraj rezervuarının aşırı yağışlar ile dolmasının etkisiyle baraj gövdesi çöktüğü için, dalgalardan kaynaklanan kuvvetler başlangıç koşulu olarak belirlenmiştir. Modelde tasarlanan çözüm ağlarındaki tüm katı sınırlar duvar (W) sınır koşulu ve sürtünmesiz olarak tanımlanmıştır. Bu nedenle, duvar sınırlarına pürüzlülük uygulanmamıştır. Akış alanının üst yüzeyi, simetri (S) sınır koşulu, Malpasset Barajı'nın aşağı akışında ise çıkış sınır koşulu uygulanmıştır. Modelin hassasiyeti düşünülerek, modelin tamamında dikdörtgen elemanlardan oluşan homojen meshler kullanılmıştır. Çözüm hücresi sayısı artırıldıkça, maksimum seviyede meydana gelen hatalı sonuçlar önemli ölçüde azaltılmıştır. Akış alanının türbülansını simüle etmek için iki denklemlili (k- ϵ) türbülans modeli ve RNG k- ϵ türbülans modeli kullanılmıştır. Ayrıca, akışa ait serbest su yüzeyi profilleri, VOF yöntemi kullanarak temsil edilmiştir. Sayısal modelden elde edilen sonuçların, Electricité de France kurumu tarafından hazırlanan fiziksel modelle uyum içinde olduğu ve RNG türbülans modelinin maksimum su yüksekliği için daha kesin sonuçlar verdiği sonucuna varılmıştır.

Dal (2018), gerçekleştirmiş olduğu çalışmada; eğimli bir kanalda ardışık baraj yıkılma problemini, fiziksel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deney ölçümleri sonucu elde edilen veriler, Flow 3D ve DualSPHysics olmak üzere iki farklı yazılımda ele alınmıştır. SPH (Smoothed Particele Hydrodynamics) yönteminin uygulaması için DualSPHysics isimli yazılım kullanılmıştır. DualSPHysics programı, baraj yıkılmaları ve taşkın dalgaları gibi serbest yüzeyli akım problemlerinde, Lagrange ve Euler yaklaşımlarının uygulanmasının zorluğu nedeniyle geliştirilen, SPH yöntemine dayanan bir yazılımdır. Flow 3D yazılımından farklı olarak analiz alanı, çözüm ağlarına (mesh) ayrılarak değil de çözüm bölgesindeki akışkan ve parçacıklar cidarlarla temsil edilmektedir. Yakın parçacıkların birbirlerine olan etkileri, aralarındaki mesafeye bağlıdır. Buna bağlı olarak, parçacıklar, etkileşim mesafesi içerisinde kalan dairesel alanda diğer parçacıklarla etkileşim halindedir. Parçacıklar arası mesafelerin ve yapay viskozite değerlerindeki değişimlerin, SPH yönteminde ulaşılan sonuçlar üzerindeki etkisinin, yüksek olduğu görülmektedir. Özellikle parçacıklar arası mesafenin azalması ile SPH yönteminden elde edilen sonuçların deney sonuçları ile uyumunun arttığı tespit edilmiştir. Bu duruma göre SPH yönteminde tanımlanan parçacık sayısının artmasıyla, akım hareketinin sayısal ortamda temsilinin daha doğru şekilde yapılabildiği sonucuna ulaşılmıştır. Çalışmanın

diğer aşamasında, FLOW-3D yazılımında oluşturulan sayısal modelde pürüzlülük hesaba katılmamıştır. Sınır koşulları olarak basınç (P), duvar (W) ve çıkan akım (O) sınır koşulları tanımlanmıştır. Su yüzeyi profilleri belirlenirken VOF yöntemine bağlı olarak sabit atmosfer basıncı ve sıfır kayma gerilmesi tanımlanmıştır. Üç türbülans modeliyle yapılan analizde; $k-\omega$ modelinin deney sonuçları ile en uyumsuz, RNG modeli ve $k-\epsilon$ modelinin ise deney sonuçlarına uyumlu olarak, birbirine yakın sonuçlar verdiği görüldüğünden, çalışmada $k-\epsilon$ modelinden elde edilen veriler kullanılmıştır. Deney ve sayısal analiz sonuçları incelendiğinde SPH yönteminden elde edilen verilerin FLOW-3D yazılımına kıyasla daha uyumsuz olduğu sonucuna varılmıştır. Bu duruma, SPH yönteminin temeli olan “akışkanın parçacık ile temsil edilmesi” kavramının neden olduğu düşünülmektedir. Deneyin birçok değişken içeren bir test ortamı meydana getirmesi nedeniyle parçacıkların çok büyük hızlarda birbirlerine ve yanal yüzeylere çarparak birbirlerinden uzak ve ilgisiz noktalara yayıldığı görülmüştür. SPH sonuçlarının, deneysel veriler ile uyumsuz olmasının bu duruma bağlı olduğu vurgulanmıştır.

Aajami (2019), çalışmasında; İzmir ilinde yer alan Süleymanlı Barajı’nın olası borulanma şeklinde gedik oluşumu sonucu yıkılması, Plaxis 2D ve Flow 3D programları ile incelenmiştir. Plaxis 2D ile gediğin gövdedeki konum ve eğim özelliklerine göre, 9 farklı senaryoda oluşan deformasyonlar modellenmiştir. Plaxis 2D programından alınan sonuçlara göre, akım ve gövde dolgu malzemesinin sürüklenmesinin modellenmesi, Flow 3D programında tüm senaryolar için çözümlenmiştir. Analiz sonuçlarında göre yıkım anındaki kret kotunun, rezervuar su kotu altına düşmesinden sonra, borulanmadan ziyade üstten aşmanın etkin olduğu dikkati çeken bir husus olarak tespit edilmiştir. Bununla birlikte, elde edilen sonuçlar incelendiğinde; çatlağın gövdenin alt kısmında, kil çekirdeğin ortasında ve çatlak eğiminin de akış yönünde aşağı doğru olması durumunda en büyük deformasyonların olduğu öğrenilmiştir.

Vargas vd. (2019), çalışmalarında; Kolombiya, La Dorada’da Magdalena Nehri’nde taşkın sonucu erozyondan etkilenen kıvrımlı kanal kıyılarının, maruz kaldığı akış dinamiklerinin, karşılaştırmalı analizleri HEC-RAS, IBER ve Flow 3D yazılımları kullanılarak incelenmiştir. Nehir kesiminin dijital yükseklik modeli önceki çalışmalardan elde edilen saha verilerinden üretilmiştir. Üç hidrolik model, 1B, 2B ve 3B çözümleme yöntemleri dikkate alınarak hazırlanmış ve sonuçların karşılaştırılması amacıyla simülasyonlar tasarlanmıştır. HEC-RAS programında 5 m aralıklarla 1416 kesit işaretlenmiştir. IBER yazılımında 5 m kenarlı üçgen ve kare elemanlardan oluşan 86,927 elemandan oluşan düzensiz bir ağ tanımlanmıştır. Flow 3D yazılımında 5 m x 5 m x 5 m ölçülerinde 2,560,806,00 kübik hücreden oluşan 4 çözüm ağı bloğu oluşturulmuştur. $k-\epsilon$

türbülans modelinin kullanıldığı IBER programında analiz süresi 32,000 saniye, RNG türbülans modelinin kullanıldığı Flow 3D programında analiz süresi 13,000 saniye sürmüştür. Çalışma sonucuna göre, hassaslık konusunda, Flow 3D modelinin üstün performansı açıkça görülmüştür. Basitlik, hız ve düşük hesaplama maliyeti ile öne çıkan 1B modellemenin, karmaşık etkileşimlerin yatay ve dikey yönlerde meydana geldiği kıvrımlı nehirlerde, hidrodinamik süreci tümüyle temsil edemediği sonucuna varılmıştır. IBER modeli ise kanal boyunca hızı daha küçük olarak çözümlemiş, su seviyesini ise Flow 3D ve HEC-RAS modellerine göre 2 m ilâ 4 m arasında yüksek tahmin ederek önemli bir farklılık oluşturmuştur. Bu hız tahmininin yanlış olduğu (Ramos, 2015) çalışmasında kanıtlanmıştır. Yapılan karşılaştırmalarda, 3B akış karakteristiklerini kapsamlı bir şekilde modelleyen ve bölgede meydana gelen erozyon süreçlerini temsil kabiliyetine sahip tek yazılımın, Flow 3D olduğu açıkça ortaya çıkarılmıştır. Bu ve benzer çalışmalarda 3B çözümlerlerin gerekliliği vurgulanmıştır.

Arkaş (2020), yapmış olduğu çalışmada; İzmir ili Seferihisar İlçesi Ürkmez Deresi üzerinde bulunan, toprak dolgu gövdeli olarak inşa edilen Ürkmez Barajı'nın, olası yıkılması durumunda meydana gelecek taşkın yayılımı deneysel ve sayısal modellemeler oluşturularak incelenmiştir. Deneysel çalışmada su derinlikleri ve hızları ölçüm cihazlarıyla ölçülürken taşkın yayılımı da kamera vasıtasıyla kaydedilmiştir. Sayısal modellemeler; ani yıkılma, trapez ve üçgen gedik oluşumları senaryolarına göre, Flow 3D programında entegre şekilde yer alan RNG, LES ve k-ε türbülans modelleri ayrı ayrı seçilerek gerçekleştirilmiştir. Ağ boyutu tasarlanırken, önemli konulardan biri olan topoğrafyaya uygunluk hususuna dikkat edilmemesi ve gereğinden büyük çözüm ağı seçilmesi durumunda hesaplamada sorunlar meydana geldiği görülmüştür. Ayrıca çözüm ağı boyutlarının fazla küçük olması durumunda ise analiz süresinin uzadığı tecrübe edildiğinden çalışmada mümkün olan en küçük (optimum) mesh boyutu seçilmiştir. Ayrıca en-boy oranı x:y:z, 3:3:1'den büyük oranlardaki çözümlerde sorunlar yaşandığından hücre boyutları 3 cm, 3 cm ve 1 cm olarak seçilmiştir. Analiz süresini hızlandırmak için 25 m/s'den daha büyük hızların dikkate alınmadığı bir filtreleme uygulanmıştır. Sonuç olarak maksimum su derinlikleri göz önüne alınarak yapılan karşılaştırmada, RNG türbülans modelinin, deney sonuçlarına kıyasla en uyumlu sonuçları verdiği tespit edilmiştir. Ani yıkılma durumunda, maksimum derinliğe ulaşılma süresi en kısa olup, bu süreyi artan şekilde üçgen ve trapez gedik oluşumları izlemiştir. Fiziksel deneyler sırasında kaydedilen baraja en yakın bölgedeki maksimum akım derinlikleri ile Flow 3D modeliyle hesaplanan derinlik değerleri arasındaki farkların kabul edilebilir seviye olduğu belirtilmiştir.

Ferdowsi vd. (2021), çalışmalarında; etkili bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği programı olan Flow 3D yazılımını kullanarak, 6 farklı geometride rezervuara sahip baraj yıkılmasının neden olduğu kararsız akımı incelemişlerdir. Çalışmada, asimetrik rezervuara sahip, İran'da yer alan Mahabad Barajı ve Fransa'da yer alan Tignes Barajı, 30 derece ve 45 derece açılı simetrik trapezoidal şeklindeki iki rezervuar, dikdörtgen şekle sahip bir rezervuar ve Flow 3D analizlerini doğrulamak için düzenlenmiş uzun bir rezervuar ayrı ayrı analiz edilmiştir. Simülasyona başlamadan önce, HAD analizinden en gerçekçi sonuçları elde etmek için çeşitli mesh boyutları ve türbülans modelleri optimize edilmiştir. Laboratuvar hassasiyet analizi sonuçları, 30 mm boyutlarındaki küp hücrelerin ve k-ε türbülans modelinin en uygun seçim olduğunu göstermiştir. Sayısal modelde, suyun giriş ve çıkışını engelleyen duvar (W) sınır koşulu, iç ve dış tarafı tamamen aynı kabul eden simetri (S) sınır koşulları çözüm ağı sınırlarına tanımlanmıştır. Çalışma sonucuna göre rezervuar şeklinin taşkın hız ve derinlikleri üzerinde etkisinin olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca performans ölçütlerine göre Flow 3D yazılımının, deneysel koşulları FLUENT yazılımından daha iyi simüle edebilmiş olduğu sonucuna varılmıştır.

Karam vd. (2021), gerçekleştirmiş oldukları çalışmada; Pakistan'da, Hunza Nehri'ni tıkayan doğal bir toprak kayması felaketi sonucu oluşan Attabad Gölü'nü oluşturan heyelan barajının olası yıkılmasına dair bir simülasyon oluşturulmuştur. Doğal bir etkiyle oluşan heyelan barajları, nispeten dolgu barajlarla benzer özellikler göstermekte olup herhangi bir felakete karşı uygun şekilde tasarlanmamış olmaları ve bileşimlerindeki belirsizlik nedeniyle risk analizlerinin yapılması öncelikli bir husustur. Taşkın nedeniyle barajın aniden kırılma riski azaltılmış olsa da, barajın potansiyel olarak yıkılmasına yol açabilecek başka mekanizmalar risk teşkil etmektedir. Attabad Gölü'nün jeofiziksel özelliklerine ve konumuna bağlı olarak, barajın depreme bağlı ya da başka bir nedenle meydana gelebilecek heyelan durumunda, üstten su aşmaya bağlı yıkılma senaryoları Flow 3D yazılımında incelenmiştir. Modellemede çalışma alanı 15 çözüm ağı bloğuna bölünmüş ve RNG türbülans modeli kullanılmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre, gölün mansabında yer alan köylerin çeşitli kesimlerinde en yüksek taşkın derinliğinin 15 m ve 92 m, en yüksek akım hızının ise 21 m/s ve 44 m/s arasında değişkenlik gösterdiği tespit edilmiştir. Olası taşkının varış süresinin, Ahmed Abad ve Nomal gibi köylerde sırasıyla 5 dk ila 68 dk arasında değişmekte olduğu görülmüş olup taşkın alanında yer alan bölgelerde tarım arazilerinin, konutların, ticarethanelerin ve bölge halkının ciddi tehlike altında olduğu sonucuna varılmıştır.

Özmen Cağatay vd. (2022), yapmış oldukları çalışmada; kuru zemin koşulları altında dikdörtgen ve yatay bir kanalda baraj yıkılması sonrası farklı yoğunluklara sahip

Newtonian sıvıların (normal su, ayçiçeği yağı ve tuzlu su) akış üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deney sonuçları, VOF ve 3B RANS tabanlı model programı Flow 3D ile sayısal olarak simüle edilerek karşılaştırılmıştır. Laboratuvarında hazırlanan deneyde bir haznedeki kapının, aniden serbest bırakılması ile fiziksel bir baraj yıkılma modeli tasarlanmıştır. Yüksek hızlı bir kamera vasıtasıyla anlık serbest yüzey profilleri kaydedilmiştir. Farklı yoğunluk ve viskozite özelliklerine sahip sıvıların başlangıçta benzer davranışlar gösterdiği ancak akış ilerledikçe, türbülans ve sürtünme kuvvetleri nedeniyle farklılıkların ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Ayrıca deneysel verilerin, sayısal simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmasıyla, zamanlama ve seçilen ölçüm noktaları ekseninde, Flow 3D programının oldukça uyumlu sonuçlar gösterdiği tespit edilmiştir.

Oğuzhan Güven (2022), çalışmasında; İzmir ilinde bulunan Ürkmez Barajı'nın ani ve kısmi olarak yıkılması durumunda mansap bölgesinde yer alan bitki örtüsünden kaynaklı pürüzlülüğün, taşkın dalgası yayılımı üzerindeki etkisi, deneysel ve sayısal yöntemlerle araştırılmıştır. Deneyler, gövde ve mansap bölgesini içerecek şekilde gerçekleştirilmiş olup mansap bölgesinin bitki örtüsü de fiziksel modelde oluşturulmuştur. Çalışma alanı benzer şekilde sayısal olarak da Flow 3D programında modellenmiş ve deneylerden elde edilen veriler, sınır koşulları olarak kullanılmıştır. Birbirinden farklı türbülans modelleri kullanılarak elde edilen sonuçlar, deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen çıkış hidrografları, sayısal modelde başlangıç koşulu olarak tanımlanmıştır. Ancak sayısal model sonuçları ile deney sonuçları arasında uyumlu sonuçlar ortaya çıkmadığı görülmüştür. Bu nedenle başlangıç koşulu olarak baraj gölü topoğrafyası girildiğinde sayısal model sonuçlarının deneysel verilerle iyi bir uyum sağladığı gözlemlenmiştir. Deneyler baraj gövdesinin ani ve kısmi yıkılmasının yanı sıra, üçgen ve trapez gedik oluşum durumları da dikkate alınarak, farklı senaryolar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre, bitki örtüsünün olası taşkın yerleşim yerlerine ulaşma süresini geciktirdiği tespit edilmiştir. Ayrıca çalışmada baraj yıkılmasında oluşacak muhtemel taşkın, taşkın yayılım haritaları elde edilmiş ve önlem planlarına vurgu yapılmıştır.

Akgün (2023), çalışmasında; Iğdır ilinde yapılması planlanan Tuzluca Barajı'nın, olası yıkılması sayısal olarak proje bilgileri üzerinden modellenmiştir. Flow 3D yazılımında, 2B (SWE) ve 3B (RANS) yöntemleriyle, üstten aşma ve borulanma olmak üzere iki farklı yıkılma senaryosu modellenmiştir. Ayrıca farklı gedik parametreleri ve yıkılma süreleri tanımlanarak 3 farklı senaryo üzerinden çözümlemeler gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan 3 farklı senaryo 2B ve 3B çözüm yöntemlerine göre toplam 6 farklı analiz gerçekleştirilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. 2B ve 3B analizlerde

RNG k-ε türbülans modeli seçilmiştir. 2B çözümleme için 606,248 adet, 3B çözümleme için ise 14,823,728 çözüm ağı hücresi analizler öncesinde oluşturulmuştur. Analizler sonucunda mansapta yer alan Halimcan ve Sürmeli köylerinin taşkından etkilendiği tespit edilmiştir. Halimcan köyünde, 2B analiz sonucuna göre 11.26 m, 3B analiz sonucuna göre 9.90 m, Sürmeli köyünde ise 2B analiz sonucuna göre 9.61 m, 3B analiz sonucuna göre 8.90 m en yüksek su derinliklerinin meydana geldiği tespit edilmiştir. Baraj aksında meydana gelen en yüksek debi; 2B analiz sonucuna göre 67,323 m³/sn, 3B analiz sonucuna göre ise 69,446 m³/sn olarak ölçülmüştür. 2B ve 3B analizler arasında oluşan su derinliği ve debilerin çalışmanın alanının genelinde birbirine yakın sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Ancak 3B analiz süresinin 2B analiz süresine göre yaklaşık 20 kat uzun olduğu bu nedenle, geniş alanlarda incelenen baraj yıkılma araştırmalarının 2B analizlerle gerçekleştirilebileceği, yüksek hassasiyet gerektiren çalışmalarda ise 3B analiz yöntemlerinin kullanılması tavsiye edilmiştir. Sayısal modelin doğrulanmasına yönelik olarak, başka bir çalışmada hazırlanmış olan yıkılma deneyinden faydalanılmıştır. Deney düzeneği, Flow 3D yazılımında aynı özelliklerle sayısallaştırılarak, simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Hem 2B hem de 3B sayısal simülasyonların, deney sonuçlarıyla uyumlu olduğu görülmüştür. Çalışma kapsamında, taşkından etkilenen yerleşim yerlerinde meydana gelebilecek can kaybı hesabı da her senaryo için ayrı ayrı yapılmıştır. Buna göre üç senaryo için tahmini can kaybı sayıları sırasıyla 201, 227 ve 191 kişi olarak hesaplanmıştır. Çalışma sonuçlarına göre taşkın etkisini azaltmaya yönelik; ağaçlandırmaların yapılması, bölge halkının bilgilendirilerek acil müdahale ve alternatif yol güzergahlarıyla tahliye planlamalarının oluşturulması, gerekli kısımlara taşkın önleyici sanat yapılarının inşa edilmesi tavsiye edilmiştir.

2.4. Havadan Ölçümle Yapılan Modelleme ve Analizler

Abidin (2015), hazırlamış olduğu çalışmada; Malezya’da yer alan Klang Gate Barajı’nın olası yıkılması sonucu meydana gelecek taşkın sonucu oluşacak en büyük su derinliği, pik debi ve taşkın varış süreleri incelenmiştir. Baraj bölgesi ve muhtemel taşkın yayılım alanı İHA ile havadan ölçülerek 1 m dikey hassasiyette sayısal yükseklik modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan SYM üzerinden hidrolik simülasyonlar, en yıkıcı taşkın senaryosuna göre HEC-RAS programında modellenmiştir. Çalışma sonucunda pik debi 21,273.00 m³/s ve olası en yüksek hızın 12 m/s olduğu sonucuna varılmıştır. Barajın olası çökmesi durumunda meydana gelecek taşkın analizlerinde topografyanın temsilindeki hassasiyetin önemli olması nedeniyle, sayısal yükseklik modelleri oluşturulurken, havadan lazer ya da radyo dalgası ile yapılan ölçümlerin kullanılması tavsiye edilmiştir.

Yusof vd. (2015), yapmış oldukları çalışmada; Durian Tunggal Barajı'nın olası yıkılması durumunda taşkın su derinliği, taşkın hızı ve taşkın yayılım alanı araştırılmıştır. Çalışma alanı yüksek çözünürlüklü olarak LIDAR teknolojisiyle taranmış 3 m hassasiyete sahip sayısal arazi modeli (SAM) hazırlanmıştır. Taşkın yayılımı CCHE2D_FLOOD yazılımında modellenmiş olup giriş sınır koşulu olarak taşkın hidrografi kullanılmıştır. Analiz sonuçlarına göre taşkın hızı 7.70 m/s ve taşkın yayılım alanı 48 km² olarak belirlenmiş olup yerleşim bölgesinin de potansiyel riskli bölge içerisinde yer aldığı tespit edilmiştir.

Çelik (2017), çalışmasında; Artvin İli, Borçka İlçesi sınırları içerisinde yer alan Balcı Deresi Havzasında, taşkınlara yönelik çalışmalarda kullanılmak üzere, yeni ve etkin bir teknoloji olan havadan ölçüm tekniğinin performans analizleri yapılmıştır. Çalışmada havadan ölçüm tekniğinden elde edilen sayısal arazi modeli (SAM); Harita Genel Komutanlığından temin edilen bölgeye ait 1/25,000 ölçekli haritalar üzerindeki 10 m aralıklı eş yükselti eğrilerinden üretilen Sayısal Arazi Yükseklik Verisi (Digital Terrain Elevation Data) ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca 17 m hassasiyetli SAM ise United States Geological Survey (USGS)'den tedarik edilerek karşılaştırmalar yapılmıştır. Edinilen bu veriler, benzer bir havzada DSI tarafından yapılan bir çalışma sonucu elde edilen veriler ile karşılaştırıldığında en yakın değerleri, havadan ölçüm verilerinin sağladığı belirlenmiştir. Balcı Deresi Havzası ile drenaj alanı büyüklüğü olarak oldukça benzer olan Kılıçlı Gölet'i Havzası'nda 18.8 m³/sn olarak ölçülen taşkın debisi değerinin, Balcı Deresi Havzası alan faktörlerine uyarlanmasıyla, 18.75 m³/sn büyüklüğündeki taşkın debisi elde edilmiştir. Taşkın debisine en yakın değer; 17.85 m³/sn değerini veren, çözünürlüğü en yüksek olan ve arazi ayrıntılarını en iyi yansıtan, havadan ölçüm verisinden elde edilmiştir. Havadan ölçüm verisi %4.80 gibi çok yakın bir fark oluştururken; DTED 2 verisi 22.72 m³/sn ile %21, ASTER verisinin ise 24.34 m³/sn ile %29.80 oranında farklı değerler verdiği görülmüştür. Sonuç olarak hidrolik modellerde kullanılan SAM verilerindeki hassasiyet azaldıkça, taşkın pik debisi değerlerinin referans değerden uzaklaştığı ve abartılı sonuçların ortaya çıktığı tespit edilmiştir.

Arseni vd. (2020), çalışmalarında; Romanya'da Tuna Nehri'nin önemli bir kolu olan ve son 50 yılda 20'den fazla taşkın yaşandığı Siret Nehri'nin taşkın yayılım analizi modellenmiştir. Çalışma alanının sayısal arazi modeli (SAM), ölçüm özelliğine sahip bir İHA vasıtasıyla elde edilen nokta bulutundan oluşturulmuştur. Oluşturulan SAM, yatayda 1 cm - 10 cm ve dikeyde 5 cm - 10 cm hassasiyetinde elde edilebilmiştir. Sağlanan hassasiyetin, HEC-RAS'taki hidrolik modelleme ve simülasyonların, doğru sonuç kabiliyetini %90 oranında olumlu yönde etkilediği görülmüştür. Analiz sonuçlarına göre,

100 yıl tekerrürlü taşkın senaryosunda yaklaşık 9,500 kişinin, orta derecede sel riskine karşı savunmasız olduğu ortaya çıkmıştır. Ayrıca, bu tür bir sel felaketinde yaklaşık 19.50 km yol altyapısı, 16.50 km demiryolu, kültürel miras ve çevresel alanların etkilendiği sonucuna varılmıştır.

Li vd. (2021), çalışmalarında; küçük bir dağlık bölge ve büyük bir kentsel bölgede İHA kullanarak, havadan ölçümler yapmış, her iki alanın sayısal yükseklik modellerini (SYM) oluşturmuşlardır. Küçük alan için 5 saat ve büyük alan için 2 gün süren ölçümler sonucu 1 metre çözünürlüğe sahip bir sayısal yükseklik modeli (SYM) elde edilmiştir. Elde edilen sayısal yükseklik modeli üzerinden, toplam 4,177,992 kare mesh ünitesini içeren ve sığ su denklemlerini kullanan 2B taşkın yayılım analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan hidrodinamik analiz sonuçları, taşkın hızının ve su derinliğinin mikro düzeydeki arazi özelliklerinden etkilendiğini göstermiştir. Böylelikle havadan radyo dalgaları ya da lazer teknolojisiyle yapılan hassas ölçümlerin, dağlık alan ya da kentsel alanlarda verimli ve güvenilir olduğu görülmüştür. Ayrıca havadan ölçüm tekniğinin hassaslığının, doğruluğu beklenen hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizlerinde oldukça önemli bir etkiye sahip olduğu vurgulanmıştır.

Lima vd. (2021), yapmış oldukları çalışmada; 25 Ocak 2019 tarihinde Brezilya'da özel bir şirkete ait bir barajın yıkılmasından elde edilen taşkın haritaları ile simülasyon çalışmaları sonucu elde edilen haritalar arasındaki benzerlik ve uyum derecesi değerlendirilmiştir. Baraj yıkılması sonucu, taşkından etkilenen bölgelerden toplanan gerçek veriler ile, simülasyonlardan elde edilen sayısal verilerin kıyaslanması açısından, çalışmanın eşsiz bir fırsat olduğu düşünülmüştür. Çalışmada üç farklı yöntemle topoğrafyayı temsilen sayısal arazi modelleri (SAM) elde edilmiştir. Birinci modelde çalışma alanının havadan ölçüm yoluyla, ikinci modelde 12.50 m hassasiyete sahip olan Alaska Uydu Tesisi Gelişmiş Arazi Gözlem Uydusu (ALOS_ASF) ile ilişkilendirilmiş SAM kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Üçüncü modelde ise SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) verileri ve 2000 yılında Endeavour uzay mekiği görevi sırasında toplanan InSAR (Sentetik Açıklıklı Radarın İnterferometrisi) verilerine dayanan 30 m çözünürlüğündeki SAM modeli kullanılmıştır. Oluşturulan SAM modelleri üzerinden, baraj yıkılma ve taşkın yayılım analizleri HEC-RAS yazılımında gerçekleştirilerek taşkın yayılım haritaları elde edilmiştir. Simülasyon sonuçlarının karşılaştırılmasıyla, havadan yapılan ölçümler sonucu elde edilen SAM verilerinin gerçeğe en yakın sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Uydu ya da farklı kaynaklardan elde edilen modellerin, hassasiyeti düşük olduğundan, taşkın analizleri üzerindeki oluşturduğu belirsizlikler oldukça fazla olduğu görülmüştür. Bu nedenle, benzer yöntemlerle elde edilen hassas olmayan veriler, birçok

faydalı amaç için değerli olsalar da baraj yıkılması sonucu taşkın yayılım tahminlerinde kullanılmaması gerektiği vurgulanmıştır. Ayrıca bu tür çalışmalarda etkilenen bölgelerin, taşkın alanı sınırları dışında bırakılma riski de bulunduğundan, olası baraj yıkılma çalışmalarında havadan hassas ölçüm yapan teknolojilerin kullanılması önerilmiştir.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

Baraj yıkılması sonucu meydana gelen taşkınların incelenmesinde, literatürde yer alan çalışmalarda en çok vurgu yapılan konu, çalışma bölgesinin hassas ve doğru bir şekilde temsil edilebilmesinin önemidir. Dolayısıyla sayısal arazi modellerinin doğru olarak elde edilemediği bir çalışma alanından, doğru analiz sonuçlarının elde edilmesi mümkün olmamaktadır. Yapılan çalışmalarda yanıltıcı sonuçların ortaya çıkması ile taşkın riski altında bulunan alanların, risksiz bölgede bırakılması olasılığı, göz ardı edilemeyecek kadar önemli bir husustur. Bu nedenle çalışmada arazinin mümkün olduğunca hassas bir şekilde temsil edilmesi hususuna oldukça önem verilmiştir. Bu amaçla çalışmada, taşkın riski bulunan bölgelerin sayısal arazi modelleri, en hassas ölçüm yöntemlerinden biri olarak kabul edilen havadan ölçüm teknolojisi yardımıyla elde edilmiştir.

Diğer taraftan, Erzincan DSİ 82. Şube Müdürlüğünde hazır bulunan, Erzincan Barajı gövde özellikleri, projeler ve baraj rezervuarına ait bilgiler kullanılarak, literatürde kabul görmüş olan ampirik yaklaşımlar yardımıyla, gedik oluşum parametreleri HEC-RAS yazılımında sentezlenerek, barajın yıkılma anında oluşan taşkın hidrografi elde edilmiştir.

Farklı yaklaşımlar arasından, barajın yıkılmasına neden olan en olumsuz gedik geometrisi seçilerek elde edilen, baraj aksında oluşan taşkın hidrografi; baraj rezervuarından mansaba doğru olan akışı temsil edecek şekilde Flow 3D yazılımında başlangıç sınır koşulu olarak atanmıştır. Havadan ölçüm çalışmaları sonucu elde edilen, taşkının üzerinden yayılacağı alan üzerinde topografyanın katı cisim modelleri de oluşturularak, 2B (SWE) ve 3B (RANS) analizlerin gerçekleştirilebilmesi için Flow 3D yazılımına eklenmiştir.

Taşkın yayılımının sayısal olarak gerçekleştirilebilmesi için oluşturulan sayısal modelin tamamlanmasının ardından; literatürde en fazla tavsiye edilen, hassas sonuçların elde edilebilmesini sağlayan türbülans modeli, çözüm ağı boyutları, çözüm ağı sınır koşulları ve serbest yüzey sınır koşulları belirlenerek, aynı koşullarda 2B ve 3B analizler gerçekleştirilmiştir.

Tarihte gerçekleşen baraj yıkılma olayları, büyük çoğunlukla hazırlıksız ve aniden meydana geldiğinden sınırlı sayıda gerçek vaka verisi kayıt altına alınabilmektedir (Vasquez ve Roncal, 2009). Bu nedenle baraj yıkılmaları sonucu düzensiz ve karmaşık bir topografyada meydana gelen taşkın problemlerini anlayabilmek için laboratuvar ve

sayısal modelleme çalışmaları yapılmış olup bu çalışmalar sürekli olarak geliştirilmeye devam etmektedir. Karmaşık topoğrafyalar üzerindeki baraj gediği akışlarının araştırılması; sayısal analizler yoluyla gerçekleştirilebilirken, farklı yöntemlerle elde edilen sayısal çözümler, deneysel verilerle kıyaslanarak doğrulanabilmektedir. Literatürde yer alan çalışmaların büyük çoğunluğu, baraj yıkılmasına bağlı taşkınları, Saint-Venant denklemleri (sığ su denklemleri – SWEs) aracılığıyla, 1 boyutlu ve 2 boyutlu olarak simüle etmiştir. Buna karşın 3 boyutlu, Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemleri, türbülans modellerini içeren, karmaşık topoğrafya üzerindeki baraj yıkılması taşkın yayılımını daha doğru bir şekilde temsil edebilmektedir. (Kocaman, Güzel, Evangelista, Özmen Çağatay ve Viccione, 2020).

Bu çalışmada ise, baraj yıkılmasına bağlı taşkın yayılım analizlerini, seçenek olarak sığ su ve RANS denklemleri ile çözümleme imkânı sağlayan, Flow 3D hesaplamalı akışkanlar dinamiği paket programı kullanılmıştır.

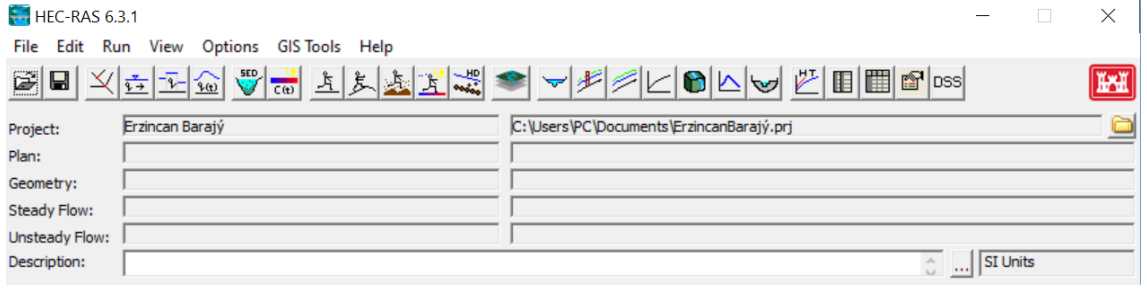
3.1. Çalışmada Kullanılan Hidrolik Yazılımlar ve Çözümleme Yöntemi

Çalışma kapsamında yapılan hidrolik simülasyonlarda, su yapılarının tasarımında ve taşkın yayılım analizleri gibi alanlarda yaygın olarak kullanılan HEC-RAS ve Flow 3D yazılımları kullanılmıştır.

3.1.1. HEC-RAS Yazılımı

Amerika Birleşik Devletleri Ordusu tarafından ilk olarak 1995 yılında geliştirilmiş olan HEC-RAS (Hydrologic Engineering Centre and River Analysis System) programı zaman içerisinde geliştirilip, güncellenerek ücretsiz olarak hizmete sunulmuştur. Bu yazılım, su yüzü profillerinin tespit edilebildiği, 1 ve 2 boyutlu hidrolik modellemeler yapılabilen bir yazılımdır. HEC-RAS yazılımında, incelenecek bölgenin topoğrafik bilgileri, topoğrafik yapı üzerindeki pürüzlülük değerleri ve birim zamanda meydana gelen su hacmi verilerine bağlı olarak, taşkın ötelemesi 1 ve 2 boyutlu olarak analiz edilebilmektedir. Ayrıca olası baraj yıkılmalarında, meydana gelen gedik oluşumuna bağlı olarak, taşkın hidrografi hesaplanabildiği gibi, katı madde taşınımı ve su kalitesi modellemeleri de yapılabilir (Ergen, 2019; Şen, 2019; Usace, 2014, 2016).

HEC-RAS yazılımı, Şekil 9’da gösterildiği gibi detaylı olmasına nazaran kolay kullanılabilir bir kullanıcı arayüzü sunmaktadır.



Şekil 9. HEC-RAS yazılımı kullanıcı ara yüzü

Su akışı ve hidrolik modelleme çalışmalarında, özellikle de akarsu taşkınlarının analizlerinde, Adhémar Jean Claude Barré de Saint-Venant tarafından 1871 yılında hazırlanan ve kendi adıyla anılan Saint-Venant denklemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. HEC-RAS yazılımında; Saint-Venant denklemleri, kütle korunumu ve momentum korunumu ilkelerine dayanan, süreklilik ve momentum denklemleri kullanılmaktadır.

(Eşitlik 26)'da görülen süreklilik denklemi, akışın sürekli olduğunu ve herhangi bir konumda (x), herhangi bir zamanda (t); kesit alanı (A) ile, kanal boyunca birim uzunluk için net yanal debi (q) (sızma, yağış vs.) ve debi (Q) arasındaki ilişkiyi ifade eder. Süreklilik denklemi, kütle korunumu ilkesine dayanmaktadır. Suyun bir yerden başka bir yere hareketinde veya akışın bir noktadan geçişi sırasında herhangi bir kaybın olmadığını varsayar.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} - q = 0 \quad (\text{Eşitlik 26})$$

(Eşitlik 27)'de gösterilen momentum denkleminde; akış hareketinin, momentum korunumu ilkesine dayalı olarak, matematiksel modeli elde edilmektedir. Bu denklem, suyun hızının, basınç değişimlerinin, yüzey sürtünmesinin ve dış kuvvetlerin (örneğin, yer çekimi) etkisi altında nasıl değiştiğini açıklar (Em, 2020; Kocaman, 2007; C. Yıldız, 2021).

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \left(\frac{\partial h}{\partial x} + S_f - S_0 \right) = 0 \quad (\text{Eşitlik 27})$$

Bu eşitlikte;

Q: Debiyi,

h: Akım derinliğini,

A: Kesit alanını,

g: Yerçekimi ivmesini,
 S_0 : Akarsu taban eğimini,
 S_f : Sürtünme kayıpları için enerji çizgisi eğimini,
x: Yatay koordinatı,
t: Zamanı ifade etmektedir.

Açık kanallardaki kararsız akımların çözümünde, St. Venant denklemleri, (Eşitlik 28)'de görüldüğü üzere; yerel ivme, konvektif ivme, basınç değişimi, yer çekimi ve sürtünme etkilerini hesaba katan farklı yaklaşımlarla kullanılabilir. Bu yaklaşımlardan kinematik dalga yaklaşımı, akışın hızı ve su yüzeyinin değişimine odaklandığından, yüzey dalgalanmalarının önemli olduğu çözümlemelerde kullanılır. Ataletsiz dalga yaklaşımı hem hız hem de su derinliği dalgalanmalarını içerir. Ağırlık dalgası yaklaşımı su akışının yer çekimi etkisi altındaki hareketini inceler. Ağırlık dalgası yaklaşımı denklemleri yer çekimi akışını ve sürtünme kaynaklı enerji kayıplarını dikkate alarak, uzun vadeli akışların modellenmesine yardımcı olur.

$$k_t \frac{\partial Q}{\partial t} + k_c \left(\frac{\partial(QV)}{\partial x} - V_x q \right) + k_p g A \frac{\partial y}{\partial x} - k_f g A (S_0 - S_f) = 0 \quad (\text{Eşitlik 28})$$

Bu eşitlikte;

Q: Debiyi,
y: Akım derinliğini,
A: Kesit alanını,
q: Kanal boyunca birim uzunluk için net yanal debiyi (sızma, yağış vs.),
g: Yer çekimi ivmesini
 V_x : Yanal akım hızının x bileşenini,
 S_0 : Kanal taban eğimini,
 S_f : Sürtünme kayıpları için enerji çizgisi eğimini,
x: Boyuna koordinatı,
t: Zamanı,
 k_t : Yerel ivme katsayısını,
 k_c : Taşınsal ivme (yanal akımın taşınsal ivmeye etki) katsayısını,
 k_p : Basınç değişimi katsayısını,
 k_f : Kanal taban eğimi katsayısını ifade etmektedir.

Momentum denkleminde yer alan “k” terimlerinin tamamının dikkate alınması ($k_t=k_c=k_p=k_f=1$) sonucu yapılan hesap yöntemi, Tam Saint-Venant (Tam Momentum) denklemi olarak adlandırılmaktadır. Tam Momentum denkleminde, yersel ivme ile konvektif ivmenin ihmal edildiği ($k_t=0, k_c=0, k_p=k_f=1$) ataletsiz dalga çözümüne ise difüzyon dalga denklemi adı verilmektedir (Kaya ve Aslı, 2012).

Hidrolik yöntemlerde süreklilik ve momentum denklemleri beraber kullanılmaktadır. HEC-RAS programında, taşkın hidrografının bir rezervuardan taşkın alanına ötelenmesi, bir boyutlu kararsız akım öteleme (Tam Saint-Venant eşitlikleri) ya da iki boyutlu kararsız akım öteleme (Tam Saint-Venant eşitlikleri veya difüzyon dalga denklemleri) kullanılabilmektedir. Hangi denklem setinin seçileceği, analiz yapılacak akış probleminin karmaşıklığına ve kullanılabilir kaynaklara bağlı olacaktır. Difüzyon Dalga denklem seti, birçok basit veya orta karmaşıklıkta uygulama için daha uygun bir seçenek olabilirken, daha karmaşık problemler için Tam Saint-Venant denklem setinin tercih edilmesi tavsiye edilmektedir. (Gündüzalp, 2020; Usace, 2014).

3.1.2. Flow 3D Yazılımı

Akışkanlar dinamiği problemlerinin çözümündeki temel amaç, akış içerisinde herhangi bir noktanın belli bir zamanda basınç, hız, kayma gerilmesi vb. gibi değerlerinin hesaplanmasıdır. Günümüzde, akışkan hareketini temsil etmek üzere tasarlanmış birçok ticari HAD yazılımı bulunmaktadır. Bu programlara Ansys Fluent & CFX, Flow-3D, OpenFOAM, Power Flow, SimScale, COMSOL Multiphysics, Autodesk CFD gibi örnekler verilebilir (Rajaa ve Kamel, 2020). Üç boyutlu analizler için oldukça yaygın olarak kullanılan Flow-3D, Flow Science Inc. tarafından tasarlanmış bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yazılımıdır.

Flow 3D yazılımı temel akışkan denklemlerini, geliştirilmiş sayısal teknikler ile çözümleyerek akışkanın üç boyutlu hareketini analiz edebilme kapasitesine sahiptir. Flow 3D yazılımı, akışkanların hareketini tanımlayan diferansiyel denklemler olan süreklilik ve Navier-Stokes denklemlerini (momentum denklemleri) üç boyutlu olarak çözebilmektedir. Su yüzü profillerinin belirlenmesinde, yazılıma entegre edilmiş VOF (Volume of Fluid) yöntemi kullanılmaktadır. Bunların dışında, sediment taşınımı, gözenekli ortam akışı, farklı fazlardaki akışkanların birbirleri ile etkileşimleri, ısı transferi ve difüzyon denklemlerinin çözümlemeleri de yazılım tarafından mümkün kılınmaktadır. Birçok araştırmacı, Flow-3D programı vasıtasıyla, taşkın yolu üzerindeki akış desenlerini en iyi şekilde simüle edebilme amacıyla çalışmalarda bulunmuştur. Bu sayısal çalışmalar sonucu elde edilmiş olan verilerin, fiziksel deneylere ait verilerle iyi bir uyum içerisinde

olduğu sonucuna varılmıştır (Erat, 2023; Flow Science Inc, 2008; Karaduman, 2018; Jalal ve Hassan, 2020).

3.1.2.1. Flow 3D Yazılımında Kullanılan Temel Eşitlikler

Flow 3D programı, yazılıma kodlanmış olan çeşitli denklem setleri aracılığıyla 2B ve 3B taşkın yayılım analizlerinin gerçekleştirilebilmesine imkan tanımaktadır. Yazılımda, 3B taşkın yayılım analizleri oldukça karmaşık ve kapsamlı olan Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemleri kullanılarak çözümlenmektedir. 2B taşkın yayılım analizleri ise Navier–Stokes denklemlerinin sadeleştirilmiş hali olan sığ su (shallow water) denklemleri kullanılarak gerçekleştirilmektedir.

3.1.2.2. İki Boyutlu Sığ Su (Shallow Water) Eşitlikleri

Denizler, büyük göller, nehir ağızları, büyük taşkınlar gibi akımın dikey yüksekliğinin, yatay genişliklere göre, çok daha küçük olduğu akışlar, sığ su akımı olarak tanımlanmaktadır.

Bu tanım esas alındığında; sığ akımlarda sıvının dikey ivmesi ihmal edilip, derinliğin de ortalama bir değer alınarak çözümleme yapılabileceği yaklaşımı ile üç boyutlu hareket denklemleri yatay düzlemde iki boyutlu sığ su denklemlerine indirgenmiştir. 3 boyutlu Navier-Stokes denklemlerine kıyasla pekçok eksikliği bulunan sığ su denklemleri, yine de çok büyük işlem gücü gerektiren baraj yıkılmaları, taşkın yayılımları, tsunami dalgaları gibi oldukça değişken akımların modellenmesinde sıklıkla kullanılmaktadır.

Sığ su modelinde, derinlik ortalamasının, üç boyutlu dikey momentum denklemi üzerine uygulanmasıyla, (Eşitlik 29’da gösterilen hidrostatik basınç ilişkisi elde edilebilmektedir.

$$p = \rho gh \quad (\text{Eşitlik 29})$$

Bu eşitlikte;

p: basıncı,

ρ : akışkan yoğunluğunu,

g: yer çekimi ivmesini,

h: akışkanın yüksekliğini ifade etmektedir.

Flow 3D yazılımındaki 3 boyutlu denklemler, akışkanın dikey yöndeki tek bir kontrol hacmi katmanında sınırlandırılmasıyla, 2 boyuta indirgenerek sığ su modellemesi yapılabilmektedir. Tabaka yüksekliğinin δz değerine eşit olduğu ilk hücre katmanında, z eksenı boyunca akımın var olduğu kabulü yapılmaktadır. Buna ek olarak, sıvı basıncı iki boyutlu momentum denklemlerine tanımlanarak, sığ su denklemleri ile özdeşleştirilmesi sağlanmaktadır. Ayrıca Flow 3D yazılımında serbest yüzeyli hücrelerin içindeki basınç (Eşitlik 30'da görüldüğü şekilde tanımlanmaktadır.

$$p = p_0 + \rho g H \quad (\text{Eşitlik 30})$$

Bu eşitlikte;

p_0 : yüzey gerilim kuvvetlerini içeren dış basıncı,

ρ : akışkan yoğunluğunu,

g : yer çekimi ivmesini,

H : akışkan yüzeyinin çözüm ağı tabanına göre yüksekliğini temsil etmektedir.

Dolayısıyla (Eşitlik 30'da yer alan H değeri, (Eşitlik 31'de gösterildiği gibi engel ve akışkan yüksekliğinin toplamı olarak hesap edilmektedir.

$$H = F V_f \delta z + (1 - V_f) \delta z \quad (\text{Eşitlik 31})$$

Bu eşitlikte;

H : akışkan yüzeyinin çözüm ağı tabanına göre yüksekliğini,

F : Çözüm ağı hücresinde sıvı tarafından işgal edilen hacmin yüzdelik dilimini,

V_f : Hücredeki açık hacim oranını,

δz : z yönündeki hücre boyutunu ifade etmektedir.

Üç boyutlu süreklilik denkleminin derinlik ortalaması alınıp, (Eşitlik 31 içerisinde sıvı yüksekliği yerine konulup, x ve y yönleri için uygun alan kesirleri de dikkate alınarak (Eşitlik 32 yardımıyla elde edilir.

$$\frac{\partial V_f F}{\partial t} + \frac{\partial u A_x F}{\partial x} + \frac{\partial v A_y F}{\partial y} = 0 \quad (\text{Eşitlik 32})$$

Bu eşitlikte;

u : Sıvının x yönündeki hızını,

A_x : Hesaplama hücresinde sıvının x yönündeki alanını,

V_f : Sıvının hesaplama hücresinde kapladığı hacmi,

v : Sıvının y yönündeki hızını,

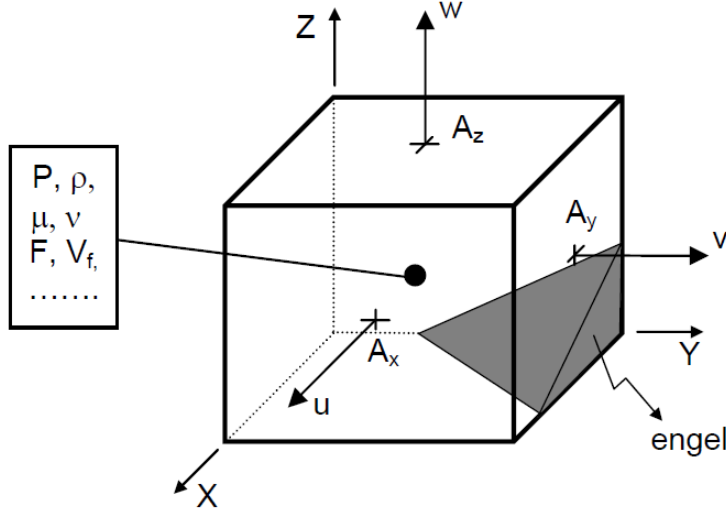
A_y : Hesaplama hücresinde sıvının y yönündeki alanını,

F : Çözüm ağı hücresinde sıvı tarafından işgal edilen hacmin yüzdelik dilimini temsil etmektedir.

(Eşitlik 32’de görüldüğü üzere sığ akış modelinde VOF (Volume of Fluid) yöntemi için kullanılan F değerinin, z yönünde bir taşınımı bulunmamaktadır. z yönünde bir taşınım olmaması, sığ su modelinde zorunlu bir kısıtlama olarak uygulanmaktadır (Flow Science Inc., 2008, 2012; Ghasemlounia, 2021; Kocaman ve Güzel, 2011).

3.1.2.3. Üç Boyutlu RANS Eşitlikleri

3 boyutlu süreklilik denklemleri ve Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS) denklemlerinden oluşan, diferansiyel denklem sistemlerinin çözümü için sonlu hacimler yöntemi kullanılmaktadır. Sonlu hacimler yöntemi, akışkanın içinde bulunduğu alanı dikdörtgen küçük parçalara böler ve her bir parçayı bir kontrol hacmi veya hücre olarak adlandırır. Bu hücreler genellikle düzensiz bir şekilde yerleştirilebilir, bu da oluşturulan modelin karmaşıklığını artırabilir. Her kontrol hücresi, akışkanın özelliklerini hesaplamak için kullanılan bir hesaplama noktasını içerir. Hesaplamalarda, akışkana ait vizkozite, basınç, yoğunluk gibi skaler büyüklükler, kontrol hacminin (hücre) merkezinde yer alırken sadece hızlar (u, v, w) kontrol hacminin yüzeyinde hesaba katılmaktadır. Şekil 10’da dikdörtgen hesaplama hücresine etkiyen parametreler gözükmektedir (Kocaman, 2007).



Şekil 10. Dikdörtgen hesaplama hücrelerine etkiyen parametreler

Çözülmesi gereken diferansiyel denklemler, Kartezyen koordinat (x, y, z) terimleriyle yazılmıştır. Silindirik koordinatlar (r, θ, z) için ise x koordinatı radyal (r) yöne, y koordinatı azimutal koordinata (θ) dönüştürülür, z eksenine ise eksenel koordinattır. Silindirik geometri için, Kartezyen hareket denklemlerine ek terimler eklenmelidir. Bu terimler, ξ katsayısı ile birlikte dahil edilir, burada $\xi=0$ Kartezyen geometriye, $\xi=1$ ise silindirik geometriye karşılık gelir.

Tüm denklemler, alan ve hacim porozite fonksiyonlarıyla formüle edilir. Bu formülasyon, karmaşık geometrik bölgeleri modellemek için kullanılan Fractional Area/Volume Obstacle Representation Method (FAVORTM) olarak adlandırılan bir yöntemdir. Örneğin, engelleri tanımlamak için sıfır hacim porozite bölgeleri kullanılırken, ince gözenekli perde levhaları modellemek için alan poroziteleri kullanılabilir. Porozite fonksiyonları aynı zamanda serbest yüzey ve duvar sınır koşullarının belirlenmesinde bazı basitleştirmeler sunar.

Yazılım tarafından sayısal olarak çözümlenen, 3 boyutlu sıkıştırılamaz akışa ($\rho =$ sabit) ait kütle korunum denklemi, Kartezyen koordinat sisteminde (Eşitlik 33) ile gösterilmiştir. Yazılım tarafından çözümlenen tüm denklemler Kartezyen koordinat sisteminde verildiğinden yönler x, y, z ile ifade edilmiş, verilen yönler göre hızlar ise u, v, w şeklinde verilmiştir. A akışa açık alanı x, y, z yönlerinde temsil etmekte iken R_{SOR} ise sisteme dışarıdan giren kütle ya da momentum kaynağını göstermektedir (Flow Science Inc., 2008).

$$\frac{\partial(uA_x)}{\partial x} + R \frac{\partial(vA_y)}{\partial y} + \frac{\partial(wA_z)}{\partial z} + \xi \frac{uA_x}{x} = \frac{R_{SOR}}{\rho} \quad (\text{Eşitlik 33})$$

(Eşitlik 34), (Eşitlik 35) ve (Eşitlik 36)'da gösterilen momentum korunumu veya Navier – Stokes eşitlikleri, akışkanın hız bileşenleri (u, v, w) için üç eksen yönündeki hareket denklemlerini, kütle korunum denklemleri yardımıyla eş zamanlı olarak çözümleyebilmektedir.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial x} + g_x + f_x - \frac{R_{SOR}}{\rho_w V_F} \quad (\text{Eşitlik 34})$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial y} + g_y + f_y - \frac{R_{SOR}}{\rho_w V_F} \quad (\text{Eşitlik 35})$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial z} + g_z + f_z - \frac{R_{SOR}}{\rho_w V_F} \quad (\text{Eşitlik 36})$$

Bu eşitliklerde;

g_x, g_y, g_z : x, y ve z yönlerindeki yer çekimi ivmesini,

P: Basıncı,

ρ_w : Akışkan yoğunluğunu,

f_x, f_y, f_z : Viskoz ivme bileşenlerini ifade etmektedir.

V_F : VOF yönteminde ifade edilmiş olan bir çözüm hücresindeki akışkanın oransal hacmidir, sıfır ve bir arasında değer almaktadır.

Flow 3D yazılımında kullanılan 3 boyutlu süreklilik ve Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS) denklemlerinin kartezyen koordinat sistemlerinde genel formu (Eşitlik 37) ve (Eşitlik 38)'de gösterilmektedir (Kocaman, 2007).

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (u_i A_i) = 0 \quad (\text{Eşitlik 37})$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u_j A_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + g_i + f_i \quad (\text{Eşitlik 38})$$

Bu eşitliklerde;

u_i : Sıvının i yönündeki hızını,

A_i : Hesaplama hücresindeki sıvının i yönündeki alanını,

V_F : Sıvının hesaplama hücresinde kapladığı hacmi,

P: Basıncı,
 g_i : i yönündeki yer çekimi ivmesini,
 ρ : Akışkan yoğunluğunu,
 f_i : i yönündeki türbülans gerilimlerini temsil etmektedir.

Tüm bu hesaplama kabiliyetlerine ek olarak Flow 3D yazılımı; sediment taşınımı, geçirimli yüzey hesabı, ısı transferi hesaplamaları ile birlikte sıkıştırılabilir akışkan yoğunluğunun ve hacminin hesaplanması gibi birçok HAD problemine çözüm sunabilme kapasitesine sahiptir (Erat, 2023). Ancak bu problemlerin çözümüne dair yöntemler çalışma konusu dışında kaldığından bu çözümlemelere ait diğer eşitlik ve parametrelerin detaylarına yer verilmemiştir

3.1.2.4. Flow 3D Yazılımında Kullanılan Türbülans Modelleri

Hidrolik akışlar, laminar ve türbülanslı akımlar olmak üzere iki türde gerçekleşir. Laminar akımlarda akışkan parçacıkları karmaşık olmayan bir düzen içerisinde bir çizgi boyunca ilerlemektedir. Ancak viskozitenin düşük, akış hızının yüksek olduğu durumlarda kinetik enerji viskoziteyi yenerek sıvı parçacıklarının düzensiz hareket etmesine neden olmaktadır. Bu düzensiz ve kararsız şekilde gerçekleşen akım türü, türbülanslı akım olarak tanımlanmaktadır. Türbülanslı akımlarda sıvı parçacığı hareketinde hız ve basınç, zaman içinde hızla değişmektedir. Türbülanslı akımlar genellikle üç boyutlu olarak gerçekleşmektedir (Ghasemlounia, 2021).

Baraj yıkılma dalgası ani değişen, viskoz, kararsız, sıkıştırılamayan ve türbülanslı bir akıma sahiptir. İdeal olarak, kütle ve momentum korunumu denklemleriyle türbülans dalgalanmalarının iyi temsil edilmesi gerekmektedir. Ancak, 3 boyutlu baraj yıkılma ve taşkın yayılım analizlerinde hesaplama yapılacak alanın çok geniş olması RANS denklemlerinin çözümü için bilgisayar kapasitesi gereksinimini oldukça arttırmaktadır. Genellikle bilgisayar belleği ve işlem süresi kısıtlamaları nedeniyle, türbülans modelinin işlenebilmesi tam olarak mümkün olmamaktadır. Bu nedenle, türbülansın ortalama akış karakteristikleri üzerindeki etkilerini tanımlayan sadeleştirilmiş modellerin kullanılması zorunlu hale gelmektedir.

Flow 3D yazılımda, 5 farklı türbülans modeli seçeneği bulunmaktadır. Bunlar; tek denklemliler türbülans enerji modeli (k), iki denklemliler k - ϵ türbülans modeli, renormalize edilmiş k - ϵ türbülans modeli (RNG), Prandtl karışım uzunluğu modeli ve büyük girdap simülasyon (large eddy simulation, LES) modelidir (Flow Science Inc, 2008; Man vd., 2019; Kocaman, 2007).

3.1.2.4.1. Tek Denklemlı Türbülans Enerji Modeli (k)

Tek denklem türbülans taşıma modeli, türbülansın akış içindeki davranışını basitçe açıklamak ve tahmin etmek için kullanılan bir tür matematiksel modeldir. Bu model, türbülansın temel özelliklerini belirleyen ve takip eden bir denklem içerir. Genellikle, bu denklem türbülansın kinetik enerjisinin taşınmasını ve dönüşümünü hesaplar. Tek denklem türbülans enerji modeli, daha karmaşık olan iki denklemlı türbülans modellerine göre daha basit ve hesaplama açısından daha hızlıdır. Ancak daha fazla ayrıntı ve doğruluk gerektiren bazı uygulamalarda yetersiz olabilirler.

Tek denklem türbülans taşıma modeli akış içindeki türbülans, hız dalgalanmalarıyla ilişkilendirilen kinetik enerji için, (Eşitlik 39)’da gösterilen bir taşıma denklemi içerir.

$$k_T = \frac{1}{2}(u'^2 + v'^2 + w'^2) \quad (\text{Eşitlik 39})$$

Bu eşitlikde; u' , v' ve w' kaotik türbülans dalgalanmalarıyla ilişkilendirilen akışın x, y ve z bileşenleridir(Flow Science Inc., 2008).

3.1.2.4.2. İki Denklemlı k-ε Türbülans Modeli

Daha gelişmiş, karmaşık ve daha yaygın bir model olan iki denklemlı k-ε türbülans modeli, kinetik enerjiyi temsil eden “k” ve onun sönümlenme hızını temsil eden “ε” için iki taşıma denklemi içerir. Bu türbülans modeli de bu sebeple k-ε türbülans modeli olarak adlandırılır. k-ε türbülans modelinin birçok farklı akış türünde makul yaklaşımlar sağladığı literatürde belirtilmiştir. Türbülansın kinetik enerjisi (k), (Eşitlik 40’da gösterilen taşıma denklemi ile, sönümlenme oranı (dissipasyon oranı, ε) ise (Eşitlik 41’de gösterilen taşıma denklemi yardımıyla hesap edilmektedir. İki denklemlı k-ε türbülans modeli, türbülansın enerji seviyelerini ve sönümlenme oranını hesaplayarak, türbülansın akış özelliklerine etkisini tahmin etmeye çalışmaktadır (Flow Science Inc, 2008; F. Kaya ve Karagöz, 2007; Sabbagh-Yazdi vd., 2007).

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial k}{\partial x} + v A_y \frac{\partial k}{\partial y} + w A_z \frac{\partial k}{\partial z} \right) = P + G + \text{Diff} - \varepsilon \quad (\text{Eşitlik 40})$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + v A_y \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + w A_z \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) = \frac{C_{1\varepsilon} \cdot \varepsilon}{k} (P + C_{3\varepsilon} \cdot G) + D\text{Diff} - C_{2\varepsilon} \cdot \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (\text{Eşitlik 41})$$

Bu eşitliklerde;

u, v, w: Akışkan hız bileşenlerini,

$A_{x,y,z}$: Akışa açık alanın x, y, z yönlerindeki değerini,

t: Zamanı,

P: Hız gradiyentinden kaynaklanan türbülans kinetik enerjisi üretimini ifade eden terimi,

G: Kaldırma kuvvetini,

Diff ve DDiff: Difüzyon dağılımı değerlerini ifade etmektedir.

V_F : VOF yönteminde ifade edilmiş olan bir çözüm hücresindeki oransal akışkan hacmidir, sıfır ve bir arasında değer alır.

$C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$: Kullanıcı tarafından düzenlenebilen boyutsuz parametreler olup k- ε modeli için sırasıyla; 1.44, 1.92 ve 0.2 değerleri kabul edilmektedir.

3.1.2.4.3. Renormalized Group (RNG) Model

RNG modeli, k- ε modeli için kullanılan denklemlere benzer denklemler sunmaktadır. Türbülansın kinetik enerjisi ve yayılım oranı gibi türbülans parametreleri için istatistiksel metotlar kullanan bir modeldir. Standart k- ε türbülans modelinde, denklem sabitleri deneysel olarak tespit edilmektedir. Standart k- ε türbülans modeli, Reynolds gerilmeleriyle birlikte, türbülansın kinetik enerjisi (k) ve türbülansın sönümlenme oranı (ε) için iki adet taşınım denklemini çözer. Bu modelde akımın tamamen türbülanslı olduğu ve viskoz etkilerin ihmal edildiği kabul edilir. Boussinesq yaklaşımına dayalı olarak, (Eşitlik 42)'de gösterilen türbülans girdap viskozitesi (ν_t) değeri, (Eşitlik 43) ve (Eşitlik 44)'de gösterilen türbülans denklemlerini çözmenin temel anahtarıdır (Flow Science Inc, 2008; Karaduman, 2018; Man vd., 2019; Sabbagh-Yazdi vd., 2007)

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (\text{Eşitlik 42})$$

Bu eşitlikte;

C_μ : Ampirik bir katsayıyı (RNG modeli için 0.085 olarak kabul edilir),

k: Türbülansın kinetik enerjisini,

ε : Türbülansın sönümlenme oranını temsil etmektedir.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \varepsilon \quad (\text{Eşitlik 43})$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (\text{Eşitlik 44})$$

Bu eşitliklerde;

ν_t : Türbülans girdap viskozitesini,

k : Türbülansın kinetik enerjisini,

ε : Türbülansın sönmelenme oranını,

x_i : Koordinatları,

C_1, C_2 : Kullanıcı tarafından düzenlenebilen boyutsuz parametreler olup RNG modeli için sırasıyla; 1.42 ve 1.68,

$\sigma_k=1.0$ ve $\sigma_\varepsilon=1.3$ olarak kabul edilmektedir.

3.1.2.4.4. Large Eddy Simulation (LES) Model

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği türbülans modellerinden biri olan büyük girdap simülasyon (LES) modeli, en küçük uzunluk ölçeklerini hesap yükünü azaltmak için ihmal eden bir yaklaşım sunmaktadır. Flow 3D yazılımına entegre olarak kullanılabilen LES modeli, 3 boyutlu ve zamana bağlı olarak hesaplamalar yapabilmektedir. LES modelinde ana yöntem; hesaplama ağının çözebileceği büyük türbülans akışlarını doğrudan hesaplamak ve çözüm ağları çözünürlüğünün temsil edemeyeceği kadar küçük olan türbülansları ise istatistiksel olarak veya alt ölçek modellemeleri kullanarak tahmin etmektir.

Büyük girdap simülasyon modelinde, çözüm ağlarının temsil edemeyeceği kadar küçük olan türbülans etkileri, kinematik girdap viskozitesi (ν_t) ile temsil edilir. Bu girdap viskozitesi, bir uzunluk ölçeğine bir ölçü birimi ile çarpılan hız dalgalanmalarına orantılıdır. Uzunluk ölçeği için, Smagorinsky, ızgara hücresi boyutlarının geometrik ortalamasını kullanır. Büyük girdap simülasyon modeli kapsamında, kinematik girdap viskozite (ν_t), (Eşitlik 45)'de gösterildiği şekilde hesap edilmektedir (Flow Science Inc., 2008; Man vd., 2019).

$$\nu_T = (cL)^2 \sqrt{2e_{ij} 2e_{ij}} \quad (\text{Eşitlik 45})$$

Bu eşitlikte;

ν_t : Kinematik girdap viskozitesini,

c: Akış problemine bağlı olarak 0.1 ve 0.2 arasında değer alan bir katsayıyı,

L: Çözüm ağı filtresi genişliğini,

e_{ij} : Gerilim hızı tensör bileşenlerini temsil etmektedir.

(Eşitlik 45)'de yer alan çözüm ağı filtre genişliği değeri (L), (Eşitlik 46)'da gösterildiği şekilde 3 boyutlu çözüm ağı ızgara ölçülerine bağlı olarak hesaplanmaktadır.

$$L = (\delta x \delta y \delta z)^{1/3} \quad (\text{Eşitlik 46})$$

3.1.2.4.5. Prandtl Karışım Uzunluğu Modeli

Prandtl karışım uzunluğu modeli; 3 boyutlu hesaplamalı akışkan dinamiği analizlerinde genellikle türbülans etkilerinin incelenmesinde, kısıtlayıcı özellikleri nedeniyle, yaygın olarak kullanılmayan, tasarlanmış ilk modeldir (Arkaş, 2020). Diğer türbülans modelleri arasında en basit model olan Prandtl karışım uzunluğu, bir akışkanın ne kadar hızlı karıştığını veya difüzyonunun ne kadar etkili olduğunu belirlemek için kullanılır. Pratikte çok mümkün olmayan şekilde Prandtl karışım uzunluğu modeli, türbülansın akışın tüm bölgelerinde homojen olduğunu varsayar. Prandtl karışım uzunluğu modelinde, türbülans kinematik viskozitesi (ν_t), (Eşitlik 47)'de gösterildiği gibi, kullanıcı tarafından belirlenebilen türbülans uzunluk ölçeği (TLEN) ve türbülans kinetik enerjisine (k_T) bağlı olarak hesaplanmaktadır (Flow Science Inc., 2008; Ghasemlounia, 2021).

$$\nu_t = \text{TLEN} \sqrt{\frac{2k_T}{3}} \quad (\text{Eşitlik 47})$$

Bununla birlikte türbülansın sönümlenme oranı (ε_t) ise 0.09 olarak kabul edilen bir katsayı (CNU) yardımıyla, (Eşitlik 48)'de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$\varepsilon_t = \text{CNU} \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{k_T^{3/2}}{\text{TLEN}} \quad (\text{Eşitlik 48})$$

3.1.2.5. Flow 3D Yazılımında Çözüm Ağları

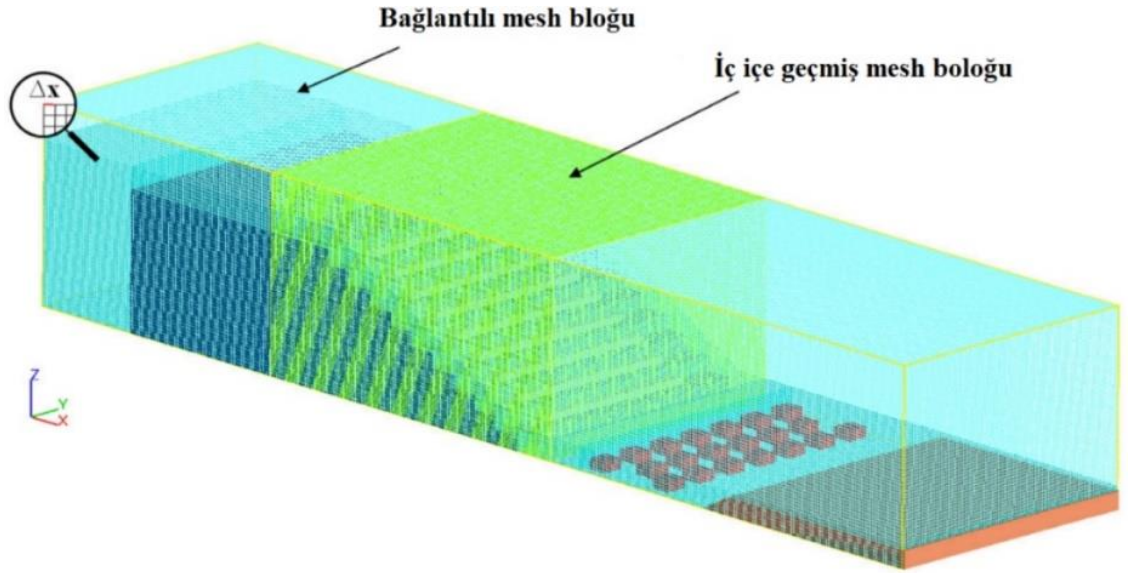
Flow-3D yazılımında; kullanıcı tarafından modellenen alanın geometrisine uygun şekilde, kartezyen ya da silindirik çözüm ağı blokları, oldukça basit ve esnek bir şekilde düzenlenebilmektedir. İdeal olarak hücreler, düzgün ve ortogonal (90 derece açılarla) olmalıdır. Eğri kenarlı veya çarpık hücreler, sayısal kararlılığı etkileyebilir ve sonuçlarda yanlışlık veya sapmalar meydana getirebilir.

Çözüm ağları; memba ve mansap bölgesinde meydana gelen akışı, etkileyebilecek unsurları çözüm alanına dahil edebilecek kadar büyük olmalıdır. Aksi takdirde yetersiz mesh çözünürlüğü, gerçeği yansıtmaktan uzak kalacaktır. Buna rağmen çözüm ağı bloklarının gereğinden büyük boyutlarda seçilmesi ile de işlem yükü ve hesaplama süresi artacaktır. Bu nedenle sayısal modellemelerde, optimum çözüm hücresi boyutunun belirlenmesi kritik öneme sahiptir (Tataroğlu, 2014).

Flow 3D yazılımı, çeşitli geometride (dikdörtgen, dairesel, dikdörtgenler prizması, silindir) çözüm ağları tanımlama imkanı sunmakla birlikte, çalışmada dikdörtgen çözüm ağları tercih edilmiştir. Çözüm ağı blokları oluşturulurken dikdörtgen ızgaraların seçilmesi, karmaşık akış ağı alanlarının örgülenmesinde büyük kolaylık ve esneklik sağlamakla birlikte sayısal modellemenin kararlı ve doğru olmasına da katkı sağlamaktadır. Dikdörtgen çözüm ağları, en basit ve en yaygın kullanılan çözüm ağı türlerinden biridir. Dikdörtgenler, düzlemde kolayca tanımlanabilir ve yönetilebilir. Bu da çözüm ağı oluşturma sürecini basitleştirerek hesaplama yükünü azaltmaktadır. Dikdörtgen çözüm ağları, sayısal kararlılığı artırır. Daha dengeli hücreler ve düzgünce düzenlenmiş düğüm noktaları ile sayısal hesaplamalarda, daha az hata oluşmasını sağlamaktadır.

Bununla birlikte, Flow 3D yazılımında; geniş, karmaşık ve yüksek hassasiyet gerektiren çalışmalar için oldukça kullanışlı bir yöntem olan çoklu ağ blokları geliştirilmiştir. Birbirine sınırlar ile bağlı bitişik ağ blokları bağlantılı blok olarak tanımlanmaktadır. Bir bloğun diğer bir bloğu kapsayacak şekilde içine aldığı bloklar ise iç içe geçmiş bloklar olarak adlandırılmaktadır.

Yazılımın hesaplama imkanlarını verimli bir şekilde kullanmak için modelleme çalışmalarında sıklıkla tercih edilen bağlantılı bloklardan her bir çözüm ağı bloğu, akış alanının belirli bir bölgesini kapsar ve düzenli bir dörtgen ağ meydana getirir. Böylece çalışma alanının, daha iyi temsil edilebilmesi sağlanmakta ve daha az çözüm ağı hücresi ile çözümleme yapılmasına imkan tanınmaktadır (Flow Science Inc., 2008, 2012). Şekil 11' de Flow 3D yazılımında kullanılan çoklu ağ bloğu örneği gösterilmektedir.



Şekil 11. Flow 3D yazılımında çoklu ağ bloğu örneği (Ghaderi ve Abbasi, 2021).

Çözüm ağları üretilirken; blok sayısı mümkün olan en az sayıda üretilmelidir. Böylece örgü ağları arası interpolasyon işlemleri azalmış olacağından potansiyel hatalar en aza indirilebilecektir. Çoklu ağ blokları arasında boyutsal uyum olmasına dikkat edilmeli ve büyük farklılıklardan kaçınılmalıdır. En yüksek kabul edilebilir oran olan 2:1 oranı üzerine çıkılması veri aktarımında yanlış sonuçlar üretilmesine sebep olabilmektedir. Geometride ve akış miktarlarında önemli değişikliklerin olduğu bölgelere ara blok sınırları tanımlamaktan kaçınılmalıdır.

3.1.2.6. Flow 3D Yazılımında Sınır Koşulları

3.1.2.6.1. Serbest Yüzey Sınır Koşulları

Yazılımda hesaplama örgüsünün yüzeyini tanımlamak için kullanılan algoritma, FAVOR (fractional area/volume obstacle representation, kesirli alan/hacimsel engel Temsili) yönteminden türetilen ve FAVOR yöntemine benzer şekilde Hirt ve Nichols (1981) tarafından sunulan akışkan hacmi (volume of fluid, VOF) tekniğidir. VOF yöntemi ile hücrelerin boş, tam dolu veya kısmen suyla dolu olduğu durumlar belirlenir. Akışın serbest yüzey sınır koşulları, bir VOF fonksiyonu ile tanımlanır. Bu fonksiyon, birim hacim başına düşen sıvı hacmini temsil eder. Tek bir sıvı için F sıvı tarafından işgal edilen hacmin yüzde dilimini temsil eder. Şekil 12’de görüleceği üzere $F=1$ olan alanlarda tamamen sıvı bulunurken, $F=0$ olan bölgeler, içlerinde sıvı olmayan hücreler karşılık gelir. Boşluklar, sıvı kütle içermeyen ve bunlara sabit bir basınç atanan bölgelerdir. Fiziksel olarak, bunlar, sıvı yoğunluğuna göre önemsiz olan buhar veya gazla dolu bölgeleri temsil eder.

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0.25	0.85	0.94	0.87	0.21	0	0	0	0
0	0	0	0.13	0.73	1	1	1	1	1	0.28	0	0	0
0.58	0.62	0.88	1	1	1	1	1	1	0.33	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.33	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.9	0.76	0.7	0.69
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Şekil 12. VOF yönteminde F değerleri şematik gösterimi (Nguyen-Thi, Nguyen, Pierens ve Coorevits, 2021).

Su yüzü profilleri belirleme yöntemlerinden VOF yöntemi 2 boyutlu ve 3 boyutlu baraj yıkılma akışı simülasyonları için en gelişmiş ve en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Bu özellik, yönteminin çalışmada kullanılması yönünde tercih sebebi olmuştur. Ayrıca rezervuar ve dere su yüzeyleri, açık hava ile temas ettiğinden normal basınç altında yüzeyde hiçbir kayma gerilmesi oluşmayacağından, çalışmadaki modelde serbest su yüzü sınır koşulu uygulanmıştır. Akışkan hacim fonksiyonu olarak tanımlanan F'nin değişimi, (Eşitlik 49)'da gösterilmekte olup F kontrol hacmi değerinin, akışkan ile birlikte hareket etmekte olduğu görülmektedir.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \left(u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} + w \frac{\partial F}{\partial z} \right) = 0 \quad (\text{Eşitlik 49})$$

3 boyutlu bir serbest yüzey probleminin Flow 3D yazılımı ile çözümünde, VOF yöntemi, sıvı-gaz veya sıvı-sıvı arayüzlerinin hareketini tanımlayan bir taşıma denklemi kullanır. Her adımında, arayüzün bulunduğu hücreler hesaplanır ve bu hücrelerdeki kesirli hacimler güncellenir. Bu, arayüzün hareketini ve değişimini izler. Ayrıca VOF yöntemi, toplam hacmin korunmasını sağlar, yani bir hücre içindeki sıvı ve gaz hacimleri toplamı sabit kalır. Çözüm ağı içerisindeki herhangi bir hücrede; hücre tamamen katı, kısmen katı veya sıvı, tamamen sıvı, kısmen sıvı ile dolu ve tamamen boş olan beş farklı durumdan biri söz konusu olabilmektedir.

Flow 3D'de, sıvıya bitişik olan gazın ataleti ihmal edilir, serbest yüzey sıvının dış sınırlarından biri haline gelir. Serbest yüzeydeki sınır koşullarının doğru bir şekilde

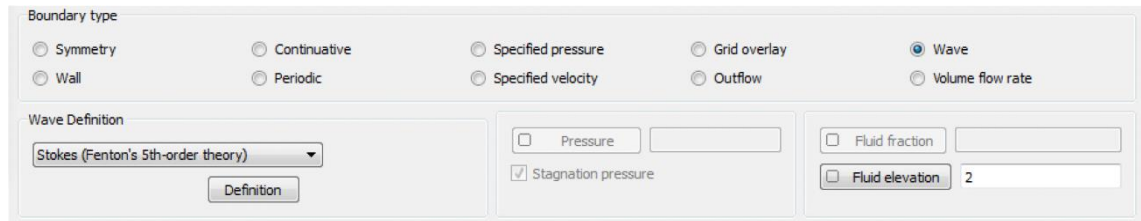
tanımlanması, serbest yüzey dinamiklerinin gerçekçi şekilde temsili için önemlidir (Flow Science Inc, 2008; Gómez vd., 2016; Hirt ve Nichols, 1981; Marsooli, 2013; Nguyen-Thi vd., 2021; Pakniyat, 2015; Palamut, 2014; Rajaa ve Kamel, 2020; Kocaman, 2007).

3.1.2.6.2. Başlangıç ve Çözüm Ağı (Mesh) Bloğu Sınır Koşulları

Flow 3D yazılımında 2 ve 3 boyutlu taşkın dalgası yayılımının sayısal olarak incelenmesi ancak çalışmaya uygun sınır koşullarının tanımlanmasıyla mümkün olmaktadır. VOF yöntemiyle serbest su yüzeyi sınır koşullarının belirlenmesinin yanında, başlangıç ve tüm çözüm ağı bloğu sınırlarının yüzeylerinde sınır koşullarının da dikkatli bir şekilde tanımlanması gereklidir.

Literatürde, Flow 3D programında başlangıç sınır koşulu olarak taşkın hidrografının kullanılması yaygın olarak görülen ve tavsiye edilen bir yöntemdir (Kocaman, 2007; Şahin, 2018).

Flow 3D yazılımında çözüm ağı bloklarının sınırlarında 10 farklı sınır koşulu tanımlanabilmektedir. Kullanıcılar tarafından çözüm türüne göre belirlenen basınç (P), belirlenen hız, simetri (S), dalga, duvar (W), bağlayıcı (continuative), ızgara yerleşimi, periyodik, hacim oranı ve çıkış (O) sınır koşullarının tanımlama imkanı bulunmaktadır. Şekil 13'de Flow 3D yazılımında çözüm ağı bloğu sınır koşulu seçim ekranı gösterilmektedir.



Şekil 13. Flow 3D yazılımında mesh bloğu sınır koşulu seçim ekranı (Flow Science Inc., 2012).

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği modellerinde en çok ihtiyaç duyulan ve kullanılan başlıca sınır koşulları; duvar, simetri, belirlenen basınç, belirlenen hız, dalga, hacim oranı ve çıkan akım sınır koşullarıdır.

Duvar (W) sınır koşulu akımın kenar ve taban sınırlarında akımın dışarı çıkmasını engelleyen sanal bir duvar gibi davranırken, simetri (S) sınır koşulu ise bitişik çözüm ağı blokları arasında akımın değişmeden ve benzer şekilde devam etmesini sağlamaktadır. Ayrıca simetri sınır koşulu, modelin üst sınırı için de kullanılır ve içi ile dışı aynı kabul edilir. Sayısal çözüm alanlarında, birden fazla bulunan kübik ağların birbirine bağlı

yüzeylerinde kullanılarak, ağlar arasındaki akımın benzer özelliklerde olması sağlanmaktadır.

Belirlenen basınç (P) sınır koşulu ise modelde fazladan basınç oluşturan alanlarda kullanılabilen etkili bir hesaplama aracıdır. Flow 3D yazılımına “statik basınç” ve “durgun basınç” olmak üzere iki tip basınç sınır koşulu tanımlanabilmektedir. Statik basınç koşulunda basınç çözüm ağı sınırında kısa bir mesafeye kadar sabit kalırken, durgun basınç koşulunda ise basınç çözüm ağı sınırının dışında sabit kalmaktadır.

Belirlenen hız (V) sınır koşulu ise çözüm ağı sınırlarında uygulanması istenilen akışkan hızının programa girilmesi amacıyla kullanılabilir. Çözüm alanı içerisinde ihtiyaca göre zamanla değişebilen akım hızları da bu sınır koşulu ile tanımlanabilmektedir.

Dalga sınır koşulu ise çözüm ağı sınırlarındaki akış dalgalarını belirlemek için kullanılmaktadır.

Akış hacmi sınır koşulu, çözüm ağı sınırına belirlenen bir debinin, giriş koşulu olarak tanımlanması amacıyla seçilen bir sınır koşuludur. Bu sınır koşulunda istenilen bir akış yüksekliği tanımlanabileceği gibi sınırın yüzey alanını kaplayacak şekilde de tanımlanabilmektedir.

Çıkış (O) sınır koşulu ise akımın sayısal modelin dışına serbestçe çıkabilmesi istenildiğinde, çözüm ağı sınırlarında tanımlanması gereken sınır koşuludur. Çıkış sınırına ulaşan akımın herhangi bir yansıma olmadan sınırdan geçmesinin istenilmesi halinde kullanılmaktadır (Flow Science Inc., 2008, 2012; Ghasemlounia, 2021; Kocaman, 2007; Vasquez ve Roncal, 2009).

3.2. Çalışma Alanı

Çalışma alanının yer aldığı Erzincan ili, Doğu Anadolu Bölgesi'nin Yukarı Fırat Bölümü'nde 39° 02' - 40° 05' kuzey enlemleri ile 38° 16' - 40° 45' doğu boylamları arasında yer almakta olup yüzölçümü 11.903 km² ve rakımı 1185 m'dir. Yüzölçümü bakımından ülkemizin 24. büyük ili olan Erzincan, Doğu Anadolu Bölgesi'nde de Erzurum, Van ve Malatya'dan sonra 4. büyük il konumundadır.

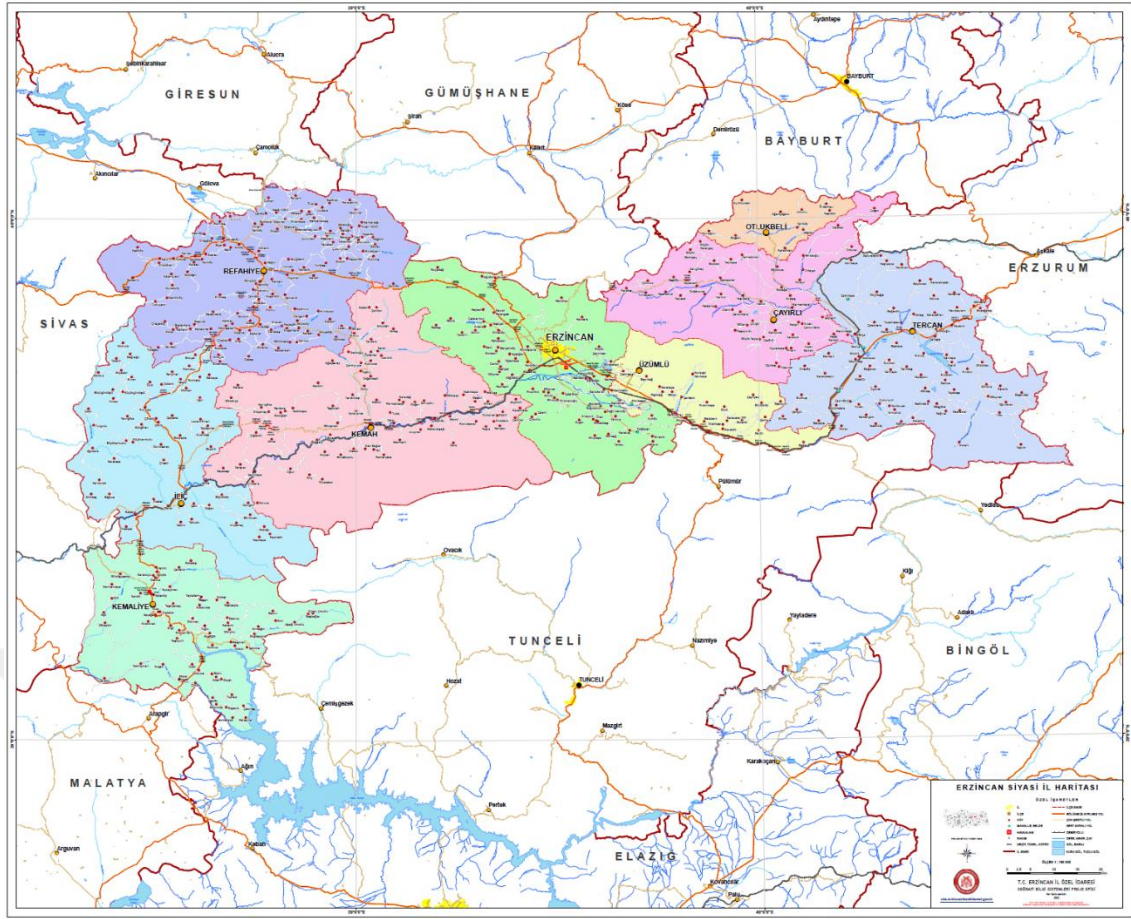
Şekil 14'de görülen Erzincan Ovası, Türkiye'nin hemen hiçbir ovasında rastlanılmayacak şekilde nispi yüksekliğe sahip olan dağlık alanlar ile çevrilidir. Yüksek dağlık alanlar arasında ortalama bir elips şeklinde kuzeybatı ve güneydoğu istikametinde uzanan ovanın uzunluğu yaklaşık 90 km olup ovanın yüz ölçümü ise yaklaşık 600 km²'dir.



Şekil 14. Erzincan Ovasının havadan görüntüsü (Polat ve Altınbilek, 2021).

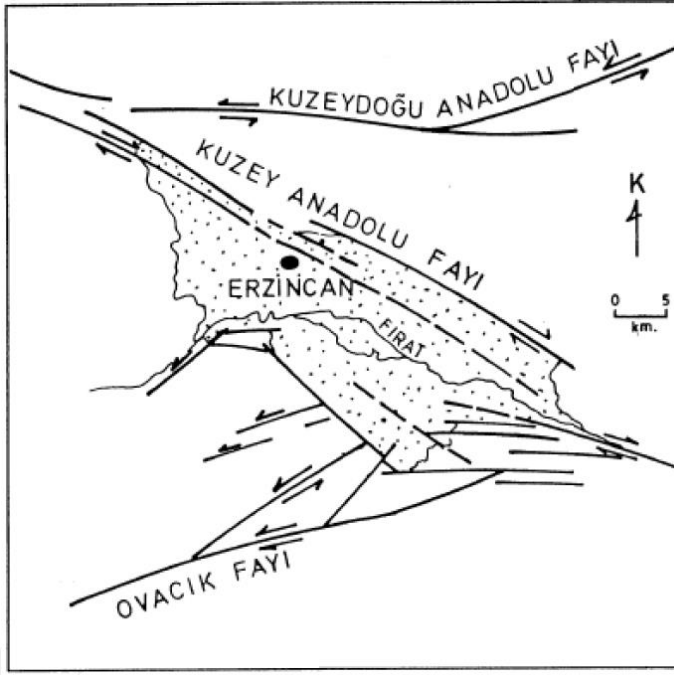
Erzincan ili, 1 merkez ve 8 taşra ilçesinden oluşmaktadır. İl genelinde 524 köy alanı ve 15 kentsel alan (1 merkez ilçe, 8 ilçe merkezi ve 6 belde) bulunmaktadır. Bu yerleşimlerde 2022 yılı itibariyle 237,351 kişi yaşamakta olup, nüfus bakımından 81 il arasında 70. sırada yer almaktadır (Karadeniz ve Altınbilek, 2018).

Erzincan ilinin; batısında Sivas, doğusunda Erzurum, kuzeyinde Bayburt ve Gümüşhane, kuzeybatısında Giresun, güneyinde Tunceli, güneydoğusunda Bingöl ve güneybatısında Malatya ve Elazığ illeri bulunmaktadır. Şekil 15’de Erzincan’ın konumu, ilçeleri ve komşu illeri görülmektedir.



Şekil 15. Erzincan ili siyasi haritası (Erzincan İl Özel İdaresi, 2022).

Erzincan ili; 1. derece deprem bölgesinde, Anadolu ve Avrasya plakasının sıkışma bölgesinde yer alan ve 21. yüzyılın en aktif fay hatlarından biri olan Kuzey Anadolu Fay Zonu üzerinde bulunmaktadır. Bununla birlikte Şekil 16'da görüldüğü gibi Erzincan Ovasının kuzeyinden geçen Kuzeydoğu Anadolu Fayı ve güneydoğusunda ise Ovacık Fayı ile kuşatılmıştır.



Şekil 16. Erzincan ili çevresi ana fay sistemleri (Tüysüz, 1993).

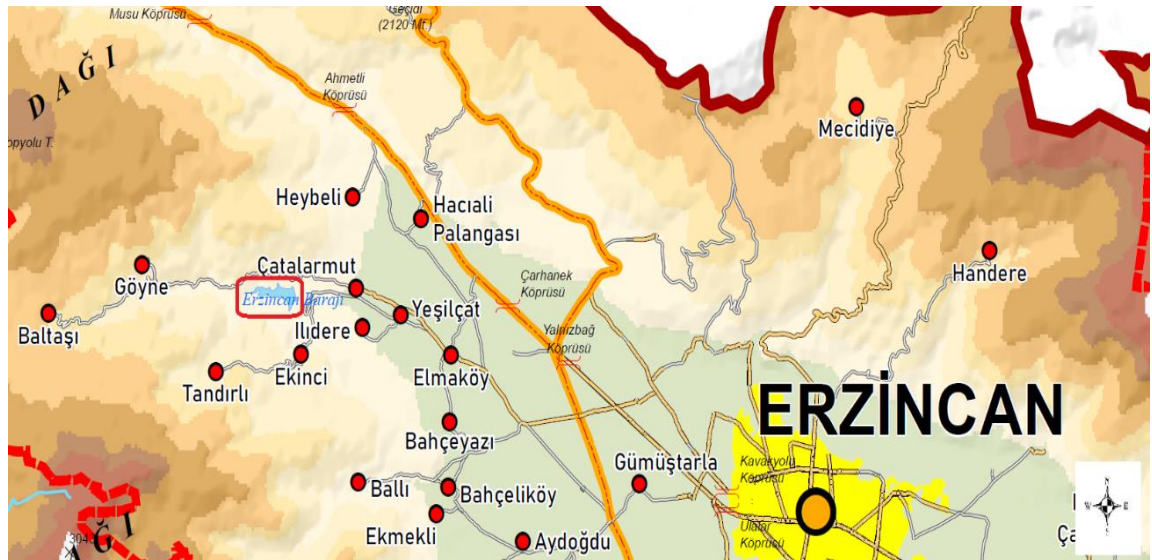
Erzincan ilinde son bin yıl içinde, şiddeti 7' den büyük olmak üzere 10'dan fazla deprem meydana gelmiştir. Tarihinde can ve mal kaybına neden olan büyük depremlerin yaşandığı Erzincan ilinde 26.12.1939 tarihinde, 7.9 büyüklüğünde Türkiye Cumhuriyeti'nin en büyük depremi meydana gelmiştir. 1939 yılında meydana gelen Erzincan depremi 20. yy içerisinde yeryüzünde görülen en büyük 15 depremden biridir. Bu deprem nedeniyle farklı kaynaklara göre yaklaşık 33,000 ila 40,000 kişi hayatını kaybetmiş ve Erzincan ili haritadan silinecek büyüklükte bir yıkım yaşamıştır. Neredeyse sağlam yapı bırakmayan bu büyük felaket sonrası, Erzincan il merkezinin yerleşim yeri değiştirilmiştir. Yine 13.03.1992 tarihinde 653 kişinin yaşamını yitirdiği 6.6 büyüklüğünde oldukça yıkıcı bir deprem daha meydana gelmiştir. Günümüzde de Kuzey Anadolu Fay Hattının aktif bir fay olması nedeniyle yakın bir gelecekte Erzincan ilinde büyük bir deprem meydana gelmesi beklenmektedir (Biricik, 2001; Boz ve Yılmaz, 2020; Görür, 2020; Kurban, 2021; Sür, 1993).

Erzincan ili sadece deprem tehlikesine karşı risk altında olmayan, tarihinde büyük taşkınların yaşanması sonucu da zorunlu yerleşim yeri değişimleri yaşanmış bir topoğrafyada yer almaktadır. Küresel iklim değişikliği sonucu sağanak karakterli yağışlara ek olarak dağlık alanlarda bulunan karın, ilkbahar yağışlarıyla kısa sürede erimesi sonucu, derelerin debisi, artarak taşkınlarla neden olmaktadır. Erzincan Meteoroloji istasyonu verilerine göre Aralık, Temmuz ve Ağustos aylarında meydana gelen yağışlar yıl ortalamasının yaklaşık 3 katına kadar çıkmaktadır. Aralık ayı yağışları genellikle kar yağışı şeklinde olduğundan taşkın riski Aralık ayında düşüktür. Buna

rağmen Temmuz ve Ağustos aylarında meydana gelen ani ve şiddetli yağışların yanında zeminin kuru olması nedeniyle de taşkınlar sıklıkla meydana gelmektedir (Uysal ve Sunkar, 2022).

Erzincan meteoroloji istasyonunun ortalama rakımı 1218 metredir. Buna rağmen Erzincan Barajı'nın bulunduğu bölgenin en yüksek noktası ise 1965 m'dir. Bu iki yükselti farkı 747 m olduğundan ve atmosferde her 200 m yükseklikte 1 °C sıcaklık düşüşü meydana geldiğinden, Erzincan Barajı bölgesinin ortalama sıcaklık değeri Erzincan il merkezine göre 3,5 °C daha düşük olmaktadır. Ayrıca baraj gölünde buharlaşmanın fazla olmasına rağmen, düşük sıcaklığa bağlı olarak havanın bağıl nem tutma kapasitesi de düşük olduğundan yağışların daha sık yaşandığı görülmektedir. Bunun sonucu olarak taşkın oluşum riskinin daha yüksek olduğu düşünülmektedir.

Çalışma konusu Erzincan Barajı, Göyne Çayı üzerinde tarımsal sulama amacıyla 1991 ve 1997 yılları arasında inşa edilmiş ve 2000 yılında işletme faaliyetine başlamıştır. Erzincan – Sivas karayolunun güney tarafında il merkezine yaklaşık 17 km uzaklıkta bulunmaktadır. 1505 rakımda yer alan Erzincan barajı 39°80'4008" enlem ve 39°29'2759" boylamında bulunmaktadır. Şekil 17'de Erzincan Barajı'nın konumu gösterilmektedir. Barajdan elde edilen sulama suyundan; Çatalarmut, Elmaköy, Ilidere, Bahçeyazı, Aydoğdu, Bahçeli ve Ekmekli köyleri faydalanmaktadır (Kaplan, 2019).



Şekil 17. Erzincan Barajı'nın konum haritası (Erzincan İl Özel İdaresi, 2022).

Erzincan Barajı kil çekirdekli zonlu toprak dolgu gövde tipinde tarımsal sulama amacıyla inşa edilmiştir. Şekil 18'de görülen Baraj gövdesinin talvegden yüksekliği 76.20 m, temelden yüksekliği 84.20 m dir. Barajın kret uzunluğu 515 m ve kret genişliği 7 m

dir. Normal su seviyesinde 10.81 hm^3 ve maksimum su seviyesinde 12.19 hm^3 hacminde rezervuarda su tutulmaktadır.



Şekil 18. Erzincan Barajı

Tablo 5’de görülen Erzincan Barajı karakteristik bilgileri, baraj projeleri ve hidrograflar DSİ Erzincan 82. Şube Müdürlüğü’nden temin edilmiştir.

Tablo 5. Erzincan Barajı karakteristik bilgileri

Tanım	Nitelik/Nicelik
Akarsu Adı	Göyne Deresi
Yağış Alanı	77 km^2
Yıllık Ortalama Yağış	367.80 mm
Yıllık Ortalama Akış	34.27 hm^3
Yıllık Ortalama Debi	$1.09 \text{ m}^3/\text{s}$
Normal Su Seviyesi (NSS)	$1,505.75 \text{ m}$
Maksimum Su Seviyesi (MSS)	$1,511.92 \text{ m}$
Minimum Su Seviyesi (MSS)	$1,481.30 \text{ m}$
NSS’de Hacim	10.8075 hm^3

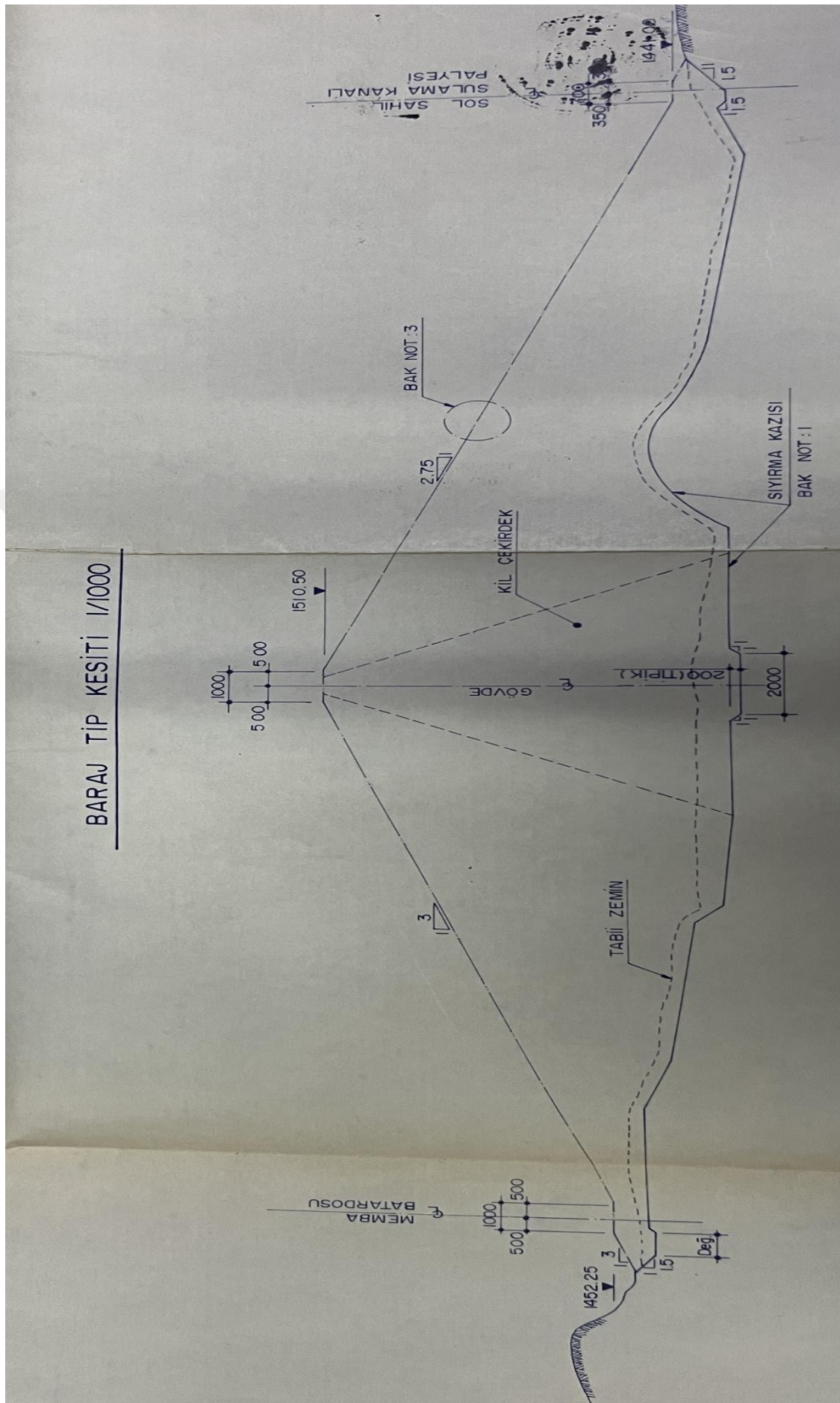
Tablo 5. (Devamı)

Tanım	Nitelik/Nicelik
MSS'de Hacim	12.1888 hm ³
Mn. SS'de Hacim	1.942 hm ³
Aktif Hacim	8.8555 hm ³
Toplam Hacim	10.8075 hm ³
Amacı	Sulama
Tipi	Zonlu Toprak
Talveg Kotu	1,437.50 m
Temel Kotu	1,429.50 m
Talvegden Yüksekliği	76,20 m
Temelden Yüksekliği	84,20 m
Baraj Kret Kotu	1,510.00 m
Kret Uzunluğu	515 m
Kret Genişliği	10 m
Parepet Duvar Kotu	1,513.70 m
Gövde Dolgu Hacmi	3 hm ³
Dolu Savak Tipi	Karşıdan alışı serbest

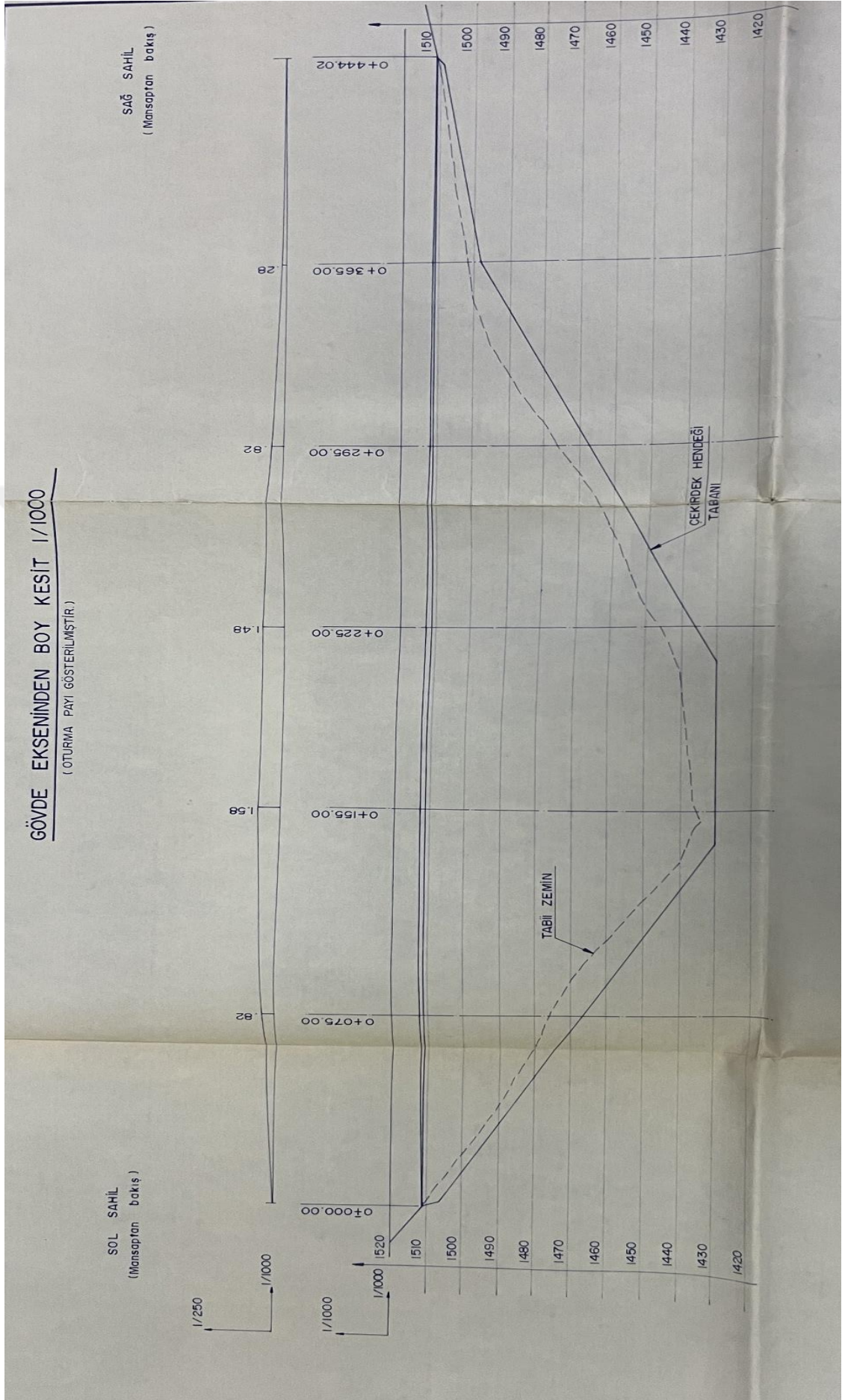
Erzincan Barajı projesine ait genel yerleşim planı Şekil 19'da, baraj gövde enkesiti Şekil 20'de ve baraj gövdesi boykesiti Şekil 21'de görülmektedir.



Şekil 19. Erzincan Barajı genel yerleşim planı



Şekil 20. Erzincan Baraj gövdesi en kesiti



Şekil 21. Erzincan Baraj gövdesi boy kesiti

3.3. SYM'nin Oluşturulması Amacıyla Havadan 3B Tarama Çalışmaları

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği modellemelerinde, sayısal yükseklik modelleri; akışın yayıldığı alanın belirlenmesi, su hızı ve su derinliğinin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Deneysel olarak yapılan çalışmalarda, çalışma alanının fiziki modelleri oluşturulmaktadır. Bunun yanında, son yıllarda bilgisayar donanım ve yazılımlarının gelişmesi ile birlikte, yeni sayısal çözüm tekniklerinin ortaya çıkması sayısal çözümlemelerin kullanımını yaygınlaştırmaktadır. Bu kapsamda, baraj yıkılma ve taşkın yayılım analizlerinin temelini oluşturacak olan, araziye ait sayısal yükseklik modellerinin temin edilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Uluslararası literatürde yapılan çalışmalarda genellikle; Amerika Birleşik Devletleri Jeolojik Araştırmalar Kurumu (USGS), Japonya Uzay Araştırma Ajansı (JAXA) tarafından uzaya gönderilen ALOS (Advanced Land Observing Satellite) uydusu, SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) ve 2000 yılında Endeavour uzay mekiği görevi sırasında toplanan InSAR (Sentetik Açıklıklı Radarın İnterferometrisi) verilerine dayanan dijital haritalar kullanılmaktadır. Bu sayısal haritaların çözünürlüğü genellikle 5 m – 30 m arasında değişmektedir. Bunların yanında T.C. Milli Savunma Bakanlığı Harita Genel Müdürlüğü tarafından 1/25000 ölçeğinde üretilen sayısal haritalar kullanılarak 30 m x 30 m hassasiyete sahip sayısal yükseklik modelleri, ArcGIS yazılımları aracılığıyla üretilebilmektedir.

Bunlardan farklı olarak, yer şekillerinin en hassas şekilde temsil edilebilmesi amacıyla havadan radyo dalgaları ya da ışın algılama teknolojileri ile de sayısal yükseklik haritaları elde edilebilmektedir. Bu teknik günümüzde geniş, ulaşımı zor ve hassasiyet gerektiren bazı hidrolojik çalışma alanlarında kullanılmaya başlanmıştır. Bu yöntem ile yatay (x,y) koordinat bilgilerinin yanı sıra düşey (z) doğrultuda yükseklik parametresi de içeren yoğun bir nokta bulutu elde edilebilmektedir. Böylece topoğrafya üzerindeki tüm yapılar ve bitki örtüsü de dahil olmak üzere, çalışma alanını en iyi şekilde temsil edebilen bir sayısal yükseklik modeli (SYM) oluşturulabilmektedir (Baş, 2016).

Çalışma alanının en hassas şekilde temsil edilebilmesi amacıyla çalışma kapsamında, 2 adet DJI – Phantom 4 RTK (real time kinematic) drone ile havadan üç boyutlu tarama ile topoğrafyanın tanımlanması ve sayısal yükseklik modelinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, çalışmada en son teknoloji, tarama yöntemiyle sonuç hassasiyetinin önemsenmesi ile birlikte çalışmanın güncel nitelikte olması da benimsenmiştir.

Phantom 4 RTK, “~10 cm” hassasiyetinde konumlandırma sağlayabilen yerleşik bir, küresel navigasyon uydu sistemi (global navigation satellite system, GNSS) alıcısı

sayesinde haritalama kabiliyeti olan bir çeşit insansız hava aracıdır. Üzerinde yer alan kamera sayesinde çözünürlüğü, 4k video ve 20 megapiksel fotoğraflar kaydedebilmektedir. Bununla birlikte üzerinde yer alan engel algılama sensörleri sayesinde engellerden de otomatik olarak uzaklaşabilmektedir. Tablo 6’da DJI – Phantom 4 RTK drone teknik özellikleri gösterilmektedir (DJI, 2022).

Tablo 6. DJI – Phantom 4 RTK drone teknik özellikleri

Hava Aracı	
Ağırlık	1391 g (Pil ve Pervaneler Dâhil)
Çapraz Boyut	350 mm (Pervaneler hariç)
Maksimum Yükselme Hızı	6 m/sn (otomatik uçuş); 5 m/sn (manuel kontrol)
Maksimum Alçalma Hızı	3 m/sn
Maksimum Hız	31 mph (50 km/sa) (P modu); 36 mph (58 km/sa) (A modu)
Maksimum Eğim Açısı	25° (P modu); 35° (A modu)
Maksimum Açısal Hız	150°/ sn (A modu)
Deniz Seviyesinden Yukarıda Maksimum Hizmet Tavanı	19685 ft (6000 m)
Maksimum Rüzgâr Hızı Direnci	10 m/sn
Çalışma Sıcaklığı	32° ila 104°F (0° ila 40°C)
Çalışma Frekansı	2.400 GHz ila 2.483 GHz (Avrupa, Japonya, Kore) 5.725 GHz – 5.850 GHz (Amerika Birleşik Devletleri, Çin)
Asılı Kalma Doğruluk Aralığı	RTK etkin ve düzgün çalışmaktadır: Dikey: ± 0.1 m; Yatay: ± 0.1 m RTK devre dışı: Dikey: ± 0.1 m (görüş konumlandırma ile); ± 0.5 m (GNSS konumlandırma ile) Yatay: ± 0.3 m (görüş konumlandırma ile); ± 1.5 m (GNSS konumlandırma ile)

Tablo 6. (Devamı)

GNSS	
Tek Frekanslı Yüksek Hassasiyetli GNSS	GPS + BeiDou + Galileo* (Asya); GPS + GLONASS
Çok Frekanslı Çok Sistemli Yüksek Hassasiyetli RTK GNSS	Kullanılan Frekans GPS: L1/L2; GLONASS: L1/L2; BeiDou: B1/B2; Galileo*: E1/E5 İlk Sabit Süre: <50 sn. Konumlandırma Hassasiyeti: Dikey 1.5 cm + 1 ppm (RMS); Yatay 1 cm + 1 ppm (RMS). 1 ppm, 1 km'lik harekette 1 mm artışla hatayı gösterir. Hız Doğruluğu: 0.03 m/s
Haritalama Fonksiyonları	
Haritalama Doğruluğu	Haritalama hassasiyeti, Dijital Ortofotolar Sınıf III için ASPRS Hassasiyet Standartlarının gereksinimlerini karşılar
Yer Örnek Mesafesi (GSD)	(H / 36.5) cm / piksel, H, çekim sahnesine göre hava aracının irtifasını gösterir (birim: m)
Edinme Verimliliği	Tek bir uçuş için yaklaşık 1 km ² 'lik maksimum çalışma alanı (182 m irtifada, yani GSD, Dijital Ortofotolar Sınıf III için ASPRS Hassasiyet Standartlarının gereksinimlerini karşılayacak şekilde yaklaşık 5 cm/pikseldir)
Kamera	
Sensör	1 inç CMOS; Etkin pikseller: 20M
Lens	FOV (Görüş Alanı) 84°, 8.8 mm (35 mm format eşdeğeri: 24 mm), f / 2.8 - f / 11. 1 m - ∞ arası otomatik odak
ISO Aralığı	Video: 100-3200 (Otomatik), 100-6400 (Manuel) Fotoğraf: 100 - 3200 (Otomatik), 100 - 12800 (Manuel)
Mekanik Deklanşör	8 - 1/2000 saniye
Elektronik Deklanşör	8 - 1/8000 saniye
Maksimum Görüntü Boyutu	4864x3648 (4: 3); 5472x3648 (3: 2)
Hareketsiz Fotoğraf Modları	Tek çekim
Video Kayıt Modları	H.264, 4K: 3840x2160 30p
Maksimum Video Bit Hızı	100 Mbps

Erzincan Barajı mansabında yer alan riskli bölgede, nüfus yoğunluğunun yüksek olduğu ve geniş tarım arazilerine sahip köyler ve organize sanayi bölgesi bulunmaktadır. Bu durum göz önünde bulundurularak; Google Earth programında olası baraj yıkılması sonucu oluşacak taşkın, muhtemel yayılabileceği alan, barajın kret ve talveg kotuna göre, kot farkları dikkate alınarak belirlenmiştir. Bu alan; baraj gövdesinden yaklaşık 13 km uzaklığa kadar geniş bir ölçüm alanını, kırmızı çizgilerle Şekil 22’de gösterildiği şekilde kapsamaktadır.

Belirlenen çalışma alanı, tarama yapacak dronların uçuş süresi ve verilerin bilgisayar yazılımında değerlendirilme durumuna göre 10 parçaya bölünmüştür.



Şekil 22. Tahmini olarak belirlenen taşkın yayılım alanının, uydu görüntüsü

10 parça olarak belirlenen alanlar insansız hava aracının kontrol kumandasında veri datası olarak kullanılabilecek dosya formatı olan “*.kml” uzantılı olarak, Şekil 23’de gösterilen DJI – Phantom 4 RTK drone kontrol kumandasına kaydedilmiştir.



Şekil 23. DJI – Phantom 4 RTK drone kontrol kumandası

Belirlenen alanlar üzerinde Şekil 24’de gösterilen 2 adet DJI markasına ait Phantom 4 RTK model drone ile hava şartları (yağmur, rüzgâr, sıcaklık vb.) dikkate alınarak farklı gün ve saatlerde yaklaşık olarak 10 saat uçuş yapılmak suretiyle 3B tarama ve hava fotoğraf verileri elde edilmiştir. Yapılan insansız hava aracı uçuşları sonucu toplam 1,552.76 ha alanda ölçüm yapılmıştır.

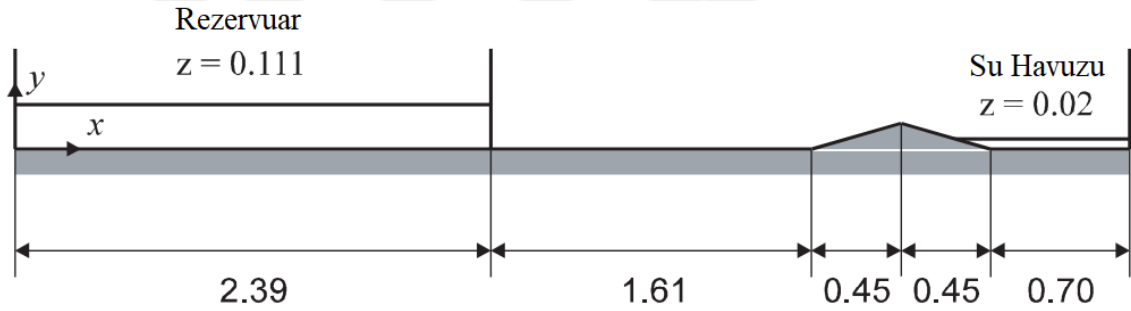


Şekil 24. Çalışmada kullanılan 2 adet DJI – Phantom 4 RTK drone

3.4. Flow 3D Yazılımında Doğrulama Analizinin Modellenmesi

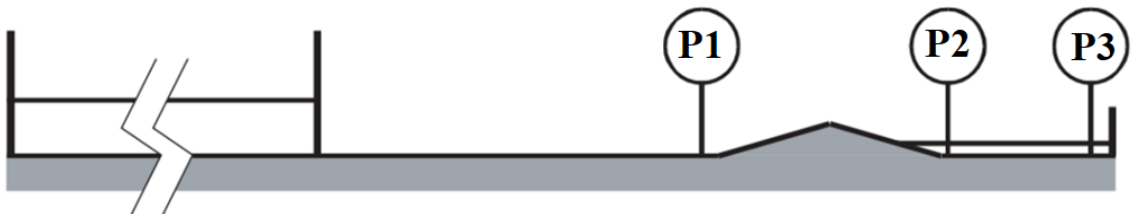
Soares-Frazão (2007) tarafından hazırlanan örnek bir çalışmada, baraj yıkılmaları sonrası, düzensiz kuru alanlarda meydana gelen taşkın yayılımının incelenmesi amacıyla oluşturulan sayısal modellerin, doğrulanmasında kullanılabilecek bir veri seti oluşturulmuştur. Çalışmada, kapak arkasında biriken suyun, üçgen prizma şeklindeki bir eşğin üzerinden aşması ile ani eğim değişiminde gerçekleşen taşkın zaman içindeki gelişimi, kameralar ve su seviyesi ölçen cihazlar kullanılarak incelenmiştir.

Bu amaçla hazırlanan Şekil 25’ de gösterilen deney modelinde, 0.50 m genişliğinde ve 5.6 m uzunluğunda dikdörtgen kesitli cam duvarlı bir kanal tasarlanmıştır. Kanal içinde hazırlanan rezervuar, 2.39 m uzunluğunda olup 0.111 m yüksekliğe kadar su ile doludur. Rezervuardan eşığe kadar uzanan kanalda kuru ortam koşulları geçerlidir. Kanal içerisinde kapaktan 1.61 m uzaklığa yerleştirilen eşğin yüksekliği 0.065 m olup, eşğin şev eğimi 0.14 ve taban genişliği 0.90 m olarak tasarlanmıştır. Eşikten, kanalın akış ucunu kapatan duvara kadar olan bölüme ise 0.02 m yüksekliğinde su eklenmiştir.



Şekil 25. Deney modeli ve başlangıç koşulları (Soares-Frazão, 2007).

Deney düzeneğine yerleştirilen akımı engellemeyen 3 adet hassas seviye ölçer Şekil 26’da gösterilen şekilde konumlandırılmıştır. Seviye ölçerler ile su yükseklikleri ölçülürken, kameralarla yapılan görüntüleme ile de su yüzü profilleri elde edilmiştir.



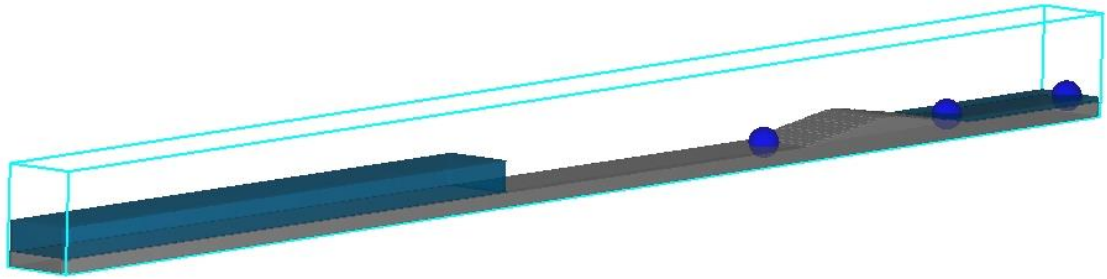
Şekil 26. Ölçüm noktası konumları (Soares-Frazão, 2007).

Deneyde kullanılan seviye ölçerlerin rezervuarın başlangıç konumundan ($x=0$) uzaklıkları Tablo 7’de gösterilmiştir.

Tablo 7. Seviye ölçüm noktaları

Derinlik Ölçer Noktası	x (m)
P1	3.935
P2	4.925
P3	5.575

Soares-Frazao (2007) tarafından hazırlanan fiziksel deney, aynı koşulların temsil edilebilmesi ve deney sonuçlarıyla karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla, FLOW 3D yazılımında sayısal olarak tasarlanmıştır. Flow 3D yazılımında sayısal olarak taşkınını incelenebilmesi ve deney sonuçlarıyla karşılaştırılabilmesi amacıyla, Tablo 7’de verilen konumlara probe noktaları atanmıştır.



Şekil 27. Flow 3D’de oluşturulan deney modeli

Flow 3D yazılımında sayısal analizlerin gerçekleştirilebilmesi için gerekli olan çözüm ağları; 2 boyutlu analiz için x ve y eksenlerinde 0.05 m x 0.05 m, 3 boyutlu analiz için x, y ve z doğrultularında 0.05 m x 0.05 m x 0.001 m olarak seçilmiştir. Buna bağlı olarak deney modelini doğru temsil edebilecek sayıda, 2 boyutlu simülasyonda 1,120.00 ve 3 boyutlu simülasyonda 20,384.00 çözüm ağı hücresi belirlenmiştir.

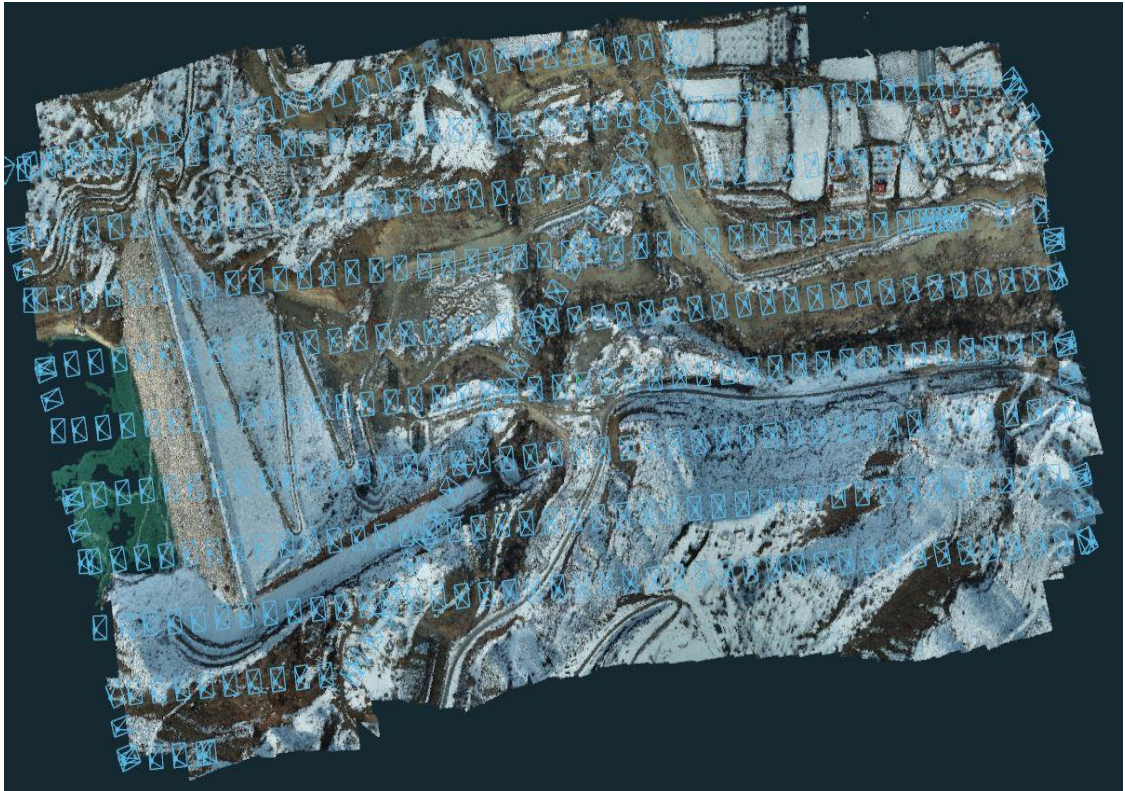
Simülasyonda türbülans modeli olarak, tüm çalışmada kullanılan RNG k-ε modeli seçilmiştir. Oluşturulan sayısal model üzerinden gerçekleştirilen analizlerinden elde edilen sonuçlar ile deney modeli sonuçları, Bulgular ve Tartışma bölümünde karşılaştırmıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

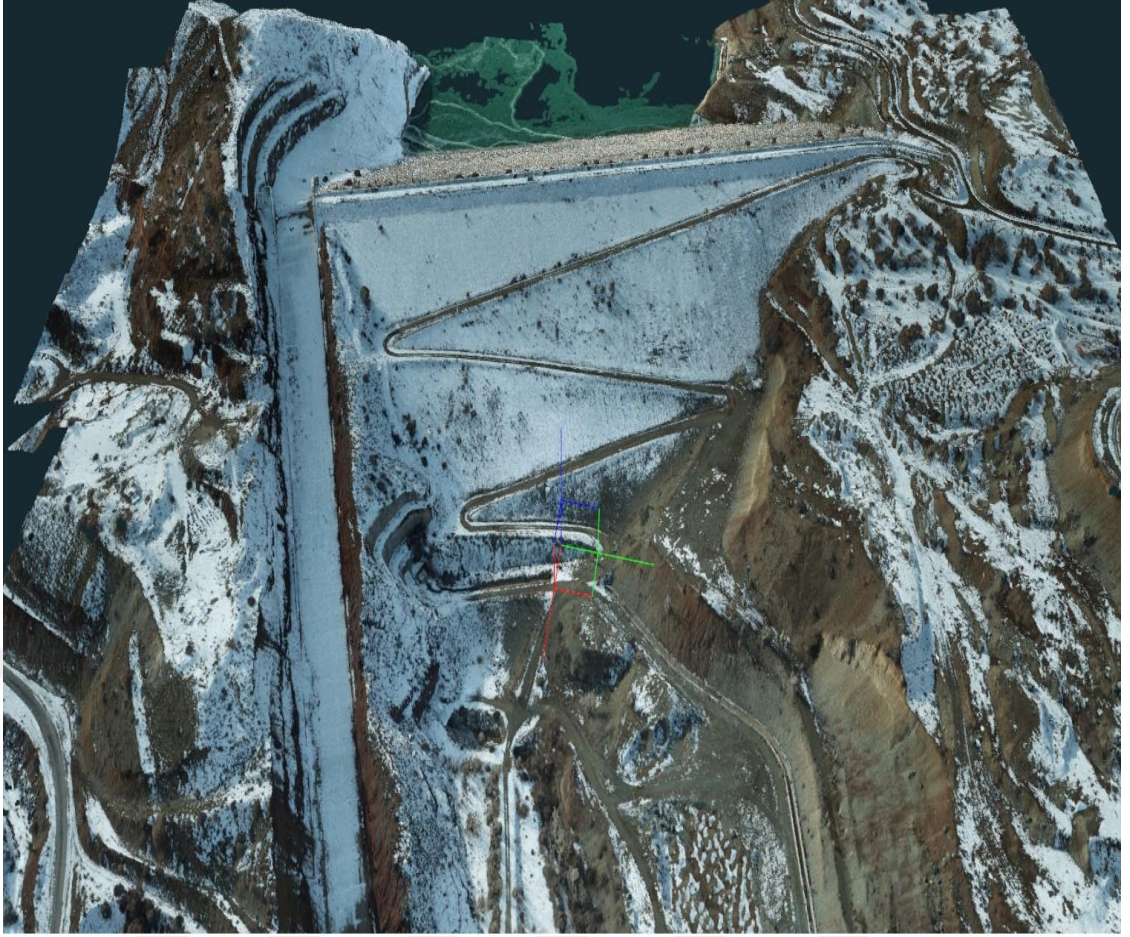
4.1. Çalışma Alanına Ait Havadan Tarama Verilerinin Elde Edilmesi

Çalışma alanı üzerinde, 2 adet DJI marka Phantom 4 RTK model insansız hava aracı ile yapılan 10 saat uçuş sonucu taranan 1,552.76 hektarlık alanın 3B tarama verileri ve hava fotoğrafları elde edilmiştir. Elde edilen hava fotoğrafları ve tarama verileri bilgisayar (workstation) ortamına aktarılmıştır.

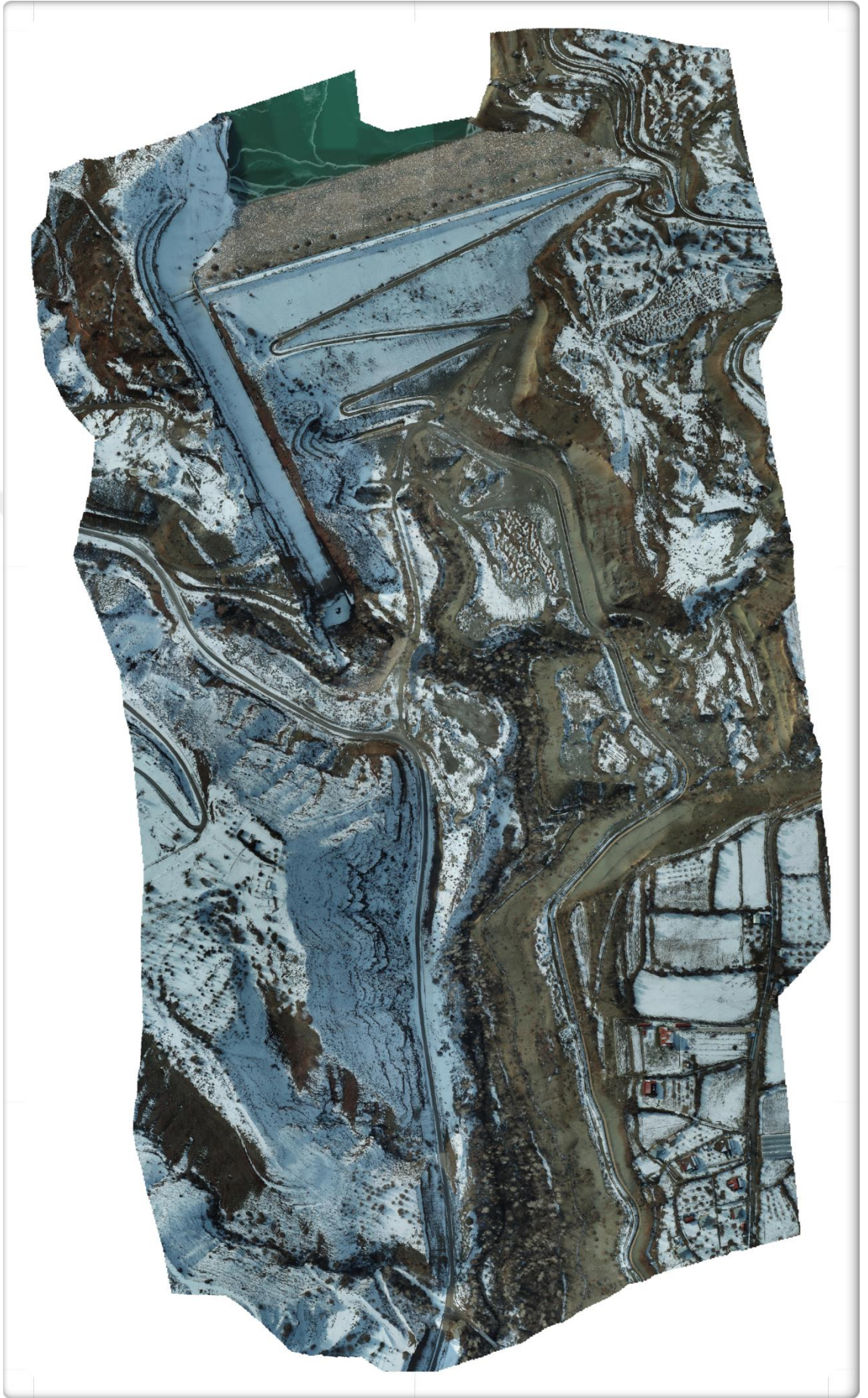
Aktarılan veriler 3D Survey programında değerlendirilerek, nokta bulutu, eş yükselti eğrileri, düzensiz üçgenleştirilmiş ağ modeli ile çalışma alanının 3B sayısal yükseklik modeli elde edilmiştir. 10 kısma bölünmüş olan çalışma alanının örnek olarak 1. bölümünde dronun gerçekleştirmiş olduğu uçuş planı Şekil 28’de ve 3D survey programında elde edilen tarama verileri sonucu oluşturulan baraj gövdesini içeren 1. bölümün sayısal yükseklik modeli Şekil 29’da gösterilmektedir. Bununla birlikte 3D Survey programında 2. bölümden 10. bölüme kadar olmak üzere hazırlanan sayısal yükseklik modelleri Şekil 30, Şekil 31, Şekil 32, Şekil 33, Şekil 34, Şekil 35, Şekil 36, Şekil 37, Şekil 38 ve Şekil 39’da gösterilmiştir.



Şekil 28. Çalışma alanının 1. bölümünde gerçekleştirilen uçuş planı ve elde edilen sayısal model



Şekil 29. Baraj gövdesinin sayısal yükseklik modeli



Şekil 30. 1. bölümünün sayısal yükseklik modeli



Şekil 31. 2. bölümünün sayısal yükseklik modeli



Şekil 32. 3. bölümünün sayısal yükseklik modeli



Şekil 33. 4. bölümünün sayısal yükseklik modeli



Şekil 34. 5. bölümünün sayısal yükseklik modeli



Şekil 35. 6. bölümünün sayısal yükseklik modeli



Şekil 36. 7. bölümünün sayısal yükseklik modeli



Şekil 37. 8. bölümünün sayısal yükseklik modeli



Şekil 38. 9. bölümünün sayısal yükseklik modeli

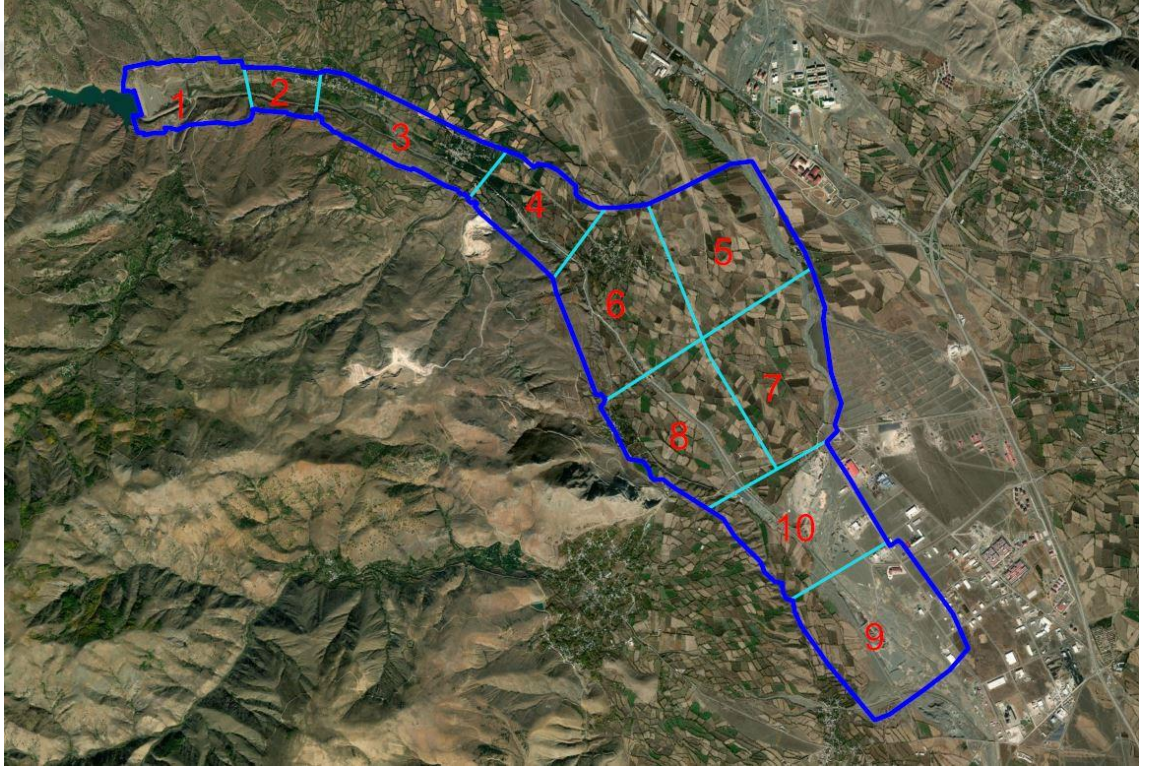


Şekil 39. 10. bölümünün sayısal yükseklik modeli

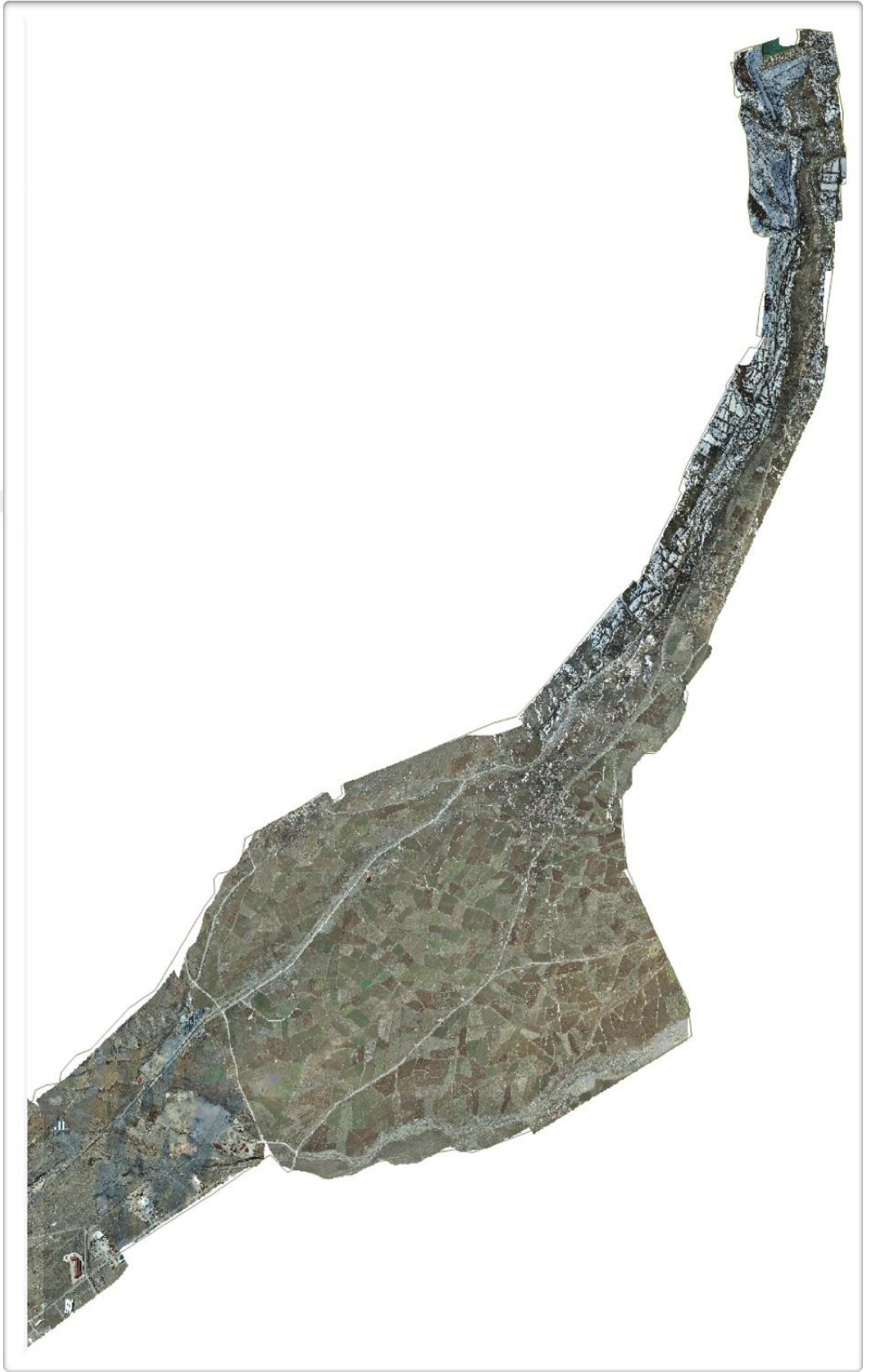
4.2. Sayısal Yükseklik Modeli ve Katı Cisim Modelinin Oluşturulması

Havadan ölçüm çalışmaları sonucu, Şekil 40'da gösterilen 10 parça halinde yüksek çözünürlük düzeyinde elde edilen alanların, 3D Survey yazılımında birleştirilmesi ile Şekil 41'de gösterilen ve aynı yüksek hassasiyete sahip sayısal yükseklik modeli elde edilmiştir.

Elde edilen sayısal yükseklik modeli; baraj gövdesi de dahil olmak üzere muhtemel taşkın yayılım bölgesi içerisinde yer alan risk altındaki alanları içermektedir. Erzincan Barajı'nın olası yıkılma senaryosu durumunda oluşacak taşkın yayılım alanı içerisinde bulunan yerleşim yerleri, yollar, binalar, tarım arazileri ve organize sanayi bölgesinde yer alan sanayi yapıları sayısal yükseklik modeli içerisinde hassas bir şekilde temsil edilmektedir.

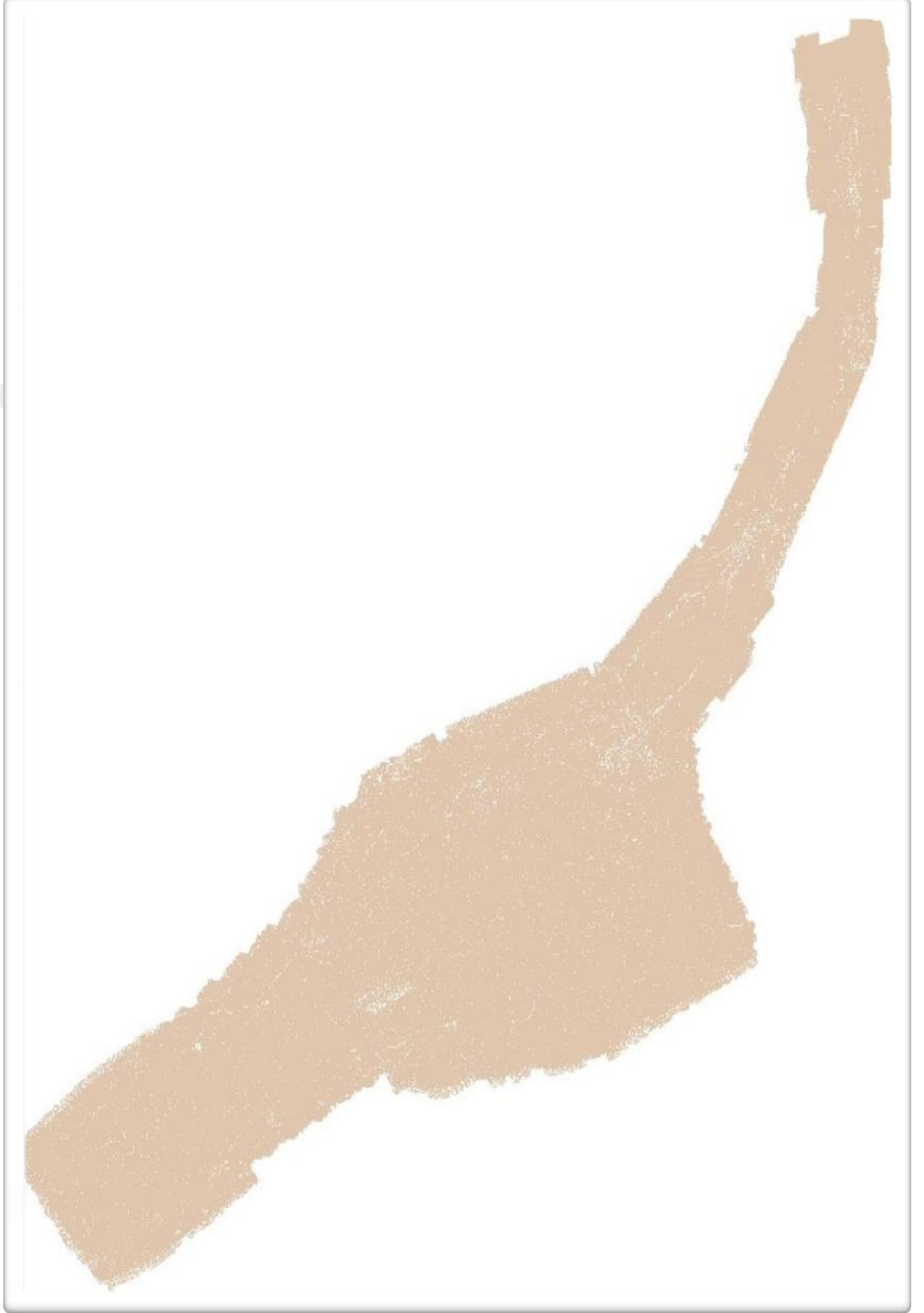


Şekil 40. Çalışma alanının bölüm numaraları



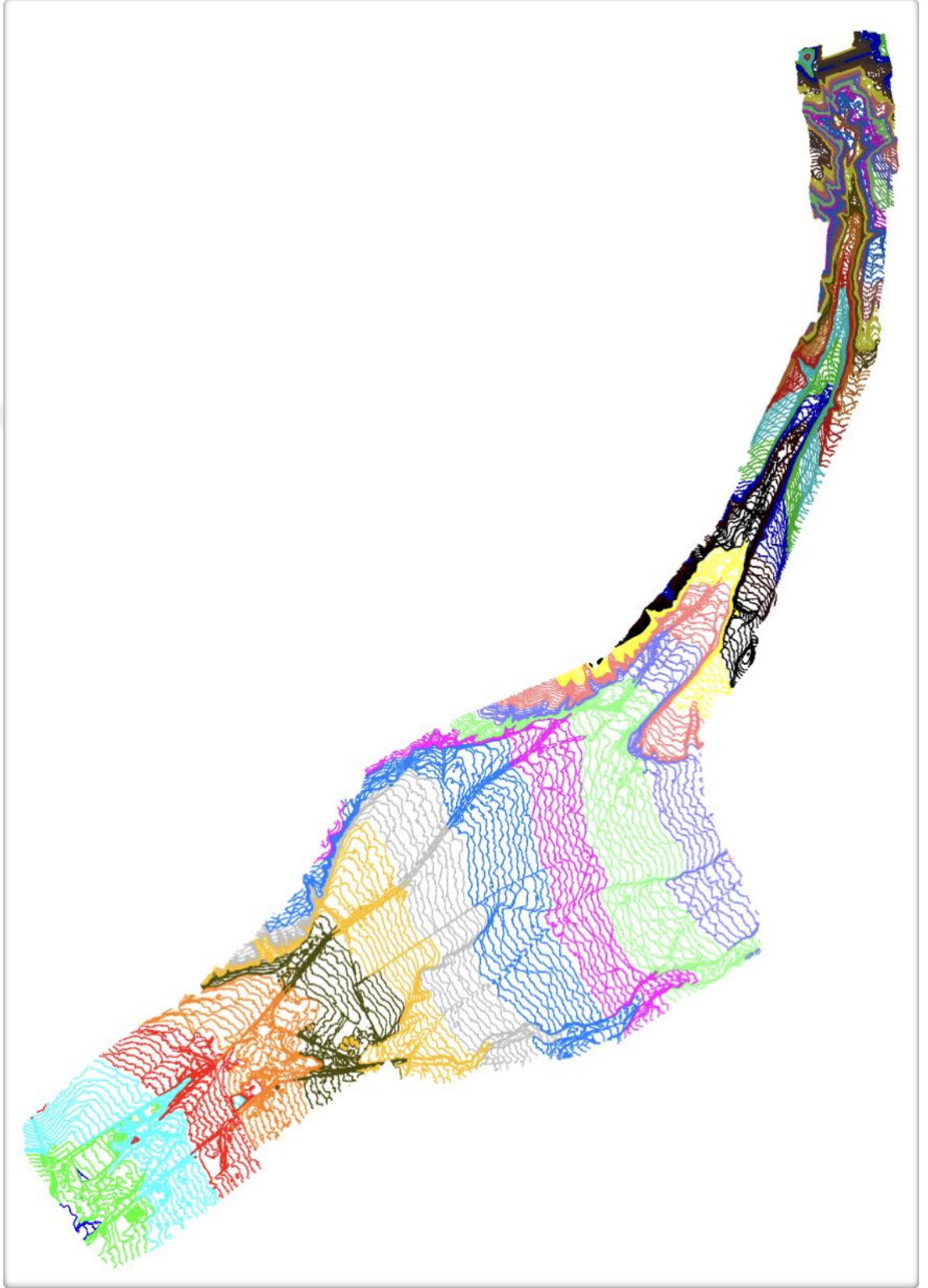
Şekil 41. Çalışma alanının sayısal yükseklik modeli

Düzenlenen sayısal yükseklik modelinin 265 milyon üçgenden oluşan düzensiz üçgensel ağ modeli de elde edilmiş olup Şekil 42’de gösterilmiştir.



Şekil 42. Çalışma alanının düzensiz üçgensel ağ modeli

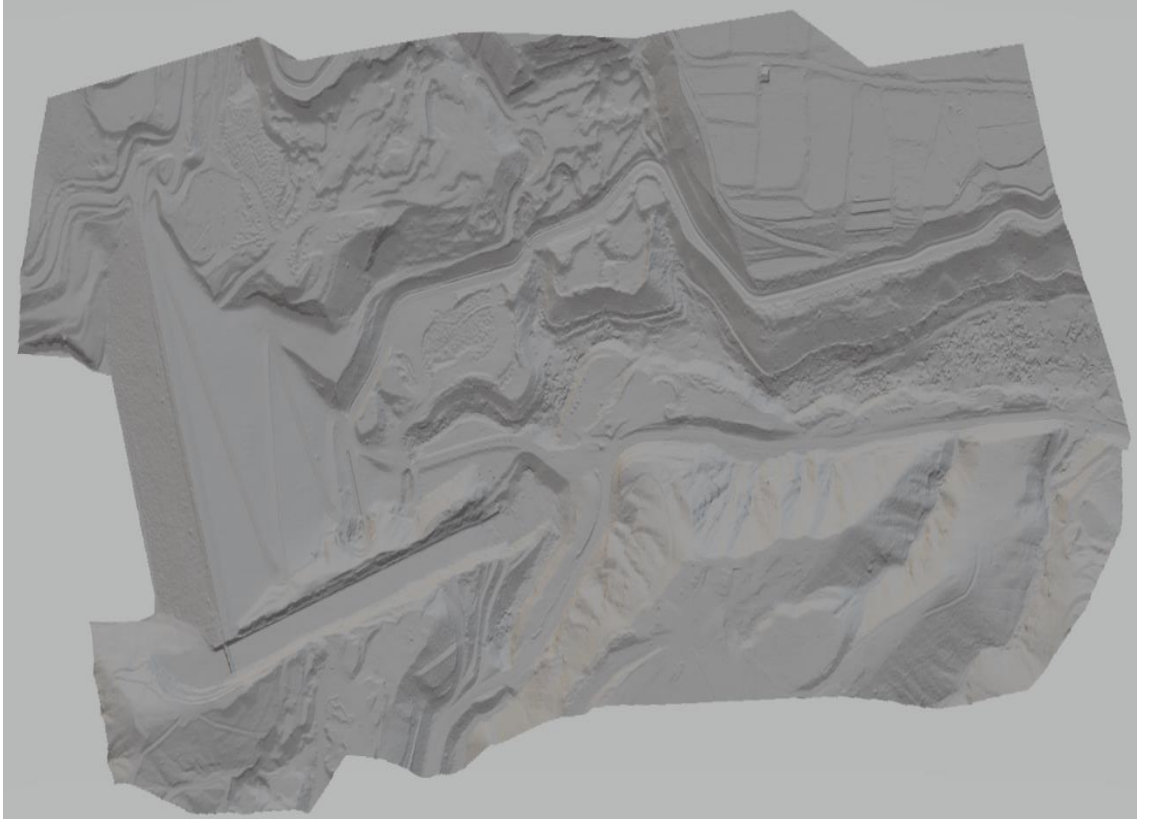
Düzenlenen sayısal yükseklik modeli Netcad yazılımında işlenerek Şekil 43.'de gösterilen eş yükselti eğrileri elde edilmiştir.



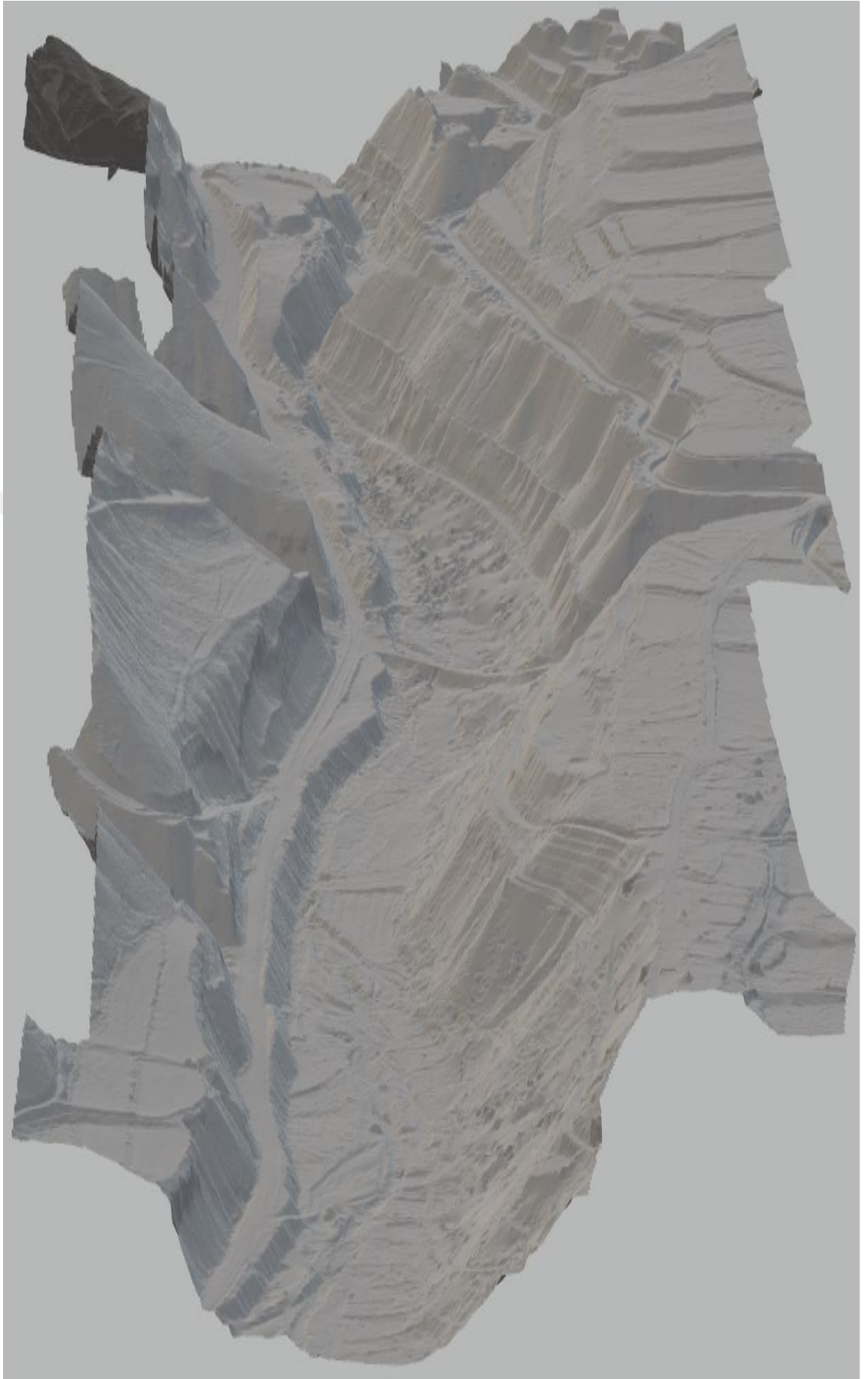
Şekil 43. Çalışma alanının eş yükselti eğrileri

Flow 3D yazılımında, baraj yıkılması sonucu taşkın yayılımının, sayısal olarak analiz edilebilmesi için nokta bulutu ve üçgensel ağlardan oluşan sayısal yükseklik modelinin, katı cisim modeline dönüştürülmesi gerekmektedir. Böylece nokta bulutu üzerinden yayılım sağlaması mümkün olmayan akışın, katı cisim modeli üzerinden akarak yayılabileceği, katı ve geçirimsiz bir yüzey teşkil edilmelidir.

Bu amaçla daha önce 3D Survey programında işlenerek elde edilmiş olan çalışma alanının sayısal yükseklik modeli, Flow 3D yazılımına yüklenebilecek şekilde katı cisim modeline dönüştürülmüştür. Yazılım ve kullanılan bilgisayarın işlem kapasitesi, Şekil 41’de gösterilen çalışma alanının tamamının sayısal yükseklik modelini tek seferde dönüştürmeye imkân vermemektedir. Bu nedenle 10 kısımdan oluşan çalışma alanının her bir bölümü ayrı ayrı katı cisim modeline dönüştürülmüştür. 10 kısım halinde üretilen tüm katı cisim modelleri Şekil 44, Şekil 45, Şekil 46, Şekil 47, Şekil 48, Şekil 49, Şekil 50, Şekil 51, Şekil 52 ve Şekil 53’de gösterilmiştir.



Şekil 44. 1. kısmın katı cisim modeli



Şekil 45. 2. kısmın katı cisim modeli



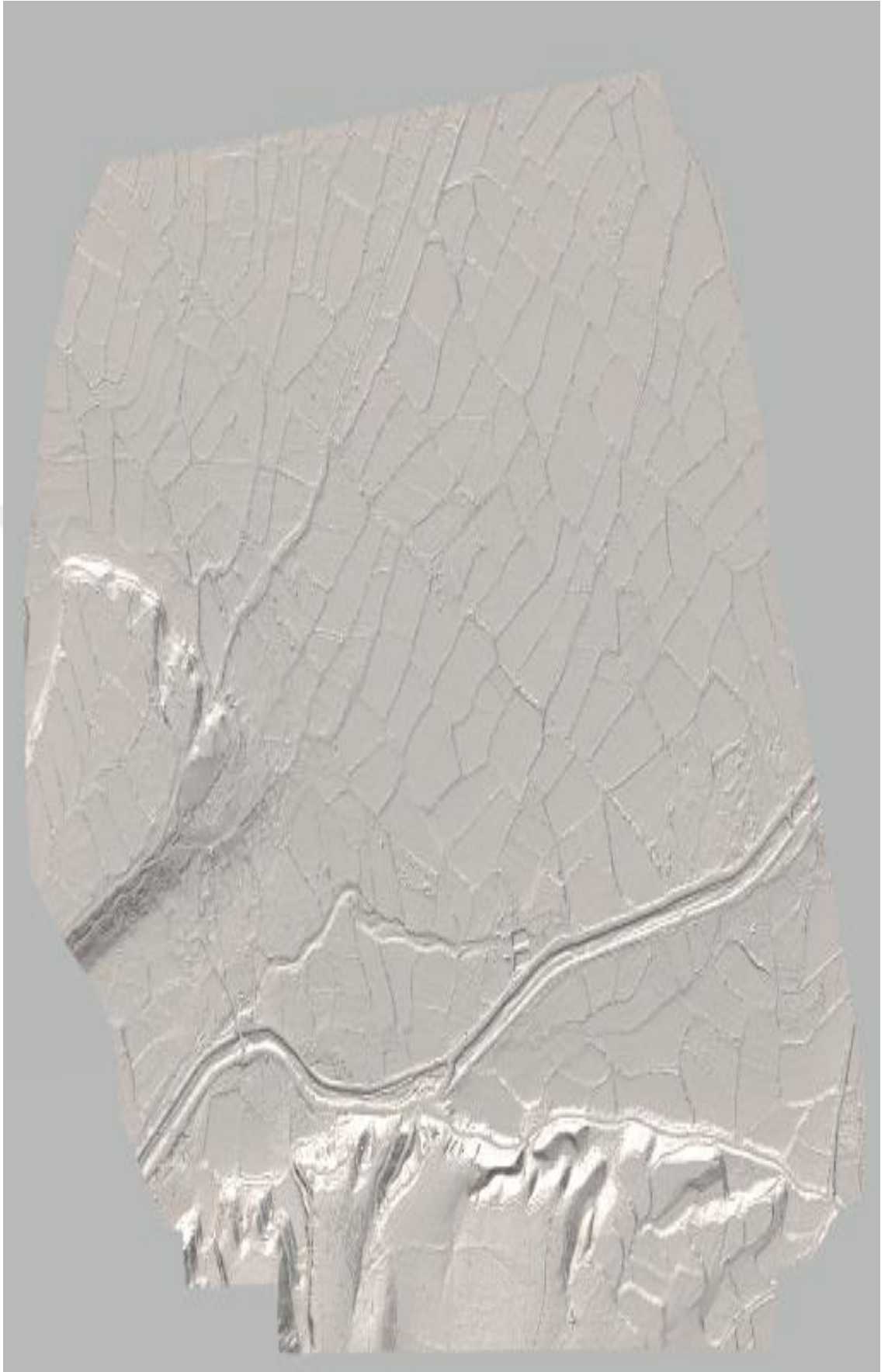
Şekil 46. 3. kısmın katı cisim modeli



Şekil 47. 4. kısmın katı cisim modeli



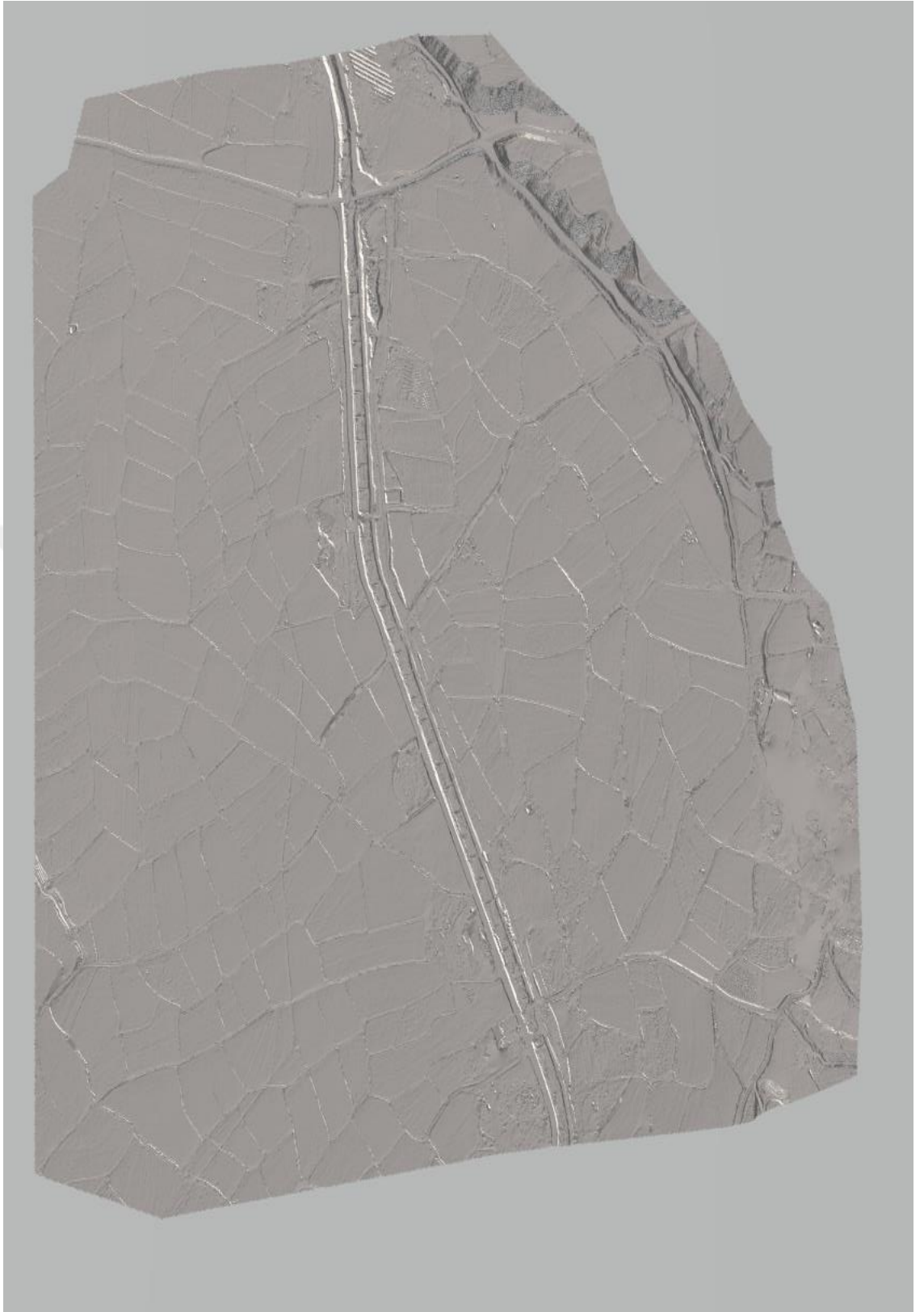
Şekil 48. 5. kısmın katı cisim modeli



Şekil 49. 6. kısmın katı cisim modeli



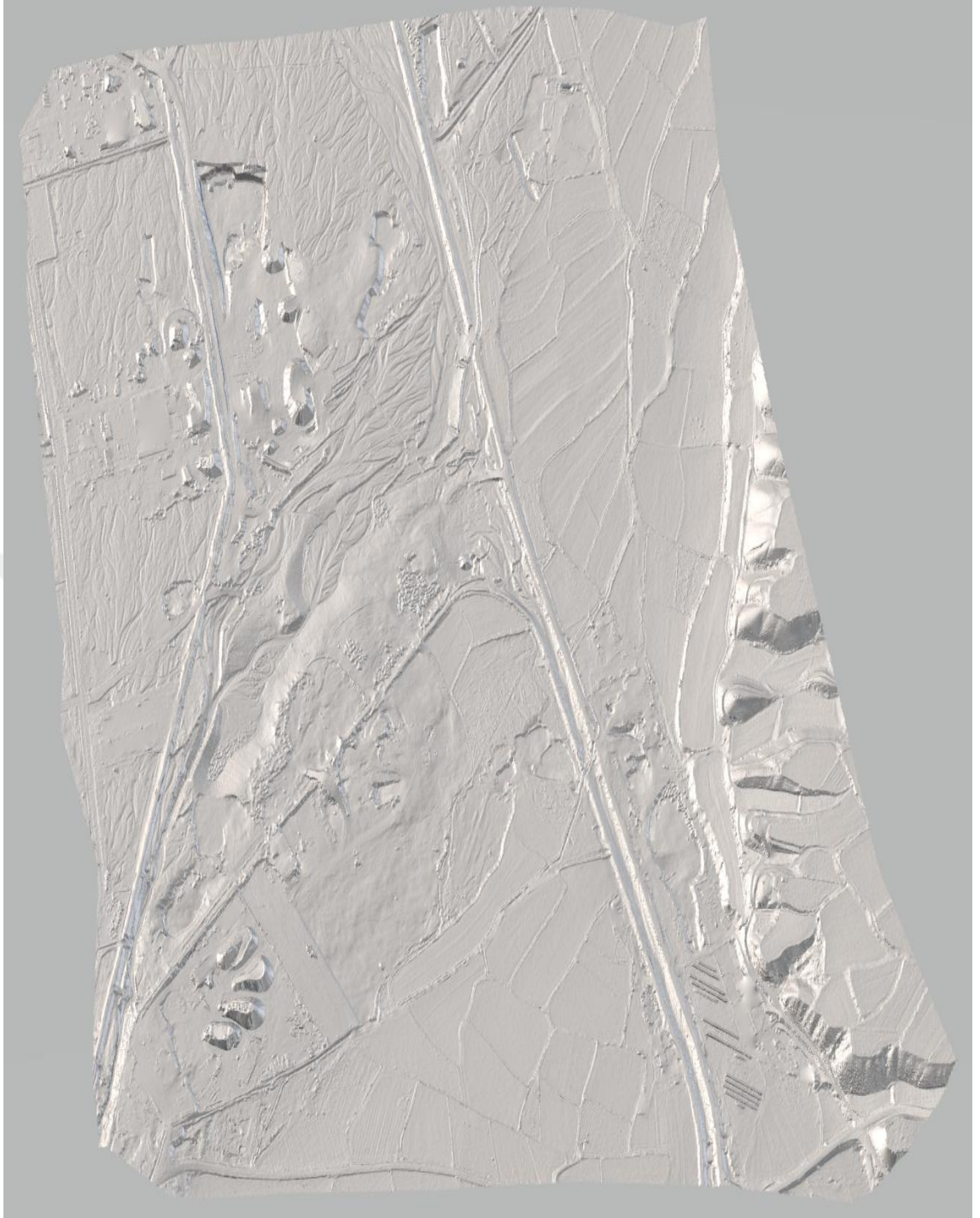
Şekil 50. 7. kısmın katı cisim modeli



Şekil 51. 8. kısmın katı cisim modeli



Şekil 52. 9. kısmın katı cisim modeli



Şekil 53. 10. kısmın katı cisim modeli

4.3. Gedik Parametrelerinin Belirlenmesi

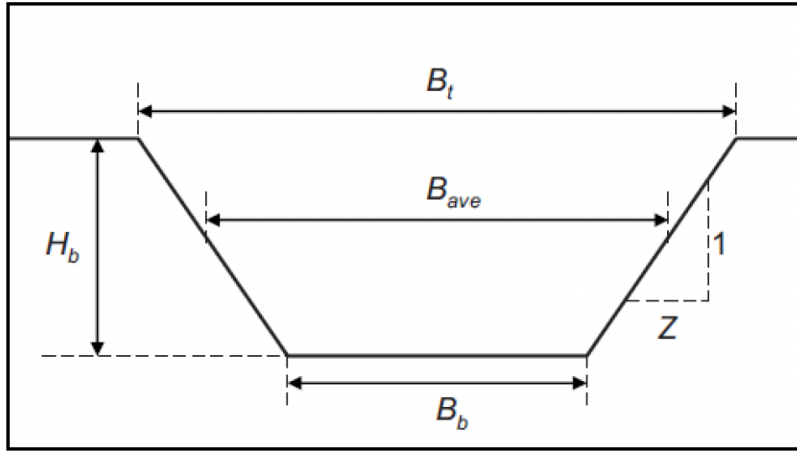
Baraj yıkılmaları ile ilgili yapılmış olan çalışmalarda; baraj yıkılmalarının, genellikle aşırı yağışlar sonucu meydana gelen katastrofik akışın, gövde kret kotunu aşması (üstten aşma) ile dolgu malzemesinin akışla birlikte taşınımı sonucu meydana geldiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte, baraj gövdesinin dolgu malzemesinde meydana gelen su sızıntısının (borulanma) kademeli olarak artması ile baraj gövdesinde oluşan gediğin baraj bütünlüğünü bozması sonucu meydana geldiği de bilinmektedir. İstatistiksel

olarak baraj yıkılmalarının %70.90 oranında üstten aşma, %14.30 oranında ise borulanma sonucu meydana geldiği belirtilmiştir.

Üstten aşma ya da borulanma sonucu oluşan gediğin; konumunun, geometrik özelliklerinin ve oluşum süresinin doğru tahmin edilmesi, oluşacak pik debinin, taşkın hidrografının ve taşkın yayılımının doğru temsil edilebilmesi açısından çok kritik bir öneme sahiptir.

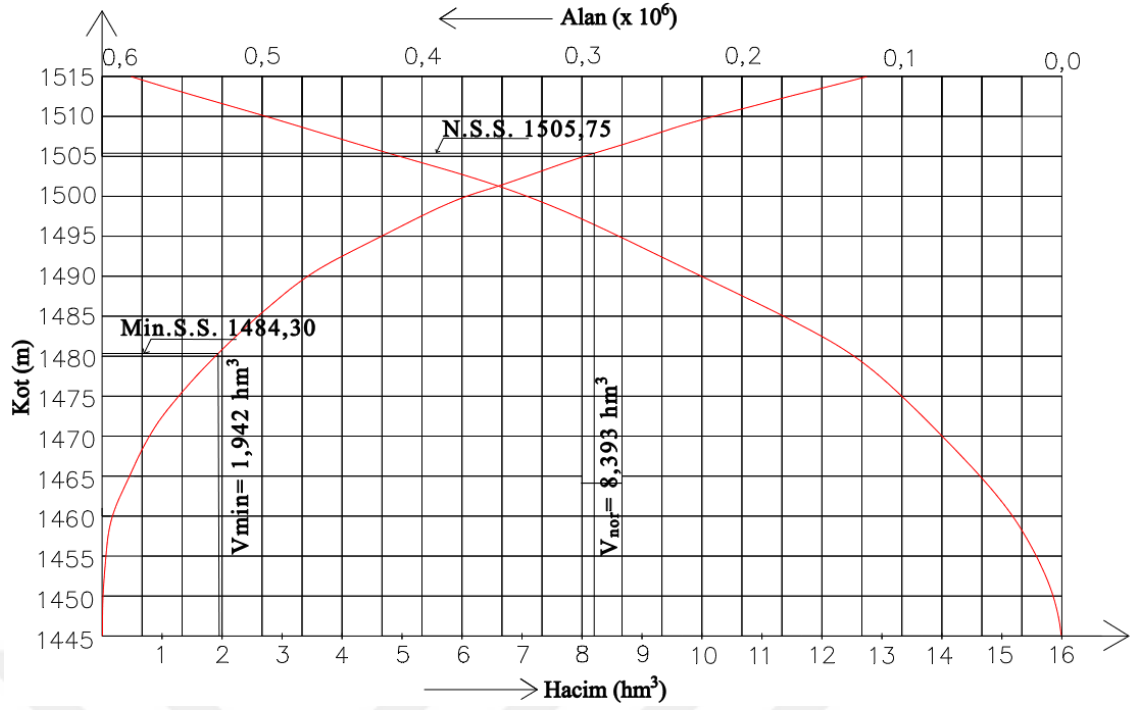
Gedik parametrelerinin belirlenmesi amacıyla, tarihsel süreç içerisinde yaşanmış olan baraj yıkılmalarından elde edilen veriler üzerinden, regresyon denklem grupları geliştirilmiştir. Geliştirilen birçok ampirik yaklaşım arasından, en çok tercih edilen yaklaşımlar, MacDonald ve Langridge-Monopolis, Singh ve Snorrason, Froehlich, Von Thun ve Gillete ile Xu ve Zhang tarafından geliştirilen denklem kümeleridir (Lamichhane ve Sharma, 2017; Saberi ve Zenz, 2015; Sammen vd., 2017).

Baraj gövdesinde oluşan gedik şekli genellikle trapez şeklinde görülmektedir. Buna bağlı olarak gediğin geometrik özellikleri Şekil 54’de gösterilen yarık derinliğine (H_b), tepe genişliğine (B_t), alt genişliğine (B_b), gedik yüksekliğine (H_b) ve kenar eğimine (Z) bağlı olarak hesaplanmaktadır (Froehlich, 1995, 2008; MacDonald ve Langridge-Monopolis, 1984; Xu ve Zhang, 2009).



Şekil 54. Ampirik yaklaşımlarda hesaplanan gedik parametreleri (Xu ve Zhang, 2009).

Erzincan Barajı’nın Tablo 5’de gösterilen karakteristik bilgileri ve Şekil 55’de gösterilen Erzincan Barajı rezervuar alanı hacim – satıh eğrisi kullanılarak, olası baraj yıkılması durumunda oluşacak gediğin geometrik özellikleri, literatürde en çok kullanılan gedik oluşum tahmin yöntemleri kullanılarak elde edilmiştir. Ayrıca seçilen ampirik yaklaşımlar, HEC-RAS programında, seçenek olan yer alan entegre şekilde kullanılabilen yaklaşımlardır.



Şekil 55. Erzincan Barajı rezervuar alanı hacim – satıh eğrisi

Tablo 5’de Erzincan Barajı karakteristik özellikleri dikkate alındığında, maksimum su kotunda (1,511.92 m) rezervuar hacmi değeri 12.1888 hm³ olarak belirtilmiştir. Ayrıca Şekil 55’ de yer alan hacim – satıh eğrilerinde, 1450 kotunda rezervuar hacminin 0 hm³ olduğu görülmektedir. Böylece; gedik oluşum süresince gedikten geçen su miktarı (V_w), (Eşitlik 50 yardımıyla, gedik yüksekliği (h_b) ise (Eşitlik 51 kullanılarak elde edilmiştir.

$$V_w = V_{1511,90} - V_{1450} = (12,188,800.00 - 0.00) = 12,188,800.00 \text{ m}^3 \quad (\text{Eşitlik 50})$$

$$h_b = 1,511.92 - 1,450.00 = 61.92 \text{ m} \quad (\text{Eşitlik 51})$$

Froehlich (1995) yaklaşımına göre üstten aşma sonucu trapez gedik oluşumunda ortalama gedik genişliği (B_{ave}), (Eşitlik 52 ile elde edilmiştir.

$$B_{ave} = 0.1803 \times 1.4 \times 12,188,800.00^{0.32} \times 61.92^{0.19} = 102.35 \text{ m} \quad (\text{Eşitlik 52})$$

Gedik ortalama genişliği hesabında kullanılan farklı ampirik eşitlikler yardımıyla, Erzincan Barajı’nın olası yıkılma senaryosunda oluşacak gedğin, üstten aşma ve borulanma senaryosu dikkate alınarak elde edilen sonuçlar Tablo 8’de gösterilmiştir.

Tablo 8. Farklı gedik oluşum yaklaşımlarına göre elde edilen gedik ortalama genişlikleri

Yöntem	Eşitlik	Eşitlik No	Gedik Ortalama Genişliği (B _{ave})	
			Üstten Aşma	Borulanma
Von Thun ve Gillette (1990)	$B_{ave} (m) = 2.5h_w + C_b$	(Eşitlik 9)	197.50 m	
Froehlich (1995)	$B_{ave} (m) = 0.1803k_0 V_w^{0.32} h_b^{0.19}$	(Eşitlik 13)	102.35m	73.11m
Froehlich (2008)	$B_{ave} (m) = 0.27k_0 V_w^{1/3}$	(Eşitlik 17)	76.50m	58.85m
Xu ve Zhang (2009)	$\frac{B_{ave}}{H_b} = 0.787 \left(\frac{H_d}{H_r} \right)^{0.133} \left(\frac{V_w^{1/3}}{H_w} \right)^{0.652} e^{B_3}$	(Eşitlik 23)	83.83m	49.03m

Ayrıca farklı ampirik yaklaşımlar kullanılarak, Erzincan Barajı'nın olası yıkılma senaryosu kapsamında, ortaya çıkacak gediğin oluşum süresi, yine üstten aşma ve borulanma senaryosuna göre elde edilmiş olup Tablo 9'de gösterilmiştir.

Tablo 9. Farklı gedik oluşum yaklaşımlarına göre elde edilen gedik oluşum süreleri

Yöntem	Eşitlik	Eşitlik No	Gedik Oluşum Süresi (t _f)	
			Üstten Aşma	Borulanma
Von Thun ve Gillette (1990)	$t_f = \frac{B_{ave}}{4h_w}$	(Eşitlik 11)	0.64 s	
Froehlich (1995)	$t_f = 0.00254 V_w^{0.53} h_b^{-0.90}$	(Eşitlik 16)	0.35 s	
Froehlich (2008)	$t_f = 0.0176 \sqrt{\frac{V_w}{gh_b^2}}$	(Eşitlik 20)	0.32 s	
Xu ve Zhang (2009)	$\frac{T_f}{T_r} = 0.304 \left(\frac{H_d}{H_r} \right)^{0.707} \left(\frac{V_w^{1/3}}{H_w} \right)^{1.228} e^{B_5}$	(Eşitlik 25)	1.03 s	0.99 s

Tablo 8'de gösterilen farklı gedik oluşum yaklaşımlarına göre gedik ortalama genişliği yönünden en büyük değerin, Von Thun ve Gillette (1990) yaklaşımında meydana geldiği görülmektedir. Ancak bu yaklaşıma ait hesaplamalarda, gedik oluşum nedeninin, üstten aşma ya da borulanma kaynaklı olup olmadığı hususunda bir ayırım yapılmamaktadır. Bu eksiklik nedeniyle Von Thun ve Gillette (1990) yönteminin literatürde yaygın olarak kullanılmadığı görülmektedir. Dolayısıyla çalışmada, gedik ortalama genişliğinin belirlenmesinde bu yöntem tercih edilmemiştir.

İkinci büyük B_{ave} değeri, Froehlich (1995) yöntemi ile üstten aşma senaryosunda oluşan 102.35 m değeridir.

Bununla birlikte; gedik oluşum süreleri Froehlich (2008) yaklaşımında 0.32 saat ve Froehlich (1995) yaklaşımında 0.35 saat olmak üzere birbirine yakın değerler olarak elde edilmiştir. Diğer yaklaşımlarda ise gedik oluşum süresi sonuçları, daha uzun süreler olarak ortaya çıkmıştır. Gedik oluşum süresi ne kadar kısa ise taşkın oluşumu da o kadar ani ve yıkıcı olacaktır. Buna bağlı olarak en olumsuz koşulların dikkate alındığı çalışmada, en kısa gedik oluşum süresinin analizlerde kullanılmasına önem verilmiştir. Froehlich (1995) ve Froehlich (2008) yaklaşımlarından elde edilen gedik oluşum süreleri, birbirine oldukça yakın değerler olduğundan asıl karşılaştırma, ortalama gedik genişliği değeri üzerinden yapılmıştır. Tüm bu karşılaştırma ve değerlendirmeler sonucunda, çalışmada, Froehlich (1995) yöntemine göre hesaplanan gedik parametreleri esas alınmıştır.

Ayrıca literatürde yer alan gerek deneysel gerekse sayısal çalışmalar sonucunda, Froehlich (1995) yönteminin, diğer yaklaşımlar arasında, en iyi tahmin başarısını gösterdiği ve güvenilir sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Hassasiyet aralığı da oldukça düşük olduğundan gedik tahmin parametrelerinin hesabında bu yaklaşımın kullanılması tavsiye edilmiştir (Aydemir ve Güven, 2017; Kocaman, 2019; Marangoz, 2020; Shahrin ve Ros, 2020b; Wahl, 2004).

Diğer taraftan literatürle uyumlu olarak, tüm yaklaşım sonuçları karşılaştırıldığında, üstten aşma sonucu meydana gelen ortalama gedik genişliği değerlerinin, borulanmaya kıyasla daha büyük değerler aldığı görülmektedir.

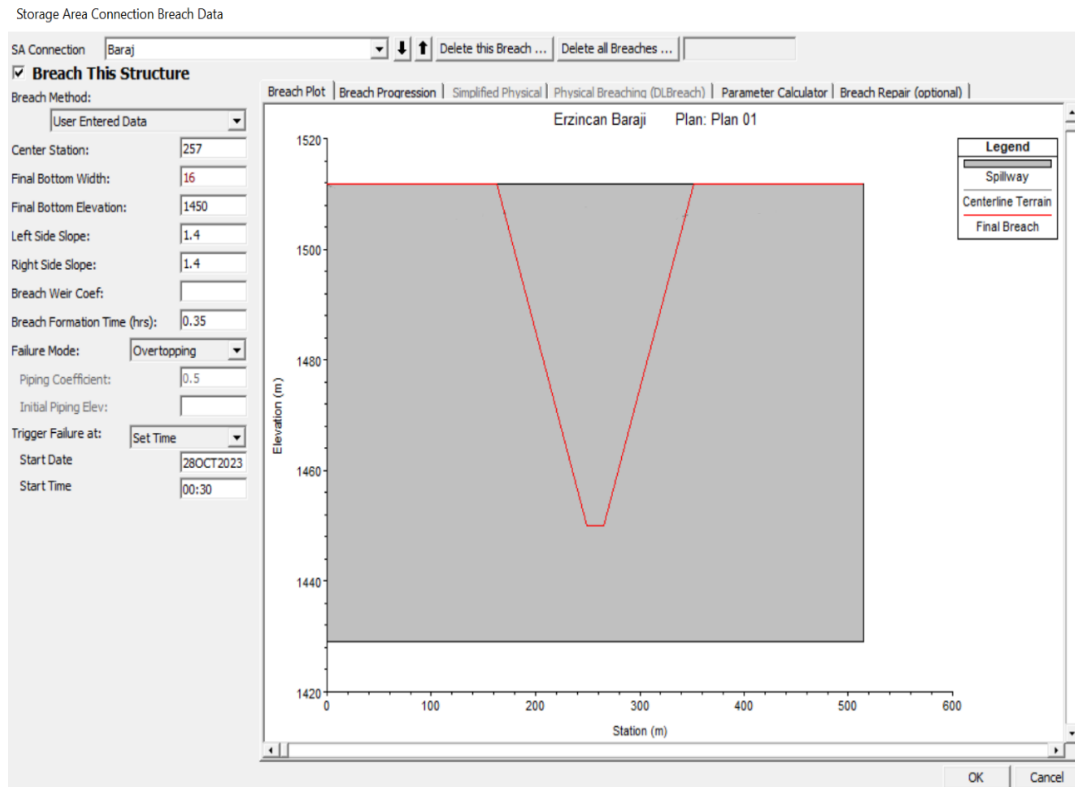
Sonuç olarak, farklı gedik oluşum eşitliklerinden elde edilen sonuçlara göre en büyük ortalama gedik genişliği değeri Froehlich (1995) yaklaşımı ile üstten aşma sonucu elde edilmiştir. Ayrıca Froehlich (1995) yaklaşımı literatürde yaygın olarak kullanılmakla birlikte, benzer çalışmalarda kullanılması da tavsiye edilmiştir. Gedik parametrelerinin en doğru şekilde tanımlanması ile gövdede meydana gelecek taşkın hidrografı doğru bir şekilde elde edilebilecektir. Bunun sonucu olarak baraj yıkılma analizi, gerçeğe yakın bir hassasiyetle gerçekleştirilebilecektir. Pek çok açıdan olumlu yönleriyle öne çıkan Froehlich (1995) yaklaşımı ile elde edilen gedik parametreleri, taşkın hidrografının elde edilmesi aşamasında bu çalışmada tercih edilmiştir. Ayrıca baraj yıkılmalarına neden olan borulanmalar genellikle yapısal kusurlar nedeniyle meydana gelmektedir. Erzincan Barajı ise yaklaşık 30 yıldır herhangi bir yapısal kusur emaresi göstermeden sorunsuz bir şekilde işlev göstermektedir. Dolayısıyla, Erzincan Barajı için yapısal kusur kaynaklı olarak oluşabilecek borulanma riskinin oldukça düşük olduğu düşünülmektedir. Bu husus,

çalışmada yapılan analizlerde üstten aşma senaryosunun seçilmesinde etkili olan bir diğer önemli nedendir. Bununla birlikte Şekil 5.'de gösterildiği gibi üstten aşma sonucu yıkılmış olan barajların diğer yıkılma türlerine nazaran daha yüksek bir oran göstermesi de çalışmada üstten aşma senaryosunun dikkate alınmasında etkili olmuştur.

4.4. HEC-RAS Yazılımında Gedik Modelinin Oluşturulması

Flow 3D yazılımında gerçekleştirilecek olan taşkın yayılım analizinde başlangıç koşulu olarak tanımlanacak olan, baraj gövde aksında meydana gelen taşkın hidrografi HEC-RAS yazılımı vasıtasıyla elde edilmiştir.

Erzincan Barajı karakteristik bilgileri ve hacim satıh eğrileri kullanılarak HEC-RAS programında baraj gövde modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan gövde modeli üzerinde tanımlanan trapez gediğin geometrisi Froehlich (1995) eşitliklerinden elde edilen sonuçlara dayanmaktadır. Gedik taban kotu 1,450.00 m, şev eğimi 1.4 olarak tespit edilen gedik modelinde, ortalama gedik genişliği 102.35 m, gedik yüksekliği 61.92 m olarak hesap edilmiştir. Buna bağlı olarak trapez gediğin, üst genişliği 188.70 m ve alt genişliği 16 m olarak elde edilmiştir. Şekil 56'de gösterilen ve HEC-RAS yazılımında oluşturulan gri renkli alan, baraj gövdesini temsil etmektedir. Baraj gövdesi üzerinde oluşacağı varsayılan trapez geometrideki gedik ise kırmızı çizgi ile gösterilmiştir.



Şekil 56. Baraj gövdesi ve gedik oluşum modeli

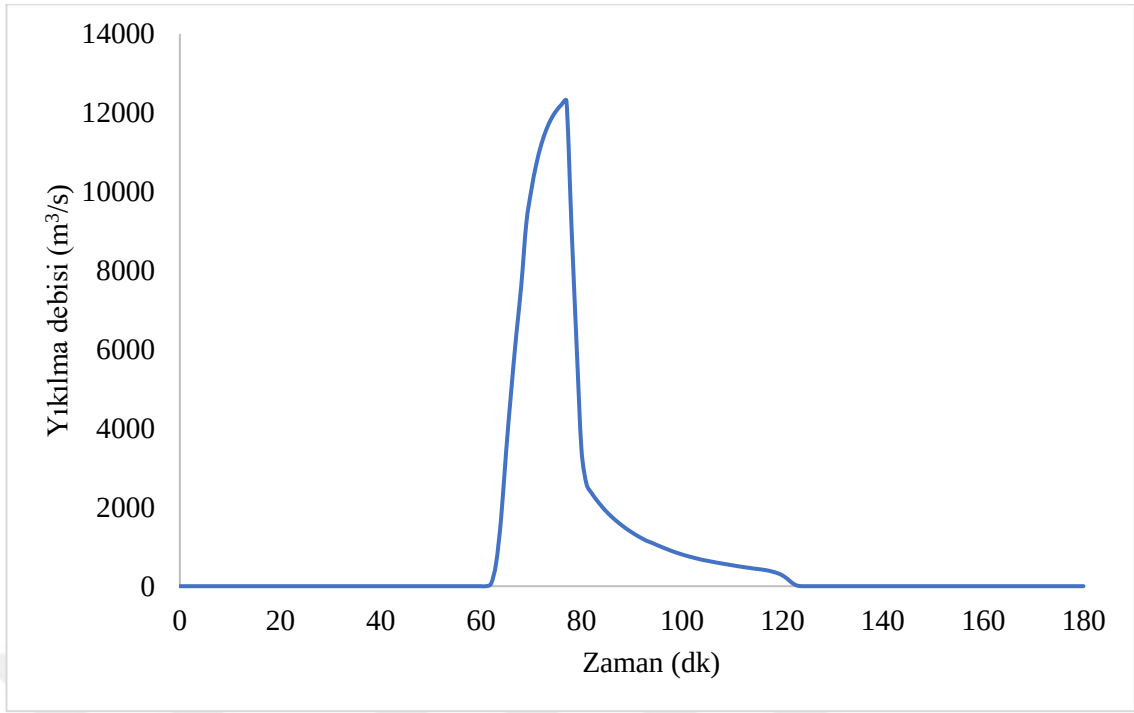
4.5. HEC-RAS Yazılımında Taşkın Hidrografının Elde Edilmesi

Gedik geometrisi, taşkın hidrografından elde edilen pik debi üzerinde etkili olsa da gedik geometrisinden daha önemli olan unsur, baraj rezervuarının geometrik ve topoğrafik yapısıdır. Rezervuarın morfolojisi, baraj yıkılma sürecinin gelişimiyle birlikte taşkın hidrografının şeklini etkilemektedir. Bu nedenle taşkın hidrografi hesaplamalarında, hacim – satıh eğrilerinin dikkate alınması model doğruluğu açısından, güçlü bir etki meydana getirecektir (Macchione vd., 2023).

Taşkın hidrografının hesaplanması amacıyla, DSİ Erzincan 82. Şube Müdürlüğü'nden temin edilen, Erzincan Barajı'na ait Şekil 55'de gösterilen hacim – satıh eğrilerinden elde edilen, kot – hacim bilgilerinden barajın rezervuar alanı tanımlanmıştır. Tanımlanan rezervuar alanı aynı zamanda modelin memba sınır şartı olarak belirlenmiştir.

Bununla birlikte mansap sınır koşulu olarak hali hazırda akım olmayan kuru arazi sınır koşulu tanımlanmıştır. Mevcut fiziki durumda da Erzincan Barajı mansap bölgesinde akım bulunmamaktadır. Gedik oluşumu ile birlikte oluşacak mansap bölgesindeki akım, en olumsuz senaryo incelendiğinden ihmal edilmiştir. Program hesap ayarlarında, hidrografın en doğru şekilde hesaplanabilmesini sağlayan, en önemli parametrelerden biri olan ve kararsız akım hesaplamalarında kullanılan, hesaplama aralığı 1 sn olarak seçilmiştir. Ayrıca hidrograf çıktı aralığı ise hidrograf hakkında yeterli aralıkta bilgi verebilecek (Tilav, 2021) düzeyde bir değer olan 1 dk'lık süre aralığı programa girilmiştir. Analiz süresi 3 saat olarak seçilmiştir.

Sonuç olarak, tüm girdilerin HEC-RAS yazılımına tanımlanmasıyla, kararsız akım koşullarında yapılan analiz sonucunda, baraj aksında meydana gelen yıkılmanın hidrografi elde edilmiştir. Üstten aşma ile trapez gedik oluşum süresine bağlı olarak, baraj aksından geçen su miktarını gösteren taşkın hidrografi elde edilmiştir. Şekil 57'de gösterilen baraj aksında oluşan taşkın hidrografında, 12,308.50 m³/s değerindeki pik debi yıkılmanın başlamasından itibaren 17. dakikada meydana gelmiştir.



Şekil 57. Baraj aksında oluşan yıkılma hidrografı

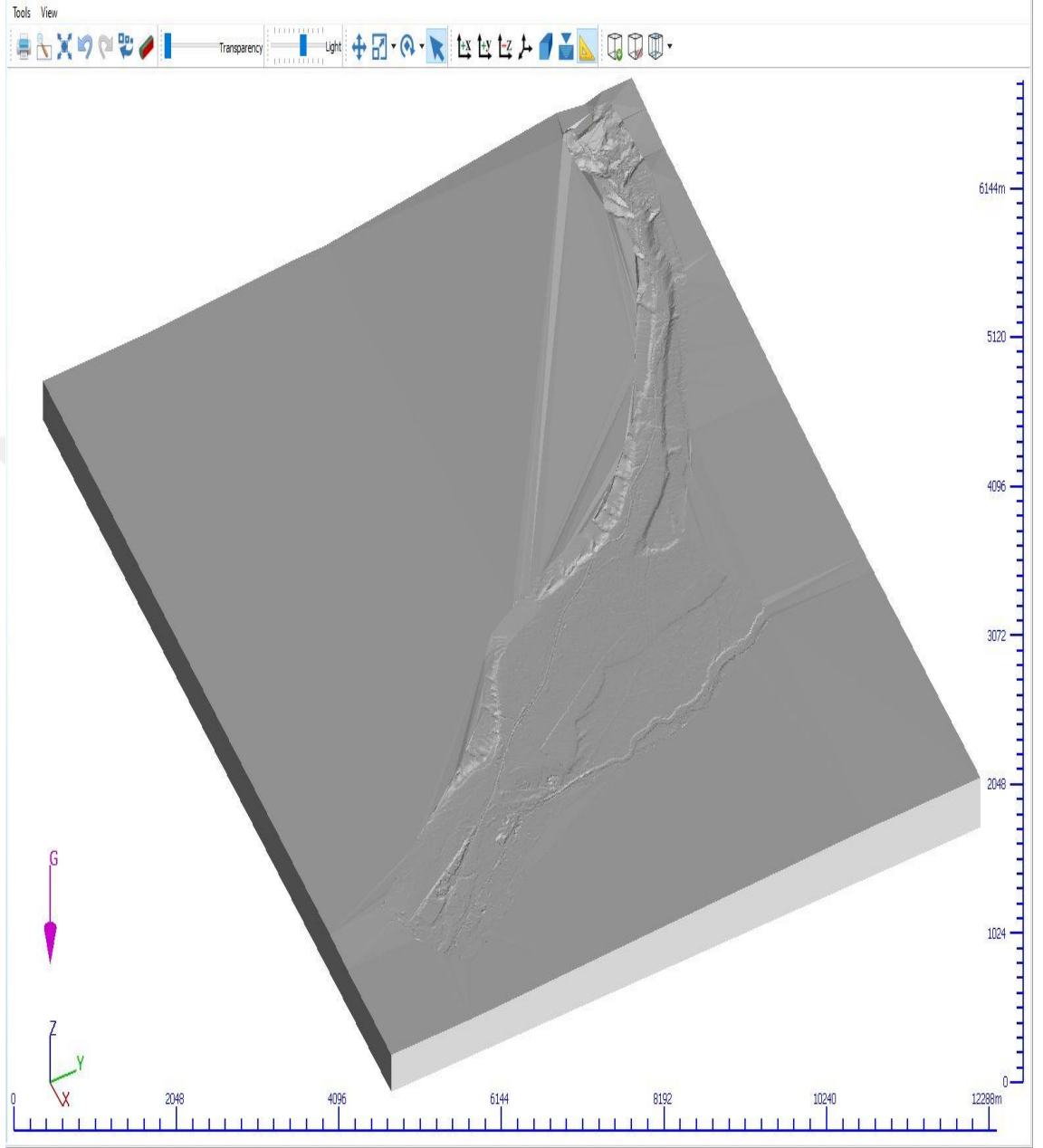
Şekil 57’de gösterilen yıkılma anında oluşan taşkın hidrografına göre baraj gövdesinde gedik oluşumunun 60. dk’da başladığı görülmektedir. Dolayısıyla 60 dk değeri referans olarak alındığında, baraj aksından geçen akım $65.69 \text{ m}^3/\text{s}$ değerine ulaşarak 2. dakikada (grafiğe göre 62. dk) başlamıştır. Grafiğe göre 63. dakikada yaklaşık 9 kat artarak $586.97 \text{ m}^3/\text{s}$ seviyesine hızlı bir şekilde ulaşmıştır. Akışın pik değere ulaşması grafiğe göre, 77. dakikada (referans değere göre 17 dk sonra) gerçekleşmiş olup pik debi değeri $12,308.50 \text{ m}^3/\text{s}$ seviyesine ulaşarak hidrografın yükselme eğilimi son bulmuştur. 78. dakikadan itibaren deşarj olan debinin değerinin hızla düştüğü ve 110. dakikada $531.27 \text{ m}^3/\text{s}$ değerine düşerek 133. dakikada $0.00 \text{ m}^3/\text{s}$ değerine düştüğü görülmüştür. Böylece 3 saat olarak seçilen analiz süresinin de yeterli olduğu anlaşılmıştır.

4.6. Flow 3D Yazılımında Sayısal Modelinin Oluşturulması

Flow 3D yazılımında gerçekleştirilecek olan Erzincan Barajı’nın olası yıkılması sonucu meydana gelecek taşkın yayılımının, 2B (SWE) ve 3B (RANS) olarak çözümlenebilmesi için gerekli olan ilk aşama, çalışma alanının katı cisim modelinin programa tanımlanmasıdır.

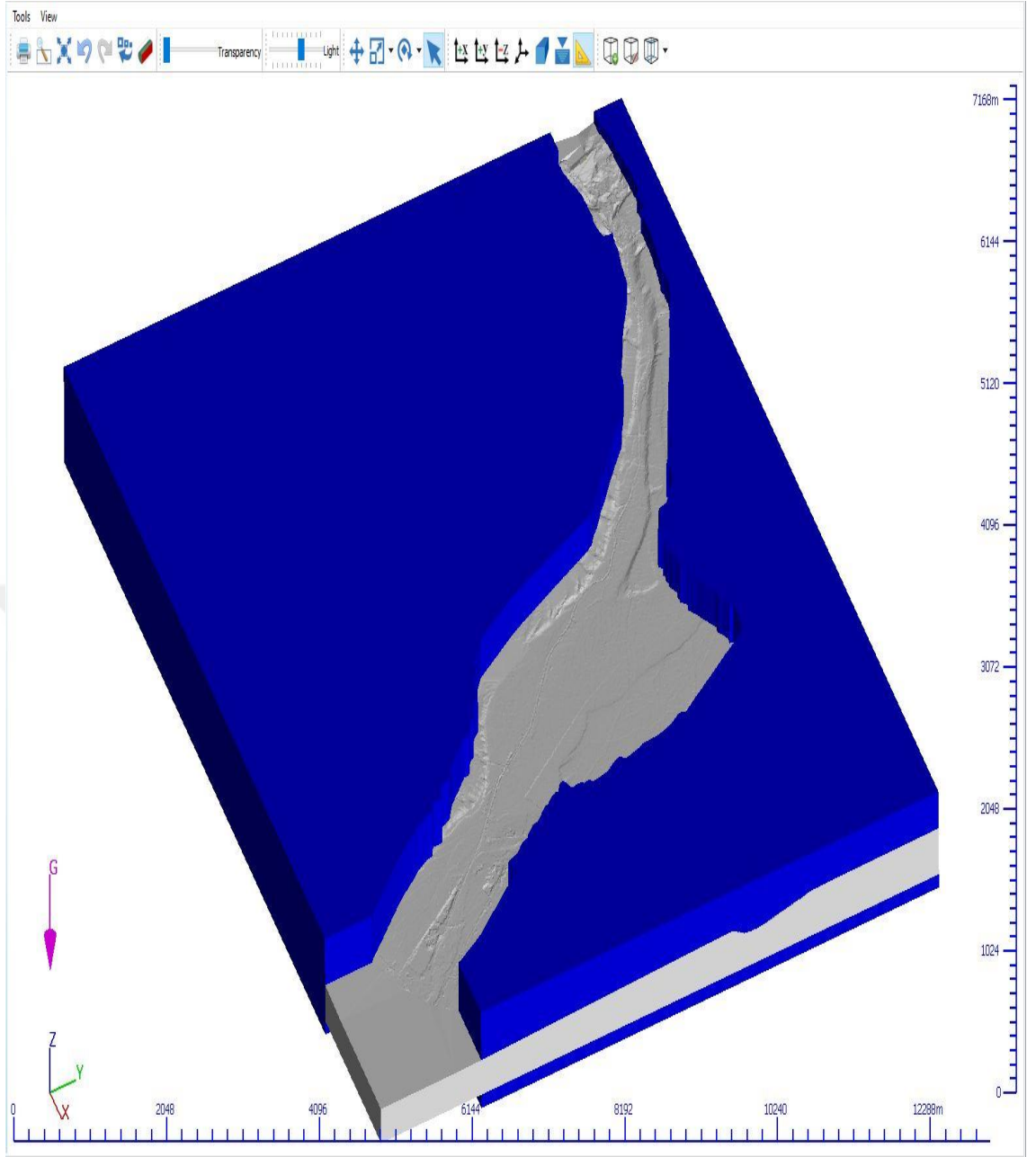
Bu amaçla çalışma alanının havadan 3 boyutlu olarak taranması sonucu elde edilmiş olan sayısal yükseklik modelinden oluşturulan ve “*STL” dosya formatında kaydedilen katı cisim modeli Flow 3D yazılımına tanımlanmıştır. Flow 3D yazılımında

yapılacak olan analizlerin ilk adımı olan katı cisim modelinin, Flow 3D yazılımına yüklenmiş hali Şekil 58’de gösterilmiştir.



Şekil 58. Flow 3D yazılımına yüklenen katı cisim modeli

Katı cisim modelinin yazılıma yüklenmesiyle, taşkın yayılım analizi yaptırılacak alanın çözümleme alanı olarak seçilmesi gerekmektedir. Çözümleme alanı, işlem yükünü azaltmak ve çözüm süresini kısaltmak amacıyla, daha önce belirlenen muhtemel taşkın yayılım alanı çerçevesinde sınırlandırılarak, gerek duyulmayan alanların analiz dışı tutulması sağlanmıştır. Katı cisim modeli üzerinde sınırlandırılan sayısal çözüm alanı Şekil 59.’da gösterilmiştir. Gri renkle gösterilen alan taşkın yayılım alanını, koyu mavi renkle gösterilen alan ise analiz dışı tutulan alanı temsil etmektedir.



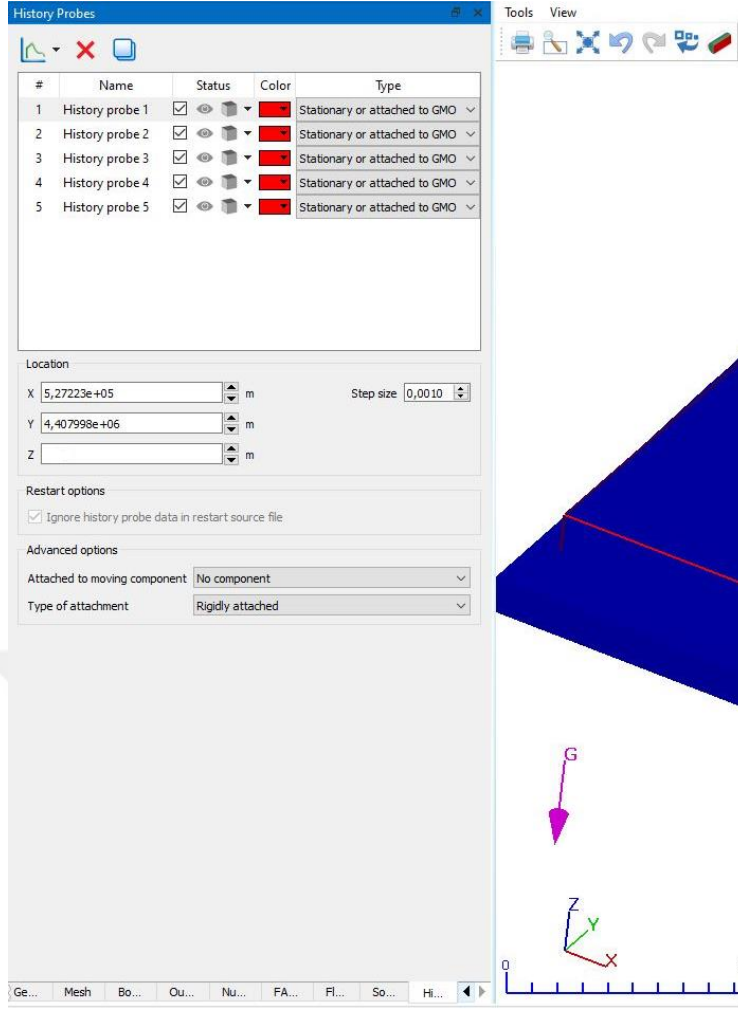
Şekil 59. Katı cisim modeli üzerinde sınırlandırılan çözümleme alanı

Taşkın yayılım analizi sonuçlarının Erzincan Barajı'nın mansap bölgesinde kalan ve taşkından etkilenmesi muhtemel yerleşim yerlerinin Universal Transvers Merkator (UTM) 3 sistemindeki koordinatları ve uzaklıkları, Tablo 10'da gösterilmiş olup, bu yerleşim yerlerinin koordinatları, katı cisim modeli üzerine tanımlanmıştır. Katı cisim modeli üzerinde yerleşim yerlerine tanımlanan her bir koordinat noktası, analiz sonunda akım derinliği ve hızların ölçüleceği inceleme (probe) noktalarıdır. 2B ve 3B analizler sonucu bu noktalarda elde edilecek derinlik ve hız değerleri kritik öneme sahip olup, yerleşim yerlerinin hangi düzeyde taşkından etkilendikleri hususunda bilgiler sunacaktır.

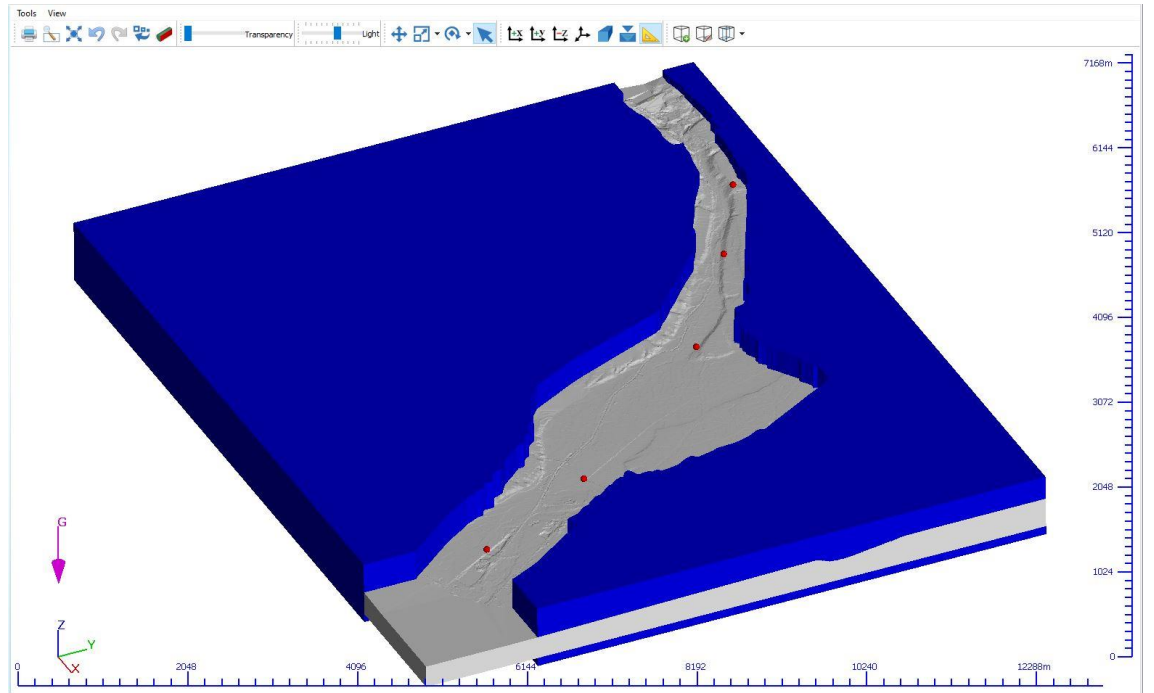
Tablo 10. Taşkın etki alanında kalması muhtemel yerleşimlerin konum bilgileri

Sıra No	Yerleşim Yeri (İnceleme Noktası)	Baraj Gövdesine Uzaklık (km)	y	x	z
1	Çatalarmut Köyü	2.00	527,223,286	4,407,998.500	1,450.753
2	Yeşilçat Köyü	3.60	528,567,204	4,407,256.074	1,386.119
3	Elmaköy Köyü	5.60	530,285,808	4,406,099.801	1,338.018
4	Organize Sanayi Bölgesi 1. Nokta	8.90	532,341,869	4,403,657.677	1,281.971
5	Organize Sanayi Bölgesi 2. Nokta	10.85	533,256,242	4,401,946.570	1,241.280

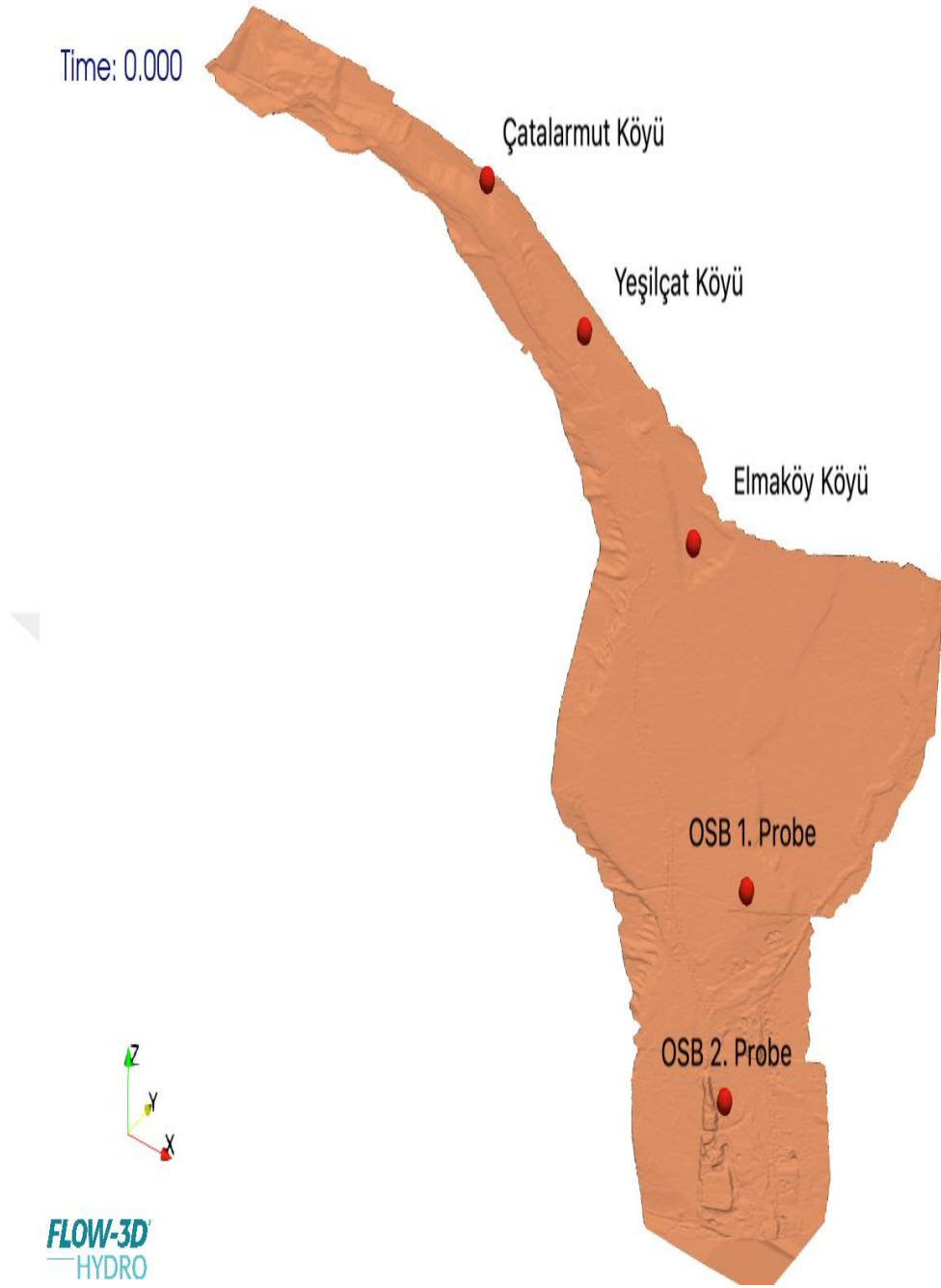
Tablo 10’da görüldüğü üzere Baraj gövdesine en yakın konumda Çatalarmut Köyü bulunmakta olup Baraj Gövdesine 2.00 km uzaklıkta yer almaktadır. İkinci yakın yerleşim yeri olarak 3.60 km uzaklık ile Yeşilçat Köyü ve 5.60 km uzaklıkta ise Elmaköy Köyü bulunmaktadır. Baraj gövdesine 8.90 km uzaklıkta önemli sanayi tesislerinin bulunduğu Erzincan Organize Sanayi Bölgesi (OSB) yer almaktadır. Erzincan Organize Sanayi Bölgesinin ekonomik açıdan önemli olması ve geniş bir alana yayılmasından dolayı, taşkının bölgeye olan etkisinin daha detaylı olarak incelenebilmesi amacıyla bu bölgeye 2 adet inceleme noktası eklenmiştir. Bu noktalardan 1. nokta OSB’nin başlangıç noktasına, 2. nokta ise baraj gövdesinden 10.85 km uzaklıktaki bir noktaya yerleştirilmiştir. Buna bağlı olarak katı cisim modeli üzerine inceleme noktalarının tanımlanması ve yerleşim yeri isimleri Şekil 60, Şekil 61 ve Şekil 62’de görülmektedir.



Şekil 60. Katı cisim modeli üzerine inceleme noktalarının tanımlanması



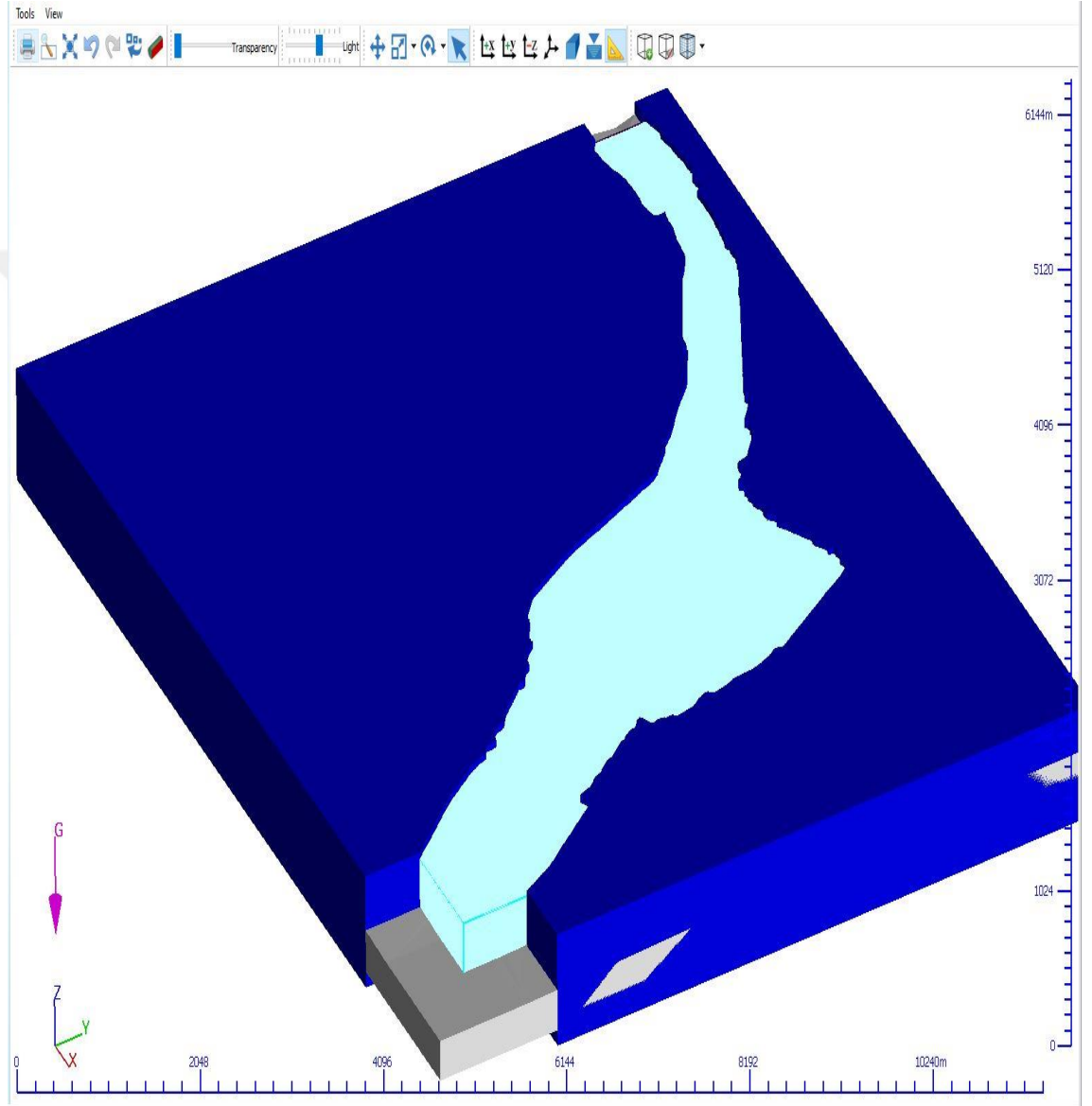
Şekil 61. Katı cisim modeli üzerine tanımlanan inceleme noktaları



Şekil 62. Katı cisim modeli üzerine tanımlanan yerleşim yeri isimleri

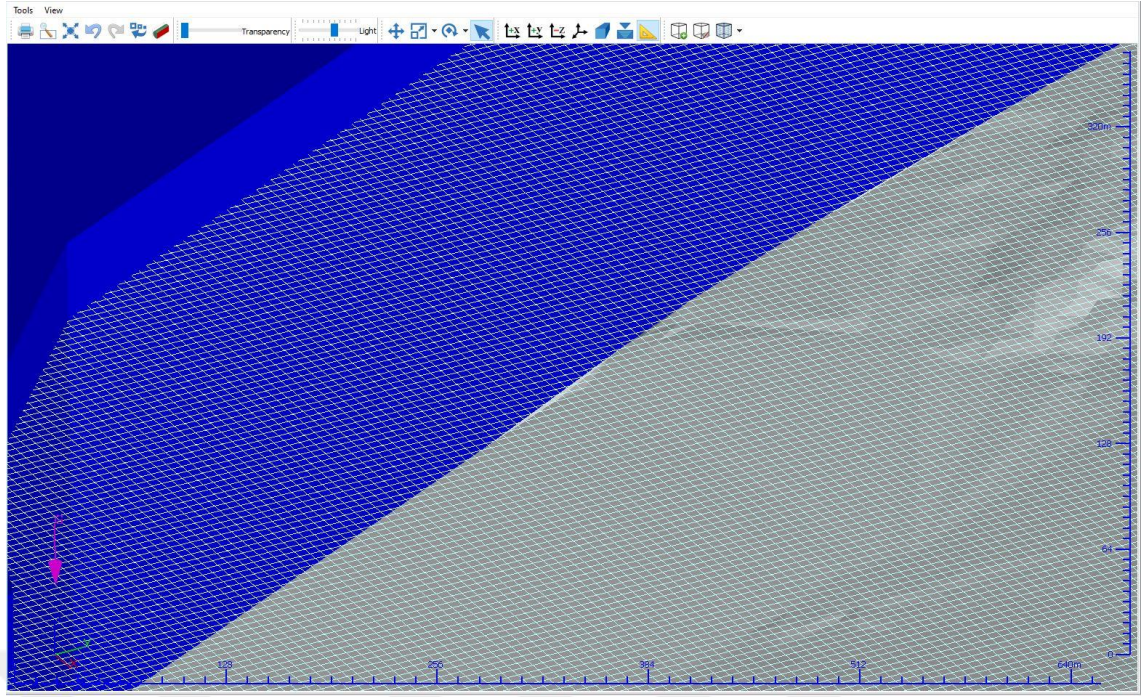
Flow 3D yazılımında gerçekleştirilecek olan analizlere başlanmadan önce çözümleme alanına modeli temsil edebilecek yeterli sayıda çözüm ağları Şekil 63.'de açık mavi renk ile temsil edilen çalışma alanına eklenmiştir. Çözümleme alanının, yazılım ve donanım kapasitesini zorlayan 1,552.76 ha genişliğinde oldukça büyük bir alanı kapsaması nedeniyle mümkün olan en küçük çözüm ağı boyutu olan 3 m x 3 m genişliğindeki dörtgen çözüm ağları seçilmiştir. Çözüm ağı boyutu seçilirken yazılım ve donanım kapasitesini denemek amacıyla 3 farklı mesh boyutunda analiz gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Çözüm ağı boyutları sırasıyla; 1 m x 1 m, 2 m x 2 m ve 3 m x 3 m seçilerek çözümlenmeye çalışılmıştır. Ancak 1 m x 1 m ve 2 m x 2 m

genişliğindeki çözüm ağlarının getirmiş olduğu aşırı işlem yükü nedeniyle, taşkın yayılım analizi yazılım tarafından gerçekleştirilememiştir. Buna rağmen yazılımda 3 m x 3 m genişliğindeki çözüm ağları belirlendiğinde ise başarılı bir 3B taşkın yayılım analizi gerçekleştirilebilmiştir. Çözüm ağları 3 m x 3 m ölçülerinde seçildiğinde çalışma alanında toplam 7,474,509.00 adet olarak elde edilen çözüm ağı hücresinde hesaplamalar yapılmıştır.



Şekil 63. Sayısal çözümleme alanına tanımlanan çözüm ağları

Çalışma alanına tanımlanan çözüm ağlarının, topografya özelliklerini en iyi şekilde temsil edebilecek yeterlilikte ve yoğunlukta olduğu, Şekil 63.'de gösterilen, çözüm ağı bloğunun büyütülüp yakınlaştırılması ile net bir şekilde görülebilmektedir. Çözüm ağı bloğunun bir bölgesinin büyütülerek, yakınlaştırılan görüntüsü Şekil 64'de gösterilmektedir.



Şekil 64. Çözüm ağı hücreleri

Daha önce Froehlich (1995) yaklaşımına bağlı olarak geometrisi belirlenen trapez şekilli gedik modeli esas alınarak, HEC-RAS yazılımı yardımıyla baraj gövde aksında elde edilen taşkın hidrografi, çözümleme alanının başlangıç sınır şartı olarak yazılıma tanımlanmıştır. Daha sonra, çözüm ağı bloğunun zeminine (tabanına) ve yan kenarlarına akımın sistemden çıkmasını engelleyen duvar (W), üst yüzeyine ise açık hava basıncı (P) ve akımın analiz alanını serbestçe terk ederek uzaklaşabilmesi için ise çalışma alanının bittiği bölgeye çıkış (O) sınır şartı tanımlanmıştır. Çalışmada tanımlanan sınır şartları; literatürde yer alan Akgun vd. (2023), Azimi vd. (2018), Ferdowsi vd. (2021), Palamut (2014) gibi benzer çalışmalara uyumlu olarak belirlenmiştir.

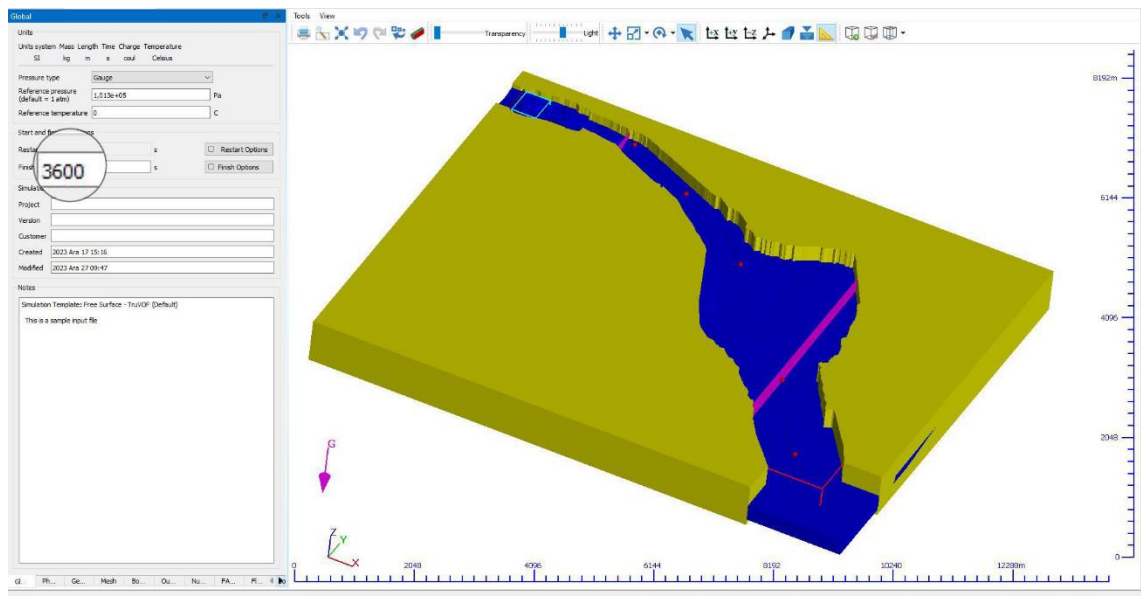
Flow 3D yazılımında model oluşturma aşamalarından birisi de sayısal hesaplamalarda kullanılacak türbülans modelinin belirlenme aşamasıdır. Baraj yıkılması sonucu oluşacak taşkın yayılımı, kararsız ve düzensiz bir akım olup türbülanslı akım özelliği göstermektedir. Buna bağlı olarak akımın doğal halinde olduğu yaklaşımıyla, Flow 3D yazılımına entegre edilmiş türbülans modellerinden biri olan RNG k- ϵ türbülans modeli seçilmiştir. Çalışmada mümkün olan en gerçekçi simülasyon sonuçlarının elde edilmesi hedeflendiğinden, literatürde yer alan pek çok çalışmada kabul gören RNG k- ϵ türbülans modelinin seçilmesi tercih edilmiştir. Tüm türbülans modelleri arasından, fiziksel model sonuçlarına da dayanılarak, RNG k- ϵ türbülans modelinin, baraj yıkılmalarında oluşan ani taşkınlarda, daha doğru sonuçlar verdiği literatürde yapılan çalışmalarda vurgulanmaktadır. (Akgun vd., 2023; Arkaş, 2020; Azimi vd., 2018;

Colman vd., 2006; Karaduman, 2018; Karam vd., 2021; Palamut, 2014; Rajaa ve Kamel, 2020). Tüm çözümlemelerde kullanılacak birim sistemi, Uluslararası Birim Sistemi (SI) seçilmiştir. Modelde tek akışkan olarak kullanılan suyun 20 °C’de ve 1,000.00 kg/m³ yoğunluğunda olduğu kabul edilmiştir. Yerçekimi ivmesi, 9.81 m/sn² olarak sisteme tanımlanmıştır.

Sonuç olarak tüm topoğrafik ve hidrolik özelliklerin yazılımda tanımlanmasıyla, en olumsuz baraj yıkılma senaryosuna göre oluşturulan sayısal model simülasyon için hazır hale getirilmiştir. Hazırlanan model üzerinden ayrı ayrı 2 boyutlu sığ su denklemleri ve 3 boyutlu Reynolds Ortalamalı Navier Stokes (RANS) denklemlerine göre taşkın yayılım analizleri gerçekleştirilmiştir. Her iki analiz de aynı bilgisayarda, aynı sayısal modele bağlı olarak, aynı türbülans modeli ve sınır koşullarında, eşit boyutta çözüm ağı hücresi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Böylece oluşan taşkının 2 boyutlu ve 3 boyutlu analiz sonuçlarına göre benzerliklerinin ve farklılıklarının incelenebilme olanağı elde edilmiştir.

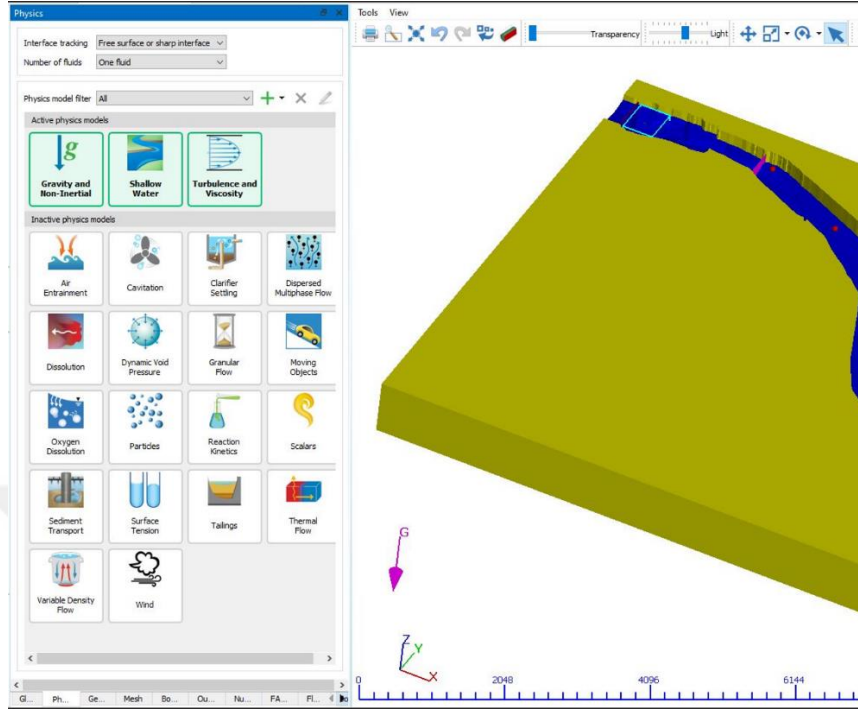
4.7. Flow 3D Yazılımında 2B Taşkın Yayılım Analizi

Çalışmada, Erzincan Barajı’nın olası yıkılması sonucu meydana gelecek muhtemel taşkın analizi; öncelikle 2 boyutlu sığ su (shallow water) modeliyle, 3600 sn olarak seçilen analiz süresince gerçekleştirilmiştir. Analiz süresi olarak seçilen 3600 sn değeri, Flow 3D yazılımında “Global” penceresinde yer alan “Finish Time” sekmesine, Şekil 65’de gösterildiği şekilde girilmiştir. Modelleme sonucu elde edilen çözümleme dosyası 50 gb büyüklüğe ulaşmıştır.



Şekil 65. Flow 3D yazılımında analiz süresinin belirlendiği “Global” penceresi

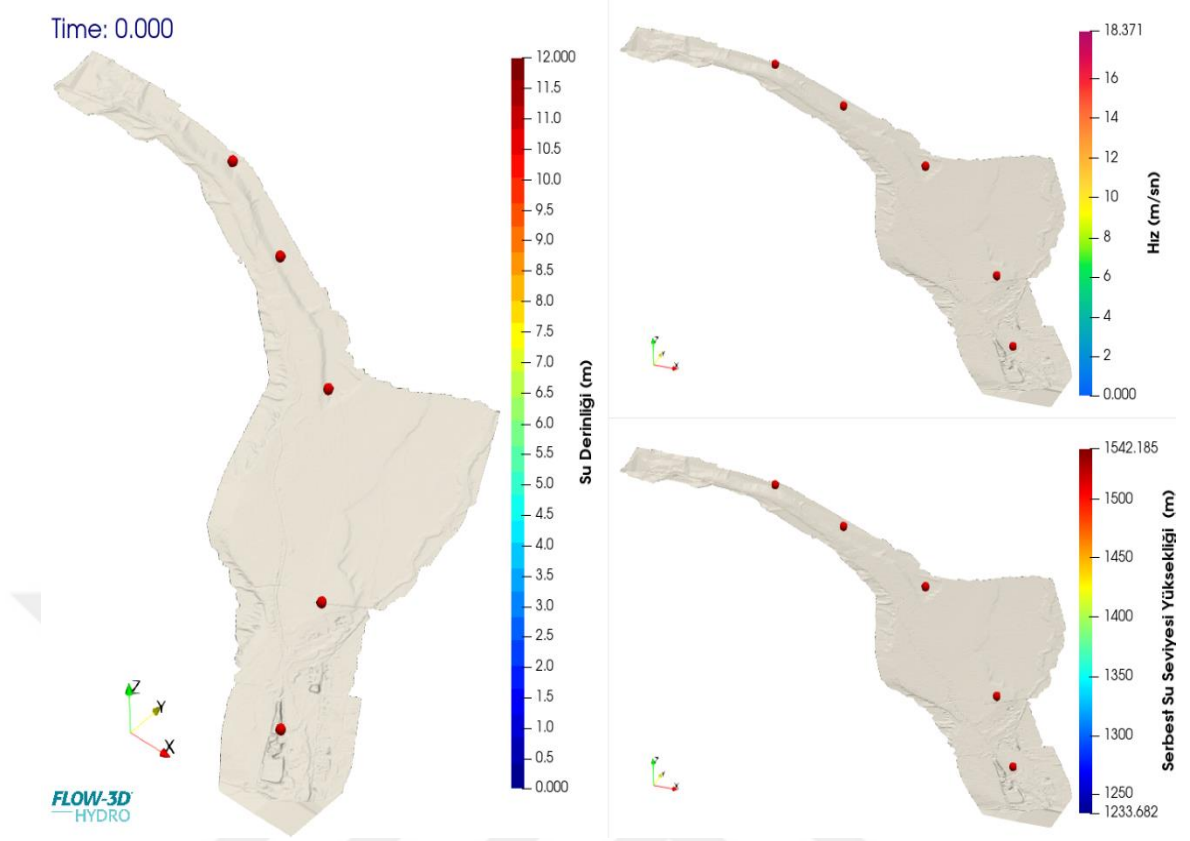
Flow 3D yazılımında, Şekil 66’da gösterilen “physics” uzantısında yer alan “shallow water” seçeneği etkinleştirilerek sığ su modeliyle analiz başlatılmıştır.



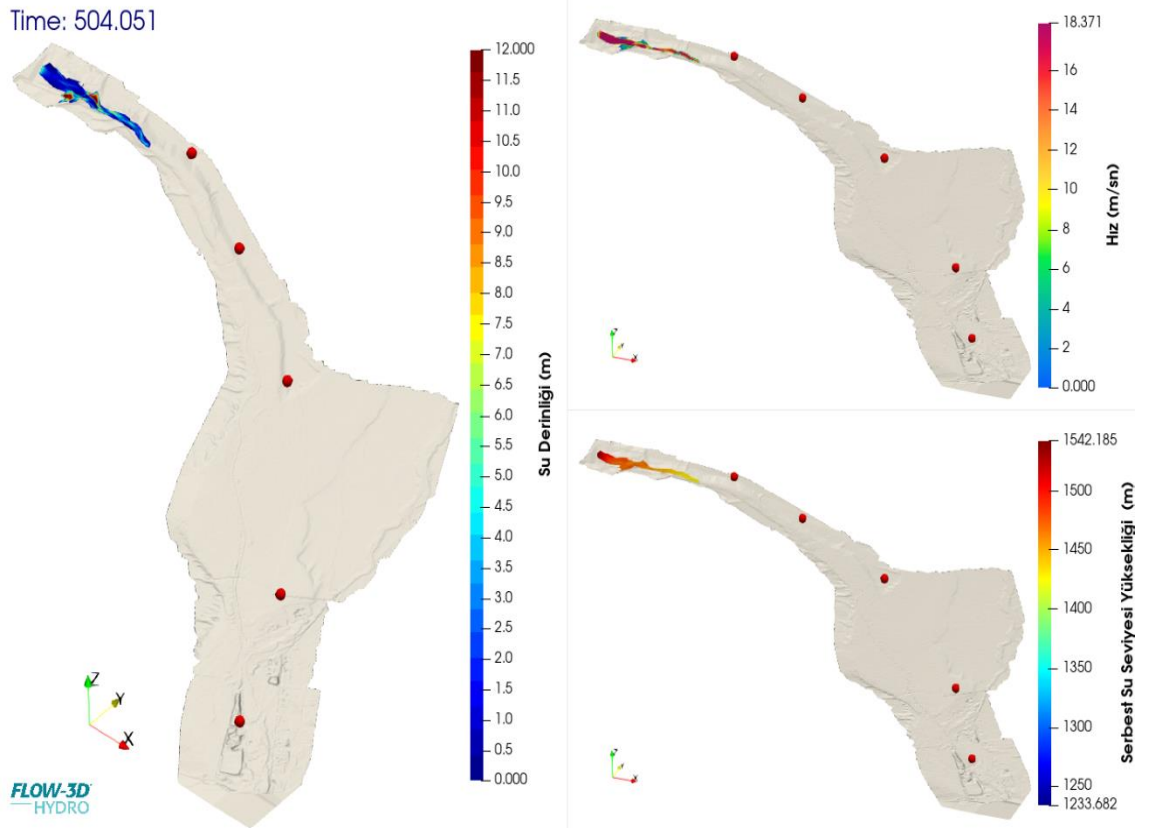
Şekil 66. Flow 3D yazılımında yer alan physics penceresi

70 saat süren analizler sonucu üretilen veriler, detaylı olarak incelenmiş olup kritik öneme sahip bilgiler elde edilmiştir. Analiz sonuçları incelendiğinde, taşkın yayılım bölgesinde 12 m yüksekliğe kadar ulaşan su derinlikleri ve 18 m/sn üzerinde akım hızları tespit edilmiştir. Analiz sonucuna göre; Çatalarmut, Yeşilçat ve Elmaköy Köylerinin taşkından etkilenmediği ancak taşkının Erzincan Organize Sanayi Bölgesine 1295. sn’de ulaştığı ve 1763. sn itibarıyla de tamamen taşkın etkisi altında kaldığı sonucuna varılmıştır. 3600 sn süren çözümleme süresince taşkın etkisinin 2500. sn itibarıyla azalmaya başladığı görülmüştür. Taşkın yayılım bölgesinde, akım derinliklerinin ve hızlarının, rezervuarın tamamen boşalmasının da etkisiyle oldukça düşük seviyelere ulaşmasıyla, 3600 sn olarak seçilen analiz süresinin de yeterli olduğu belirlenmiştir.

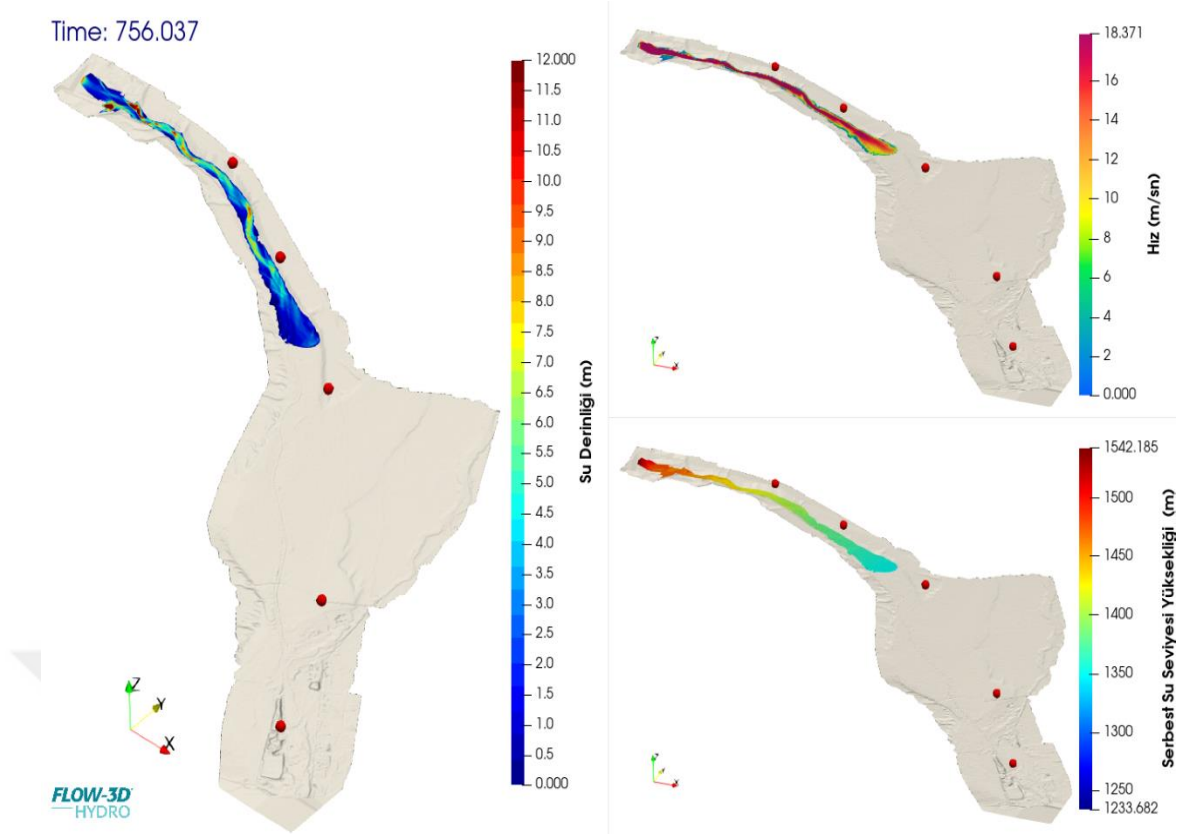
2 boyutlu sığ su modeli analizinde meydana gelen taşkın başlangıçtan, 3600. sn’ye kadar olan yayılım süreci ile taşkına ait analiz sonuçları Şekil 67, Şekil 68, Şekil 69, Şekil 70, Şekil 71, Şekil 72, Şekil 73, Şekil 74, Şekil 75, Şekil 76, Şekil 77 ve Şekil 78’de gösterilmiştir. Şekildeki görsellerde, solda kalan ekranda taşkın derinlikleri, sağ üstte kalan ekranda taşkın hızları ve sağ altta kalan ekranda ise akım yüksekliğine ait kot değerleri incelenebilmektedir.



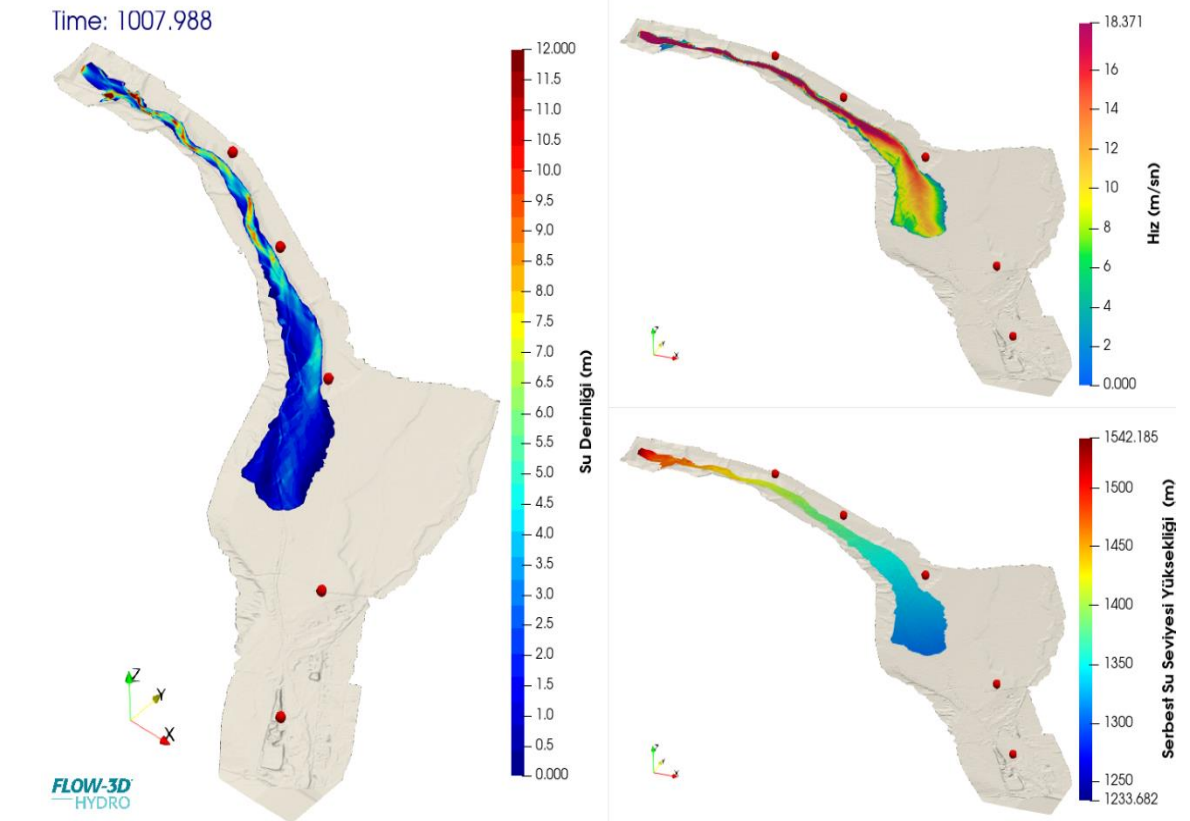
Şekil 67. 2B analizde taşkın başlangıç anı



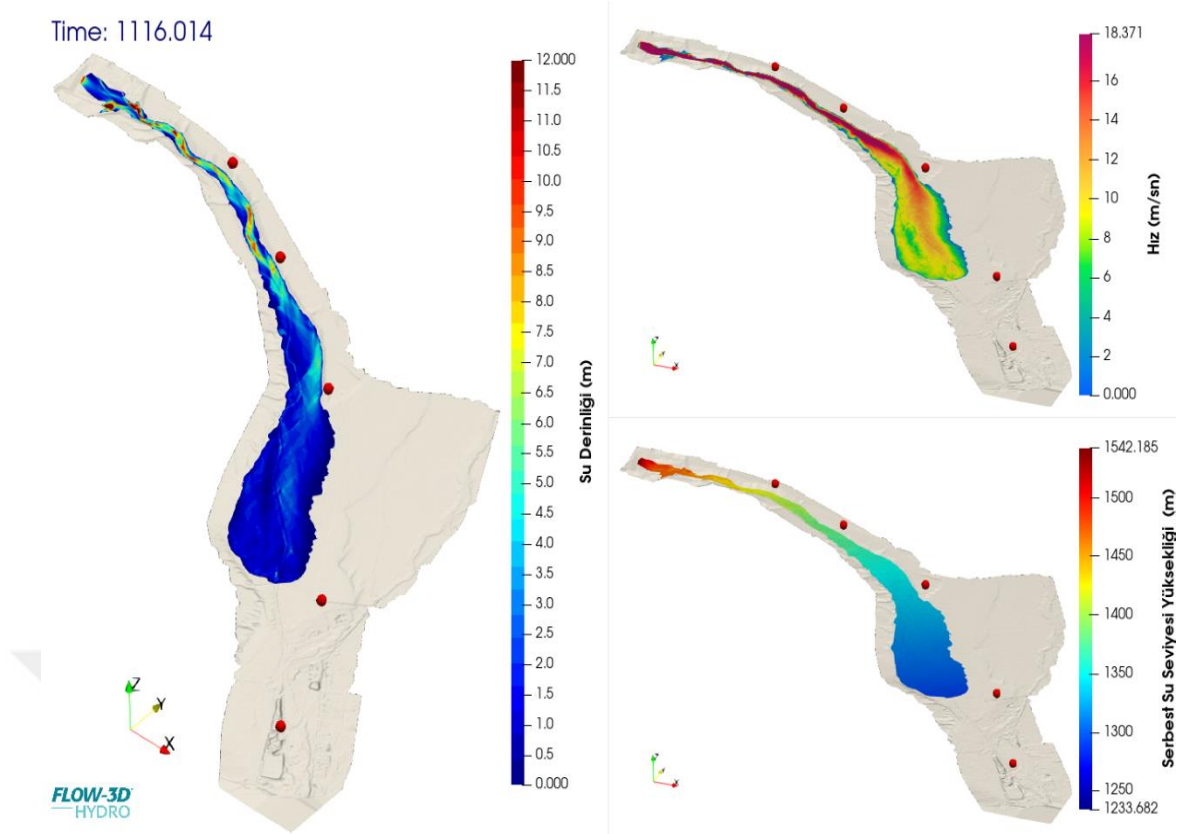
Şekil 68. 2B analizde 504. saniyedeki taşkın yayılımı



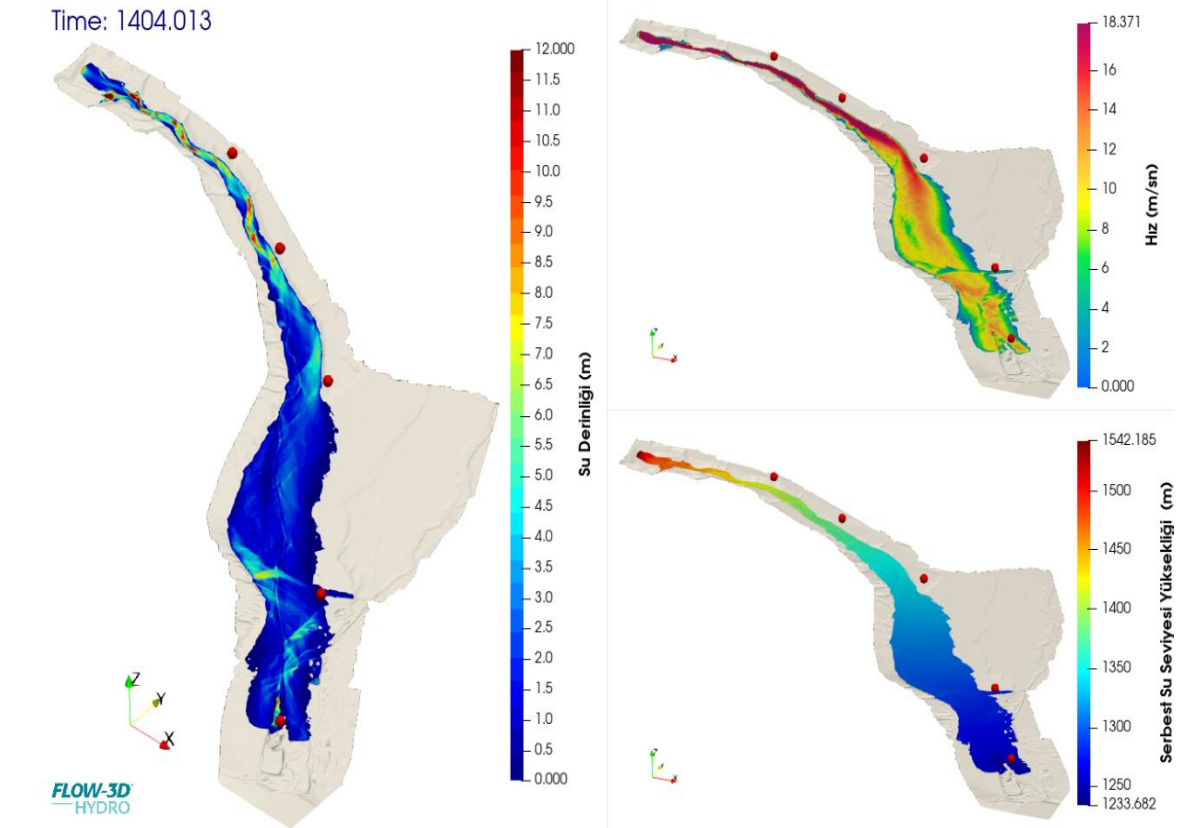
Şekil 69. 2B analizde 756. saniyedeki taşkın yayılımı



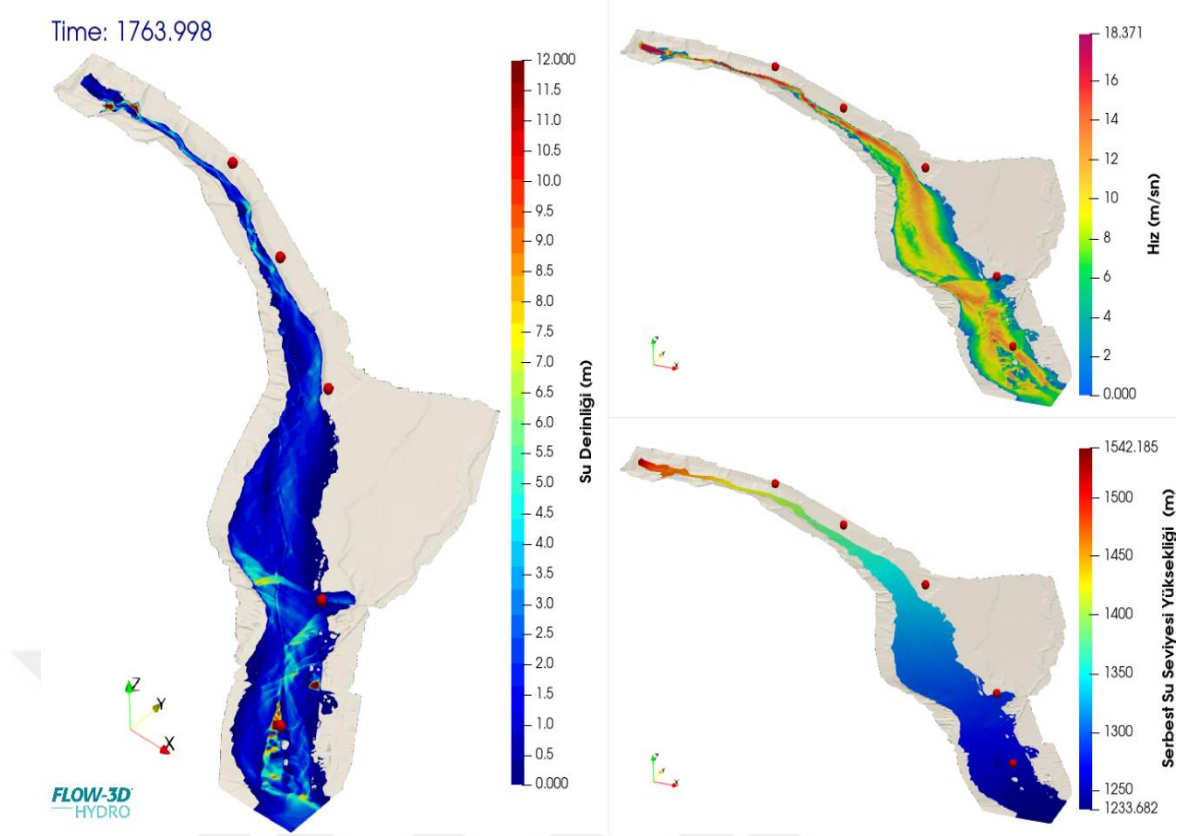
Şekil 70. 2B analizde 1007. saniyedeki taşkın yayılımı



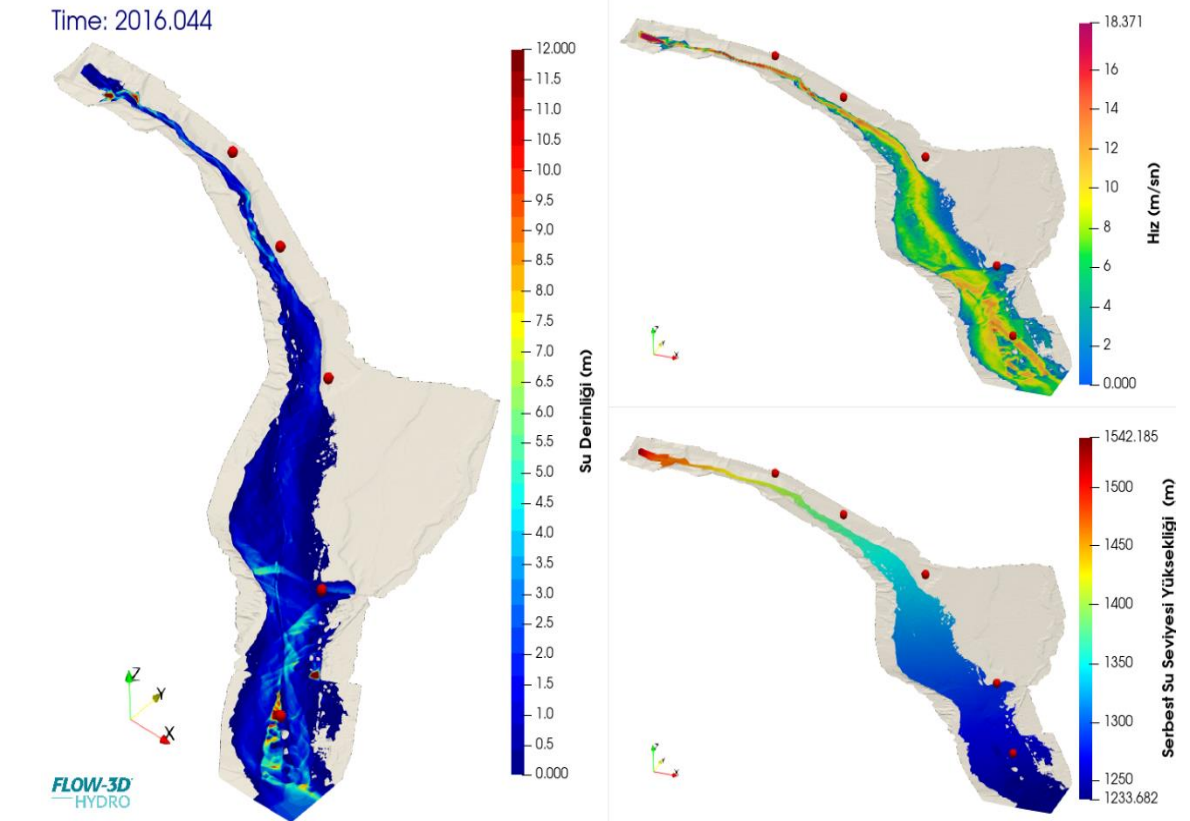
Şekil 71. 2B analizde 1116. saniyedeki taşkın yayılımı



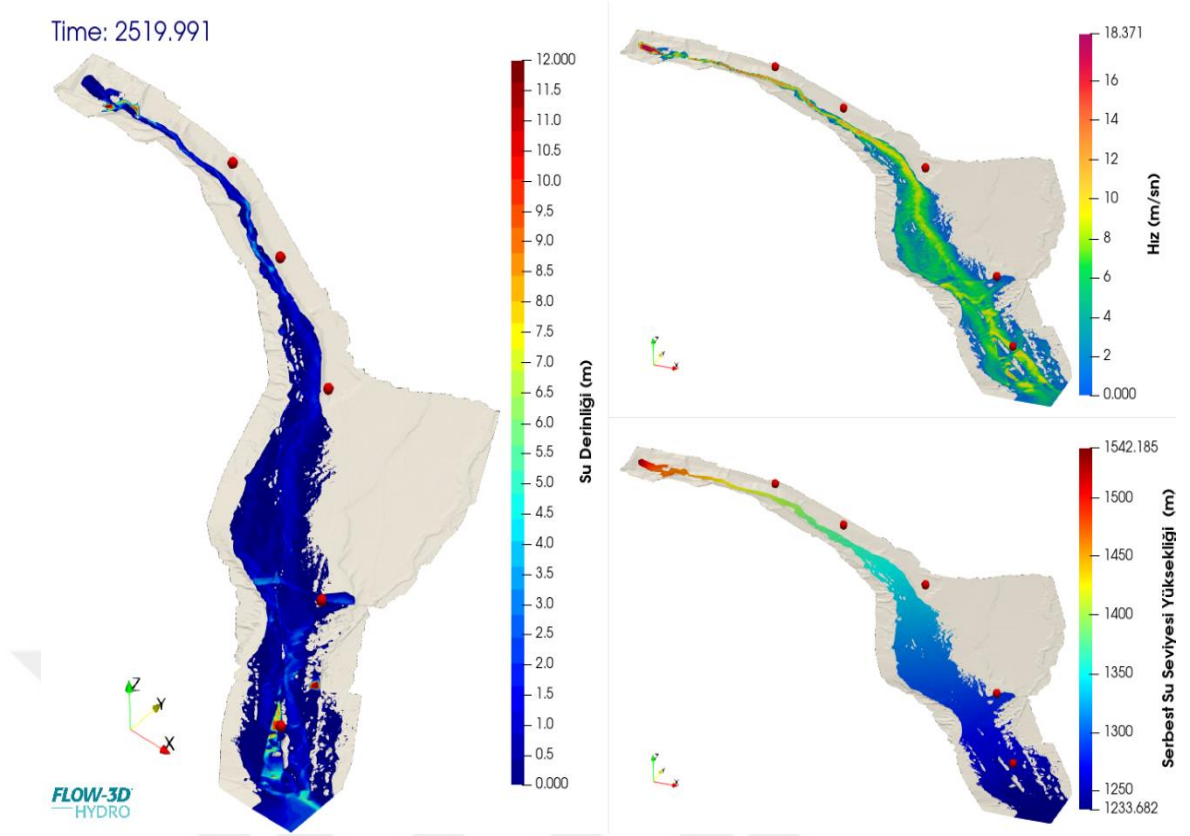
Şekil 72. 2B analizde 1404. saniyedeki taşkın yayılımı



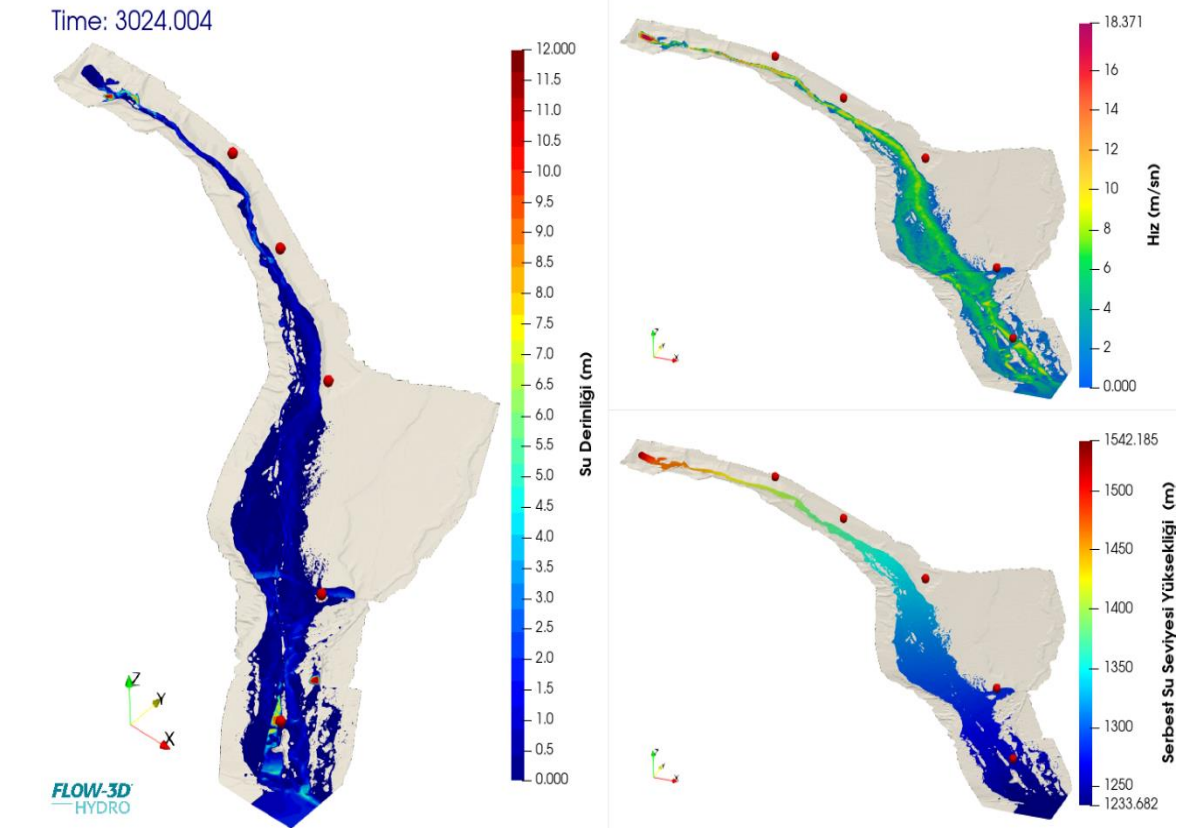
Şekil 73. 2B analizde 1763. saniyedeki taşkın yayılımı



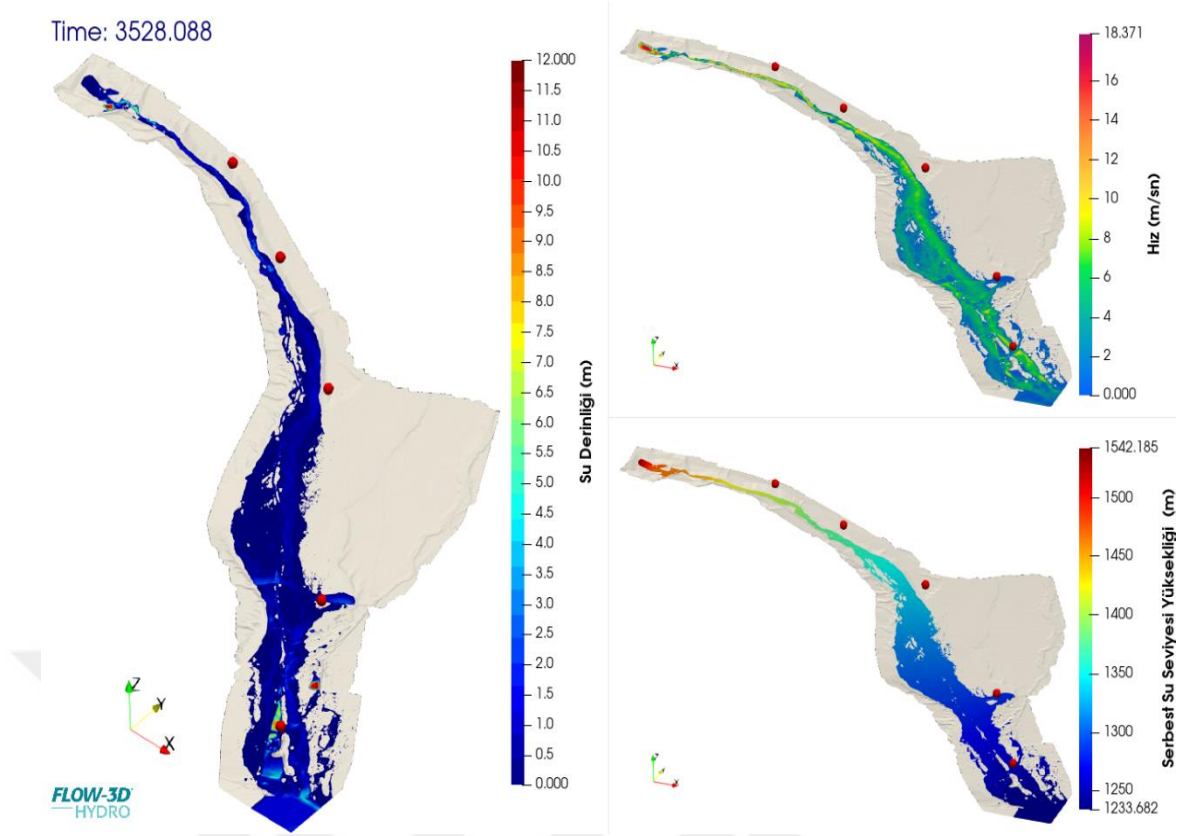
Şekil 74. 2B analizde 2016. saniyedeki taşkın yayılımı



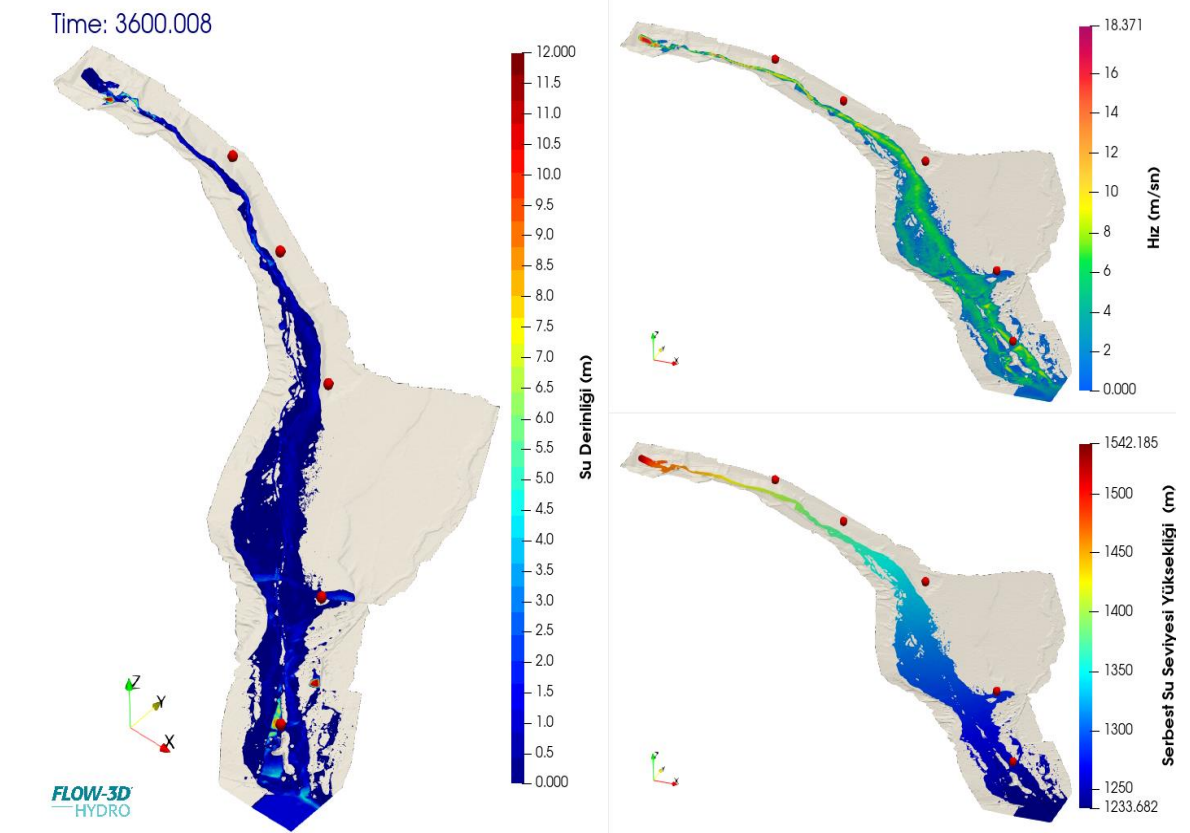
Şekil 75. 2B analizde 2519. saniyedeki taşkın yayılımı



Şekil 76. 2B analizde 3024. saniyedeki taşkın yayılımı

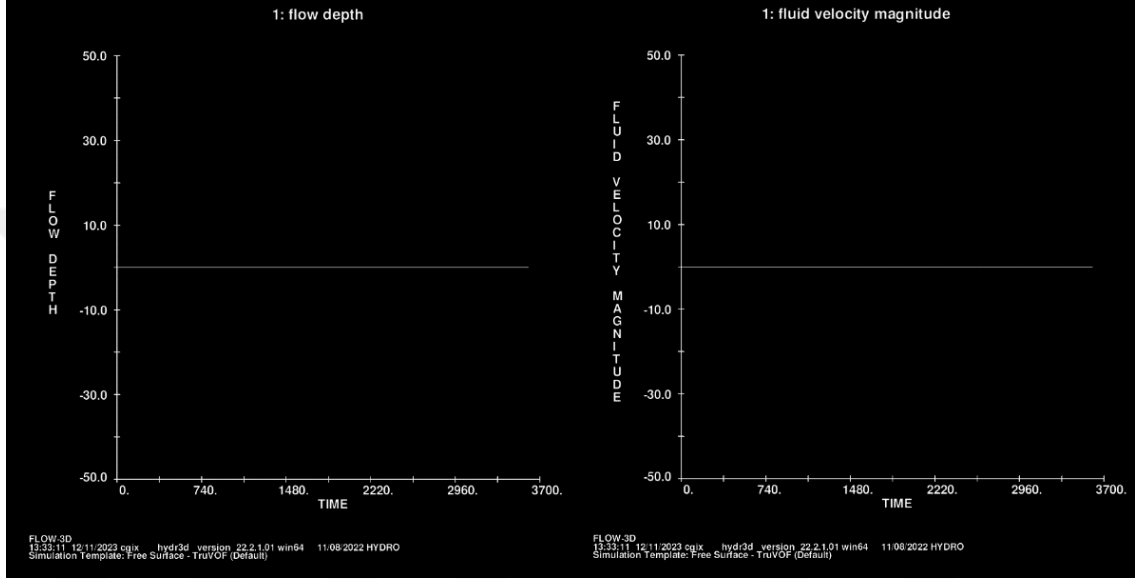


Şekil 77. 2B analizde 3528. saniyedeki taşkın yayılımı

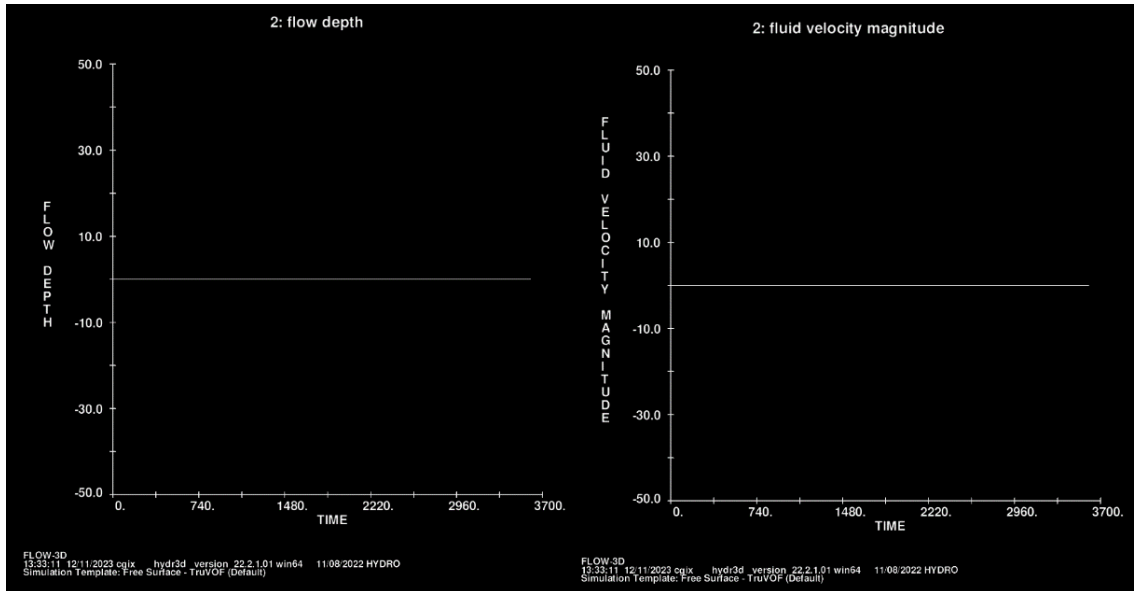


Şekil 78. 2B analizde 3600. saniyedeki taşkın yayılımı

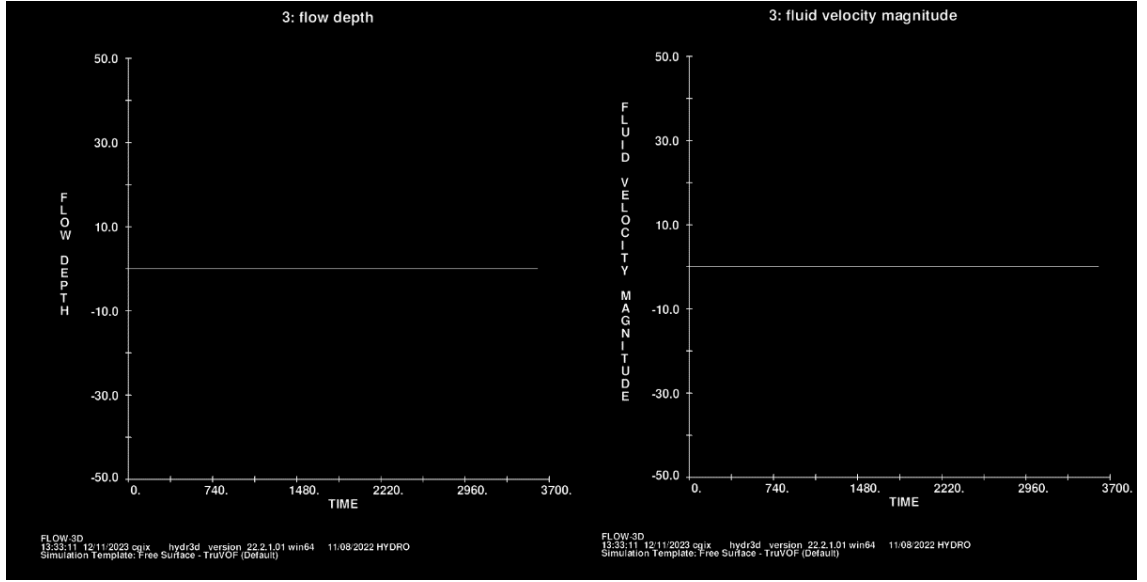
Taşkın yayılım alanı içerisinde tanımlanan yerleşim yerlerinin bulunduğu 5 adet inceleme noktasında meydana gelen taşkın, akım derinliği ve hızlarına ait grafikler de Flow 3D yazılımından elde edilmiştir. Baraj gövdesine; 2.00 km uzaklıkta yer alan 1. inceleme noktası, 3.60 km uzaklıkta yer alan 2. inceleme noktası ve 5.60 km uzaklıkta yer alan 3. inceleme noktalarında bulunan sırasıyla Çalatalarmut, Yeşilçat ve Elmaköy Köylerinde ölçülen su derinliği ve akım hızlarının sıfır olarak ölçüldüğü Şekil 79, Şekil 80 ve Şekil 81’de yer alan grafiklerde görülmektedir.



Şekil 79. 2B analizde Çatalarmut Köyü (1. probe) akım derinliği ve hız grafiği

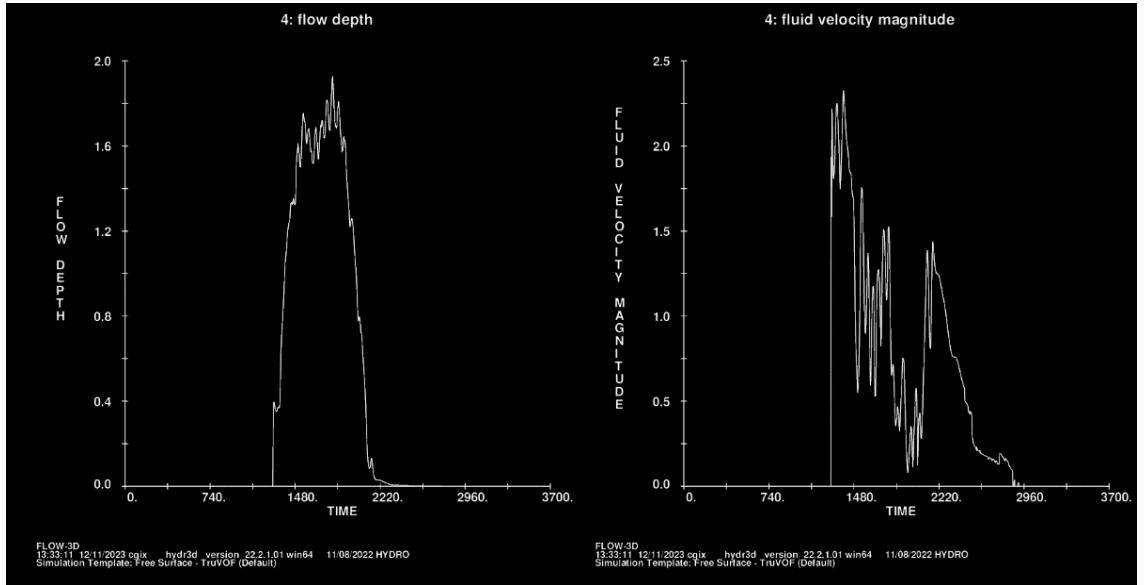


Şekil 80. 2B analizde Yeşilçat Köyü (2. probe) akım derinliği ve hız grafiği



Şekil 81. 2B analizde Elmaköy Köyü (3. probe) akım derinliği ve hız grafiği

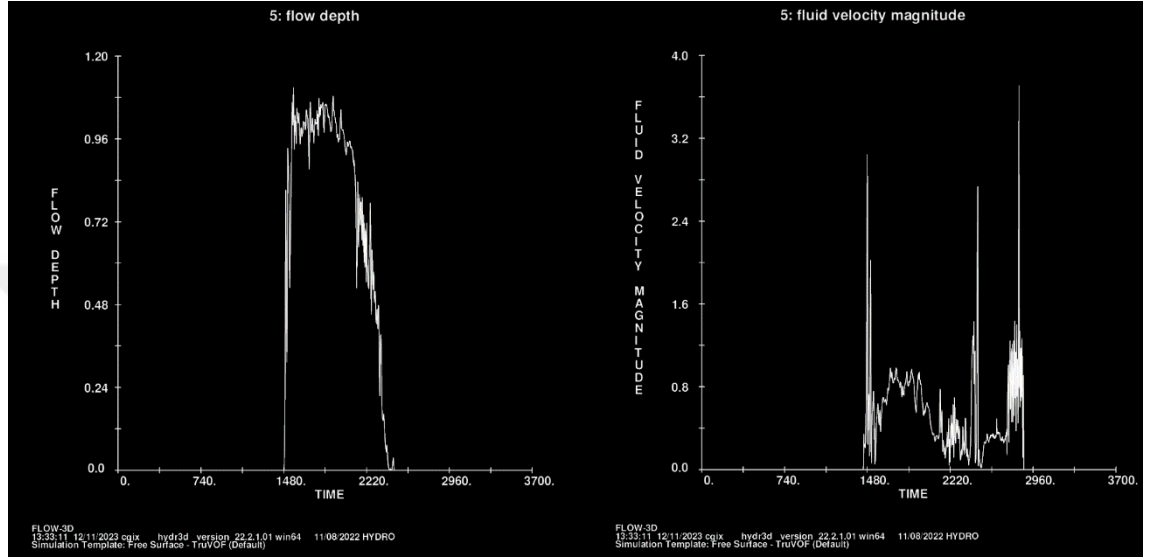
Erzincan Organize Sanayi Bölgesinin başlangıç noktasında yer alan, baraj gövdesinden 8.90 km uzaklıkta yer alan 4. inceleme noktasına, taşkın 1265. sn'de yaklaşık olarak 21 dk'da ulaştığı ve 1,95 m'lik derinlik değerinin meydana geldiği görülmektedir. Ayrıca taşkından etkilenen bu noktada en büyük akım hızı değerinin yaklaşık 2.38 m/sn olduğu da ölçüm sonuçlarından elde edilmiştir. 4. probe noktasında oluşan taşkın derinliği ve hızının zamana bağlı olarak değişim grafiği, Şekil 82'de gösterilmiştir.



Şekil 82. 2B analizde OSB 1. inceleme noktası (4. probe) akım derinliği ve hız grafiği

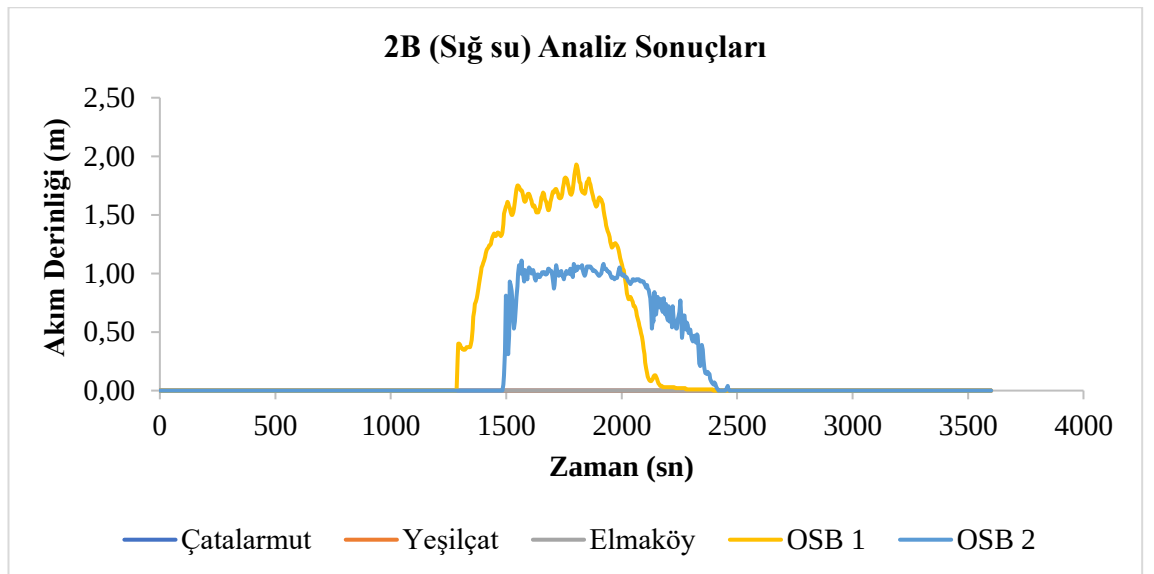
Erzincan Organize Sanayi Bölgesinde yer alan, baraj gövdesinden 10.85 km uzaklıkta yer alan 5. inceleme noktasına, taşkın 1480. sn'de en yüksek 1.10 m'lik

derinlik değerine ulaştığı görülmektedir. Ayrıca taşkından etkilenen bu noktada en büyük akım hızı değerinin yaklaşık 3.80 m/sn olduğu da ölçüm sonuçlarından elde edilmiştir. 5. probe noktasında oluşan taşkın derinliği ve hızının zamana bağlı olarak değişim grafiği, Şekil 83’de gösterilmiştir. Yine grafiklerde görüldüğü üzere taşkın etkisinin en fazla 3000 sn devam ettiği görülmüş olup, 3600 sn olarak seçilen analiz süresinin yeterli olduğu açıkça görülmektedir.

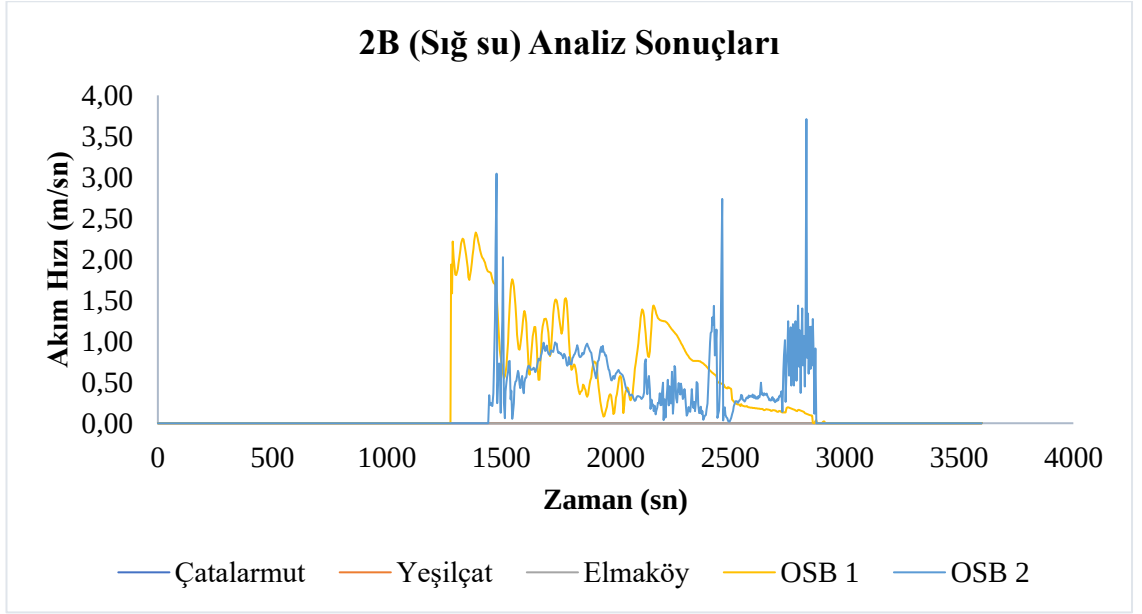


Şekil 83. 2B analizde OSB 2. inceleme noktası (5. probe) akım derinliği ve hız grafiği

Flow 3D yazılımında gerçekleştirilen 2B (sığ su) analizler sonucu tüm yerleşim yerlerinde (probe noktalarında) zamana bağlı olarak ölçülen akım derinleri Şekil 84’de, akım hızları ise Şekil 85’de gösterilmiştir.



Şekil 84. 2B analiz sonucu elde edilen zamana bağlı su derinliği değişim grafiği



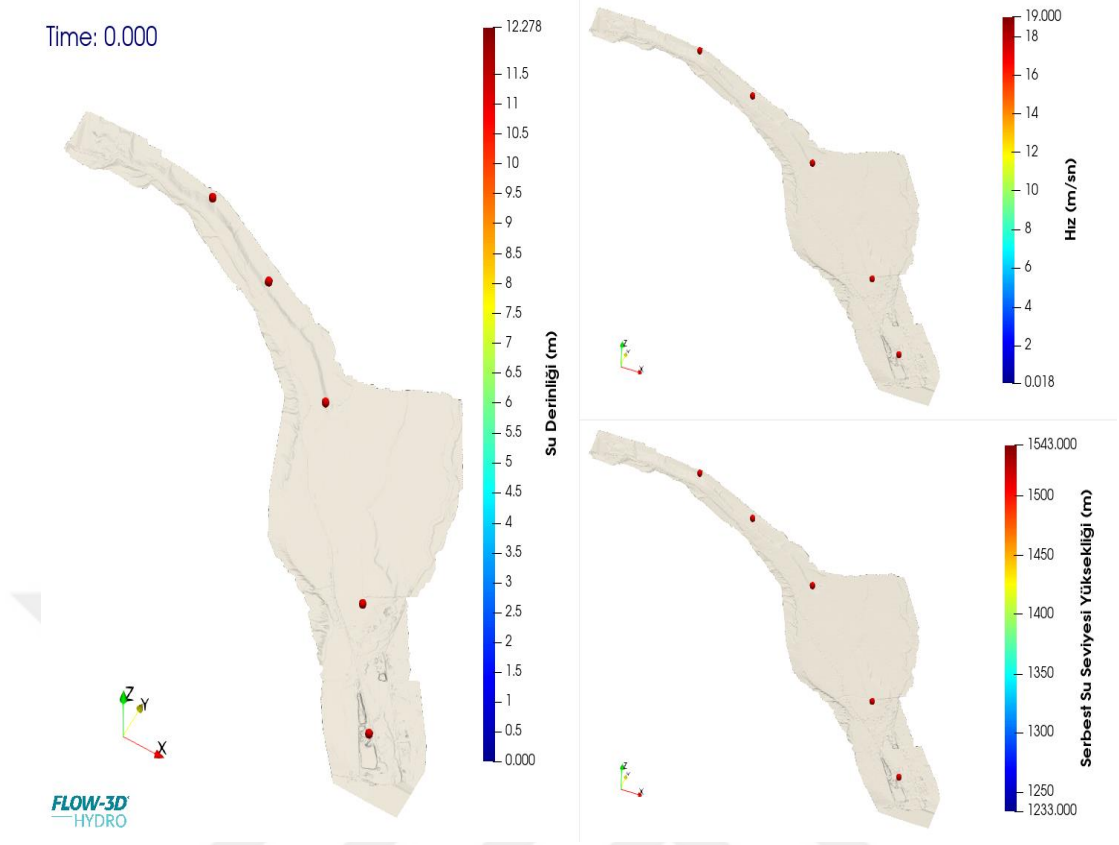
Şekil 85. 2B analiz sonucu elde edilen zamana bağlı akım hızı değişim grafiği

4.8. Flow 3D Yazılımında 3B Taşkın Yayılım Analizi

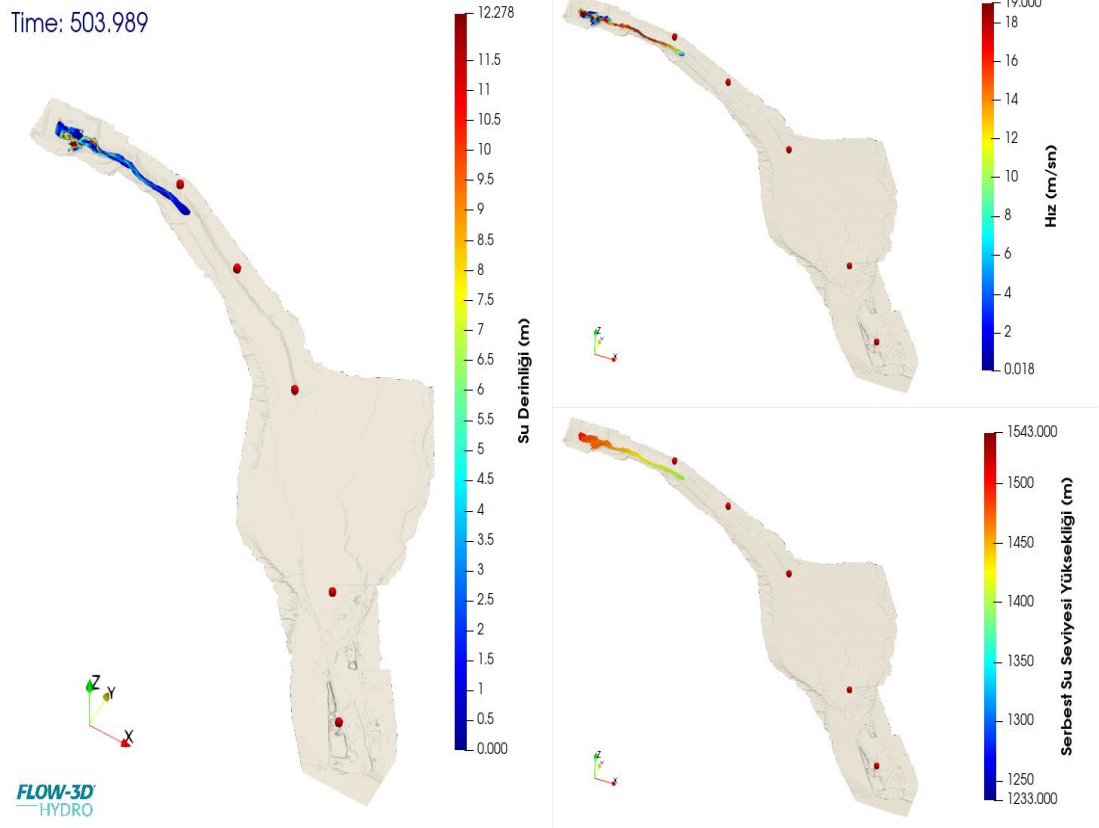
Çalışmada Erzincan Barajı'nın olası yıkılması sonucu meydana gelecek muhtemel taşkın analizi; 2 boyutlu sığ su (shallow water) yöntemiyle çözümlendikten sonra aynı model üzerinden yine 3600 sn olarak seçilen analiz süresince 3 boyutlu (RANS) çözüm yöntemiyle de gerçekleştirilmiştir. Modelleme sonucu elde edilen çözümleme dosyası 2 boyutlu modele göre 3 kat artarak 150 gb büyüklüğe ulaşmıştır.

15 gün süren analiz sonucu üretilen veriler, detaylı olarak incelenmiş ve 2 boyutlu çözümlemeye kıyasla farklı sonuçlar oluştuğu ortaya çıkarılmıştır. Analiz sonuçları incelendiğinde, taşkın yayılım bölgesinde 12.30 m yüksekliğe kadar ulaşan su derinlikleri ve 19 m/sn üzerinde akım hızları tespit edilmiştir. Analiz sonucuna göre; Çatalarmut ve Yeşilçat Köylerinin taşkından etkilenmediği ancak Elmaköy Köyü'ne yaklaşık 800. sn'de ulaştığı görülmüştür. Taşkın, Erzincan Organize Sanayi Bölgesine 1200. sn'de ulaştığı ve 1270. sn itibariyle de bölgenin tamamen taşkın etkisi altında kaldığı sonucuna varılmıştır. 3600 sn süren çözümleme süresince taşkın etkisinin 2500. sn itibariyle azalmaya başladığı görülmüştür. Taşkın yayılım bölgesinde, akım derinliklerinin ve hızlarının, rezervuarın tamamen boşalmasının da etkisiyle oldukça düşük seviyelere ulaşmasıyla, 3600 sn olarak seçilen analiz süresinin de yeterli olduğu belirlenmiştir.

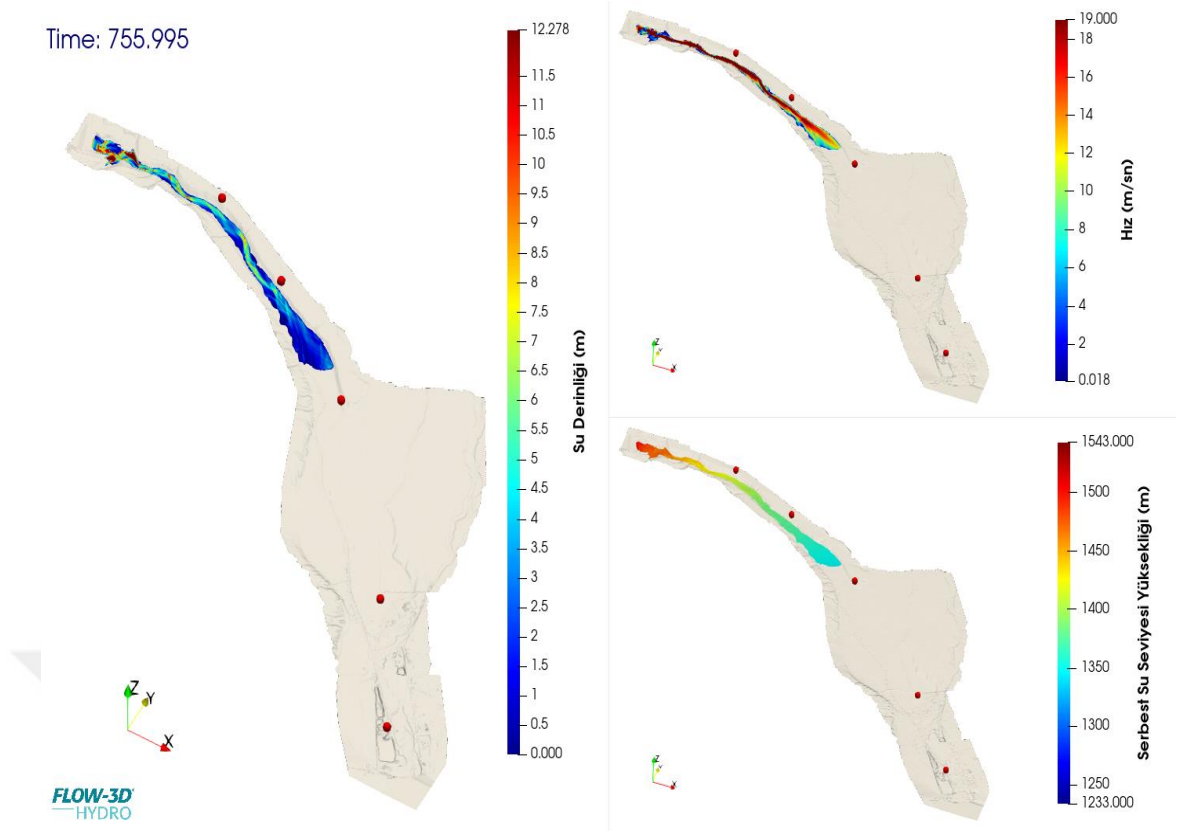
2 boyutlu sığ su modeli analizinde meydana gelen taşkın başlangıçtan, 3600. sn'ye kadar olan yayılım süreci ile taşkına ait analiz sonuçları Şekil 86, Şekil 87, Şekil 88, Şekil 89, Şekil 90, Şekil 91, Şekil 92, Şekil 93, Şekil 94, Şekil 95, Şekil 96, ve Şekil 97'de gösterilmiştir. Şekillerdeki görsellerde, solda taşkın derinlikleri, sağ üstte taşkın hızları ve sağ altta ise akım yüksekliğine ait kot değerleri incelenebilmektedir.



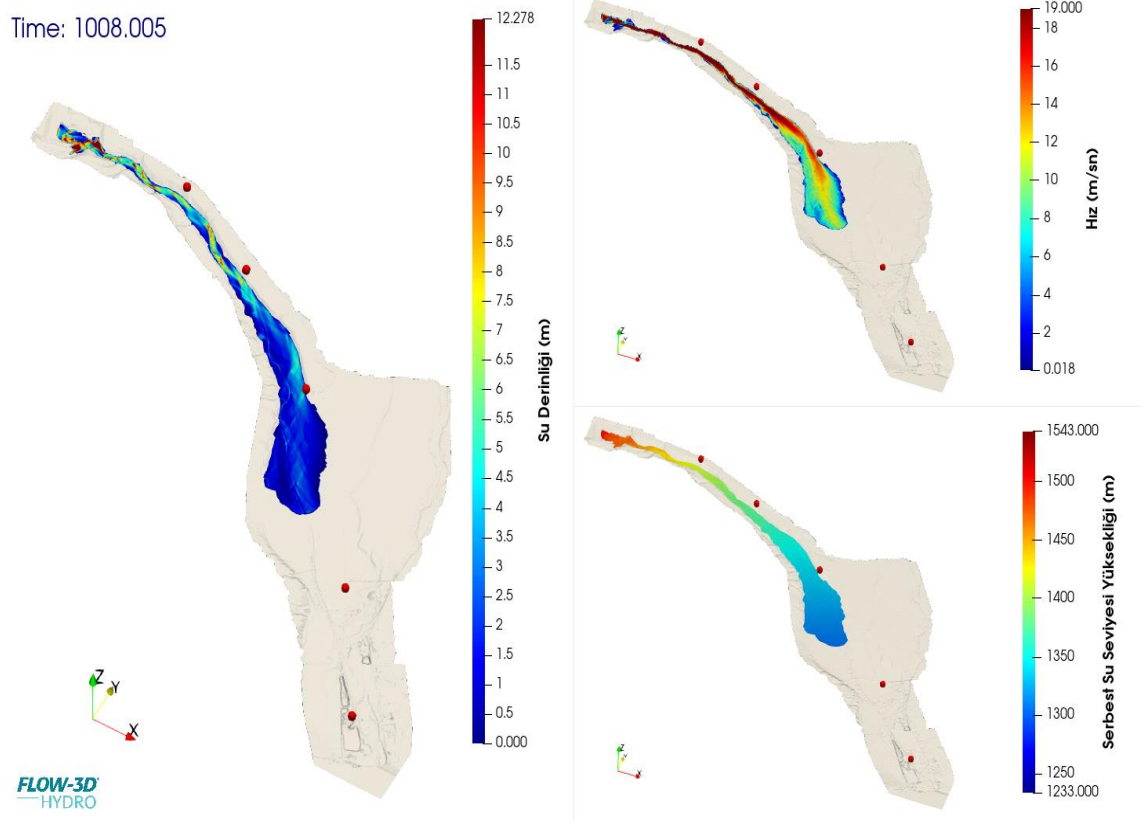
Şekil 86. 3B analizde taşkın başlangıç anı



Şekil 87. 3B analizde 504. saniyedeki taşkın yayılımı

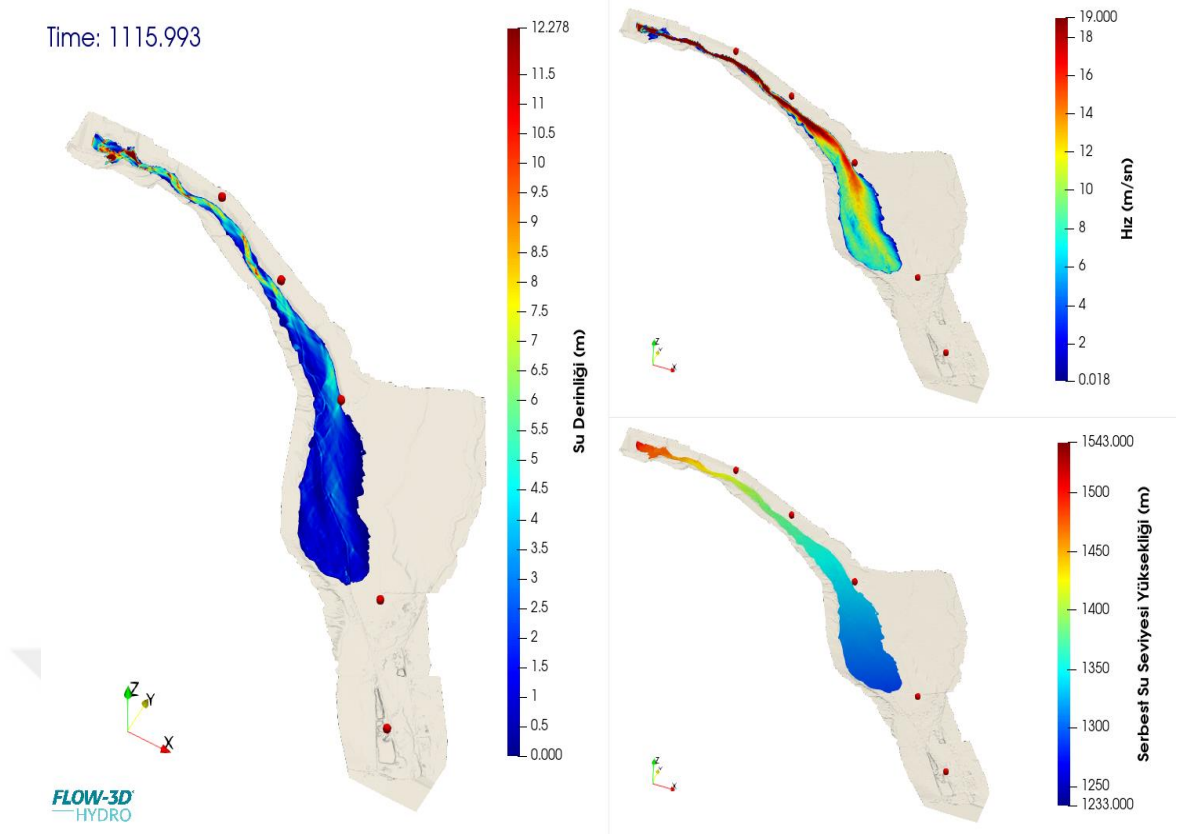


Şekil 88. 3B analizde 756. saniyedeki taşkın yayılımı



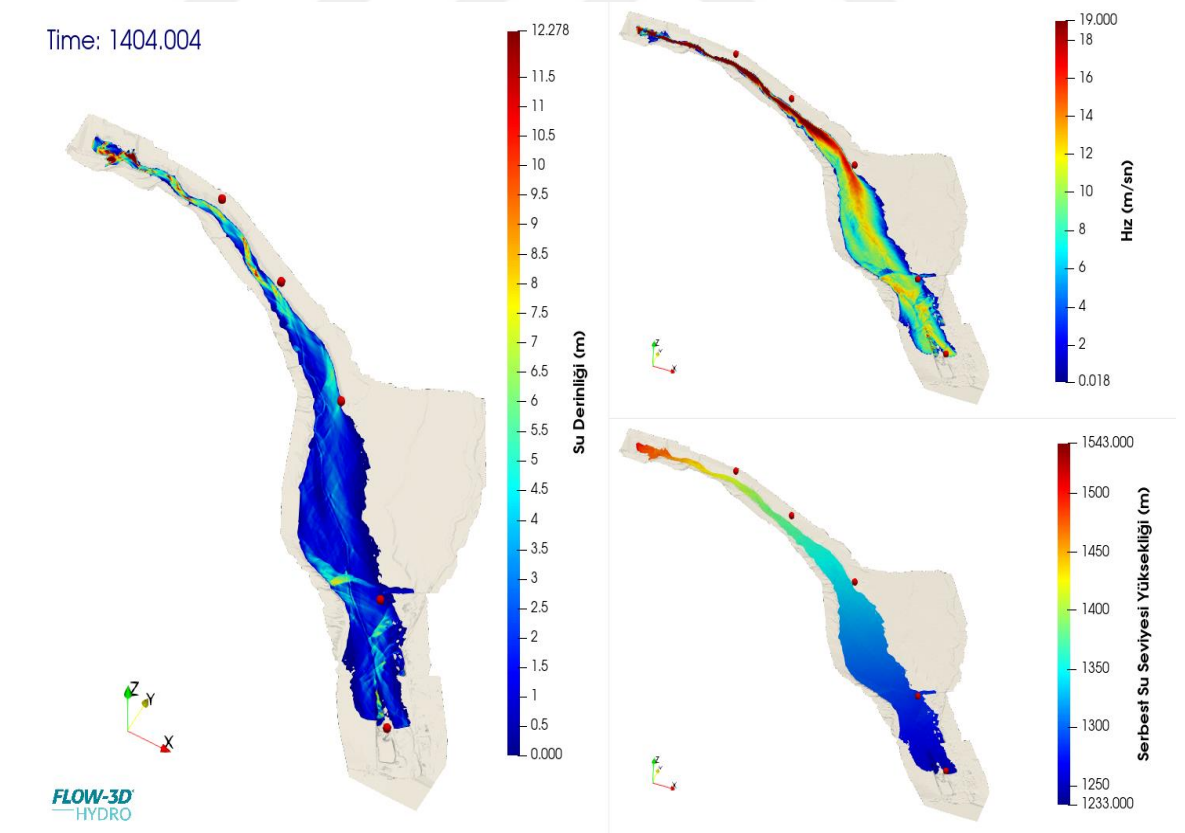
Şekil 89. 3B analizde 1008. saniyedeki taşkın yayılımı

Time: 1115.993

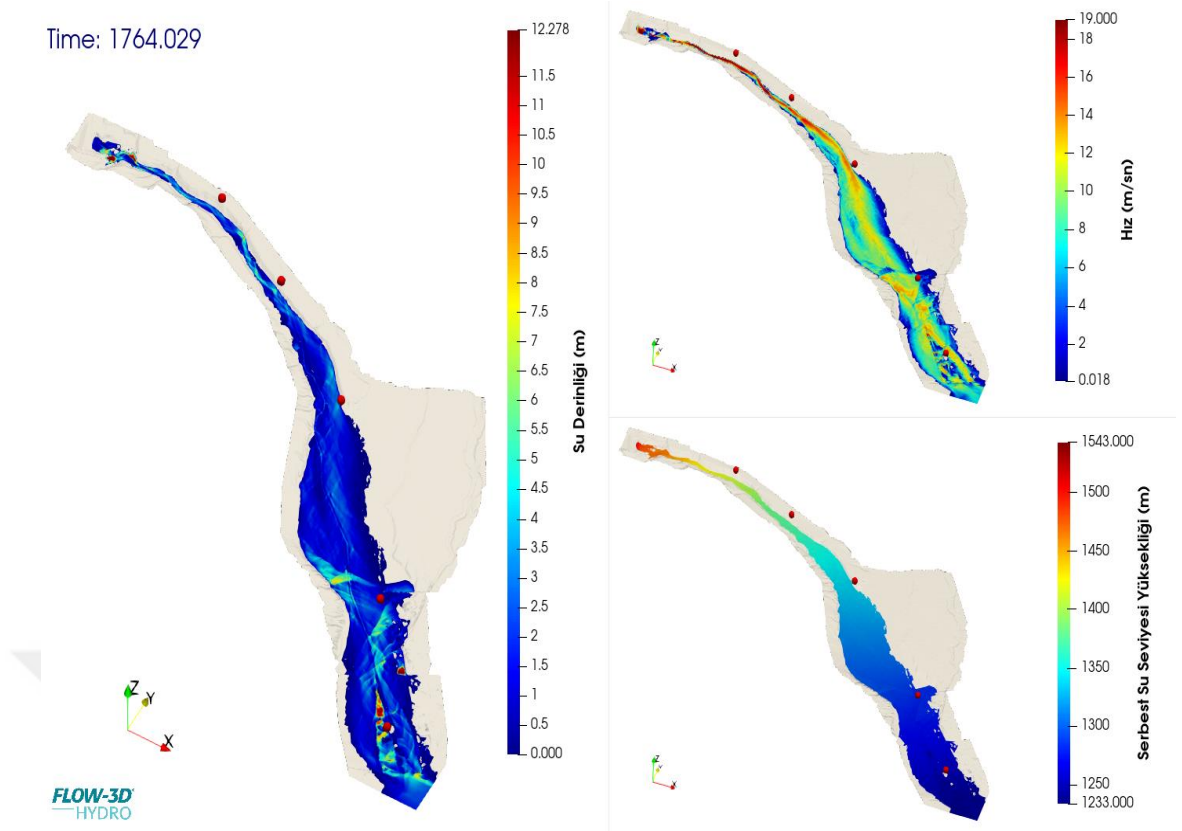


Şekil 90. 3B analizde 1116. saniyedeki taşkın yayılımı

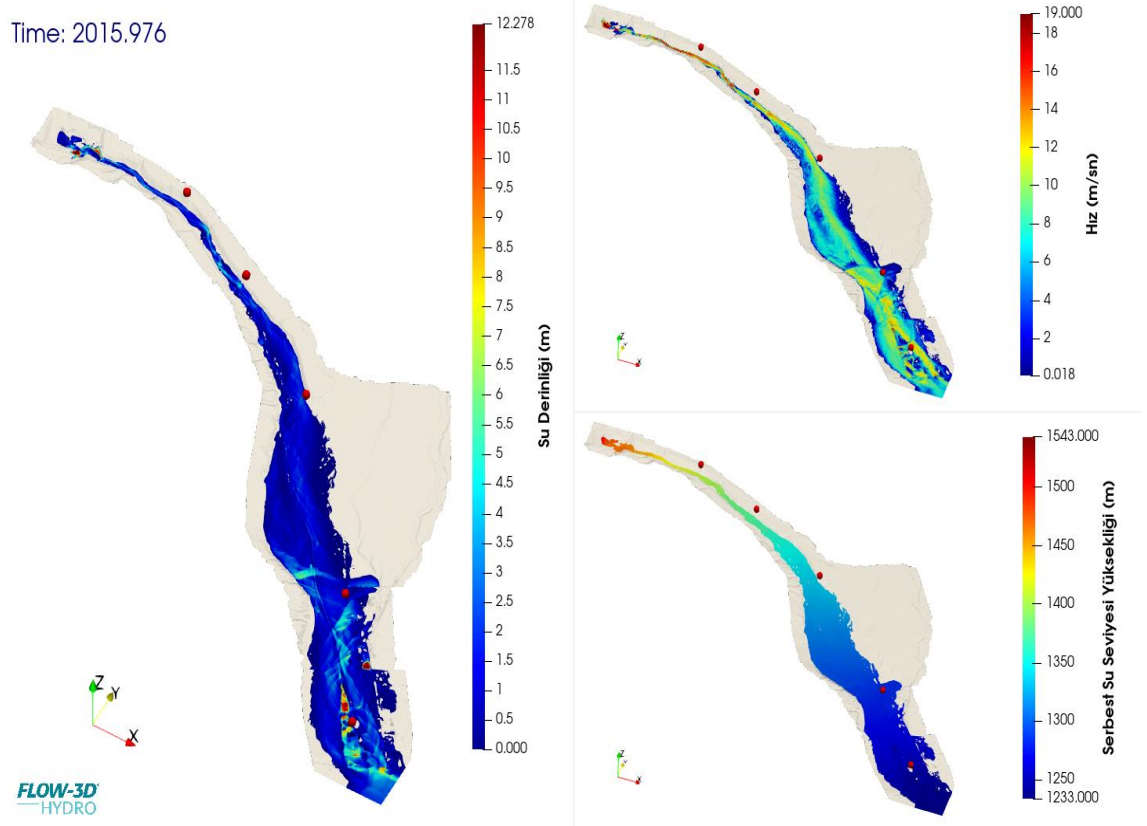
Time: 1404.004



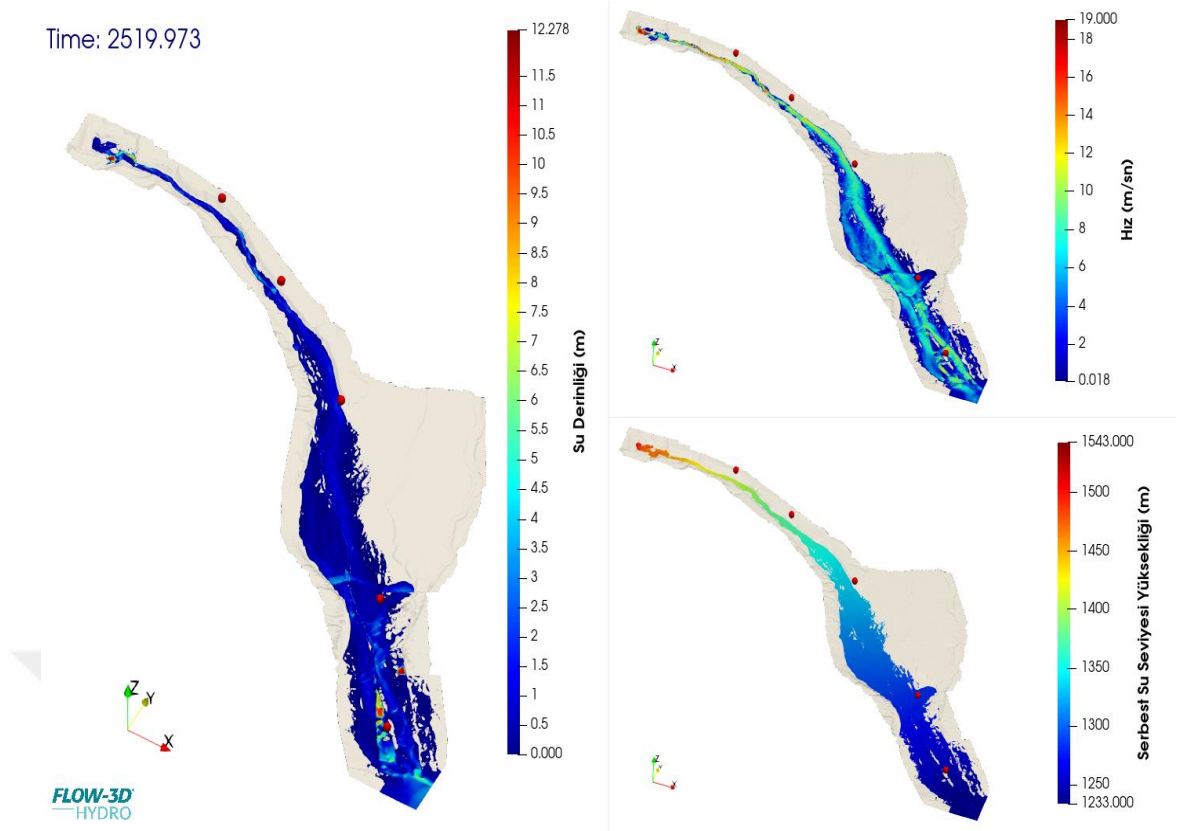
Şekil 91. 3B analizde 1404. saniyedeki taşkın yayılımı



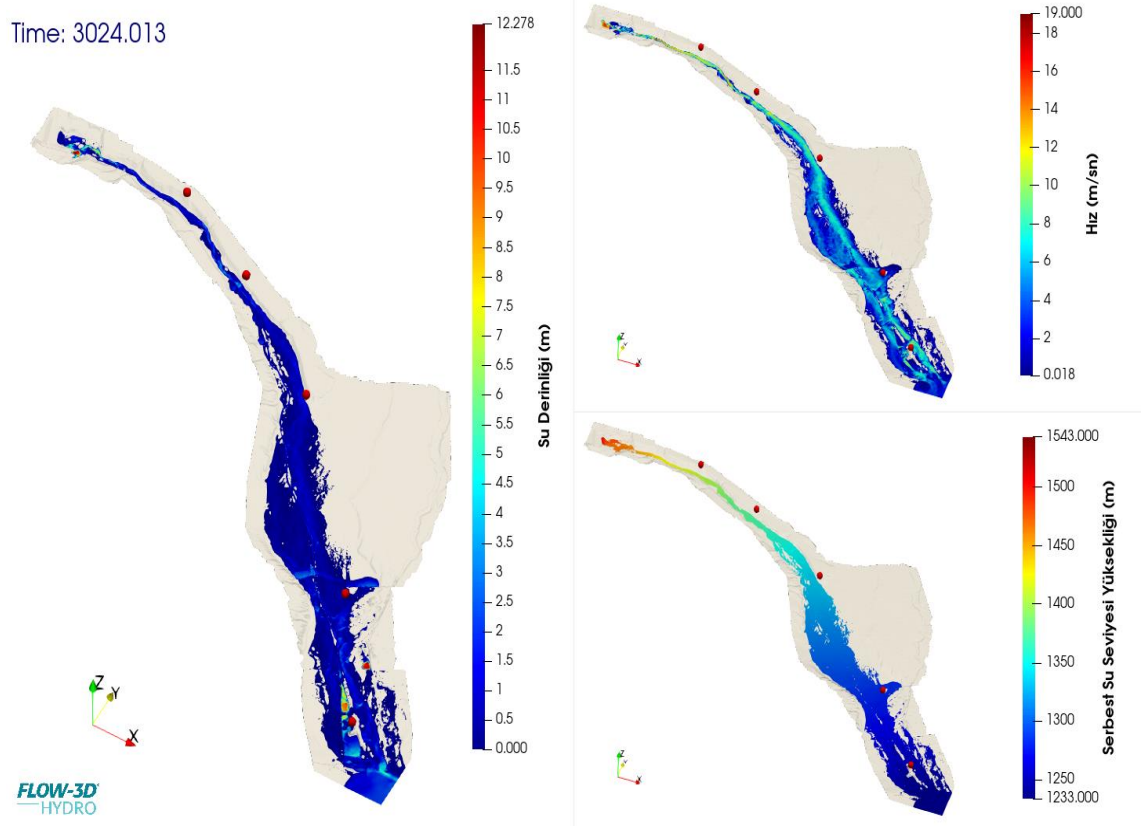
Şekil 92. 3B analizde 1764. saniyedeki taşkın yayılımı



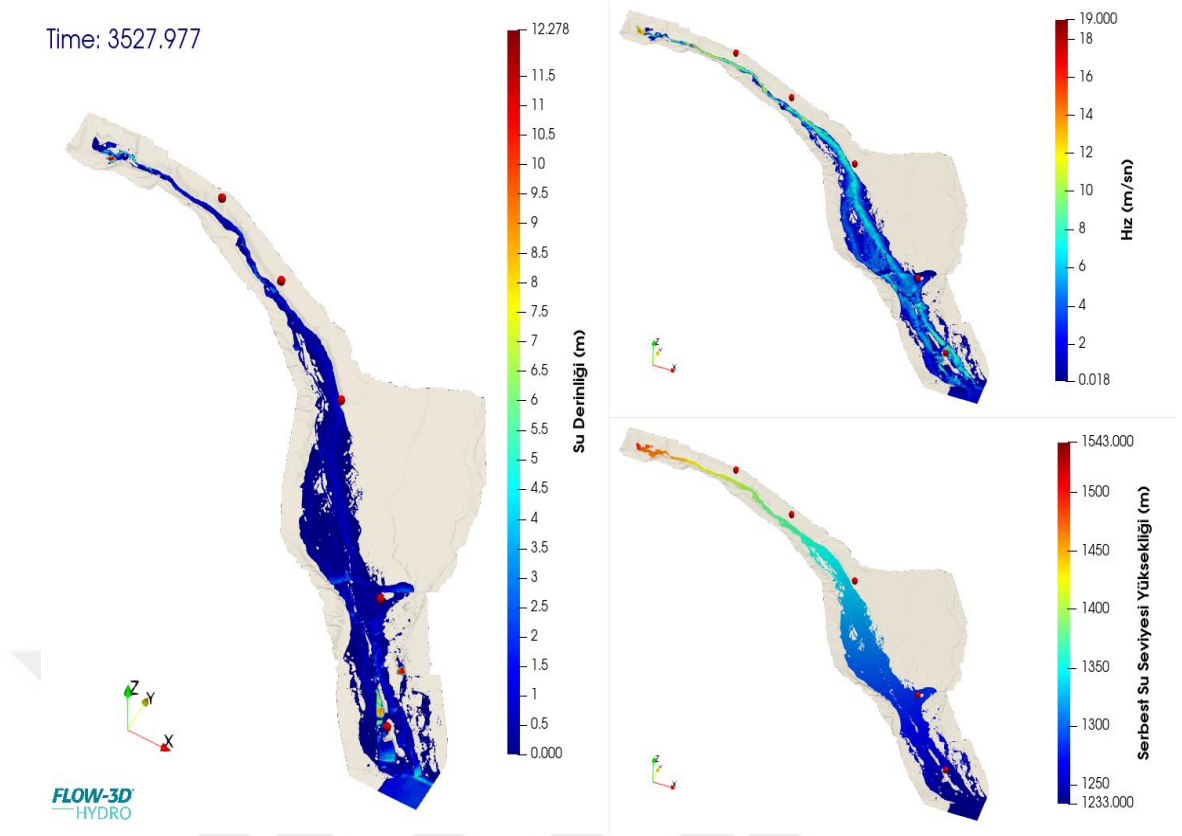
Şekil 93. 3B analizde 2016. saniyedeki taşkın yayılımı



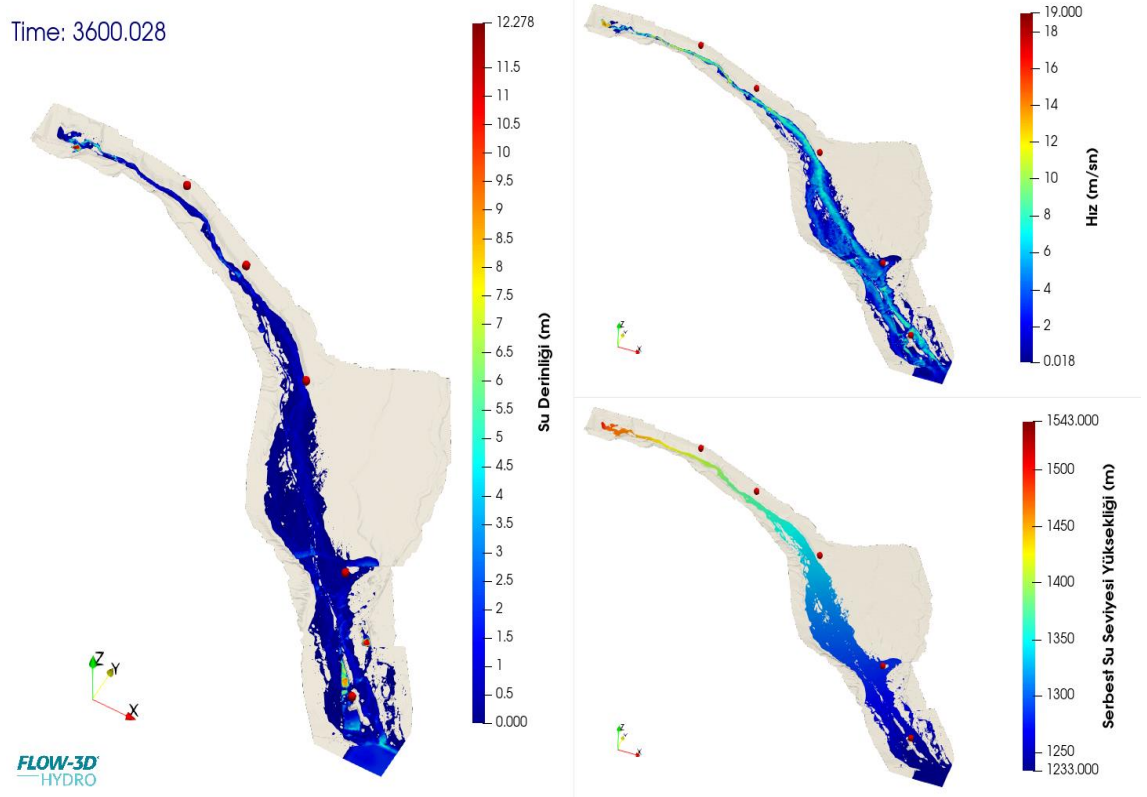
Şekil 94. 3B analizde 2519. saniyedeki taşkın yayılımı



Şekil 95. 3B analizde 3024. saniyedeki taşkın yayılımı

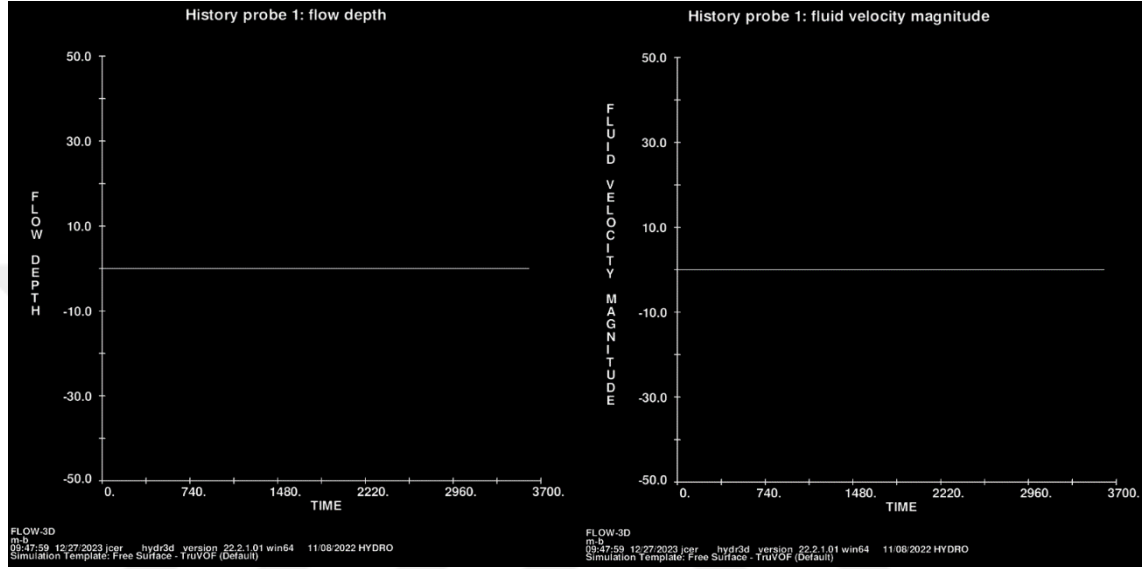


Şekil 96. 3B analizde 3528. saniyedeki taşkın yayılımı

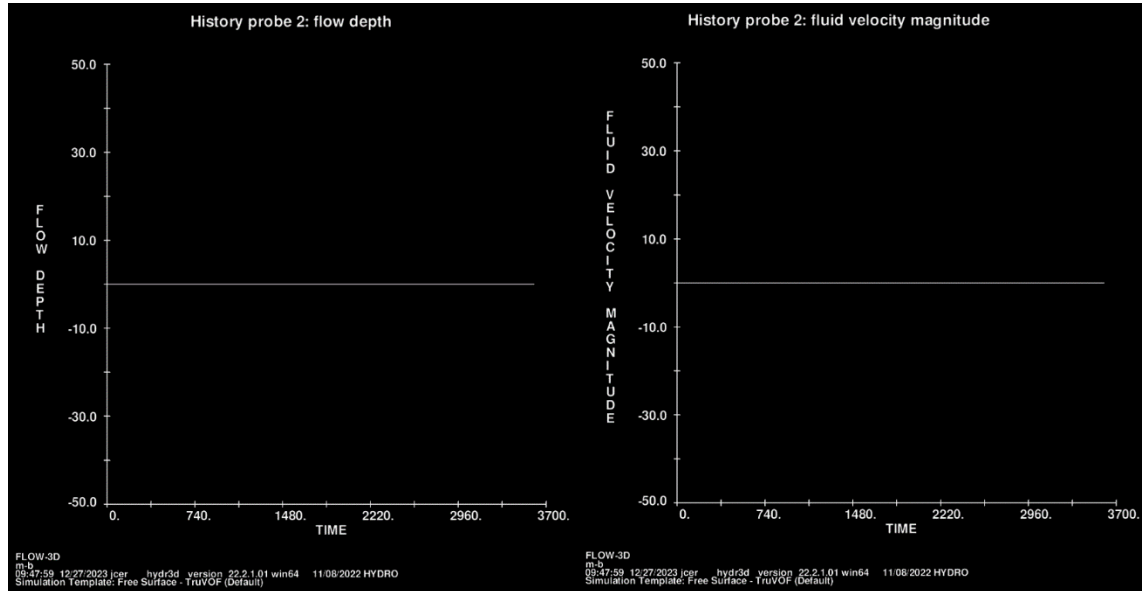


Şekil 97. 3B analizde 3600. saniyedeki taşkın yayılımı

Taşkın yayılım alanı içerisinde tanımlanan yerleşim yerlerinin bulunduğu 5 adet inceleme noktasında meydana gelen taşkın, akım derinliği ve hızlarına ait grafikler de Flow 3D yazılımından elde edilmiştir. Baraj gövdesine; 2.00 km uzaklıkta yer alan 1. inceleme noktası ve 3.60 km uzaklıkta yer alan 2. inceleme noktalarında bulunan sırasıyla Çalatalarmut ve Yeşilçat Köylerinde ölçülen su derinliği ve akım hızlarının sıfır olarak ölçüldüğü Şekil 98 ve Şekil 99’da yer alan grafiklerde görülmektedir.



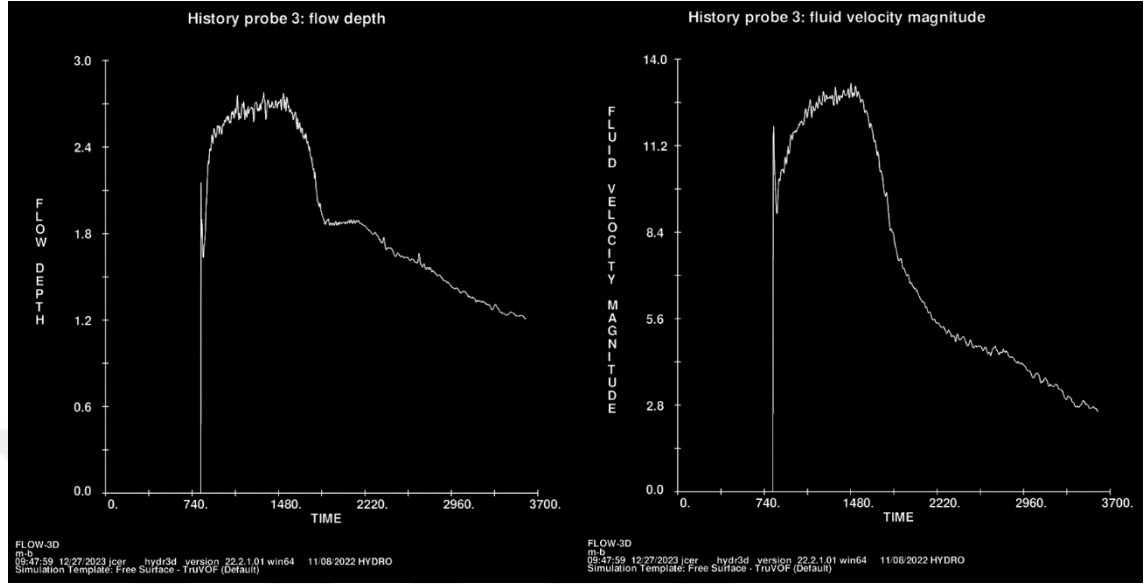
Şekil 98. 3B analizde Çatalarmut Köyü (1. probe) akım derinliği ve hız grafiği



Şekil 99. 3B analizde Yeşilçat Köyü (2. probe) akım derinliği ve hız grafiği

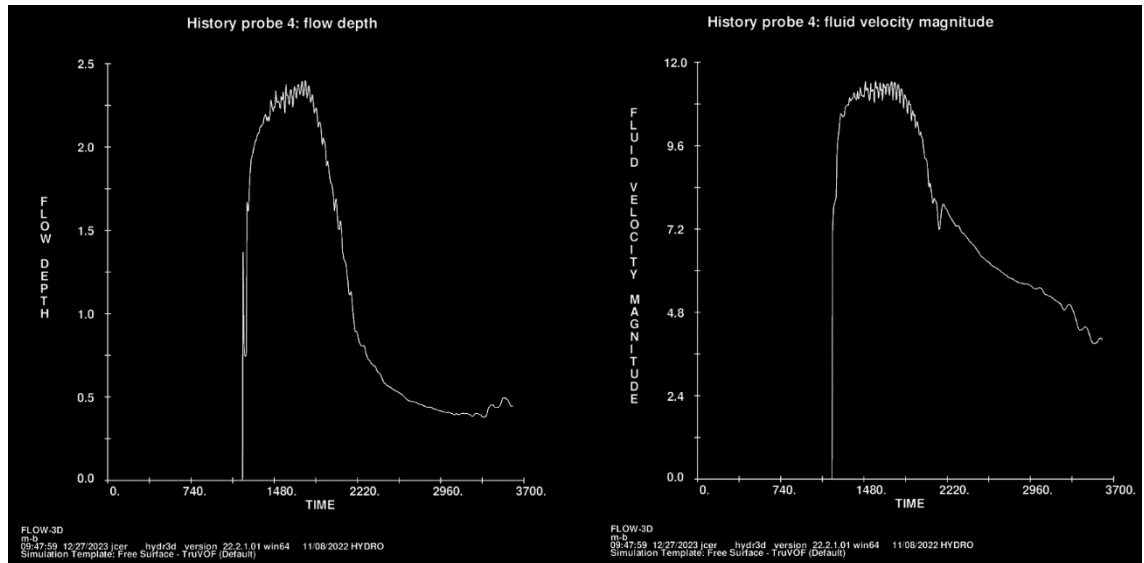
3B analiz sonuçlarına göre; Baraj gövdesine 5,60 km uzaklıkta yer alan 3. probe noktasının atandığı Elmaköy Köyüne taşkın 814. sn’de (yaklaşık olarak 14 dk’da) ve 2.80 m’lik derinlik değerine ulaştığı görülmektedir. Ayrıca taşkından etkilenen bu

noktada en büyük akım hızı değerinin yaklaşık 13.30 m/sn olduğu da ölçüm sonuçlarından elde edilmiştir. 4. probe noktasında oluşan taşkın derinliği ve hızının zamana bağlı olarak değişim grafiği Şekil 100’de gösterilmiştir.



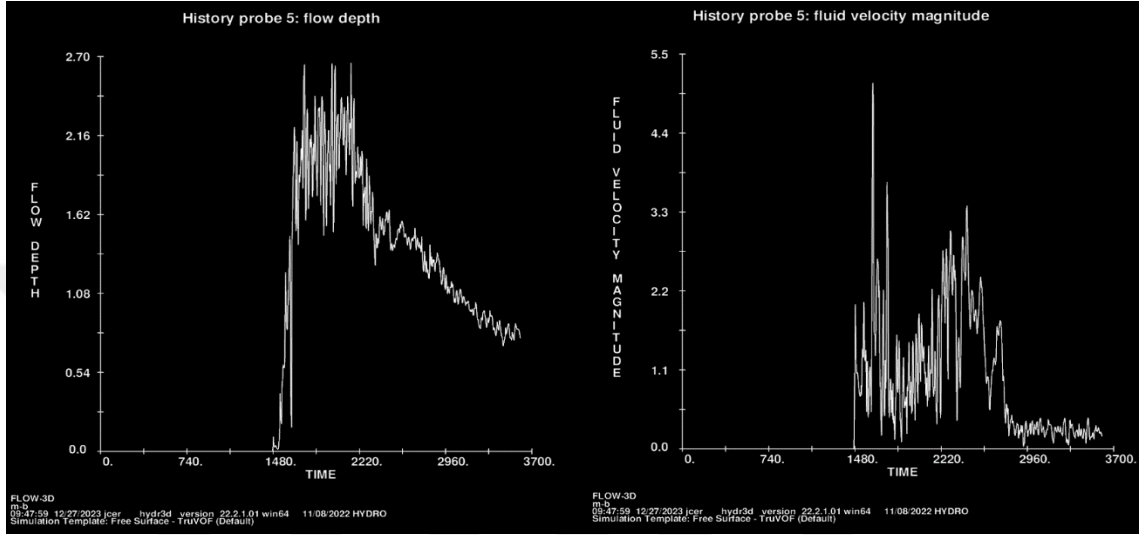
Şekil 100. 3B analizde Elmaköy Köyü (3. probe) akım derinliği ve hız grafiği

Erzincan Organize Sanayi Bölgesinin başlangıç noktasında yer alan, baraj gövdesinden 8.90 km uzaklıkta yer alan 4. inceleme noktasına, taşkının 1265. sn’de (yaklaşık olarak 21 dk) 2.38 m’lik derinlik değerine kadar ulaştığı görülmektedir. Ayrıca taşkından etkilenen bu noktada en büyük akım hızı değerinin yaklaşık 11.40 m/sn olduğu da ölçüm sonuçlarından elde edilmiştir. 4. probe noktasında oluşan taşkın derinliği ve hızının zamana bağlı olarak değişim grafiği, Şekil 101’de gösterilmiştir.



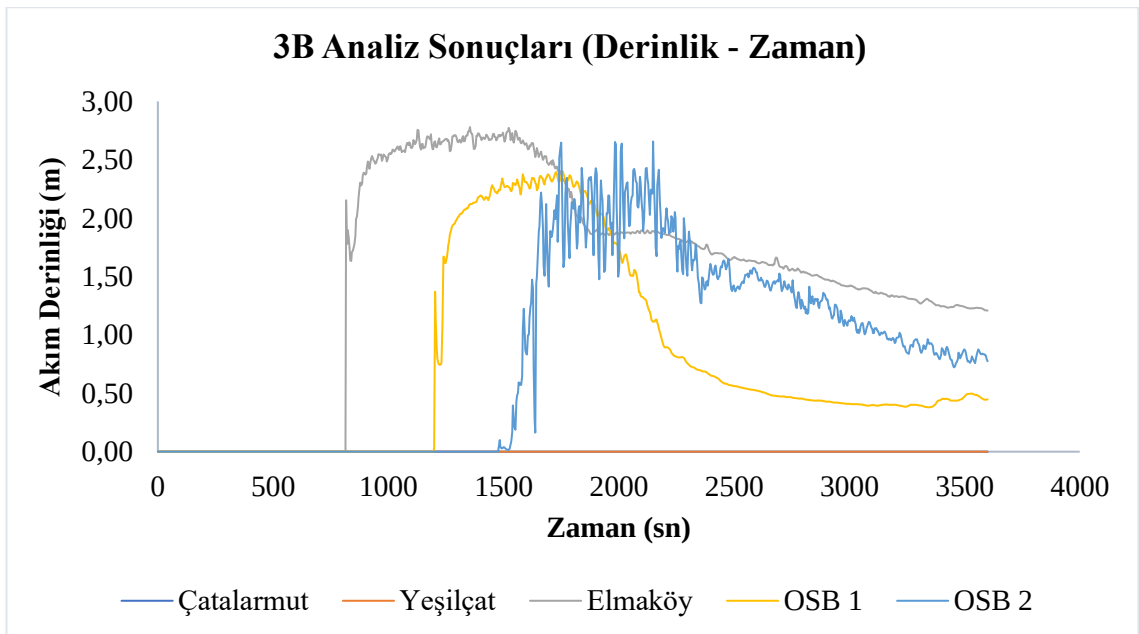
Şekil 101. 3B analizde OSB 1. inceleme noktası (4. probe) akım derinliği ve hız grafiği

Erzincan Organize Sanayi Bölgesinde yer alan, baraj gövdesinden 10.85 km uzaklıkta yer alan 5. inceleme noktasına, taşkınının 1480. sn'de en yüksek 2.70 m'lik derinlik değerine ulaştığı görülmektedir. Ayrıca taşkından etkilenen bu noktada en büyük akım hızı değerinin yaklaşık 5.25 m/sn olduğu da ölçüm sonuçlarından elde edilmiştir. 5. probe noktasında oluşan taşkın derinliği ve hızının zamana bağlı olarak değişim grafiği, Şekil 102'de gösterilmiştir.

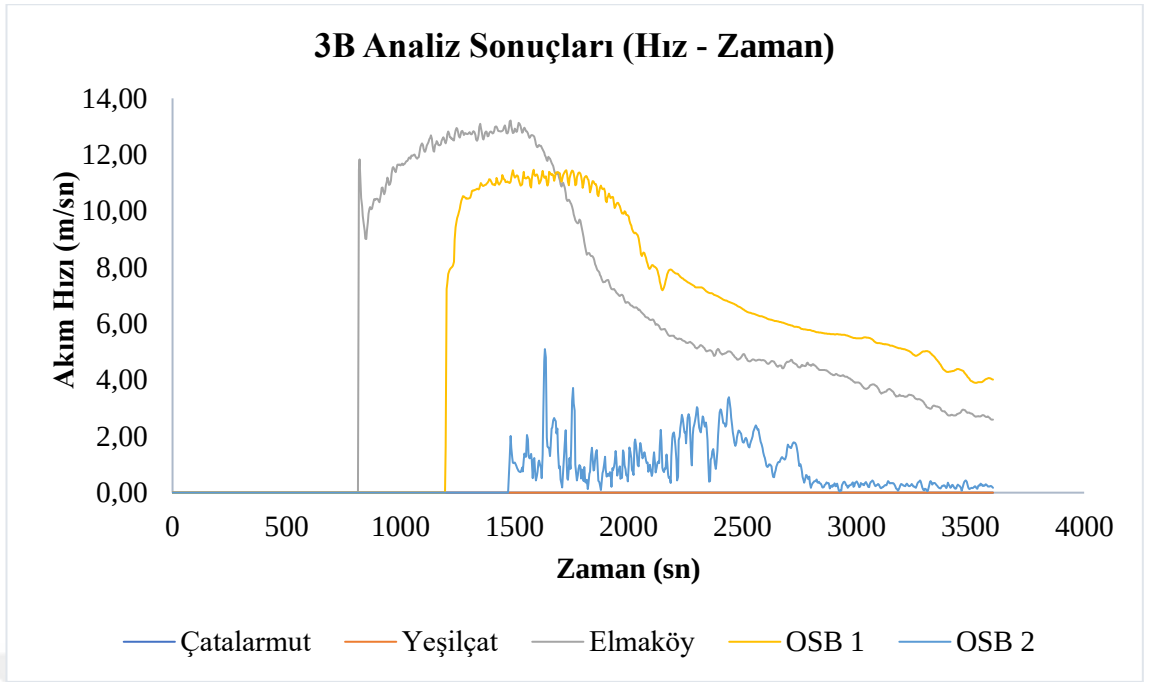


Şekil 102. 3B analizde OSB 2. inceleme noktası (5. probe) akım derinliği ve hız grafiği

Flow 3D yazılımında gerçekleştirilen 3B analizler sonucu tüm yerleşim yerlerinde (probe noktalarında) zamana bağlı olarak ölçülen akım derinleri Şekil 103'de, akım hızları ise Şekil 104'de gösterilmiştir.



Şekil 103. 3B analiz sonucu elde edilen zamana bağlı derinlik değişim grafiği

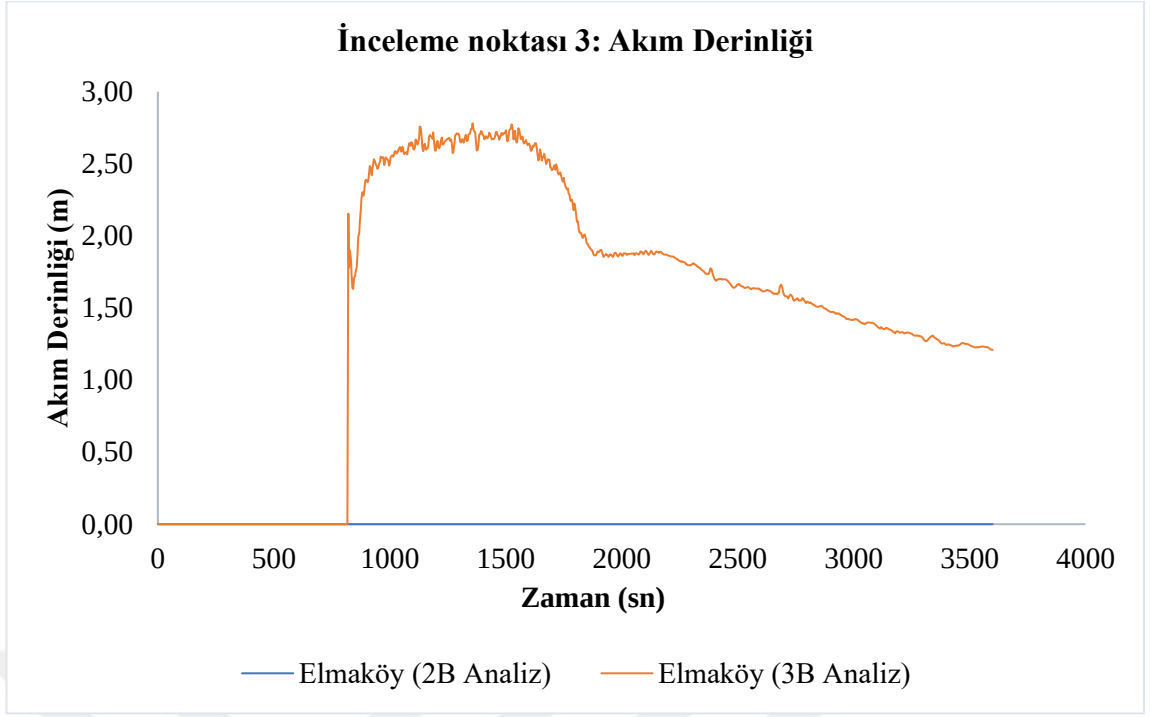


Şekil 104. 3B analiz sonucu elde edilen zamana bağlı akım hızı değişim grafiği

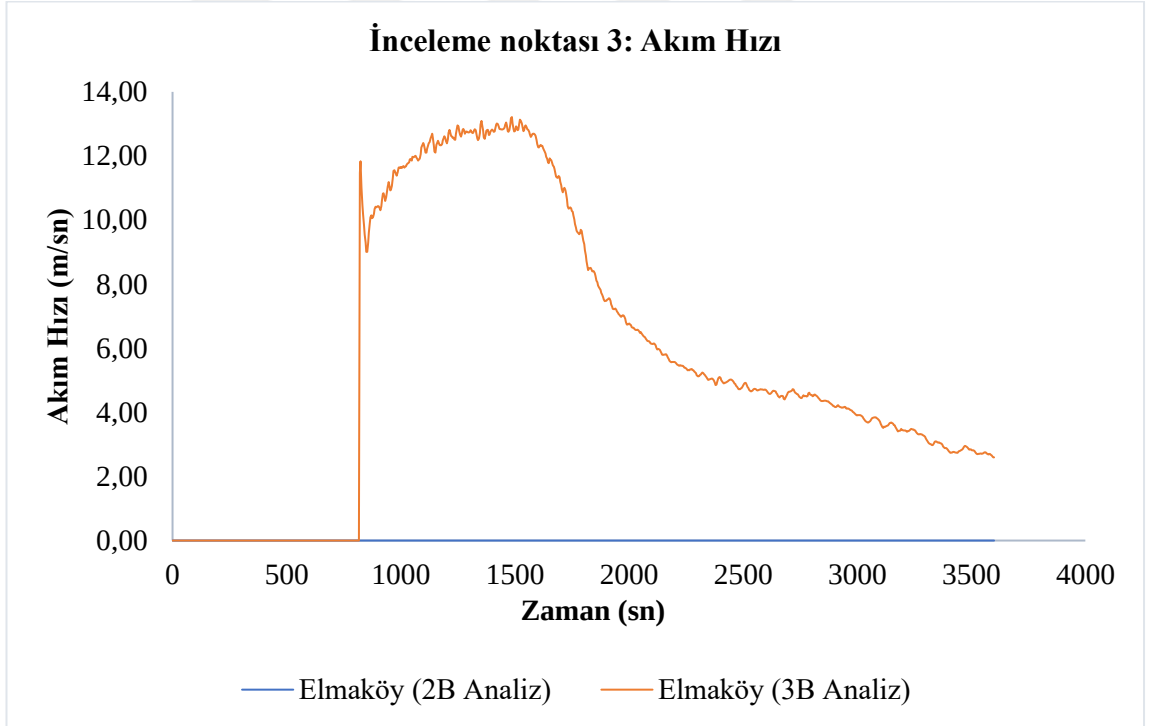
4.9. 2B ve 3B Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Flow 3D yazılımında gerçekleştirilen analizlerde 2B (sığ su) analizi 70 saatlik sürede tamamlanırken, 3B analiz 15 günlük bir sürede tamamlanabilmiştir. Flow 3D yazılımında gerçekleştirilen 2B (sığ su) ve 3B analiz sonuçları karşılaştırıldığında; 2B analizde en büyük akım derinliği 12 m olarak gerçekleşirken, 3B analiz sonucunda 12.30 m olarak gerçekleşmiştir. En büyük akım hızı ise 2B (sığ su) analiz sonucunda 18.37 m/sn, 3B analiz sonucunda ise 19 m/sn değerine ulaşmıştır. Ayrıca her iki analiz yönteminde de taşkın, yerleşim yerlerine tanımlanan inceleme (probe) noktalarına benzer sürelerde ulaştığı tespit edilmiştir.

2B (sığ su) analizleri sonucu baraj gövdesine 5.60 km uzaklıkta bulunan 3 nolu inceleme noktasında bulunan Elmaköy Köyü'nde, Şekil 105 ve Şekil 106'da görüldüğü üzere taşkına ait akım derinliği ve akım hızı sıfır olarak ölçülmektedir. Dolayısıyla 2B (sığ su) modeliyle yapılan analizde, Elmaköy Köyü'nün taşkından etkilenmediği tespit edilmiştir. Buna rağmen, 3 numaralı inceleme noktasında (Elma Köy) 3B (RANS) analiz sonucu yaklaşık 2,78 m yüksekliğe ulaşan su derinliği ve 13,21 m/sn değerinde akım hızının ölçülmesi, sonuçlar arasında önemli bir farklılık olarak ortaya çıkmaktadır.

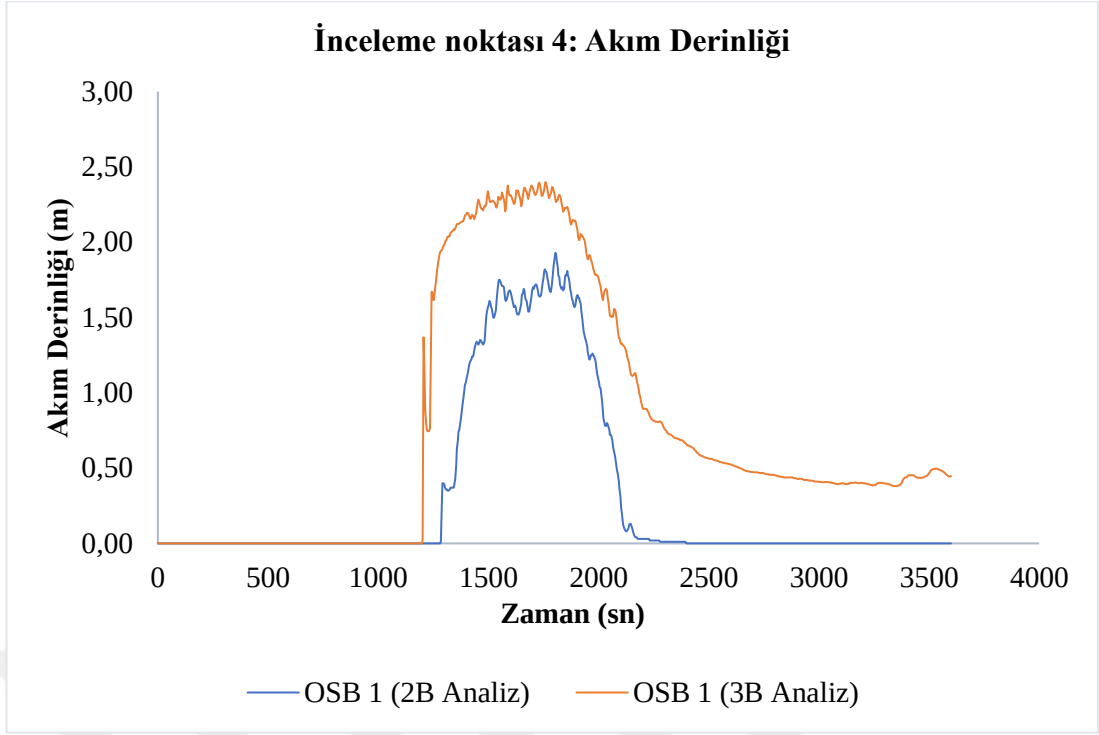


Şekil 105. Elmaköy’de 2B ve 3B analiz sonucu elde edilen zamana bağlı derinlik değişim grafiği



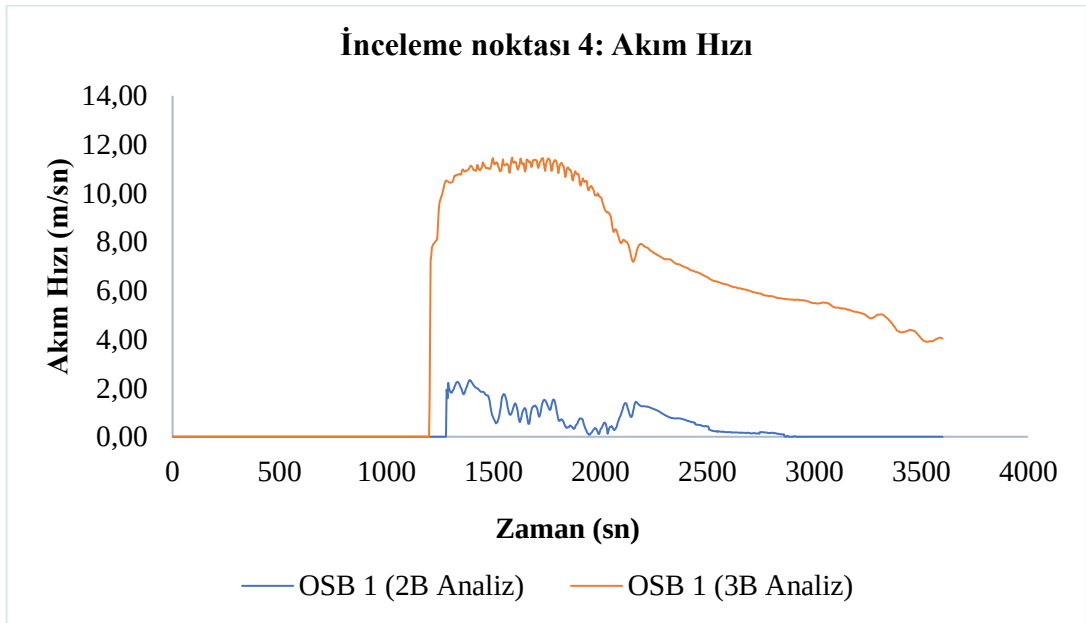
Şekil 106. Elmaköy’de 2B ve 3B analiz sonucu elde edilen zamana bağlı akım hızı değişim grafiği

Baraj gövdesine 8.90 km uzaklıkta bulunan 4 nolu inceleme noktasında bulunan OSB 1’de, Şekil 107’de görüldüğü üzere 2B (sığ su) analiz sonucu ortaya çıkan en büyük akım derinliği 1.93 m iken 3B analiz sonucu ortaya çıkan en büyük akım derinliği 2.40 m değerine ulaşmaktadır.



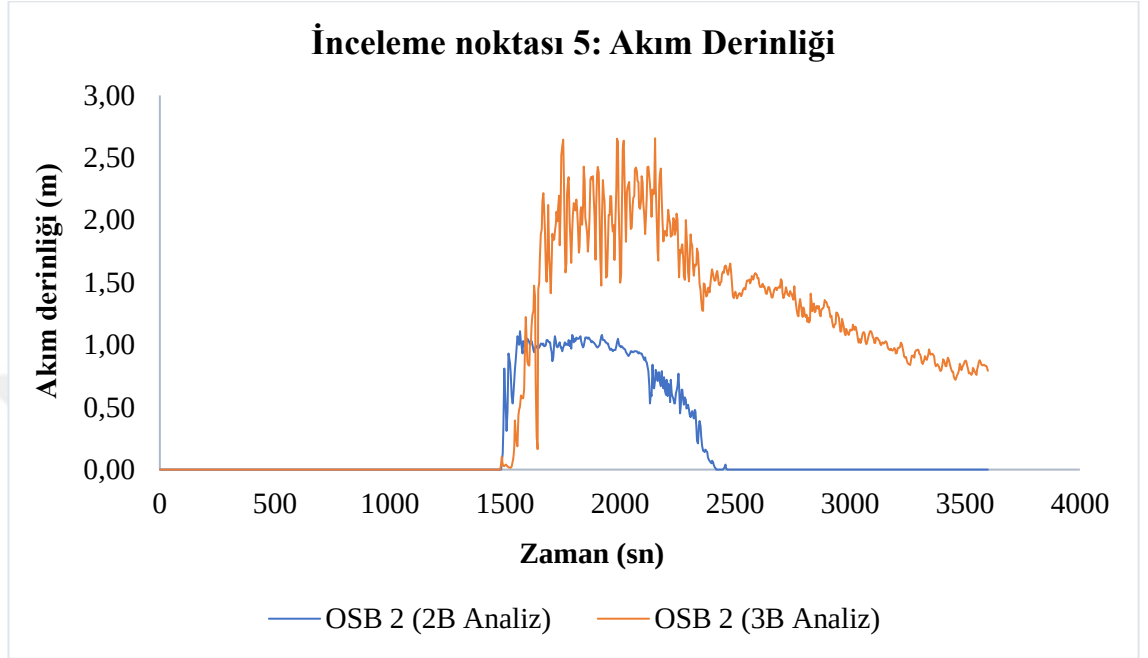
Şekil 107. OSB 1’de 2B ve 3B analiz sonucu elde edilen zamana bağlı derinlik değişim grafiği

Akım hızı değerlerinin karşılaştırılmasında ise Şekil 108’de gösterilen grafikte görüldüğü üzere 2B (sığ su) analizinde ölçülen en büyük akım hızı değeri 2.33 m/sn iken, 3B analiz sonucu 11.46 m/sn değeri ölçülmüştür. Dolayısıyla 3B analiz sonucu ölçülen akım derinliği değeri 2B analize göre 0.47 m, akım hızı değeri 9.13 m/sn daha yüksek ölçülmüştür.



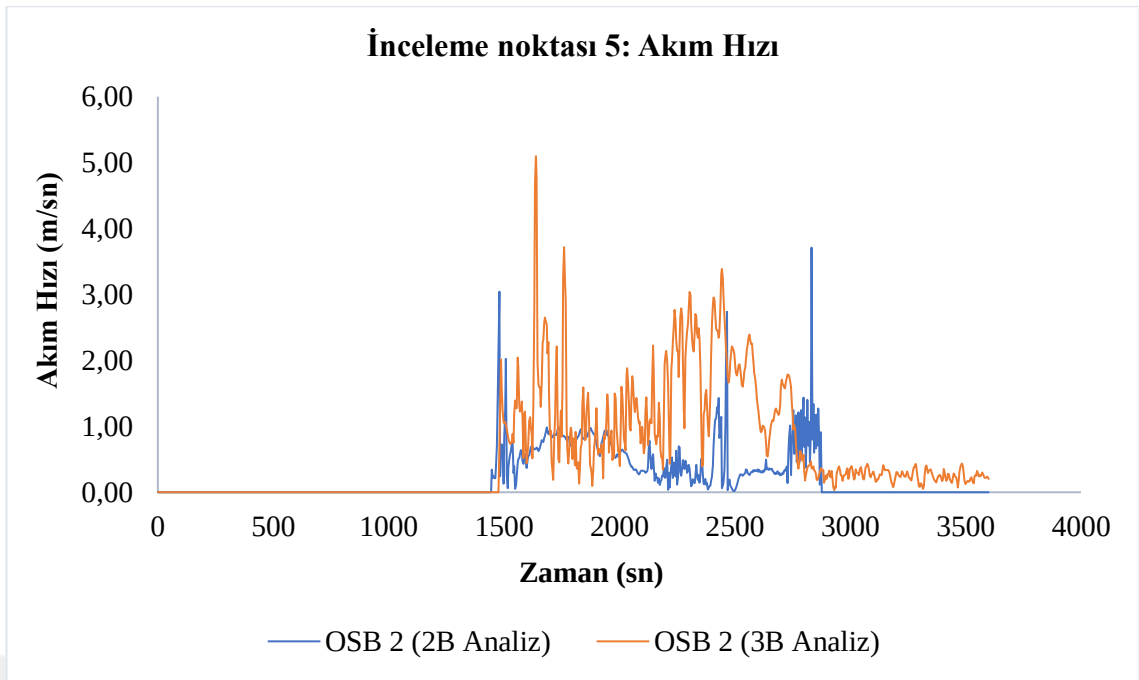
Şekil 108. OSB 1’de 2B ve 3B analiz sonucu elde edilen zamana bağlı akım hızı değişim grafiği

Baraj gövdesine 10.85 km uzaklıkta bulunan 5 nolu inceleme noktasında bulunan OSB 2’de, Şekil 109’da görüldüğü üzere 2B (sığ su) analiz sonucu ortaya çıkan en büyük akım derinliği 1.11 m iken 3B analiz sonucu ortaya çıkan en büyük akım derinliği 2.66 m değerine ulaşmaktadır.



Şekil 109. OSB 2’de 2B ve 3B analiz sonucu elde edilen zamana bağlı derinlik değişim grafiği

Ayrıca Şekil 110’da da görüldüğü üzere 2B (sığ su) analizinde ölçülen en büyük akım hızı değeri 3.71 iken, 3B analiz sonucu 5.10 m/sn değeri ölçülmüştür. Dolayısıyla 3B analiz sonucu ölçülen akım derinliği değeri 1.55 m, akım hızı değeri 1.39 m/sn daha yüksek ölçülmüştür.



Şekil 110. OSB 2’de 2B ve 3B analiz sonucu elde edilen zamana bağlı akım hızı değişim grafiği

2B ve 3B analizler sonucu tüm inceleme noktalarında elde edilen en büyük akım derinlikleri ve akım hızları Tablo 11’de gösterilmiştir.

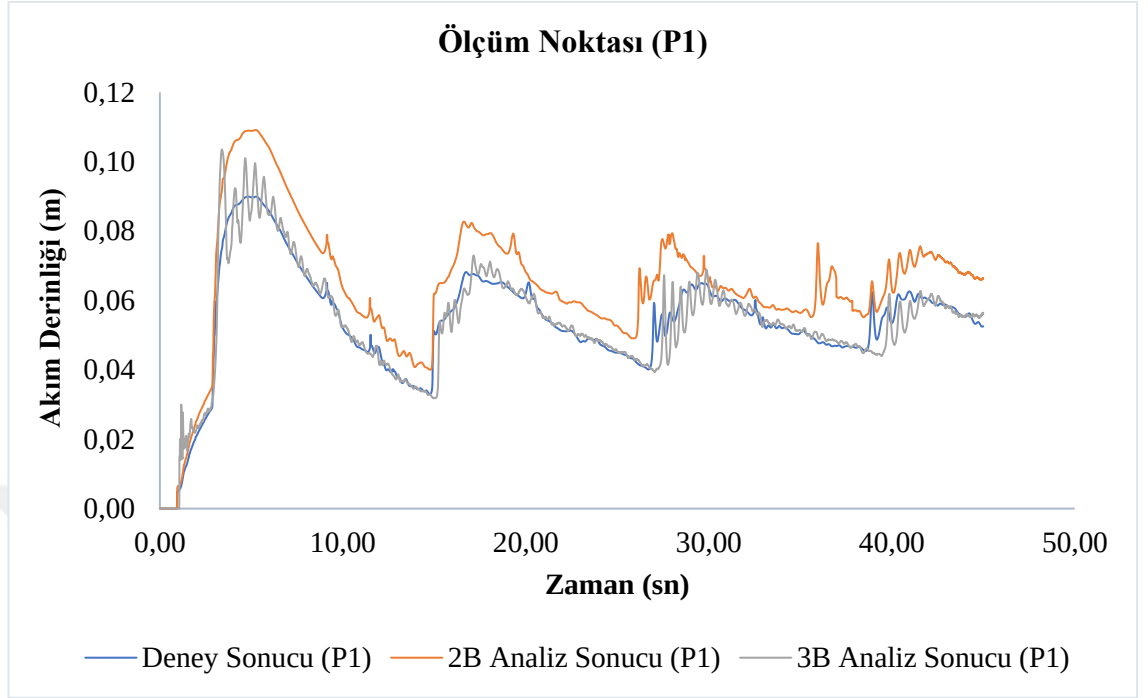
Tablo 11. 2B ve 3B analizler sonucu elde edilen akım derinlikleri ve akım hızları

	Çatalarmut		Yeşilçat		Elmaköy		OSB 1		OSB 2	
	2B	3B	2B	3B	2B	3B	2B	3B	2B	3B
Akım Derinliği (m)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.78	1.93	2.40	1.11	2.66
Akım Hızı (m/sn)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	13.21	2.33	11.46	3.71	5.10

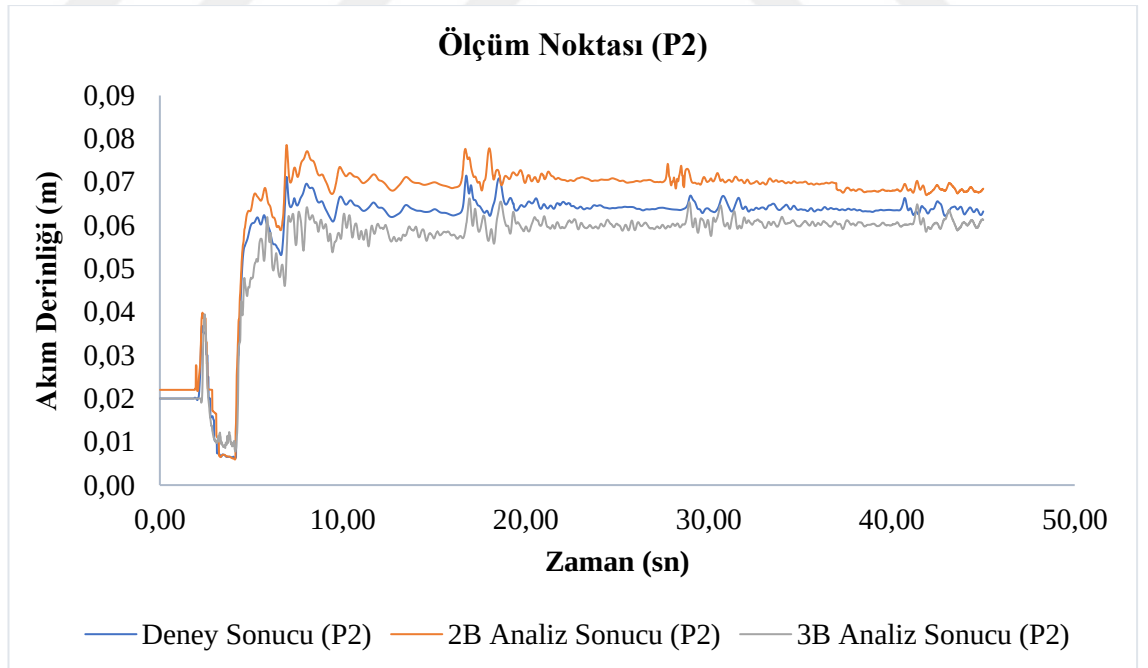
4.10. Flow 3D Yazılımından Elde Edilen Doğrulama Analizi Sonuçları

Baraj yıkılmaları sonucu oluşan taşkın yayılımını incelemek amacıyla, Soares-Fraza (2007) tarafından hazırlanan deney düzeneğinin Flow 3D yazılımında sayısal olarak modellenmesi ile 2B (sığ su) ve 3B boyutlu doğrulama analizleri gerçekleştirilmiştir. Deney sonucunda ve Flow 3D yazılımında gerçekleştirilen analizlerde belirli noktalara yerleştirilmiş olan 3 adet (P1, P2, P3) noktada derinlik değerleri ölçülmüştür. Fiziksel deneyden elde edilen sonuçlar ile 2B ve 3B sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Zamana bağlı olarak, P1 noktasında ölçülen su derinliklerinin karşılaştırıldığı grafik Şekil 111’de, P2 noktasında ölçülen su

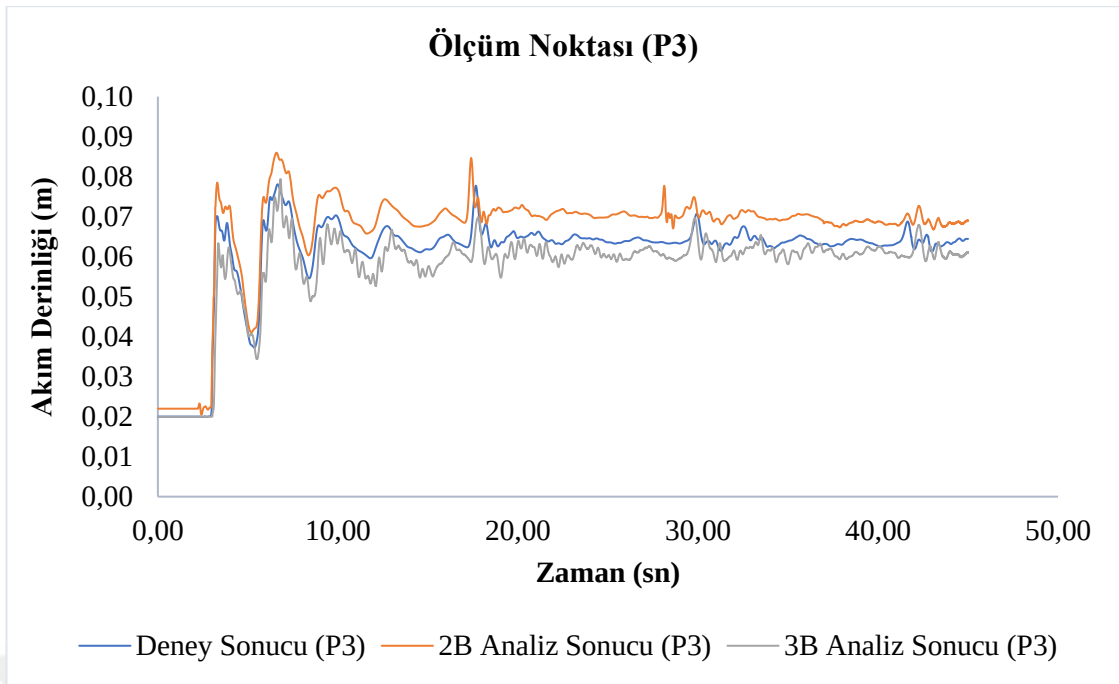
derinliklerinin karşılaştırıldığı grafik Şekil 112’de ve P3 noktasında ölçülen su derinliklerinin karşılaştırıldığı grafik Şekil 113’de gösterilmiştir.



Şekil 111. P1 ölçüm noktasında deney ve sayısal analizler sonucu oluşan akım derinliği grafiği



Şekil 112. P2 ölçüm noktasında deney ve sayısal analizler sonucu oluşan akım derinliği grafiği



Şekil 113. P3 ölçüm noktasında deney ve sayısal analizler sonucu oluşan akım derinliği grafiği

P1, P2 ve P3 ölçüm noktalarında deney ve sayısal analiz sonuçlarının verildiği Şekil 111, Şekil 112 ve Şekil 113’de görüldüğü üzere, sayısal analiz sonuçları ile deney sonucu elde edilen su derinliklerinin oldukça benzer değerler aldığı görülmektedir. Özellikle akışın engelle karşılaşmadığı ve türbülansın az olduğu P1 noktasında ve akımın eşiği geçtikten sonra türbülansın da arttığı P2 ve P3 noktalarında 3B sayısal analiz sonuçlarının, 2B sığ su modeline göre deney sonuçlarıyla daha uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca literatürde yer alan Flow 3D yazılımında tasarlanan HAD modellerinin, deney sonuçlarıyla kıyaslamalarında uyumlu sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Deney modeli, 2B ve 3B analiz sonucu elde edilen ortalama su derinlikleri Tablo 12’de gösterilmiştir. (Akgun vd., 2023; Dai vd., 2020; Dal, 2018; Erat, 2023; Kocaman, 2007; Kocaman vd., 2021; Oğuzhan Güven, 2022).

Tablo 12. Deneysel model ve simülasyonlardan ölçülen ortalama su derinlikleri

Ölçüm Noktası	Ortalama Su Derinlikleri (m)		
	Deney Modeli	2B Model	3B Model
P1	0.0599	0.0643	0.0536
P2	0.0611	0.0649	0.0553
P3	0.0548	0.0666	0.0574

Deney sonuçları ve sayısal modellerde belirlenen su derinlikleri arasındaki sapma miktarının belirlenmesi için üç nokta için de hataların ortalama karekökü (HOK) olarak

adlandırılan Root Mean Square Error (RMSE) ve Ortalama Mutlak Hata (OMH) olarak adlandırılan Mean Absolute Error (MAE) değerleri hesaplanmıştır. (Eşitlik 53’de gösterilen OMH ve (Eşitlik 54’de gösterilen HOK yöntemleri, modellenen veri setlerinin karşılaştırılarak en uygun modelin belirlenme çalışmalarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Alaboz vd., 2020; Anılan vd., 2018; Ferdowsi vd., 2021; Robb ve Vasquez, 2015).

$$OMH = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |E - S| \quad (\text{Eşitlik 53})$$

$$HOK = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E - S)^2} \quad (\text{Eşitlik 54})$$

Bu eşitliklerde;

n: Veri sayısını,

E: Deney sonucu değerini,

S: Simülasyon değerini ifade etmektedir.

Hesaplamalar sonucu P1, P2 ve P3 noktalarında hesaplanan değerler Tablo 13’de verilmiştir. Herhangi bir asgari referans değeri bulunmamakla birlikte OMH ve HOK değerlerinin sıfır değerine yakınlığı model performansının doğruluk derecesini göstermektedir

Tablo 13. OMH ve HOK sapma değerleri

Ölçüm Noktası	OMH (m)		HOK (m)	
	3B	2B	3B	2B
P1	0.0028	0.0107	0.0047	0.0117
P2	0.0044	0.0057	0.0050	0.0059
P3	0.0036	0.0058	0.0046	0.0062

Hesaplamalar sonucu P1, P2 ve P3 noktalarında hesaplanan sapma değerleri Tablo 13’de verilmiştir. Herhangi bir asgari referans değeri bulunmamakla birlikte OMH ve HOK değerlerinin sıfır değerine yakınlığı model performansının doğruluk derecesini göstermektedir Tablo 13’de görüleceği üzere OMH ve HOK eşitliklerinden hesaplanan sapma değerleri oldukça küçük ve sıfır değerine yakın olduğundan, 2B ve 3B model performanslarının son derece iyi sonuçlar verdiği söylenebilmektedir.

4.11. Muhtemel Can Kaybı Tahmini

Erzincan Barajı'nın olası yıkılması durumunda, meydana gelebilecek taşkın riski altında yer alan, yerleşim yerlerinin ve sanayi tesislerinin bulunduğu, çalışma kapsamında ortaya çıkarılmıştır. 12.1888 hm³ göl alanına sahip Erzincan Barajı'nın olası yıkılması durumunda, risk altında bulunan yerleşim yerleri ve sanayi tesislerinde yüksek akım hızları ve akım derinlikleri tespit edilmiştir. Yüksek su derinliği ve hızları göz önünde bulundurulduğunda, olası can kayıplarının meydana gelmesi muhtemel bir sonuç olarak göz önünde bulundurulmalıdır. 2B (SWE) analiz sonucunda Elmaköy Köyü'nün taşkından etkilenmediği, buna rağmen 3B (RANS) analizde ise taşkından etkilendiği görülmektedir. Bu nedenle taşkın yayılım alanı, su derinlikleri ve hızları açısından en olumsuz senaryo, 3 boyutlu analiz sonucunda ortaya çıkmıştır.

3B taşkın yayılım analizi sonucu Elmaköy Köyü'nün kısmen taşkından etkilendiği ve etkilenen yerleşimlerde yaşayan insan sayısının, nüfusun en yoğun olduğu dönemde yaklaşık 50 kişi olduğu Erzincan İl Özel İdaresi ve köy muhtarlığı verilerinden elde edilmiştir. Ayrıca yine taşkın riski altında bulunduğu tespit edilen, Erzincan Organize Sanayi Bölgesi'nde yer alan sanayi tesislerinin bilgileri ve çalışan sayıları da Erzincan Organize Sanayi Bölgesi Müdürlüğünden temin edilmiştir. Muhtemel taşkın yayılım bölgesinde 6 adet sanayi tesisi bulunmakta olup bunlardan 2'si günümüzde faaliyet göstermemektedir. Baraj mansabında ve taşkın riski altında olduğu tespit edilen sanayi tesisi listesi ve çalışan sayıları Tablo 14'de gösterilmiştir. Elmaköy Köyünde ve sanayi tesislerinde, can kaybı hesabına esas olmak üzere yaklaşık toplam 107 kişinin risk altında olduğu verisi elde edilmiştir.

Tablo 14. Taşkın riski altında bulunan sanayi tesisleri

Firma Adı	Tesis Sektörü	Çalışan Kişi Sayısı
Atrak Uçan Demiryolu Sistemleri San. Ve Tic.Aş.	Demiryolu Travers Üretimi	0
Mabelsan Reklam Ve Kurumsal Tanıtım Hiz.Aş.	Reklam Malzemeleri Üretimi	0
Saka Ağaç Endüstri San. Ve Tic.Ltd.Şti	Pelet Üretimi	32
Nayla Gayrimenkul Geliştirme İnş. San. Ve Tic. Aş.	Beton Yapı Elemanları Üretimi	8
Eda İnşaat San. ve Tic.Ltd. Şti.	Beton Yapı Elemanları Üretimi	5
24 Ayar Madencilik Enerji Orman Ür. San. ve Tic. Ltd.Şti.	Krom Konsantre ve Zenginleştirme	12

Baraj yıkılması sonucu meydana gelebilecek can kaybı hesabı pek çok parametreye bağlı olup her baraj için benzersiz niteliktedir. Bu nedenle can kaybı hesaplamalarının,

gerçeği tam olarak temsil etmesi mümkün olmamakla birlikte farklı tahmini hesaplama teknikleri geliştirilmiştir. Baraj yıkılmalarına bağlı olarak meydana gelen can kaybının tespiti için literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde; yapılan çalışmaların, geçmiş baraj yıkılmalarına dayalı olarak, çeşitli istatistiksel hesaplamalar sonucu ortaya çıkarılan farklı amprik yaklaşımlara bağlı olduğu görülmektedir. Bu yöntemler arasından yine literatürde sıkça kullanılmış olan pek çok baraj yıkılmasının incelenmesiyle ortaya çıkarılmış olan Graham yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca Graham yönteminde diğer yöntemlere nazaran daha fazla değişkenin etkisi, hesaplamalara dahil edilerek daha gerçekçi sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır. Gelişen teknolojik imkanlarla Graham yöntemi sayısal simülasyonlarla modifiye edilerek geliştirilmiştir. Modifiye edilmiş Graham yöntemi, özellikle pek çok baraj yıkılma vakasının meydana geldiği Çin Halk Cumhuriyeti'nde yapılmış olan çalışmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlara bağlı olarak bu çalışma kapsamında yapılan can kaybı tahmini hesaplamalarında, modifiye edilen Graham metodunun kullanılması tercih edilmiştir. Modifiye edilmiş Graham yönteminde, taşkın riski altında bulunan bölgedeki yaşayan insan sayısı, bu insanların afete tepki verebilme kapasitesi, etkilenen nüfusun yaş dağılımı ve bu insanların baraj yıkılmaları konusundaki farkındalığına bağlı olarak hesaplanmaktadır. Bunun yanı sıra taşkın şiddeti ve bölgenin barajdan uzaklığına bağlı olarak taşkın ulaşma süresi de hesaplamalarda etkili olmaktadır. Ayrıca barajın yüksekliği, gövdenin yıkılma süresi, baraj gölünde depolanan suyun hacmi, topografyanın eğimi ve bölgedeki yapıların dayanıklılığı ile ilgili parametreler de hesaplamalara dahil edilmektedir. Modifiye edilmiş Graham yönteminde Erzincan Barajı'nın olası yıkılması durumunda meydana gelebilecek tahmini can kaybı sayısı, (Eşitlik 55, (Eşitlik 56, (Eşitlik 57 ve (Eşitlik 58 yardımıyla elde edilmiştir (Akgun vd., 2023; Akgün, 2023; DeKay ve McClelland, 1993; Graham, 1999; Jonkman vd., 2008; Lee vd., 1986; Sun vd., 2014; Xiaoling vd., 2012; Zhou vd., 2014).

$$LOL=Par.f.a$$

(Eşitlik 55)

Bu eşitlikte;

LOL: Tahmini can kaybı sayısını,

Par: Risk altında bulunan kişi sayısını,

f: Risk altında bulunan kişilerin ölüm oranını (literatürde 0.75 olarak önerilmiştir),

a: Ölüm oranını etkileyen faktörlere bağlı olarak değişen katsayıyı ifade etmektedir.

$$a = m_1 + bm_2 \quad (\text{Eşitlik 56})$$

$$m_1 = \sum_{i=1}^4 s_i \theta_i \quad (\text{Eşitlik 57})$$

$$m_2 = \sum_{i=1}^9 n_i t_i \quad (\text{Eşitlik 58})$$

Bu eşitliklerde;

b: Sabit katsayı (literatürde 0.75 olarak önerilmiştir),

s_i : Can kaybına etki eden faktör (Tablo 15’de gösterilen aralıklardan seçilir)

n_i : Can kaybına etki eden faktör (Tablo 17’de gösterilen aralıklardan seçilir)

θ_i : Analitik Hiyerarşi Prosesine (AHP) göre belirlenen katsayıyı,

($\theta_1 = \theta_2 = 0.2$ ve $\theta_3 = \theta_4 = 0.3$)

t_i : Analitik Hiyerarşi Prosesine (AHP) göre belirlenen katsayıyı

($t_1 = t_3 = t_4 = 0.2$ ve $t_2 = t_5 = 0.1$ ve $t_6 = t_7 = t_8 = t_9 = 0.05$) temsil etmektedir.

m_1 değerlerinin hesaplanabilmesi için seçilmesi gereken s_i sabitlerine ait değer aralıkları Tablo 15’de gösterilmiştir.

Tablo 15. Can kaybına etki eden s_i değerleri

s_i	Riskli Bölgede Yaşayan İnsan Sayısı	Taşkın Şiddeti	Uyarı Süresi (saat)	Afet Farkındalığı
0.01 - 0.20	$1 - 10^2$	Çok düşük	$1.00 < W_t$	Çok düşük
0.20 - 0.40	$10^2 - 10^3$	Düşük	$0.75 < W_t < 1.00$	Düşük
0.40 - 0.60	$10^3 - 10^4$	Normal	$0.50 < W_t < 0.75$	Normal
0.60 - 0.80	$10^4 - 10^5$	Yüksek	$0.25 < W_t < 0.50$	Yüksek
0.80 - 1.00	$>10^5$	Çok Yüksek	$W_t < 0.25$	Çok Yüksek

Çalışma kapsamında seçilen, Erzincan Barajı’nın mansap bölgesinde riskli bölgede yaşayan insan sayısı faktörü (s_1), taşkın şiddeti faktörü (s_2), uyarı süresi faktörü (s_3) ve afet farkındalığı faktörü (s_4) değerleri, Tablo 16’de gösterilmiştir.

Tablo 16. Tahmini can kaybı için seçilen s_i değerleri

s_i	s_1	s_2	s_3	s_4
2B analiz	0.20	0.70	0.80	0.50
3B analiz	0.25	0.70	0.80	0.50

Flow 3D yazılımında gerçekleştirilen 2B analiz sonucuna göre, Elmaköy Köyü taşkından etkilenmediğinden, riskli bölgede yaşayan insan sayısına bağlı olan s_1 değeri 0.20 seçilmiştir. Buna rağmen 3B analiz sonucu Elmaköy Köyü'nün taşkından etkilendiği görüldüğünden, s_1 değeri 0.25 olarak seçilmiştir. s_2 , s_3 ve s_4 değerleri ise her iki analiz sonucu için de aynı olduğundan tüm değerler eşit seçilmiştir.

m_2 değerlerinin hesaplanabilmesi için seçilmesi gereken n_i sabitlerine ait değer aralıkları Tablo 17'de gösterilmiştir.

Tablo 17. Can kaybına etki eden n_i değerleri

n_i	Genç Nüfus Oranı	Hava Durumu	Baraj Gövdesi Yıkılma Zamanı	Baraja Olan Mesafe (km)	Tahliye ve kurtarma kabiliyeti	Baraj yüksekliği (m)	Göl alanı hacmi	Arazi eğimi	Bina Aşınma Dayanımı
0.01-0.20	80 - 100	Güneşli	Tatil günü sabahı	>50	Çok başarılı	<10	Çok küçük	Sahil	Çok güçlü
0.20-0.40	60-80	Hafif yağış	İş günü sabah	20-50	Başarılı	10-15	Küçük	Düz	Güçlü
0.40-0.60	40-60	Ortalama yağış	İş günü sabah	10-20	Normal	15-30	Normal	Eğimli	Orta
0.60-0.80	20-40	Fırtına	İş günü gece	5-10	Başarısız	30-70	Büyük	Dağlık	Zayıf
0.80-1.00	0-20	Şiddetli fırtına	Gündüz	0-5	Çok başarısız	>70	Çok büyük	Vadi	Çok zayıf

Hesaplamalar için seçilmiş olan; Erzincan Barajı'nın mansap bölgesindeki riskli bölgede yaşayan genç nüfus oranı (n_1), hava durumu (n_2), baraj gövdesinin yıkılma zamanı (n_3), baraja olan uzaklık (n_4), tahliye ve kurtarma kabiliyeti (n_5), baraj yüksekliği (n_6), rezervuar hacmi (n_7), mansabın arazi eğimi (n_8) ve bina aşınma dayanımı (n_9) değerleri, Tablo 18'de gösterilmiştir.

Tablo 18. Tahmini can kaybı için seçilen n_i değerleri

n_i	n_1	n_2	n_3	n_4	n_5	n_6	n_7	n_8	n_9
2B analiz	0.40	0.60	0.60	0.60	0.30	0.80	0.20	0.60	0.40
3B analiz	0.60	0.60	0.70	0.70	0.30	0.80	0.20	0.60	0.50

Flow 3D yazılımında gerçekleştirilen 2B analiz sonucuna göre Elmaköy Köyü taşkından etkilenmekte ancak 3B analiz sonucuna göre ise taşkından etkilenmemektedir. Buna bağlı olarak Elmaköy Köyü hesaplamalara dahil edildiğinde genç nüfus oranı düşmekte, baraj gövdesine ortalama uzaklık azalmaktadır. Ayrıca köydeki yapıların, sanayi tesislerine nazaran daha düşük dayanımda olduğu da göz önünde alındığında,

ortalama yapı dayanımı düşmektedir. Tablo 18’de gösterilen n_i değerleri bu durumlar dikkate alınarak seçilmiştir.

Tablo 16 ve Tablo 18’de gösterilen değerler kullanılarak, (Eşitlik 57 ve (Eşitlik 58 yardımıyla hesaplanan m_1 ve m_2 değerleri Tablo 19’da gösterilmiştir.

Tablo 19. Tahmini can kaybı için hesaplanan m_1 ve m_2 değerleri

m_i	m_1	m_2
2B analiz	0.57	0.58
3B analiz	0.51	0.60

Tablo 19’da gösterilen m_1 ve m_2 değerlerinin (Eşitlik 56’da yerine konulmasıyla ölüm oranını etkileyen faktörlere bağlı olarak değişen katsayı (a) değerleri hesaplanarak Tablo 20’de gösterilmiştir.

Tablo 20. Tahmini can kaybı için hesaplanan a değerleri

	2B analiz	3B analiz
a	0.70	0.73

2B analiz dikkate alındığında yalnızca Organize Sanayi Bölgesi etkilendiğinden; risk altında bulunan kişi sayısı (Par) 57 kişi, 3B analiz dikkate alındığında ise Organize Sanayi Bölgesi insan sayısına, Elmaköy Köyü’nün de dahil edilmesiyle Par değeri 107 kişidir.

Nihai olarak (Eşitlik 55’de, Par, f ve a değerlerinin yerine konulmasıyla tahmini can kaybı sayısı (LOL) 2B ve 3B analizler için ayrı ayrı hesaplanarak Tablo 21’de gösterilmiştir.

Tablo 21. Tahmini can kaybı sayısı (LOL)

	2B analiz	3B analiz
LOL	30 kişi	59 kişi

Erzincan Barajı’nın olası yıkılması durumunda meydana gelecek taşkın 2B (sığ su) sayısal modellemesi sonucu elde edilen veriler üzerinden yapılan hesaplamalar sonucu; tahmini can kaybı sayısının 30 kişi olabileceği sonucuna ulaşılmıştır. 3B analiz sonuçlarına göre yapılan hesaplamada ise bu sayının 2B analize göre yaklaşık 2 katı sayıya ulaşarak 59 kişinin yaşamını yitirme olasılığının olduğu tahmin edilmektedir.

2B sayısal analiz sonucuna göre olası taşkın riski altı yaşayan 57 kişinin yaklaşık %53 oranına karşılık gelen 30 kişinin yaşamını yitirme olasılığının olduğu öngörülmektedir. Diğer taraftan 3B analiz sonucuna göre ise taşkından etkilenme olasılığı olan 107 kişinin can kaybı olasılığının %55 olduğu ve 59 kişinin yaşamını yitirebileceği çalışma sonucu ortaya çıkarılmıştır.



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında, Türkiye Cumhuriyeti'nin Erzincan ilinde yer alan, 1997 yılında inşası tamamlanan, tarımsal sulama amacıyla zonlu toprak dolgu gövde özelliğinde inşa edilen Erzincan Barajı'nın, olası yıkılma analizleri gerçekleştirilerek oluşabilecek taşkın yayılımı incelenmiştir. Çalışma konusu Erzincan Barajı inşa edildiği günden günümüze kadar sağlam ve sorunsuz bir şekilde hizmet vermektedir. Çalışma alanı olarak Erzincan Barajı'nın seçilmesi barajın olası yıkılması ile ilgili herhangi bir belirti ya da şüpheli bir durum olmasından kaynaklanmamaktadır. Barajın olası yıkılması ile ilgili tüm senaryolar, tamamen teorik ve sayısal olarak tasarlanmıştır.

Çalışma kapsamında öncelikle, çalışma alanı üzerinde, 2 adet DJI marka Phantom 4 RTK model insansız hava aracı ile 1,552.76 hektarlık alanın 3B tarama verileri ve hava fotoğrafları elde edilerek ± 10 cm düzeyinde yüksek hassasiyetli SYM oluşturulmuştur. Gelişmiş teknolojik imkanların kullanıldığı bu tarama yönteminin tercih edilmesiyle, hazır uydu verilerinden temin edilen SYM'ye nazaran topografyayı en iyi şekilde temsil edebilen, çok daha detaylı bir katı cisim modeli elde edilebilmiştir.

Gövde gedik modeli, dolgu baraj yıkılmalarında en çok karşılaşılan trapez şekilli olarak seçilmiş olup gedik geometrisinin belirlenmesinde farklı ampirik yaklaşımlar karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonucu en gerçekçi ve olumsuz gedik parametreleri Froehlich (1995) yaklaşımıyla elde edilmiştir. Erzincan Barajı karakteristik bilgileri ve hacim satıh eğrileri kullanılarak HEC-RAS programında baraj gövde modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan gövde modeli üzerinde tanımlanan trapez gediğin geometrisi Froehlich (1995) eşitliklerinden elde edilen sonuçlara dayanmaktadır. Gedik taban kotu 1,450.00 m, şev eğimi 1.4 olarak tespit edilen gedik modelinde, ortalama gedik genişliği 102.35 m, gedik yüksekliği 61.92 m değerinde elde edilmiş olup gediğin oluşum süresi de 0.35 s olarak hesap edilmiştir.

HEC-RAS yazılımında oluşturulan gedik modeline bağlı olarak, baraj gövde aksında oluşan taşkın hidrografi yine HEC-RAS yazılımı kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen taşkın hidrografına göre yıkılmanın başlamasıyla, akışın pik değere ulaşması 17 dk'da gerçekleşmiş olup pik debi değeri $12,308.50 \text{ m}^3/\text{s}$ seviyesine kadar yükselmiştir.

HEC-RAS yazılımı yardımıyla elde edilen taşkın hidrografına ait veriler, Flow 3D yazılımına başlangıç sınır koşulu olarak tanımlanmıştır. Çözümleme alanının, yazılım ve donanım kapasitesini zorlayan, 1,552.76 ha genişliğinde oldukça büyük bir alanı kapsaması nedeniyle optimum çözüm ağı boyutu olan 3 m x 3 m ölçülerindeki çözüm

ağları seçilmiştir. Çözüm ağları 3 m x 3 m ölçülerinde seçilerek, çalışma alanında toplam 7,474,509 adet olarak elde edilen çözüm ağı hücresinde hesaplamalar yapılmıştır. Düzenlenen çözüm ağı hücrelerinin sınır koşulları (duvar, simetri, serbest yüzey, çıkış) literatüre uyumlu olarak belirlenmiş ve taşkın riski bulunan yerleşim yerlerine, inceleme (probe) noktaları atanmıştır. Çalışmada türbülans modelleri arasından baraj yıkılmalarında oluşan ani taşkınlarda, daha doğru sonuçlar verdiği literatürde sıkça vurgulanan RNG k-ε türbülans modeli seçilmiştir.

Flow 3D yazılımının hassasiyetinin doğrulanması amacıyla literatürde yer alan bir baraj yıkılma deneyi de ayrıca aynı koşul ve parametrelerle sayısal olarak modellenmiştir. Oluşturulan sayısal modelde taşkın yayılımı hem 2B sığ su (shallow water) hem de 3B (RANS) analiz yöntemleriyle incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre sayısal yöntemden elde edilen analiz sonuçlarıyla, deney sonucu yapılan ölçüm sonuçlarının birbiriyle oldukça uyumlu görülmüştür. Ancak 3B analiz sonucu elde edilen akım değerlerinin, 2B analiz sonuçlarına nazaran, deney sonuçlarına daha yakın olduğu tespit edilmiştir.

Gerçekleştirilen doğrulama analizinden, uyumlu sonuçlar elde edilmiş olduğundan çalışma konusu Erzincan Barajı'nın olası yıkılması sonucu oluşacak taşkın analizleri Flow 3D yazılımında 2B (sığ su) ve 3B çözüm yöntemleriyle ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir.

Analiz sonuçları incelendiğinde, taşkın yayılım bölgesinde özellikle baraj gövdesine yakın olan bölgelerde 12.30 m yüksekliğe kadar ulaşan akım derinlikleri tespit edilmişken en yüksek akım hızı ise 19 m/sn seviyesinde ölçülmüştür. Taşkın, yaklaşık 14 dk sonra Elmaköy'e, 20 dk sonra ise Organize Sanayi Bölgesine ulaşmıştır.

2B (sığ su) analiz yöntemiyle gerçekleştirilen analiz sonucunda membadan mansaba doğru sıralanan yerleşim yerlerinden Çatalarmut, Yeşilçat ve Elmaköy Köylerinin taşkından etkilenmediği görülmüştür. Diğer inceleme noktalarından olan OSB 1 noktasında 1.93 m yüksekliğe ulaşan akım derinliği ve 2.33 m/sn değerine ulaşan akım hızı ölçülmüştür. Yine riskli bölgede yer alan OSB 2 noktasında en büyük akım derinliği 1.11 m seviyesinde, en büyük akım hızı ise 3.71 m/sn değerinde ölçülmüştür.

3B analiz sonucunda yine Çatalarmut ve Yeşilçat Köylerinin taşkından etkilenmediği görülmüştür. 2B analiz verilerine göre taşkından etkilenmeyen Elmaköy Köyü'nün 3B analiz sonucunda taşkından etkilendiği sonucuna ulaşılmıştır. Elmaköy yerleşim yerinde oluşan taşkına ait en büyük derinlik ve hız verileri sırasıyla 2.78 m ve 13.21 m/sn olarak ölçülmüştür. Yine akış yönünde bulunan OSB 1 noktasında 2.40 m yüksekliğe ulaşan akım derinliği ve 11.46 m/sn değerine ulaşan akım hızı ölçülmüştür. OSB 2 noktasında ise en büyük 2.66 m'lik derinlik ve 5.10 m/sn'lik hız değerleri ölçülmüştür.

OSB 1 ve OSB 2 noktalarında 2B ve 3B analiz sonuçları karşılaştırıldığında; 3B analiz sonucu elde edilen derinlik ve hız değerlerinin, 2B analize göre daha büyük değerler aldığı tespit edilmiştir. 2B analizde taşkından etkilenmediği görülen Elmaköy'ün, 3B analizde taşkından ciddi şekilde etkilendiğinin görülmesi önemli bir sonuç olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu sonuçlara bağlı olarak, 3B analiz sonucuna göre olası bir taşkın, daha geniş bir alanı kapsayacak genişlikte ve daha yıkıcı bir etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Her iki analiz sonucunda da yolların, sanat yapılarının, tarımsal yapıların, meskenlerin ve günümüzde farklı sektörlerde hizmet veren 4'ü faal halde 2'si ise kapalı durumda olan 6 sanayi tesisinin taşkından etkilendiği tespit edilmiştir. Maddi kayıpların yanında Erzincan Barajı'nın olası yıkılması senaryosunda en istenmeyen durum olan can kayıplarının yaşanması da muhtemel sonuçlar arasında yer almaktadır. Çalışma kapsamında yapılan hesaplamalarda gedik geometrisi, taşkın yayılım alanı, taşkın hızı ve literatürde kullanılan diğer parametrelere göre hesaplamalar gerçekleştirilmiş olup 2B ve 3B analiz verilerine göre farklı sayıda can kaybının yaşanabileceği belirlenmiştir. Muhtemel can kaybı ile ilgili yapılan hesaplamalar sonucu, 2B analiz verilerine dayalı olarak 57 kişinin, 3B analiz verilerine bağlı olarak ise 107 kişinin hayatını kaybetme olasılığının olduğu belirlenmiştir. Her iki analiz arasında tahmini can kaybı sayısı olarak da büyük fark meydana geldiği görülmüştür.

2B analizler; daha düşük maliyet, daha az işlem gücü ve daha kısa işlem süresine ihtiyaç duyduğundan, literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır. Buna rağmen çalışma sonucunda dikkat çekici bir şekilde görüldüğü üzere 2B (sığ su) analizlerden elde edilen taşkın yayılımı daha kısıtlı bir alana yayılmıştır. Taşkın hızları bakımından da 2B analiz sonuçlarına göre daha düşük akım hızları ölçülmüştür. Bu durumda karar vericiler tarafından geliştirilecek risk önleyici planlamalarda, taşkın şiddetinin düşük olarak değerlendirilmesi ve bazı yerleşim yerlerinin risk dışı olarak değerlendirilmesi, sonucunu doğurabilecektir.

2B (sığ su) analizin özellikle düşey eksen (z eksen) yönündeki hesaplamalarda kısıtlayıcı özelliklerine nazaran, 3B analiz yönteminin üç eksen boyunca çok daha detaylı ve hassas hesaplamalar yapabildiği görülmüştür. Bu sebeple, özellikle can kaybı olasılığı bulunan riskli alanlarda, topografyanın ve akış dinamiklerinin hassas bir şekilde temsil edilebildiği 3B sayısal model analizlerinin gerçekleştirilmesi önerilmektedir. 3B sayısal modellemelerin kapsamlı, detaylı ve güvenilir olması, SYM ve katı cisim modelinin hassasiyet düzeyine bağlıdır. Sayısal modellemelerde düşük hassasiyetli sayısal haritaların ya da uydu verilerinin kullanılması, yapılacak analizlerde hatalı sonuçların

ortaya çıkmasına neden olabilecektir. Buna bağı olarak bu çalışmadakine benzer şekilde yüksek hassasiyetli havadan ölçüm yöntemlerinin ya da benzer teknolojik imkanların kullanılarak, topografyanın hassas bir şekilde temsil edilebildiği modellerin kullanılması tavsiye edilmektedir.

Çalışmanın; daha iyi teknolojik imkanlar dahilinde, daha küçük çözüm ağlarının kullanılmasının yanı sıra, farklı gedik oluşum yaklaşımları, farklı gedik parametreleri, farklı türbülans modelleri ile yapılacak olan analizlerin karşılaştırılmasına yönelik çalışmalara ilham kaynağı olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca havadan ölçüm sonucu oluşturulan SYM ve hazır uydu verilerinden elde edilen SYM verilerinin ayrı ayrı analiz sonuçlarına etkisinin karşılaştırılması ile ilgili çalışmalar SYM hassasiyetinin önemini, daha anlaşılır hale getirebilecektir.

Ayrıca farklı HAD yazılımları yardımıyla benzer çözümlemelerin gerçekleştirilmesi ve elde edilen sonuçların karşılaştırılması daha geniş bir bakış açısı sağlayacaktır.

Tarımsal sulama amacıyla inşa edilen Erzincan Barajı, geniş bir bölgenin sulanmasını sağlayarak bölgeye değer katan önemli bir yapıdır. Olası bir yıkılma durumunda, taşkın dalgasının meydana getireceği ilk yıkımların yanı sıra, etkilenen tarım arazilerinde, tarımsal yapılarda ve sanayi tesislerinde uzun süreler boyunca üretim yapılamaması veya yeterli verim elde edilememesi gibi durumlar kalıcı ekonomik ve sosyolojik sorunlar meydana getirebilecektir.

Bu nedenle çalışma sonucunda elde edilen taşkın yayılım verilerine göre etkili planlamalar yapılmalı ve önlemler hayata geçirilmelidir. Öncelikle barajın yapısal güvenliği sürekli olarak izlenmeli ve düzenli olarak gerekli onarım çalışmaları yapılmalıdır. Ani müdahale senaryoları hazırlanmalı, gerekli ekipler oluşturulmalı ve ekipman temin edilmelidir. Riskli bölgede, yaşayan insanlar eğitilmeli, acil durum müdahale eylem planları hazırlanmalıdır. Bununla birlikte risk altında bulunan bölgedeki yerleşim alanlarının afet yerleşim planı doğrultusunda revize edilmesi veya taşkın etkisini engelleyen ya da en azından azaltan sanat yapıları inşa edilmelidir. Bu önlemlerin hayata geçirilmesiyle, olası bir afet anında yaşanabilecek can kaybı ve maddi kayıpların önüne geçilmesi ya da en aza indirilmesi mümkün olabilecektir.

KAYNAKÇA

- Aajami, A. (2019). *Toprak dolgu barajların yıkılmasının modellenmesi, Yüksek lisans tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.*
- Abay, O., Baykan, N. ve Baykan, N.O. (2015). Tarih boyunca barajların elden çıkma nedenleri, 4. Su Yapıları Sempozyumu, 19-21 Kasım 2015, Antalya, Türkiye, ss. 157-166.
- Abidin, Z. (2015). *Dam break flood inundation modelling for Klang Gate Dam, Yüksek lisans tezi, Malezya Teknoloji Üniversitesi.*
- Adityawan, M. B., Sandi, C., Harlan, D., Farid, M., Kuntoro, A. A., Widyaningti, Nugroho, J. (2023). Numerical modeling of dam break induced flow through multiple buildings in an idealized city. *Results in Engineering*, 18. doi:10.1016/J.RINENG.2023.101060
- Akdemir, H. (2022). *Dam break induced flood analysis by soft computing techniques, Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.*
- Akgun, C., Nas, S. S. ve Uslu, A. (2023). 2D and 3D numerical simulation of dam-break flooding: a case study of the Tuzluca Dam, Turkey. *Water (Switzerland)*, 15(20). doi:10.3390/w15203622
- Akgün, Ç. (2023). *Tuzluca Barajı rezervuarının gedik parametrelerine dayalı taşkın simülasyonları ve mansap bölgesindeki etkileri, Doktora tezi, Gümüşhane Üniversitesi, Gümüşhane.*
- Alaboz, P., Demir, S. ve Dengiz, O. (2020). Determination of spatial distribution of soil moisture constant using different interpolation model case study, isparta atabey plain. *Journal of Tekirdag Agricultural Faculty*, 17(3), 432-444. doi:10.33462/jotaf.710411
- Anılan, T., Uzlu, E., Kankal, M. ve Yüksek, Ö. (2018). The estimation of flood quantiles in ungauged sites using Teaching-Learning Based Optimization and Artificial Bee Colony algorithms. *Scientia Iranica*, 25(2A), 632-645. doi:10.24200/sci.2017.4185
- Arkaş, T. (2020). *Baraj yıkılması sonucu oluşan taşkın dalgalarının deneysel ve nümerik metodlar ile araştırılması, Doktora tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.*
- Arseni, M., Rosu, A., Calmuc, M., Calmuc, V. A., Iticescu, C. ve Georgescu, L. P. (2020). Development of flood risk and hazard maps for the lower course of the Siret River, Romania. *Sustainability (Switzerland)*, 12(16). doi:10.3390/su12166588

- Ashraf, A. (2021). *Numerical Investigation of 2D dam-break failures by using GIS applications, Doktora tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Ankara.*
- Aydemir, A. ve Güven, A. (2017). Baraj yıkılma modellerinde kullanılan debi tahmin yöntemlerinin karşılaştırılması. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 2(1), 22-29.
- Azeez, O., Elfeki, A., Kamis, A. S. ve Chaabani, A. (2020). Dam break analysis and flood disaster simulation in arid urban environment: the Um Al-Khair dam case study, Jeddah, Saudi Arabia. *Natural Hazards*, 100(3), 995-1011. doi:10.1007/s11069-019-03836-5
- Azimi, H., Heydari, M. ve Shabanlou, S. (2018). Numerical simulation of the effects of downstream obstacles on Malpasset dam break pattern. *Journal of Applied Research in Water and Wastewater*, 10.
- Baş, N. (2016). *Lidar verileri ile sam üretiminde farklı arazi türlerine göre performans araştırması, Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.*
- Bharath, A., Shivapur, A. V., Hiremath, C. G. ve Maddamsetty, R. (2021). Dam break analysis using HEC-RAS and HEC-GeoRAS: A case study of Hidkal dam, Karnataka state, India. *Environmental Challenges*, 5. doi:10.1016/J.ENVC.2021.100401
- Biricik, A. S. (2001). Yeryuvarı'nda doğal olaylar ve afetler. *Marmara Coğrafya Dergisi*, 3(1), 7-21.
- Bonomelli, R., Farina, G., Pilotti, M., Molinari, D. ve Ballio, F. (2023). Historical comparison of the damage caused by the propagation of a dam break wave in a pre-alpine valley. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 48, 101467. doi:10.1016/J.EJRH.2023.101467
- Boz, D. ve Yılmaz, A. (2020). An approach to the planning and environmental geology of Erziñcan plain and its surroundings. *Jeoloji Muhendisligi Dergisi*, 44(2), 225-254. doi:10.24232/jmd.826959
- Chen, S. shui, Zhong, Q. ming ve Shen, G. ze. (2019). Numerical modeling of earthen dam breach due to piping failure. *Water Science and Engineering*, 12(3), 169-178. doi:10.1016/J.WSE.2019.08.001
- Chen, Z., Gao, B. ve Devereux, B. (2017, 14 Ocak). State-of-the-art: DTM generation using airborne LIDAR data. *Sensors (Switzerland)*. MDPI AG. doi:10.3390/s17010150

- Colman, A., Rincón, J., Arauja, C., Materano, G. ve Reyes, M. (2006). *The effect of the choice of turbulence model on the simulation of fluid flow OD a centrifuga! separator. Rev. Téc. Ing. Univ. Zu Ila* (Cilt 29).
- Çelik, H. (2017). *Taşkın modellemede lidar verisi ile performans analizleri, Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.*
- Dai, S., He, Y., Yang, J., Ma, Y., Jin, S. ve Liang, C. (2020). Numerical study of cascading dam-break characteristics using SWEs and RANS. *Water Science and Technology: Water Supply*, 20(1), 348-360. doi:10.2166/ws.2019.168
- Dal, K. (2018). *Eğimli kanalda ardışık baraj yıkılmasının deneysel ve sayısal incelenmesi, Yüksek lisans tezi, İskenderun Teknik Üniversitesi, Hatay.*
- Danielle, V. S. (2019). *A comparison of HEC-RAS and DSS-WISE LITE 2D hydraulic models for a Racnho Cielito Dam Breach, Yüksek lisans tezi, Californiya State University, Sacramento.*
- de Oliveira, A. M., Conti, J. B., Santos, R. L., de Oliveira, L. N. A., Brito, C. A. O., Costa, F. P. ve de Santana, E. N. (2022). Loss of life estimation and risk level classification due to a dam break. *Heliyon*, 8(4), e09257. doi:10.1016/J.HELİYON.2022.E09257
- DeKay, M. L. ve McClelland, G. H. (1993). Predicting Loss of Life in Cases of Dam Failure and Flash Flood. *Risk Analysis*, 13(2), 193-205. doi:10.1111/j.1539-6924.1993.tb01069.x
- DJI. (2022). Phantom 4 rtk kullanım kılavuzu model no: WM334R. 15 Ekim 2023 tarihinde, <http://www.dji.com/product/phantom-4-rtk/info#video> adresinden erişildi.
- Duan, W., Hanasaki, N., Shiogama, H., Chen, Y., Zou, S., Nover, D., Wang, Y. (2019). Evaluation and future projection of Chinese precipitation extremes using large ensemble high-resolution climate simulations. *Journal of Climate*, 32(8), 2169-2183. doi:10.1175/JCLI-D-18-0465.1
- Duan, W., He, B., Nover, D., Fan, J., Yang, G., Chen, W., Liu, C. (2016). Floods and associated socioeconomic damages in China over the last century. *Natural Hazards*, 82(1), 401-413. doi:10.1007/s11069-016-2207-2
- Eldeeb, H., Mowafy, M. H., Salem, M. N. ve Ibrahim, A. (2023). Flood propagation modeling: Case study the Grand Ethiopian Renaissance dam failure. *Alexandria Engineering Journal*, 71, 227-237. doi:10.1016/j.aej.2023.03.054
- Em, A. (2020). *Kralkızı ve Dicle barajlarının yıkılması sonrası nümerik taşkın modellemesi ve simülasyonu, Doktora tezi, Dicle Üniversitesi, Diyarbakır.*

- Erat, B. (2023). *Su alma ağızı membasında oluşan oyulma çukuru karakteristiklerinin deneysel ve sayısal incelenmesi*, Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Ergen, K. (2019). *Baraj taşkın risk analizi Sakarya Geyve Doğantepe barajı örneği*, Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya.
- Erzincan İl Özel İdaresi. (2022). Erzincan ili siyasi haritası. *Coğrafi Bilgi Sistemleri*. 9 Ekim 2023 tarihinde https://cbs.erzincanilozelidaresi.gov.tr/site_fotolar/tematik/erzincansiyasi.pdf adresinden erişildi.
- Ferdowsi, A., Nemati, M. ve Farzin, S. (2021). Development of dam-break model considering real case studies with asymmetric reservoirs. *Computational Engineering and Physical Modeling*, 4(4), 39-63. doi:10.22115/cepm.2021.311759.1188
- Flow Science Inc. (2008). *Flow 3D version 9.3 user manual*. 9 Kasım 2023 tarihinde, www.flow3d.com adresinden erişildi.
- Flow Science Inc. (2012). *Flow 3D documentation release10.1.0*.
- Freer, J., Beven, K. J., Neal, J., Schumann, G., Hall, J. ve Bates, P. (2011). Flood risk and uncertainty. *Risk and Uncertainty Assessment for Natural Hazards* içinde 9781107006195, 190-233. Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9781139047562.008
- Froehlich, D. (1995). Embankment dam breach parameters revisited. *ASCE Conf. on Water Resources Engineering* içinde (ss. 887-891). Texas. <https://www.researchgate.net/publication/239964974> adresinden erişildi.
- Froehlich, D. (2008). Embankment dam breach parameters and their uncertainties. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(12), 1708-1721. doi:10.1061/(asce)0733-9429(2008)134:12(1708)
- Froehlich, D. C. (1987). Embankment-dam breach parameters *In Hydraulic Engineering, Proceedings of the 1987 National Conference* içinde (ss. 570-575).
- Ghaderi, A. ve Abbasi, S. (2021). Experimental and numerical study of the effects of geometric appendance elements on energy dissipation over stepped spillway. *Water (Switzerland)*, 13(7). doi:10.3390/w13070957
- Ghasemlounia, R. (2021). *Hidrolik ve Su Kaynakları Mühendisliğinde FLOW-3D*. Ankara, Türkiye: Nobel Yayınları.
- Görür, N. (2020). *Türkiye’de deprem az gittik uz gittik*. İstanbul: Doğan yayıncılık.
- Graham, W. J. (1999). A procedure for estimating loss of life caused by dam failure. *Sediment River Hydral*, 6, 1-43.

- Gündüzalp, G. (2020). *İki boyutlu (2d) analiz ile baraj yıkılma taşkınının havza üzerinde incelenmesi: Melen çayı örneği, Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya.*
- Hale, C. D. (2019). A transfer function model for deformation hazard analysis of earthen dams, *Doktora tezi, University of California, Berkeley.*
- Hirt, C. W. ve Nichols, B. D. (1981). Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, 39(1), 201-225. doi:10.1016/0021-9991(81)90145-5
- ICOLD. (1988). *World register of dams: 4th updating.* Paris.
- ICOLD. (2009). *Question No. 91 Dam Safety Management.* Brezilya.
- ICOLD. (2020). World Register of Dams-General Synthesis. 19 Ağustos 2023 tarihinde, https://www.icold-cigb.org/GB/world_register/general_synthesis.asp adresinden erişildi.
- Jalal, H. K. ve Hassan, W. H. (2020). Three-dimensional numerical simulation of local scour around circular bridge pier using Flow-3D software. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* içinde (C. 745). Institute of Physics Publishing. doi:10.1088/1757-899X/745/1/012150
- Jonkman, S. N., Vrijling, J. K. ve Vrouwenvelder, A. C. W. M. (2008, Eylül). Methods for the estimation of loss of life due to floods: A literature review and a proposal for a new method. *Natural Hazards*, 46(3), 353-389. doi:10.1007/s11069-008-9227-5
- Kaplan, H. (2019). *Erzincan Barajı ve çevresi florası, Yüksek lisans tezi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Erzincan.*
- Karadeniz, V. ve Altınbilek, M. S. (2018). Erzincan ilinin topografik analizi ve idari sınırlar ilişkisi, bazı sorunlar. *Erzincan Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 11(1), 383-304.
- Karaduman, Ç. (2018a). *Su alma ağızı membasında oluşan oyulma çukuru karakteristiklerinin deneysel ve sayısal incelenmesi, Yüksek lisans tezi, Bitlis Eren Üniversitesi ve Dicle Üniversitesi, Bitlis.*
- Karaduman, Ç. (2018b). *Ilısu barajı dipsavak performansının sayısal modelle belirlenmesi, Yüksek lisans tezi, Bitlis Eren Üniversitesi ve Dicle Üniversitesi.*
- Karam, W., Khan, F. A., Alam, M. ve Ali, S. (2021). Simulation of dam-dreak flood wave and inundation mapping: a case study of Attabad Lake. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, 9(6), 703-714. doi:10.30534/ijeter/2021/15962021

- Kaya, B. ve Aslı, Ü. (2012). Diferansiyel kuadratur yöntemi kullanılarak difüzyon dalga yaklaşımı ile taşkınların ötelenmesi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 27(2), 313-322.
- Khalkho, V., Thomas, Dr. A., Singh, M. ve Dadel, S. (2020). Dam break analysis and flood inundation mapping using HEC-RAS for piping failure. *International Journal of Chemical Studies*, 8(5), 1989-1992. doi:10.22271/chemi.2020.v8.i5aa.10596
- Khosravi, K., Rostaminejad, M., Cooper, J. R., Mao, L. ve Melesse, A. M. (2019). Dam break analysis and flood inundation mapping: The case study of Sefid-Roud Dam, Iran. *Extreme Hydrology and Climate Variability: Monitoring, Modelling, Adaptation and Mitigation* içinde (ss. 395-405). Elsevier. doi:10.1016/B978-0-12-815998-9.00031-2
- Kocaman, B. (2019). *Baraj yıkılması sonucu taşkın yayılım alanının iki farklı hidrodinamik modelle belirlenmesi kıyaslanması ve yüzey pürüzlülüğünün taşkın üzerindeki hassasiyetinin incelenmesi, Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.*
- Kocaman, S. (2007). *Baraj yıkılması probleminin deneysel ve teorik olarak incelenmesi, Doktora tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana.*
- Kocaman, S., Dal, K., Yılmaz, A., Üniversitesi, İ. T. ve Bölümü, M. (2021). Mansapta trapez daralma olması durumunda baraj yıkılması taşkın dalgası yayılımının sıg su denklemleri ile modellenmesi Modelling of dam break flood wave propagation in case trapezoidal contraction on downstream using SWEs. *Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci*, 10(2), 695-703. doi:10.28948/ngmuh.825144
- Kocaman, S. ve Güzel, H. (2011), Baraj yıkılması taşkın dalgası yayılmasının 3-boyutlu deneysel ve nümerik karşılaştırılması. *e-Journal of New World Sciences Academy*, 6(1), 406-414.
- Kocaman, S., Güzel, H., Evangelista, S., Özmen Çağatay, H. ve Viccione, G. (2020). Experimental and numerical analysis of a dam-break flow through different contraction geometries of the channel. *Water (Switzerland)*, 12(4). doi:10.3390/W12041124
- Kumar, S., Jaswal, A., Pandey, A. ve Sharma, N. (2017). Literature review of dam break studies and Inundation mapping using hydraulic models and GIS. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 18 Eylül 2023 tarihinde, www.irjet.net adresinden erişildi.
- Kurban, S. (2021). *Erzincan ili olasılıksal sismik tehlike analizi ve zemin davranış analizi, Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.*

- Lamichhane, N. ve Sharma, S. (2017). Development of flood warning system and flood inundation mapping using field survey and LiDAR data for the grand river near the city of Painesville, Ohio. *Hydrology*, 4(2). doi:10.3390/hydrology4020024
- Lee, R., Hu, P. S., Neal, D. M., Ogles, M. R., Sorensen, J. H. ve Tramble, D. A. (1986). Predicting loss of life from floods. *Oak Ridge National Laboratory Draft Report. Prepared for the Institute for Water Resources, U.S. Army Corps of Engineers.*
- Li, B., Hou, J., Li, D., Yang, D., Han, H., Bi, X., Xia, J. (2021). Application of lidar uav for high-resolution flood modelling. *Water Resources Management*, 35(5), 1433-1447. doi:10.1007/s11269-021-02783-w
- Lima, R. P., Elmiro, M. A. T., Nero, M. A., Temba, P. da C., Fonseca, B. M. ve Castiglione, L. H. G. (2021). Assessment of digital terrain models in dam break simulation studies. *Boletim de Ciencias Geodesicas*, 27(1), 1-20. doi:10.1590/s1982-21702021000100005
- MacDonald, T. C. ve Langridge-Monopolis, J. (1984). Breaching characteristics of dam failures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(5), 567-586. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:5(567)
- Man, C., Zhang, G., Hong, V., Zhou, S. ve Feng, Y. (2019). Assessment of Turbulence Models on Bridge-Pier Scour Using Flow-3D. *World Journal of Engineering and Technology*, 07(02), 241-255. doi:10.4236/wjet.2019.72016
- Mandlbürger, G., Hauer, C., Höfle, B., Habersack, H. ve Pfeifer, N. (2009). *Optimisation of LiDAR derived terrain models for river flow modelling. Hydrol. Earth Syst. Sci* (C. 13). 13. Eylül 2023 tarihinde, www.hydrol-earth-syst-sci.net/13/1453/2009/ adresinden erişildi.
- Marangoz, H. O. (2020). *Baraj yıkılma sonrası oluşacak taşkın dalgasının difüzyon ve momentum dalga yaklaşımlarıyla modellenmesi, Yüksek lisans tezi, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Rize.*
- Marsooli, R. (2013). *3-D numerical simulation of dam-break flows over movable beds, Doktora tezi, The University of Mississippi.*
- Marsooli, R. ve Wu, W. (2014). 3-D finite-volume model of dam-break flow over uneven beds based on VOF method. *Advances in Water Resources*, 70, 104-117. doi:10.1016/J.ADVWATRES.2014.04.020
- MGM. (2022). Türkiye yıllık dolu yağışlı gün sayısı. *Meteoroloji Genel Müdürlüğü, meteorolojik parametrelerin Türkiye analizi*. 8 Ekim 2023 tarihinde <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=parametrelerinTürkiyeAnalizi> adresinden erişildi.

- Moon, N., Parker, M., Boshoff, H. ve Clohan, D. (2019). Advances in non-Newtonian dam break studies (ss. 165-172). doi:10.36487/ACG_rep/1910_09_Boshoff
- MWR. (1993). *National inventory of reservoir dam failures during 1981–1990, Ministry of Water Resources of the People's Republic of China.*
- Najar, M. (2021). *Production and assessment of hazard maps for dam-break connected floods in the case of embankment dams through GIS and mathematical models, Doktora tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.*
- Nguyen-Thi, L. Q., Nguyen, V. D., Pierens, X. ve Coorevits, P. (2021). An experimental and numerical study of the influence of viscosity on the behavior of dam-break flow. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, 35(3), 345-362. doi:10.1007/s00162-021-00562-2
- Oertel, M. ve Bung, D. B. (2012). Initial stage of two-dimensional dam-break waves: Laboratory versus VOF. *Journal of Hydraulic Research*, 50(1), 89-97. doi:10.1080/00221686.2011.639981
- Oğuzhan Güven, S. (2022). *Baraj yıkılması durumunda bitki örtüsünden kaynaklı pürüzlülüğün taşkın dalgası yayılımı üzerine etkisinin deneysel ve sayısal olarak araştırılarak sonuçların akıllı kent acil eylem planında kullanılabilirliğinin değerlendirilmesi, Doktora tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.*
- Ongdas, N., Akiyanova, F., Karakulov, Y., Muratbayeva, A. ve Zinabdin, N. (2020). Application of hec-ras (2d) for flood hazard maps generation for Yesil (İshim) River in Kazakhstan. *Water (Switzerland)*, 12(10), 1-20. doi:10.3390/w12102672
- Özmen Çağatay, H., Turhan, E. ve Kocaman, S. (2022). An experimental investigation of dam-break induced flood waves for different density fluids. *Ocean Engineering*, 243. doi:10.1016/j.oceaneng.2021.110227
- Pakniyat, H. (2015). *Tahtalı barajının yıkılması durumunda oluşacak taşkın dalgalarının modellenmesi, Yüksek lisans tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.*
- Palamut, N. (2014). *Baraj yıkılma analizi ve uygulaması, Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.*
- Peker, İ. B., Hacı, A., Paşa, Y. ve Gülbaz, S. (2022). Elmalı dam failure analysis and flood disaster simulation with different scenarios using HEC-RAS 2D. In IWA 4.Regional Conference on Diffuse Pollution & Eutrophication
- Pilotti, M., Milanese, L., Bacchi, V., Tomirotti, M. ve Maranzoni, A. (2020). Dam-Break Wave Propagation in Alpine Valley with HEC-RAS 2D: Experimental Cancano Test Case. *Journal of Hydraulic Engineering*, 146(6). doi:10.1061/(asce)hy.1943-7900.0001779

- Polat, P. ve Altınbilek, M. S. (2021). Erzincan'ın iklim özellikleri ile Erzincan'da kaydedilen uzun dönem (1930-2020) sıcaklık ve yağış verilerinin trend analizleri. *Doğu Coğrafya Dergisi*, 26(46), 55-80. doi:10.17295/ataunidcd.959297
- Putri, P. I. D., Iskandar, R. F., Adityawan, M. B., Kardhana, H. ve Indrawati, D. (2020). 2D Shallow Water Model for Dam Break and Column Interactions. *Journal of the Civil Engineering Forum*, 6(3), 237. doi:10.22146/jcef.54307
- Rajaa, A. I. ve Kamel, H. (2020). *Performance Study of Fluent-2D and Flow-3D Platforms in the CFD Modeling of a Flow Pattern Over Ogee Spillway P A P E R I N F O Spillway Numerical model Physical model Flow-3D Ansys Fluent Flow simulate. Anbar Journal Of Engineering Science*©4. <http://www.uoanbar.edu.iq/Evaluate/> adresinden erişildi.
- Ramos, E. P. A. (2015). *Modelación bidimensional del flujo generado por la rotura de una presa de tierra, utilizando el programa IBER*, Yüksek lisans tezi, Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- Robb, D.M. and Vasquez, J.A. (2015). Numerical simulation of dam-break flows using depth-averaged hydrodynamic and three-dimensional CFD models. In Proceedings of the 22nd Canadian Hydrotechnical Conference, 29 April–2 May 2015. Montreal, QC, Canada.
- Romanescu, G. ve Stoleriu, C. C. (2017). Exceptional floods in the Prut basin, Romania, in the context of heavy rains in the summer of 2010. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17(3), 381-396. doi:10.5194/nhess-17-381-2017
- Sabbagh-Yazdi, S.-R., Rostami, F. ve Mastorakis, N. E. (2007). Turbulent modeling effects on finite volume solution of three dimensional aerated hydraulic jumps using volume of fluid. *12th WSEAS Int. Conf. on applied mathematics* içinde (ss. 168-174).
- Saberi, O. ve Zenz, G. (2015). Empirical relationship for calculate outflow hydrograph of embankment dam failure due to overtopping flow. *International Journal of Hydraulic Engineering*, 2015(3), 45-53. doi:10.5923/j.ijhe.20150403.01
- Sammen, S. S., Mohamed, T. A., Ghazali, A. H., Sidek, L. M. ve El-Shafie, A. (2017). An evaluation of existent methods for estimation of embankment dam breach parameters. *Natural Hazards*, 87(1), 545-566. doi:10.1007/s11069-017-2764-z
- Shahrim, M. F. ve Ros, F. C. (2020a). Dam Break Analysis of Temenggong Dam Using HEC-RAS. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 479(1), 012041. doi:10.1088/1755-1315/479/1/012041

- Shahrim, M. F. ve Ros, F. C. (2020b). Estimation of breach outflow hydrograph using selected regression breach equations. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* içinde (C. 476). Institute of Physics Publishing. doi:10.1088/1755-1315/476/1/012129
- Shen, Y., Cheng, R., Xiao, W., Zeng, L., Wang, L., Sun, P. ve Chen, T. (2022). Temporal dynamics of soil nutrients in the riparian zone: Effects of water fluctuations after construction of the Three Gorges Dam. *Ecological Indicators*, 139, 108865. doi:10.1016/J.ECOLIND.2022.108865
- Simsek, O. ve Islek, H. (2023). 2D and 3D numerical simulations of dam-break flow problem with RANS, DES, and LES. *Ocean Engineering*, 276, 114298. doi:10.1016/J.OCEANENG.2023.114298
- Singh, K. P. ve Snorrason, A. (1984). Sensitivity of outflow peaks and flood stages to the selection of dam breach parameters and simulation models. *Journal of Hydrology*, 68(1-4), 295-310. doi:10.1016/0022-1694(84)90217-8
- Singh, V. P. (1996). *Dam breach modeling technology*. Water Science and Technology Library (C. 17). Dordrecht: Springer Netherlands. doi:10.1007/978-94-015-8747-1
- Soares-Frazão, S. (2007). Experiments of dam-break wave over a triangular bottom sill. *Journal of Hydraulic Research*, 45(1), 19-26. doi:10.1080/00221686.2007.9521829
- Soriano, E., Mediero, L. ve Garijo, C. (2020). Quantification of expected changes in peak flow quantiles in climate change by combining continuous hydrological modelling with the modified curve number method. *Water Resources Management*, 34(14), 4381-4397. doi:10.1007/s11269-020-02670-w
- Sumira, M., Anggraheni, E. ve Prastica, R. M. S. (2023). Dam Break Analysis of Sermo Dam. *Journal of the Civil Engineering Forum*, 127-138. doi:10.22146/jcef.5619
- Sun, R., Wang, X., Zhou, Z., Ao, X., Sun, X. ve Song, M. (2014). Study of the comprehensive risk analysis of dam-break flooding based on the numerical simulation of flood routing. Part I: Model development. *Natural Hazards*, 73(3), 1547-1568. doi:10.1007/s11069-014-1154-z
- Sür, Ö. (1993). Türkiye'nin deprem bölgeleri. *Ankara Üniversitesi Türkiye Coğrafyası Araştırma ve Uygulama Merkezi Dergisi*, 2, 53-65.
- Şahin, G. S. (2018). *Numerical modeling the flood wave as a result of Ürkmez Dam failure, Yüksek lisans tezi, İzmir Teknoloji Enstitüsü, İzmir.*
- Şen, T. (2019). *Atatürk baraj bendinin yıkılmasıyla oluşacak taşkın ve etkilerinin CBS yardımıyla incelenmesi. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.*

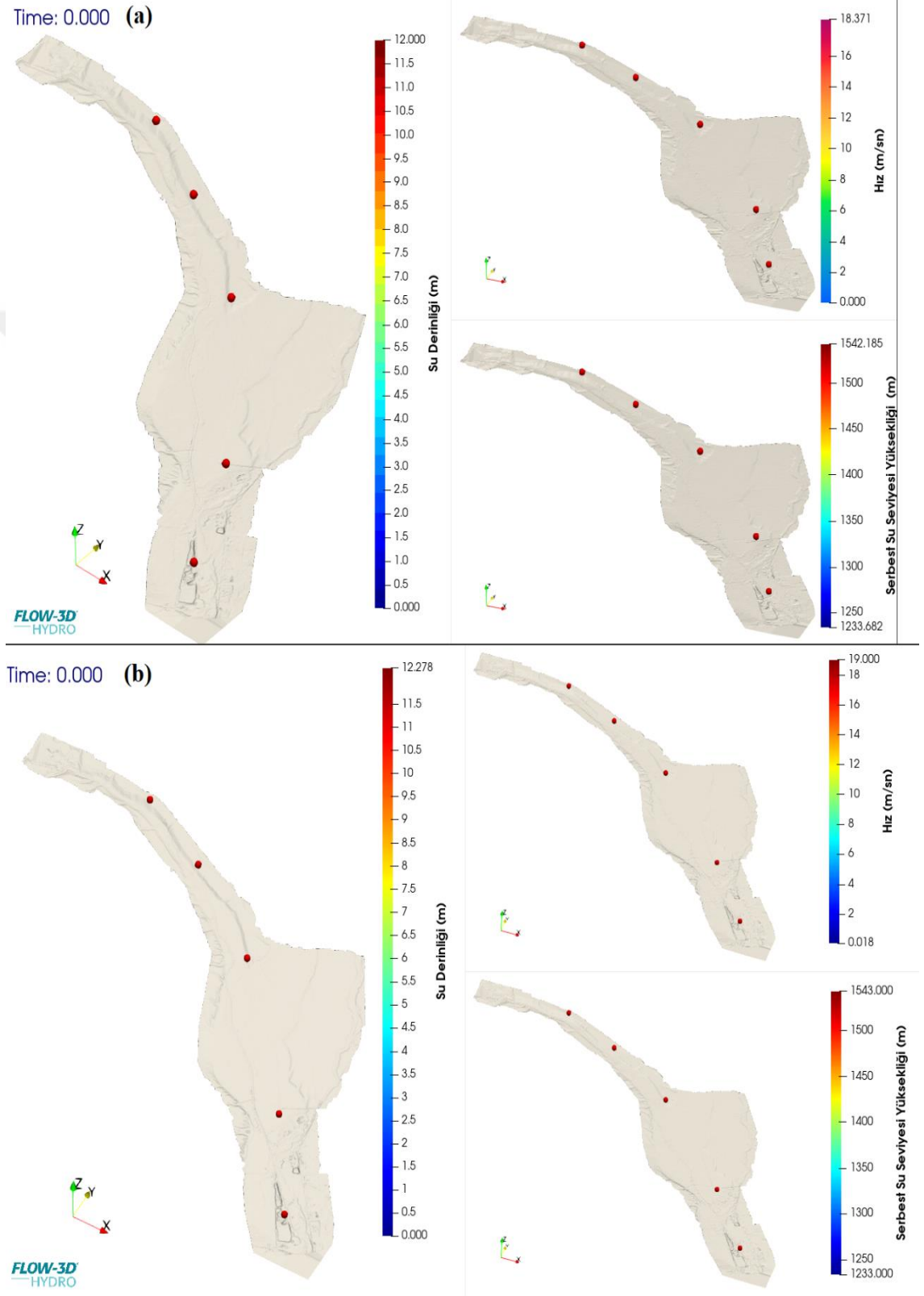
- Tataroğlu, R. M. (2014). *Numerical Investigation of vortex formation at intake structures using Flow 3d software*, Yüksek lisans tezi, Middle East Technical University, Ankara.
- Teng, J., Jakeman, A. J., Vaze, J., Croke, B. F. W., Dutta, D. ve Kim, S. (2017). Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. *Environmental Modelling and Software*. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.envsoft.2017.01.006
- Tilav, E. S. (2021). *Baraj yıkılması sonucu oluşan taşkının incelenmesi: Darlık barajı örneği*, Yüksek lisans tezi, İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.
- Tofiq, F. A. (2015). *Computational dam safety analysis based on predicted probable maximum flood discharge from statistical downscaling taking into consideration different general circulation models*, Doktora tezi, Gaziantep Üniversitesi, Gaziantep.
- Tüysüz, O. (1993). Erzincan çevresinin jeolojisi ve tektonik evrimi. 2. *Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı* içinde (ss. 271-280). İstanbul: MMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Deprem Mühendisliği Türkiye Milli Komitesi, İTÜ Yapı ve Deprem Uygulama Araştırma Merkezi.
- Ulvi, A. (2021). İHA fotogrametrisine genel bakış: geleneksel topoğrafik harita yapımı tekniği ile maliyet karşılaştırması. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 8(1), 458-471. doi:10.35193/bseufbd.885579
- URL-1. (2023). https://en.wikipedia.org/wiki/Dam_failure#cite_note-16, 17 Ağustos 2023.
- Usace. (2014). *Using HEC-RAS for dam break studies*. 18 Eylül 2023 tarihinde, www.hec.usace.army.mil adresinden erişildi.
- Usace. (2016). *HEC-RAS river analysis system hydraulic reference manual*. 18 Eylül 2023 tarihinde, www.hec.usace.army.mil adresinden erişildi.
- Uysal, A. ve Sunkar, M. (2022). Erzincan Ovası kuzeyindeki yerleşmelerin yer değiştirmesine neden olan afetler: sel, taşkın ve çamur akımları. *Afet ve Risk Dergisi*, 5(2), 693-714. doi:10.35341/afet
- Vargas, J., Rivera, L., Salazar, A., Robledo, V., Chang, P., ve Temgoua, A. G. T. (2019). Comparative study of the HEC-RAS, IBER and FLOW 3D softwares in studying flow characteristics across a dynamic meander in Colombia. Canadian Society for Civil Engineering Annual Conference, Montreal, Canada, 12–15 Haziran 2019.

- Vasquez, J.A. (2009). Testing River2D and Flow3D for sudden dam-break flow simulations. In Proceedings of the Conference on Canadian Dam Association, 3–8 October 2009, Whistler, Canada.
- Von Thun, J.L. ve Gillette, D.R. (1990). Guidance on breach parameters. Internal Memorandum, Bureau of Reclamation, Denver, USA.
- Wahl, T. L. (1997). Predicting embankment dam breach parameters-a needs assessment. *U. S. Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, USA* içinde. Denver. 19 Ağustos 2023 tarihinde, <https://www.researchgate.net/publication/254347750> adresinden erişildi.
- Wahl, T. L. (2004). Uncertainty of predictions of embankment dam breach parameters. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(5), 389-397. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:5(389)
- Waskito, T. N., Bisri, M., Limantara, L. M. ve Soetopo, W. (2022). Simulation of saguling dam break using the HEC-RAS software. *Hunan Daxue Xuebao/Journal of Hunan University Natural Sciences*, 49(8), 241-249. doi:10.55463/issn.1674-2974.49.8.29
- Weerasinghe, L. N. K., Thayaparan, M. ve Fernando, T. (2022). Functional characteristics of an early warning system to minimise the risks of dam breaks in Sri Lanka. *World Construction Symposium* içinde (ss. 506-518). Ceylon Institute of Builders. doi:10.31705/WCS.2022.41
- Whitfield, P. H. (2012). Floods in future climates: A review. *Journal of Flood Risk Management*. doi:10.1111/j.1753-318X.2012.01150.x
- Xiaoling, W., Xuefei, A., Ruirui, S. ve Weiping, G. (2012). The comprehensive risk analysis of dam-break consequences based on numerical simulation. *Applied Mechanics and Materials*, 229-231, 1850-1853. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.229-231.1850
- Xu, Y. ve Zhang, L. M. (2009). Breaching parameters for earth and rockfill dams. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(12), 1957-1970. doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000162
- Xu, Y., Zhang, L. ve Jia, J. (2008). Lessons from catastrophic dam failures in August 1975 in Zhumadian, China. *GeoCongress 2008* içinde (ss. 162-169). Reston, VA: American Society of Civil Engineers. doi:10.1061/40971(310)20
- Yıldız, A. ve Martı, A. İ. (2015). *Comparison of experimental study and cfd analysis of the flow under a sluice gate*.
- Yıldız, C. (2021). *Baraj yıkılması taşkın risk analizi Yeşildere Barajı örneği, Yüksek lisans tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ*.

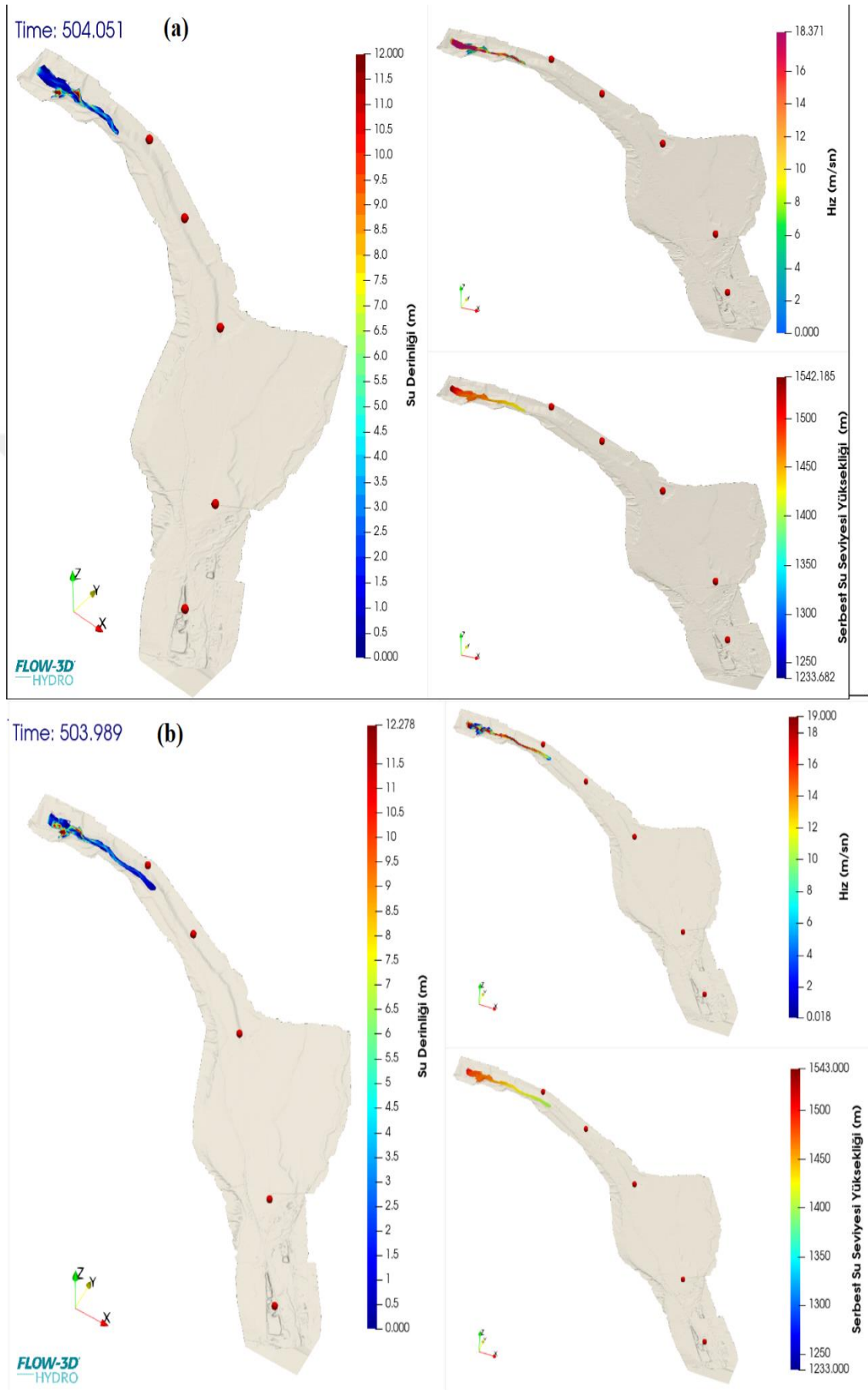
- Yusof, Z. M., Omar, N. A. ve Amerudin, S. (2015). Floodplains modelling due to dam break. *Jurnal Teknologi*, 75(10), 2180-3722. doi:10.11113/jt.v75.5282
- Zhang, L., Peng, M., Chang, D. ve Xu, Y. (2016a). Dam failure mechanisms and risk assessment. *Singapore: John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd.* doi:10.1002/9781118558522
- Zhang, L., Peng, M., Chang, D. ve Xu, Y. (2016b). Dam failure mechanisms and risk assessment. *Viley online books içinde (ss. i-xix)*. John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd. doi:10.1002/9781118558522
- Zhang, Limin., Xu, Y. ve Jia, J. S. (2009). Analysis of earth dam failures: A database approach. *Georisk*, 3(3), 184-189. doi:10.1080/17499510902831759
- Zhou, Z., Wang, X., Sun, R., Ao, X., Sun, X. ve Song, M. (2014). Study of the comprehensive risk analysis of dam-break flooding based on the numerical simulation of flood routing. Part II: Model application and results. *Natural Hazards*, 72(2), 675-700. doi:10.1007/s11069-013-1029-8

EKLER

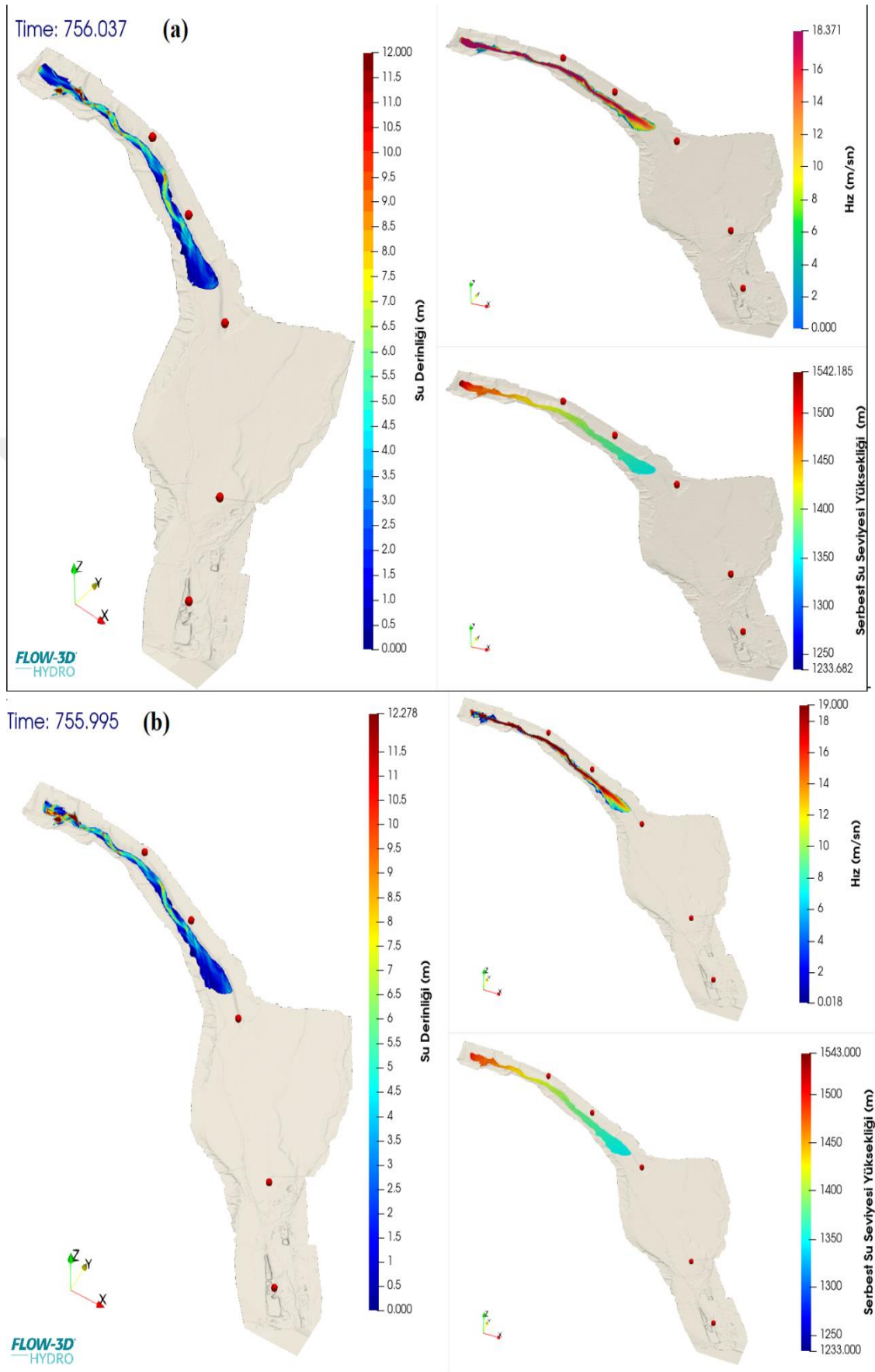
Ek 1. 0. Saniyede 2B (a) ve 3B (b) Analizler Sonucu Oluşan Derinlik ve Hız Dağılımı



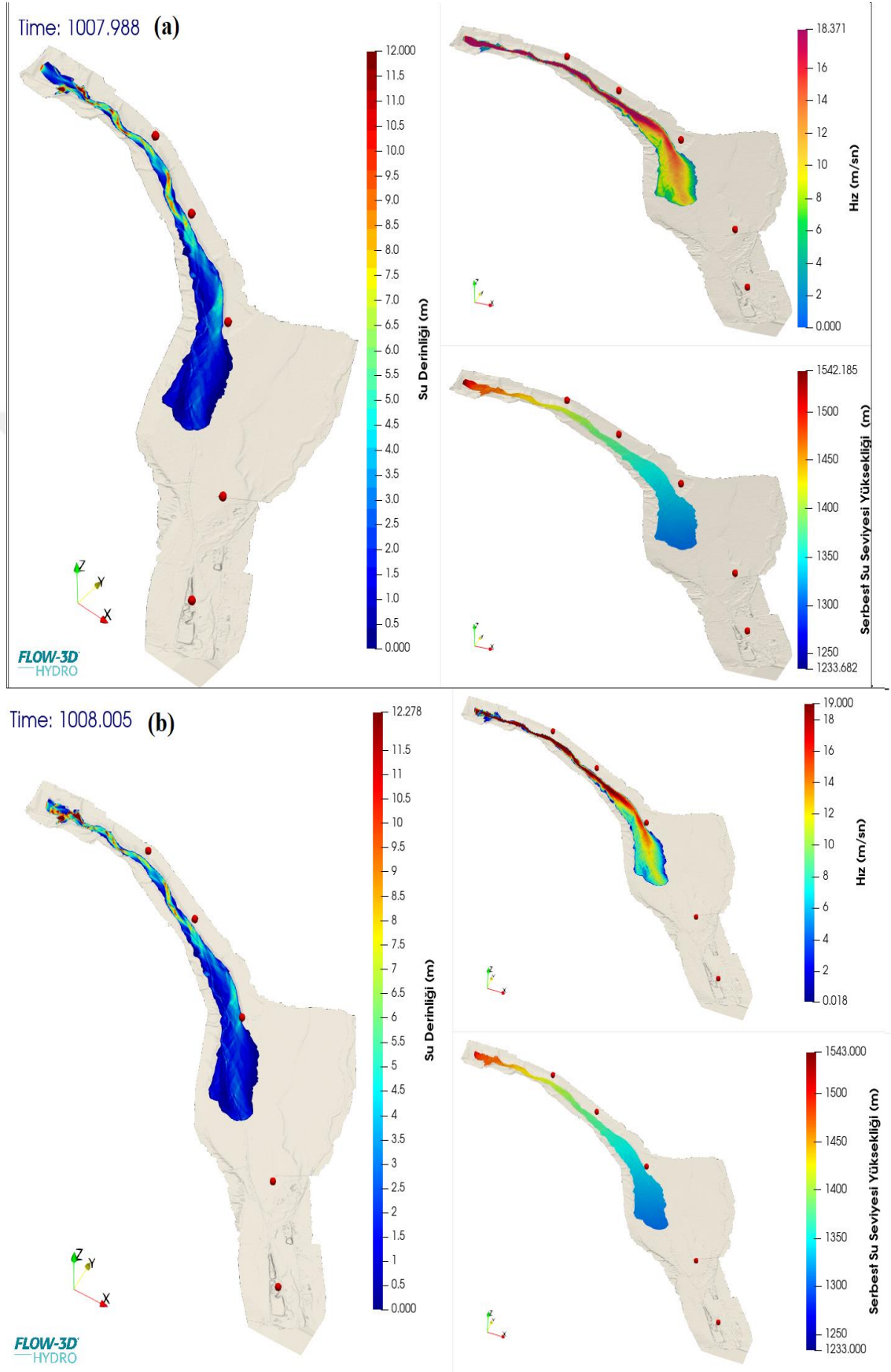
Ek 2. 504. Saniyede 2B (a) ve 3B (b) Analizler Sonucu Oluşan Derinlik ve Hız Dağılımı



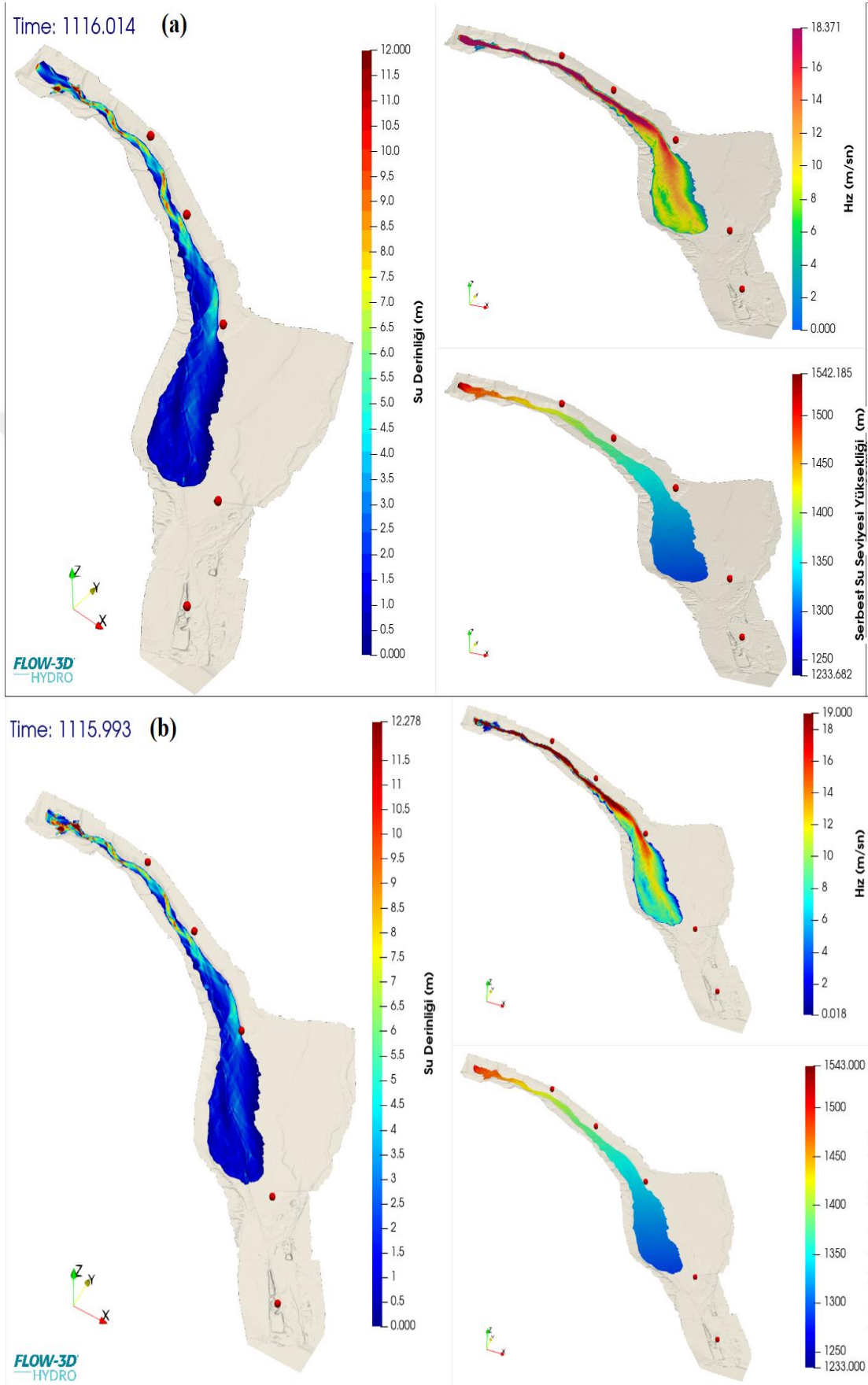
Ek 3. 756. Saniyede 2B (a) ve 3B (b) Analizler Sonucu Oluşan Derinlik ve Hız Dağılımı



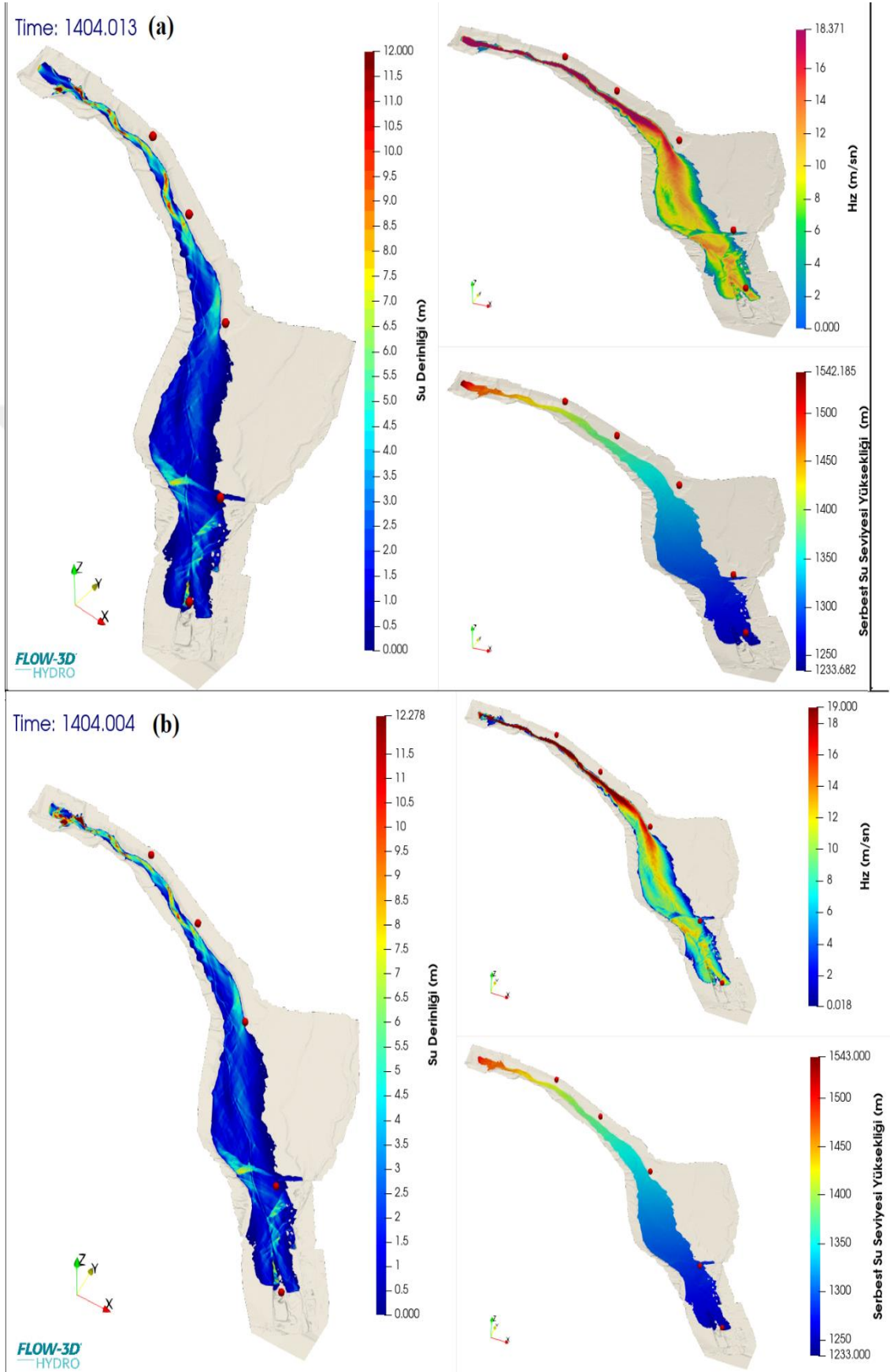
Ek 4. 1008. Saniyede 2B (a) ve 3B (b) Analizler Sonucu Oluşan Derinlik ve Hız Dağılımı



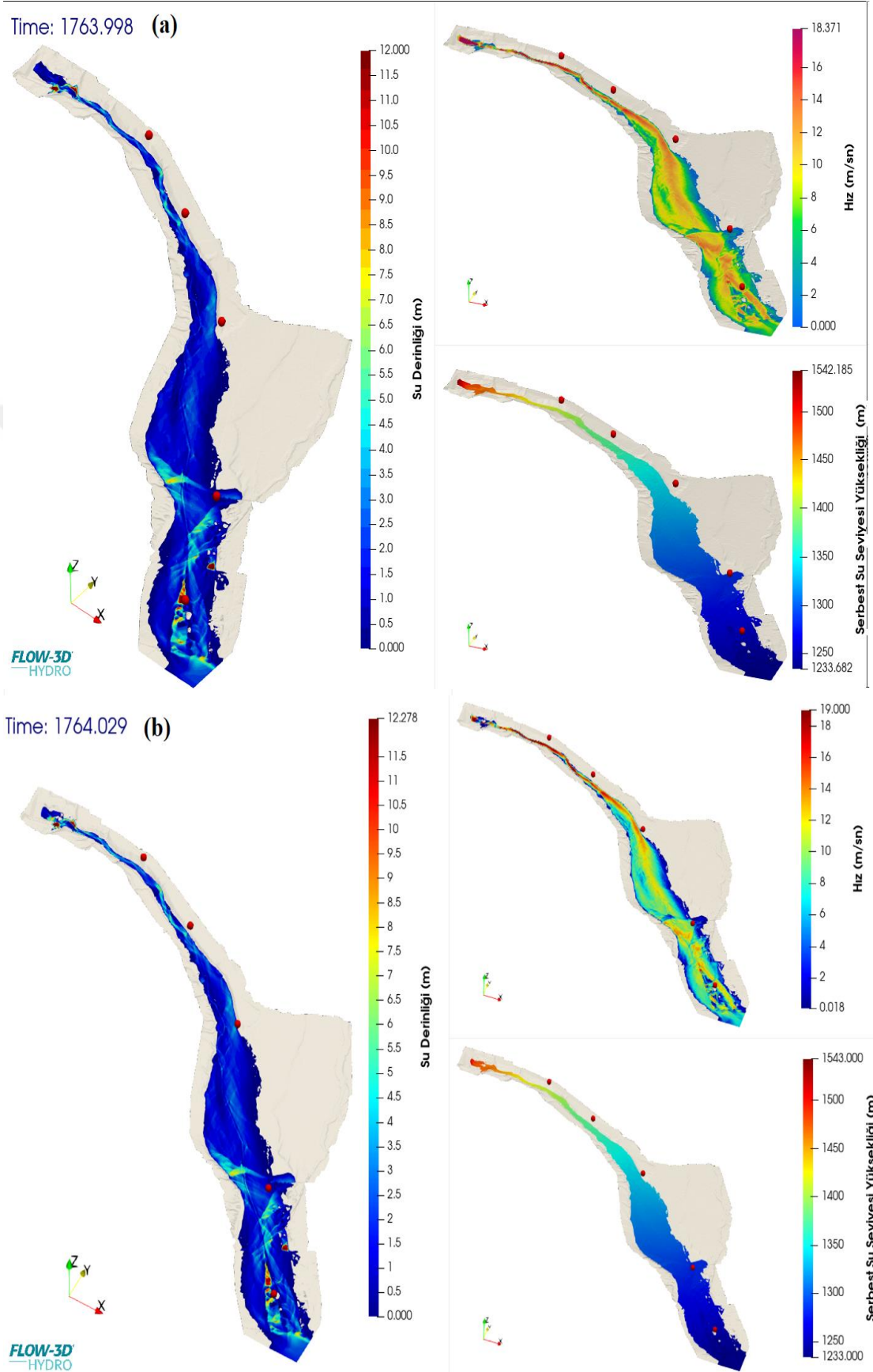
Ek 5. 1116. Saniyede 2B (a) ve 3B (b) Analizler Sonucu Oluşan Derinlik ve Hız Dağılımı



Ek 6. 1404. Saniyede 2B (a) ve 3B (b) Analizler Sonucu Oluşan Derinlik ve Hız Dağılımı

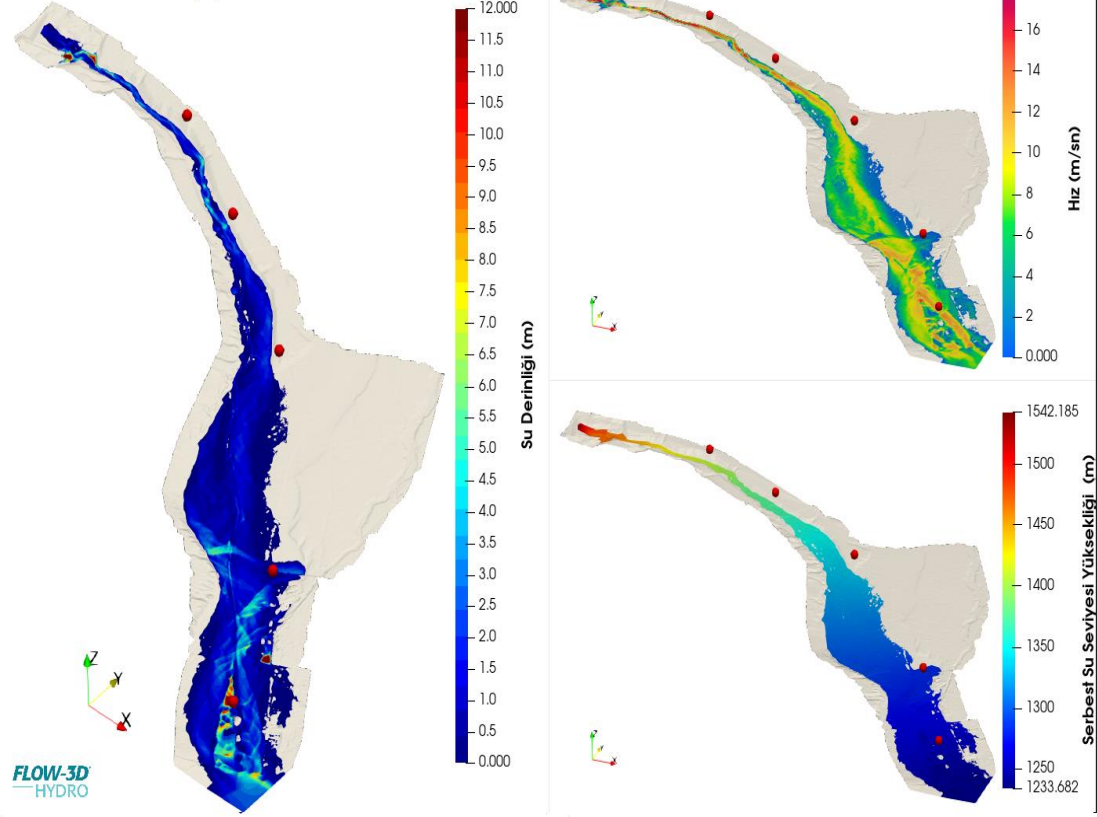


Ek 7. 1764. Saniyede 2B (a) ve 3B (b) Analizler Sonucu Oluşan Derinlik ve Hız Dağılımı

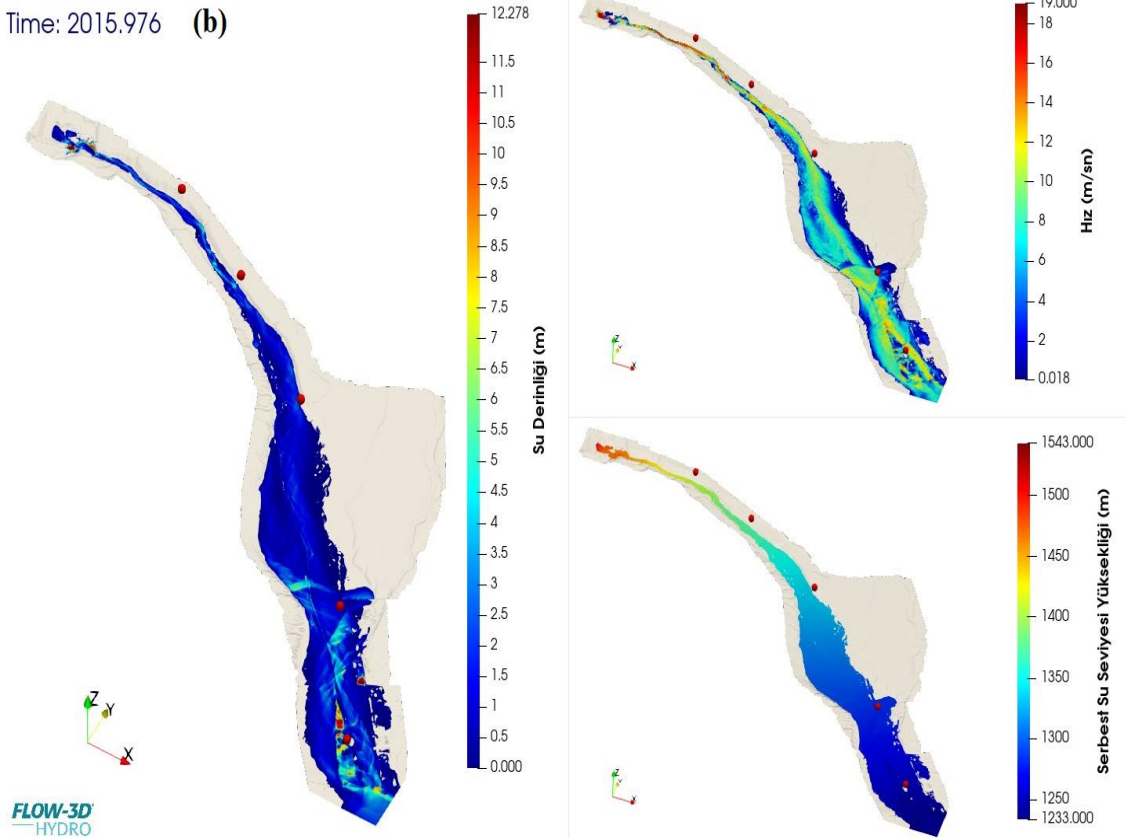


Ek 8. 2016. Saniyede 2B (a) ve 3B (b) Analizler Sonucu Oluşan Derinlik ve Hız Dağılımı

Time: 2016.044 (a)

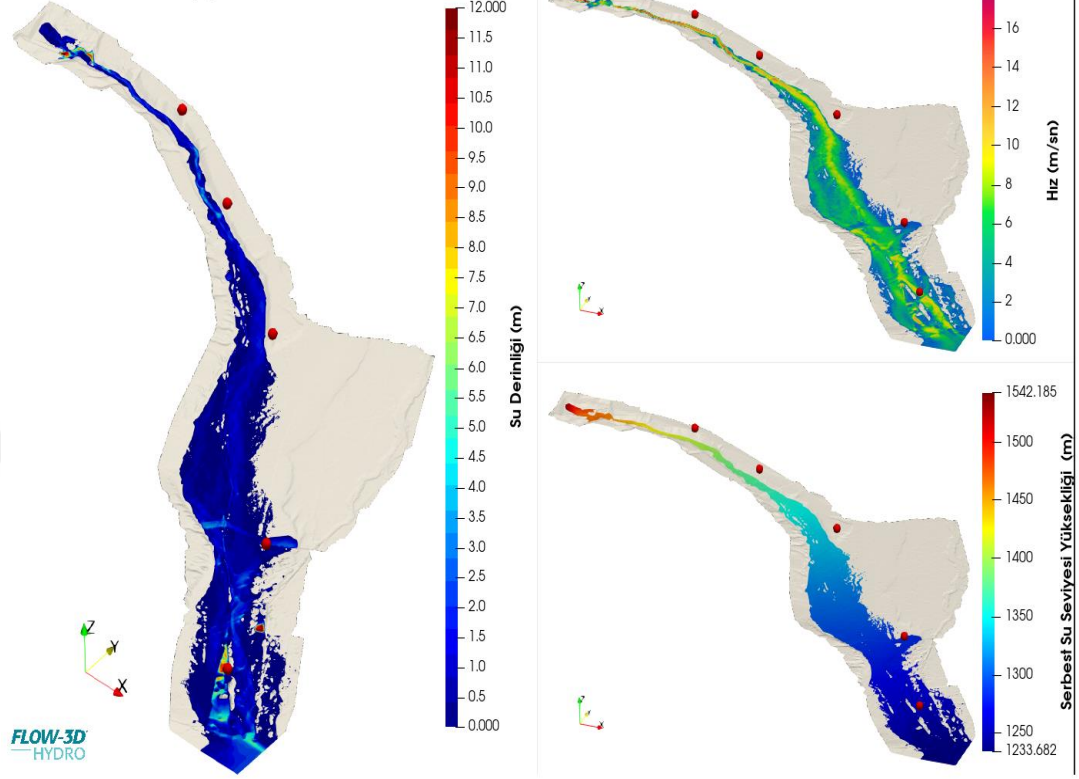


Time: 2015.976 (b)

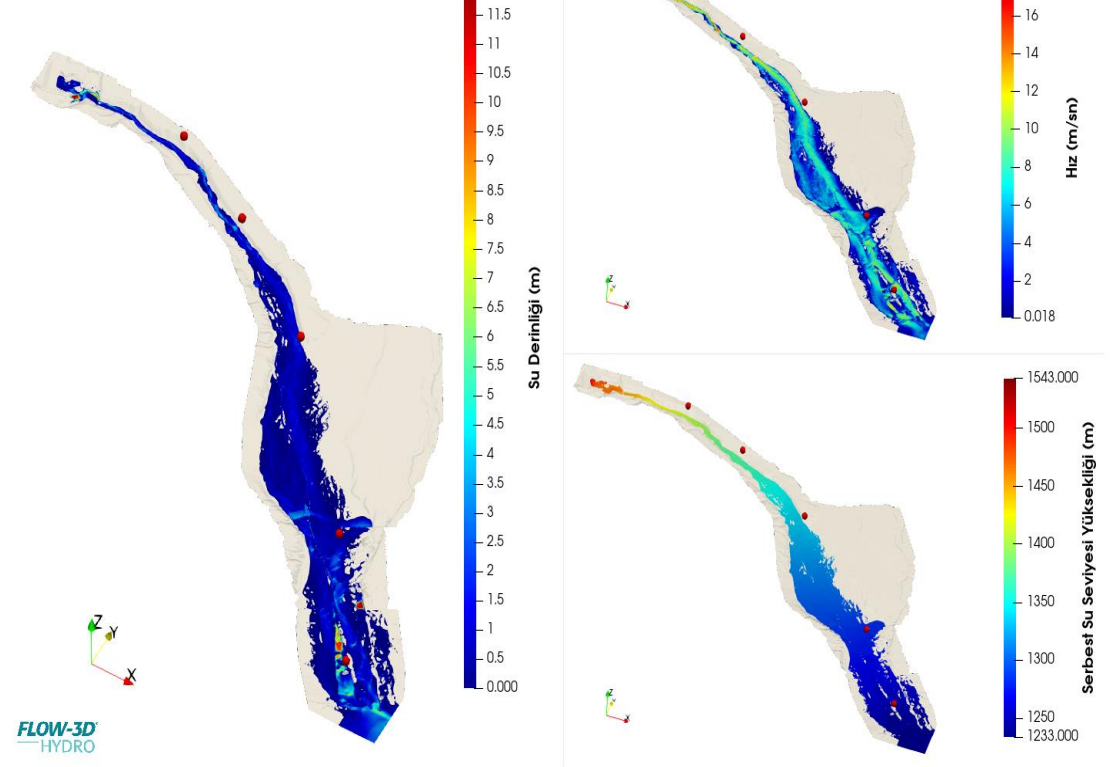


Ek 9. 2520. Saniyede 2B (a) ve 3B (b) Analizler Sonucu Oluşan Derinlik ve Hız Dağılımı

Time: 2519.991 (a)

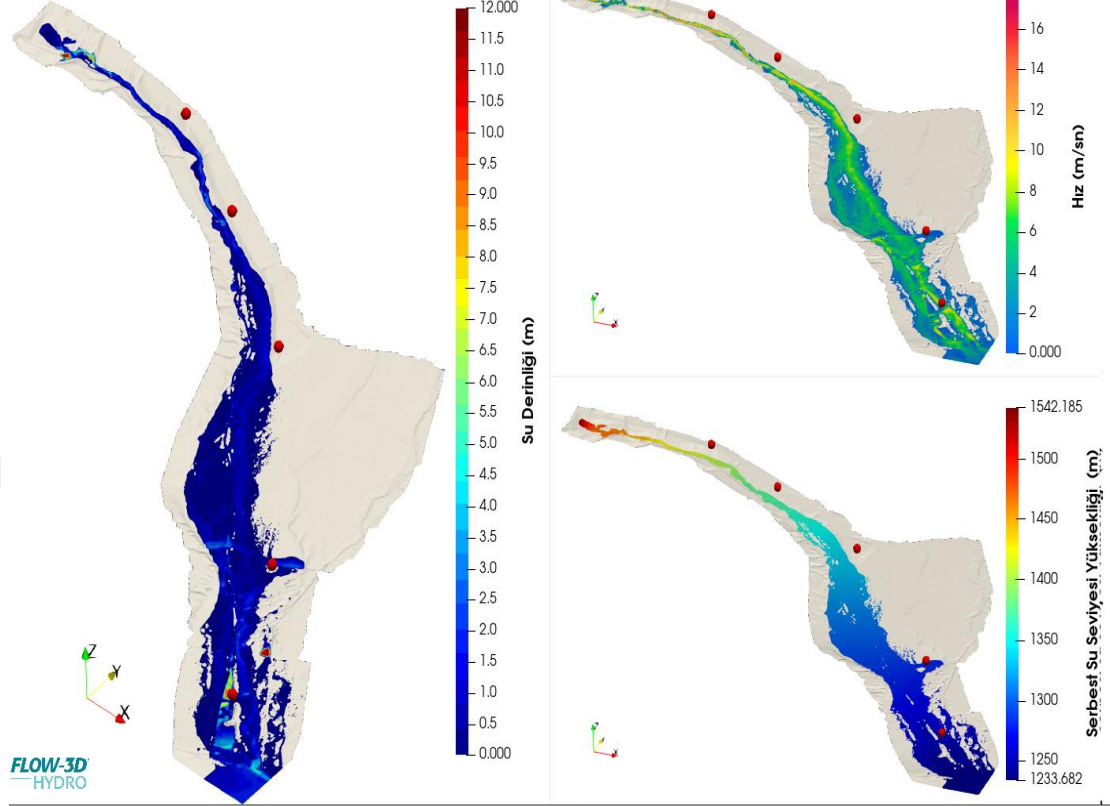


Time: 2519.973 (b)

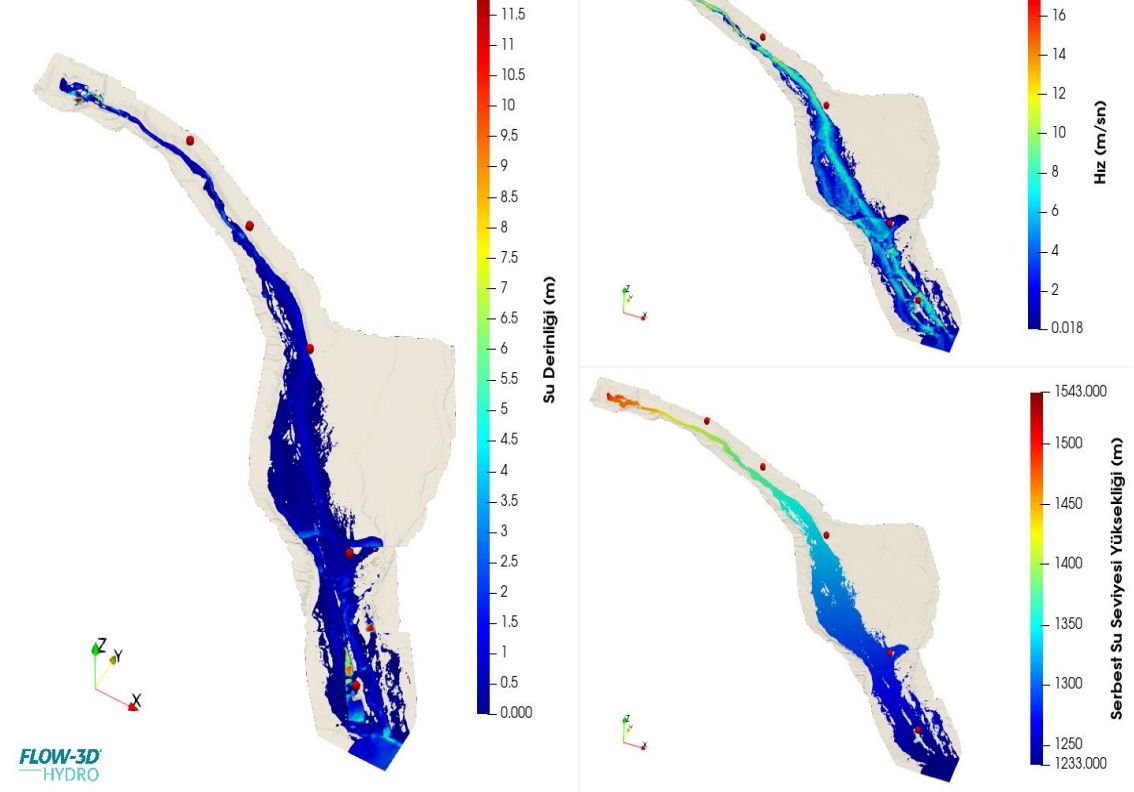


Ek 10. 3024. Saniyede 2B (a) ve 3B (b) Analizler Sonucu Oluşan Derinlik ve Hız Dağılımı

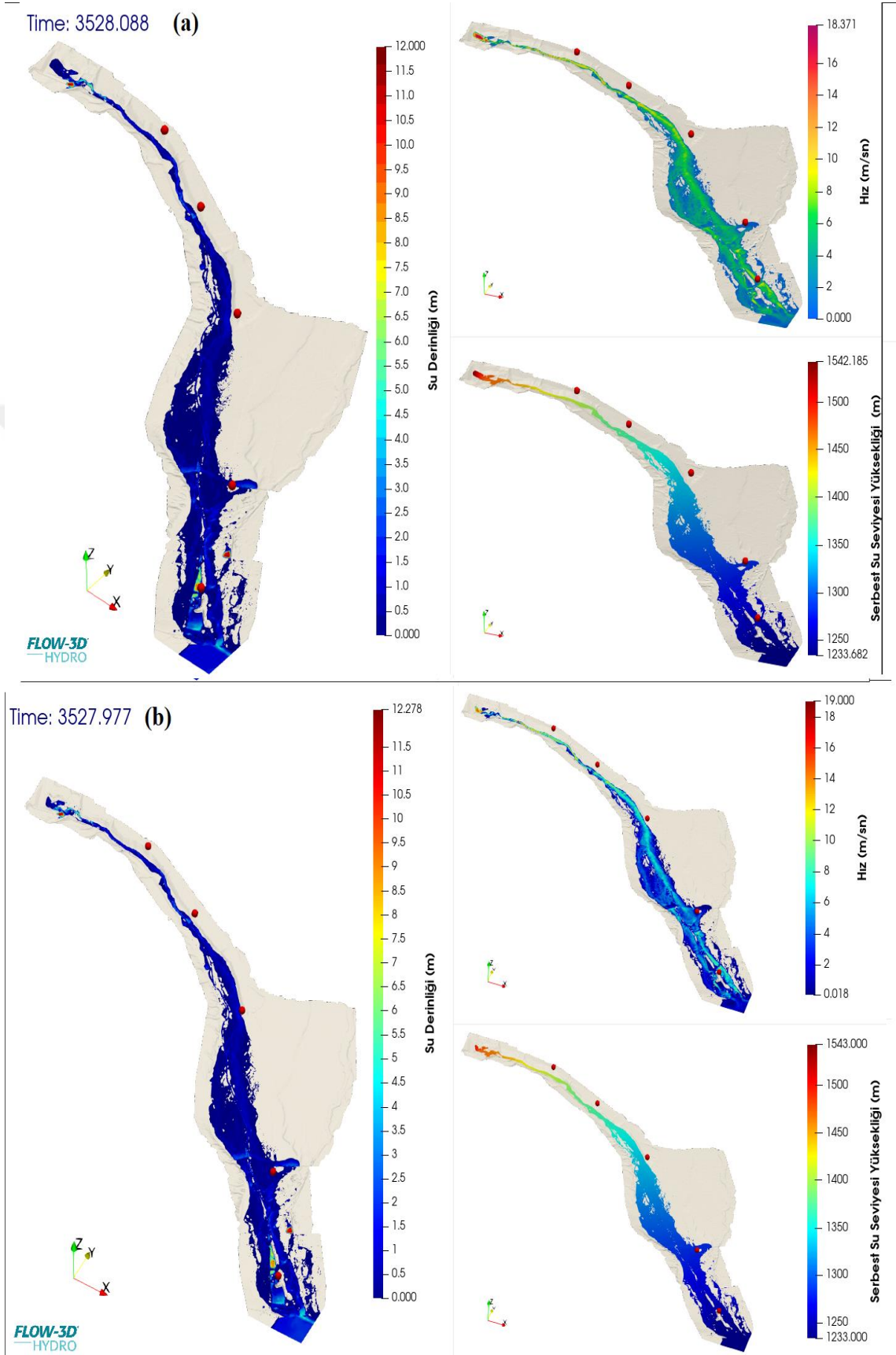
Time: 3024.004 (a)



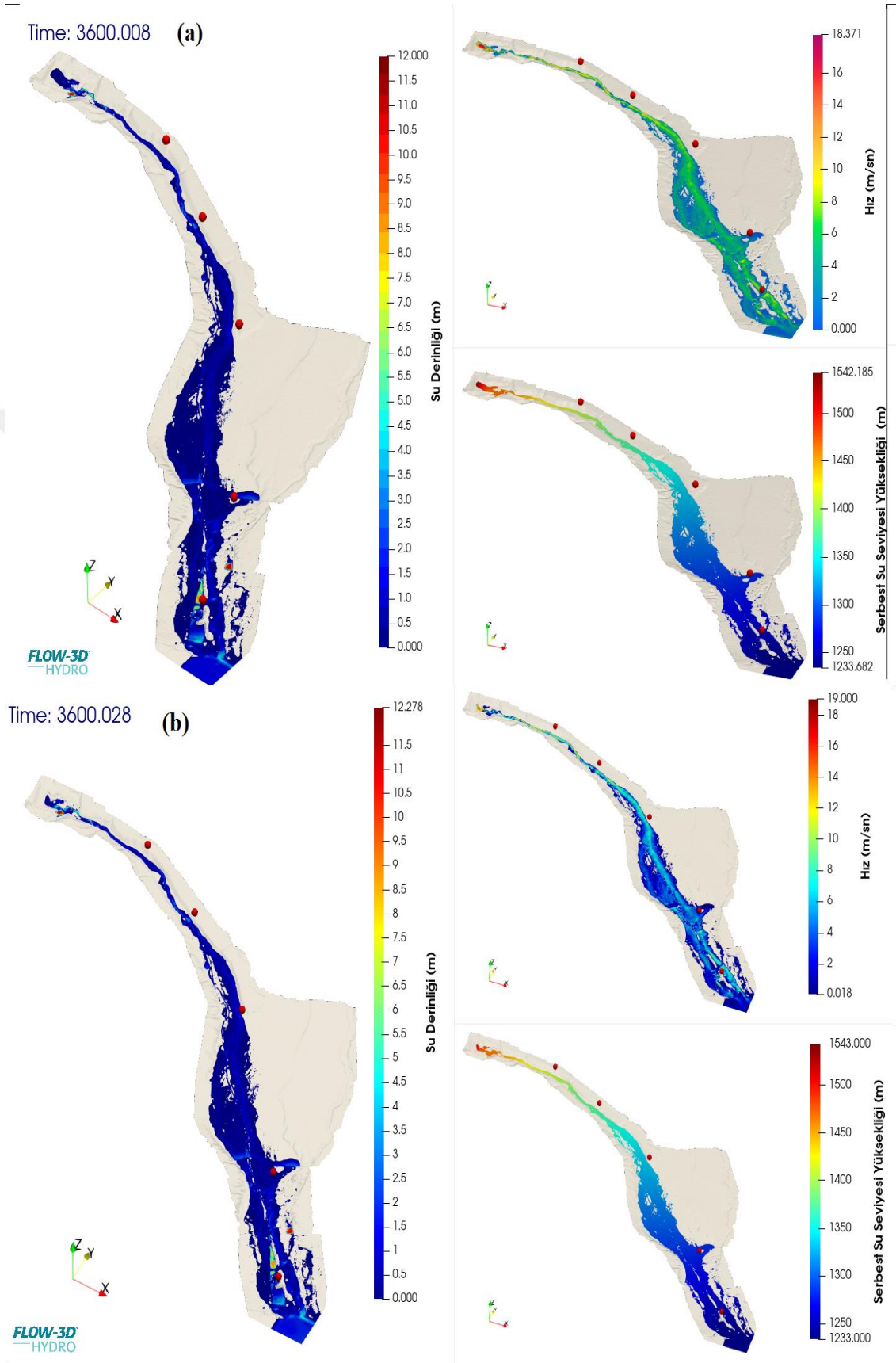
Time: 3024.013 (b)



Ek 11. 3528. Saniyede 2B (a) ve 3B (b) Analizler Sonucu Oluşan Derinlik ve Hız Dağılımı



Ek 12. 3600. Saniyede 2B (a) ve 3B (b) Analizler Sonucu Oluşan Derinlik ve Hız Dağılımı



ÖZGEÇMİŞ

Akın ÜSLÜ 2003 yılında Lisesi'nden, 2008 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünden, 2010 yılında Anadolu Üniversitesi İşletme Fakültesinden mezun olmuştur. 2011 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisansını tamamlamıştır.

2019 yılında Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında doktora programına başlamıştır. İyi derecede İngilizce bilmektedir. 2012 yılından itibaren Erzincan İl Özel İdaresinde İnşaat Mühendisi olarak görev yapmaktadır.

Bu doktora tezi, Gümüşhane Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'nde 21.F5110.02.01 proje kodlu GÜBAP290Hızlı Destek Programı ile desteklenmiştir.

Yayınlar:

Akgün, Ç. Nas S.S. ve Üslü, A. (2023). 2D and 3D numerical simulation of dam-break flooding: a case study of the Tuzluca Dam, Turkey. *Water*, 15(20), 3622.