

T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TUZLUCA BARAJI REZERVUARININ GEDİK PARAMETRELERİNE
DAYALI TAŞKIN SİMÜLASYONLARI VE MANSAP BÖLGESİNDEKİ
ETKİLERİ

DOKTORA

Çağrı AKGÜN

ARALIK-2023

GÜMÜŞHANE



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

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**TUZLUCA BARAJI REZERVUARININ GEDİK PARAMETRELERİNE
DAYALI TAŞKIN SİMÜLASYONLARI VE MANSAP BÖLGESİNDEKİ
ETKİLERİ**

**FLOOD SIMULATIONS BASED ON BREACH PARAMETERS OF TUZLUCA
DAM RESERVOIR AND ITS EFFECTS ON THE DOWNSTREAM AREA**

DOKTORA

Çağrı AKGÜN

**ARALIK-2023
GÜMÜŞHANE**



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

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**TUZLUCA BARAJI REZERVUARININ GEDİK PARAMETRELERİNE
DAYALI TAŞKIN SİMÜLASYONLARI VE MANSAP BÖLGESİNDEKİ
ETKİLERİ**

**FLOOD SIMULATIONS BASED ON BREACH PARAMETERS OF TUZLUCA
DAM RESERVOIR AND ITS EFFECTS ON THE DOWNSTREAM AREA**

DOKTORA

Çağrı AKGÜN

Danışman: Prof. Dr. Salim Serkan NAS

**ARALIK-2023
GÜMÜŞHANE**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Doktora Tezi olarak hazırlamış olduğum “**Tuzluca Barajı Rezervuarının Gedik Parametrelerine Dayalı Taşkın Simülasyonları ve Mansap Bölgesindeki Etkileri**” 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 kısıtlara 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.

21/12/2023

Çağrı AKGÜN

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Gümüşhane Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora Tezi olarak hazırlanmıştır. Lisansüstü eğitimimin her aşamasında maddi ve manevi desteğini esirgemeyen, bilgi ve birikimi ile akademik gelişimimi sağlayan kıymetli danışman hocam Prof. Dr. Salim Serkan NAS'a teşekkürü borç bilirim. Tez izleme komitemde bulunarak değerli eleştiri ve önerileriyle bana yol gösteren Dr. Öğr. Üyesi Rahim ŞİBİL ile Dr. Öğr. Üyesi Tuğçe ANILAN'a teşekkür ederim.

Çalışmadaki yardımlarından dolayı Öğr. Gör. Emirhan ÖZDEMİR'e, İnş. Yük. Müh. Akın ÜSLÜ'ye, Öğr. Gör. Murat KARAHAN'a, DSİ 24. Bölge Müdürlüğü ve KGM 18. Bölge Müdürlüğü personellerine teşekkür ederim. Ayrıca çalışmalarım sırasında desteğini ve sabrını eksik etmeyen eşime, eğitim hayatım boyunca her zaman yanımda olan aileme teşekkürlerimi sunarım.

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

Çağrı AKGÜN
GÜMÜŞHANE –2023

ÖZET

Bu tezde Türkiye'nin Iğdır İlinde inşa edilmesi planlanan Tuzluca Barajı'nın 2 boyutlu (2D) ve 3 boyutlu (3D) sayısal yıkılma simülasyonları FLOW3D yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sığ Su Denklemleri (SWE) ve Reynolds-Ortalama Navier-Stokes (RANS) denklemlerinin kullanıldığı analizlerde türbülans modeli olarak RNG k- ϵ seçilmiştir. Farklı gedik geometrisi ve yıkılma süreleri üzerinden oluşturulan senaryolarda her iki çözüm yönteminde de mansap bölgesinde iki yerleşimde ciddi su derinlikleri tespit edilmiştir. 2D analizler için ilgili senaryo koşullarında Halimcan ve Sürmeli yerleşimlerinde sırasıyla 11.26 m ve 9.61 m maksimum su derinlikleri gözlemlenmiştir. 3D analizlerde ise Halimcan ve Sürmeli yerleşimleri için maksimum su derinlikleri 9.9 m ve 8.9 m olarak tespit edilmiştir. Söz konusu simülasyonlarda baraj aksında meydana gelen pik debiler ise 2D analizlerde 67323 m³/sn, 3D analizlerde 69446 m³/sn olarak gözlemlenmiştir. Çalışma kapsamında Tuzluca Barajı'nın farklı yıkılma senaryolarındaki ölüm oranları ile hız-derinlik çarpımları da araştırılmıştır. Baraj yıkılma süresi ve gedik geometrisinin taşkın yayılımı, taşkın şiddeti ve yerleşimlerdeki ölüm oranları üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Doğrulama analizi olarak, literatürde yer alan bir baraj yıkılması deneyi FLOW3D yazılımı kullanılarak sayısal olarak çözülmüş ve deney sonuçları ile sayısal model sonuçları arasında uyum gözlemlenmiştir. 3D sayısal model deneysel sonuçlarının daha doğru bir temsilini sağlasa da çalışmanın ana konusunu oluşturan Tuzluca Barajı'nın yıkılma analizinde simülasyonun çözüm süresi 2D modele kıyasla yaklaşık 20 kat daha uzun sürmüştür. Bu sebeple baraj yıkılması gibi geniş ölçekli çalışmalar için 2D analizlerin daha pratik olabileceği, daha küçük ölçekli çalışmalar veya daha fazla hassasiyet gerektiren durumlar için ise 3D modellemenin uygun olacağı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Baraj yıkılmaları, FLOW3D, RANS, Sayısal simülasyon
Tuzluca Barajı

SUMMARY

In this thesis, 2D and 3D numerical failure simulation of the Tuzluca Dam, which is planned to be built in Iğdır Province of Turkey, was carried out using FLOW3D software. RNG k- ϵ was chosen as the turbulence model in the analyzes using Shallow Water Equations (SWE) and Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) equations. In the scenarios created with different breach geometry and failure times, serious water depths were detected in two settlements in the downstream region in both solution methods (2D SWE and 3D RANS). For 2D analyses, maximum water depths of 11.26 m and 9.61 m were observed in Halimcan and Sürmeli settlements, respectively, under the relevant scenario conditions. In 3D analyses, the maximum water depths for Halimcan and Sürmeli settlements were determined as 9.9 m and 8.9 m. In the simulations in question, the peak flow rates occurring at the dam axis were observed as 67323 m³/sec in 2D analyses and 69446 m³/sec in 3D analyses. Within the scope of the study, mortality rates and speed-depth multiplications in different failure scenarios of the Tuzluca Dam were also investigated. It has been observed that dam failure time and breach geometry have a significant impact on flood propagation, flood severity and mortality rates in settlements. As a verification analysis, a dam failure experiment in the literature was solved numerically using FLOW3D software and a satisfactory agreement was observed between the experimental results and the numerical model results. Although the 3D numerical model provides a more accurate representation of the experimental results, the solution time of the simulation in the failure analysis of the Tuzluca Dam, which is the main subject of the study, takes approximately 20 times longer than the 2D model. For this reason, it has been determined that 2D analyses may be more practical for large-scale studies such as dam break, while 3D modeling will be suitable for smaller-scale studies or situations requiring more precision.

Keywords: Dam failure, FLOW3D, RANS, Numerical simulation, Tuzluca Dam

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.....	XIII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	XIV
1. GİRİŞ.....	1
2. YAZIN ÖZETİ.....	12
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	40
3.1. Çalışma Bölgesi Hakkında Genel Bilgiler.....	40
3.2. Tuzluca Barajı ve Hidroelektrik Santral Projesi.....	42
3.3. Coğrafi Bilgi Sistemleri ve Arazi Verilerinin Elde Edilmesi.....	52
3.4. Çalışma Alanı Sınırlarının Belirlenmesi.....	53
3.5. Gedik Parametrelerinin Belirlenmesi.....	57
3.6. FLOW3D Yazılımı ve Kullanılan Eşitlikler.....	65
3.6.1. 2D Sığ Su Denklemleri (SWE).....	67
3.6.2. Süreklilik (Kütlenin Korunumu) Denklemi.....	68
3.6.3. Navier Stokes (Momentumun Korunumu) Denklemi.....	69
3.6.4. Türbülans Etkisi ve Reynold Ortalamalı Navier Stokes Denklemleri.....	70
3.6.5. Türbülans Modelinin Seçilmesi.....	78
3.6.6. Sonlu Hacimler Yöntemi.....	78
3.7. Doğrulama Analizi.....	81
3.8. FLOW3D ile 2D ve 3D Baraj Yıkılma Analizi.....	83
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	92
4.1. FLOW3D Doğrulama Analizi Sonuçları.....	92
4.2. FLOW3D 2D ve 3D Taşkın Simülasyonları.....	95
4.3. Taşkın Pik Debisinin Analitik Yöntemlerle Karşılaştırılması.....	108
4.4. Olası Can Kayıplarının Tahmini.....	111

4.5. İnsan Denge Kaybı ve Bina Yıkılma Analizi.....	115
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	120
KAYNAKÇA	123
EKLER	133
ÖZGEÇMİŞ.....	157



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Baraj yıkılmaları, sebepleri ve ölüm sayıları.....	2
Tablo 2. Xu ve Zhang (2009) yönteminde diğer değişkenlere ait bilgiler.....	23
Tablo 3. Su altında kalacak yerleşimlerin nüfus bilgileri.....	44
Tablo 4. Tuzluca Barajı ve HES projesine ait karakteristik bilgiler.....	47
Tablo 5. Tuzluca Barajı'na ait gedik karakteristikleri.....	58
Tablo 6. MacDonald ve LM (1984) yöntemine göre gedik parametreleri.....	59
Tablo 7. Froehlich (1995) yöntemine göre hesaplanan gedik parametreleri.....	61
Tablo 8. Froehlich (2008) yöntemine göre hesaplanan gedik parametreleri.....	62
Tablo 9. Xu ve Zhang (2009) yöntemine göre hesaplanan gedik parametreleri.....	64
Tablo 10. Hesaplanan gedik parametrelerinin karşılaştırılması.....	64
Tablo 11. Soares-Fraza (2007) seviye ölçerlerin konumu.....	82
Tablo 12. Sayısal simülasyonlara ait genel karakteristik bilgiler.....	86
Tablo 13. RMSE ve MAE değerleri.....	94
Tablo 14. Pik debi tahmini için analitik yöntemler.....	109
Tablo 15. Xu ve Zhang (2009) yönteminde j, k ve l katsayılarına ait bilgiler.....	110
Tablo 16. Pik debi analitik ve sayısal çözümlerinin karşılaştırılması.....	110
Tablo 17. Önerilen si değerlerinin aralıkları.....	113
Tablo 18. Önerilen ni değerlerinin aralıkları.....	113
Tablo 19. Yerleşim ve simülasyon senaryolarına göre seçilen si değerleri.....	114
Tablo 20. Yerleşim ve simülasyon senaryolarına göre seçilen ni değerleri.....	114
Tablo 21. Tuzluca Barajı'nın yıkılması durumunda öngörülen can kayıpları.....	114

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Geçmiş baraj yıkılmalarının sebeplerine ait istatistiki dağılım.....	4
Şekil 2. Üstünden su aşma ve borulanma sebepli baraj yıkılmaları.....	5
Şekil 3. Gövde üzerinden suyun aşması sonucu oluşan gedik gelişimi.....	6
Şekil 4. Chaq Chaq Barajının yıkılması.....	6
Şekil 5. Borulanma sonucu oluşan gedik gelişimi.....	7
Şekil 6. Teton Barajı yıkılma aşamaları.....	8
Şekil 7. Yıkılan barajların yaş aralıkları dağılımı.....	9
Şekil 8. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği bileşenleri.....	11
Şekil 9. Tuzluca Barajı ve HES projesinin lokasyon haritası.....	40
Şekil 10. Tuzluca ilçe merkezi.....	41
Şekil 11. Tuzluca Tuz Mağaraları.....	41
Şekil 12. Aşağı Aras Havzası Projeleri.....	43
Şekil 13. Tuzluca Barajı rezervuarından etkilenecek yerleşimler.....	45
Şekil 14. Iğdır-Digor-Kars (D070) karayoluna ait uydu görüntüsü.....	46
Şekil 15. Tuzluca Barajı aks yeri.....	47
Şekil 16. Tuzluca Barajı ve HES projesinin genel yerleşim planı.....	49
Şekil 17. Tuzluca Barajı gövdesi enkesiti.....	50
Şekil 18. Tuzluca Barajı gövdesi boykesiti.....	51
Şekil 19. CBS ve klasik yönetim sisteminin zamana göre kümülatif maliyeti.....	52
Şekil 20. Çalışma bölgesine ait sayısal yükseklik modeli.....	54
Şekil 21. Çalışma bölgesine ait uydu görüntüsü.....	55
Şekil 22. FLOW3D’de çalışma alanının görüntüsü.....	56
Şekil 23. Gedik parametreleri.....	57
Şekil 24. FLOW3D yazılımında gerçekleştirilen senaryolar.....	65
Şekil 25. Bir hesaplama hücresi örneği.....	66
Şekil 26. VOF yönteminde F değerleri şematik gösterimi.....	67
Şekil 27. Uzayda bir kontrol hacmi.....	68
Şekil 28. Çözüm ağı yerleşimi.....	79
Şekil 29. W, P, E düğüm noktaları etrafındaki kontrol hacmi.....	79
Şekil 30. Soares-Fraza (2007) deney modeli.....	82
Şekil 31. FLOW3D Soares-Farazao (2007) deney modeli.....	82
Şekil 32. FLOW3D mesh blokları ve toplam hücre sayısı.....	84
Şekil 33. FLOW3D türbülans modeli seçimi.....	85

Şekil 34. Trapez gedik için FLOW3D yazılımında oluşturulan hareketli parçalar.....	87
Şekil 35. Dikdörtgen gedik için FLOW3D yazılımında oluşturulan hareketli parçalar ..	88
Şekil 36. Simülasyonlarda trapez ve dikdörtgen gediklerde taşkın durumu.....	90
Şekil 37. FLOW3D yerleşimlere atanan probe noktaları.....	89
Şekil 38. Deney ve sayısal modellerin karşılaştırılması.....	93
Şekil 39. 2D analizlerde 1. senaryo için taşkın yayılımının zamanla değişimi.....	96
Şekil 40. 2D analizlerde 2. senaryo için taşkın yayılımının zamanla değişimi.....	97
Şekil 41. 2D analizlerde 3. senaryo için taşkın yayılımının zamanla değişimi.....	98
Şekil 42. 2D analizler için 1., 2. ve 3. senaryolarda yerleşimlere ait su derinlikleri....	100
Şekil 43. 3D analizlerde 1. senaryo için taşkın yayılımının zamanla değişimi.....	102
Şekil 44. 3D analizlerde 2. senaryo için taşkın yayılımının zamanla değişimi.....	103
Şekil 45. 3D analizlerde 3. senaryo için taşkın yayılımının zamanla değişimi.....	104
Şekil 46. 3D analizler için 1., 2. ve 3. senaryolarda yerleşimlere ait su derinlikleri....	105
Şekil 47. 2D ve 3D analizlerde 1., 2. ve 3. senaryolara ait taşkın hidrografları.....	107
Şekil 48. 1. Senaryo için derinlik-hız grafikleri.....	116
Şekil 49. 2. Senaryo için derinlik-hız grafikleri.....	117
Şekil 50. 3. Senaryo için derinlik-hız grafikleri.....	118

EKLER DİZİNİ

Ek 1. 2D simülasyonda 1. Senaryo için taşkın yayılımı ve su derinlikleri.....	133
Ek 2. 2D simülasyonda 2. Senaryo için taşkın yayılımı ve su derinlikleri.....	137
Ek 3. 2D simülasyonda 3. Senaryo için taşkın yayılımı ve su derinlikleri.....	141
Ek 4. 3D simülasyonda 1. Senaryo için taşkın yayılımı ve su derinlikleri.....	145
Ek 5. 3D simülasyonda 2. Senaryo için taşkın yayılımı ve su derinlikleri.....	149
Ek 6. 3D simülasyonda 3. Senaryo için taşkın yayılımı ve su derinlikleri.....	153



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	: Kesit alanı
B_{ave}	: Ortalama gedik genişliği
B_b	: Gedik alt genişliği
B_t	: Gedik üst genişliği
C	: Baraj kret genişliği
CH_4	: Metan
CO_2	: Karbondioksit
f_i	: Bir akışkan hacmi için Reynolds gerilmeleri
f	: Risk altındaki nüfusun ölüm oranı
F	: Akışkan hacmi oranı
g	: Yerçekimi ivmesi
h	: Herhangi bir noktadaki su yüksekliği
h_{vc}	: Kritik derinlik hızı
h_d	: Baraj yüksekliği
H_b	: Gedik yüksekliği
h_w	: Yıkılma anında gedik tabanının üzerindeki su yüksekliği
k	: Türbülans kinetik enerji
L	: Karakteristik uzunluk
LOL	: Can kaybı sayısı
m	: Kütle
n	: Manning pürüzlülük katsayısı
O	: Üstünden su aşması durumu
Q	: Debi
Q_p	: Taşkın pik debisi
p	: Basınç
P	: Borulanma durumu
Par	: Risk altındaki nüfus
R	: Türbülans yoğunluğu
S_f	: Rezervuar şekil faktörü
t	: Zaman
T_f	: Baraj yıkılma süresi
τ	: Kayma gerilmesi
τ_{ij}	: Gerilme tansörü

τ_{ij}'	: Türbülans (Reynolds, çalkantı gerilmeleri)
u	: x doğrultusundaki akım hızı
v	: y doğrultusundaki akım hızı
V	: Ortalama akım hızı
V_{er}	: Aşınan gövde hacmi
V_r	: Yıkılma anında rezervuardaki su hacmi
V_w	: Yıkılma anında gedik tabanının üzerindeki su hacmi
w	: z doğrultusundaki akım hızı
W_{avg}	: Ortalama gedik genişliği
ρ	: Akışkan yoğunluğu
ε	: Türbülans sönümlenme oranı
ϕ	: Akışın taşınım özelliği
μ	: Kinematik viskozite
μ_t	: Türbülans viskozitesi
ν	: Dinamik viskozite
z	: Gedik kenar eğimi
CBS	: Coğrafi bilgi sistemi
CADAM	: Baraj Yıkılması Modelleme Eylem Projesi
DEM	: Sayısal yükseklik modeli
FAVOR	: Kesit alan / hacim oranı
HAD	: Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
ICOLD	: Uluslararası Büyük Barajlar Komisyonu
LES	: Büyük girdap simülasyonu (Large Eddy Simulation)
MAE	: Ortalama Mutlak Hata
RANS	: Reynolds Ortalamalı Navier Stokes (Reynolds Averaged Navier - Stokes) Denklemleri
RMSE	: Kök Ortalama Kare Hatası
SWE	: Sığ Su Denklemleri (Shallow Water Equations)
STL	: Stereolitografi teknolojisi
VOF	: Akışkan hacmi yöntemi (Volume of Fluid)
USBR	: Amerika Birleşik Devletleri Islah Bürosu

1. GİRİŞ

Akış halindeki suyu akarsu vadisinde tutmak için inşa edilen barajlar, yüz yıllardır insanlığın su ihtiyacını karşılamak için yapılmaktadır. Tarihte bilinen ilk barajın M.Ö. 4000 yıllarında Nil Nehri üzerinde sulama ve içme suyu temini için inşa edildiği tahmin edilmektedir. Günümüzde gelişen teknoloji, ekipman ve tecrübeyle bir çok sınıfta baraj inşa edilerek sulama ve içme suyu sağlama, taşkın kontrolü, enerji üretimi, akarsu ulaşımı ve su kalitesinin iyileştirilmesi sağlanmaktadır (Bozkuş 2004, Berkün, 2005; Ağırlioğlu, 2007; Shivashankar, 2016).

Barajların sınıflandırılması büyüklükleri, yapılış amaçları ve yapı malzemesine göre yapılmaktadır. Uluslararası Büyük Barajlar Komisyonu (ICOLD), bir barajın büyük baraj olarak nitelendirilmesi için; yüksekliğinin 15 metreden büyük olması veya en az 10 metre yükseklikte ve 500 metre kret uzunluğuna sahip olması gerektiğini belirtmiştir. Yapılış amaçlarına göre barajlar tek veya çok amaçlı barajlar olarak sınıflandırılmaktadır. Örneğin sadece sulama suyu temini için yapılan barajlar tek, hem sulama suyu sağlayan hem de hidroelektrik enerji üreten barajlar çok amaçlı olarak nitelendirilmektedir. Yapı malzemesine göre barajlar ise dolgu ve beton barajlar olarak ikiye ayrılmaktadır. Dolgu barajlar kendi arasında toprak ve kaya dolgu barajlar olarak ikiye, beton barajlar ise ağırlık, payandalı ve kemer barajlar olarak üçe ayrılmaktadır (Berkün, 2005; Xu ve Zhang, 2009; ICOLD, 2011).

Geçmişte bir çok faydası düşünülerek inşa edilen barajların birtakım çevresel sorunlara da yol açtığı bilinmektedir. Nehir ekosisteminin bozulması, sudaki canlı hayatının tehdi, verimli arazilerin su altında kalması, insanların yerlerinden edilmesi gibi bilindik etkilerin yanı sıra barajlar fosil yakıtlar gibi sera gazı emisyonu da yapmaktadır. Gerek inşaat aşamasında iş makineleri ve beton karışımı etkisi gerekse işletme aşamasında baraj rezervuarında su altında kalan ekositemin mikrobiyal parçalanması, su yüzeyinden CH₄ ve CO₂ çıkışına sebep olmaktadır. Akarsu ve göllerden farklı olarak baraj rezervuarı var olan bir ekosistem üzerine kuruludur. Bu durum yoğun bir karasal alanı sular altında bırakmakta ve organik maddelerin çürümesi suretiyle su altındaki ekosistem ölçeğiyle orantılı olarak sera gazı emisyonuna sebep olmaktadır. Özellikle tropikal bölgelerde inşa edilen barajların eşit kurulu güçte bir termik santralden daha fazla sera gazı emisyonu yapabileceği belirtilmektedir (Fearnside ve Pueyo, 2012; Zhao vd., 2015; Kirchherr ve Charles, 2016).

Barajların meydana getirebileceği olumsuz etkilerden belki de en tehlikelisi bir barajın yıkılması durumudur. Barajlar, rezervuarında depoladığı yüksek hacimdeki su kütlesi nedeniyle potansiyel bir tehdit durumundadır. Yapım aşamasındaki hatalar, meteorolojik faktörler ve meydana gelen depremler gibi etkenlerin yanında devletler arası savaşlar sebebiyle de baraj yıkılmaları gerçekleşmektedir. Öyle ki ikinci dünya savaşı yıllarında Almanya'nın Dortmund kenti yakınlarında bulunan Möhne Barajı bombalanarak yıkılmış ve 1200 kişinin hayatını kaybetmesine neden olmuştur. Baraj yıkılmaları tarihi incelendiğinde tek seferde en çok can kaybının yaşandığı baraj yıkılmasının 1975 yılında Çin'de meydana geldiği ve 171000 kişinin hayatını kaybettiği görülmektedir (Zagonjoli, 2007; Adamo vd., 2020; Em ve Hamidi, 2021).

Tablo 1. Baraj yıkılmaları, sebepleri ve ölüm sayıları (Adamo vd., 2020).

Baraj	Ülke	Yıkılma Yılı	Baraj Tipi	Baraj Yüksekliği (m)	Yıkılma Sebebi	Ölüm Sayısı	
Puentes	İspanya	1802	M	69	O	600	
Iruhaika	Japonya	1868	E	28	-	1200	
Fergoug	Cezayir	1881	A	33	FL	200	
South Fork	ABD	1889	E/R	21	O	2200	
Tigra	Hindistan	1917	M	33	FL	1000	
Gleno	İtalya	1923	E	35	O	600	
St. Francis	ABD	1928	G	62	S	450	
Möhne	Almanya	1943	M	40	W	1200	
Malpasset	Fransa	1959	A	66	F	420	
Vajont	İtalya	1963	A	262	O	2400	
Sempor	Endonezya	1967	R	60	P	200	
Nanak	Hindistan	1967	E	16	P	100	
Banqio	Çin	1975	E	24.5	O	171000	
Teton	ABD	1976	E/R	93	P	11	
Machu	Hindistan	1979	E	26	O	2000	
Kantilla	Siri Lanka	1986	E	27	O	127	
Gouhou	Çin	1993	R	59	P	400	
Zeyzoun	Suriye	2002	E	43	O	22	
Fujinuma	Japonya	2012	E	18.5	E	8	
Xe Namnoy	Laos	2018	E/R	78	O	36	
Baraj Tipi	A	E	G	M	R		
	Kemer Baraj	Toprak Dolgu	Ağırlık Baraj	Taş Baraj	Kaya Dolgu		
Yıkılma Sebebi	E	F	FL	O	P	S	W
	Deprem	Temel Problemleri	Sel	Üstünden Su Aşma	Borulanma	Kayma	Savaş

Tablo 1'de gösterilen başlıca baraj yıkılma olayları incelendiğinde bir barajın herhangi bir sebeple yıkılmasının ne denli ciddi problemlere yol açacağı görülmektedir.

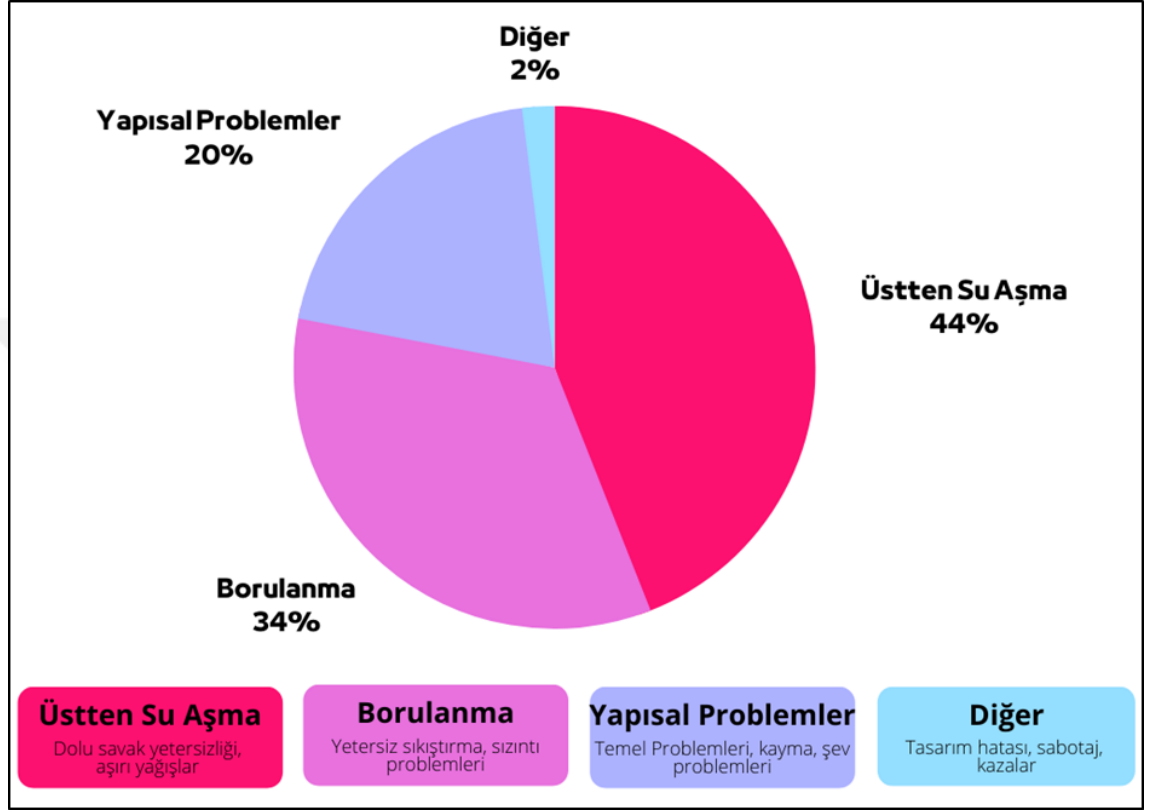
Baraj yıkılmalarının nehir taşkınlarına göre daha ani ve yüksek debilerde gerçekleşmesi çok daha fazla can ve mal kaybına sebep olacak taşkınlar yaratabilmektedir. Özellikle baraj gövdesindeki kırılmanın ani gerçekleşmesi uyarı vaktinin azalmasına ve risk altındaki insanların tahliye edilmesini güçleştirmektedir. Bu durum mansap bölgesindeki can kayıplarını artıran önemli bir unsurdur. Mevcut ve planlama aşamasındaki barajların yıkılma analizlerinin yapılarak mansap bölgesinde taşkın yayılım haritalarının çıkarılması ve acil eylem planlarına entegre edilmesinin, olası yıkılma etkilerini azaltabilecek önemli bir hazırlık olduğu düşünülmektedir.

Dünya'nın bir çok yerinde gerçekleşen baraj yıkılmalarıyla birlikte, yıkılma sonrası meydana gelebilecek can ve mal kayıpları ile çevresel etkileri azaltmak için baraj güvenliği alanında çalışmalar yapılmıştır. Ülkemizde baraj yıkılması görülmemiş, ancak 2012 yılında Adana ilindeki Gökdere Köprü Barajı'nın dolu savak kapaklarından birinin kopması sonucu gelişen taşkın sebebiyle 10 kişi hayatını kaybetmiştir (URL-1).

ABD baraj güvenliği noktasında ciddi çalışmalar yapmış ve bu konu üzerinde kamu – özel teşebbüs birçok kuruluşun uzmanlaşmasını sağlamıştır. Hatta U.S. Army Corps of Engineers (ABD Ordusu Mühendisler Birliği) tarafından HEC-RAS yazılımı geliştirilerek baraj yıkılmaları ve etkilerinin araştırılması için kullanıcıların hizmetine sunulmuştur. Ülkemizde baraj güvenliğiyle ilgili çalışmalar DSİ (Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü) öncülüğünde yürütülmekte olup bu kapsamda ilk çalışmalar 1998 yılında Baraj Emniyeti Çalışma Programı'nın hazırlanmasıyla başlamıştır. Sonraki dönemlerde bu alandaki çalışma sayıları artmıştır (Bozkuş, 2004; Abay vd., 2015; Khosravi vd., 2019; Marangoz ve Anılan, 2022; Aksoy vd., 2022).

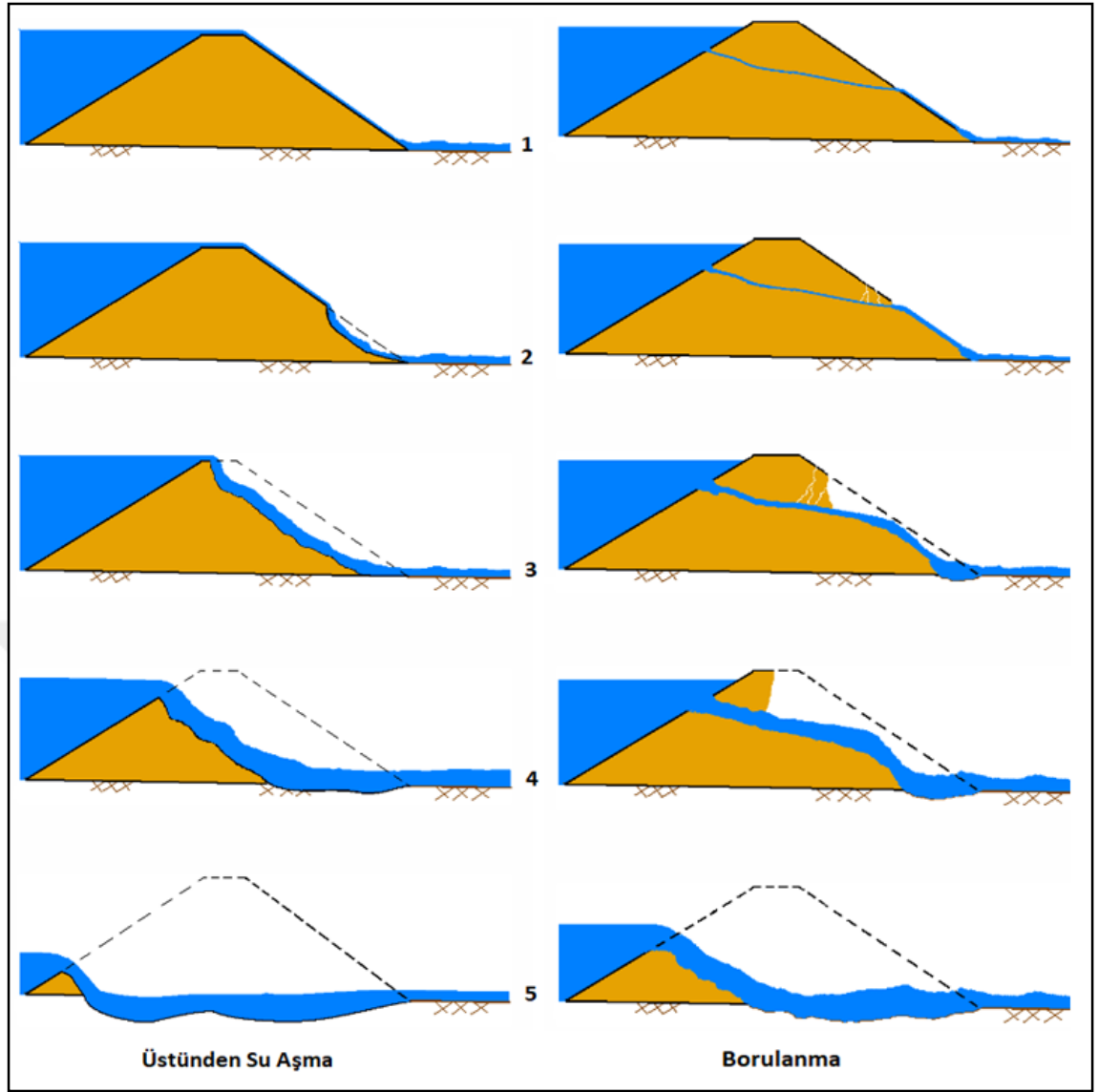
Geçmiş baraj yıkılmaları incelendiğinde yıkılmaya sebebiyet veren belirgin bir etken olmakla birlikte genelde birkaç faktörün birlikte meydana gelmesiyle yıkılmaların gerçekleştiği görülmektedir. Bu durum baraj yıkılma mekanizmalarının karmaşıklığını gösterirken aynı baraj türlerine veya aynı yıkılma sebeplerine ait benzer gedik ve yıkılma mekanizmalarının gelişmesi de bu noktada bir kategorizasyon yapılabilmesini mümkün kılmıştır. Örneğin dolgu barajlarda meydana gelen yıkılmaların büyük bir kısmı borulanma sebebiyle meydana gelirken, bu tarz yıkılmalarda baraj gövdesinin ortasında oluşan dikdörtgen gedik genişlemesiyle yıkılma gerçekleşmektedir. Aşırı yağışlar veya yetersiz dolu savak nedeniyle barajın üstünden su aşması şeklinde gerçekleşen baraj yıkılmalarında ise krette başlayan trapez gedik aşağıya doğru büyümesiyle yıkılmalar gerçekleşmektedir (Karakaya, 2005; Palamut, 2014; Ruan vd., 2021; Uysal ve Taşçı, 2023).

Başlıca baraj yıkılma sebepleri; üstten su aşma, borulanma, yapısal problemler ve diğer sebepler (tasarım hatası, dolusavak kapağı kopmaları, sabotaj vs.) olarak sınıflandırılabilir. Baraj tipi ve yıkılmayı etkileyen faktörlere bağlı olarak her barajın yıkılma mekanizması farklı işleyebilmektedir. 1990 yılına kadar gerçekleşen baraj yıkılmalarının sebeplerine ait istatistiki dağılım Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Geçmiş baraj yıkılmalarının sebeplerine ait istatistiki dağılım (ICOLD, 1995).

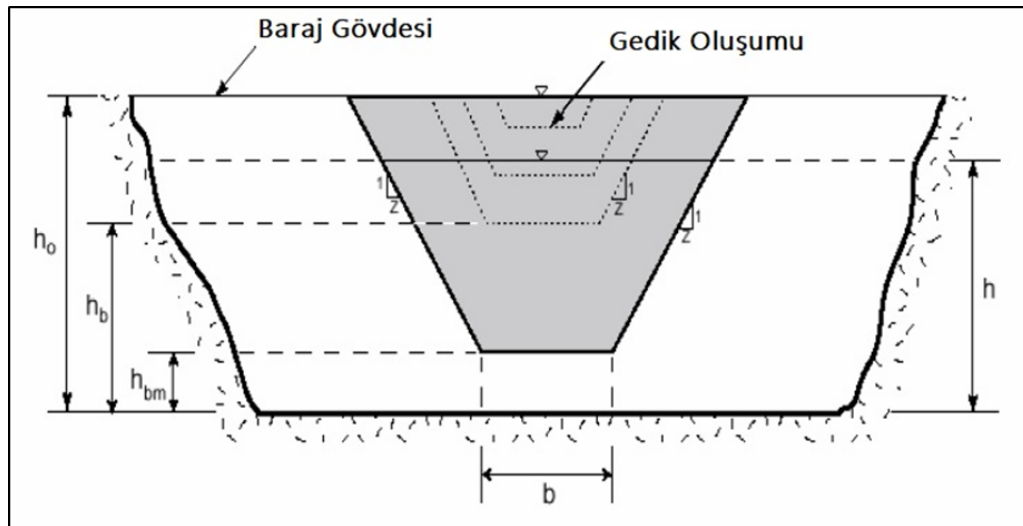
Geçmiş baraj yıkılmalarının nedenleri incelendiğinde ağırlıklı olarak üstten su aşma ve borulanma problemlerinin yıkılmaya sebebiyet verdiği görülmektedir. Aşağıda Şekil 2’de üstünden su aşma ve borulanma kaynaklı baraj yıkılmasının şematik karşılaştırılması gösterilmiştir.



Şekil 2. Üstünden su aşma ve borulanma sebepli baraj yıkılmaları (URL-2, 2022).

Barajın üstünden su aşması, genellikle aşırı yağışlar, yetersiz dolu savak kapasitesi, bakım onarım eksikliği sonucu dolusavakların tıkanması ve baraj yüksekliğinin düşük projelendirilmesi nedeniyle olmaktadır. Bu durumda baraj kretinde ve mansap yüzünde aşınma nedeniyle açılan trapez gedik tabana doğru genişleyerek büyümekte ve baraj yıkılması gerçekleşmektedir. (Karakaya, 2005; Palamut, 2014; Wu, 2016).

Aşağıda Şekil 3’de üstünden su aşması durumunda baraj gövdesinde oluşacak gedik şeklinin görseli verilmiştir.



Şekil 3. Gövde üzerinden suyun aşması sonucu oluşan gedik gelişimi (Karakaya, 2005).

Üzerinden su aşması sonucu yıkılan barajlara 2006 yılında Irak'ta yıkılan Chaq Chaq Barajı örneği verilebilmektedir. 14.5 metre yükseklikte kil çekirdekli toprak dolgu tipindeki baraj, aşırı yağışlar sonucunda gövde üzerinden suyun aşması sonucu yıkılmış ve herhangi bir can kaybı meydana gelmemiştir.

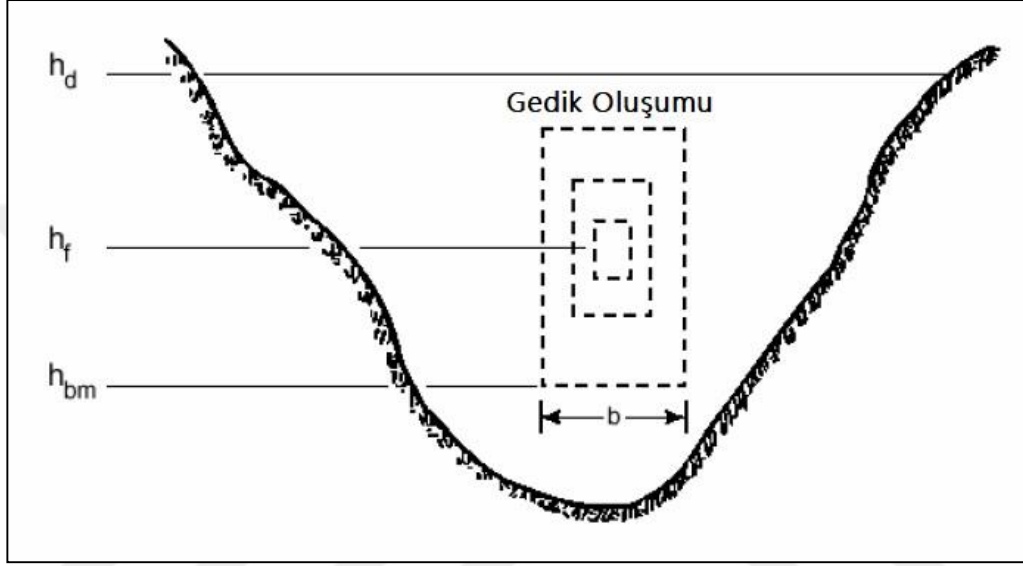


Şekil 4. Chaq Chaq Barajının yıkılması (Abdulrahman, 2014).

Baraj yıkılmalarında bir diğer sık karşılaşılan sebep borulanma olayıdır. Özellikle dolgu barajlarda baraj güvenliği noktasında en dikkat edilmesi gereken husus olup ICOLD (Uluslararası Büyük Barajlar Komisyonu)’un verilerine göre dolgu baraj yıkılmalarının yaklaşık %40’ı borulanma sebepli olarak karşımıza çıkmaktadır.

Borulanma, baraj gövdesine sızan suyun orada bir iç erozyon meydana getirmesidir. Oluşan boşluktan suyla birlikte ince malzemenin de geçmesi oyucu genişleterek barajın yıkılmasına sebebiyet vermektedir. Bu durumda baraj gövdesinin herhangi bir yerinde açılan dikdörtgen gedik zamanla büyüyerek baraj yıkılmasını gerçekleştirmektedir (Karakaya, 2005; Wu, 2016).

Aşağıda Şekil 5'te borulanma durumunda baraj gövdesinde oluşacak gedik şeklinin görseli verilmiştir.



Şekil 5. Borulanma sonucu oluşan gedik gelişimi (Karakaya, 2005).

Dolgu barajlarda borulanmaya neden olan faktörler; etkili bir filtrasyon uygulanamaması, gövdede veya temelde düzgün sıkıştırma yapılmaması, deprem dolayısıyla oluşan çatlaklar ve doğal süreçlerden dolayı gelişen süreksizlik ve kirlilikler olarak sıralanabilmektedir (Ajami, 2019).

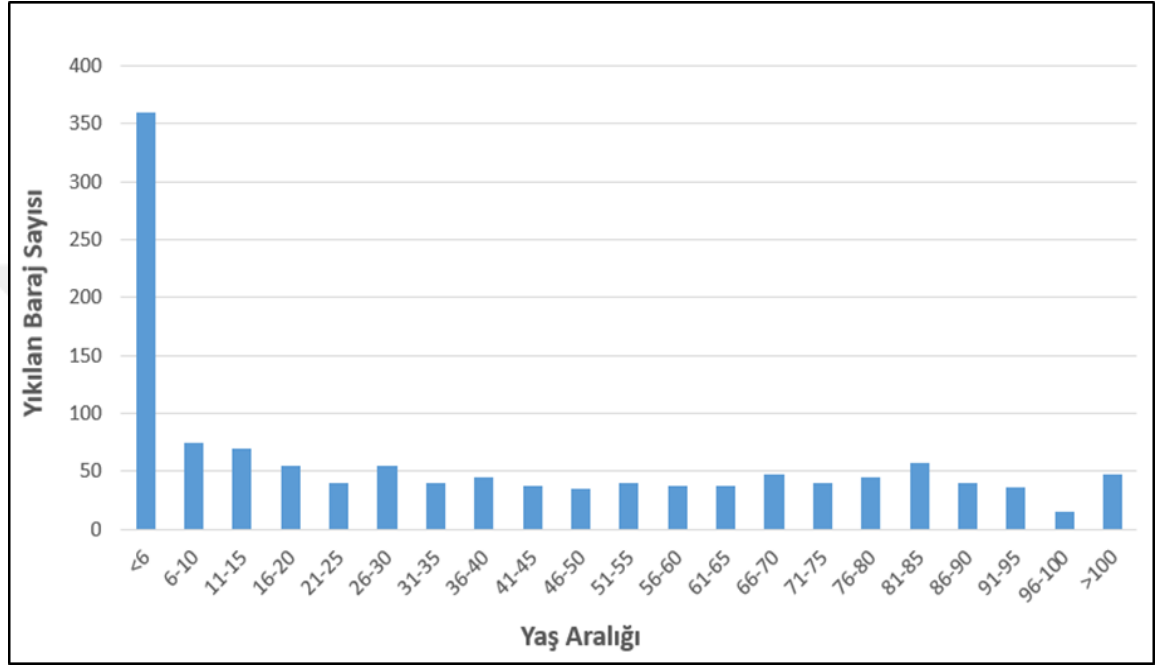
Borulanma sonucu yıkılan barajlara örnek olarak Teton Barajı verilebilir. ABD Idaho eyaletinde bulunan 93 metre yükseklikte toprak – kaya dolgu tipindeki baraj 1976 yılında baraj gövdesinde meydana gelen iç erozyon sonucunda yıkılmıştır. Yıkılma sonucunda mansap bölgesinde 11 kişi hayatını kaybetmiş ve yüksek oranda maddi kayıp oluşmuştur (Uysal, 1977).

Aşağıda Şekil 6'da Teton Barajı'nın yıkılma aşamaları gösterilmektedir. Baraj gövdesinde borulanma sonucu açılan gedik birkaç saat içerisinde barajı yıktığı görülmektedir.



Şekil 6. Teton Barajı yıkılma aşamaları (URL-3, 2022).

Baraj yıkılmaları ve yaş aralıklarıyla ilgili yapılan kapsamlı bir araştırmada yıkılan barajların önemli bir kısmının baraj inşaatı tamamlandıktan kısa bir süre sonra gerçekleştiği görülmektedir. Bu durum baraj yıkılmalarına meteorolojik faktörlerden ziyade tasarım hatası ve yapısal problemlerin de önemli ölçüde etki ettiğini göstermektedir. Aşağıda Şekil 7’de 1158 adet baraj yıkılmasının yaş aralığı dağılımına ait grafik verilmiştir.



Şekil 7. Yıkılan barajların yaş aralıkları dağılımı (URL-4).

Baraj yıkılmaları ve etkileri içinde çok sayıda değişken bulunması açısından karmaşık bir mekanizmaya sahiptir. Bir baraj yıkılmasına ait hidrolojik parametrelerin tahminine yönelik çalışmaların çoğu, geçmiş baraj yıkılmaları ile yapılan istatistiki çalışmalar üzerinden ampirik formüllerle kâğıt üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu durum çalışmaların hassasiyetini tartışma konusu yapmaktadır. Neticede gerçek bir baraj yıkılması; geniş bir mansap arazisinde elle hesaplanamayacak ölçüde karmaşık üç boyutlu akış denklemleri içeren, taşkın yayılımında önemli bir etken olan arazi engebelerinin gerçeğe en yakın şekilde temsilini gerektiren; malzeme, gedik mekanizması, baraj tipi, yıkılma şekli ve sediment durumu gibi ampirik formüllerle temsil edilmesi zor olan çok sayıda parametre içermektedir (Kocaman, 2007; Elçi vd., 2017).

Her bir baraj yıkılması için oluşan şartların, yıkılma mekanizmasının ve etkilerinin farklılığı düşünüldüğünde bu noktadaki eksikliği gidermek adına gelişen bilgisayar teknolojilerinden faydalanılmıştır. Son yıllarda bilgisayar ve yazılım teknolojisinin

gelişmesi bu noktada daha hassas çalışmalar yapılmasına olanak sağlamaktadır. Özellikle 1970’li yıllardan sonra kullanılan Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) teknolojisi, geniş arazilerin rahatlıkla bilgisayar ortamına aktarılarak gerçekçi analizler yapılmasını sağlamış; bu teknolojinin baraj yıkılma analizlerinde kullanılması da önceki analizlerinin en büyük eksikliklerinden biri olan topoğrafik koşulların temsili sorununu çözerek araştırmaların doğruluk ve hassasiyetini artırmıştır. CBS’nin arazi durumunu bilgisayar ortamına aktarabilmesiyle birlikte onunla uyumlu hidrolik hesaplamalar yapan yazılımlar da geliştirilmiştir. Bu alanda yapılan son çalışmalar geliştirilen yazılımlar vasıtasıyla bir, iki ve üç boyutlu hidrolik modellemelerle yapılmıştır. Bu kapsamda ABD Ordusu Mühendisler Birliği tarafından HEC-RAS, ABD Ulusal Hava Servisi tarafından FLDWAV, Danimarka Hidroloji Enstitüsü tarafından MIKE FLOOD geliştirilmiştir. Bunun yanında birçok özel sektör kuruluşu da benzer yazılımlar (FLOW3D, ANSYS FLUENT vb.) geliştirerek baraj güvenliği alanında önemli çalışmalar yapılmasını sağlamıştır (Palamut, 2014; Elçi vd. 2017).

Baraj yıkılma modellemelerinde önemli olan husus modeldeki hidrolik akış koşullarının doğadaki gerçek akışa olan uygunluğudur. Bir boyutlu modellemeler, oluşan taşkın dalgasının sadece boyuna yönde ilerlediği kabulüne göre gerçekleşerek yatay ve dikey anlamda çözümü yapmamaktadır. İki boyutlu hidrolik modellemelerde ise taşkın dalgasının boyuna ve yatay yönde ilerlediği varsayılarak dikey doğrultuda çözümü yapmamaktadır (Kocaman, 2021; Farooq, 2023).

1D ve 2D modellemeler analiz süresinin kısalığı bakımından üç boyutlu hidrolik modellemelere göre avantajlı olmaktadır. Ancak doğadaki gerçek taşkın hareketi üç ekseninde gelişen, zamana bağlı değişen ve serbest yüzeyli akış halinde gerçekleşmektedir. Bu noktada gerçek bir taşkın dalgasını temsil edebilecek en genel sayısal ifade üç boyutlu kütle, enerji ve momentumun korunumu denklemlerinden oluşan Navier-Stokes denklemleridir. Navier-Stokes denklemlerinin karmaşıklığı ve çözüm zorluğu sebebiyle bilgisayar destekli yapılan baraj yıkılma analizlerinin çoğunda Sığ Su denklemleri (SWE) olarak da bilinen Saint-Venant denklemleri kullanılmaktadır. SWE denklemleri, akışta düşey hız bileşenlerinin ihmal edilmesi ve hidrostatik basınç koşullarının hâkim olması gibi birtakım kabuller barındırmaktadır. Özellikle bir ve iki boyutlu çözümü yapan yazılımların (HEC-RAS, DAMBRK, FLDWAV) çözüm esası bu denkleme dayanmaktadır (Kocaman, 2007; Niazi vd. 2016; Vargas vd., 2019).

Özellikle son dönemlerde hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) yazılımlarının gelişmesi akışkanlar mekaniği alanındaki çalışmalardan daha hassas sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır. CFD, akışkanlar mekaniği ilkelerini matematik ve bilgisayar

bilimleriyle entegre ederek akışkan davranışlarıyla ilgili problemleri çözüp analiz eden bir bilim dalı olarak tanımlanmaktadır (Engin vd., 2020).



Şekil 8. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği bileşenleri (Engin vd., 2020).

Literatürdeki taşkın risk analizleri, çözüm süresinin kısalığı ve gelişmiş yazılımlara erişim zorluğu nedeniyle çoğunlukla bir ve iki boyutlu çözümlemelerle yapılmıştır. Söz konusu analizler içerdiği sınırlamalar ve kabuller açısından topoğrafya ve taşkın akımının fiziksel özelliklerini gerekli doğrulukta yansıtmadığından analiz sonuçlarının doğruluğunu tartışma konusu yapmaktadır (Kocaman, 2007; Ashraf, 2021).

Bu tezin amacı literatürdeki boşluklar dikkate alınarak, Iğdır ili Tuzluca ilçesine yapılacak Tuzluca Barajı'nın iki boyutlu (2D) ve üç boyutlu (3D) yıkılma simülasyonlarını gerçekleştirerek geniş ölçekli topoğrafyalarda 3D analizlerin kullanılabilirliğini incelemek ve farklı yıkılma senaryolarında baraj yıkılma parametrelerinin taşkın yayılımına olan etkisini incelemektir. 265 milyon m³ gibi büyük bir rezervuar hacmine sahip olması beklenen Tuzluca barajının yıkılma olasılığı mansap bölgesindeki yerleşimler için önemli bir tehdit oluşturacaktır. Bu kapsamda analiz sonucunda taşkın yayılım haritaları çıkarılarak bölgedeki köy ve yerleşimlerin risk durumu değerlendirilebilecektir. Ayrıca Tuzluca Barajı'nın henüz planlama aşamasında olması nedeniyle araştırmada tespit edilen bulgu ve risklerin, karar vericilere projeye ilgili bazı revizyon fırsatları sunabileceği değerlendirilmektedir.

2. YAZIN ÖZETİ

Literatürde taşkın konusunda pek çok çalışma bulanmasına karşın bunların çoğunu meteorolojik faktörlere bağlı olarak gelişen nehir taşkınları oluşturmakta, özellikle 3D baraj yıkılması çalışmalarının az sayıda olduğu görülmektedir. Baraj yıkılmaları sonucu gerçekleşen taşkınların daha yüksek pik debilerle gerçekleştiği ve bu debilere ulaşma süresinin kısalığı düşünüldüğünde mevcut ve planlama aşamasındaki barajların yıkılma analizlerinin yapılarak taşkın risk durumunun belirlenmesi ve gerekli önlemlerin alınması önem arz etmektedir.

Saint Venant (1871), baraj yıkılması sonucu gelişen taşkın yayılımını matematiksel olarak ifade etmek için kendi adını verdiği St. Venant denklem sistemini geliştirmiştir. Kütle ve momentum korunumu ilkelerine dayanarak geliştirdiği denklem birçok baraj yıkılma analiz ve hesaplarında kullanılmıştır.

Schocklitsch (1917), yapmış olduğu çalışmada baraj yıkılmaların ani bir şekilde değil de aşamalı olarak gerçekleştiği kabulünün daha doğru olacağını belirtmiş ve analitik çözümlemelerin baraj yıkılmalarının hesabında durumu tam olarak temsil edemeyeceğini savunmuştur.

Dressler (1952), baraj yıkılmalarında sürtünme etkisini dikkdörtgen bir kanal üzerinde incelemiş; sürtünme katsayısı için Darcy-Weisbach bağıntısını kullanmıştır. Çalışma sonucunda sürtünmenin akış hızı üzerinde dalga yayılma hızına oranla daha etkili olduğunu belirtmiştir.

Brakensiek ve Comer (1965), Fortran-II bilgisayar yazılımını kullanarak Thomas taşkın modellerini incelemiştir. Teorik tahmin yöntemlerinin tek başına yeterli olamayacağını, bunların laboratuvar deneyleri ve teknolojik ekipmanlarla desteklenmesi gerektiğini vurgulamışlardır.

MacDonald ve Langridge-Monopolis (1984), geçmiş baraj yıkılmalarına ait verilerle istatistiki analizler yaparak, yıkılma sırasında oluşacak gedik geometrisi, yıkılma süresi ve çıkış pik debisinin tahmini için grafiksel ilişkiler geliştirmişlerdir. Rezervuar hacmi, yıkılma şekli, dolgu malzemesinin aşınabilirlik derecesi, baraj yüksekliği, baraj kret genişliği ve memba-mansap şev eğimlerini kullanarak aşınan malzeme miktarı üzerinden baraj yıkılma parametreleri için tahmin yöntemleri geliştirmişlerdir.

Fread (1984), ABD Uluslararası Hava Servisi tarafından geliştirilen ve yaygın bir şekilde kullanılan DAMBRK (Dam Break Flood Forecasting Model) baraj yıkılması modelleme yazılımını kullanarak geçmişte yıkılan 5 baraj üzerinde çalışmıştır. Üzerinden

su aşma ve borulanma kaynaklı yıkılmalar için ayrı ayrı analizler yaparak sonuçları eldeki gerçek yıkılma parametreleri ile karşılaştırmıştır.

Wurbs (1987), baraj yıkılması sonucu gelişen taşkın yayılımının modellenmesi için son teknolojik gelişmeleri inceleyerek farklı modelleri karşılaştırmıştır. Çalışma sonucunda yeterli ekipman gücünün mevcudiyeti halinde yüksek hassasiyette doğruluk ve hızlı çözümler için ABD Uluslararası Hava Servisi tarafından geliştirilen DAMBRK (Dam Break Flood Forecasting Model) ve SMPDBK (Simplified Dam-Break Flood Forecasting Model) modellerinin uygun seçimler olacağını belirtmiştir.

Bureau of Reclamation (1988), yayınlamış olduğu bültende 21 adet dolgu baraj yıkılması üzerinde analizler yapmış; rezervuardaki su yüksekliğine bağlı olarak ortalama gedik genişliği, yıkılma süresi ve çıkış pik debisinin tahmini için ampirik formüller geliştirmiştir.

$$B_{ave} = 3h_w \quad (\text{Eşitlik 1})$$

$$T_f = 0.011B_{ave} \quad (\text{Eşitlik 2})$$

$$Q_p = 19.1h_w^{1.85} \quad (\text{Eşitlik 3})$$

Buradaki eşitliklerde;

B_{ave} : Ortalama gedik genişliği,

T_f : Baraj yıkılma süresi,

h_w : Su yüksekliği,

Q_p : Çıkış pik debisini ifade etmektedir.

Singh ve Scarlatos (1988), dolgu barajların yıkılmasında gedik mekanizmasıyla ilgili çalışmalar yapmışlardır. Trapez, üçgen ve dikdörtgen gedik şekli için geliştirilen model geçmiş baraj yıkılma verileriyle test edilmiş, 1976 yılında ABD’de yıkılan Teton Barajı için dikdörtgen şeklindeki gediğin daha doğru sonuçlar verdiğini tespit etmişlerdir.

Von Thun ve Gillette (1990), geçmiş yıllarda yıkılan ve yıkılma verileri belli olan 57 adet baraj üzerinde çalışarak baraj yıkılma parametrelerinin tahmini için ampirik formüller geliştirmiştir. Bu yöntemle baraj yüksekliği ve rezervuar hacmi üzerinden baraj malzemesinin aşınabilirlik durumuna göre iki farklı yıkılma süresi ve ortalama gedik genişliği hesaplanabilmektedir.

$$B_{ave} = 2.5h_w + C_b \quad (\text{Eşitlik 4})$$

$$T_f = B_{ave} / (4h_w + 61) \quad (\text{Yüksek aşınabilirlik}) \quad (\text{Eşitlik 5})$$

$$T_f = B_{ave} / (4h_w) \quad (\text{Düşük aşınabilirlik}) \quad (\text{Eşitlik 6})$$

$$C_b = \begin{cases} 6.1 ; & V_w \times 10^{-6} < 1.23 \\ 18.3 ; & V_w \times 10^{-6} \leq 6.17 \\ 42.7 ; & V_w \times 10^{-6} \leq 12.3 \\ 54.9 ; & V_w \times 10^{-6} \geq 12.3 \end{cases} \quad (\text{Eşitlik 7})$$

Buradaki eşitliklerde;

B_{ave} : Ortalama gedik genişliği,

T_f : Baraj yıkılma süresi,

h_w : Su yüksekliği,

V_w : Rezervuardaki su hacmi,

C_b : Rezervuar hacmine bağlı katsayıdır.

Bell vd. (1992), ani baraj yıkılması durumunu deneysel yöntemlerle incelemiştir. 30 cm genişlik, 30 cm yükseklik ve 432 cm uzunluğundaki kavisli bir kanalda, kanal tabanının pürüzlü ve pürüzsüz olması ile masnap tarafının ıslak ve kuru olması durumlarına göre taşkın dalgasının yayılımını incelemiştir. Taşkın dalgasını kanal kapağının ani olarak açılmasıyla, kanal pürüzlülüğünü ise ince metal ızgaralar ve ahşap parçalar kullanarak oluşturmuşlardır. Taşkın dalgasının yayılımını video kamera cihazıyla, su derinliklerini ise kanala yerleştirilen çubuklar yardımıyla gözlemlemiştir. Kanalin dış kavis bölgesinde su dalgası önünün hız ve derinliğinin iç kavis bölgesine göre daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir.

Froehlich (1995), geçmiş yıllarda yıkılan ve yıkılma verileri belli olan 63 adet dolgu baraj üzerinden istatistiki analizler yaparak yıkılma parametreleri için tahmin yöntemleri geliştirmiştir. Rezervuar hacmi, baraj yüksekliği ve yıkılma şekli katsayısı parametrelerini kullanarak; oluşacak trapez gediğin ortalama genişliği, yüksekliği yıkılma süresi ve çıkış debisinin hesaplanabilmesi için ampirik formüller geliştirmiştir.

$$B_{ave} = 0.1803k_0V_w^{0.32}h_w^{0.19} \quad (\text{Eşitlik 8})$$

$$T_f = 0.00254V_w^{0.53}h_w^{-0.90} \quad (\text{Eşitlik 9})$$

$$Q_p = 0.607V_w^{0.295}h_w^{1.24} \quad (\text{Eşitlik 10})$$

$k_0 = 1$ (borulanma); 1.4 (üstünden su aşma)

$z = 0.9$ (borulanma); 1.4 (üstünden su aşma)

Bu eşitliklerde;

B_{ave} : Ortalama gedik genişliği (m),

T_f : Baraj yıkılma süresi (sa)

Q_p : Çıkış pik debisi (m^3/sn)

h_w : Su yüksekliği (m)

V_w : Rezervuardaki su hacmi (m^3)

z : Gedik kenar eğimini

k_0 : Yıkılma şekline bağlı katsayıyı ifade etmektedir.

Mohapatra ve Bhallamudi (1996), baraj yıkılması olayında memba ve mansap birleşim geometrisinin taşkın dalgası üzerindeki etkisini incelemişlerdir. 4 farklı su yolu geometrisi oluşturarak yıkılma durumunu temsil eden 2D denklem sistemini sayısal olarak çözmüş; hesaplanan su yüksekliklerini literatürdeki deneysel yöntemler ve ampirik formüllerle karşılaştırmışlardır. Elde edilen sonuçların literatürdeki çalışmalarla uyumlu sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

Hicks vd. (1997), çalışmalarında baraj yıkılması sonucu gelişen taşkın dalgasının hesabında bir ve iki boyutlu çözüm yöntemlerini karşılaştırmışlardır. Bellos vd. (1992) tarafından gerçekleştirilen deneysel yöntemdeki dikdörtgen kanal üzerinde bir boyutlu ve iki boyutlu Saint Venant denklemleri çözülmüştür. Ayrıca hesaplamalar Galerkin sonlu elemanlar yöntemi (CDG) ve dört noktalı kapalı sonlu farklar yöntemi (BFD) ile de ayrı ayrı yapılmıştır. Çalışma sonucunda CDG çözüm yönteminin daha başarılı sonuçlar verdiği ve bir boyutlu çözüm yönteminin yeterli doğrulukta ve hızlı sonuç vermesi bakımından pratik bir çözüm olacağı vurgulanmıştır.

Lauber ve Hager (1997), baraj yıkılması sonucu gelişen taşkın yayılımını deneysel olarak incelemişlerdir. 50 x 140 cm ebatlarındaki dikdörtgen pürüzsüz bir kanalda ani yıkılmayı gerçekleştirip sonuçları Ritter (1982)'in baraj yıkılmaları için geliştirdiği ampirik çözümlemelerle karşılaştırmış ve deneyi dakikada 3000 görüntü alabilen profesyonel bir kamera ile gerçekleştirerek her ayrıntıyı gözlemleyebilmişlerdir. Sonuç kısmında yıkılma sonrası negatif dalga hızının Ritter'in çözümüne kıyasla daha yüksek, pozitif yönlü dalganın ise daha yavaş olduğunu belirtmişlerdir.

Zoppou ve Roberts (1999), yaptıkları çalışmada baraj yıkılması sonucu oluşan taşkın yayılımının tahmin edilmesi için bilgisayar destekli model geliştirmişlerdir. Sürtünme ve eğim durumlarının da sisteme entegre edilebildiği model, iki boyutlu sığ su denklemlerine dayanmaktadır. Sonlu hacimler yönteminin kullanıldığı modelde çözüm ağını (mesh) üçgen hacimler oluşturmuştur. Modelin doğrulanması için çözüm sonuçları

literatürdeki analitik çözümler ve verileri belli olan geçmiş baraj yıkılma sonuçlarıyla karşılaştırılmış, yüksek oranda uyum sağlandığı vurgulanmıştır.

Valiani vd. (2002), 1959 yılında, yapımı tamamlandıktan 5 yıl sonra yıkılan Malpasset Barajı'nın yıkılma analizini gerçekleştirmişlerdir. Godunov (1959) tarafından geliştirilen ve hiperbolik denklem sistemlerinin çözümünde kullanılan Godunov şeması üzerinden türettikleri çözüm yöntemiyle Saint Venant denklemlerini kullanarak baraj yıkılmasını modellemişlerdir. Geliştirdikleri sayısal yöntemin sonuçlarını barajın gerçek yıkılma parametreleri ve deneysel yöntemlerle karşılaştırarak modelin yüksek oranda doğru sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

Gouda vd. (2002), yapmış oldukları çalışmada AVL Fame hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yazılımını kullanarak bir baraj yıkılma simülasyonu gerçekleştirmişlerdir. Yazılımın çözüm esası kütle ve momentumun korunumu ilkeleri ile sonlu hacimler yöntemine dayanmaktadır. Modelin doğruluğunu test etmek için Brufau ve Navarro (2000), tarafından gerçekleştirilen deneysel baraj yıkılma çalışmasının verileri kullanılmıştır. Yapılan doğruluk analizinde deney sonuçları ve simülasyon sonuçları arasında iyi bir uyum gözlemlenmiştir. Gerçek bir şehir merkezi ele alınarak, nehrin üst kısmındaki baraj yıkılmasının şehir merkezinde oluşturacağı etki simüle edilmiştir. AVL Frame yazılımında 2.2 m boyutlarında 225000 altıgen çözüm ağı hücresi (mesh) tanımlanarak 800 m x 800 m'lik bir alan için yıkılma analizi gerçekleştirilmiştir. 200 MHz işlemci hızına sahip IBM Power 3 işlemcili bilgisayarla yapılan ve 82 saat süren analiz sonucunda taşkın haritaları elde edilerek risk derecelendirilmesi yapılmıştır.

Brunner (2003), yapmış olduğu çalışmada 2002 yılında geliştirilen ve kullanıcıların baraj yıkılmasını modelleyebileceği HEC-RAS 3.1 yazılımının metodolojisi ve kullanım seçenekleri hakkında bilgiler vermektedir. Ayrıca çalışma kapsamında 1976 yılında ABD'de yıkılan ve 11 kişinin hayatını kaybettiği Teton Barajı'nın yıkılma analizi de gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda baraj gövdesinden geçen gedik hidrografi ve taşkın dalgasının mansap bölgesindeki yayılımının literatürdeki verilerle uyumlu sonuçlar verdiği belirtilmiştir.

Bozkuş (2004), ABD Ulusal Hava Servisi tarafında geliştirilen DAMBRK yazılımını kullanarak İzmir İli sınırlarında bulunan Kestel Barajı'nın yıkılma analizini yapmıştır. Yazılımın çözüm esası Saint Venant denklemlerine dayanmakta ve dört noktalı kapalı sonlu hacimler yöntemi ile hesap yapmaktadır. 62,5 m yüksekliği ve normal su kotunda 37,4 milyon m³ rezervuar hacmi bulunan barajın, üstünden su aşması sebebiyle yıkıldığı varsayılmıştır. Yıkılma senaryoları için 62,5 m yüksekliğinde ve şev eğimleri 1:1 olan trapez gedik tanımlanmıştır. İki farklı gedik taban genişliği (125 m, 190 m) ve 4

farklı yıkılma süresi (0,5 sa, 1 sa, 2, sa, 3 sa) seçilerek gerçekleştirilen 8 farklı senaryoya göre sonuçlar karşılaştırılmıştır. Beklendiği gibi en tehlikeli durum 190 m gedik genişliği ve 0,5 saat yıkılma süresi ile gerçekleştirilen analizde olmuştur. Bu senaryoya göre 23 dakika sonunda 1 nolu en kesitte (Bergama – Merkez) 36,15 m su derinliği ve 61069 m³ taşkın debisinin oluştuğu görülmüştür.

Quecedo vd. (2004), yapmış oldukları çalışmada baraj yıkılması durumunun nümerik çözümü için Navier-Stokes ve sığ su denklemlerini karşılaştırmışlardır. Navier-Stokes denklemlerinin düşey hız ve ivmelerinin ihmal edilmesiyle türetilen sığ su denklemlerinin çözümünde Taylor-Galerkin metodu kullanılmıştır. Islak ve kuru mansap koşulları için dalga etkileri, su yüzeyi profilleri ve basınç değerleri karşılaştırılmıştır. Analizler için 500 Mhz hızında Pentium III işlemcili bilgisayar kullanılmıştır. Navier-Stokes denkleminin çözümü için 3997 adet üçgen çözüm ağı (mesh) oluşturulmuştur. Karşılaştırmalarda sığ su denklemlerine göre yapılan çözümlemelerde kuru yataklar üzerinde taşkın dalgasının daha hızlı ilerlediği ve barajdan uzak bölgelerde makul tahminler yaptığı görülmüştür. Islak yatak koşullarında ise Navier-Stokes denklemlerine yakın sonuçlar ortaya koyan sığ su denklemleri, yüzey pürüzlülüğünün değişken olduğu arazilerde yanlış sonuçlar verebilmektedir. Sonuç olarak; Navier-Stokes denklemlerinin çözüm zorluğu düşünüldüğünde, baraj yıkılma problemlerinde yaygın bir şekilde kullanılan sığ su denklemlerinin birtakım eksiklikleri bulunmasına rağmen geniş arazilerin çözümü için uygun bir seçenek olabileceği görülmüştür. Navier-Stokes yönteminin ise 3 boyutlu akım koşullarının gerektiği daha dar alanlarda uygulanması gerektiği belirtilmiştir.

Zhou vd. (2005), yapmış oldukları çalışmada nehir taşkınlarında yaygın bir şekilde kullanılan HEC-RAS yazılımına yeni eklenen baraj yıkılma modülünü, o dönemin popüler baraj yıkılma analiz yazılımı olan ve ABD Ulusal Hava Servisi tarafından geliştirilen FLDWAV ile karşılaştırmışlardır. Her iki yazılımın da çözüm esası Saint Venant denklemlerine dayalıdır ve arazi en kesitleri tanımlanarak analizler gerçekleştirilmektedir. En kesit tanımlama işlemlerinde farklılıklar bulunmaktadır. FLDWAV’da her bir en kesit ortalama 7-8 adet üst genişlik (W_i) ve yükseklik (E_i) çifti tanımlanarak oluşturulurken; HEC-RAS’ta daha kolay ve kullanışlı bir şekilde nokta ve istasyon mesafesi tanımlayarak oluşturulmaktadır. Analiz için gerçek bir baraj yıkılması seçilmiş, Kanada sınırlarındaki Ontario Barajı’nın yıkılma simülasyonu her iki yazılım ile de yapılarak gerçek yıkılma verileriyle karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçlarına göre iki yazılım da benzer altyapı ve çözüm tekniklerini kullandığı için aynı sonuçlar ortaya çıkmıştır. FLDWAV çamur ve sediment akışını da modelleyebildiğinden daha fazla

hesaplama seçeneğine sahip olması; HEC-RAS ise daha kullanışlı işlem ve görüntüleme seçeneklerine sahip olması bakımından ön plana çıkmıştır.

Karakaya (2005), ABD Ulusal Hava Servisi tarafından geliştirilen FLDWAV yazılımını kullanarak Bartın ilinde bulunan Kızılköprü Barajı'nın sayısal yıkılma analizini gerçekleştirmiştir. 69 m yüksekliğinde, 66 milyon m³ rezervuar hacmine sahip kil çekirdekli kaya dolgu tipindeki barajın yıkılma analizi için; 4 farklı gedik geometrisi, 3 farklı yıkılma süresi, üç farklı Manning pürüzlülük katsayısı ve 10 farklı dolu savak kapağı açıklığı olmak üzere 6 farklı senaryo grubu üzerinden toplamda 48 analiz yapılmıştır. Çalışmanın sonuç kısmında senaryoları oluşturan parametrelerin önemi yorumlanmıştır. Gedik geometrisi ve yıkılma süresinin pik debi ile maksimum taşkın derinlikleri üzerinde önemli derecede etkili olduğu; yine 5 numaralı senaryo grubunda görüldüğü gibi Manning pürüzlülük katsayısının da pik debi ve taşkın derinlikleri üzerinde etkili olduğu belirtilmiştir. Çalışma kapsamında mansap bölgesindeki yerleşimlere ait maksimum taşkın derinlikleri ve taşkın ulaşma süreleri belirlenerek tablolarla görselleştirilmiştir.

California merkezli yazılımı şirketi FlowSimulation LLC (2006), geliştirmiş olduğu BreZo taşkın modelleme yazılımını kullanarak Hawaii sınırlarındaki Kalihiwai Barajı'nın yıkılma analizini yapmıştır. Yazılımın çözüm esası Godunov tipi sonlu hacimler şeması ile sığ su denklemlerine dayanmaktadır. Analizde kullanılan arazi verileri için ABD Jeoloji Araştırmaları Kurumu'nun (United States Geological Survey) internet sitesinden 10 m x 7 m çözünürlüğünde sayısal yükseklik modeli indirilmiştir. Yıkılma sonrası su yolu üzerinde 3-5 m, diğer bölgelerde daha kaba olmak üzere toplam 80000 adet üçgen mesh (çözüm ağı) tanımlanarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. En kötü senaryo olarak baraj gövdesinde 61 m genişlik ve 6 m yüksekliğinde bir gedik oluşarak barajın aniden yıkıldığı varsayılmıştır. Çalışma kapsamında en kötü senaryo altında rezervuar hacminin 40 ve 80 galon; Manning pürüzlülük katsayısının ise 0,05 ve 0,1 olarak değiştiği 4 farklı simülasyon gerçekleştirilerek taşkın haritaları hazırlanmış ve yerleşimlerdeki taşkın derinlikleri tespit edilmiştir.

Begnudelli ve Sanders (2007), yapmış oldukları çalışmada 1928 yılında California'da yıkılan St. Francis barajının yıkılma simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Godunov tipi sonlu hacimler şeması kullanarak sığ su denklemleri çözülmüştür. Analiz için BreZo (FlowSimulation, LLC, Irvine, Calif.) taşkın modelleme yazılımı kullanılmıştır. Simülasyonda kullanılacak arazi verileri için ABD Jeoloji Araştırmaları Kurumu'ndan (United States Geological Survey) sayısal yükseklik modeli temin edilmiştir. Intel Fortran marka, çift çekirdekli ve 2,4 GHz işlemci hızına sahip bilgisayarla

yapılan simülasyonda dört farklı tabakada toplam 285932 adet üçgen mesh (çözüm ağı) tanımlanmıştır. Çalışma kapsamında Manning katsayısının taşkın yayılım hızı üzerinde önemli bir etken olduğu, Manning katsayısındaki %50'lik bir değişikliğin taşkın yayılım hızını da %25 oranında değiştireceği tespit edilirken; Manning katsayısındaki değişimlerin mansap bölgesinde su altında kalan arazi alanını çok fazla etkilemediği görülmüştür. Yine çalışma kapsamında elde edilen pik debi ve ulaşma sürelerinin literatürdeki bilgilerle uyumlu olduğu, artık masaüstü bilgisayarlarla iki boyutlu baraj yıkılma analizlerinin gerçekleştirilebileceği belirtilmiştir.

Kocaman (2007), yapmış olduğu çalışmada baraj yıkılması durumunu analitik, deneysel ve sayısal olarak incelemiş, sonuçları karşılaştırmıştır. Analitik çözümde mansap bölgesinin kuru olması durumu için Ritter (1892), ıslak olması durumu için ise Stoker (1957)'nin geliştirdiği çözümler kullanılmıştır. Deneysel yöntem için 30 cm yükseklik, 30 cm genişlik, 890 cm uzunluğunda olan ve bunun 465 cm'sini rezervuarı oluşturan dikdörtgen bir kanal düzeneği hazırlanmıştır. Aradaki kapağın aniden kaldırılmasıyla oluşturulan baraj yıkılma dalgasını mansap bölgesinin ıslak, kuru ve mansapta farklı geometrik özelliklerde eşik olması durumlarına göre, 5 farklı noktada su derinliği ve su yüzü profillerinin değişimini saniyede 25 görüntü alabilen profesyonel bir kamera ile incelenmiştir. Sayısal çözüm için ise FLOW3D yazılımı kullanılarak sığ su denklemleri ve Reynolds Ortalamalı Navier Stokes (RANS) denklemleri çözülmüştür. Deneysel düzenek dikkate alınarak kurulan sayısal modelde RANS denklemlerinin çözümü için akışkan hacmi (VOF) yaklaşımı kullanılmıştır. 2 GB RAM ve 3,2 Ghz işlemci hızına sahip bilgisayarda 0,01 m aralıklı toplam 85632 adet mesh (çözüm ağı) kullanılarak yapılan analiz 11.25 dakika sürerken, sığ su denklemleriyle 26730 mesh kullanılarak yapılan çözümleme 4.9 dakika sürmüştür. Çalışmanın sonuç kısmında analitik çözümlerin deney sonuçlarıyla uyumlu olduğu; sayısal çözümlemelerde ise RANS denklemleri ile yapılan çözümlerin deney sonuçlarıyla iyi uyum sağladığı ancak sığ su denklemiyle yapılan sayısal çözümlerde eşik bölgesindeki su yüzü profillerinde farklılıklar bulunduğu belirtilmiştir. Bunun dışında sığ su denklemlerinin de yeterli doğrulukta sayılabileceği ve çözüm süresinin RANS denklemlerine göre oldukça kısa olduğu düşünüldüğünde geniş ölçekli baraj yıkılması problemlerinde iyi bir seçenek olarak değerlendirilebileceği belirtilmiştir.

Froehlich (2008), geçmiş yıllarda yıkılan ve yıkılma verileri belli olan 74 adet dolgu baraj üzerinden istatistiki analizler yaparak gedik parametreleri için tahmin yöntemleri geliştirmiştir. 1995 yılında yapmış olduğu çalışmasını güncelleyerek rezervuar hacmi,

gedik yüksekliği ve yıkılma şekli katsayısı parametreleri ile oluşacak trapez gedik ortalama genişliği ve yıkılma süresinin tahmini için ampirik formüller geliştirmiştir.

$$B_{ave} = 0.27k_0V_w^{0.32}h_b^{0.04} \quad (\text{Eşitlik 11})$$

$$T_f = 0.0176(V_w/gh_b^2)^{0.5} \quad (\text{Eşitlik 12})$$

$k_0 = 1$ (borulanma); 1.4 (üstünden su aşma)

$z = 0.7$ (borulanma); 1 (üstünden su aşma)

Bu eşitliklerde;

B_{ave} : Ortalama gedik genişliği (m)

T_f : Baraj yıkılma süresi (sa)

h_b : Gedik yüksekliği

z : Gedik kenar eğimini

k_0 : Yıkılma şekline bağlı katsayıyı ifade etmektedir.

Erpicium vd. (2008), yüksek çözünürlüklü sayısal yükseklik modeli (DEM) verisi kullanarak baraj yıkılması probleminin sayısal çözümünü yapmışlardır. WOLF2D yazılımı ile yapılan analizde sonlu hacimler yöntemiyle iki boyutlu sıg su denklemleri çözülmüştür. Oluşturulan sayısal modelin doğrulaması için sayısal ve deneysel yöntemler kullanılmıştır. Sayısal yöntemlerin birincisinde, Alcrudo ve Navarro (1993) tarafından yapılan çalışmadaki silindirik barajın ani yıkılma analizi gerçekleştirilmiştir. İç ve dış çapları sırasıyla 1 m ve 10 m olan içi su dolu silindirin yıkılmasıyla gerçekleşen taşkın dalgası dairesel meshler kullanılarak çözülmüş, referans model ile aralarında yüksek derecede uyum gözlemlenmiştir. İkinci doğrulama çalışması deneysel yöntem kullanılarak yapılmıştır. Avrupa CADAM (Baraj Yıkılması Modelleme Eylem) Projesi kapsamında hazırlanan rapordaki deneysel düzenek referans alınarak sayısal model kurulmuş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sayısal yöntemin, kavisli kanallarda baraj yıkılması ile oluşan taşkın dalgasının davranışını ölçmedeki etkinliği araştırılmıştır. Kare bir rezervuar ve bir kapakla ayırdığı L şeklindeki dikdörtgen kanal şeklindeki düzenek sayısal modelde kurularak sonuçlar karşılaştırılmıştır. 2 cm mesh aralığıyla yapılan çözümlemelerde mansap bölgesindeki su derinlikleri karşılaştırıldığında sayısal model ve referans alınan deneysel çalışma sonuçları arasında yüksek derecede uyum olduğu görülmüştür. Sayısal modelin üçüncü doğrulama çalışması ise 1959 yılında yıkılan ve yıkılma verileri belli olan Malpasset Barajı'nın yıkılma simülasyonu gerçekleştirilerek yapılmıştır. Barajın mansabında bulunan ve taşkın dalgasıyla tahrip edilen üç adet elektrik

trafosunun kesin kapanma zamanları belli olduğu için taşkın dalgası yayılma süresinin bilinmesi ve polis tutanaklarında bulunan su seviyesi izlerinin raporlanması doğrulama referansı olarak kabul edilmiştir. Sayısal modelin kurulması için topoğrafik veriler resmi kurumlardan alınarak enterpolasyon yoluyla oluşturulmuş ve Manning pürüzlülük katsayısı 0,0286 olarak kabul edilmiştir. Yapılan sayısal analiz sonuçları ile referans alınan bilgiler arasında tatmin edici bir düzeyde uyum olduğu görülmüştür. Çalışma kapsamında sayısal, deneysel ve saha verileriyle doğrulaması yapılan sayısal model ile Belçika’da bulunan büyük barajlar için yıkılma analizi gerçekleştirilmiştir. Yüksek çözünürlüklü DEM verisi ve 1000000 mesh kullanılarak yapılan sayısal çözümlemede mansap bölgesindeki taşkın derinlikleri ve dalga yayılma hızları hesaplanarak taşkın risk haritaları oluşturulmuştur.

Al-Taiee vd. (2009), yapmış oldukları çalışmada Musul kentinde bulunan 105 m yükseklik ve 11.1 milyar m³ rezervuar hacmine sahip, toprak dolgu tipindeki Musul Barajı’nın sayısal yıkılma analizini gerçekleştirmişlerdir. Analiz için, çözüm esasları Saint Venant denklemlerine dayanan SYMDBK bilgisayar yazılımı kullanılmıştır. Borulanma sebebiyle yıkıldığı varsayılan baraj için gedik parametrelerinin belirlenmesinde literatürdeki Singh and Snorrason (1984), Bureau of Reclamation (1988), Von Thum (1990) ve Froehlich (1995) tarafından geliştirilen yöntemler kullanılmıştır. Bu yöntemlerle elde edilen gedik genişlikleri ve yıkılma süreleriyle birlikte farklı su derinlikleri üzerinden 5 farklı yıkılma senaryosu gerçekleştirilmiştir. Modelin topoğrafik girdisi için uydu görüntülerinden yararlanılmıştır. Arazinin Manning pürüzlülük katsayısı olarak 0.1, 0.03 ve 0.04 değerleri kullanılmıştır. En olumsuz senaryo için yapılan analize göre barajın 60 km mansabında bulunan Musul kentinin %54’ünün sular altında kalacağı, 5.52 saat içerisinde kent merkezinde 25 metreye varan taşkın derinliklerinin oluşacağı ve toplamda 252 km²’lik bir alanın taşkından etkileneceği belirtilmiştir. Ayrıca çalışma kapsamında en olumsuz senaryo için taşkından etkilenecek kamu binaları, havaalanları, köprüler, yollar, oteller, büyük binalar, ibadethaneler ve petrol istasyonlarının sayıları tespit edilerek tabloda gösterilmiştir.

Xu ve Zhang (2009), geçmişteki baraj yıkılma verileri üzerinden istatistiki çalışmalar yaparak baraj yıkılma parametrelerinin tahmin edilebilmesi için yeni ampirik formüller geliştirmişlerdir. 182 adet toprak ve kaya dolgu barajın yıkılma verilerine dayalı olarak 5 farklı baraj parametresi (baraj yüksekliği, rezervuar şekil katsayısı, baraj tipi, dolgu malzemesi aşınabilirliği, yıkılma şekli) üzerinden trapez gedik parametreleri, yıkılma süresi ve pik debinin tahmini için formüller geliştirmişlerdir.

$$\frac{H_b}{H_d} = 0,453 - 0,025 \left[\frac{H_d}{H_r} \right] + B_1 \quad (\text{Eşitlik 13})$$

$$B_1 = a+b+c \quad (\text{Eşitlik 14})$$

$$\frac{B_t}{H_b} = 1,062 \left[\frac{H_d}{H_r} \right]^{0,092} \left[\frac{V_w^{1/3}}{H_w} \right]^{0,508} e^{B_2} \quad (\text{Eşitlik 15})$$

$$B_2 = d+e+f \quad (\text{Eşitlik 16})$$

$$\frac{B_{ave}}{H_b} = 0,787 \left[\frac{H_d}{H_r} \right]^{0,133} \left[\frac{V_w^{1/3}}{H_w} \right]^{0,652} e^{B_3} \quad (\text{Eşitlik 17})$$

$$B_3 = g+h+i \quad (\text{Eşitlik 18})$$

$$\frac{Q_p}{\sqrt{gV_w^{5/3}}} = 0,175 \left[\frac{H_d}{H_r} \right]^{0,199} \left[\frac{V_w^{1/3}}{H_w} \right]^{-1,274} e^{B_4} \quad (\text{Eşitlik 19})$$

$$B_4 = j+k+l \quad (\text{Eşitlik 20})$$

$$\frac{T_f}{T_r} = 0,304 \left[\frac{H_d}{H_r} \right]^{0,707} \left[\frac{V_w^{1/3}}{H_w} \right]^{1,228} e^{B_5} \quad (\text{Eşitlik 21})$$

$$B_5 = m+n+p \quad (\text{Eşitlik 22})$$

Bu eşitliklerde;

B_{ave} : Ortalama gedik genişliği (m)

T_f : Baraj yıkılma süresi (sa)

T_r : Zaman sabiti

H_b : Gedik yüksekliği (m)

H_d : Baraj yüksekliği (m)

H_w : Yıkılma anında gedik tabanının üzerindeki su yüksekliği (m)

Q_p : Çıkış pik debisi (m^3/sn)

V_w : Yıkılma anında gedik tabanının üzerindeki su hacmi (m^3)

B_1 , B_2 , B_3 , B_4 ve B_5 değerlerinin hesaplanmasında kullanılan, baraj tipine göre belirlenen a, d, g, j, m; yıkılma şekline göre belirlenen b, e, h, k, n ve gövde malzemesi aşınabilirlik durumuna göre belirlenen c, f, i, l, p değişkenlerine ait bilgiler Tablo 2’de özetlenmiştir.

Tablo 2. Xu ve Zhang (2009) yönteminde diğer değişkenlere ait bilgiler

	DB	BKB	ZDB
a	0.145	0.176	0.132
d	0.031	0.088	-0.089
g	-0.041	0.026	-0.0226
j	-0.503	-0.591	-0.649
m	-0.327	-0.674	-0.189
	O	P	
b	0.218	0.236	
e	0.299	-0.239	
h	0.149	-0.389	
k	-0.705	-1.039	
n	-0.579	-0.611	
	YA	OA	DA
c	0.254	0.168	0.031
f	0.411	-0.062	-0.289
i	0.291	-0.14	-0.391
l	-0.007	-0.375	-1.362
p	-1.205	-0.564	0.579

DB: Dolgu baraj, BKB: Ön yüzü beton kaplamalı baraj, ZDB: Zonlu dolgu baraj, O: Üstünden su aşma, P: Borulanma, YA: Gövde malzemesi yüksek aşınabilirlik, OA: Gövde malzemesi orta aşınabilirlik, DA: Gövde malzemesi düşük aşınabilirlik

Vasquez (2009), ani baraj yıkılması problemini iki boyutlu derinlik ortalamalı akış modeli River2D ve üç boyutlu hesaplamalı akışkanlar dinamiği modeli Flow3D yazılımlarını kullanarak çözmüş, sonuçları deneysel yöntemle karşılaştırmıştır. İlk olarak sediment birikiminden dolayı memba ve mansap bölgelerindeki yatak seviyelerinin farklı olması durumu incelenmiştir. Leal vd. (2002) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışma referans alınarak aynı model River2D ve Flow3D yazılımlarında sayısal olarak çözülmüştür. Söz konusu deneysel düzenek 19.2 m uzunluk, 0.5 m genişlik ve 0.7 m yüksekliğe sahip olup, membadaki sediment birikimini temsil etmek için memba ve mansap arasında 12 cm kot farkı olacak şekilde basamaklı yapılmıştır. River2D yazılımında mesh aralıkları 0.25 m ve 0.50 m olmak üzere iki farklı çözüm ağı aralığında yapılmış; sonuçların değişmediği görülmüştür. Flow3D yazılımında ise meshler yatay yönde 0.2 m, dikey yönde 0.1 m ve toplamda 300000 mesh kullanılarak yapılmıştır. Mansap bölgesinin kuru ve ıslak olmasına göre yapılan analizlerde barajın yıkılmasından 1 saat ve 4 saat sonra su yüzü profilleri incelenmiş; her iki modelin de deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu, hidrolik sıçramalar ve akıntı şeklinin doğru aktarıldığı belirtilmiştir. Çalışma kapsamında yapılan ikinci analiz; baraj mansabında bir engelin bulunması durumunda hangi sayısal modelin taşkın akışını daha doğru temsil edeceğini göstermeyi

amaçlamıştır. Bunun için Soares-Frazao ve Zech (2007) tarafından yapılan deneysel çalışma referans model olarak seçilmiş ve sayısal modele uygulanmıştır. 3.6 m genişliğinde bir kanalda 1 m genişlikteki gediğin aniden açılmasıyla taşkın dalgası oluşturulmuştur. Gövdenin 3.5 m mansabında bulunan 0.4 m x 0.8 m boyutlarında dikdörtgen bir engele çarpan dalgaların hareketi 5 farklı basınç göstergesi yerleştirilerek incelenmiştir. Düz kanaldaki baraj yıkılmasına göre çok daha karmaşık gelişen söz konusu durumda, sayısal modeller ve deney sonuçları arasında iyi bir uyum gözlenememekle birlikte; Flow3D'nin River2D yazılımına kıyasla deneysel modele daha yakın olduğu belirtilmiştir. Üçüncü kıyaslama çalışması ise baraj mansabında üçgen şeklinde bir taban eğiğinin bulunması durumudur. Referans olarak Soares-Frazao (2007) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışma seçilmiş ve her iki yazılımda da model kurularak baraj yıkılması olayı gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada rezervuar seviyesi 0.111 m olup barajın 1.61 m mansabına yerleştirilen üçgen eğiğin tepe yüksekliği 0,065 m, memba ve mansap eğimleri ise 0.14'tür. Deneysel düzeneğe yerleştirilen 3 adet basınç göstergesi ve dijital kamera ile basınç değişimleri ve su yüzü profili incelenmiştir. Her iki sayısal modelde yapılan çözümlemeler sonucunda; River2D'nin başarılı olmadığı, bazı hidrolik sıçramaları tamamen kaçırdığı görülmüştür. Flow3D'nin ise deneysel modelle mükemmel bir uyum yakaladığı belirtilmiştir. Çalışma kapsamında son olarak Flow3D yazılımı ile daha gerçekçi bir senaryo altında baraj yıkılma analizi yapılmıştır. 540 m uzunluk, 420 m genişlik ve 70 m yüksekliğe sahip bir çalışma alanı Flow3D'ye aktararak betonarme bir barajın yıkılması modellenmiştir. 8 çekirdekli ve 2.66 GHz hızında çalışan Xeon E5430 işlemci ile yapılan analizde toplam 5.439.000 mesh kullanılmış olup, analiz süresi 7 saat sürmüştür. Çalışmanın sonuç kısmında River2D'nin nehir taşkınları için kullanılabileceği ancak baraj yıkılmaları gibi karmaşık problemlerde kullanılmasının uygun olmadığı belirtilmiştir. Deneysel modellerle mükemmel derecede uyum sağlayan Flow3D'nin ise baraj yıkılmalarına başarılı sonuçlar verdiği ancak büyük arazilerde çok yüksek bilgisayar gücü gerektirdiği ve analiz süresinin çok zaman alabileceği belirtilerek; geniş topoğrafyalar için pratik olmayacağı vurgulanmıştır.

Kocaman ve Güzel (2011), yapmış oldukları çalışmada ani baraj yıkılması durumunu 3 boyutlu hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı olan FLOW3D ve kurdukları deneysel düzenek aracılığıyla çözerek sonuçları karşılaştırmışlardır. Deneysel düzenek 100 cm uzunluk, 50 cm genişlik ve 35 cm yüksekliğe sahip kenarları cam olan bir dikdörtgen kanaldan ve kanalı ikiye ayıran 1 cm kalınlığındaki kapaktan oluşmuştur. Kapağın aniden kaldırılmasıyla oluşan taşkın dalgası saniyede 300 görüntü alabilen 3 adet

yüksek hızlı video kamerayla kaydedilmiş ve su hareketinin daha görünür olması için suya gıda boyası karıştırılmıştır. Sonlu hacimler ve akışkan hacmi (VOF) yöntemlerini kullanarak 3 boyutlu Navier Stoke denklemlerini çözen FLOW3D yazılımı ile yapılan sayısal analiz; 0.05 cm mesh aralığında ve toplam 800000 adet mesh kullanılarak çözülmüştür. 2.5 Ghz hıza sahip ve iki çekirdekli Intel marka işlemcili bilgisayarlar yapılan analiz 2 saat sürmüştür. Çalışmanın sonuç kısmında sayısal ve deneysel yöntem arasında su hareketi ve dalga yayılma hızları için yüksek derecede uyum olduğu gözlemlenmiş, gelecekte bilgisayarların çözüm hızının artmasıyla birlikte Flow3D yazılımının geniş ve karmaşık topoğrafyalarda yapılan taşkın analizleri için önemli bir araç olacağı belirtilmiştir.

Bellos ve Hrissanthou (2011), betonarme bir barajın yıkılmasıyla oluşan taşkın dalgasının yayılımını HECRAS yazılımını kullanarak araştırmışlardır. Lax-Wendroff ve McCormack şemaları ile Saint-Venant denklemlerini çözerek iki farklı sayısal model geliştirmiş ve analiz sonuçlarını doğrulamak için deneysel yöntem kullanmışlardır. Deneysel yöntem için Soares-Fraza (2007) tarafından geliştirilen model referans alınmıştır. 0.5 m genişlik ve 5.6 m uzunlukta olan dikdörtgen kanal düzeneği referans alınmıştır. 2.39 m aralıkla yerleştirilen düşey kapaklar ile 0.111 m yüksekliğinde ve 2.39 m uzunluğunda rezervuar alanı oluşturulmuştur. Ayrıca barajın 1.61 m mansabına yerleştirilen tepe yüksekliği 0.065 m, memba ve mansap eğimleri ise 0.14 olan üçgen eşik ile de taşkın dalgasının ani eğim değişimlerindeki davranışı incelenmiştir. Çalışma kapsamında baraj kapağının ani olarak kaldırılmasından $t=1.8$ s, $t=3.0$ s, $t=3.7$ s, $t=8.4$ s ve $t=15.5$ s sonraki su yüzü profilleri üzerinden Lax-Wendroff ve McCormack şemaları kullanılarak gerçekleştirilen iki sayısal çözüm ile deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Sayısal çözüm ve deneysel sonuçlar arasında memnun edici düzeyde bir uyum olduğu, sadece $t=15.5$ s de bir miktar farklılık bulunduğu gözlemlenmiştir. Geliştirilen sayısal modellerin olası baraj yıkılması sonrası taşkın sularının mansaptaki yerleşimlere ulaşma süreleri ve ilgili su derinliklerinin tahmin edilmesi noktasında yeterli seviyede olduğu belirtilmiştir.

Li vd. (2012), Çin'de 2008 yılında meydana gelen Wenchuan depreminin tetiklediği toprak kaymasıyla oluşan ve 2.8 milyon m³ rezervuar hacmine sahip Xiaojiaqiao Bariyer Gölünün yıkılma simülasyonu gerçekleştirmişlerdir. Analizin topoğrafik girdileri için uydu görüntüleri ve insansız hava araçları kullanılarak 10 m çözünürlüklü DEM verileri oluşturulmuştur. ArcGIS yazılımı vasıtasıyla göle ait geometrik parametreler bulunmuştur. Sayısal çözüm için ise sonlu farklar yöntemi kullanılarak iki boyutlu Saint Venant denklemleri kullanılmıştır. Gölü tıkayan bariyerin

tam ve yarım yıkılması durumları için, 10 m çözünürlüğünde ve toplamda 165480 mesh hücresi kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonda mansap bölgesindeki taşkın etkisi analiz edilmiştir. Tam yıkılma durumunda Xiaobazhenfulin, Anxincun, Shangqingcun ve Xiangxicun yerleşim merkezlerinde su derinliğinin sırasıyla 14.56 m, 7.2 m, 3.64 m ve 1.68 metreye ulaşabileceği; taşkından etkilenen nüfus sayısının ise 5300'ü aşacağı belirtilmiştir.

Yerramilli (2013), yapmış olduğu çalışmada iklim değişikliği sonucu artan yağış yoğunluğunun bir baraj yıkılma senaryosundaki etkisini incelemiştir. Bu bağlamda HEC-RAS yazılımı kullanılarak ABD Mississippi eyaletinde bulunan Ross Barnett Barajı'nın yıkılma simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Topoğrafik girdiler için Mississippi Otomatik Kaynak Bilgi Sistemi (MARIS)'den alınan DEM verileri ArcGIS ortamında üçgenleşmiş düzensiz ağ (TIN) verisine dönüştürülerek HEC-RAS yazılımına aktarılmıştır. Bölgeye ait yağış verileri ise ABD Ulusal Jeoloji Merkezi (USGS)'den alınarak yazılıma girilmiştir. Baraj yıkılma parametreleri için HEC-RAS kullanım kılavuzu dikkate alınarak gedik genişliği 58.5 m, gedik şev eğimi 2:2, yıkılma süresi 4 saat olarak belirlenmiş ve yıkılma modu borulanma seçilmiştir. Çalışma kapsamında taşkın risk haritaları edilmiş ve bölgenin risk durumu incelenmiştir. Taşkın sularının Hinds ilçesine kadar ulaşacağı, 203700 m² alanın sular altında kalacağı ve maksimum su derinliğinin 14 metreye ulaşabileceği belirtilmiştir. Ayrıca çalışma kapsamında 1979 yılında aynı bölgede meydana gelen sel felaketine ait veriler Ulusal Okyanus ve Atmosfer İdaresi'nden (NOAA) alınarak mevcut analizin haritalarıyla karşılaştırılmıştır. Yapılan görsel karşılaştırmada, her iki senaryodaki taşkın haritasının birbirine çok yakın olduğu ve 1979 sel felaketi 200 yıllık bir sel olarak kabul edildiğinden, yüksek yoğunluklu bir yağış olayı altındaki Ross Barnett Barajı'nın yıkılmasının 200 yıllık bir sel etkisine eşdeğer kabul edilebileceği belirtilmiştir.

Palamut (2014), baraj yıkılması problemini HEC-RAS yazılımıyla tek, FLOW3D yazılımıyla ise üç boyutta sayısal olarak çözerek sonuçları karşılaştırılmıştır. İzmir'de bulunan, 25 milyon m³ rezervuar hacmine ve 75.8 m yüksekliğe sahip Rahmanlar Barajı için yapılan simülasyonlarda gedik parametreleri Froehlich (2008) yaklaşımına göre belirlenmiştir. HEC-RAS yazılımı ile yıkılma şekli, gedik genişliği ve gedik şev eğimlerini değiştirerek 0.39 saatlik yıkılma süresiyle 5 farklı senaryoda tek boyutlu Saint Venant denklemlerini çözülerek simülasyonlar gerçekleştirilmiş ve bir saat süren çözümlemelerin ardından taşkın alanları haritalanmıştır. FLOW3D yazılımının çözüm esası üç boyutlu Reynolds Ortalamalı Navier Stokes (RANS) denklemlerine dayanmaktadır. Çalışma kapsamında FLOW3D ile sadece bir simülasyon

gerçekleştirilmiş olup söz konusu simülasyon için HEC-RAS'ta gerçekleştirilen senaryolardan en olumsuz şartlardaki seçilmiştir. 26 m gedik taban genişliği, 70 m gedik yüksekliği ve gedik şev eğimi 1 olacak şekilde gerçekleştirilen simülasyon yaklaşık 3 gün sürerken; mansaptaki yerleşim alanlarına taşkın sularının ulaşmadığı görülmüştür. Her iki yazılımla da çıkarılan taşkın haritalarının birbirine az da olsa yakın olduğu; mevcut ve planlama aşamasında olan barajlar için önce tek boyutlu, risk durumu içermesi halinde 3 boyutlu yıkılma analizlerin yapılması gerektiği belirtilmiştir.

Abdulrahman (2014), yapmış olduğu çalışmada Irak'ın Süleymaniye kentinde 2006 yılında aşırı yağışlar sonucu yıkılan Chaq-Chaq Barajı'nın yıkılması durumunu HEC-RAS yazılımını kullanarak analiz etmiş ve sonuçları literatürde kullanılan güncel gedik tahmin yöntemleriyle karşılaştırmıştır. Manning pürüzlülük katsayısı 0.028 olarak belirlenmiş ve mansap bölgesine ait topoğrafya kesitleri Süleymaniye Belediyesi'nden AutoCAD formatında alınarak HEC-RAS ortamına aktarılmıştır. Gedik parametreleri için yıkılma bölgesindeki araştırmalardan elde edilen veriler kullanılmış; gedik oluşum süresi için ise barajın 1.36 km mansabında bulunan köprüdeki görgü tanıklarının su seviyesi ifadeleri kullanılmıştır. 1, 1.5 ve 1.6 saat gedik oluşum sürelerinde üç farklı simülasyon yapılmış; köprüdeki su seviyesi değerinin 1.6 saatlik durumda gerçek değere en çok yaklaştığı görülmüştür. HEC-RAS yazılımı kullanılarak gerçek yıkılma verileri üzerinden yapılan analizin sonuçları literatürde güvenilir kabul edilen 4 farklı tahmin yöntemi; Froehlich (1995), Froehlich (2008), Xu ve Zhang (2009) ve Pierce (2010) yöntemleriyle karşılaştırılarak sonuçlar tablolastırılmıştır. Sonuç olarak Xu ve Zhang (2009) yönteminin ortalama gedik genişliğini ve gedik oluşum süresini; Froehlich (2008) yönteminin ise üst gedik genişliğini diğer yöntemlerden daha doğru tahmin ettiğini belirtilmiştir. Pik debinin tahmininde de Pierce (2010) yönteminin HEC-RAS'ta bulunan değere daha yakın olduğu belirtilmiştir. Genel değerlendirme olarak ise Xu ve Zhang (2009) yönteminin diğer modellere göre daha başarılı bulunduğu aktarılmıştır.

Robb ve Vazquez (2015), ani baraj yıkılmalarında mansapta bir engelin bulunması durumunu; iki boyutlu sayısal çözüm yapabilen TELEMAC-2D yazılımı ile üç boyutlu sayısal çözümleme yapan FLOW3D ve OPENFOAM yazılımlarıyla çözerek sonuçları deneysel çalışmalarla karşılaştırmışlardır. Birinci deneysel model olarak Soares-Fraza (2007) tarafından yapılan deney sonuçları kullanılmıştır. 0.5 m genişlik ve 5.6 m uzunlukta olan dikdörtgen kanala 2.39 m aralıkla yerleştirilen düşey kapaklar ile 0.111 m yüksekliğinde ve 2.39 m uzunluğunda rezervuar alanı oluşturulmuştur. Barajın 1.61 m mansabına yerleştirilen tepe yüksekliği 0.065 m, şev eğimleri ise 0.14 olan üçgen eşik yerleştirilerek taşkın dalgasının ani eğim değişimlerindeki davranışı incelenmiştir.

TELEMAC-2D ile yapılan analizde yaklaşık 0.02 m çözüm aralığında toplam 13000 mesh kullanılmış ve Manning pürüzlülük katsayısı 0.011 olarak alınmıştır.

FLOW3D ve OPENFOAM yazılımları ile yapılan analizlerde ise 0.1 x 0.1 x 0.05 m ebatlarında 896000 mesh hücresi kullanılmıştır. İlk deneysel düzenek üzerinden yapılan analiz sonuçları karşılaştırıldığında; üç yazılımla da yapılan sayısal çözümlemelerin deney sonuçlarıyla yüksek derecede uyumlu olduğu ve her üç modelin de karmaşık topoğrafyalarda taşkın dalgasını doğru simüle edebileceği belirtilmiştir. Sayısal modellerin mansapta bir engel bulunması durumunda taşkın dalgasını modelleyebilme yeteneğini karşılaştırmak için ikinci deneysel model olarak Soares-Frazao and Zech (2007) tarafından yapılan deneysel çalışma seçilmiştir. 3.6 m genişliğinde dikdörtgen bir kanalda 1 m genişlikteki gediğin aniden açılmasıyla taşkın dalgası oluşturulmuştur. Gövdenin 3.5 m mansabında bulunan 0.4 m x 0.8 m boyutlarında dikdörtgen bir engele çarpan dalgaların hareketi 5 farklı basınç göstergesi yerleştirilerek incelenmiştir. Aynı model sayısal analizlerde de kurulmuştur. TELEMAC-2D yazılımı ile yapılan analizde 0.05 m çözüm aralıklarında 660000 mesh kullanılmış ve Manning pürüzlülük katsayısı 0.010 alınarak çözüm yapılmıştır. OPENFOAM yazılımında 0.02 x 0.02 x 0.01 m ve 0.03 x 0.03 x 0.01 m boyutlarında toplam 3800000 mesh kullanılmıştır. FLOW3D yazılımında ise 0.035 x 0.02 x 0.01 m boyutlarında toplam 4200000 mesh kullanılmıştır. Sayısal çözüm sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında; üç modelinde deney sonuçlarıyla iyi uyum sağladığı ve üçünün de aynı ortalama hata değerine sahip olduğu hesaplanmıştır. Çalışmanın sonuç kısmında üç boyutlu analizlerin daha fazla çaba gerektirdiği göz önüne alındığında, geniş arazilerdeki baraj yıkılma problemlerinde çok fazla bir avantajının olmadığı ve bu deneysel düzenedeki mansap engel mesafesinin rezervuar yüksekliğine göre fazla olmasının suyun üç boyutlu etkilerini azaltabileceğine dikkat çekerek, üç boyutlu analizlerin baraj yakınındaki taşkın etkilerinin araştırıldığı durumlarda kullanılmasının faydalı olabileceğini belirtmişlerdir.

Shivashankar (2016), ANSYS FLUENT yazılımını kullanarak ani baraj yıkılması probleminin sayısal çözümünü iki farklı türbülans modeliyle çözerek sonuçları deneysel yöntemle karşılaştırmıştır. Deneysel yöntem için Fraccarollo ve Toro (1995) tarafından gerçekleştirilen çalışma referans alınmıştır. Söz konusu deneyde 2 m genişlik, 2 m uzunluk ve 1 m yüksekliğe sahip rezervuar alanı ile 2 m genişlik, 8 m uzunluk ve 30 cm yüksekliğindeki mansap tarafından oluşan dikdörtgen kanal üzerinden yapılan deneyde, 0.5 m genişlik ve 0.95 m yüksekliğe sahip düşey kapağın aniden kaldırılmasıyla oluşturan taşkın davranışı incelenerek 11 farklı noktada basınç değişimleri, su hızları ve su yüzü profilleri incelenmiştir. Deneysel modelin aynısı ANSYS FLUENT yazılımında

kurularak Büyük Girdap Akımları (LES) ve k-Epsilon (k- ϵ) türbülans modelleri ile sayısal olarak çözülmüş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sayısal çözümleme için Navier Stokes denklemleri kullanılmış; Akışkan Hacmi (VOF) yöntemi kullanılarak serbest su yüzeyinin hareketi modellenmiştir. Çalışma sonucunda her iki sayısal modelin de genel olarak güvenilir sonuçlar verdiği; LES modelinin su derinliği ve su hızlarında daha başarılı olduğu belirtilmiştir.

Aydemir ve Güven (2017), yapmış oldukları çalışmada baraj yıkılma analizleri için kullanılan literatürdeki debi tahmin metotlarını karşılaştırmışlardır. Bu kapsamda S.C. Service (1981), Costa (1985), Froehlich (1995) ve Gupta ve Singh (2012) tarafından geliştirilen yöntemler, Wahl (2004) tarafından derlenen ve yıkılma verileri güvenilir kabul edilen 25 adet baraj yıkılması olayına uygulanmıştır. Elde edilen pik debi değerleri ve gerçek değerler üzerinden doğrusal regresyon analizi yapılmıştır. Her bir yöntem için hesaplanan R^2 değerinin 1'e yakınlığı yöntemin uygunluğunu göstermektedir. S.C. Service (1981), Costa (1985), Froehlich (1995), Gupta ve Singh (2012) yöntemlerine ait R^2 değerleri sırasıyla 0.738, 0.622, 0.875, 0.928 olarak hesaplanmıştır. Gupta ve Singh (2012) yöntemi yüksek doğrulukta çıkmasına rağmen hesap aşamasında gereken parametrelerin birçok baraj yıkılmasında bilinmemesinden dolayı uygulama alanının sınırlı olduğu belirtilmiştir. Çalışma kapsamında baraj yüksekliğinin 15 m'den büyük ve küçük olması durumlarına göre sınıflandırma yaparak aynı regresyon analizleri yapılmış, 15 m'den büyük barajlarda Froehlich (1995) yönteminin en güvenilir sonuçları verdiği görülmüş ve yapılacak baraj yıkılma analizlerinde bu yöntemin seçilmesinin daha uygun olacağı belirtilmiştir.

Tahershamsi vd. (2017), yapmış oldukları çalışmada ani baraj yıkılmalarında yıkılma oranı ve rezervuar geometrisinin çıkış pik debisi üzerindeki etkisini deneysel ve sayısal yöntemlerle incelemiştir. Deneysel çalışmalar laboratuvar ortamında geniş dikdörtgen, uzun dikdörtgen ve yamuk şeklinde 14 farklı rezervuar alanı oluşturularak, yatay bir kanal üzerinde düşey kapağın aniden kaldırılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Mansap bölgesinde 4 farklı noktaya yerleştirilen ultrasonik sensörler ile de hız ve seviye ölçümleri yapılmıştır. Deneysel çalışmada geniş dikdörtgen rezervuarlı barajın yıkılmasında pik debi değerinin daha yüksek ve pik debiye ulaşma süresinin daha kısa olduğu gözlemlenmiştir. Uzun dikdörtgen rezervuarlı barajda ise yıkılma sonrası pik debinin daha düşük, pike ulaşma süresinin ise daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu durum rezervuar geometrisinin taşkın pik debisi üzerindeki etkisini göstermiştir. Deney modeli hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı olan ANSYS FLUENT ortamında da oluşturularak 3 cm çözüm ağı aralıklarında ve 3 boyutlu RANS denklemleri kullanılarak

çözümüştür. Deney ve sayısal model sonuçları arasında iyi derecede uyum olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmanın sonraki adımında ise geçmiş baraj yıkılma verileri ve deneysel sonuçlar üzerinden regresyon analizi yapılarak ani ve kademeli baraj yıkılmalarında pik debinin tahmini için rezervuar şekil faktörü ve baraj yıkılma oranına bağlı olarak ampirik formüller geliştirmişlerdir.

$$Q_p = 0.348S_f^{-0.455}(\alpha/A_0)^{0.098} \quad (\text{Ani yıkılmalar için}) \quad (\text{Eşitlik 23})$$

$$Q_p = 0.134S_f^{-0.408}(\alpha/A_0)^{0.207} \quad (\text{Kademeli yıkılmalar için}) \quad (\text{Eşitlik 24})$$

$$S_f = (B_b H_b)/(B_d H_d)$$

Bu eşitliklerde;

Q_p : Çıkış pik debisi

S_f : Rezervuar şekil faktörü

α : Yıkılma alanı (m^2)

A_0 : Baraj aksındaki rezervuar kesit alanı (m^2)

B_b : Gedik üst genişliği (m)

B_d : Baraj gövdesi üst genişliği (m)

H_b : Gedik yüksekliği (m)

H_d : Baraj yüksekliğini (m) temsil etmektedir.

Dursun ve Gül (2018), yapmış oldukları çalışmada Malatya ilinde 1963-1969 yıllarında inşa edilen, 55 m yüksekliğe ve 60 milyon m^3 rezervuar hacmine sahip toprak dolgu tipindeki Sürğü Barajı'nın yıkılma analizini gerçekleştirmişlerdir. Modelin topoğrafik girdileri için ABD Ulusal Jeoloji Merkezi (USGS)'den 10 m çözünürlüğünde sayısal yükseklik modeli elde edilmiştir. Gedik parametrelerinin belirlenebilmesi için Froehlich (2008) eşitlikleri kullanılarak; gedik taban genişliği 92 m, gedik yüksekliği 28 m, gedik şev eğimleri 1:1 ve yıkılma süresi 1.36 saat olarak hesaplanmıştır. HECRAS yazılımı kullanılarak yapılan iki boyutlu çözümlemelerde 20 m x 20 m boyutlarında çözüm ağları oluşturulmuş ve taşkın risk haritaları elde edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre 1 saat içinde 15300 m^3/sn 'lik taşkın pik debisinin oluşacağı, taşkın sularının 3 saat içerisinde mansaptaki Altıntop köyüne, 24 saat sonra da Kapıdere köyüne ulaşacağı aktarılmıştır. Ayrıca oluşması muhtemel taşkın su kotunun 1285 m olacağı, toplamda 31 km^2 'lik alanın sular altında kalacağı, 200 kişinin hayati risk altında olacağı ve toplamda 1000 kişinin oluşacak taşkından etkileneceği belirtilmiştir.

Hu vd. (2018), yapmış oldukları çalışmada kuru ve ıslak mansap koşullarında baraj yıkılması problemini MIKE 3D ve FLOW 3D yazılımlarıyla üç boyutlu çözerek su derinlikleri, ortalama hızlar ve su yüzü profillerini yayınlanmış deneysel çalışma verileriyle karşılaştırmışlardır. Deneysel veriler Özmen – Çağatay ve Kocaman (2010) tarafından gerçekleştirilen çalışmadan alınmıştır. Söz konusu çalışmada 30 cm yükseklik, 30 cm genişlik, 890 cm uzunluğunda olan ve bunun 465 cm'sini rezervuarı oluşturan dikdörtgen bir kanal düzeneği kullanılmıştır. Aradaki kapağın aniden kaldırılmasıyla oluşturulan taşkın dalgasının yayılımı, mansap bölgesindeki kuyruk suyu derinliğinin 0, 2.5 ve 10 cm olması durumlarına göre yüksek hızlı dijital kameralarla incelenmiştir. Deneysel model FLOW3D ve MIKE FLOOD yazılımlarında da kurularak sayısal olarak çözülmüştür. Her iki yazılımın da çözüm esası RANS denklemlerine dayanmaktadır. FLOW3D yazılımında 0.05 m aralığında toplam 256000 mesh kullanılarak; MIKE FLOOD yazılımında ise yine 0.05 m aralığındaki ağlarla toplam 1068 element kullanılarak ve Manning pürüzlülük katsayısı 0.012 girilerek çözülmüştür. Yapılan karşılaştırma sonucunda her iki yazılımın da deney sonuçlarıyla yüksek derecede uyumlu olduğu ve FLOW3D yazılımının ıslak mansap koşullarında MIKE FLOOD yazılımına kıyasla daha başarılı olmasına rağmen analiz süresinin 24 kat daha uzun olduğu görülmüştür. Genel değerlendirme olarak; her iki yazılımında düşük hata payıyla çözümleme yapması ve analiz süreleri dikkate alındığında geniş ölçekli baraj yıkılma analizleri için MIKE FLOOD yazılımının daha cazip olduğu belirtilmiştir.

Khosravi vd. (2019), İran'da bulunan 106 m yükseklik ve 1.2 milyar m³ rezervuar hacmine sahip Sefid-Roud Barajı'nın yıkılma simülasyonunu gerçekleştirerek taşkın risk haritalarını oluşturmuşlardır. Modelin topoğrafik girdileri için ArcGIS 10.2 yazılımından elde edilen 50 adet enkesit HECRAS ortamına aktarılmıştır. Mansap bölgesindeki arazi kullanım durumu Google Earth uydu görüntülerinden belirlenerek Manning pürüzlülük katsayıları bölgeye göre 0.25, 0.08, 0.05, 0.035 ve 0.025 olarak girilmiştir. Gedik parametreleri için literatürdeki bilgiler incelenerek; 250 m genişlik ve 50 m yükseklikte trapez bir şekil kabul edilmiştir. Gövde malzemesi beton olduğundan yıkılma şekli üstünden su aşma, baraj yıkılma süresi ise 0.1 saat olarak belirlenmiştir. Simülasyon 100 m x 100 m boyutlarında toplam 23494 mesh oluşturularak Saint Venant denklemlerinin iki boyutlu çözülmesiyle gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonucunda baraj mansabındaki bazı yerleşimlerde 52 m, 42 m ve 27 m gibi çok yüksek su derinliklerinin ortaya çıktığı, yıkılma sonrası 118000 m³/sn büyüklüğünde pik debi ve 4 ile 15 m/sn arasında değişen akım hızlarının olduğu görülmüştür. Ayrıca olası yıkılma sonucunda Aliabad-e-Paein, Roudbar ve Rostamabad yerleşimleri ile Totkaboun'un bazı bölgelerinde toplam 3100

kişinin hayati risk altında bulunduğu, Tahran – Raşt karayolu ile bölgede bulunan geniş pirinç tarlaları ve zeytinliklerin yok olacağının tahmin edildiği belirtilmiştir. Çalışma kapsamında taşkın risk haritaları da elde edilerek sonraki dönemlerde yapılacak acil eylem planları için önemli bir veri kaynağı oluşturulmuştur.

Mahnamfar vd. (2020), MIKE FLOOD (MIKE 21) yazılımını kullanarak İstanbul ilinde bulunan Elmalı Barajı'nın çeşitli dolusavak debileri için, Göksu Deresi mansabında oluşması muhtemel taşkınları modelleyerek taşkın risk haritaları oluşturmuşlardır. Saint Venant denklemlerinin iki boyutta çözülmesiyle gerçekleştirilen analizde üçgen ve dikdörtgen hücrelerden oluşan toplam 32766 mesh kullanılmıştır. Dolu savak maksimum deşarj kapasitesinin $540 \text{ m}^3/\text{sn}$ olduğu barajda, dolu savak kapasitesinin %25, %50, %75 ve %100'ünün kullanıldığı taşkın durumları için dört ayrı senaryo gerçekleştirilerek bölgeler için risk derecelendirilmesi yapılmış ve taşkın risk haritaları hazırlanmıştır. Birinci (%25), ikinci (%50), üçüncü (%75) ve dördüncü (%100) senaryolarda sırasıyla 0.453 km^2 , 0.605 km^2 , 0.732 km^2 ve 0.820 km^2 taşkın alanı ile 4.8 m, 6 m, 7 m ve 7.7 m taşkın derinliklerinin oluşacağı belirtilmiştir. Taşkına maruz kalan alan, üç farklı kritik su derinliği (0.6 m, 1 m ve 3.5 m) belirlenerek düşük riskli, orta riskli, yüksek riskli ve aşırı riskli olmak üzere dört bölgeye ayrılmış ve taşkın risk haritası oluşturulmuştur. Ayrıca çalışma kapsamında taşkın zararlarının azaltılması için önerilerde bulunularak; riskli bölgelerde yapılaşmalara izin verilmemesi, yeni iletişim teknolojilerinden yararlanarak bölge sakinlerinin hızlı tahliye edilmesinin sağlanması ve derenin deşarj kapasitesini düşürecek engellerin (örneğin deniz limanındaki tekneler) hızlı bir şekilde kaldırılması gerekliliği vurgulanmıştır.

Shahrim ve Ros (2020), Malezya'da bulunan 127 m yükseklik ve 6 milyar m^3 rezervuar hacmine sahip Temenggor Barajı'nın olası yıkılma analizini gerçekleştirerek pik debi ve gedik parametrelerinin tahmininde literatürde kullanılan yöntemleri karşılaştırmışlardır. MacDonald ve Langridge-Monopolis (1984), Von Thun ve Gillete (1990), Froehlich (1995) ve Froehlich (2008) tarafından geliştirilen formüller, Temenggor Barajı için uygulanarak farklı gedik parametreleri, yıkılma şekli ve yıkılma süreleri üzerinden 8 farklı senaryo oluşturulmuştur. Her bir senaryo için HECRAS yazılımında yıkılma analizi yapılarak elde edilen pik debi değerleri karşılaştırılmıştır. Manning pürüzlülük katsayısı nehir yatağı için 0.035, nehir kıyısı için 0.16 olarak girilmiştir. Analiz sonucunda literatürdeki dört yöntemin de gedik parametrelerinin tahmininde güvenilir sonuçlar verdiği, Froehlich (1995) ve Froehlich (2008) tarafından geliştirilen yöntemlerin pik debinin tahmininde % -1.8 ile % +16.5 fark ile HECRAS

yazılımı ile uyumlu sonuçlar verdiği, MacDonald ve Langridge-Monopolis (1984) yönteminin ise pik debi değerini % 40 fazla bulduğu belirtilmiştir.

Federico ve Cesali (2020), HECRAS yazılımını kullanarak İtalya’da bulunan 266 m yükseklik ve 15.7 milyon m³ rezervuar hacmine sahip Sciaguana Barajı’nın iki boyutlu yıkılma analizini gerçekleştirerek elde edilen taşkın parametrelerini literatürdeki ampirik yöntemlerle karşılaştırmışlardır. Çalışma kapsamında oluşturulan taşkın yayılım haritaları da bölgeye ait geçmişte yapılan taşkın eylem planı ile karşılaştırılmıştır. Barajın kısmi ve tam yıkılma durumlarına göre farklı yıkılma şekli (borulanma – üstünden su aşma), yıkılma süresi ve gedik gelişim eğrisi üzerinden dört farklı senaryo belirlenerek analizler gerçekleştirilmiştir. Topoğrafik girdiler için 2 m x 2 m boyutlarında DEM verisi kullanılmış; Manning pürüzlülük katsayısı ise 0.06 olarak girilmiştir. Senaryolarda yıkılma sürelerinin belirlenmesi için MacDonald ve Langridge-Monopolis (1984), USBR (1988) ve Froehlich (2016) yöntemleri kullanılmıştır. Analiz sonucunda elde edilen taşkın yayılım haritalarının geçmiş dönemde yerel yönetimler tarafından hazırlanan harita ile farklılıklar gösterdiği görülmüştür. HECRAS ile elde edilen pik debi değerleri literatürdeki tahmin yöntemleri ile karşılaştırıldığında; Singh ve Snorrson (1984), MacDonald ve Langridge-Monopolis (1984), Xu ve Zhang (2009) sırasıyla 1., 4. ve 2. senaryo ile yakın sonuçlar vermiştir. Singh ve Scarlatos (1988) tarafından geliştirilen taşkın debisinin zamanla değişimini gösteren hidrograf denklemi ise 1., 2. ve 3. senaryoda çözülerek HECRAS yazılımında yapılan sayısal çözümlemeyle karşılaştırılmış ve aralarında yüksek derecede uyum olduğu gözlemlenmiştir.

Em ve Hamidi (2021), yapmış oldukları çalışmada Diyarbakır ilinde bulunan 126 m yükseklik ve 1.92 milyar m³ rezervuar hacimli Kralkızı Barajı’nın yıkılma analizini HECRAS yazılımını kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Topoğrafik harita, paftalara işlenen yerel ölçümlerden elde edilen eş yükselti eğrilerinin Global Mapper yazılımına aktarılıp düzenlenmesiyle oluşturulmuştur. Hidrolik model süreklilik ve momentum denklemlerinden oluşan Saint Venant denklemlerinin çözümüyle yapılan taşkın ötelemesine dayanmaktadır. Gedik parametrelerinin belirlenmesi için geçmiş baraj yıkılma verileri ile literatürde yaygın bir şekilde kullanılan USBR (1982) ve Froehlich (1995) yöntemleri değerlendirilmiştir. Yıkılma şekli olarak üstünden su aşma, yıkılma süresi $T_f = 1$ saat ve ortalama gedik genişliği $B_{ort} = 350$ m olarak belirlenmiştir. Saha çalışmaları sonucu elde edilen Manning pürüzlülük katsayısı değerleri ise 0.02 ile 0.03 arasında değişmektedir. Analiz sonucunda taşkın sonrası mansap bölgesinde yaklaşık 6 m’lik su derinliklerinin oluştuğu ve 1310. saniyede membadaki son kesitte yaklaşık 230000 m³/sn pik debinin meydana geldiği görülmüştür. Ayrıca yıkılmanın, Kralkızı

Barajı'nın hemen mansabında bulunan Dicle Barajı'nın da yıkılmasını tetikleyebileceği belirtilmiştir.

Qiu vd. (2021), yapmış oldukları çalışmada beton yüzölçümü kum-çakıl dolgu barajların yıkılmasında gedik parametrelerinin belirlenmesi için yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Türbülans modeli, sediment taşıma formülü, ve eğilme momenti denge yöntemini kullanarak barajın üstünden su aşma sonrası gedik gelişimini tahmin etmek için matematiksel bir model geliştirmişlerdir. Baraj yıkılmalarında gövdede meydana gelen aşınma, kum yüklü bir türbülanslı akış oluşturduğundan hesaplamalarda RNG k- ϵ türbülans modeli kullanılarak hesaplamalarda türbülans etkisi dikkate alınmıştır. Gedik gelişimindeki bir başka önemli etken sediment taşınımında, askıda ve sürüntü yük hareketleri için askıda hız denklemleri ile Meyer Peter ve Müller (1948) eşitliği kullanılmıştır. Kırılma sonrası beton yüz ve su ağırlığının oluşturacağı eğilme momentleri de hesaplanarak gedik gelişimindeki etkisi dikkate alınmıştır. Geliştirilen matematiksel modelin doğruluğunu test etmek için 1993 yılında Çin'de yıkılan ve yıkılma parametreleri bilinen Gougou Barajı'na ait yıkılma simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Aynı ölçeklerde gerçekleştirilen yıkılma analizinde 2 m x 2 m x 2 m, 4 m x 4 m x 4 m ve 6 m x 6 m x 6 m boyutlarında 3 mesh tabakası halinde toplam 4.94 milyon mesh hücresi kullanılmıştır. Simülasyonda 4700. saniye sonrası şelale benzeri su akışı oluşmuş ve gedik zamana bağlı genişlemeye başlamıştır. 7200. saniyeye gelindiğinde rezervuar su seviyesi sabit hale gelmiş ve yıkılma tamamlanmıştır. Simülasyon sonucunda nihai gedik genişliği ve yüksekliği 132.5 m ve 69 m olarak elde edilmiştir. Gerçek yıkılma verilerine göre ise nihai gedik genişliği 137.5 m, gedik yüksekliği 60 m ve yıkılma süresi 1.83 – 2.25 saat arasındadır. Geliştirilen matematiksel modele dayalı simülasyon ve gerçek tarihsel veriler karşılaştırıldığında gedik genişliğinde % 3.6, gedik yüksekliğinde % 15 sapma bulunmuştur. Sonuç olarak geliştirilen modelin su ve toprak arasındaki etkileşimi temsil edebildiği ve gedik parametrelerinin tahmin edilmesinde gerçeğe yakın sonuçlar verebileceği belirtilmiştir.

Wang vd. (2021), yapmış oldukları çalışmada 2017 yılında Tibet'te meydana gelen 6.5 Mw şiddetindeki deprem sonucu yıkılan Huohua Gölü doğal barajının yıkılma analizini gerçekleştirmişlerdir. Yıkılma sonrası arazi verilerinden elde edilen 14 m yükseklik, 30 m alt genişlik ve 35 m üst genişliğe sahip trapez şeklindeki nihai gedik, sayısal modele aktararak ani baraj yıkılması durumu simüle edilmiştir. Massflow yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen analizin çözüm esası kütle ve momentum korunumu denklemlerine dayanmaktadır. Sayısal simülasyonda topoğrafyaya ait DEM verisi 0.1 m çözünürlüğünde olup, mesh aralıkları 1 m x 1 m ve Manning pürüzlülük katsayısı değeri

0.0157'dir. Simülasyon sonucunda 280000 m³ rezervuar hacmine sahip barajın 200 sn içinde tamamen boşaldığı, mansap bölgesinde 3 metreye yakın su derinliği ve 2-3 m/sn'lik su hızlarının olduğu görülmüştür. Sayısal simülasyon sonuçları yıkılmadan önceki uydu görüntüleri ve yıkılma sonrası gerçekleştirilen insansız hava aracı çekimleriyle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda sayısal simülasyonun taşkın yayılım sürecini oldukça iyi bir şekilde yakalayabildiği; model sonuçları ve insansız hava aracı görüntülerinden elde edilen bitki örtüsü değişim alanları arasında iyi bir uyum sağlandığı görülmüştür.

Bharath vd. (2021), HECRAS yazılımını kullanarak Hindistan'da bulunan 54 m yükseklik ve 1.4 milyar m³ rezervuar hacmine sahip Hidkal Barajı'nın yıkılma simülasyonunu gerçekleştirmiş ve literatürde yaygın kullanılan ampirik formüllerle karşılaştırmışlardır. Taşkın ötelemesi için bir boyutlu Saint Venant denklemleri kullanılmış, topoğrafik girdiler için ise Cortosat-1 uydularından elde edilen 30 m çözünürlüğündeki DEM verilerinden yararlanılmıştır. Froehlich (2008) yöntemi kullanılarak borulanma ve üstten su aşma senaryoları için gedik parametreleri ve yıkılma süreleri belirlenmiştir. Yapılan simülasyon sonucunda taşkın risk haritaları oluşturulmuş; borulanma ve üstten su aşma sebepli yıkılmalarda sırasıyla 75224 m² ve 79205 m²'lik alanların sular altında kaldığı görülmüştür. Baraj aksında elde edilen maksimum pik debi değerleri ise borulanma durumunda 72086 m³/sn, üstten su aşma durumunda ise 78455 m³/sn olarak elde edilmiştir. Baraj aksı ve ilerisinde 5, 10, 15, 20 ve 22. km'lerde elde edilen hidrograflarda pik debi değerlerinin her iki yıkılma senaryosunda da baraj aksından uzaklaştıkça azaldığı da görülmüştür. Çalışma kapsamında literatürde sıkça kullanılan 5 yöntem (MacDonald ve Langridge-Monopolis (1984), Froehlich (1995), Froehlich (2008), Von Thun ve Gillette (2021) ve Xu ve Zhang (2021)) ile gedik parametreleri ayrıca hesaplanıp HECRAS ile yıkılma analizi gerçekleştirilmiş; MacDonald ve Langridge-Monopolis (1984) yönteminde en yüksek su seviyesi ve pik debi değeri elde edilmişken, Xu ve Zhang (2021) yönteminde bu değerler en düşük hali almıştır. Ayrıca çalışmada gedik parametreleri üzerinden duyarlılık analizi gerçekleştirilerek; Froehlich (2008) yöntemiyle hesaplanan gedik parametrelerinin her biri %20'lik adımlarla değiştirilerek pik debi ve su seviyesi değerlerine bakılmıştır. Bu değerlerin gedik genişliği ve derinliği ile doğru; baraj yıkılma süresiyle ters orantılı olduğu görülmüştür.

Kocaman vd. (2021), yapmış oldukları çalışmada mansap bölgesinde trapez daralma olması durumunda baraj yıkılması taşkın yayılımının deneysel ve sayısal analizini karşılaştırmışlardır. Deneysel yöntemde 30 cm genişlik ve 9 m uzunluğundaki dikdörtgen cam duvarlı kanalın 4.65 m ilerisine yerleştirilen düşey kapakla 25 cm

yüksekliğinde rezervuar alanı oluşturulmuştur. Kanaldaki daralma durumu, kapaktan 152 cm sonra başlayacak şekilde 95 cm uzunluk ve 10 cm yüksekliğe sahip iki trapez engelin yerleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Deneysel çalışmada saniyede 50 görüntü alabilen 3 adet video kamera ve görüntü işleme sistemi kullanılmıştır. Suyu gıda boyası eklenerek su yüzeyi hareketinin belirginleşmesi sağlanmış ve kanal boyunca noktaya sanal seviye ölçer yerleştirilerek su seviyesi değişimleri de incelenmiştir. Sayısal analiz için Zurich Üniversitesi tarafından geliştirilen BASEMENT yazılımı kullanılmıştır. Çözüm esaslı sığ su denklemlerinin iki boyutta çözümüne dayanan yazılımda sonlu hacimler yöntemiyle çözüm yapılmıştır. Deneysel model yazılıma aynı ölçülerde aktarılmış, mesh aralıkları 0.01 m ve Manning pürüzlülük katsayısı değeri 0.0095 olarak seçilmiştir. Sınır şartı olarak kanal kenarları duvar, mansap çıkışı outflow olarak belirlenmiştir. Sayısal yöntemle elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlar ile karşılaştırıldığında; kesit daralmasının olduğu ve birkaç negatif dalga etkisinin gerçekleştiği bölümler haricinde genel itibarıyla iyi bir uyum olduğu görülmüştür. Meydana gelen kabul edilebilir seviyedeki sapmanın sebebi olarak, sayısal simülasyonun düşey ivme bileşiminin ihmal edilerek 2D sığ su denklemleriyle gerçekleştirilmesi gösterilmiştir.

Marangoz ve Anılan (2022), yapmış oldukları çalışmada Trabzon ilinde bulunan Atası Barajı'nın ani yıkılma simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir. 2D Saint Venant denklemlerine dayanan 2 farklı taşkın yönlendirme modeli kullanmışlardır. Difüzyon dalga modeli ve dinamik dalga modelleriyle gerçekleştirilen simülasyonlarda gedik parametrelerinin belirlenmesi için Froehlich (1995) yöntemi kullanılmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre difüzyon ve dinamik dalga modellerinde şehir merkezindeki ortalama akış hızları sırasıyla 7.45 m/sn ve 5.43 m/sn olarak gözlemlenmiştir. Her iki modelden elde edilen maksimum su derinliklerinde arazinin büyük bir kısmında 1-2 m'lik farklar gözlemlenirken şehir merkezinde bu değer 6 m'ye kadar çıkmıştır. Çalışma kapsamında her iki modelinde taşkın yatağının potansiyel risk durumunu yeterli doğrulukta temsil edebileceği belirtilirken dinamik dalga modelinin daha gerçekçi bir çözüm sağladığı vurgulanmıştır.

Aksoy vd. (2022), yapmış oldukları çalışmada İzmir ilinde bulunan Ürkmez Barajı'nın küçültülmüş modelini oluşturarak barajın olası yıkılma analizini deneysel ve sayısal yöntemlerle karşılaştırmışlardır. Deneysel yöntem için oluşturulan fiziksel modelde baraj özellikleri, rezervuar ve mansap bölgesi yanal doğrultularda 1/150, düşey doğrultuda 1/30 oranında küçültülmüştür. Yıkılma durumu baraj gövdesine yerleştirilen trapez parçanın sisteme yerleştirilen bir motor tarafından yukarı kaldırılmasıyla oluşturulmuştur. Mansap bölgesinde bulunan bitki örtüsü plastik fırçalarla temsil edilerek

pürüzlülük koşulları sağlanmış, binalar ise küçültme oranına sadık kalınarak ahşap levhalarla yapılmıştır. 3 farklı rezervuar seviyesi üzerinden gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda elektronik cihazlar kullanılarak altı farklı noktada su seviyesi, iki farklı noktada ise hız ölçümleri yapılmıştır. Sayısal model için FLOW3D yazılımı kullanılmıştır. Deneysel modelin geometrisi yazılımda kurularak üç farklı su seviyesi ve dört farklı türbülans modelinde (LES, k- ϵ , RNG k- ϵ ve k- ω) analizler gerçekleştirilmiştir. 2.5 cm x 2.5 cm x 0.25 cm boyutlarında toplamda 2688000 mesh hücresi kullanılarak gerçekleştirilen analizlerde deneysel modelde olduğu gibi yukarıya doğru hareket eden trapez parça ile gediklenme durumu gerçekleştirilmiştir. Sınır koşulu için deneysel modelden elde edilen hidrograf ve baraj rezervuarının tanımlanması olmak üzere iki farklı durum değerlendirilmiştir. Tüm bu değişkenler üzerinden gerçekleştirilen 15 farklı senaryoda sayısal çözüm deneysel model sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Beklendiği gibi rezervuar seviyesinin yüksek olduğu durumda mansap bölgesindeki maksimum su derinliğinin arttığı ve maksimum su derinliğine ulaşma süresinin azaldığı görülmüştür. Ayrıca sınır şartlarının baraj gölü olarak tanımlandığı senaryoda sayısal sonuçların deneysel sonuçlarla oldukça uyumlu olduğu; türbülans modellerinin ise analiz sonuçlarında belirgin bir farklılık yaratmadığı görülmüştür. Analiz sonucunda yerleşimlerin sık olduğu bölgede 5.48 dakika içinde 82 cm'lik maksimumu su derinliğinin oluştuğu belirtilmiştir.

Najar ve Gül (2022), İzmir İlinde bulunan Ürkmez Barajı'nın olası yıkılma analizini HECRAS yazılımını kullanarak ve literatürde yaygın bir şekilde kullanılan 5 farklı gedik tahmin yöntemiyle gerçekleştirerek gedik parametrelerinin çıkış pik debisi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Saint Venant denklemlerinin iki boyutlu çözümüne dayanan HECRAS yazılımı ile farklı gedik parametreleri, rezervuar seviyeleri ve yıkılma şekilleri üzerinden toplamda 96 senaryoya göre yıkılma durumu gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar karşılaştırıldığında USBR (1988) ve Von Thun ve Gillette (1990) yöntemlerinde en yüksek pik debi ve en düşük pike ulaşma süresinin oluştuğu, en düşük pik debi ve en uzun pike ulaşma sürelerinin ise MacDonald ve Langridge-Monopolis (1984) ve Xu ve Zhang (2009) yöntemlerinde oluştuğu görülmüştür. Froehlich (2008) yönteminde ise ortalama değerler elde edilmiştir. Çalışma kapsamında gedik parametreleri üzerinden duyarlılık analizi gerçekleştirilerek; Froehlich (2008) yöntemiyle hesaplanan gedik parametrelerinin her biri %25'lik adımlarla artırılarak pik debi ve pike ulaşma sürelerine bakılmıştır. İnceleme sonucunda baraj yıkılma süresi ve gedik genişliğinin pik debi ve pike ulaşma sürelerini önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Özellikle gedik genişliği değerinin iki katına çıkarılması durumunda pik debinin %34 arttığı ve pike ulaşma

süresinin %50 azaldığı dikkat çekmiştir. Gedik şev eğiminin ise bu değerler üzerinde önemli bir etkisinin bulunmadığı görülmüştür.

Le ve Nguyen (2022), yapmış oldukları çalışmada baraj yıkılmalarında gedik genişliği, rezervuar seviyesi ve gedik konumunun taşkın hidrografi üzerindeki etkilerini deneysel ve sayısal çözümler üzerinden araştırmışlardır. Shige-eda ve Akiyama (2003) tarafından gerçekleştirilen deneysel model FLOW3D yazılımında kurularak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Deneysel modelde 2.98 m genişlik ve 4.72 m uzunluğa sahip dikdörtgen havuzun 1.93 m'lik kısmı ince bir tabakayla ayrılarak rezervuar oluşturulmuştur. Aradaki tabakanın 50 cm'lik kısmı (gedik) açılarak gerçekleştirilen ani yıkılma deneyinde mansap tarafında 6 farklı noktada seviye ölçümleri yapılmıştır. Söz konusu deneysel model FLOW3D yazılımında kurularak sonuçlar karşılaştırılmış ve iyi derecede uyum sağlandığı gözlemlenmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında deneysel model FLOW3D yazılımı üzerinde genişletilerek üç farklı gedik genişliği (25 cm, 50 cm, 75 cm), üç farklı rezervuar su seviyesi (20 cm, 40 cm, 60cm) ve iki farklı gedik konumu (merkezde, sol kenarda) üzerinden toplam 16 farklı senaryoda analizler gerçekleştirilmiştir. 0.015 m x 0.015 m x 0.015 m boyutlarında toplam 2,183,656 mesh hücresi kullanılarak gerçekleştirilen analizlerde türbülans modeli olarak LES (Large Eddy Simulation) modeli kullanılmıştır. Intel i7, 2.9 GHz ve 8 çekirdek işlemcili bilgisayarla gerçekleştirilen her bir analiz 4.9 saat sürmüştür. Yapılan analizler sonucunda, artan gedik genişliğinin baraj kapağının merkez hattında su derinliğinin azalmasına pik debinin ise artmasına sebep olduğu ve beklendiği gibi artan rezervuar seviyesinin de pik debiyi artırdığı görülmüştür. Ayrıca gedik konumunun taşkın pik debisi üzerinde etkili olduğu ve gediğin merkezde olduğu durumda, kenarda olması durumuna kıyasla daha yüksek pik debiye neden olduğu gözlemlenmiştir.

Khojeh vd. (2022), yapmış oldukları çalışmada farklı hassasiyetteki sayısal yükseklik modelinin (DEM) nehir taşkın simülasyonları üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışma bölgesi olarak İran'ın güneydoğusunda bulunan ve 17 Mart 2019'da bir sel felaketinin meydana geldiği Gorganrood Nehri seçilmiştir. Bu kapsamda ALOS-PALSAR'dan 12.5 m, SRTM' den 30 ve 90 m, ASTER'den ise 30 m çözünürlüklere sahip uydusal kaynaklardan elde edilen 4 farklı DEM verisi HEC-RAS yazılımına aktararak taşkın simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması için taşkın meydana geldiği tarihlerdeki SENTINEL uydu görüntüleri incelenerek SNAP yazılımı ile taşkın haritaları üretilmiştir. Pik debinin doğruluğunu karşılaştırmak için ise o tarihlerde Voshmgir Barajı girişinde elde edilen $547.92 \text{ m}^3/\text{sn}$ 'lik

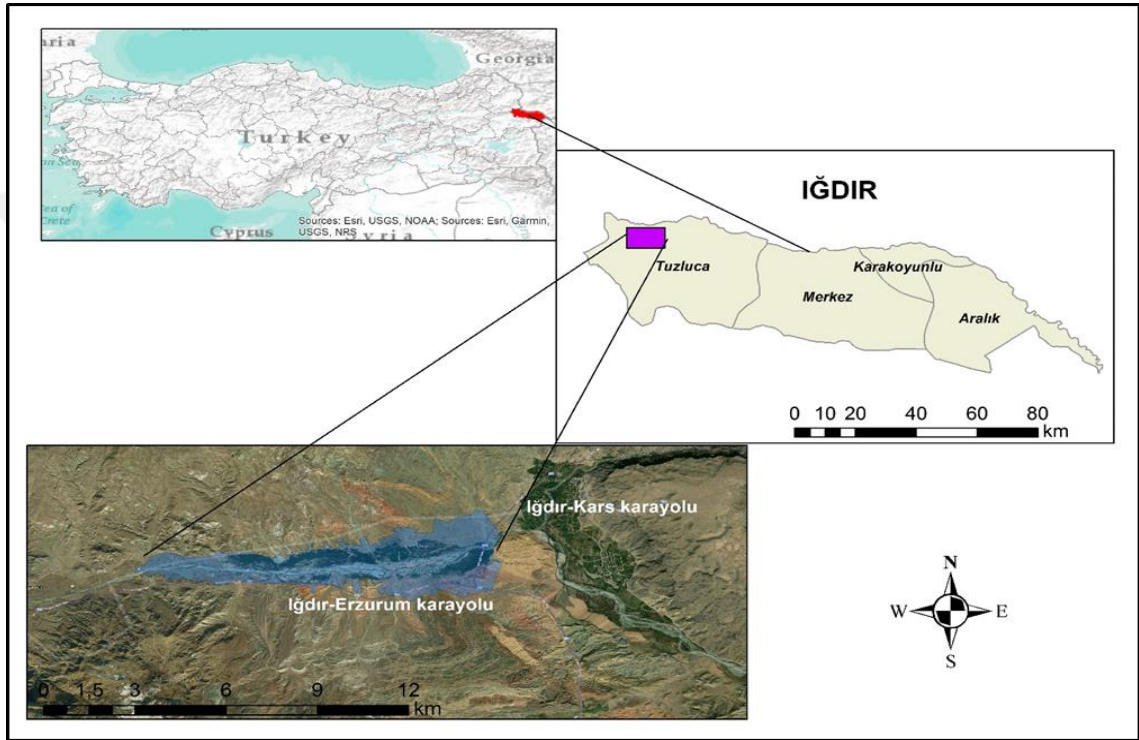
pik debi değeri bilgisi kullanılmıştır. Taşkın olayının meydana geldiği tarihte Gonbad akım gözlem istasyonunda ölçülen saatlik taşkın debisi memba sınır koşulu olarak HEC-RAS yazılımına girilmiştir. Manning pürüzlülük katsayıları 0.02 ile 0.04 arasında, çözüm ağı (mesh) boyutları ise 50 m olarak yazılıma girilmiştir. Simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında pik debiyi tahmin etmede ALOS-PALSAR'dan elde edilen 12.5 m çözünürlüklü DEM verisi ile gerçekleştirilen simülasyon % 19.56 hata payıyla en başarılı bulunmuştur. ALOS-PALSAR ve SRTM'den elde edilen DEM verileriyle gerçekleştirilen analiz sonuçlarının birbirleriyle uyumlu olduğu gözlemlenirken ASTOR'dan elde edilen DEM verilerinin kullanıldığı simülasyonun zayıf performans gösterdiği belirtilmiştir. Çalışmanın sonuç kısmında ALOS-PALSAR'dan elde edilen DEM verilerinin hidrolik simülasyonlarda kullanılmasının faydalı olabileceği belirtilmiştir.

Uysal ve Taşçı (2023), Batman ilinde bulunan 85 m yükseklik ve 1.25 milyar m³ rezervuar hacmine sahip Batman Barajı'nın olası yıkılma durumunu ve mansaptaki etkilerini üç farklı topoğrafik altlık kullanarak HEC-RAS yazılımı ile gerçekleştirmişlerdir. Analizler iki boyutlu Saint Venant denklemlerinin sonlu hacimler yöntemiyle çözülmesiyle gerçekleştirilmiştir. Harita Genel Müdürlüğünden elde edilen 5 m çözünürlüklü SAM (sayısal arazi modeli) verisi ile iki farklı uydu verisi olan SRTM ve ALOS-PALSAR'dan elde edilen, sırasıyla 30 m ve 12.5 m çözünürlüklü DEM (sayısal yükseklik modeli) verileri kullanılarak üç farklı analiz gerçekleştirilmiştir. Rezervuarın tam dolu olduğu sırada barajın üstünden su aşması sonucu oluşan trapez gediklenmenin yıkılmaya sebep olacağı kabulüyle yapılan analizlerde gedik parametreleri için literatürde sıkça kullanılan Froehlich (2008) yöntemi kullanılmıştır. İlgili yöntemle göre gedik yüksekliği 72 m, nihai gedik alt genişliği 284 m ve baraj yıkılma süresi 3.92 saat olarak belirlenmiştir. Pürüzlülük etkisi için ESA WorldCover uydusuna ait arazi kullanım haritasına göre belirlenen Manning değerleri girilmiş ve analizlerde 25 m çözünürlüklü çözüm ağları (mesh) kullanılmıştır. Gerçekleştirilen üç farklı analiz sonuçları karşılaştırıldığında; taşkın hidrograflarının üç modelde de birbirine yakın olduğu, maksimum su seviye değerlerinde SRTM ile Harita Genel Müdürlüğü arasında %92.8, ALOS-PALSAR ile Harita Genel Müdürlüğü arasında ise % 92.4'lük bir uyumun gözlemlendiği belirtilmiştir. En olumsuz senaryo çıkan Harita Genel Müdürlüğünden elde edilen SAM verisine göre gerçekleştirilen analizde, 12 yerleşimin ve Batman Havaalanı'nın taşkın sularından etkileneceği ve bölgedeki 10985 kişinin risk altında olduğu görülmüştür. Ayrıca analiz kapsamında taşkın tehlike haritaları da elde edilerek yerleşimlerdeki su hızları ve taşkın sularının ulaşma süreleri belirlenmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Çalışma Bölgesi Hakkında Genel Bilgiler

Bu tez çalışmasında çalışma bölgesi olarak, Türkiye'nin en doğusunda bulunan Iğdır İli, Tuzluca İlçesi'ne yapılması planlanan Tuzluca Barajı ve HES Projesi alanı seçilmiştir. Baraja ait lokasyon haritası Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9. Tuzluca Barajı ve HES projesinin lokasyon haritası

Tuzluca İlçesi, 1254 km²'lik alanıyla Iğdır ilinin en büyük ilçesi olup Ağrı, Kars ve Ermenistan ile sınırı bulunmaktadır. Uygun iklim ve toprak yapısı sebebiyle yerleşim tarihi çok eskilere dayanan Tuzluca İlçesi, su kaynakları bakımından da zengin olup ilçenin kuzeyinden Aras Nehri ve Arpaçay geçmektedir (Şimşek, 2017). 81 köy yerleşkesinin bulunduğu ilçenin nüfusu Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) 2022 yılı verilerine göre 22699'dur.



Şekil 10. Tuzluca ilçe merkezi (URL-5, 2023)

Karasal iklim etkisinde olan ilçenin yıllık ortalama sıcaklığı 11.1°C iken düşen yıllık ortalama yağış miktarı 326.2 mm 'dir. Genel olarak dağlık alanların bulunduğu ilçede yüksek rezervli tuz mağaraları bulunmaktadır. Günlük 100 tona yaklaşan üretimin büyük bir kısmı karayollarında buzlanma çalışmaları kapsamında kullanılmakla birlikte tarımsal işletmelerde, hayvansal işletmelerde, deri sanayisinde ve gıda sektöründe de kullanılmaktadır (Güngörmez, 2015).



Şekil 11. Tuzluca Tuz Mağaraları

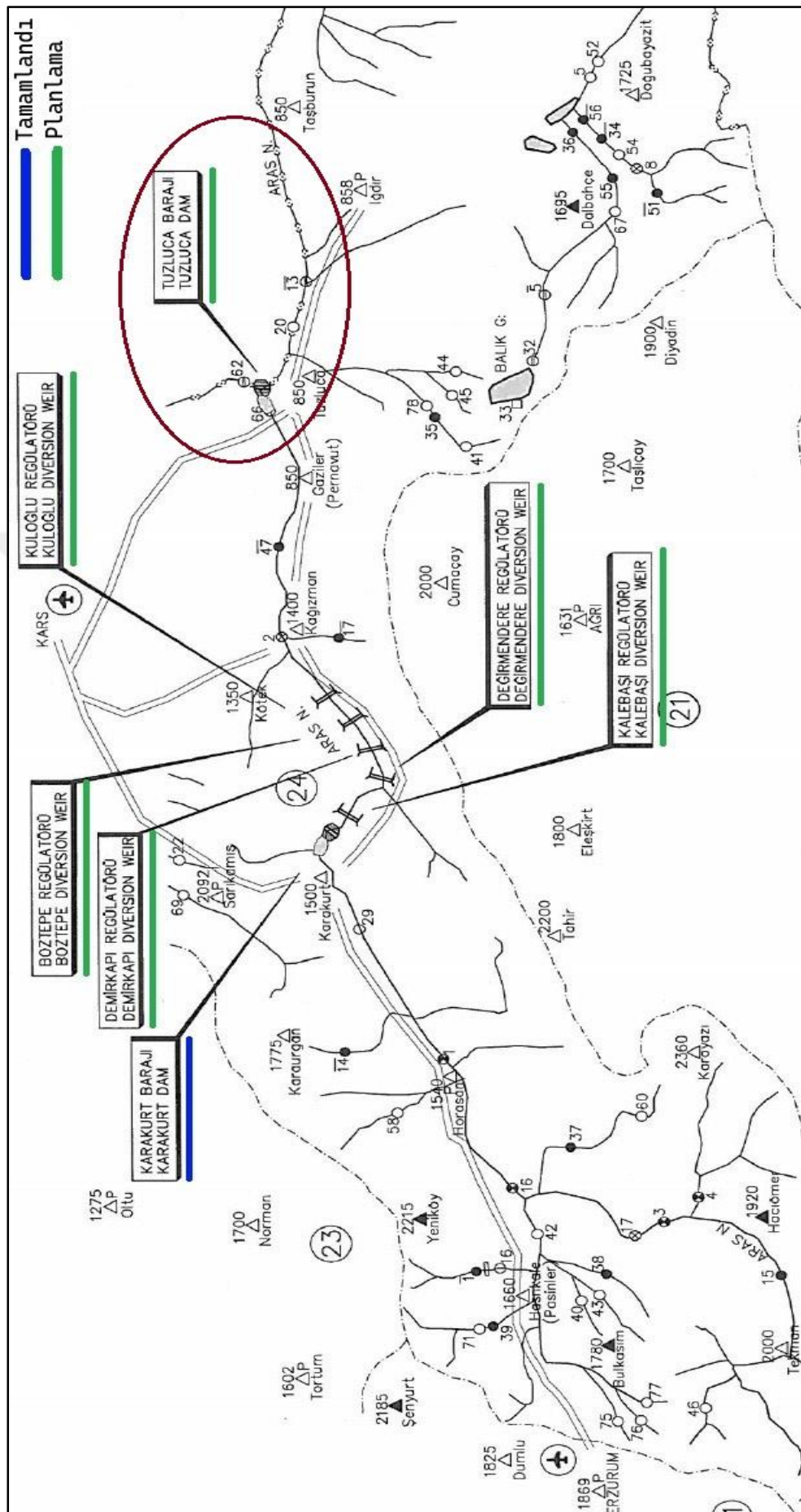
İlçenin bitki örtüsü büyük oranda step özellik göstermekle birlikte ilçe merkezi ve köylerde yetiştirilen meyve ağaçları bitki örtü görüntüsünü değiştirebilmektedir. Tuzluca arazisinde genel itibariyle bazaltik ve kahverengi, tarımsal üretim açısından verimli topraklar bulunmaktadır. Tuzluca ilçesinin ekonomik yapısı tarım, hayvancılık ve madencilğe dayanmaktadır. Iğdır kaysısının yanı sıra elma, üzüm, ceviz, domates, mısır ve yonca yetiştirilerek ülkemizin bir çok bölgesine satılmaktadır. Coğrafi yapısı nedeniyle bölge hayvanları için önemli yaylaları bulunmakta ve yoğun bir şekilde yaylacılık faaliyetleri yapılmaktadır (AK-TEL, 2015).

Su kaynakları bakımından zengin olan ilçenin en önemli su kaynağı Aras Nehri'dir. Bingöl Dağları'nın yamaçlarından doğan nehir, Tekman Yaylası ve Pasinler Havzası'nın sularını toplayarak Erzurum-Kars platosundan Ermenistan sınırlarına ulaşmakta, Azerbaycan'da Kura nehri ile birleşerek Hazar Denizi'ne dökülmektedir. Türkiye-Azerbaycan ve Türkiye - Ermenistan sınırlarını oluşturan 1072 km uzunluğundaki nehrin 548 km'si ülkemiz sınırları içerisindedir (Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, 2019).

3.2. Tuzluca Barajı ve Hidroelektrik Santral Projesi

Tuzluca Barajı ve HES projesi, Iğdır İli, Tuzluca İlçesinde yapılması planlanmakta olan sulama suyu sağlama ve hidroelektrik enerji üretimi amaçlı bir projedir. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı tarafından 960,175,000 TL proje bedeliyle 2023 yılı yatırım programına alınmıştır. İlgili projenin yıl içinde ihalesinin tamamlanıp inşaatının başlayacağı öngörülmektedir.

Aras Nehri üzerine kurulacak olan Tuzluca Barajı ve HES projesi, Karakurt Barajı'ndan sonra Aşağı Aras Havzası için planlanan en büyük projedir. Bölgede sulama suyu ihtiyacını karşılamak ve hidroelektrik enerji üretmek için Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü tarafından planlanan, Horasan'dan başlayıp Ermenistan sınırına kadar uzanan Aşağı Aras Havzası Projeleri kapsamında iki baraj ve beş regülatör projesi planlanmıştır (AK-TEL, 2015).



Şekil 12. Aşağı Aras Havzası Projeleri (EİE ve Dolsar, 2004).

Iğdır’da verimli toprak yapısı ve ılıman iklim koşulları sayesinde birçok çeşit sebze ve meyve yetiştiriciliği yapılabilmektedir. Şehir pamuk, şeker pancarı, kayısı gibi ürünler yetiştirmesi bakımından “Doğu’nun Çukurovası” olarak adlandırılmasına rağmen yeterli sulama imkanlarının bulunmamasından dolayı potansiyelinin altında bir rekolte ve üretim çeşitliliğine sahiptir. Türkiye’nin en az yağış alan bölgelerinden biri olan Iğdır Ovası’nda Tuzluca Barajı ve HES projesinin yapılmasıyla rezervuarda depolanacak suyun, tarım arazilerinin Temmuz ve Ağustos aylarındaki 255 milyon m³’lük sulama suyu ihtiyacını karşılaması beklenmektedir (AK-TEL, 2015).

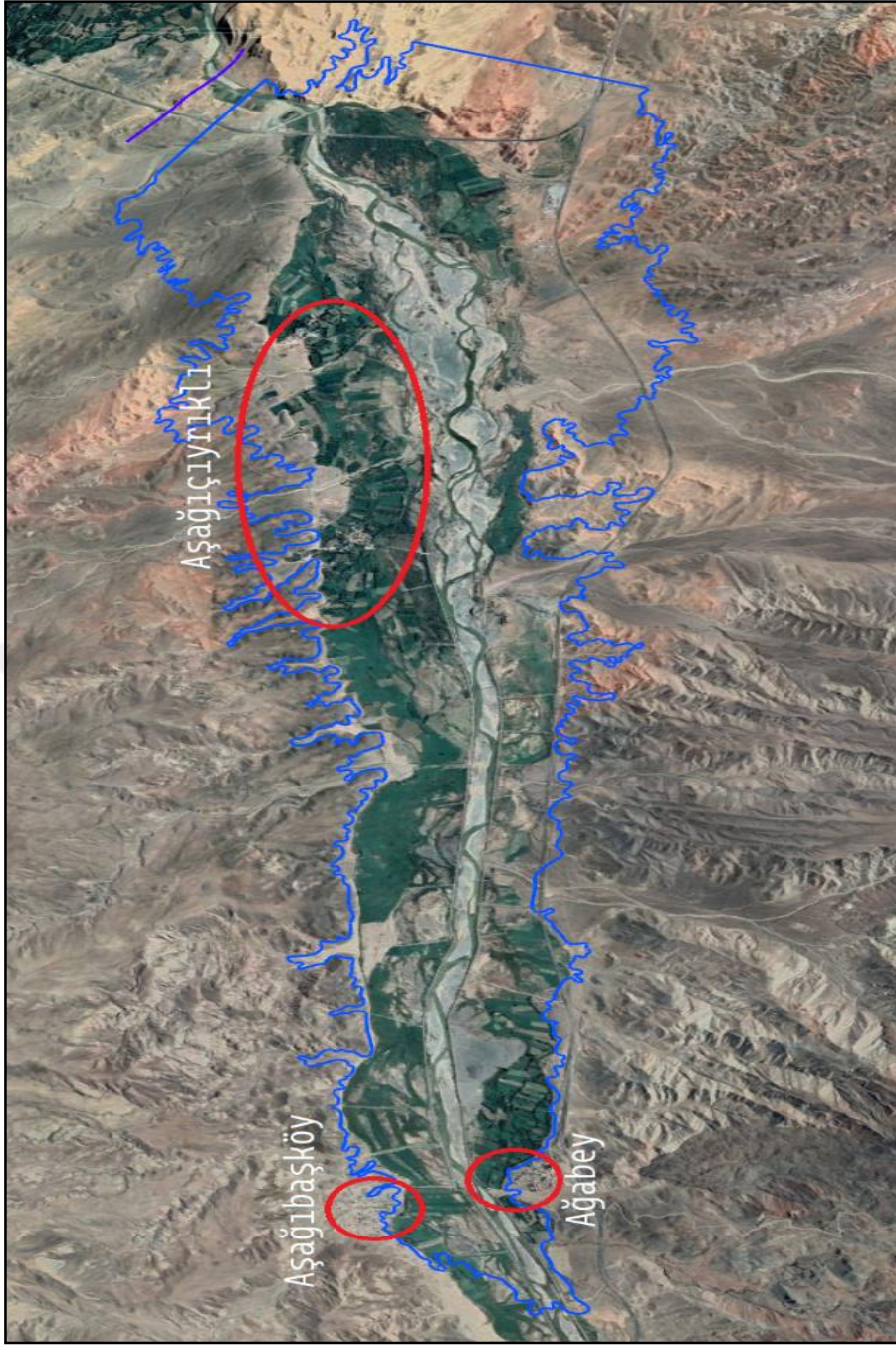
Tuzluca Barajı ve HES, talvegden 45 m yükseklikte, kil çekirdekli kaya dolgu tipindedir. 265 milyon m³ rezervuar hacmine sahip olacak barajın sulama faydası yanında 20 MW’lık kurulu gücüyle hidroelektrik enerji üretmesi planlanmaktadır. Tuzluca Barajı ve HES’in yeterli kapasiteyle çalışması durumunda yıllık ortalama 117.10 GWh enerji üretmesi beklenmektedir (AK-TEL, 2015).

Barajın yapılmasıyla Iğdır İli Tuzluca İlçesi’ne bağlı Aşağıçıyıklı ve Ağabey köyleri ile Kars İli Digor İlçesi’ne bağlı Aşağıbaşköy köyü rezervuar altında kalacaktır. Su altında kalacak köylerle ilgili kamulaştırma maliyetleri ve yeniden yerleşim planları hazırlanmıştır. Söz konusu yerleşimlere ait nüfus verileri aşağıda Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3. Su altında kalacak yerleşimlerin nüfus bilgileri (TÜİK, 2022).

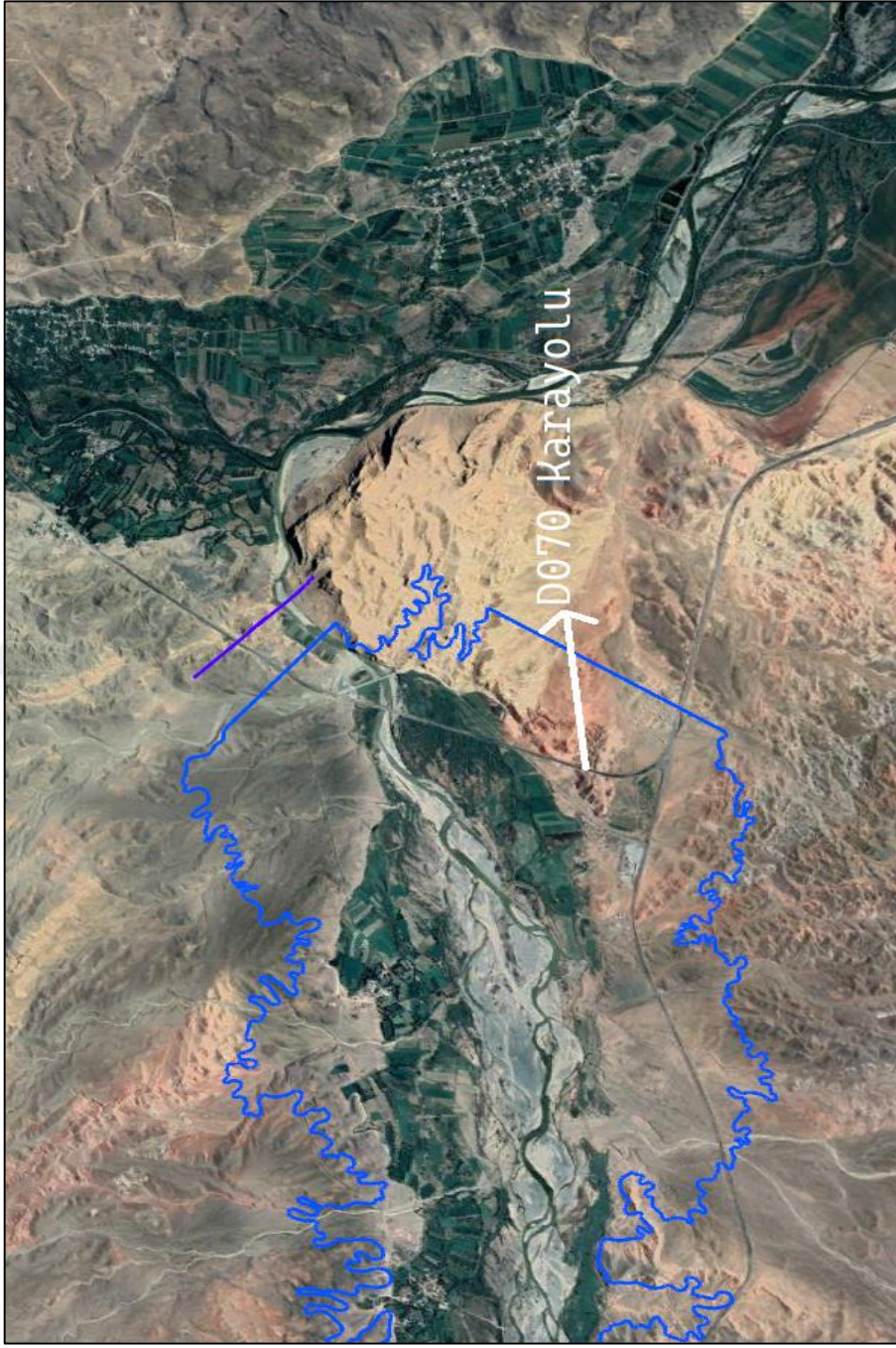
İl ve İlçe	Köy	Nüfus
Iğdır - Tuzluca	Ağabey	67
Iğdır - Tuzluca	Aşağıçıyıklı	143
Kars - Digor	Aşağıbaşköy	117

Tuzluca Barajı’nın yapılmasından etkilenecek yerleşimlere ait uydu görüntüleri aşağıda Şekil 13’te verilmiştir. Mavi sınırlar rezervuar alanını temsil etmektedir.



Şekil 13. Tuzluca Barajı rezervuarından etkilenecek yerleşimler

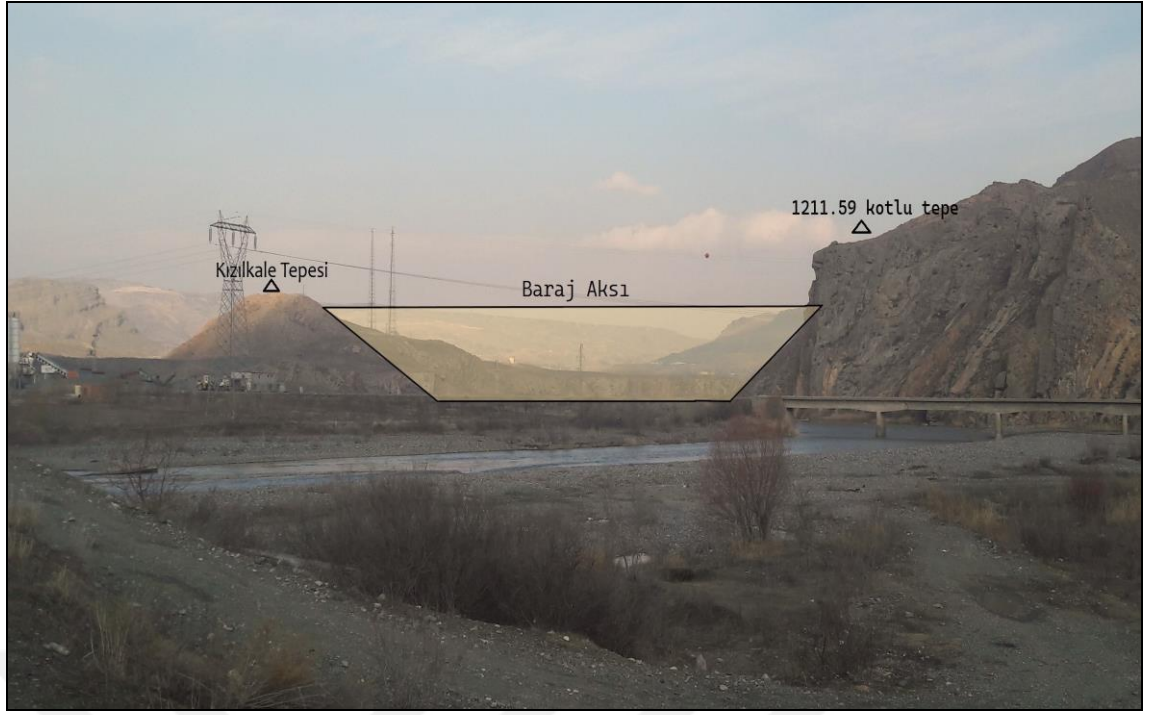
Projenin yapılmasıyla birlikte Iğdır-Digor-Kars karayolu sular altında kalacaktır. Bölgeye ulaşımın yeniden sağlanması için Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından gerekli planlamaların yapıldığı ve ihalesinin 2023 yılında yapılarak çalışmalara başlanılacağı öğrenilmiştir. Karayolları 18. Bölge Müdürlüğü'nden edinilen bilgilere göre yeni ulaşım için 11.5 km'lik yol, 400 m uzunluğunda viyadük, 375 m uzunluğunda tünel ve 120 m uzunluğunda yeni bir köprü düşünülmektedir. Barajın yapılmasıyla su altında kalacak Iğdır-Digor-Kars (D070) karayoluna ait uydu görüntüsü aşağıda Şekil 14'te gösterilmektedir.



Şekil 14. Iğdır-Digor-Kars (D070) karayoluna ait uydu görüntüsü

Tuzluca Barajı'nın gövdesi için planlanan konum, Iğdır-Digor-Kars karayolu üzerinde, Aşağıçıyıklı köy girişinin 400 m mansabında bulunmaktadır. Baraj için düşünülen konum, Aras Nehri'nin Arpaçay Nehri ile birleşip ülkemiz sınırlarını terk etmeden hemen önceki bölgedir. 955 m talveg kotundaki Tuzluca Barajı aksı, 1031 m kotlu Kızkale Tepesi ile 1212 m kotlu tepeyi birleştiren çizgidir.

Tuzluca Baraj gövdesinin aksı için belirlenen alan aşağıda Şekil 15'te gösterilmektedir.



Şekil 15. Tuzluca Barajı aks yeri

Yapılan jeolojik araştırmalara göre baraj yeri kayasının geçirimsiz bir yapıda olduğu ve enjeksiyon perdesi yapıldıktan sonra baraj gövdesinden herhangi bir su kaçağı ihtimali bulunmamaktadır. Yine yapılan çalışmalarda baraj yerinin duraylılığı noktasında herhangi bir problemin bulunmadığı belirtilmiştir. Baraj inşaatında kullanılacak malzeme temini için ise baraj bölgesine yakın 3 adet geçirimli, 2 adet geçirimsiz ve 2 adet kaya malzeme ocağı belirlenmiştir (AK-TEL, 2015).

Tuzluca Barajı ve HES projesine ait karakteristik bilgiler aşağıda Tablo 4'te verilmektedir.

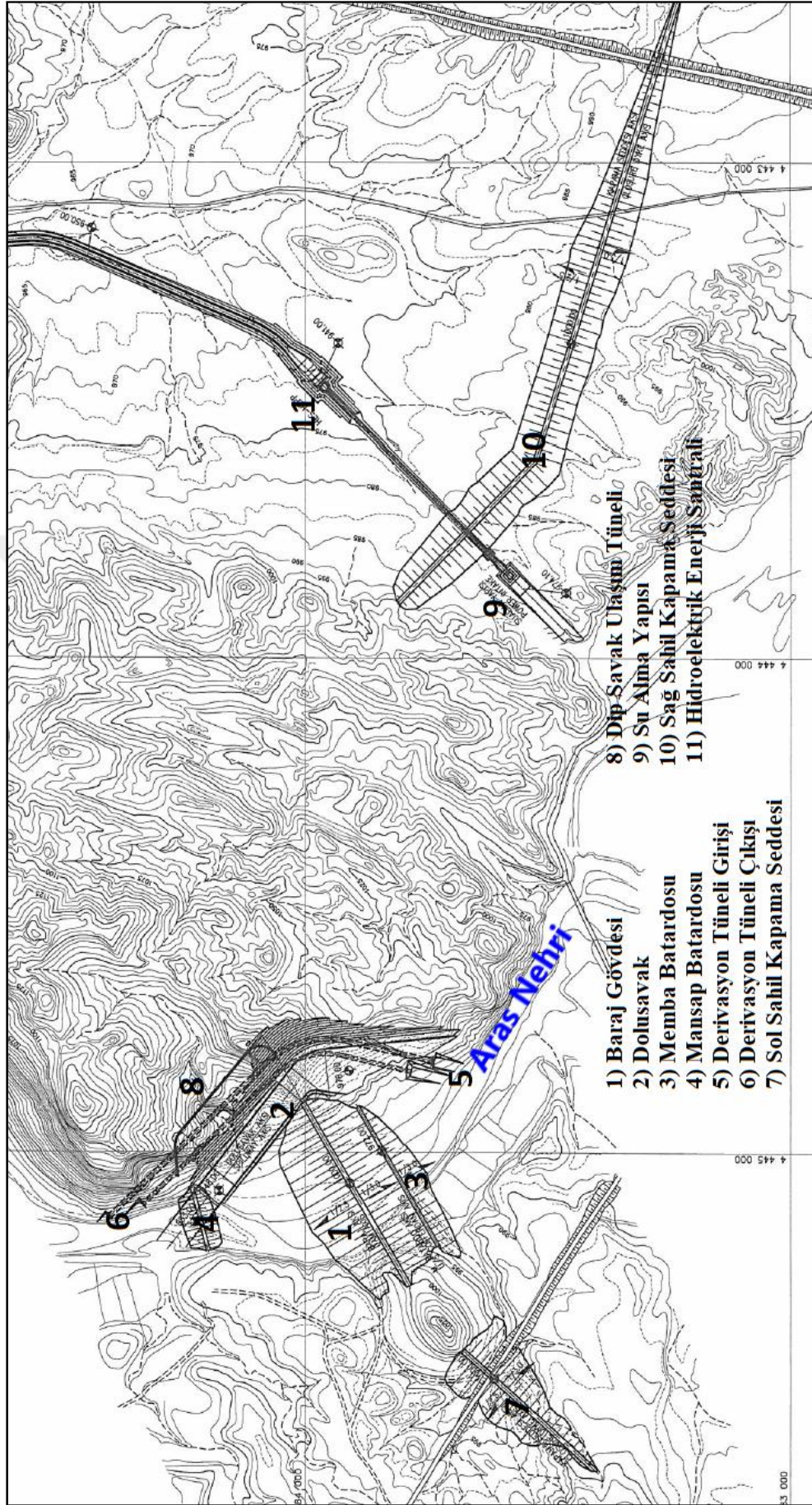
Tablo 4. Tuzluca Barajı ve HES projesine ait karakteristik bilgiler (AK-TEL, 2015).

Kalemler	Miktar/Özellik
Baraj	
Tipi	Kil çekirdekli kaya dolgu
Kret Kotu	1000 m
Kret Genişliği	10 m
Kret Uzunluğu	550 m
Talveg Kotu	955 m
Talvegden Yükseklik	45 m
Baraj Gövdesi Dolgu Hacmi	2 milyon m ³
Memba Şevi	3/1
Mansap Şevi	2.5/1

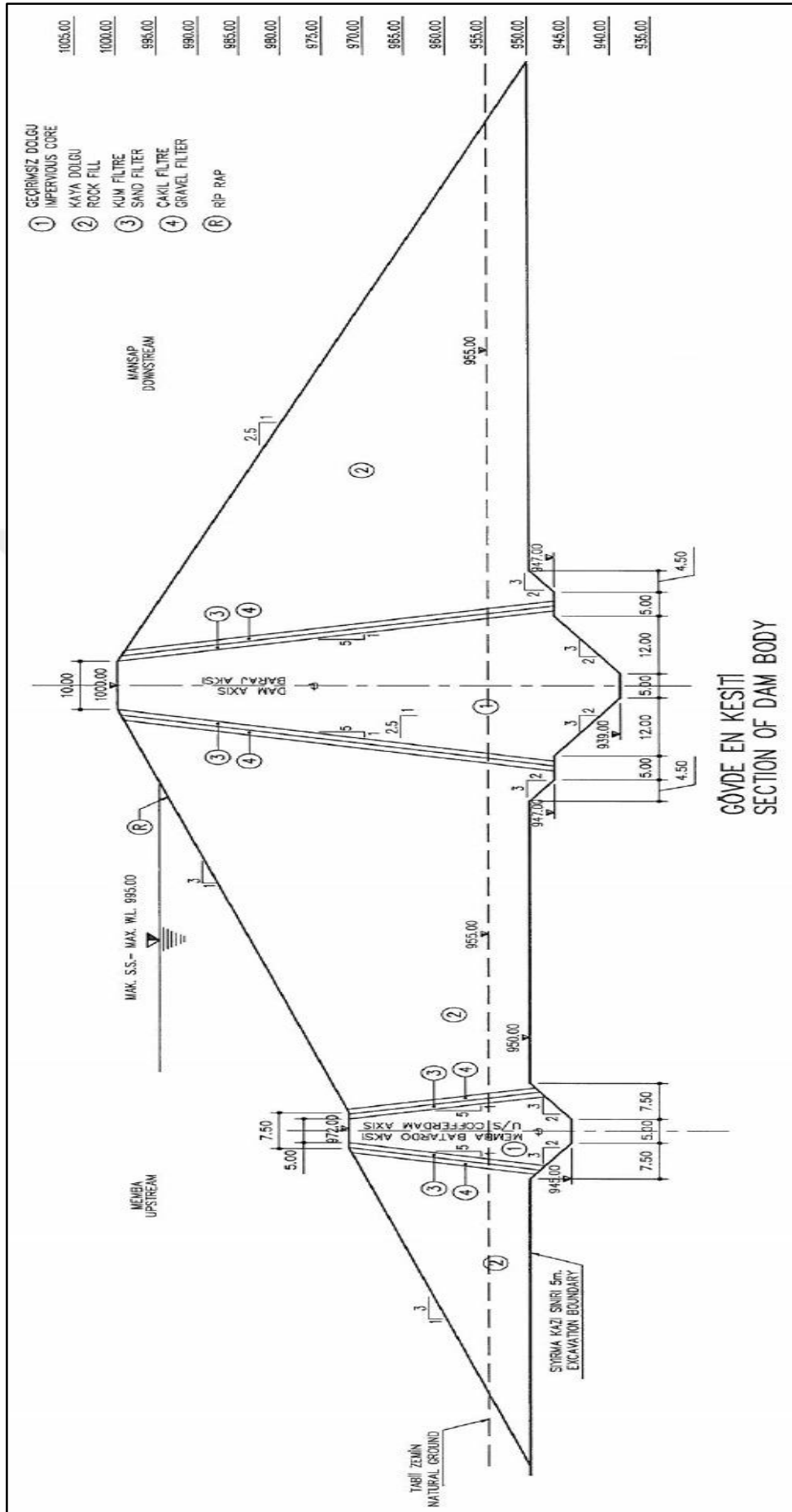
Tablo 4. (devamı)

Rezervuar	
Maksimum İşletme Kotu	995 m
Minimum İşletme Kotu	978.5 m
Toplam Rezervuar Hacmi	265 milyon m ³
Aktif Rezervuar Hacmi	195 milyon m ³
Ölü Rezervuar Hacmi	70 milyon m ³
Maksimum Su Kotunda Rezervuar Alanı	16.5 km ²
Rezervuar Uzunluğu	11.5 km
Ortalama Rezervuar Genişliği	1.44 km
Yıllık Ortalama Akım	1.69 milyar m ³
Dolu Savak Yapısı	
Tip	Radyal kapaklı
Dolu Savak Hidrograf Pik Debisi	5420.10 m ³ /sn
Dolu Savak Eşik Kotu	980 m
Dolu Savak Kapak Boyutları	10 m x 16 m
Dolu Savak Kapak Sayısı	4
Derivasyon Yapısı	
Derivasyon Tünel Sayısı	2
Derivasyon Tüneli Kapasitesi	1018 m ³ /sn
Derivasyon Tüneli Çapı	8 m
1. Tünel Uzunluğu	675.15 m
2. Tünel Uzunluğu	815.66 m
Batardo Yapısı	
Tip	Kaya Dolgu
Memba Batardosu Kret Kotu	972 m
Mansap Batardosu Kret Kotu	965 m
Memba Batardosu Şevi	3/1
Mansap Batardosu Şevi	2.5/1
Hidroelektrik Enerji Santrali	
Ünite Sayısı	2
Ünite Gücü	10 MW
Toplam Kurulu Güç	20 MW
Kapasite Faktörü	0.67
Üretilecek Firm Enerji	72.92 GWh
Üretilecek Sekonder Enerji	44.18 GWh
Üretilecek Toplam Enerji	117.10 GWh
Cebri Boru Uzunluğu ve Çapı	540 m / 5 m
Türbin Tipi	Francis

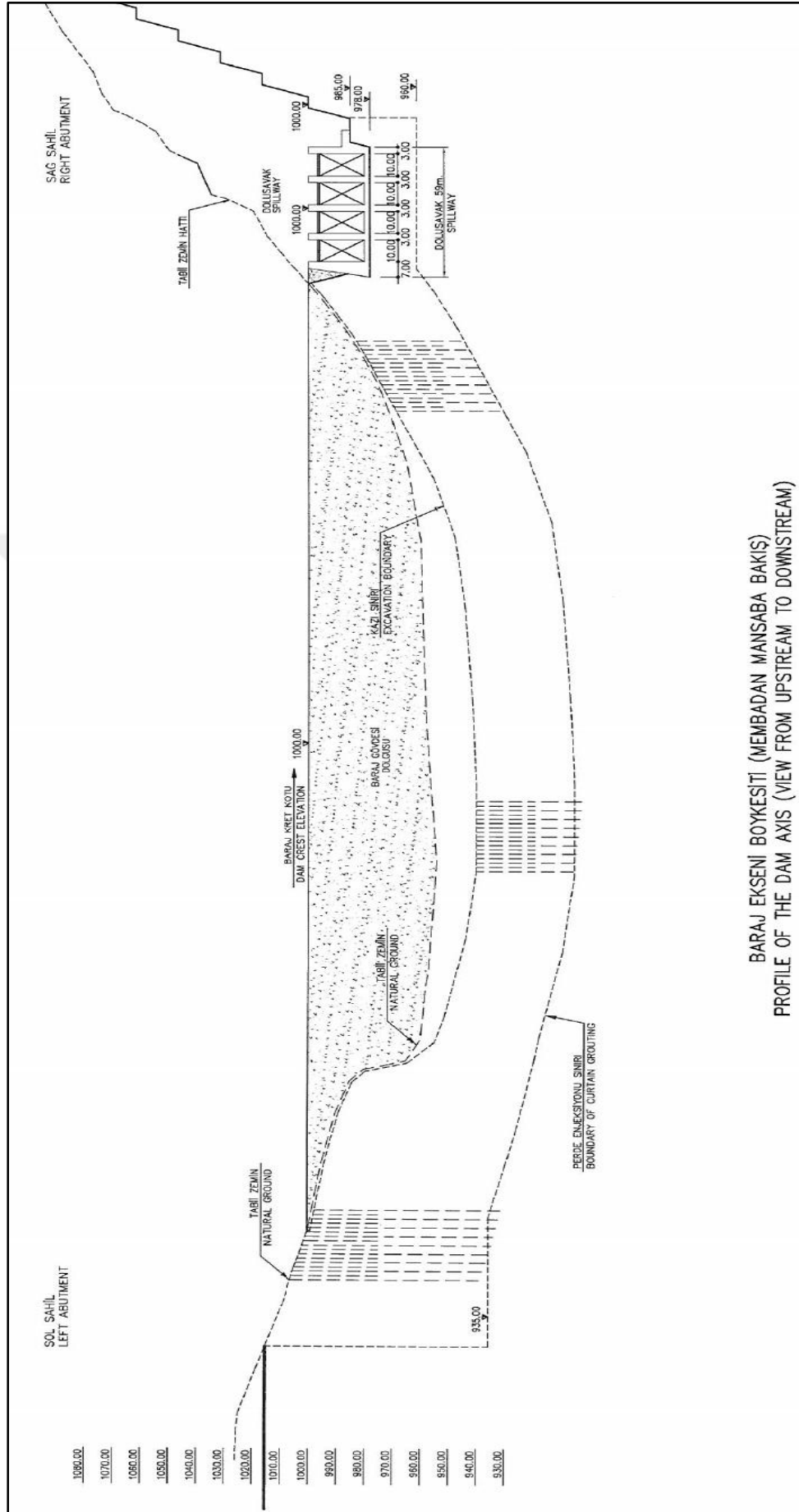
Tuzluca Barajı ve HES projesine ait genel yerleşim planı ile baraj gövdesi enkesit ve boykesit planları sırasıyla aşağıda Şekil 16, 17 ve 18’de verilmiştir.



Şekil 16. Tuzluca Barajı ve HES projesinin genel yerleşim planı (AK-TEL, 2015; Akgün 2018).



Şekil 17. Tuzluca Barajı gövdesi en kesiti (EİE ve Dolsar, 2004)

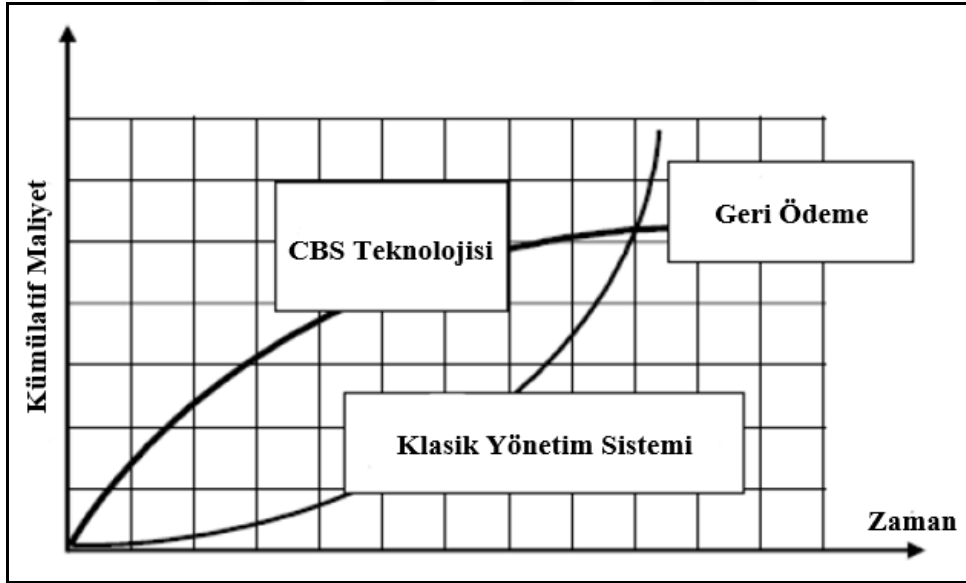


Şekil 18. Tuzluca Barajı gövdesi boy kesiti (EİE ve Dolsar, 2004).

3.3. Coğrafi Bilgi Sistemleri ve Arazi Verilerinin Elde Edilmesi

Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS), yeryüzündeki fiziki ve beşerî durumları konu alarak ihtiyaç doğrultusunda coğrafi verilerin toplanması, saklanması, işlenmesi, analiz edilmesi ve görüntülenmesine yarayan çeşitli bileşenlerden oluşmuş sistemdir. CBS; veri, yazılım, donanım, personel ve yöntem olmak üzere beş ana bileşenden oluşmaktadır. CBS'nin bilgi karmaşasının önlenmesi, verilerin daha hızlı ve güvenli bir şekilde aktarılabilmesi, bilgilerde tutarsızlık bulunması durumunda hızlı bir şekilde güncelleme imkanının bulunması ve istenen kriterlere göre sınıflandırma ve analiz yapılması bakımından geleneksel haritacılık yöntemlerine kıyasla birçok faydası bulunmaktadır. (Googchild, 2009; Erdoğan, 2017; Lü vd., 2018).

Söz konusu avantajlar zamanı, maliyeti ve hata yapma olasılığını ciddi ölçüde düşürmektedir. İnan (2006), geleneksel yönetim sistemine göre ilk aşamada daha yüksek maliyetli olan CBS'nin uzun vadede daha ekonomik olduğunu Şekil 19'daki grafikte göstermektedir.



Şekil 19. CBS ve klasik yönetim sisteminin zamana göre kümülatif maliyeti (İnan, 2006)

Bilgisayar teknolojisindeki ilerlemelerle birlikte fen bilimlerinden sosyal beşerî bilimlere kadar hemen tüm alanlarda CBS teknolojisinden faydalanılmaktadır. Su ve atıksu kuruluşları tarafından kullanılan verilerin %80'inden fazlasının coğrafi tabanlı olduğu düşünüldüğünde özellikle su kaynakları mühendisliğinde CBS'den sıkça yararlanılmaktadır. Su yapıları, su kalitesi, havza çalışmaları, taşkın risk analizleri, baraj yıkılmaları ve birçok konu özelinde yapılmış çalışmalarda CBS etkin bir rol oynamaktadır. (Shamsi, 2002; Tona vd., 2022).

Tuzluca Barajı ve HES projesine ait arazinin modellenebilmesi için de CBS teknolojisinden yararlanılmıştır. Bu kapsamda baraj bölgesine ait 12.5 m çözünürlüğündeki sayısal yükseklik modeli (DEM), ALOS uydusuna ait verilerden elde edilmiştir.

2006 yılında Japonya Havacılık ve Uzay Araştırma Ajansı (JAXA) tarafından fırlatılan ALOS uydusu, harita bilimi, kaynakların araştırılması, afet takibi ve çevresel değişikliklerin incelenmesi gibi çalışmalara katkı sağlamak için geliştirilmiştir. Üzerinde bulunan PALSAR isimli radarla her türlü hava koşulunda 24 saat çekim yapabilen ALOS uydusu; Antartika, Grönland, İzlanda ve Kuzey Avrasya bölgeleri hariç tüm karasal alanların 12.5 m ve 30 m çözünürlüklü harita ürünlerini sunabilmektedir (Sena vd., 2020).

ALOS uydusuna ait DEM verilerinin güvenilirliği birçok çalışmada kanıtlanmış olup Khojeh vd., (2022) ile Uysal ve Taşçı (2023) tarafından yapılan iki farklı çalışmada taşkın risk analizleri için test edilmiştir. Her iki çalışmada da yüksek oranda doğruluk elde edilmiş ve karşılaştırıldığı diğer uydusal kaynaklardan elde edilen DEM verilerine göre daha başarılı olmuştur.

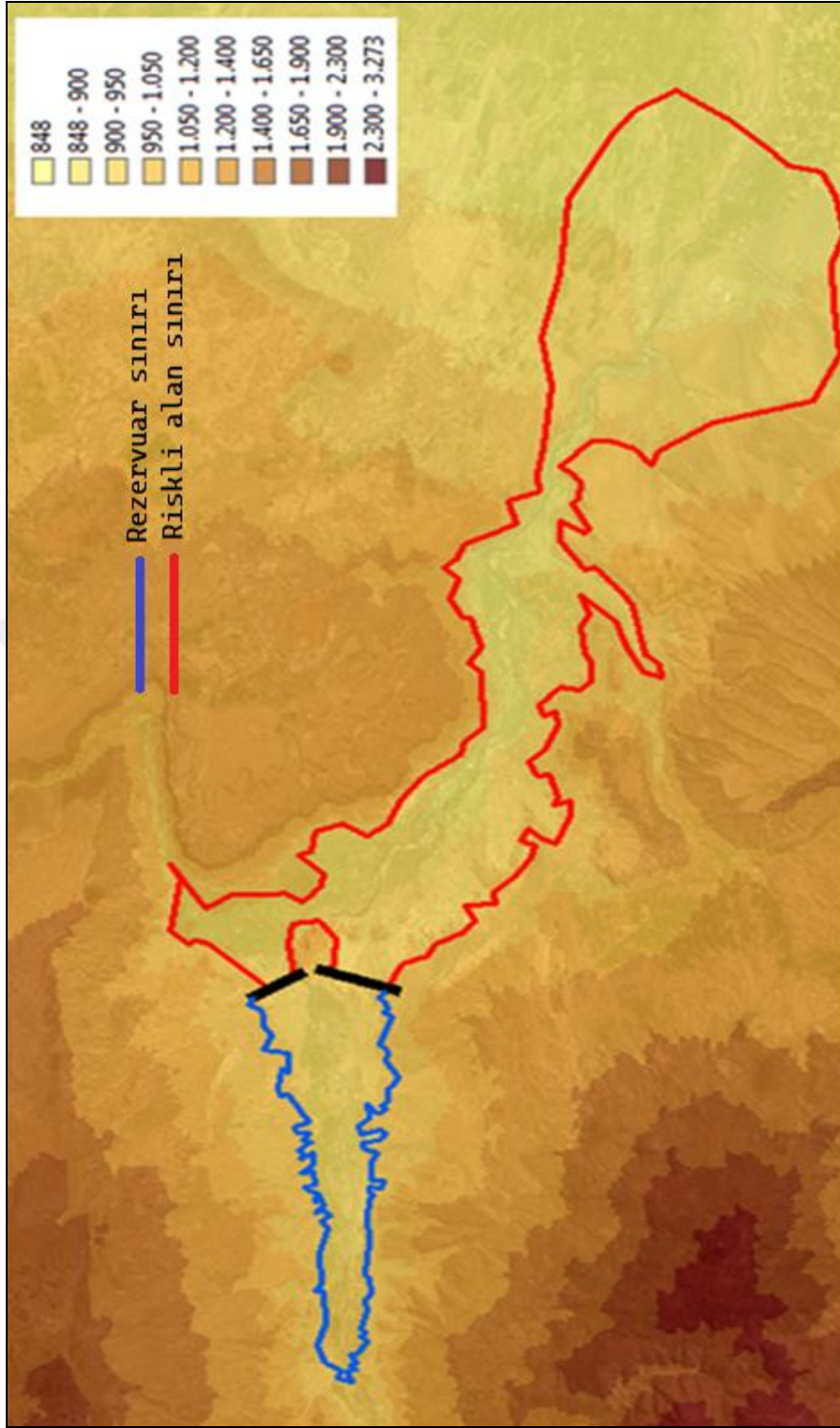
Çalışma kapsamında <https://search.asf.alaska.edu> sitesinden Tuzluca Barajı ve HES projesi bölgesinin ALOS uydusuna ait 12.5 m çözünürlüklü DEM verisi indirilmiştir. İndirilen veriler üzerinde ESRI firması tarafından geliştirilen ArcGIS yazılımına aktararak gerekli kırpma işlemleri yapılmıştır.

3.4. Çalışma Alanı Sınırlarının Belirlenmesi

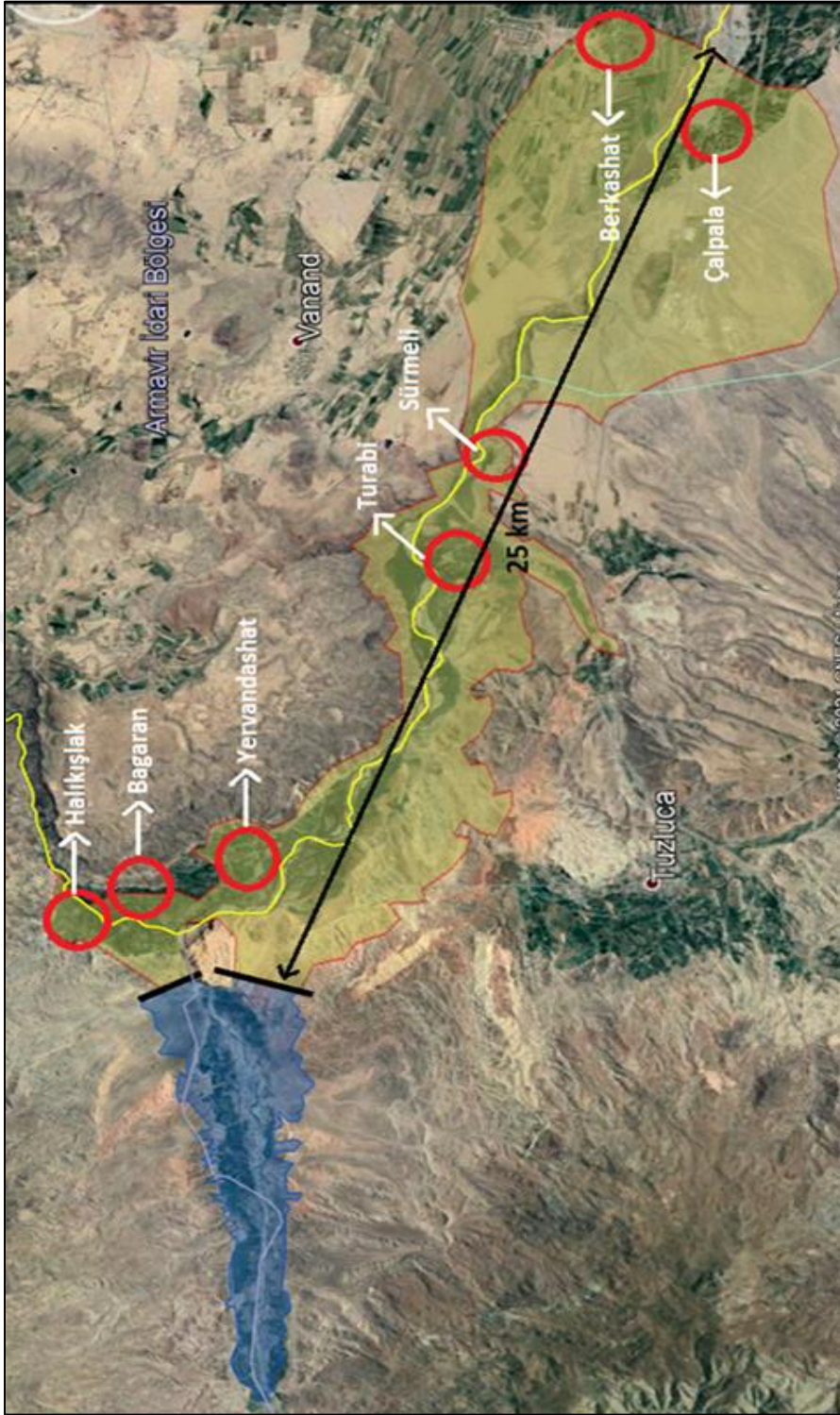
Çalışma alanı sınırlarının belirlenmesi için ArcGIS yazılımı ile bir ön çalışma yapılmıştır. Tuzluca Barajı ve HES Projesi Planlama Raporu ile ÇED Raporundan alınan bilgiler doğrultusunda baraj gövdesinin yeri ve rezervuar sınırları Sayısal Yükseklik Modeli (DEM) üzerine işlenmiştir.

Literatürdeki çalışmalar ve geçmiş baraj yıkılmaları üzerinde yapılan araştırmalar sonucunda; baraj aksından mansaba doğru 25 km mesafede, baraj kret kotundan (1000 m) düşük seviyedeki bölgeler riskli kabul edilerek çalışma alanı olarak belirlenmiştir. Söz konusu kabul doğrultusunda ArcGIS yazılımı üzerinde yükseklik analizi yapılarak bu bölgeler sayısal yükseklik modeli üzerine işlenmiştir. Daha sonra sayısal yükseklik modeli Google Earth'a aktararak uydu görüntüleriyle incelenme imkânı da sağlanmıştır.

Çalışma alanı sınırlarının işlendiği sayısal yükseklik modeli ve uydu görüntülerine ait görseller aşağıda Şekil 20 ve 21'de sunulmuştur.

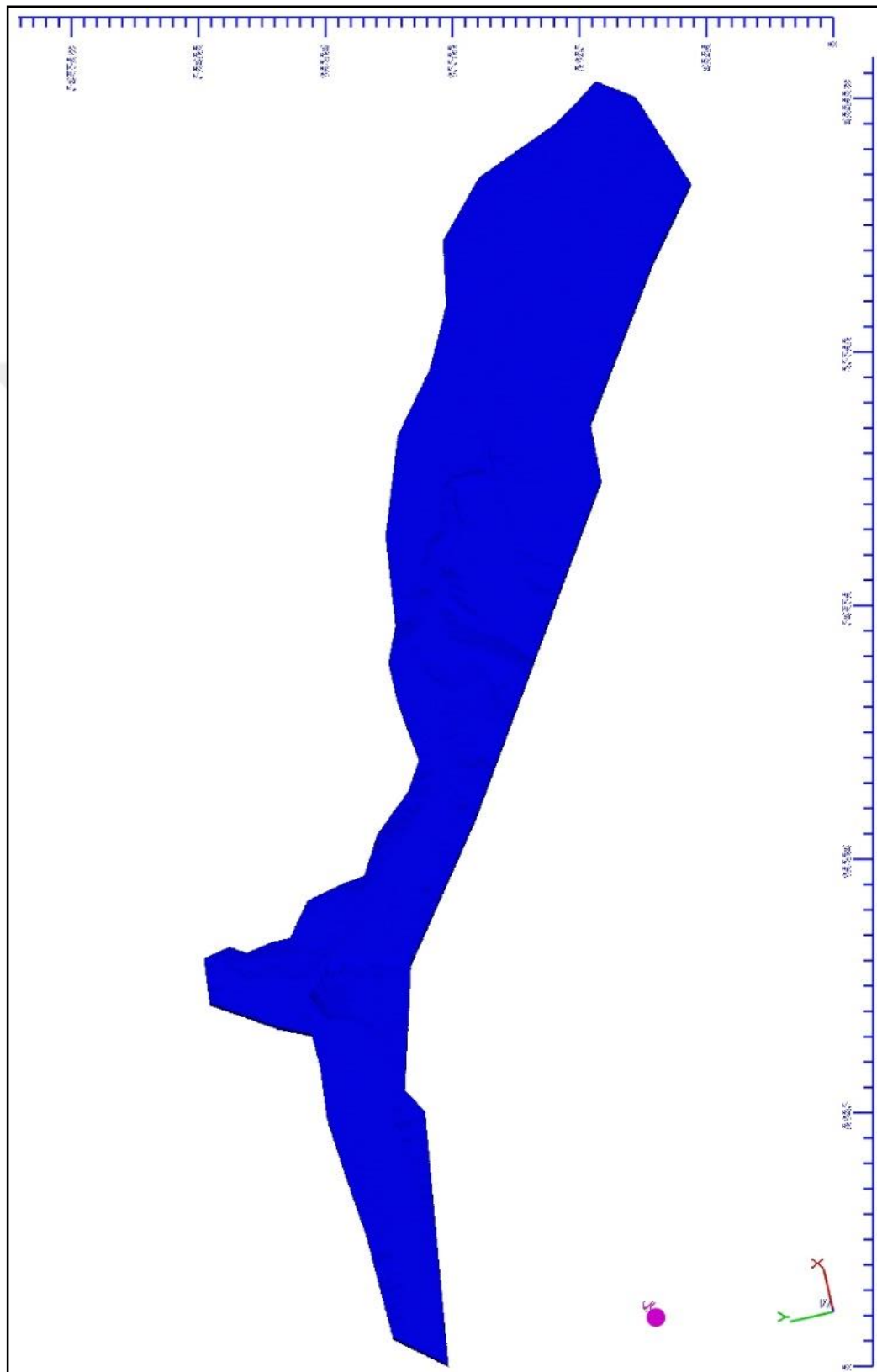


Şekil 20. Çalışma bölgesine ait sayısal yükseklik modeli



Şekil 21. Çalışma bölgesine ait uydu görüntüsü

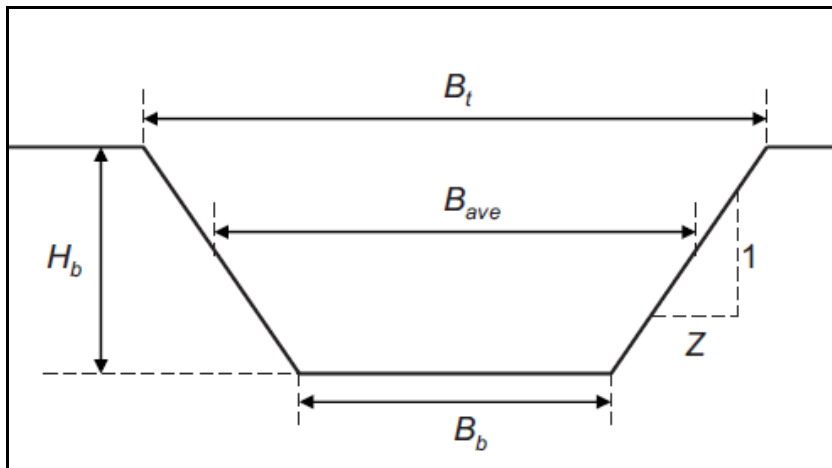
Çalışma sınırlarına ait uydu görüntüleri incelendiğinde ülkemiz sınırlarına ait Halıkışlak, Turabi, Sürmeli ve Çalpala köyleri ile Ermenistan topraklarında bulunan Bagaran, Yervandashat ve Berkhasat köyleri risk altındaki yerleşimler olarak tespit edilmiştir.



3.5. Gedik Parametrelerinin Belirlenmesi

Baraj yıkılmaları, sebebi ne olursa olsun (üstünden su aşma, borulanma, kayma, temel problemleri vs.) baraj gövdesinde başlayan gediklenmenin büyümesiyle gerçekleşmektedir (Xiong, 2011). Aşırı yağışlar veya yetersiz dolu savak nedeniyle barajın üstünden su aşması şeklinde gerçekleşen yıkılma durumunda, gedik başlangıcı tipik olarak baraj kretinde meydana gelmekte ve genellikle yamuk şeklini alarak aşağıya doğru büyüme eğilimi göstermektedir. Öte yandan, dolgu barajlarda sıklıkla görülen borulanma kaynaklı yıkılma durumunda ise gedik baraj gövdesinin herhangi bir noktasında başlayıp hem enine hem de boyuna yönde büyüyerek yamuk veya dikdörtgen bir şekil oluşturmaktadır. Bu sebeple baraj yıkılma sürecini anlamak ve süreci sayısal olarak tanımlayabilmek için gedik parametrelerinin tahmin edilmesi önemli bir aşamadır (Karakaya, 2005; Ruan vd., 2021).

Baraj yıkılmalarında gedik parametreleri genel olarak geometrik ve hidrografik süreçler olarak ikiye ayrılmaktadır. Geometrik parametreler; gedik yüksekliği (H_b), gedik üst genişliği (B_t), gedik ortalama genişliği (B_{ave}), gedik alt genişliği (B_b) ve gedik yan eğimleridir (Z). Geçmiş baraj yıkılmalarının büyük bir kısmında gedik geometrisinin trapez olduğu gözlemlenmiştir. Hidrografik parametreler ise; çıkış pik debisi ve baraj yıkılma süresidir. Baraj yıkılma süresi, gediklenmenin başlangıcından bitişine kadar olan süre olarak tanımlanmaktadır. Geçmişteki baraj yıkılması olaylarında can kaybının mevcut tahliye süresiyle doğrudan ilişkili olduğunu görülmüştür. (Singh ve Snorrason 1984; Xu ve Zhang, 2009).



Şekil 23. Gedik parametreleri (Xu ve Zhang, 2009).

Baraj yıkılma analizlerinde en önemli belirsizliklerden biri gedik parametrelerinin tahmin edilmesidir. Çalışma kapsamında literatürde sıkça kullanılan, MacDonald ve

Langridge-Monopolis (1984), Bureu of Reclamation (1988), Von Thun ve Gillette (1990), Froehlich (1995), Froehlich (2008), Xu ve Zhang (2009) tarafından geçmiş baraj yıkılmalarına ait güvenilir veriler üzerinden yapılan regresyon ilişkileri sonucunda geliştirilen yöntemler incelenmiş ve Tuzluca Barajı için uygulanmıştır.

Söz konusu yöntemlerde kullanılan Tuzluca Barajı'na ait karakteristik bilgiler aşağıda Tablo 5'te özetlenmiştir.

Tablo 5. Tuzluca Barajı'na ait gedik karakteristikleri

Tuzluca Barajı'na Ait Gedik Karakteristikleri	
Gedik tabanından itibaren su yüksekliği (h_w)	45 m
Baraj yüksekliği (h_d)	45 m
Rezervuardaki su hacmi (V_w)	265 milyon m ³
Kret genişliği (C)	10 m
Memba şev eğimi (Z_1)	3/1
Mansap şev eğimi (Z_2)	2.5/1

İlk yöntem olarak MacDonald ve Langridge-Monopolis (1984) tarafından geliştirilen yöntem uygulanmıştır. MacDonald ve Langridge-Monopolis (1984), geçmiş baraj yıkılmalarına ait verilerle istatistiki analizler yaparak, yıkılma sırasında oluşacak gedik geometrisi, yıkılma süresi ve çıkış pik debisinin tahmini için istatistiki ilişkiler geliştirmişlerdir. Rezervuar hacmi, yıkılma şekli, dolgu malzemesinin aşınabilirlik derecesi, baraj yüksekliği, baraj kret genişliği ve memba-mansap şev eğimlerini kullanarak aşınan malzeme miktarı üzerinden baraj yıkılma parametreleri için tahmin yöntemleri geliştirmişlerdir (Washington, 2007; Colorado, 2010).

$$W_b = \frac{27V_{er} - H_b^2 (CZ_b + \frac{H_b Z_b Z_3}{3})}{H_b (C + \frac{H_b Z_3}{2})} \quad (\text{Eşitlik 25})$$

$$V_{er} = 0,714BFF^{0,852} \quad (\text{Eşitlik 26})$$

$$BFF = V_w h_w \quad (\text{Eşitlik 27})$$

$$Z_3 = Z_1 + Z_2 \quad (\text{Eşitlik 28})$$

$$T_f = 0,016V_{er}^{0,364} \quad (\text{Eşitlik 29})$$

Burada;

BFF: Gedik oluşum faktörü

W_b : Gedik taban genişliği (ft)

V_{er} : Aşınan gövde hacmi (yds³)
 H_b : Gedik yüksekliği (ft)
 C : Kret genişliği (ft)
 Z_b : Gedik şev eğimi
 Z_1 : Memba şev eğimi
 Z_2 : Mansap şev eğimi
 V_w : Rezervuardaki su hacmi (acre-ft)
 h_w : Gedik tabanından itibaren su yüksekliği (ft)
 T_f : Yıkılma süresi

Geçmiş baraj yıkılma verileri ve literatürdeki çalışmalar incelenerek gedik yüksekliği (H_b) değeri baraj yüksekliğine eşit, 45 m olarak kabul edilmiştir. Ayrıca MacDonald ve Langridge-Monopolis (1984), Z_b değerinin trapez gedikler için 2, dikdörtgen gedikler için 0 olarak alınabileceğini belirtmiştir. ÇED ve Planlama Raporlarından elde edilen Tuzluca Barajına ait karakteristik bilgiler, gerekli birim dönüşümleri yapılarak denklemlere uygulandığında $V_{er} = 1.76 \times 10^6$ yds³ olarak hesaplanmıştır. Üstünden su aşma sebepli yıkılma senaryosu için trapez, borulanma sebepli yıkılma senaryosu için dikdörtgen gedik oluşacağı kabulüyle, bu yöntemle göre her iki senaryo için hesaplanan gedik parametreleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 6. MacDonald ve LM (1984) yöntemine göre gedik parametreleri

	Üstünden Su Aşma	Borulanma
Gedik yüksekliği (H_b)	45 m	45 m
Gedik taban genişliği (W_b)	161 m	224 m
Gedik üst genişliği (B_t)	341 m	224 m
Yıkılma süresi (T_f)	3 saat	3 saat

İkinci yöntem olarak uygulanan Bureau of Reclamation (1988), yayınlamış olduğu bültende 21 adet dolgu baraj yıkılması üzerinde analizler yapmış; rezervuardaki su yüksekliğine bağlı olarak ortalama gedik genişliği, yıkılma süresi ve çıkış pik debisinin tahmini için ampirik formüller geliştirmiştir.

$$B_{ave} = 3h_w \quad (\text{Eşitlik 1})$$

$$T_f = 0.011B_{ave} \quad (\text{Eşitlik 2})$$

Buradaki eşitliklerde;

B_{ave} : Gedik orta genişliği (m),

T_f : Baraj yıkılma süresi (sa),

h_w : Su yüksekliği (m)

Tuzluca Barajı'na ait bilgiler ilgili yönteme uygulandığında;

$B_{ave} = 135$ m

$T_f = 1.5$ saat olarak elde edilmiştir.

Üçüncü yöntem olarak uygulanan Von Thun ve Gillette (1990), geçmiş yıllarda yıkılan ve yıkılma verileri belli olan 57 adet baraj üzerinde çalışarak baraj yıkılma parametrelerinin tahmini için ampirik formüller geliştirmiştir. Bu yöntemle baraj yüksekliği ve rezervuar hacmi üzerinden baraj malzemesinin aşınabilirlik durumuna göre iki farklı yıkılma süresi ve ortalama gedik genişliği hesaplanabilmektedir.

$$B_{ave} = 2.5h_w + C_b \quad (\text{Eşitlik 4})$$

$$T_f = B_{ave} / (4h_w + 61) \quad (\text{Yüksek aşınabilirlik}) \quad (\text{Eşitlik 5})$$

$$T_f = B_{ave} / 4h_w \quad (\text{Düşük aşınabilirlik}) \quad (\text{Eşitlik 6})$$

$$C_b = \begin{cases} 6.1 ; & V_w \times 10^{-6} < 1.23 \\ 18.3 ; & V_w \times 10^{-6} \leq 6.17 \\ 42.7 ; & V_w \times 10^{-6} \leq 12.3 \\ 54.9 ; & V_w \times 10^{-6} \geq 12.3 \end{cases}$$

Burada;

V_w : Rezervuar hacmi (m^3)

h_w : Su yüksekliği (m)

B_{ave} : Gedik ortalama genişliği (m)

C_b : Rezervuar hacmine bağlı katsayıyı ifade etmektedir.

Yüksek aşınabilirlik durumu kabul edilerek Tuzluca Barajı'na ait bilgiler ilgili yönteme uygulandığında;

$B_{ave} = 167$ m

$T_f \approx 1$ saat olarak elde edilmiştir.

Dördüncü yöntem olarak uygulanan Froehlich (1995), geçmiş yıllarda yıkılan ve yıkılma verileri belli olan 63 adet dolgu baraj üzerinden istatistiki analizler yaparak yıkılma parametreleri için tahmin yöntemleri geliştirmiştir. Rezervuar hacmi, baraj yüksekliği ve yıkılma şekli katsayısı parametrelerini kullanarak; oluşacak trapez gedik ortalama genişliği, yüksekliği, yıkılma süresi ve çıkış debisinin hesaplanabilmesi için ampirik formüller geliştirmiştir.

$$B_{ave} = 0.1803k_0V_w^{0.32}h_w^{0.19} \quad (\text{Eşitlik 8})$$

$$T_f = 0.00254V_w^{0.53}h_w^{-0.90} \quad (\text{Eşitlik 9})$$

$$k_0 = \begin{pmatrix} 1.4 & \text{üstünden su aşma} \\ 1 & \text{borulanma} \end{pmatrix}$$

$$z = \begin{pmatrix} 1.4 & \text{üstünden su aşma} \\ 0.9 & \text{borulanma} \end{pmatrix}$$

Bu eşitliklerde;

B_{ave} : Gedik orta genişliği (m),

T_f : Baraj yıkılma süresi (sa)

h_w : Su yüksekliği (m)

V_w : Rezervuardaki su hacmi (m^3)

z : Gedik kenar eğimini

k_0 : Yıkılma şekline bağlı katsayıyı ifade etmektedir.

Yıkılma anındaki su yüksekliği baraj yüksekliğine eşit ve 45 m; rezervuar hacmi ise en olumsuz durum düşünülerek $265 \times 10^6 m^3$ kabul edilmiştir. Bu yöntemle göre her iki senaryo için hesaplanan gedik parametreleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 7. Froehlich (1995) yöntemine göre hesaplanan gedik parametreleri

	Üstünden Su Aşma	Borulanma
Gedik yüksekliği (H_b)	45 m	45 m
Ortalama Gedik genişliği (B_{ave})	258 m	184 m
Yıkılma süresi (T_f)	2.4 saat	2.4 saat

Beşinci yöntem olarak uygulanan Froehlich (2008), geçmiş yıllarda yıkılan ve yıkılma verileri belli olan 74 adet dolgu baraj üzerinden istatistiki analizler yaparak gedik parametreleri için tahmin yöntemleri geliştirmiştir. 1995 yılında yapmış olduğu

çalışmasını güncelleyerek rezervuar hacmi, gedik yüksekliği ve yıkılma şekli katsayısı parametreleri ile oluşacak trapez gedikğin ortalama genişliği ve yıkılma süresinin tahmini için ampirik formüller geliştirmiştir.

$$B_{ave} = 0.27k_0V_w^{0.32}h_b^{0.04}$$

$$T_f = 0.0176(V_w/gh_b^2)^{0.5}$$

$$k_0 = \begin{pmatrix} 1.4 ; & \text{üstünden su aşma} \\ 1 & ; & \text{borulanma} \end{pmatrix}$$

$$z = \begin{pmatrix} 1.4 ; & \text{üstünden su aşma} \\ 0.7 ; & \text{borulanma} \end{pmatrix}$$

Bu eşitliklerde;

B_{ave} : Gedik orta genişliği (m)

V_w : Rezervuar hacmi (m^3)

T_f : Baraj yıkılma süresi (sa)

h_b : Gedik yüksekliği

z : Gedik kenar eğimini

g : Yer çekimi ivmesi (9.81 m/s^2)

k_0 : Yıkılma şekline bağlı katsayıyı ifade etmektedir.

Yıkılma anındaki su yüksekliği baraj yüksekliğine eşit ve 45 m; rezervuar hacmi ise en olumsuz durum düşünülerek $265 \times 10^6 \text{ m}^3$ kabul edilmiştir. Bu yöntemle göre her iki senaryo için hesaplanan gedik parametreleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 8. Froehlich (2008) yöntemine göre hesaplanan gedik parametreleri

	Üstünden Su Aşma	Borulanma
Gedik yüksekliği (H_b)	45 m	45 m
Gedik orta genişliği (B_{ave})	218 m	156 m
Yıkılma süresi (T_f)	2 saat	2 saat

Çalışma kapsamında uygulanan altıncı ve son yöntemde Xu ve Zhang (2009), geçmişteki baraj yıkılma verileri üzerinden istatistiki çalışmalar yaparak baraj yıkılma parametrelerinin tahmin edilebilmesi için yeni ampirik formüller geliştirmişlerdir. 182 adet toprak ve kaya dolgu barajın yıkılma verilerine dayalı olarak 5 farklı baraj

parametresi (baraj yüksekliği, rezervuar şekil katsayısı, baraj tipi, dolgu malzemesi aşınabilirliği, yıkılma şekli) üzerinden trapez gedik parametreleri, yıkılma süresi ve pik debinin tahmini için formüller geliştirmişlerdir.

$$\frac{H_b}{H_d} = 0,453 - 0,025 \left[\frac{H_d}{H_r} \right] + B_1 \quad (\text{Eşitlik 13})$$

$$B_1 = a+b+c \quad (\text{Eşitlik 14})$$

$$\frac{B_t}{H_b} = 1,062 \left[\frac{H_d}{H_r} \right]^{0,092} \left[\frac{V_w^{1/3}}{H_w} \right]^{0,508} e^{B_2} \quad (\text{Eşitlik 15})$$

$$B_2 = d+e+f \quad (\text{Eşitlik 16})$$

$$\frac{B_{ave}}{H_b} = 0,787 \left[\frac{H_d}{H_r} \right]^{0,133} \left[\frac{V_w^{1/3}}{H_w} \right]^{0,652} e^{B_3} \quad (\text{Eşitlik 17})$$

$$B_3 = g+h+i \quad (\text{Eşitlik 18})$$

$$\frac{Q_p}{\sqrt{gV_w^{5/3}}} = 0,175 \left[\frac{H_d}{H_r} \right]^{0,199} \left[\frac{V_w^{1/3}}{H_w} \right]^{-1,274} e^{B_4} \quad (\text{Eşitlik 19})$$

$$B_4 = j+k+l \quad (\text{Eşitlik 20})$$

$$\frac{T_f}{T_r} = 0,304 \left[\frac{H_d}{H_r} \right]^{0,707} \left[\frac{V_w^{1/3}}{H_w} \right]^{1,228} e^{B_5} \quad (\text{Eşitlik 21})$$

$$B_5 = m+n+p \quad (\text{Eşitlik 22})$$

Bu eşitliklerde;

B_{ave} : Gedik orta genişliği (m)

T_f : Baraj yıkılma süresi (sa)

T_r : Zaman sabiti

H_b : Gedik yüksekliği (m)

H_d : Baraj yüksekliği (m)

H_w : Yıkılma anında gedik tabanının üzerindeki su yüksekliği (m)

H_r : Büyük baraj - küçük baraj sınır yükseklik değeri

Q_p : Çıkış pik debisi (m^3/sn)

V_w : Yıkılma anında gedik tabanının üzerindeki su hacmini (m^3) temsil etmektedir.

B_1 , B_2 , B_3 , B_4 ve B_5 değerlerinin hesaplanmasında kullanılan, baraj tipine göre belirlenen a, d, g, j, m; yıkılma şekline göre belirlenen b, e, h, k, n ve gövde malzemesi

aşınabilirlik durumuna göre belirlenen c, f, i, l, p değişkenlerine ait bilgiler Bölüm 2, Tablo 2’de özetlenmiştir.

Xu ve Zhang (2009), zaman sabiti (T_f) için 1; büyük baraj-küçük baraj sınır yüksekliği (H_r) için Uluslararası Büyük Barajlar Komitesinin (ICOLD) belirlediği 15 m değerinin kullanılabileceğini belirtmiştir. Tuzluca Barajı karakteristik bilgileri kullanılarak yüksek derecede aşınabilir dolgu malzemesi durumlarına göre, borulanma ve üstünden su aşma yıkılma şekilleri için hesaplar yapılmış ve aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 9. Xu ve Zhang (2009) yöntemine göre hesaplanan gedik parametreleri

	Üstünden Su Aşma	Borulanma
Gedik yüksekliği (H_b)	45 m	45 m
Gedik orta genişliği (B_{ave})	287 m	168 m
Gedik üst genişliği (B_t)	380 m	222 m
Gedik alt genişliği (B_b)	217 m	87 m
Yıkılma süresi (T_f)	2.4 saat	2.3 saat

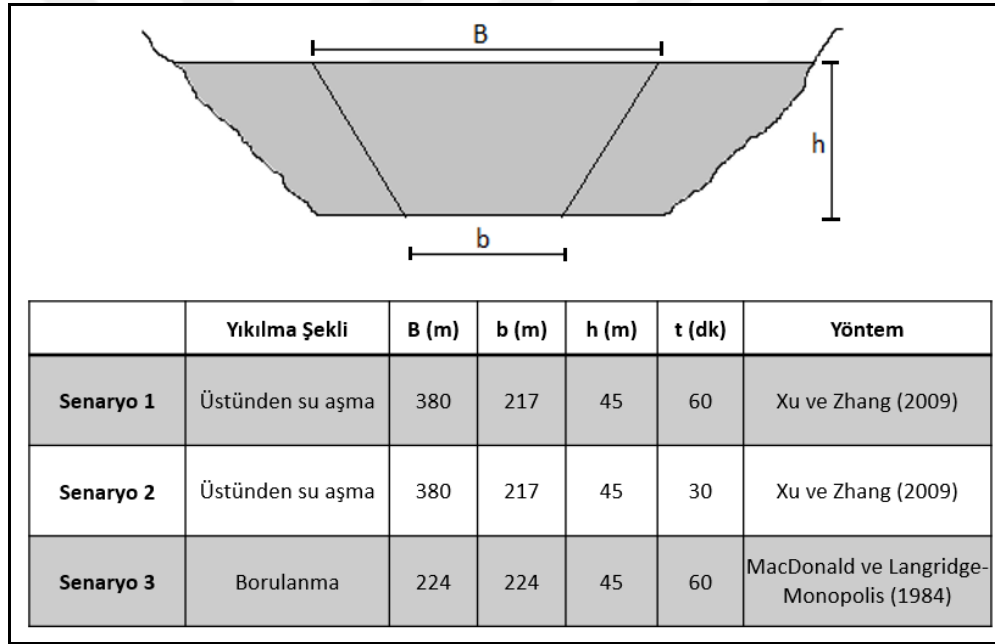
Tuzluca Barajı’nın yıkılma durumuna ait gedik parametrelerinin belirlenmesinde literatürde kullanılan en yaygın altı yöntem karşılaştırılmıştır. İlgili yöntemlere ait sonuçlar aşağıda Tablo 10’da özetlenmiştir.

Tablo 10. Hesaplanan gedik parametrelerinin karşılaştırılması

Yöntem	Yıkılma Şekli							
	Üstünden Su Aşma				Borulanma			
	B_t (m)	B_{ave} (m)	B_b (m)	T_f (sa)	B_t (m)	B_{ave} (m)	B_b (m)	T_f (sa)
MacDonald ve LM	341		161	3	224		224	3
Bureau of Reclamation		135		1.5		135		1.5
Von Thun ve Gillette		167		1		167		1
Froehlich (1995)		258		2.4		184		2.4
Froehlich (2008)		218		2		156		2
Xu ve Zhang	380	287	217	2.4	222	168	87	2.3

Literatürdeki yöntemler karşılaştırıldığında üstten su aşması durumunda gedik boyutları noktasında en olumsuz şartların Xu ve Zhang (2009); yıkılma süresinde ise Von Thun ve Gillette (1990) yöntemlerinde olduğu görülmektedir. Borulanma sebepli yıkılmalarda ise dikdörtgen gedik durumu sadece MacDonald ve Langridge-Monopolis (1984) yönteminde uygulanabildiği için o yöntem kullanılmıştır.

Analiz aşamasında uygulanacak senaryolar en olumsuz şartlar dikkate alınarak belirlenmiştir. Üstten su aşması durumu için Xu ve Zhang (2009) yöntemi kullanılarak nihai gedik boyutları; gedik yüksekliği 45 m, gedik üst genişliği 380 m ve gedik orta genişliği 287 m, borulanma sebepli yıkılda ise MacDonald ve Langridge-Monopolis (1984) yöntemi kullanılarak nihai gedik boyutları; gedik yüksekliği 45 m, gedik üst genişliği 224 m ve gedik taban genişliği 224 m olarak kabul edilmiştir. Yıkılma süresi ise en olumsuz sonuç çıkması bakımından her iki yıkılma şeklinde de Von Thun ve Gillette (1990) yöntemi kullanılarak 1 saat olarak belirlenmiştir. Çalışma kapsamında baraj yıkılma süresinin taşkın yayılımına etkisinin incelenebilmesi için, yıkılma süresinin 30 dk olduğu bir senaryo da uygulanmıştır. Hesaplamalar sonucunda FLOW3D yazılımında gerçekleştirilmesine karar verilen 3 farklı senaryoya ait bilgiler aşağıda Şekil 24'te özetlenmiştir.



Şekil 24. FLOW3D yazılımında gerçekleştirilen senaryolar

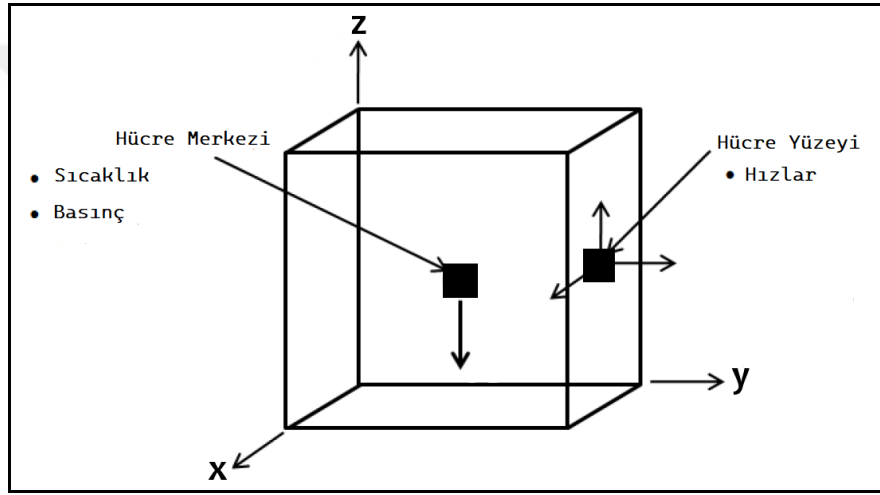
3.6 FLOW3D Yazılımı ve Kullanılan Eşitlikler

Tez kapsamında yıkılma simülasyonunun sayısal çözümü için FLOW SCIENCE firmasına ait FLOW3D yazılımı kullanılmıştır. Gümüşhane Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü bünyesinde GÜBAP 2902 Hızlı Destek Programı kapsamındaki proje desteğiyle yazılımın lisanslı sürümü kiralanmıştır.

Bilgisayar destekli hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı olan FLOW3D, deniz bilimleri, havacılık, nükleer enerji, makine mühendisliği ve hidrolik mühendisliği alanlarında yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Yazılım, zamana bağlı 2D ve 3D akış

problemlerine yönelik geliştirildiğinden tüm akışkanlar mekaniği problemlerinde kullanılabilmektedir (Kocaman, 2007; Karahan vd., 2020).

FLOW3D yazılımında 2D analizler Saint-Venant denklemleri olarak da bilinen Sığ Su Denklemlerine (SWE) dayanmaktadır. 3D analizler ise Süreklilik Denklemi ve Reynold Ortalamalı Navier Stokes (RANS) denklemlerinin sonlu hacimler yöntemiyle çözümüne dayanmaktadır. FLOW3D’de hesaplama alanı, küçük dikdörtgen hücrelerden (mesh) oluşan bir ızgara sisteminden meydana gelmektedir. Çözümde kontrol hacminin merkezinde basınç ve yoğunluk gibi skaler büyüklükler hesaplanırken, aksenal hız büyüklükleri hücre yüzeyinde hesaplanmaktadır (Ghasemlounia, 2021). Bir hesaplama hücresine ait şematik görüntü aşağıda Şekil 25’te gösterilmiştir.



Şekil 25. Bir hesaplama hücresi örneği

FLOW3D yazılımında, akışkan yüzeyinin hareketini tahmin etmek için akışkan hacmi yöntemi (VOF; volume of fluids), katı yüzeylerin sınırlarının belirlenmesi için ise FAVOR (fractional area/volume ratio) tekniği kullanılmaktadır. FAVOR yöntemiyle STL formatındaki arazi yüzeyi ön işleme tabi tutularak pürüzlülük etkisi de belirlenmektedir (Karahan vd., 2020; Franco vd., 2020).

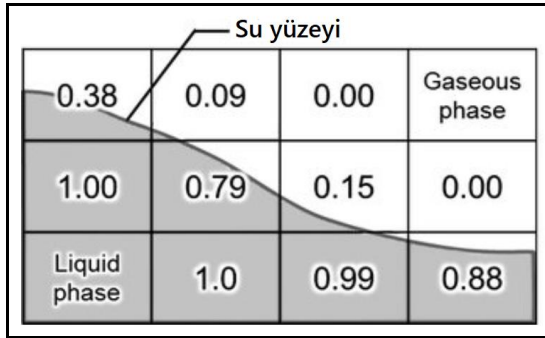
VOF yönteminde, her bir hücre içerisindeki su oranı tespit edilerek bir akışkan hacmi (F) değeri tanımlanmaktadır. Bu F değeri hücre tamamen suyla doluysa 1, tamamen boş ise 0, kısmen suyla doluysa 0 ile 1 arasında bir değer almaktadır. Bu yöntemle birlikte tüm hücrelerdeki F değerinin bilinmesiyle serbest su yüzeyinin konumu, hareketi ve çözüm ağı hücreleriyle yaptığı açı belirlenmektedir.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} + w \frac{\partial F}{\partial z} = 0 \quad (\text{Eşitlik 30})$$

Burada;

F: kontrol hacmi değeri,

u, v, w: akışkanın sırasıyla x,y ve z doğrultusundaki hız bileşenleridir.



Şekil 26. VOF yönteminde F değerleri şematik gösterimi (Ogino vd. 2018).

FAVOR yöntemi ise problem geometrisi ve katı cisimlerin modellenenbilmesi için kullanılmaktadır. Söz konusu yöntemle çözüm ağındaki hücreleri kaplayan katı engeller belirlenmektedir. Bu yöntemde hücredeki boşluk oranına göre bir değer tanımlanmaktadır. Çözüm ağı hücresi tamamen engel ile doluyorsa bu değer 0, tamamen boşsa 1, kısmen engel ile doluyorsa bu değer boşluk oranına göre 0 ile 1 arasında olmaktadır. Böylece çeşitli yazılımlarla modellenen düzensiz topoğrafyaya sahip arazi geometrisi FAVOR tekniği ile FLOW3D’de kolayca temsil edilebilmektedir (Kocaman 2007; Ghasemlounia, 2021).

3.6.1. 2D Sığ Su Denklemleri (SWE)

Sığ Su denklemleri kütle ve momentumun korunumu ilkelerine dayanmaktadır. Denklem, düşey ivme bileşenlerinin ihmal ve akışta hidrostatik basınç koşullarının hakimiyeti gibi önemli varsayımlar ile Navier- Stokes denklemlerinden türetilmiştir.

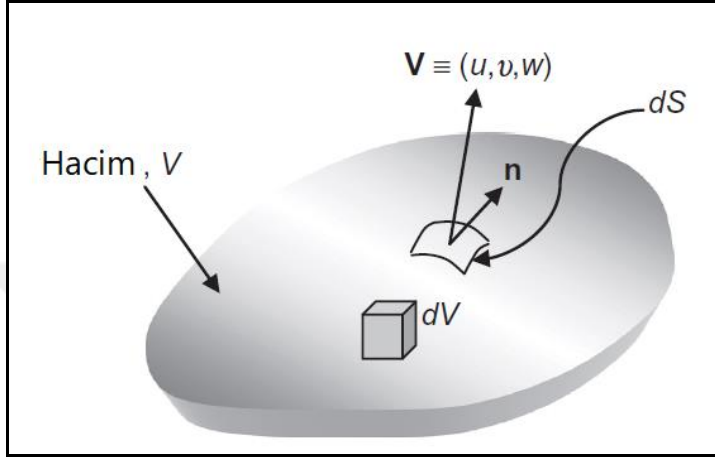
FLOW3D’de kullanılan VOF ve FAVOR teknikleri Sığ Su denkleminde uygulandığında denklemler aşağıdaki formda elde edilmektedir.

$$\frac{\partial V_f F}{\partial t} + \frac{\partial u A_x F}{\partial x} + \frac{\partial v A_y F}{\partial y} = 0 \quad (\text{Eşitlik 31})$$

Bu denklemlerde u sıvının x yönündeki hızını, A_x hesaplama hücresindeki sıvının x yönünde kapladığı alanı, V_f hesaplama hücresindeki sıvının kapladığı hacmi, v sıvının y yönündeki hızını, A_y akışkanın hesaplama hücresinde y yönünde kapladığı alanı, F ise akışkanın derinliğini temsil etmektedir (Ghasemlounia, 2021).

3.6.2. Süreklilik (Kütlenin Korunumu) Denklemi

Kütlenin korunumu denklemi; maddenin yoktan var, vardan da yok edilemeyeceği ilkesine dayanmaktadır. Uzayda gelişigüzel V hacminde yer kaplayan bir kontrol hacminden bir akışkanın geçtiğini ele alırsak, söz konusu kontrol hacmindeki kütle değişim hızının kontrol hacminin yüzeyinden (S) geçen net kütle akısına eşit olması gerekmektedir (Engin vd., 2020).



Şekil 27. Uzayda bir kontrol hacmi (Tu vd., 2018)

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV = - \int_S \rho \mathbf{V} \cdot \mathbf{n} dS \quad (\text{Eşitlik 32})$$

Denklemden $\mathbf{n}$; birim normal vektörünü ifade etmektedir. Burada Gauss diverjans teoremi uygulanıp yüzey integrali yerine hacim integrali yazılırsa denklem aşağıdaki formata dönüşmektedir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (\text{Eşitlik 33})$$

Eşitlik 32, Kartezyen koordinat sisteminde yazılırsa kütlenin korunumu denklemi aşağıdaki gibi elde edilmektedir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (\text{Eşitlik 34})$$

Denklemlerde V hacim, $\mathbf{V}$ herhangi bir noktada akışkan hızı, u , v ve w ise yerel hız bileşenlerini ifade etmektedir.

3.6.3. Navier Stokes (Momentumun Korunumu) Denklemi

Denklem Newton'un ikinci hareket yasasına dayanmaktadır. Buna göre bir akışkan parçasına etki eden kuvvetler toplamı aynı akışkan parçasının kütle ve ivmesinin çarpımına eşit olması gerekmektedir (Engin vd., 2020).

$$\rho \frac{d\mathbf{V}}{dt} = -\nabla p + \nabla \tau + \rho g \quad (\text{Eşitlik 35})$$

Bu eşitlikte $\mathbf{V}$ herhangi bir noktada akışkan hızı, τ gerilme tansörünü, g yer çekimi ivmesini, ρ yoğunluğu, p basıncı, t ise zamanı temsil etmektedir. İlgili denklem aşağıdaki forma indirgenip tansör formunda yazılırsa;

$$\rho \frac{d\mathbf{V}}{dt} = \rho \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \rho \mathbf{V} \nabla (\mathbf{V}) = -\nabla p + \nabla \tau + \rho g \quad (\text{Eşitlik 36})$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (\text{Eşitlik 37})$$

Bu denklemlerde 3 boyutlu akış koşulları dikkate alındığında $i, j; 1, 2, 3$ değerlerini almakta ve akımın x, y, z doğrultularındaki bileşenlerini temsil etmektedir. Denklemlerde bulunan τ gerilme tansörünün formülü aşağıda verilmiştir.

$$\tau_{ij} = \mu \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (\text{Eşitlik 38})$$

Burada μ , akışkanın dinamik viskozite katsayısını ifade etmektedir.

τ gerilme tansörü, Eşitlik 36'da yerine yazılırsa Navier Stokes denklemi aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] + \rho g_i \quad (\text{Eşitlik 39})$$

Eşitlik 38, Kartezyen koordinat sisteminde yazılırsa Navier Stokes denklemleri açık formda aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\rho \left[\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right] = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] + \rho g_x \quad (\text{Eşitlik 40})$$

$$\rho \left[\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right] = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] + \rho g_y \quad (\text{Eşitlik 41})$$

$$\rho \left[\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right] = - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] + \rho g_z \quad (\text{Eşitlik 42})$$

Bu denklem sisteminde yer çekimi ivmesi sadece z ekseninde etki ettiğinden g_x ve g_y değerleri sıfırdır.

İlgili denklemler incelendiğinde basınç (p) ve üç hız bileşeni (u, v, w) olmak üzere toplam dört bilinmeyen bulunmaktadır. Buna karşılık bir süreklilik denklemi ve üç adet Navier Stokes eşitliği olmak üzere toplamda dört denklem bulunmakta ve denklem sayısı bilinmeyen sayısına eşit olmaktadır. Ancak Navier-Stokes denklemleri, matematiksel olarak oldukça karmaşık ve genellikle analitik olarak çözülemeyen problemlerdir. Bu nedenle uygun başlangıç ve sınır koşulları altında sayısal yöntemler kullanarak yaklaşık çözümler elde edilmektedir. Bu yöntemlerin kullanımı için viskozite, yoğunluk ve yerçekimi etkisi gibi faktörlerin de bilinmesi gereklidir. Navier-Stokes denklemleri, sıkışmayan ve Newtoniyen akışların hareketini tanımlayan bir diferansiyel denklem sistemidir. Yani söz konusu akışın yoğunluğunun, hacminin ve viskozitesinin zamana göre değişmediği kabulüyle hareket edilmektedir. Söz konusu hesaplar hidrodinamik, aerodinamik, gemi tasarımı, madencilik ve tıp alanlarıyla ilgili uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Kocaman, 2007; Engin vd., 2020; Ghasemlounia, 2021).

3.6.4. Türbülans Etkisi ve Reynolds Ortalamalı Navier Stokes (RANS) Denklemleri

Doğadaki gerçek akış laminar veya türbülanslı olmak üzere iki şekilde gerçekleşmektedir. Laminar akışlarda akışın yörüngesi düzgün, akışkan parçacıklarının hareketi birbirine benzer ve aralarında bir momentum alışverişi bulunmamaktadır. Doğadaki akışların büyük bir kısmını oluşturan türbülanslı akışlarda ise akışkan parçacıkları düzensiz, karmaşık ve gelişigüzel hareket etmektedir. Türbülanslı akımda akışkan parçacıkları arasında momentum alışverişi olmaktadır. Akımın laminar veya

türbülanslı olması durumu, atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlerine oranına bağlıdır ve bu orana Reynold sayısı denilmektedir (Berkün, 2019; Engin vd. 2020).

$$Re = \frac{\rho \mathbf{V} L}{\mu} \quad (\text{Eşitlik 43})$$

Burada;

ρ : Yoğunluk

$\mathbf{V}$: Akımın ortalama hızı

μ : Dinamik viskozite

L : Kesit alanının karakteristik boyutunu temsil etmektedir.

Borular üzerinde yapılan deneylerde; düşük Reynolds sayısı ($Re < 2300$) laminar akışı, orta büyüklükte Reynolds sayısı ($2300 < Re < 4000$) laminar ve türbülanslı akış arasında geçiş dönemi akışı, büyük Reynolds sayısı ($Re > 4000$) ise türbülanslı akış koşullarını temsil etmektedir. Açık kanal akımlarında ise borulu akışlardan farklı olarak, çevresel şartlar ve şekilsel faktörler türbülans durumunu etkileyebilmektedir. Açık kanal akımlarında türbülanslı akıma geçiş için kritik Reynold sayısının 5000 civarında olduğu kabul edilmektedir.

Türbülanslı akışta basınç ve hız bileşenlerinin değerleri anlık olarak rastgele değişebildiği için mevcut modeller türbülans etkisini tüm ayrıntılarıyla inceleyememektedir. Hız bileşenleri ve basıncın anlık değeri ortalama ve anlık sapmalar üzerinden hesaplanmaktadır (Ghasemlounia, 2021).

$$u = \bar{u} + u' \quad v = \bar{v} + v' \quad w = \bar{w} + w' \quad p = \bar{p} + p' \quad (\text{Eşitlik 44})$$

Burada u, v, w, p değerleri anlık hız ve basınç; $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}, \bar{p}$ değerleri ortalama hız ve basınç; u', v', w', p' değerleri ise hız ve basınç değerlerindeki anlık sapmaları ifade etmektedir.

Eşitlik 44'de verilen bilgiler sıkışmayan akım koşullarında eşitlik 34'deki süreklilik denkleminde yerine yazılırsa;

$$\frac{\partial(\bar{u} + u')}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v} + v')}{\partial y} + \frac{\partial(\bar{w} + w')}{\partial z} = 0 \quad (\text{Eşitlik 45})$$

Benzer şekilde eşitlik 43'deki bilgiler sıkışmayan akım koşullarında eşitlik 39, 40 ve 41'de yerine yazılırsa;

$$\rho \left[\frac{\partial(\bar{u}+u')}{\partial t} + (\bar{u}+u') \frac{\partial(\bar{u}+u')}{\partial x} + (\bar{v}+v') \frac{\partial(\bar{u}+u')}{\partial y} + (\bar{w}+w') \frac{\partial(\bar{u}+u')}{\partial z} \right] = -\frac{\partial(\bar{p}+p')}{\partial x} + \mu \left[\frac{\partial^2(\bar{u}+u')}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(\bar{u}+u')}{\partial y^2} + \frac{\partial^2(\bar{u}+u')}{\partial z^2} \right] + \rho g_x \quad (\text{Eşitlik 46})$$

$$\rho \left[\frac{\partial(\bar{v}+v')}{\partial t} + (\bar{u}+u') \frac{\partial(\bar{v}+v')}{\partial x} + (\bar{v}+v') \frac{\partial(\bar{v}+v')}{\partial y} + (\bar{w}+w') \frac{\partial(\bar{v}+v')}{\partial z} \right] = -\frac{\partial(\bar{p}+p')}{\partial y} + \mu \left[\frac{\partial^2(\bar{v}+v')}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(\bar{v}+v')}{\partial y^2} + \frac{\partial^2(\bar{v}+v')}{\partial z^2} \right] + \rho g_y \quad (\text{Eşitlik 47})$$

$$\rho \left[\frac{\partial(\bar{w}+w')}{\partial t} + (\bar{u}+u') \frac{\partial(\bar{w}+w')}{\partial x} + (\bar{v}+v') \frac{\partial(\bar{w}+w')}{\partial y} + (\bar{w}+w') \frac{\partial(\bar{w}+w')}{\partial z} \right] = -\frac{\partial(\bar{p}+p')}{\partial z} + \mu \left[\frac{\partial^2(\bar{w}+w')}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(\bar{w}+w')}{\partial y^2} + \frac{\partial^2(\bar{w}+w')}{\partial z^2} \right] + \rho g_z \quad (\text{Eşitlik 48})$$

Türbülanslı akım koşullarında Süreklilik ve Navier Stokes denklemleri için, laminar akımdan farklı olarak ek bilinmeyenlerin geldiği görülmektedir. Söz konusu bilinmeyenlerin belirlenebilmesi için türbülans modellerinden yararlanılmaktadır. Türbülanslı akışı çözebilmek için Navier Stokes denklemlerinin zaman ortalaması alınarak denklem Reynold Ortalamalı Navier Stokes (RANS) denklem sistemine modifiye edilmektedir (Ghasemlounia, 2021).

Eşitlik 45, 46 ve 47'deki terimlerin zaman ortalaması alınırsa u' , v' , p' ve w' değerleri sıfıra eşit olmaktadır. Bu durumda denklemler aşağıdaki formlara dönüşmektedir.

$$\rho \left[\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{u}'u'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}'v'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}'w'}{\partial z} \right] = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu \left[\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \right] + \rho g_x \quad (\text{Eşitlik 49})$$

Eşitlik 48’de türbülans etkisine ait parametreler eşitliğin sağ tarafına alınırsa x, y ve z doğrultularında RANS denklemleri aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\begin{aligned} \rho \left[\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right] = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu \left[\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \right] - \\ \rho \left[\frac{\partial \overline{u'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \right] + \rho g_x \end{aligned} \quad (\text{Eşitlik 50})$$

$$\begin{aligned} \rho \left[\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right] = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \mu \left[\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial z^2} \right] - \\ \rho \left[\frac{\partial \overline{v'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} \right] + \rho g_y \end{aligned} \quad (\text{Eşitlik 51})$$

$$\begin{aligned} \rho \left[\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right] = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \mu \left[\frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial z^2} \right] - \\ \rho \left[\frac{\partial \overline{w'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{w'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w'w'}}{\partial z} \right] + \rho g_z \end{aligned} \quad (\text{Eşitlik 52})$$

Elde edilen RANS denklemleri geliştirilmiş formda yazılırsa;

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] - \rho \frac{\partial (\overline{u'_i u'_j})}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (\text{Eşitlik 53})$$

Bu denklemde $\rho \frac{\partial (\overline{u'_i u'_j})}{\partial x_j}$ ifadesi, Reynolds gerilmeleri olarak adlandırılmaktadır.

Genelleştirilmiş RANS denklemi Reynolds gerilmeleri τ'_{ij} ve laminar vizkoz gerilmeleri τ_{ij} cinsinden yazılırsa;

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial (\tau_{ij} + \tau'_{ij})}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (\text{Eşitlik 54})$$

Reynolds gerilmelerinin elde edilebilmesi için çeşitli türbülans modellerinde en yaygın kullanılan model Boussinesq yaklaşımıdır. Bu yöntem ile RANS

denklemlerindeki türbülans (Reynolds) gerilmeleri girdap viskozitesi kullanılarak tahmin edilmektedir (Ghasemlounia, 2021).

$$\tau'_{ij} = \mu_t \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (\text{Eşitlik 55})$$

Bu denklemde μ_t terimi, türbülans viskozitesini temsil etmektedir. Türbülans viskozitesi akışkanın moleküler yapısından bağımsız olup akımın hız çalkantılarına bağlı olarak değişmektedir. Bazı kaynaklarda girdap dinamik viskozitesi de denilmektedir.

μ_t , türbülans viskozitesinin belirlenebilmesi için farklı türbülans modellerinden yararlanılmakta ve hangi türbülans modelinin türbülans viskozitesi değerini en iyi temsil ettiğine ilişkin kesin bir bilgi bulunmamaktadır. Türbülans viskozitesi μ_t 'nin boyutsal analizi dikkate alınırsa aşağıdaki gibi yazılabilmektedir.

$$\mu_t = C\rho V_t l \quad (\text{Eşitlik 56})$$

Bu denklemde;

C : sabit bir katsayı

ρ : akışkanın yoğunluğu

V_t : hız ölçeği

l : uzunluk ölçeğini temsil etmektedir.

Literatürdeki türbülans modelleri türbülanslı akıstaki hız ölçeği (V_t) ve uzunluk ölçeğini (l) tahmin ederek τ'_{ij} Reynold gerilmesini hesaplamak için geliştirilmiştir.

FLOW3D yazılımında kullanılan 3 boyutlu süreklilik ve RANS denklemlerinin kartezyen koordinat sistemlerinde genelleştirilmiş formu aşağıda verilmektedir (Kocaman, 2007).

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (u_i A_i) = 0 \quad (\text{Eşitlik 57})$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left[u_j A_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + g_i + f_i \quad (\text{Eşitlik 58})$$

Bu denklemlerde;

P : Basıç

u : Akımın i doğrultusundaki hızı

V_f : i doğrultusunda hesaplama hücresinde akışkanın kapladığı hacmi

A_i : i doğrultusunda hesaplama hücresinde akışkanın kapladığı alanı

g_i : Yerçekimi ivmesini

f_i : Seçilen türbülans modeline göre türbülans gerilmelerini temsil etmektedir.

Araştırmacılar tarafından türbülanslı akışların simülasyonu için birçok türbülans modeli geliştirilmiştir. Bu türbülans modelleri yardımıyla RANS denklemlerinin karmaşık yapısı basitleştirilerek türbülanslı akışların gerçeğe yakın bir şekilde modellenebilmesi sağlanabilmektedir. FLOW3D yazılımında 5 farklı türbülans modeli seçeneği bulunmaktadır. Bunlar iki denklemlilik k- ϵ türbülans modeli, renormalize edilmiş k- ϵ türbülans modeli, Prandtl karışım uzunluğu modeli, tek denklemlilik türbülans enerji modeli ve büyük girdap simülasyon modelidir (Ajami, 2019; Ghasemlounia, 2021).

İki Denklemlilik k- ϵ Türbülans Modeli: Standart k- ϵ türbülans modeli olarak da anlandırılan model, basit uygulanabilirliği ve kabul edilebilir seviyede doğru sonuçlar vermesi bakımından araştırmalarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Türbülans kinetik enerjisi (k) ve türbülans yitim hızı (ϵ) kullanılarak türbülans viskozitesi (μ_t) aşağıdaki gibi yazılmaktadır (Şimşek vd., 2011; Engin vd., 2020).

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (\text{Eşitlik 59})$$

Türbülans kinetik enerjisi (k) ve türbülans yitim hızı (ϵ) değerlerinin hesaplanmasında aşağıdaki eşitlikler kullanılmaktadır.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u \frac{\partial k}{\partial x} + v \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right] + P - D \quad (\text{Eşitlik 60})$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + u \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + v \frac{\partial \epsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right] + \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1} P - C_{\epsilon 2} D) \quad (\text{Eşitlik 61})$$

Bu eşitliklerde $D = \mathcal{E}$ olarak kabul edilmekle birlikte P ve kinematik türbülans viskozitesi (ν_t) aşağıdaki gibi formüle edilmektedir.

$$\nu_t = \frac{\mu_t}{\rho} \quad (\text{Eşitlik 62})$$

$$P = 2\nu_t \left[\left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]^2 + \left[\frac{\partial v}{\partial y} \right]^2 \right] + \nu_t \left[\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right]^2 \quad (\text{Eşitlik 63})$$

Türbülans denklemlerindeki 5 farklı sabit katsayıların değeri, kapsamlı çalışmalar sonucunda aşağıdaki gibi kabul edilmektedir (Launder ve Spalding, 1974).

$$C_\mu=0.09, \sigma_k=1, \sigma_\epsilon=1.3, C_{\epsilon 1}=1.44 \text{ ve } C_{\epsilon 2}=1.92$$

Renormalize Edilmiş (RNG) k-ε Türbülans Modeli: RNG türbülans modelinde Standart k-ε türbülans modeliyle benzer şekilde türbülans kinetik enerjisi (k) ve türbülans yitim hızı (ε) üzerinden RANS denklemleri çözülmektedir. Bu modelde akım özelliklerini daha iyi yansıtmak için farklı sabitler ve ilave terimler kullanılmıştır. RNG türbülans modelinde denkleme şekil R türbülans yoğunluğu terimi eklenmekte ve RANS denklemi aşağıdaki şekli almaktadır (Tu vd., 2018).

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + u \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + v \frac{\partial \epsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right] + \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1} P - C_{\epsilon 2} D) - R \quad (\text{Eşitlik 64})$$

$$R = \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta / \eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (\text{Eşitlik 65})$$

Bu denklemlerde $C_\mu=0.0845$, $\sigma_k=0.718$, $\sigma_\epsilon=0.718$, $C_{\epsilon 1}=1.42$, $C_{\epsilon 2}=1.68$, $\beta=0.015$ ve $\eta_0=4.38$ olarak belirlenmiştir. Ayrıca denklemde bulunan η ve ona bağlı terimlerin formülü aşağıda verilmiştir.

$$\eta = S \frac{k}{\epsilon} \quad (\text{Eşitlik 66})$$

$$S = \sqrt{2S_{ij}^2} \quad (\text{Eşitlik 67})$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] \quad (\text{Eşitlik 68})$$

Prandtl Karışım Uzunluğu Modeli: Sıfır denklemlili türbülans modelleri grubunda bulunan bu modelde diferansiyel denklemler kullanılmadan, ampirik formüller ve laboratuvar deneyleriyle çözüm yapılmaktadır. Bu yöntemde türbülans üretimi ve sönümlenmesinin akışın her noktasında dengelendiği varsayılmaktadır. Pek yaygın kullanılmayan yöntemde türbülans kinetik enerjisi (k) ve türbülans yitim hızı (ε) değerleri aşağıdaki eşitliklerle hesaplanmaktadır (Ghasemlounia, 2021).

$$\varepsilon = 1.225C \frac{k^{3/2}}{T} \quad (\text{Eşitlik 69})$$

$$\nu_t = T \sqrt{\frac{2k}{3}} \quad (\text{Eşitlik 70})$$

Bu denklemlerde T ; türbülans uzunluk ölçeği, ν_t ; kinematik viskozitedir. C sabitinin değeri 0.9 olarak kabul edilmektedir.

Büyük Girdap Simülasyon (LES) Modeli: Genel itibariyle akımdaki büyük ölçekli türbülans hareketlerini doğrudan çözen, küçük türbülans hareketlerini ise yaklaşık olarak tahmin eden türbülans modelidir. Bu teknikte Navier Stokes denklemlerinin kapatılması için alt çözüm ağı ölçeği ve türbülans viskozitesi kullanılmaktadır. Smagorinsky (1963) tarafından geliştirilen alt çözüm ağı ölçeği modeli literatürde en yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Engin vd., 2020).

$$\tau_{ij} - \frac{\delta_{ij}}{3} \tau_{kk} = -2\nu_t^{SGS} \bar{S}_{ij} \quad (\text{Eşitlik 71})$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \quad (\text{Eşitlik 72})$$

Türbülans gerilmelerinin hesaplanmasında kullanılan denklemlerde ν_t^{SGS} alt çözüm ağı ölçeği kinematik viskozitesi, $\bar{S}_{ij}$ büyük ölçeğin şekil değiştirme hızını göstermektedir. Bu durumda alt çözüm ağı ölçeği türbülans viskozitesi ve şekil değiştirme hızı aşağıdaki gibi yazılabilmektedir.

$$\mu_t^{SGS} = C_s^2 \rho \Delta^2 |\overline{S}_{ij}| \quad (\text{Eşitlik 73})$$

$$|\overline{S}_{ij}| = \sqrt{2 \overline{S}_{ij} \overline{S}_{ij}} \quad (\text{Eşitlik 74})$$

Burada μ_t^{SGS} alt çözüm ağı ölçeği türbülans viskozitesi, C_s akış problemine bağlı olarak 0.065 ile 0.3 arasında değişen sabit katsayı ve Δ çözüm ağı filtresi genişliğidir.

3.6.5. Türbülans Modelinin Seçilmesi

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen baraj yıkılma simülasyonu geniş bir çalışma alanında ve yüksek hassasiyetle gerçekleştirildiğinden analizlerin gerçekleştirilme süresi literatürdeki benzer çalışmaların çoğundan uzun sürmektedir. Ayrıca çalışma kapsamında türbülans modellerinin taşkın üzerindeki hassasiyeti araştırılmadığından tek bir türbülans modeli seçilerek simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışmasında türbülans modeli olarak, literatürdeki baraj yıkılma analizlerinde yaygın bir şekilde kullanılan ve birçok çalışmada geçerliliği kanıtlanmış olan Renormalize Edilmiş (RNG) k- ϵ modeli seçilmiştir. Bu model yüksek ve düşük Reynold sayılarına sahip türbülanslı akım koşullarını doğru bir şekilde modelleyebilmektedir (Kaheh vd., 2010; Dehdar ve Parsaie, 2016; Oliva, 2017; Aksoy vd., 2022).

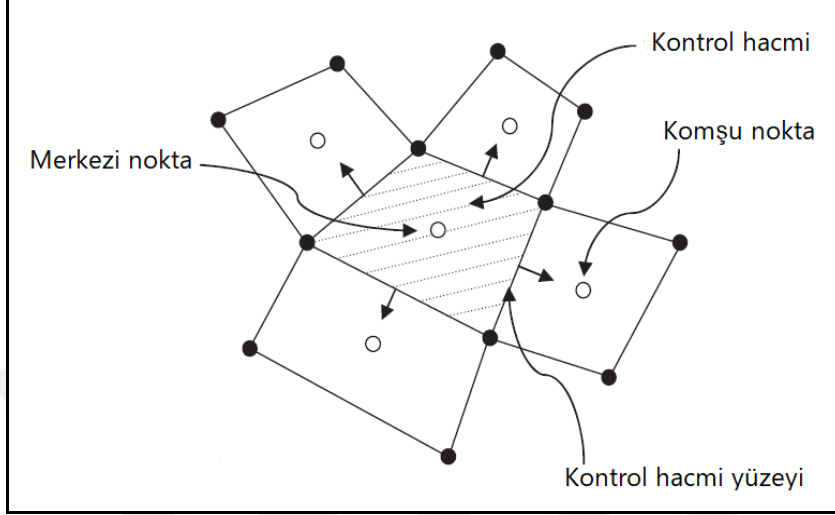
Bu model ile türbülans kinetik enerjisi (k), türbülans yitim hızı (ϵ) ve türbülans yoğunluğu (R) etkileri üzerinden RANS denklemleri çözülebilmektedir. Bölüm 3.6.3.'de RNG k- ϵ modeli türbülans modeliyle ilgili detaylı bilgiler verilmiştir.

3.6.6. Sonlu Hacimler Yöntemi

Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde, Navier-Stokes denklemleri gibi diferansiyel formdaki denklemlerin çözülebilmesi için birtakım teknikler kullanılarak denklem sistemi cebirsel forma indirgenmektedir. Sonlu farklar yöntemi, sonlu hacimler yöntemi, sonlu elemanlar yöntemi ve spektral yöntemi gibi tekniklerle yapılan ayrıklaştırma işleminden sonra çeşitli sınır şartları kullanılarak bilgisayar teknolojisi sayesinde bu cebirsel denklemler çözülmektedir (Zienkiewicz, 2000; Kocaman, 2007; Tu vd., 2018).

Sonlu hacimler yöntemi, düzensiz çözüm ağlarında da kullanılabilmesiyle karmaşık geometrileri doğru çözebilmesi bakımından hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde en yaygın kullanılan tekniktir. FLOW3D yazılımında da RANS denklemleri sonlu hacimler yöntemiyle çözülmektedir. Sonlu hacimler yönteminde sistem, sonlu sayıda komşu

hacimlere bölünür. Tüm kontrol hacimlerinin merkezinde akış parametreleri hesaplanır ve enterpolasyonla hacim yüzeyindeki değerler de elde edilmektedir. Böylece her bir kontrol hacmi için komşu düğüm parametrelerini de kapsayan cebirsel eşitlik elde edilmektedir (Engin, 2020).

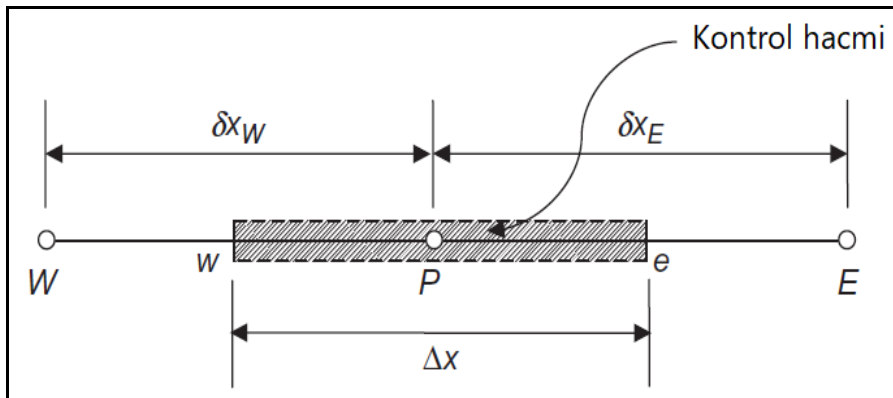


Şekil 28. Çözüm ağı yerleşimi (Engin, 2020).

Sonlu hacimler yönteminde, sistemdeki taşınım değişkeni ϕ olmak üzere bir boyutta temel denklem aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right] + S = 0 \quad (\text{Eşitlik 75})$$

Burada; ϕ akışın taşınım özelliğini, Γ difüzyon katsayısını, S ise kaynak terimini ifade etmektedir.



Şekil 29. W, P, E düğüm noktaları etrafındaki kontrol hacmi (Tu vd., 2018)

Şekil 29.'daki tek boyuttaki kontrol hacmi örneğinde P düğüm noktası için difüzyon denklemi yazılırsa aşağıdaki yaklaşık denklem elde edilmektedir.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right] = \frac{1}{\Delta V} \int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial x} \left[\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right] dV = \frac{1}{\Delta V} \int_A \left[\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right] dA^x \approx \frac{1}{\Delta V} \sum_{i=1}^2 \left[\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right]_i + A_1^x \quad (\text{Eşitlik 76})$$

Bu denklemlerde A_1^x izdüşüm alanları; $A_1^x = -A_w$ ve $A_2^x = A_e$ olmak üzere ilgili terimler aşağıdaki gibi yazılabilmektedir.

$$\sum_{i=1}^2 \left[\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right]_i = \left[\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right]_e A_e - \left[\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right]_w A_w \quad (\text{Eşitlik 77})$$

$$\frac{1}{\Delta V} \int_{\Delta V} S dV = S \quad (\text{Eşitlik 78})$$

Böylece ΔV kontrol hacmi için ayrıklaştırılmış denklemin yapısı aşağıdaki gibi olmaktadır;

$$\frac{1}{\Delta V} \left[\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right]_e A_e - \frac{1}{\Delta V} \left[\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right]_w A_w + S = 0 \quad (\text{Eşitlik 79})$$

Denklemi cebirsel olarak ifade etmek için; kontrol hacminin giriş (w) ve çıkış (e) yüzeylerindeki türevlerine düğüm noktalarını kapsayacak şekilde düzeltme yapılırsa difüzyon akıları aşağıdaki gibi yazılabilmektedir (Tu vd., 2018).

$$\left[\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right]_e A_e = \Gamma_e A_e \left[\frac{\phi_e - \phi_p}{\delta x_e} \right] \quad (\text{Eşitlik 80})$$

$$\left[\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right]_w A_w = \Gamma_w A_w \left[\frac{\phi_p - \phi_w}{\delta x_w} \right] \quad (\text{Eşitlik 81})$$

Eşitlik 79 ve 80'i Eşitlik 75'te yerine yazarsak denklem aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$\frac{\Gamma_e A_E}{\Delta V} \left[\frac{\phi_E - \phi_P}{\delta x_E} \right] - \frac{\Gamma_w A_W}{\Delta V} \left[\frac{\phi_P - \phi_W}{\delta x_W} \right] + S = 0 \quad (\text{Eşitlik 82})$$

Kontrol hacminin giriş ve çıkış yüzeylerindeki difüzyon akıları (ϕ) arasındaki fark kadar rejimde difüzyon akı üretimi olacağından, denklem aşağıdaki gibi yeniden yazılabilmektedir.

$$\frac{1}{\Delta V} \left[\frac{\Gamma_e A_E}{\delta x_E} + \frac{\Gamma_w A_W}{\delta x_W} \right] \phi_P = \frac{1}{\Delta V} \left[\frac{\Gamma_e A_E}{\delta x_E} \right] \phi_E + \frac{1}{\Delta V} \left[\frac{\Gamma_w A_W}{\delta x_W} \right] \phi_W + S \quad (\text{Eşitlik 83})$$

Eşitlik 82 α_e , α_p ve α_w katsayıları kullanılarak cebirsel formda aşağıdaki gibi yazılabilmektedir.

$$\alpha_P \phi_P = \alpha_E \phi_E + \alpha_W \phi_W + b \quad (\text{Eşitlik 84})$$

Burada;

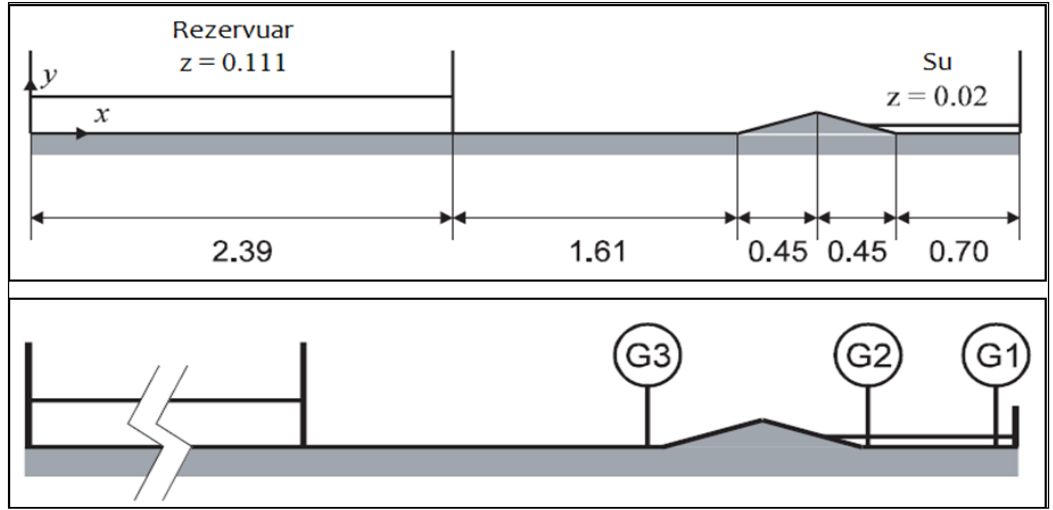
$$\alpha_E = \frac{\Gamma_E A_E}{\Delta V \delta x_E}$$

$$\alpha_W = \frac{\Gamma_W A_W}{\Delta V \delta x_W}$$

$\alpha_P = \alpha_E + \alpha_W$ ve $b = S$ olarak kabul edilmektedir.

3.7. Doğrulama Analizi

Soares-Fraza (2007), yapmış olduğu çalışmada 0.5 m genişlik ve 5.6 m uzunlukta olan iki ucu kapalı dikdörtgen kanal düzeneği oluşturmuştur. Başlangıçtan 2.39 m mesafede yerleştirilen düşey kapak ile 0.111 m yüksekliğinde ve 2.39 m uzunluğunda rezervuar alanı elde edilmiştir. Ayrıca barajın (kapağın) 1.61 m mansabına yerleştirilen tepe yüksekliği 0.065 m, şev eğimleri ise 0.14 olan üçgen eşik ve eşikten sonraki kısımda da 0.02 m derinliğinde su bulunmaktadır. Çalışmada yıkılma sonrası gelişen taşkın dalgasının ani eğim değişimlerindeki davranışı incelenmiştir. Deneysel düzeneğe yerleştirilen 3 adet seviye ölçer ve dijital kamera sayesinde su derinlikleri ve su yüzü profilleri elde edilmiştir. Deney düzeneğine ilişkin görsel Şekil 30'da verilmiştir.



Şekil 30. Soares-Frazao (2007) deney modeli

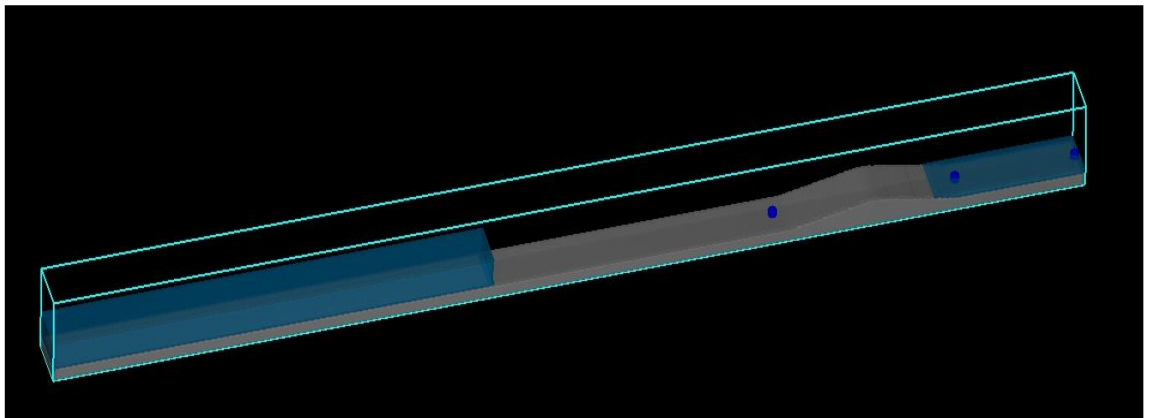
Deneydeki seviye ölçerlerin konumu ile ilgili bilgiler aşağıda Tablo 11’de verilmektedir.

Tablo 11. Soares-Frazao (2007) seviye ölçerlerin konumu

Seviye Ölçer	x (m)	y (m)
G1	5.575	0.25
G2	4.925	0.25
G3	3.935	0.25

Baraj kapağı x = 0 noktasıdır.

Soares-Frazao (2007) tarafından geliştirilen deneysel model bire bir ölçüleriyle FLOW3D yazılımında kurulmuştur. Deneysel sonuçlarla karşılaştırma yapmak için Tablo 11’de verilen konumlara probe noktaları atanmıştır.



Şekil 31. FLOW3D Soares-Farazao (2007) deneysel modeli

Sayısal simülasyonlarda 2D analiz için çözüm ağı hücreleri x ve y doğrultularında 0.02 m x 0.02 m; 3D analiz için x, y ve z doğrultularında 0.02 m x 0.02 m x 0.005 m olarak seçilmiştir. 2D ve 3D simülasyonlar için sırasıyla toplamda 7000 ve 254800 mesh hücresi kullanılmıştır. Simülasyonda türbülans modeli olarak yine RNG k-ε modeli seçilmiştir.

İntel i7 6 çekirdekli işlemci ve 16 GB RAM'e sahip bilgisayarla gerçekleştirilen simülasyonlarda 2D analizin çözüm süresi 3 dakika iken 3D analizin çözüm süresi 30 dakika olarak gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar ve deneysel model ile karşılaştırılması Bulgular ve Tartışma bölümünde verilmiştir.

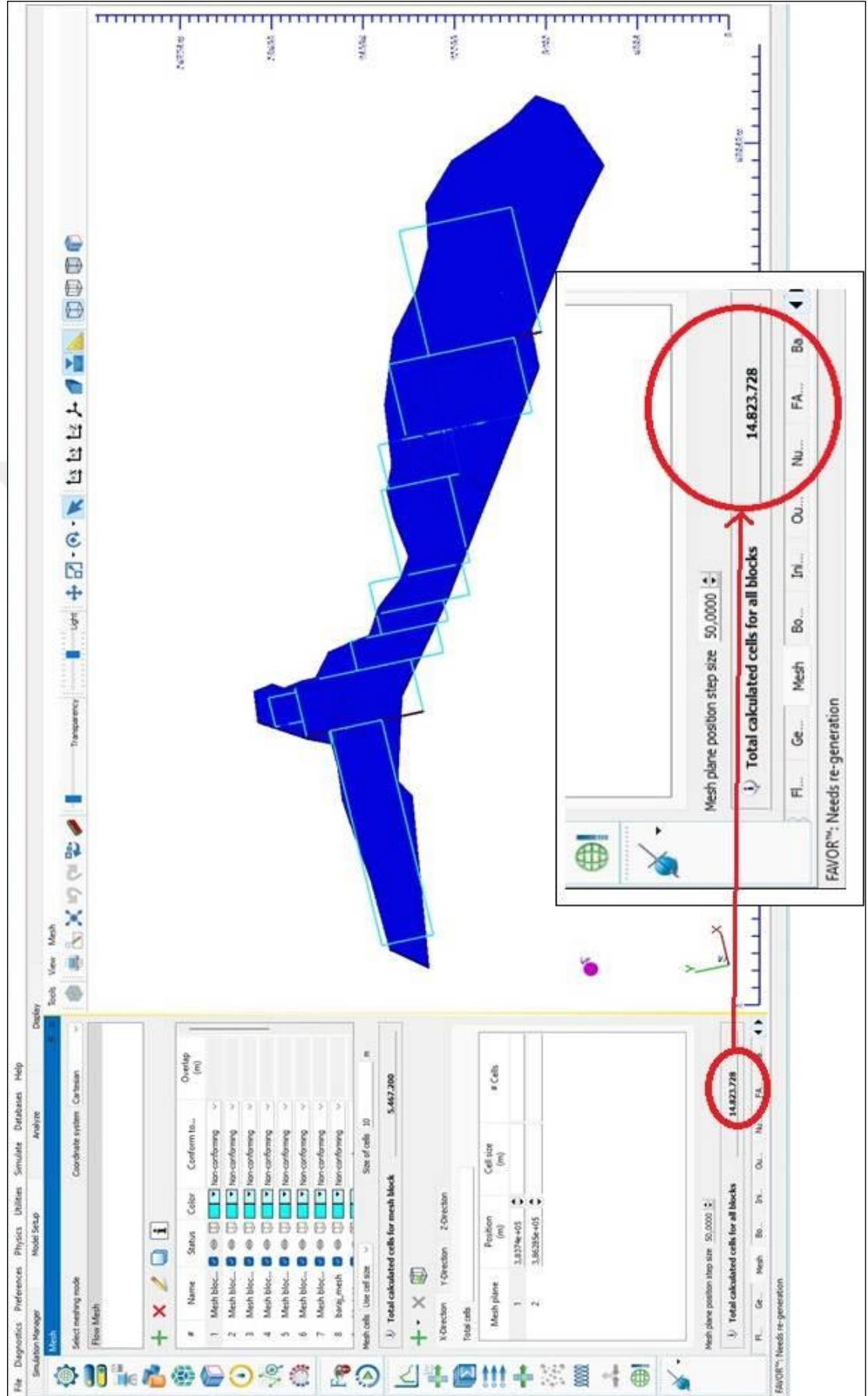
3.8. FLOW3D ile 2D ve 3D Baraj Yıkılma Analizlerinin Gerçekleştirilmesi

Baraj yıkılma simülasyonu gibi geniş çalışma alanı olan araştırmaların deneysel yöntemlerle gerçekleştirilmesi zor ve çok yüksek maliyetli olmaktadır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği ve yazılım alanındaki gelişmeler bu noktada araştırmacılara büyük kolaylıklar sağlamaktadır (Şimşek, 2011; Palamut, 2014).

Bu tez çalışmasında FLOW3D yazılımı kullanılarak Iğdır İli, Tuzluca İlçesinde yapılması planlanan Tuzluca Barajı'nın 2D ve 3D sayısal yıkılma simülasyonları gerçekleştirilmiştir. FLOW3D yazılımı, zamana bağlı üç boyutlu akış problemlerini çözmek için geliştirilen sayısal yöntemleri kullanarak RANS ve süreklilik denklemlerini aynı anda çözebilmektedir (Güven, 2021).

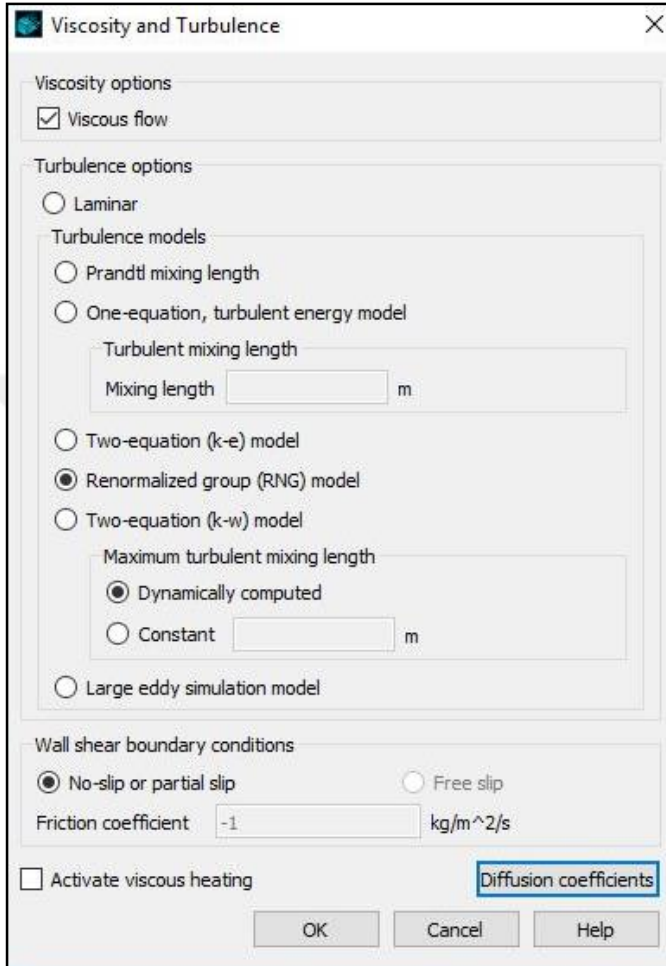
Arazinin modellenebilmesi için, baraj bölgesine ait 12.5 m çözünürlüğünde sayısal yükseklik modeli (DEM) verileri, güvenilirliği birçok çalışmada test edilmiş ALOS uydusuna ait verilerden alınmıştır. Bu veriler ArcGIS 10.8 yazılımında düzenlenmiş, daha sonra Global Mapper yazılımıyla STL formatına dönüştürülerek FLOW3D'ye katı cisim olarak eklenmiştir.

Sayısal hesaplamalar dikdörtgen hücrelerden (mesh) oluşan bir çözüm ağı üzerinde yapılmakta, mesh boyutları analiz süresi ve çözüm hassasiyetini önemli ölçüde etkilemektedir. Tuzluca Barajı'na ait çalışma bölgesi yaklaşık 101 km²'lik çok geniş bir araziye kapladığından analiz süresi ve çözüm hassasiyetiyle ilgili değerlendirmeler ve literatür araştırmaları sonucu mesh boyutları, yerleşimlerin bulunduğu ve can kaybı riski olan alanlarda 10 m x 10 m, diğer bölgelerde ise 20 m x 20 m seçilmiştir. 3D simülasyonlarda z doğrultusunda 1 m yüksekliğinde mesh boyutları seçilmiştir. Analizlerde 10 farklı mesh blokta 2D simülasyonlar için toplam 606,248; 3D simülasyonlar için toplam 14,823,728 mesh hücresi (çözüm ağı) oluşturulmuştur. Söz konusu mesh blokları ve toplam hücre sayısına ait görsel aşağıda Şekil 32'de verilmiştir.



Şekil 32. FLOW3D mesh blokları ve toplam hücre sayısı

Sayısal simülasyonda türbülans modeli olarak, literatürdeki baraj yıkılma analizlerinde yaygın bir şekilde kullanılan ve birçok çalışmada doğruluğu test edilen Renormalize Edilmiş (RNG) k- ϵ modeli seçilmiştir (Kaheh vd., 2010; Dehdar-behbahani and Parsaie, 2016; Oliva ve Valentin, 2017; Aksoy vd., 2022).



Şekil 33. FLOW3D türbülans modeli seçimi

Simülasyonun gerçekleştirilmesinden önce yapılması gereken bir başka önemli husus sınır şartlarının tanımlanmasıdır. Akışın fiziksel yapısını doğru temsil edecek uygun sınır şartlarının belirlenmesi problemin çözümünü önemli ölçüde etkilemektedir.

FLOW3D yazılımında çözüm ağı yüzeyleri için 10 farklı sınır koşulu seçeneği bulunmaktadır. Akış özellikleri ve fiziksel model dikkate alınarak; Simetri (S), Duvar (W, Wall) ve Dışarı akış (O, Outflow) olmak üzere üç farklı sınır koşulu tanımlanmıştır. Simetri (S) sınır koşulu, mesh blokları arasında akım özelliklerinin değişmemesi durumu için kullanılmıştır. Duvar (W) sınır koşulu yanal yüzeylerde su akışına engel sınırların tanımlanması için kullanılırken Dışarı akış (O) sınır koşulu ise akımın sistemden çıkışını modellemek için kullanılmıştır.

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen sayısal simülasyonlara ait genel karakteristik bilgiler aşağıda Tablo 12’de özetlenmiştir.

Tablo 12. Sayısal simülasyonlara ait genel karakteristik bilgiler (Akgün vd., 2023).

Genel	Analiz süresi	1. Senaryo 7200 s 2. Senaryo 4700 s 3. Senaryo 6500 s
	Birim sistemi	SI
	Akış modu	Sıkışamayan
Fizik	Yer çekimi ivmesi	-9.81 m/sn ²
	Türbülans modeli	RNG k-ε
Akış	Materyal	Su (20 °C)
	Yoğunluk	1000 kg/m ³
Mesh ve Geometri	Mesh boyutları	10 m x 10 m; 20 m x 20 m
	Toplam mesh sayıları*	606248; 14823728
	Mesh tipi	Kartezyen
	Sınır şartları**	X _{min} = Duvar (W), Simetri (S)
		X _{max} = Simetri (S), Dışarı akış (O)
		Y _{min} = Duvar (W)
		Y _{max} = Duvar (W)
		Z _{min} = Duvar (W)
		Z _{max} = Dışarı akış (O)

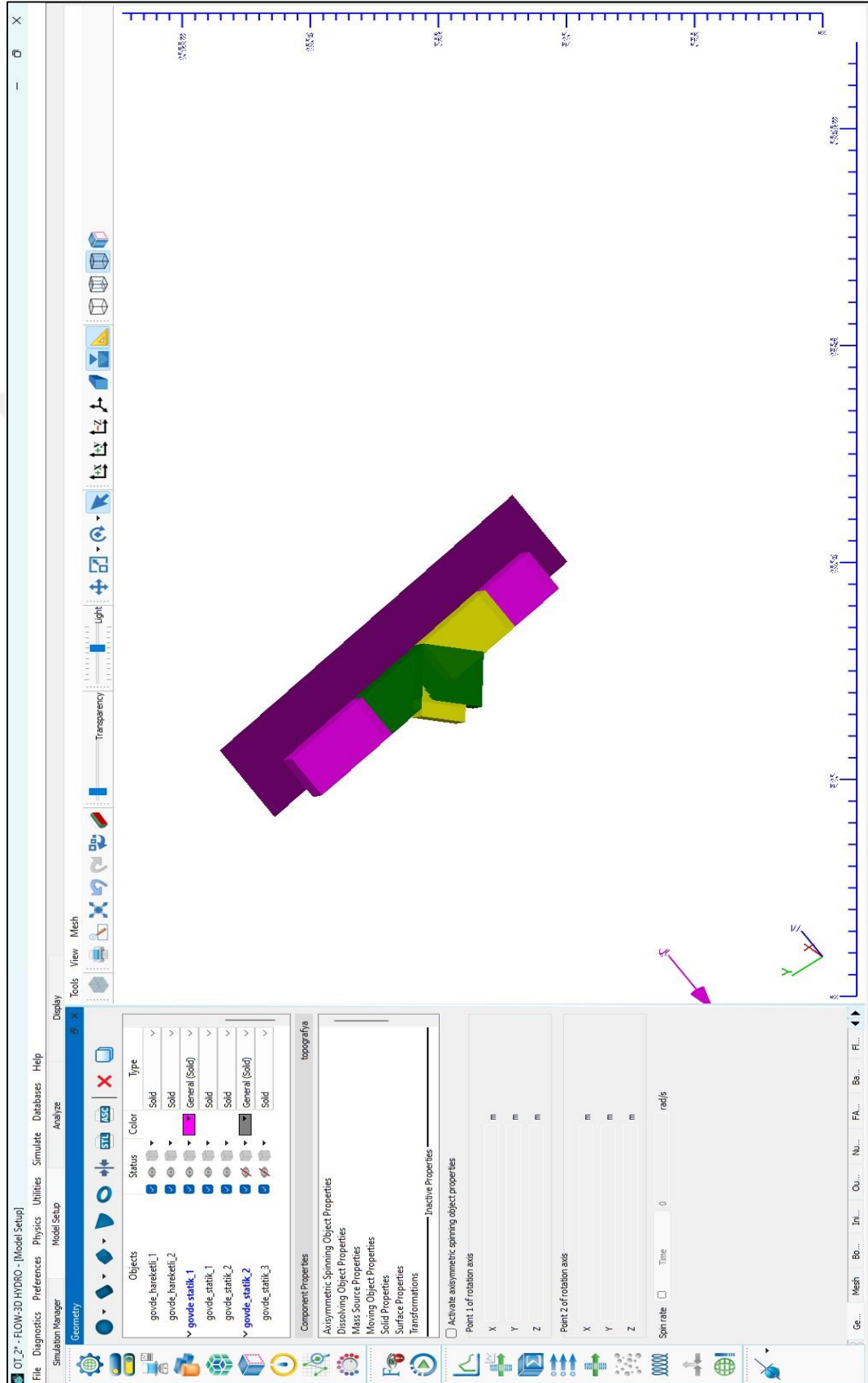
* 2D analizde toplam mesh sayısı 606248'dir. 3D analizde z yönünde 1m mesh boyutu kullanıldığından toplam mesh sayısı 14823728'dir.

** İlk mesh blokta Xmin = Duvar sınır koşulu uygulanırken diğer mesh bloklarda sürekliliği sağlamak için Xmin = Simetri sınır koşulu uygulandı. Son mesh bloğunda Xmax = Dışarı akış sınır koşulu uygulanırken, diğer mesh bloklarında Xmax = Simetri sınır koşulu uygulandı.

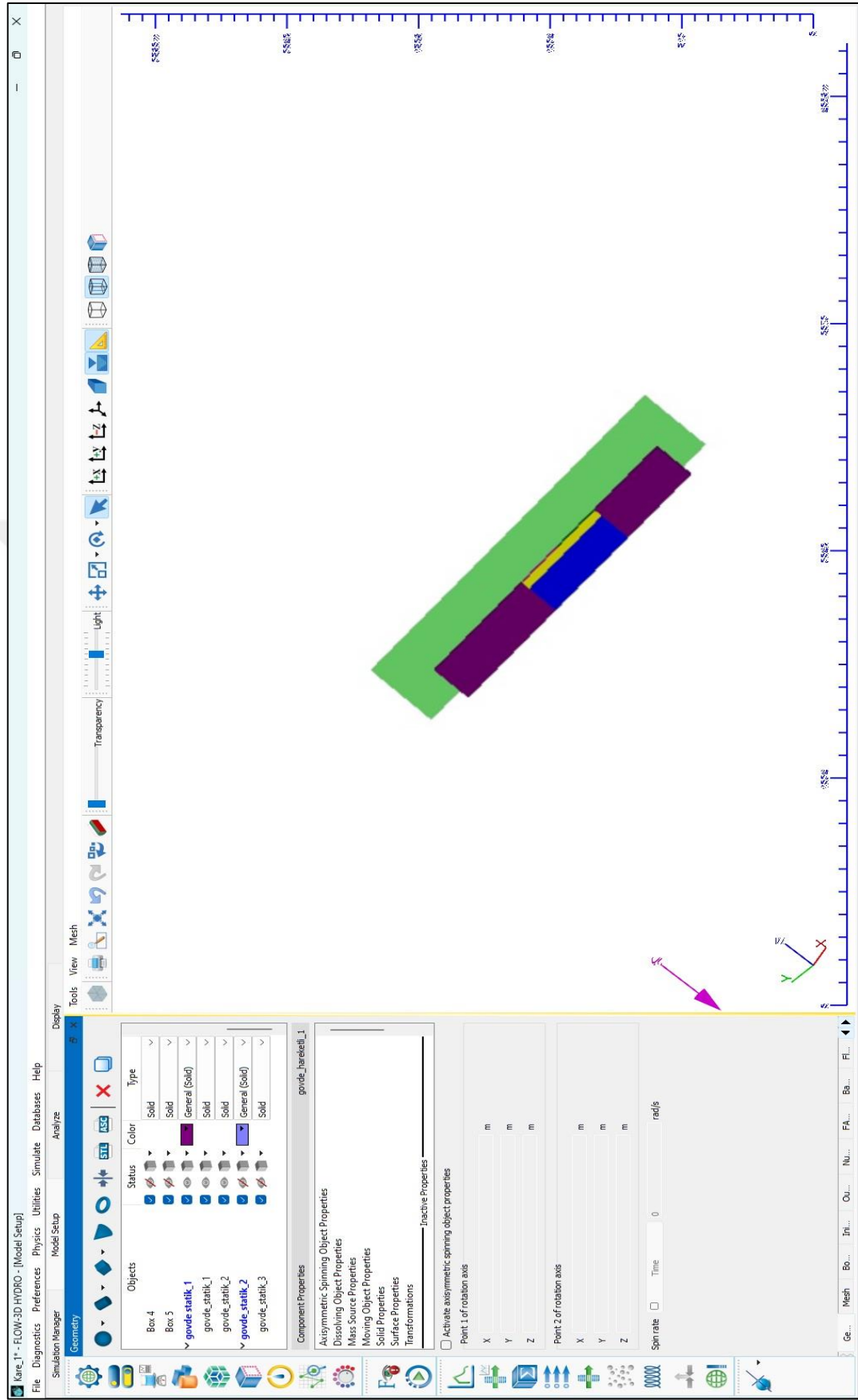
Baraj yıkılma analizlerinde sürece etki eden bir başka önemli husus baraj gövdesinde meydana gelecek gediklenme durumudur. Gedik parametrelerinin belirlenmesi için bölüm 3.5’te literatürde yaygın olarak kullanılan yöntemler karşılaştırılarak, yıkılma şekli ve yıkılma süreleri üzerinden 3 farklı senaryoya ait yıkılma parametreleri belirlenmiştir.

Literatürdeki baraj yıkılma çalışmalarının büyük bir kısmında yıkılma, gövdenin tamamı ya da belirlenen gedik boyutu kadar olan parçasının aniden kaldırılmasıyla ani yıkılma şeklinde gerçekleşmektedir. Ancak gerçek bir dolgu baraj yıkılması, herhangi bir sebepten dolayı açılan gediğin zamana bağlı büyümesiyle kademeli olarak gerçekleşmektedir. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen analizde bu durum sisteme hareketli parçalar tanımlanarak sağlanmıştır. FLOW3D yazılımında baraj gövdesi koordinatlarına göre baraj aksına hareketli gövde elemanları tanımlanarak baraj gövdesi oluşturulmuştur. Aşağı yukarı ve sağa sola hareket eden parçalara çeşitli hızlar tanımlanarak her bir senaryoya uygun nihai gedik genişliği ve açılma süresi elde

edilmiştir. Şekil 34 ve Şekil 35'te FLOW3D yazılımında trapez ve dikdörtgen gedik mekanizmaları için oluşturulan hareketli parçalar gösterilmiştir.

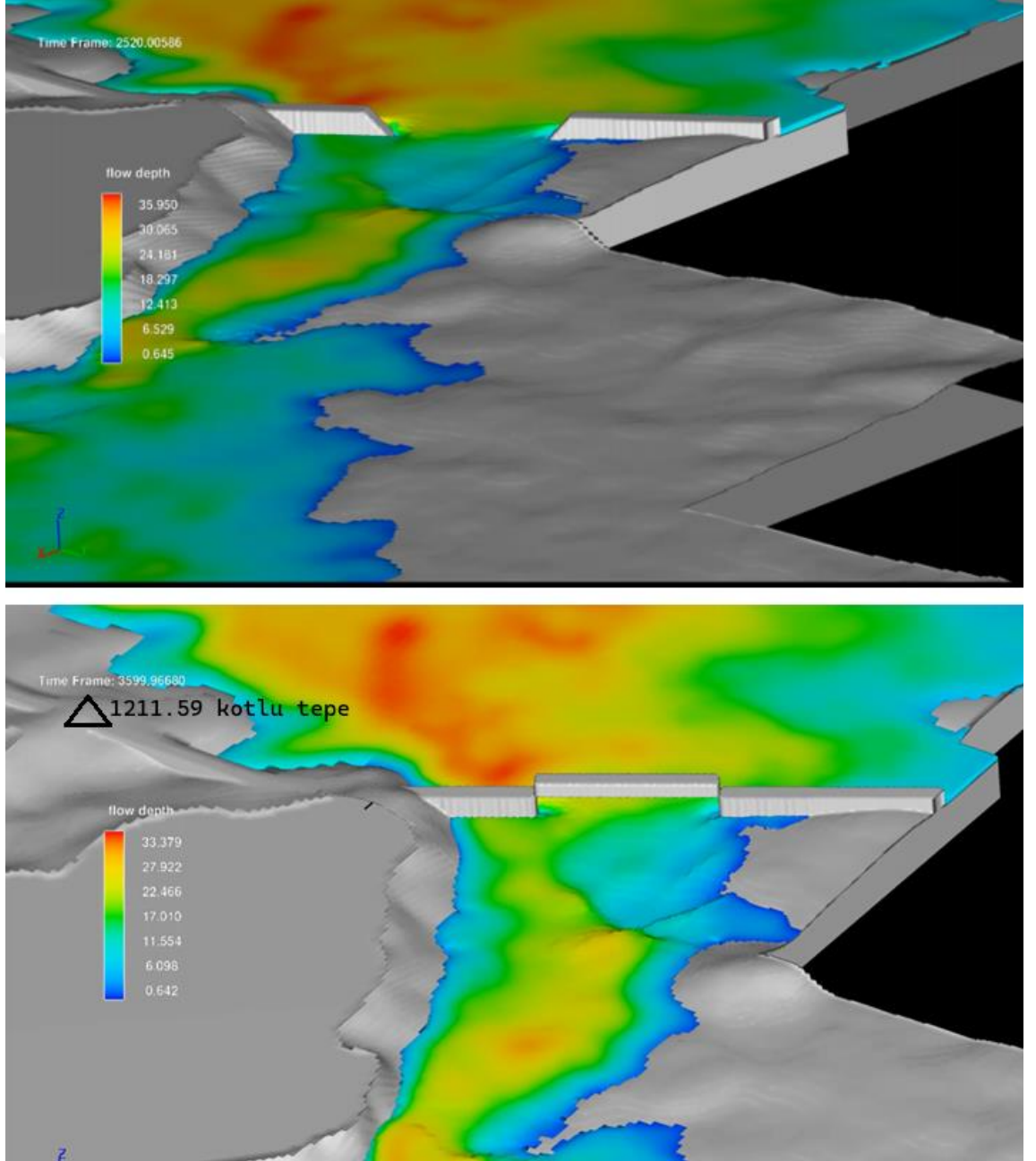


Şekil 34. Trapez gedik için FLOW3D yazılımında oluşturulan hareketli parçalar



Şekil 35. Dikdörtgen gedik için FLOW3D yazılımında oluşturulan hareketli parçalar

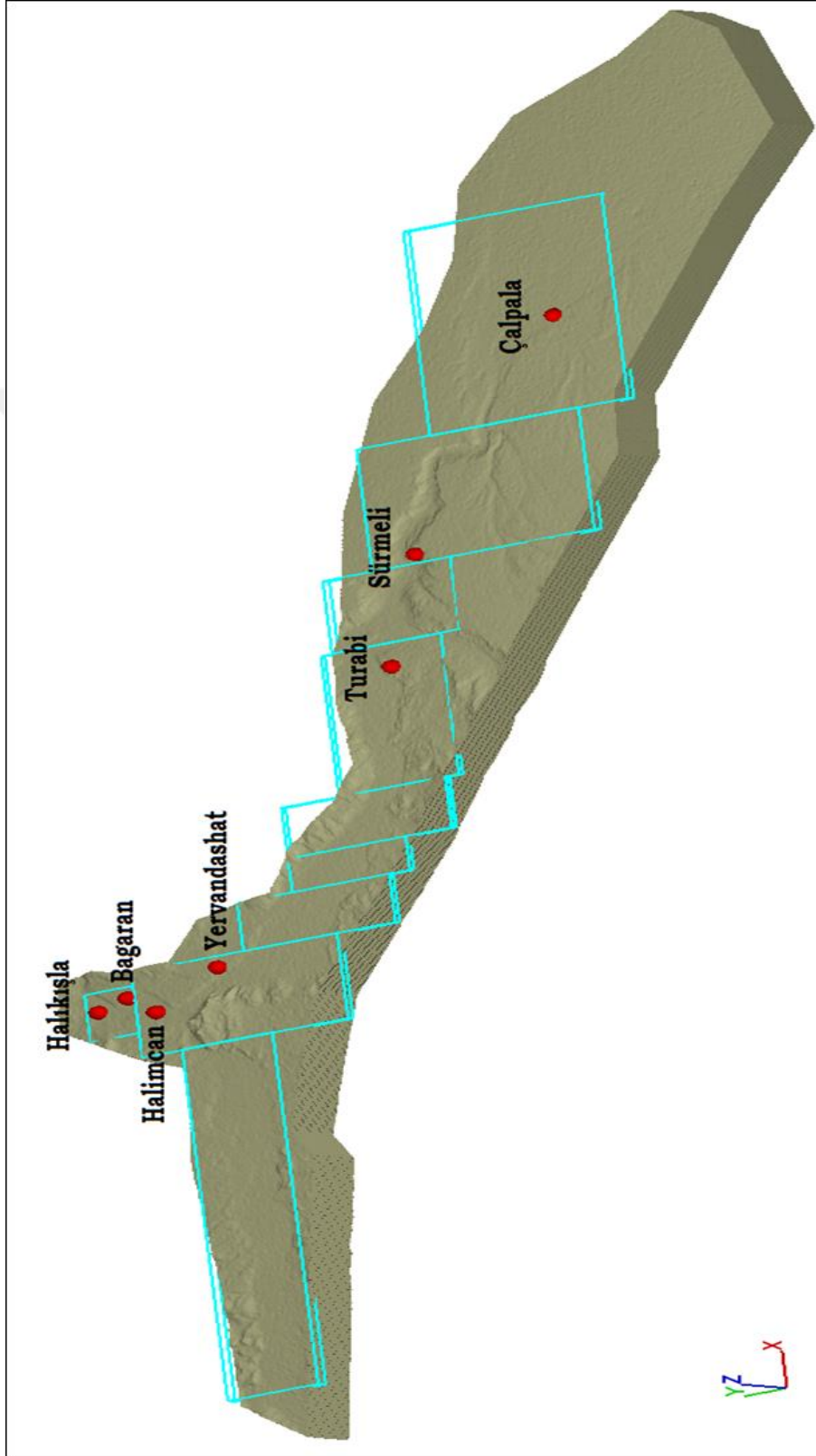
Şekil 34, 35’teki görseller, FLOW3D yazılımında model kurulurken tanımlanan basit geometriler ve oluşturulan gövde parçalarını temsil etmektedir. Simülasyon gerçekleştirildiğinde, trapez ve dikdörtgen gedik durumları için baraj gövdesi ve su akışlarına ilişkin görseller aşağıda Şekil 36’da verilmiştir.



Şekil 36. Simülasyonlarda trapez ve dikdörtgen gediklerde taşkın durumu (Akgün vd., 2023).

FLOW3D yazılımında model kurulurken mansap bölgesindeki yerleşimlere probe noktaları atanarak taşkın anında yerleşimlerdeki taşkın etkileri incelenmiştir. Bu doğrultuda, baraj mansabında bulunan ve ülkemiz sınırlarındaki Halimcan, Halıkışla,

Turabi, Sürmeli, Çalpala köyleri ile Ermenistan sınırları içerisinde bulunan Bagaran ve Yervandashat yerleşimlerine probe noktaları atanmıştır. Söz konusu probe noktaları Şekil 37’de gösterilmiştir.



Şekil 37. FLOW3D yerleşimlere atanan probe noktaları (Akgün vd., 2023).

Tuzluca Barajı'nın olası yıkılma problemi için gerekli topoğrafik ve hidrolik şartlar FLOW3D yazılımına aktarılarak simülasyon için model kurulmuştur. İki farklı yıkılma şekli (üstünden su aşma, borulanma), farklı gedik boyutları ve farklı yıkılma süreleri üzerinden belirlenen üç senaryo iki farklı çözüm yöntemine (2D SWE ve 3D RANS) uygulanarak toplam 6 farklı simülasyon gerçekleştirilmiştir. Intel i7, 6 çekirdekli işlemci ve 16 GB RAM'e sahip bilgisayarla gerçekleştirilen analizlerde; 2D analizler için her bir simülasyonun çözüm süresi ortalama 18 saat iken 3D analizlerde her bir simülasyon ortalama 15 günde tamamlanmıştır. Elde edilen sonuçlar Bulgular ve Tartışma bölümünde irdelenmiştir.

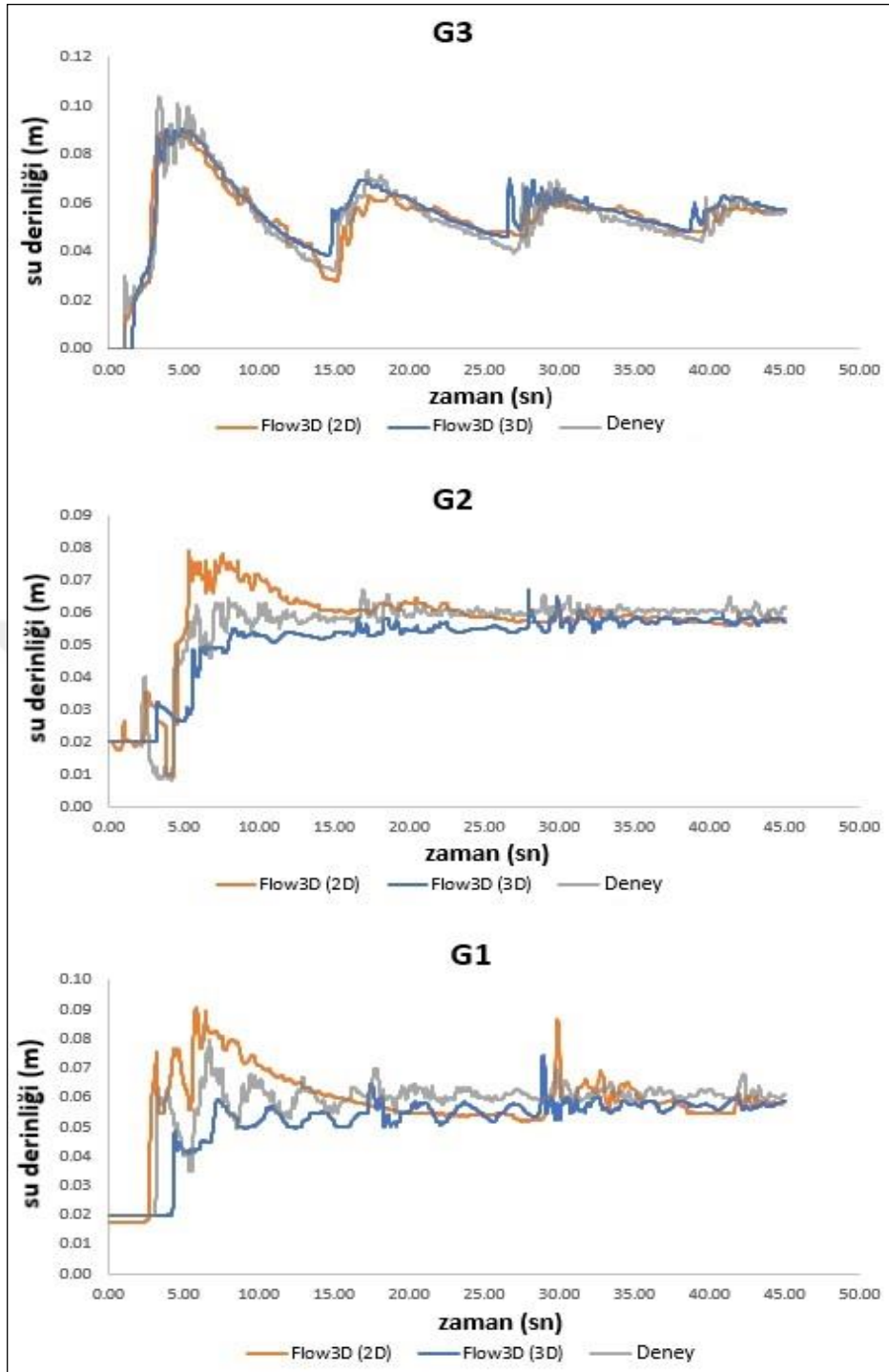
Ayrıca bu tez çalışmasında, yapılan analizlerin güvenilirliğinin ölçülebilmesi için bir doğrulama analizi de yapılmıştır. Bu kapsamda Soares-Fraza (2007) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışma FLOW3D yazılımına aktarılarak sayısal simülasyonu yapılmıştır. Elde edilen sayısal simülasyon sonuçları ile deney sonucu ölçülen değerler karşılaştırılmıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. FLOW3D Doğrulama Analizi Sonuçları

Doğrulama çalışmasında Soares-Fraza (2007) tarafından gerçekleştirilen baraj yıkılması deneyi FLOW3D yazılımı kullanılarak 2D ve 3D analizlerle sayısal olarak çözülmüş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Intel i7 işlemcili, 6 çekirdekli ve 16 GB RAM'e sahip bilgisayarda gerçekleştirilen simülasyonlar, 2D analiz için 3 dakika, 3D analiz için ise 30 dakika sürmüştür. G1, G2 ve G3 noktalarındaki su seviyesi değişimlerinin deney sonuçlarıyla karşılaştırılması Şekil 38'de gösterilmektedir.





Şekil 38. Deney ve sayısal modellerin karşılaştırılması (Akgün vd., 2023).

Şekil 38 incelendiğinde 2D ve 3D sayısal simülasyon sonuçlarının deney sonuçlarıyla tatmin edici bir uyum gösterdiği anlaşılmaktadır. Sığ Su denklemlerini çözen 2D sayısal model, hiçbir engelin bulunmadığı G3 noktasında başarılı sonuçlar verirken, eşğin mansabında yer alan G2 ve G1 noktalarında nispeten daha kötü performans göstermiştir. Navier-Stokes denklemleri ile çözüm yapan 3D sayısal modelin çalışmanın genelinde; özellikle ani topoğrafik değişikliklerde, hidrolik sıçramalarda ve su hareketinin zamanlamasında daha başarılı olduğu görülmüştür. Bu gözlem literatürde

benzer karşılaştırmaların yapıldığı çalışmalarla tutarlıdır (Kocaman, 2007; Zhang vd., 2018; Dai vd., 2020; Kocaman vd., 2021; Hien vd., 2021; Akgün vd., 2023).

Deney sonuçları ve sayısal modellerde belirlenen su derinlikleri arasındaki sapma miktarının belirlenmesi için üç nokta için de Kök Ortalama Kare Hatası (RMSE) ve Ortalama Mutlak Hata (MAE) değerleri hesaplanmıştır. RMSE ve MAE yöntemleri, iki veri seti arasındaki hata miktarının belirlenmesi ve model performansının değerlendirilmesinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Willmott ve Matsuura, 2005; Chai ve Draxler, 2014; Robb ve Vasquez, 2015).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2} \quad (\text{Eşitlik 85})$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e_i| \quad (\text{Eşitlik 86})$$

Bu eşitliklerde e , model hatasını temsil etmektedir. G1, G2 ve G3 noktalarında hesaplanan değerler Tablo 13’te verilmiştir.

Tablo 13. RMSE ve MAE değerleri

Probe	RMSE (m)		MAE (m)	
	3D	2D	3D	2D
G3	0.0047	0.0048	0.0028	0.0030
G2	0.0050	0.0051	0.0044	0.0047
G1	0.0048	0.0050	0.0038	0.0041

RMSE ve MAE değerlerinin 0’a yakınlığı model performansının doğruluk seviyesini göstermektedir ancak bu noktada bir eşik değer bulunmamaktadır. RMSE ve MAE değerlerine göre model performansının değerlendirilmesi, veri seti ve model özelliklerine göre değişkenlik göstermektedir.

Deneyisel modelde G1, G2 ve G3 noktalarında zamana bağlı ölçülen su seviyesi değerlerinin ortalaması sırasıyla 0.0599 m, 0.0611 m ve 0.0548 m olarak hesaplanmıştır. 2D simülasyon sonuçlarının deneyisel modelden maksimum sapma değerleri G1, G2 ve G3 noktalarında sırasıyla 0.038 m, 0.028 m ve 0.016 m olarak gözlemlenirken, 3D simülasyon sonuçlarına göre G1, G2 ve G3 noktalarında bu değerler sırasıyla 0.033 m, 0.023 m ve 0.016 m olarak gözlemlenmiştir. Tablo 13’de hesaplanan RMSE ve MAE

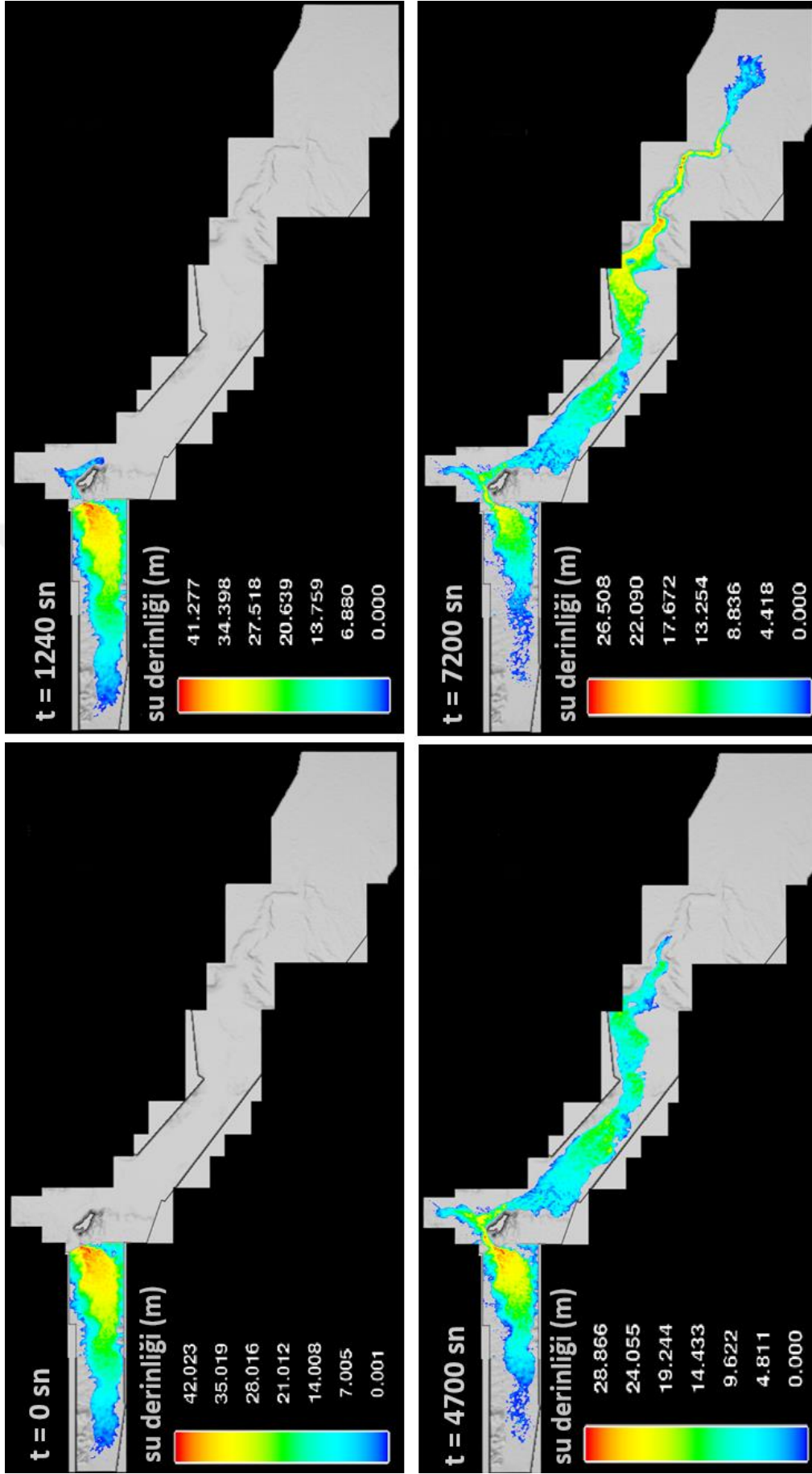
değerleri, ortalama değerlerden çok küçük olduğundan model performansının iyi olduğu kabul edilebilmektedir.

4.2. FLOW3D 2D ve 3D Taşkın Simülasyonları

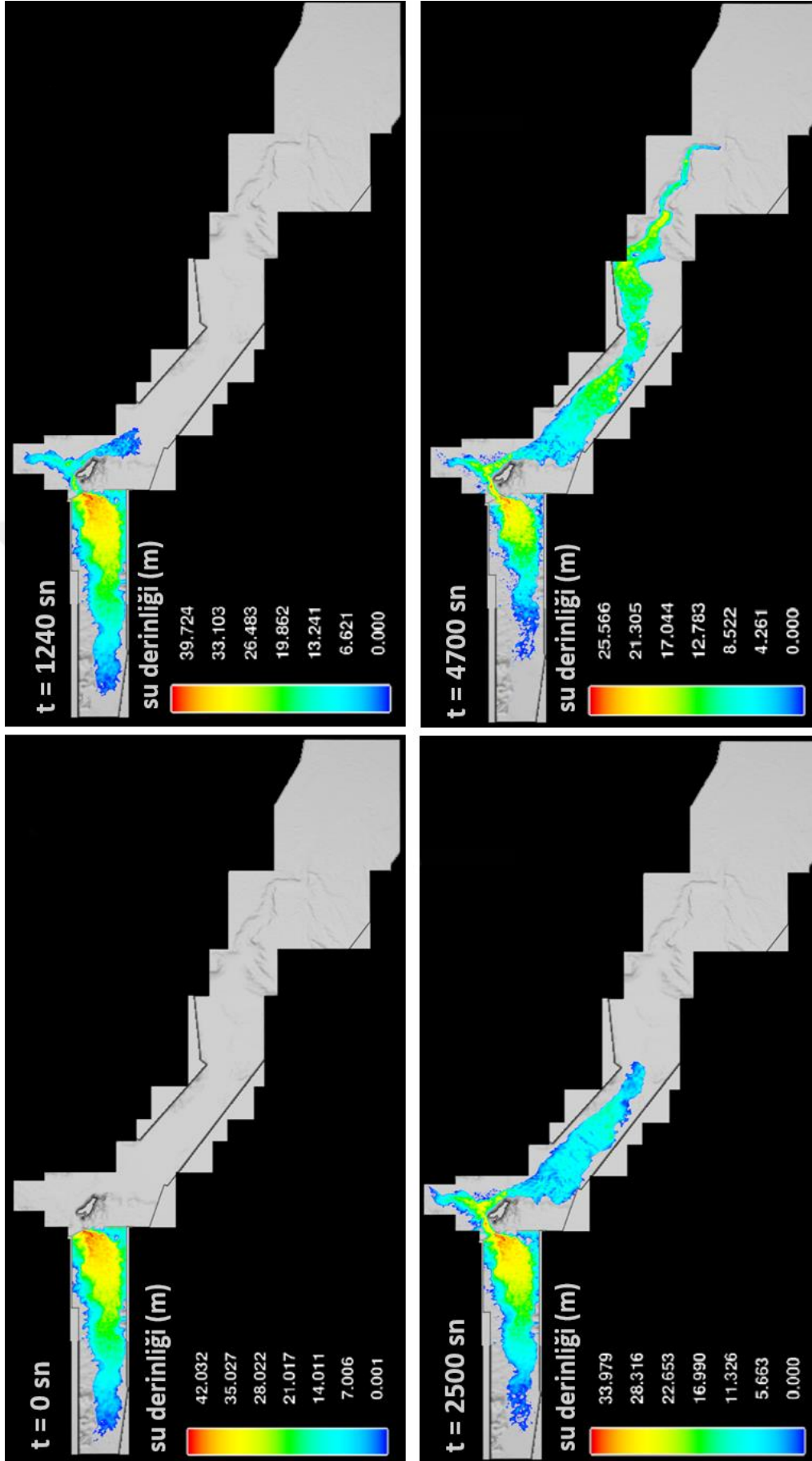
FLOW3D yazılımında; iki farklı yıkılma şekli (üstünden su aşma, borulanma), farklı gedik boyutları ve farklı yıkılma süreleri üzerinden belirlenen üç senaryo iki farklı çözüm yöntemine (2D SWE ve 3D RANS) uygulanarak toplam 6 farklı simülasyon gerçekleştirilmiştir.

2D Sığ Su denklemleriyle gerçekleştirilen analizlerde her bir senaryo için taşkın yayılımının zamana göre değişimi Şekil 39-41’de verilmektedir.

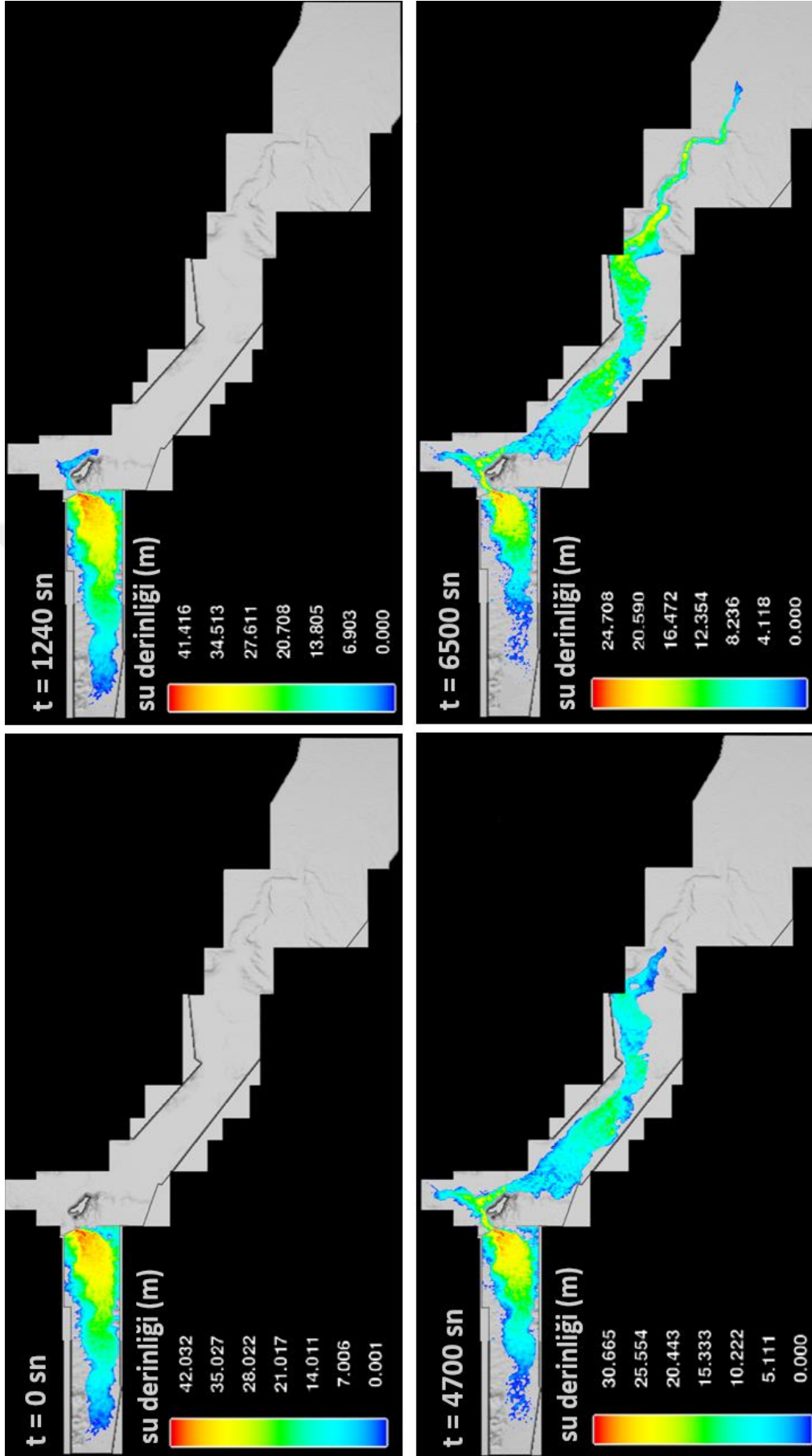




Şekil 39. 2D analizlerde 1. senaryo için taşkın yayılımının zamanla değişimi (Akgün vd., 2023).



Şekil 40. 2D analizlerde 2. senaryo için taşkın yayılımının zamanla değişimi (Akgün vd., 2023).

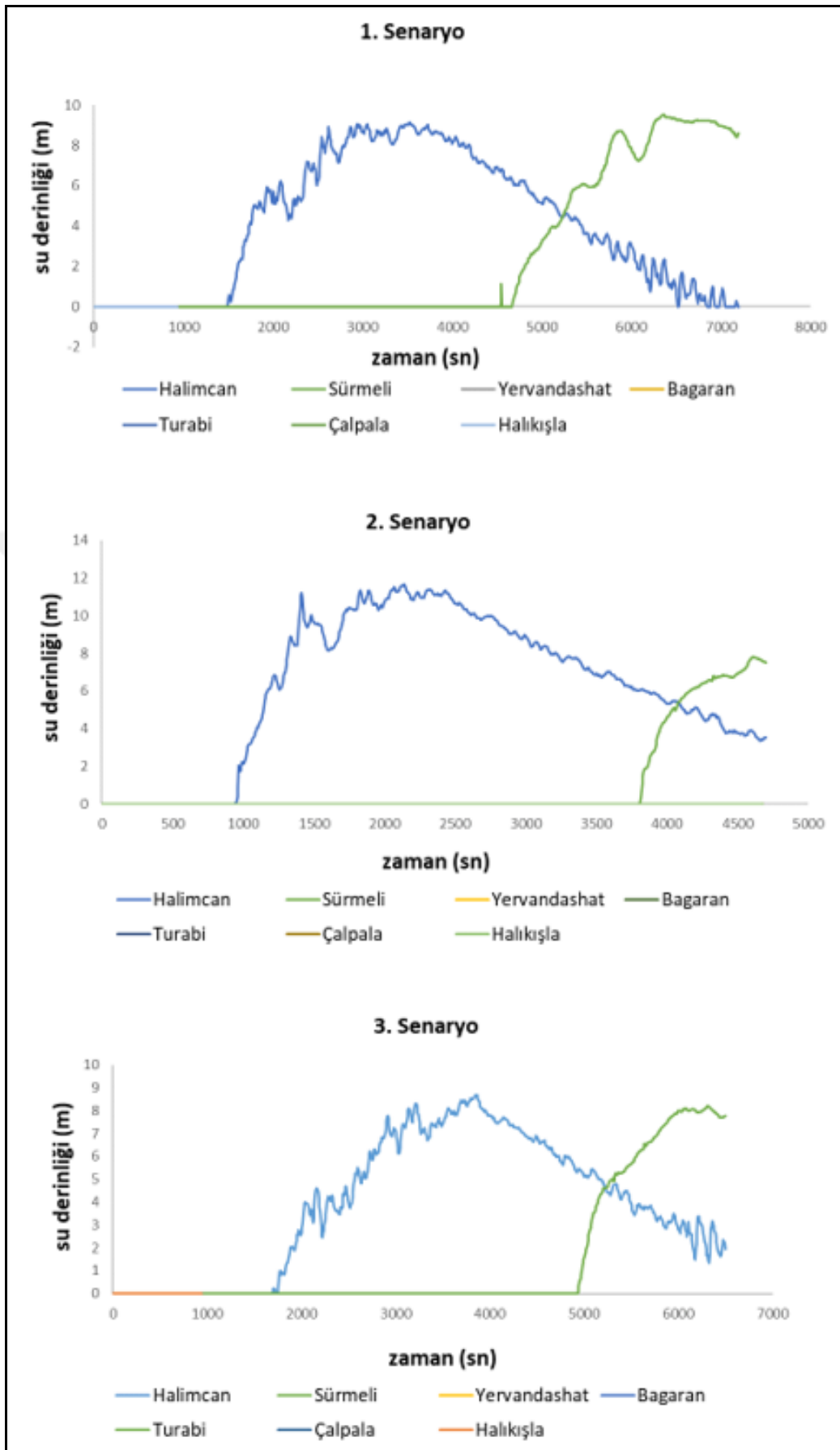


Şekil 41. 2D analizlerde 3. senaryo için taşkın yayılımının zamanla değişimi (Akgün vd., 2023).

Her bir senaryo için taşkın yayılma simülasyonları incelendiğinde, baraj yıkılma süresinin daha kısa olduğu 2. senaryoda beklendiği gibi taşkın yayılım hızının daha yüksek olduğu görülmektedir. Yıkılmanın borulanma kaynaklı ve gedik geometrisinin daha küçük olduğu 3. senaryoda ise taşkın yayılım hızı en düşük çıkmıştır.

Yıkılma sonrası risk altındaki yerleşimlerin durumunu daha detaylı analiz etmek için 7 yerleşim birimine probe noktaları atanmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre taşkın dalgasından sadece Halimcan ve Sürmeli köylerinin etkilendiği görülmüştür. Diğer köyler daha yüksek bölgelerde yer aldığından sadece tarım arazileri etkilenmiştir. Tüm senaryolar için köy yerleşimlerindeki taşkın derinlikleri Şekil 42'de gösterilmektedir.



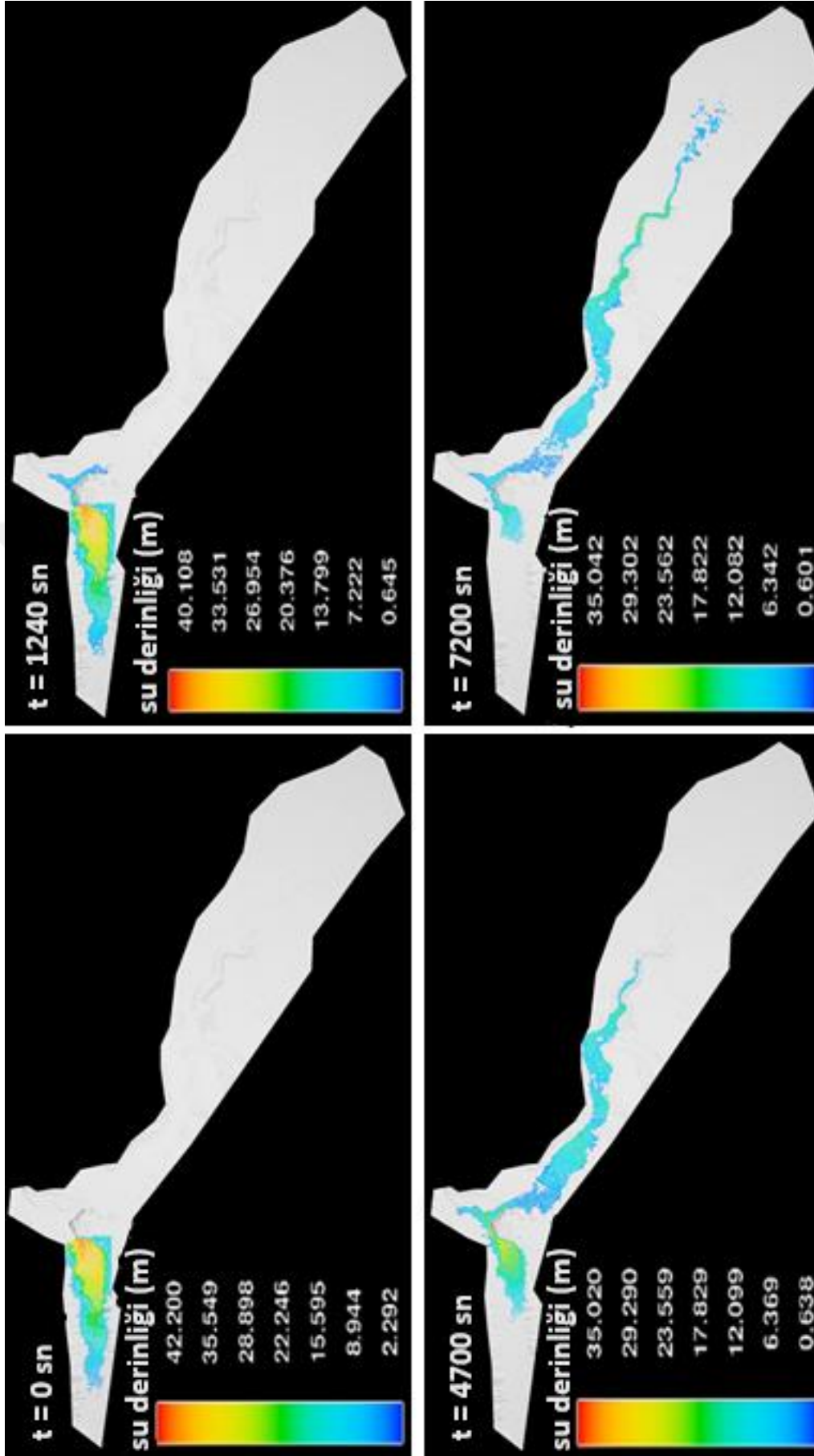


Şekil 42. 2D analizler için 1., 2. ve 3. senaryolarda yerleşimlere ait su derinlikleri (Akgün vd., 2023).

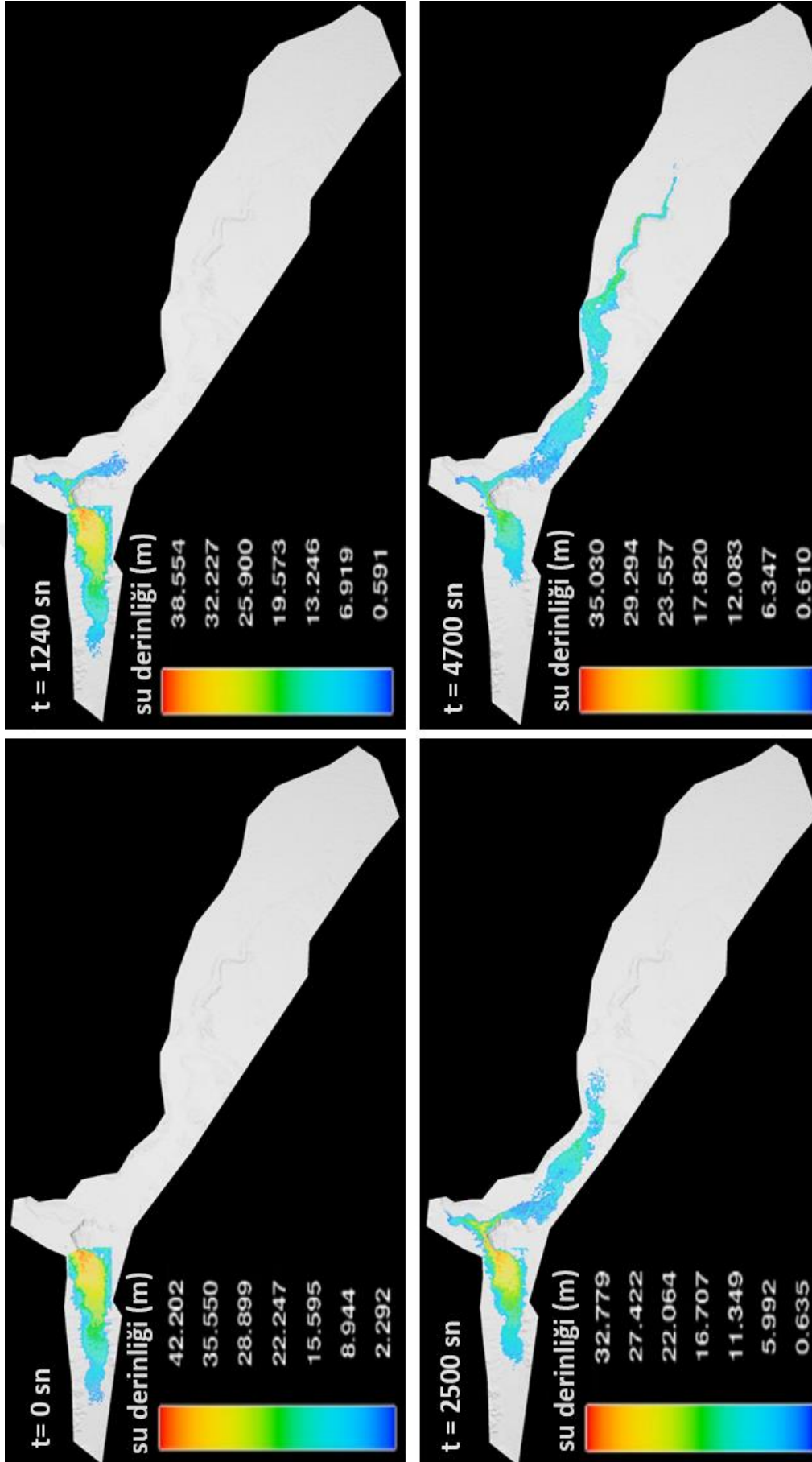
2D baraj yıkılma simülasyonu sonuçları incelendiğinde baraj aksından yaklaşık 1,6 km uzaklıkta bulunan Halimcan yerleşiminde Senaryo 1, 2 ve 3 için sırasıyla 9.12 m, 11.26 m ve 8.68 m maksimum su derinliklerinin olduğu görülmüştür. Baraj aksından yaklaşık 15 km uzaklıkta bulunan Sürmeli köyünde ise Senaryo 1, 2 ve 3 için sırasıyla 9.61 m, 8.15 m ve 8.20 m maksimum su derinlikleri gözlemlenmiştir. Ayrıca sel sularının Halimcan köyüne varış süreleri Senaryo 1, 2 ve 3 için sırasıyla 24 dakika, 16 dakika ve 28 dakika olarak gözlenirken, Sürmeli köyü için bu süreler sırasıyla 75 dakika, 62 dakika ve 82 dakika olarak gözlemlenmiştir (Akgün vd., 2023).

Maksimum taşkın derinlikleri noktasında her iki yerleşimde de ciddi taşkın derinlikleri oluşmasına karşın Sürmeli yerleşimine taşkın sularının ulaşma süresi tüm senaryolarda 1 saatin üzerinde çıkmıştır. Bu durum söz konusu yerleşimi Halimcan'a göre daha az riskli yapmakta ve etkili erken uyarı sistemlerinin varlığı halinde can kaybı riskinin düşebileceğini göstermektedir.

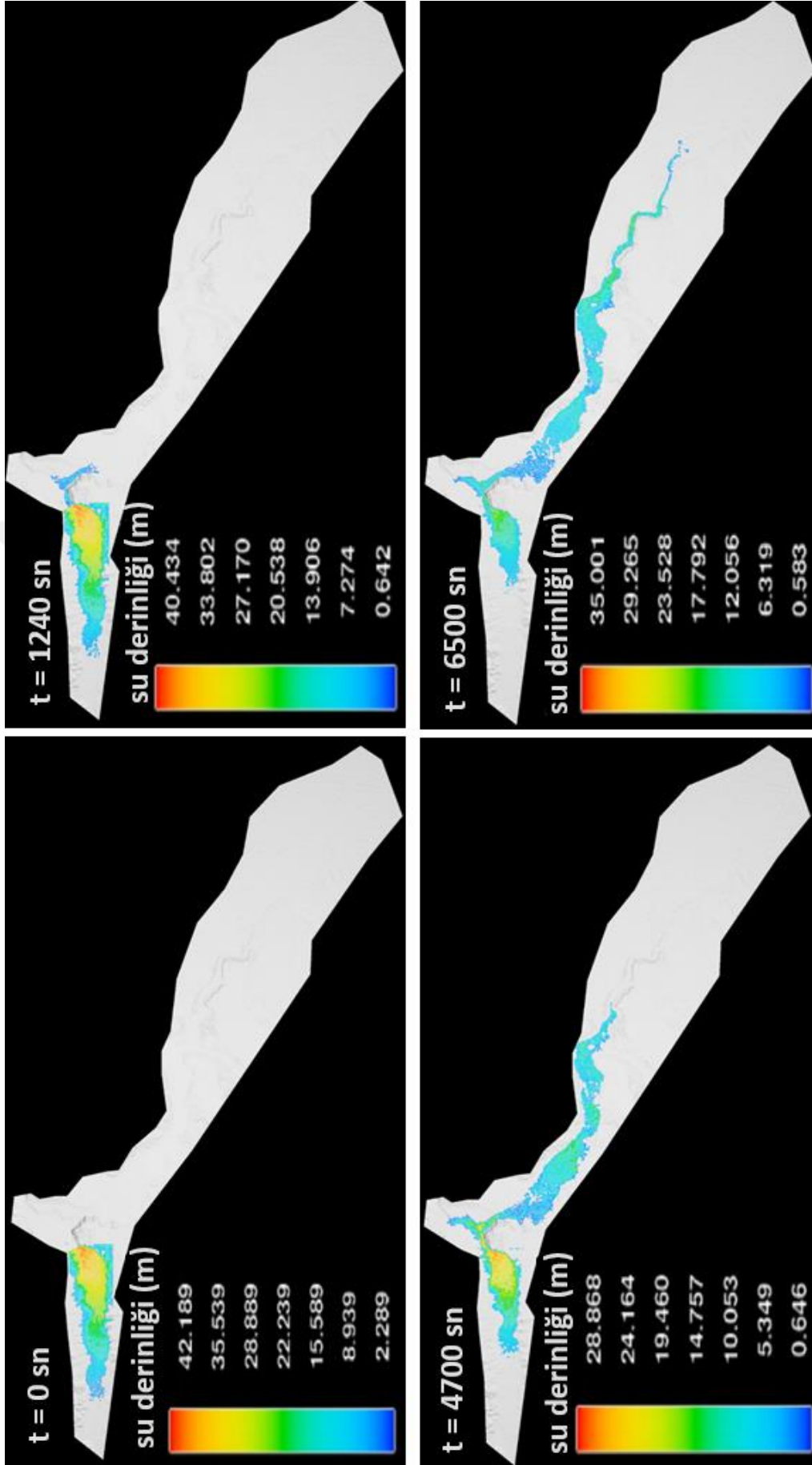
Tez kapsamında, Tuzluca Barajı'nın yıkılması durumu 3D RANS denklemleri ile de çözülerek geniş arazilerde 3D baraj yıkılma simülasyonlarının kullanılabilirliği ve 2D simülasyonlarla arasındaki farklar araştırılmıştır. 3D baraj yıkılma simülasyonları için her bir senaryoya ait taşkın yayılımının zaman içindeki değişimi Şekil 43-45'te gösterilmektedir.



Şekil 43. 3D analizlerde 1. senaryo için taşkın yayılımının zamanla değişimi (Akgün vd., 2023).

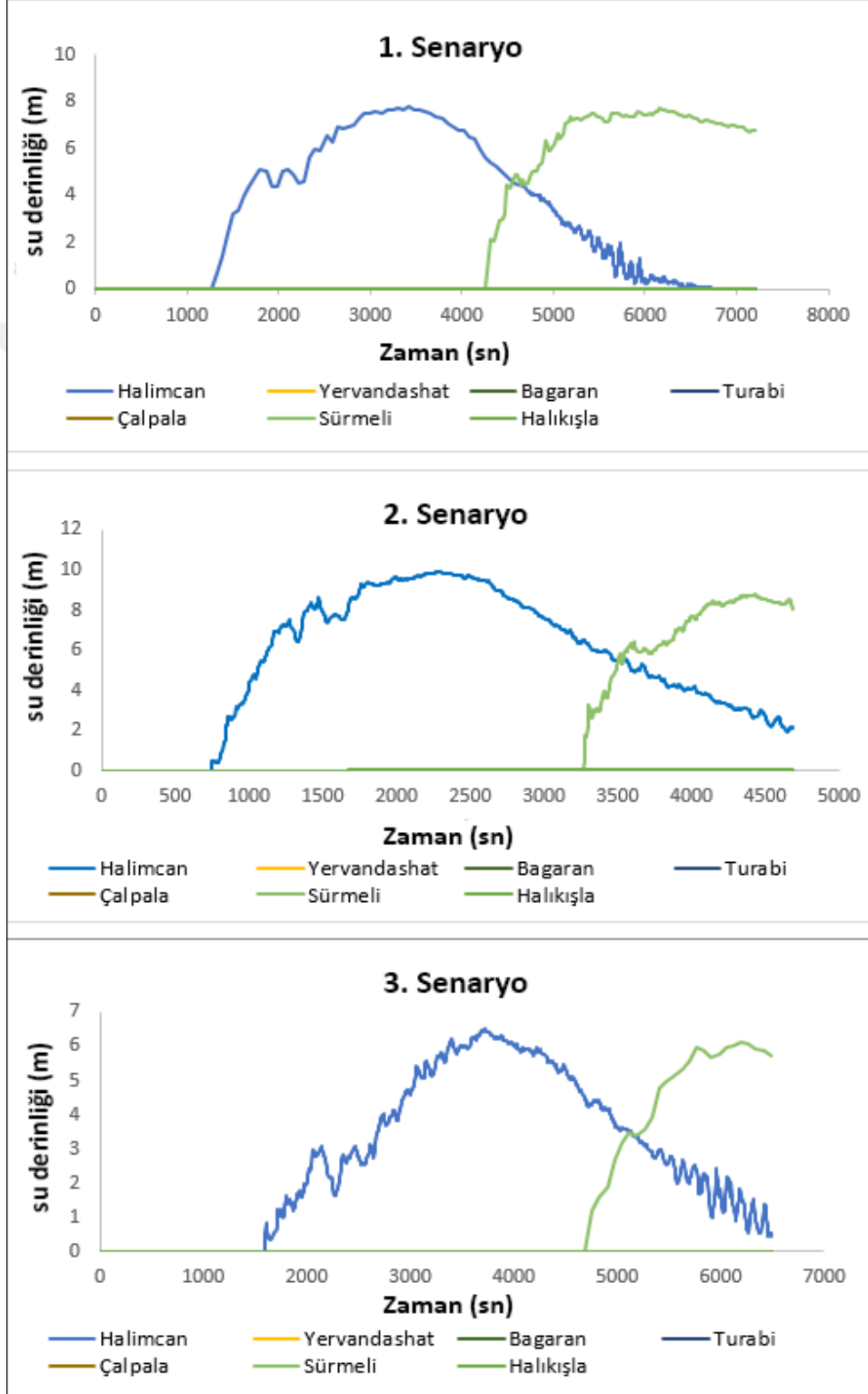


Şekil 44. 3D analizlerde 2. senaryo için taşkın yayılımının zamanla değişimi (Akgün vd., 2023).



Şekil 45. 3D analizlerde 3. senaryo için taşkın yayılımının zamanla değişimi (Akgün vd., 2023).

3D analiz sonuçları değerlendirildiğinde, 2D analiz sonuçlarına benzer şekilde taşkın dalgalarından sadece Halimcan ve Sürmeli köylerinin etkilendiği görülmüştür. 3D analizlere göre her bir senaryo için yerleşimlerdeki taşkın derinlikleri Şekil 46'da gösterilmektedir.



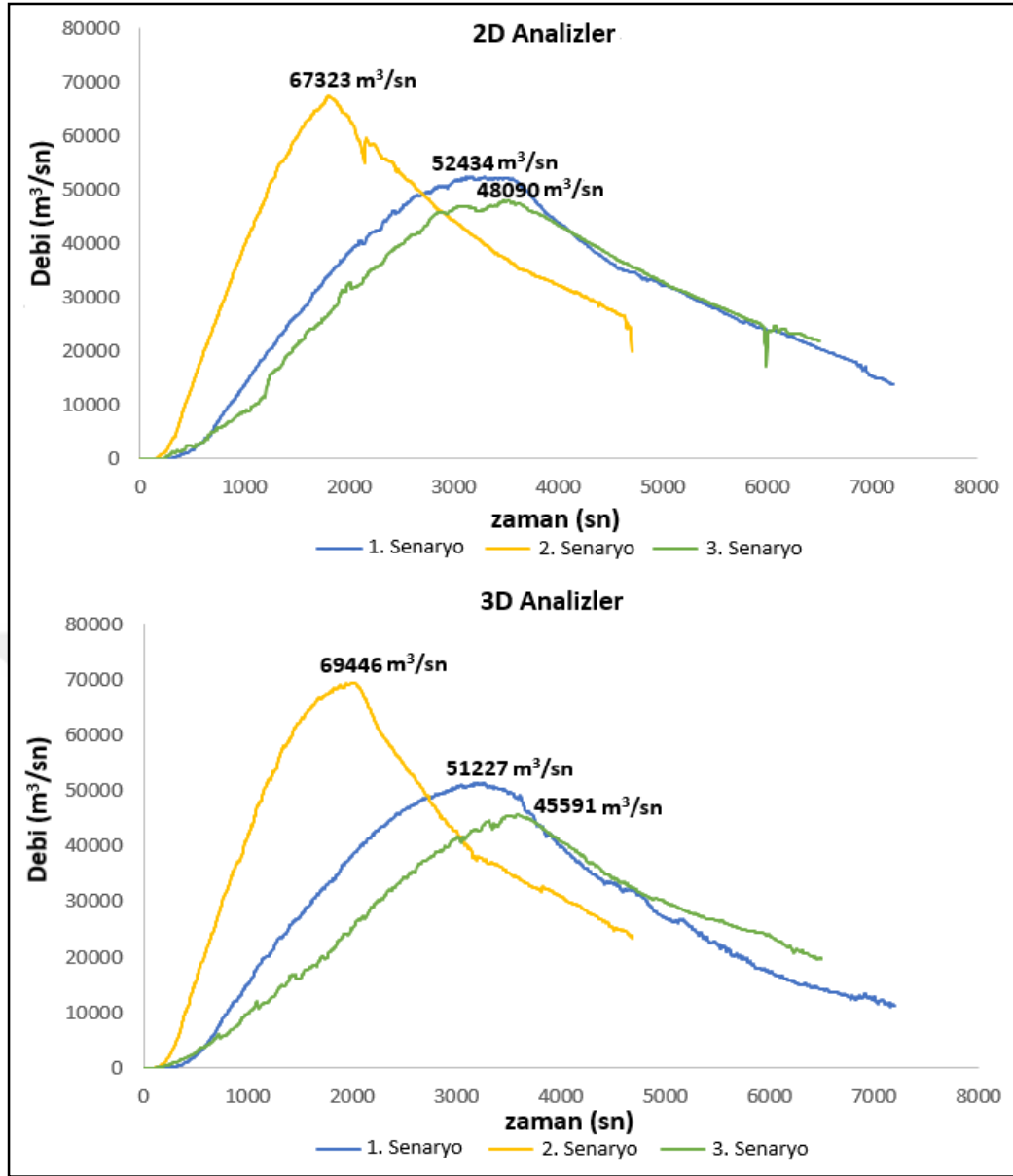
Şekil 46. 3D analizler için 1., 2. ve 3. senaryolarda yerleşimlere ait su derinlikleri (Akgün vd., 2023).

Baraj aksına yaklaşık 1,6 km uzaklıkta bulunan Halimcan köyüne, 1., 2. ve 3. senaryolarda sırasıyla 7.8 m, 9.9 m ve 6.45 m; baraj aksına yaklaşık 15 km uzaklıkta bulunan Sürmeli köyünde ise 7.6 m, 8.9 m ve 6.1 m maksimum su derinliklerinin olduğu görülmüştür. Ayrıca 1., 2. ve 3. senaryolarda Halimcan köyüne taşkın sularının ulaşma süresi sırasıyla 22 dk, 13 dk ve 26 dk iken Sürmeli köyüne sırasıyla 71 dk, 54 dk ve 79 dk olarak gözlemlenmiştir (Akgün vd., 2023).

Taşkın yayılımları incelendiğinde, 3D ve 2D simülasyon sonuçları arasında yerleşim yerlerinde birkaç metrelik derinlik farkı dışında çalışma alanının genelinde benzerlik olduğu gözlemlenmiştir. Taşkın sularının yerleşimlere ulaşma sürelerinde ise 3D ve 2D simülasyon sonuçları arasındaki farkın dakikalar düzeyinde olduğu görülmüştür.

Halimcan yerleşimine taşkın sularının ulaşma süresinin düşük olması, olası yıkılma durumunda insanların tahliye edilmesi için gereken süreyi kısaltmaktadır. Uyarı vakti olarak nitelendirilen bu kavram, baraj yıkılmaları sonrası meydana gelebilecek can kaybı sayısını etkileyen en önemli parametrelerden birisi olarak kabul edilmektedir. Graham (1999), uyarı vakti değerinin 15 dakikanın altına inmesi durumunda risk altındaki nüfusun %50'sinin hayatını kaybedebileceğini, uyarı vakti değerinin 90 dakikanın üzerinde olması halinde ise bu oranın %0.02 olabileceğini belirtmiştir. Özellikle 3D analiz sonuçlarına göre 2. senaryo koşullarında Halimcan yerleşimine 13 dakikada taşkın sularının ulaştığı görülmektedir. Bu durum söz konusu senaryo koşullarının gerçekleşmesi durumunda bölgede ciddi can kayıplarının yaşanabileceğini göstermektedir (Jonkman vd., 2002).

Çalışma kapsamında her bir senaryo için baraj aksında meydana gelecek taşkın hidrografının elde edilebilmesi için baraj aksına Flux Surface yerleştirilmiştir. Simülasyon sonucu baraj aksında elde edilen taşkın hidrografları aşağıda Şekil 47'de verilmiştir.



Şekil 47. 2D ve 3D analizlerde 1., 2. ve 3. senaryolara ait taşkın hidrografları (Akgün vd., 2023).

Yapılan 2D ve 3D analizlerde, en yüksek pik debinin yıkılma süresi daha kısa olan 2. senaryoda meydana geldiği, en düşük pik debinin ise en küçük gedik kesit alanına sahip 3. senaryoda meydana geldiği görülmektedir.

2D analizlerde 1., 2. ve 3. senaryolar için pik debiler sırasıyla 52434 m^3/sn , 67323 m^3/sn ve 48090 m^3/sn olmuştur. Pik debiye ulaşmak için geçen süreler sırasıyla 3175 sn, 1805 sn ve 3529 sn olarak gözlemlenmiştir. 3D analizlerde ise 1., 2. ve 3. senaryolar için pik debiler sırasıyla 51227 m^3/sn , 69446 m^3/sn ve 45591 m^3/sn olarak gözlemlenirken, pik debiye ulaşma süreleri sırasıyla 3262 sn, 2025 sn ve 3578 sn'dir.

2D analiz sonuçlarına göre baraj yıkılma süresinin taşkın yayılımına etkisi incelendiğinde; aynı gedik geometrisine sahip senaryo 1 ve 2'den, yıkılma süresinin daha

kısa olduğu senaryo 2'de (30 dakika) pik debi değeri %28 daha yüksek çıkmıştır. Bu durum Bello vd. (2022) tarafından yapılan ve baraj yıkılmalarında taşkın yayılımını etkileyen en önemli parametrenin yıkılma süresi olduğu belirtilen çalışmayla da uyumludur. Aynı yıkılma süresi ve farklı gedik geometrisine sahip senaryo 1 ve 3 karşılaştırıldığında ise gedik kesit alanının yaklaşık %30 daha küçük olduğu 3. senaryoda pik debi değerinin %9 daha düşük olduğu görülmektedir. 3D analiz sonuçlarına göre pik debiler karşılaştırıldığında ise 2. senaryodaki pik debi değerinin 1. senaryoya göre %35 daha büyük olduğu görülmüştür. 1. ve 3. Senaryolar karşılaştırıldığında 3. senaryoda pik debi değerinin %12 daha düşük olduğu görülmektedir. Sonuçların literatürdeki benzer çalışmalarla uyumlu olduğu görülmüştür (Karakaya, 2005; Shahrin, ve Ros, 2020; Bharath vd., 2021; Hien ve Nguyen, 2021; Akgün vd., 2023).

2D ve 3D sayısal simülasyonların taşkın yayılımları karşılaştırıldığında; iki farklı çözümün sonuçları arasında anlamlı bir fark olmadığı görülmüştür (Şekil 39-41, Şekil 43-45). Mansap bölgesindeki yerleşimlerin risk durumu incelendiğinde Şekil 42 ve Şekil 46'da görüldüğü gibi her iki analizde de sadece Halimcan ve Sürmeli yerleşimleri sel sularından etkilenmektedir. Yerleşimlerde 2D ve 3D model sonuçları arasında bazı bölgelerde birkaç metrelik su derinliği farkı bulunsa da çalışma alanında genel bir benzerlik bulunmaktadır. Şekil 47'de her iki yöntem için de baraj aksında elde edilen hidrograflar gösterilmektedir. 2D ve 3D modeller ile elde edilen hidrograflarda pik debi ve pik debiye ulaşma süresinin birbirine çok yakın olduğu ve yaklaşık %3-5'lik bir fark olduğu görülmektedir. Çözüm süresi açısından bir karşılaştırma yapılacak olursa 3D analizlerin bu konuda dezavantajlı olduğu ve 2D analizlere göre yaklaşık 20 kat daha uzun çözüm süresi gerektirdiği görülmüştür (Akgün vd., 2023).

4.3. Taşkın Pik Debisinin Analitik Çözümlerle Karşılaştırılması

Literatürde baraj yıkılma problemlerinin çözümüne yönelik birçok analitik yöntem geliştirilmiştir. Geçmiş baraj yıkılmalarının güvenilir verileri kullanılarak geliştirilen bu ampirik formüllerle Bölüm 3.5'te gedik parametleri belirlenmişti. Benzer şekilde bu bölümde de literatürdeki analitik çözümlerden yararlanarak üç farklı senaryo için pik debi hesapları yapılmış, sonuçlar 3D sayısal simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Hesaplamalarda gedik boyutları ve yıkılma süreleri, sayısal simülasyondaki senaryolarla aynı seçilerek sadece pik debiler hesaplanmıştır. Hesaplamalarda kullanılan analitik yöntemler Tablo 14'te verilmiştir.

Tablo 14. Pik debi tahmini için analitik yöntemler

Yöntem	Pik Debi	Vaka Sayısı
MacDonald ve Langridge-Monopolis (1984)	$Q_p = 1.154(V_w h_w)^{0.412}$	42
Singh ve Snorrason (1984)	$Q_p = 13.4(h_d)^{1.89}$	28
Costa (1985)	$Q_p = 0.981(V_r h_d)^{0.42}$	31
USBR (1988)	$Q_p = 19.1 h_w^{1.85}$	21
Froehlich (1995)	$Q_p = 0.607 V_w^{0.295} h_w^{1.24}$	22
Walder ve O'Connor (1997)	$Q_p = 0.61(V_w h_w)^{0.43}$	
Xu ve Zhang (2009)	$\frac{Q_p}{\sqrt{g V_w^{5/3}}} = 0.175 \left[\frac{h_d}{H_r} \right]^{0.199} \left[\frac{V_w^{1/3}}{h_w} \right]^{-1.274} e^{B_4}$ $B_4 = j+k+l, H_r = 15 \text{ m}$	75
Pierce vd. (2010)	$0.0176(V_w h_w)^{0.606}$	87
De Lorenzo ve Macchione (2014)	$Q_p = 0.321 g^{0.258} (v V_w)^{0.485} H_b^{0.802} \text{ (OT)}$ $Q_p = 0.347 g^{0.263} (v V_w)^{0.474} h_w^{2.992} H_b^{-2.151} \text{ (P)}$ $v = 0.07 \text{ m/sn}$	
Froehlich (2016)	$Q_p = 0.0175 k_m k_h \sqrt{\frac{g V_w h_w H_b^2}{W_{avg}}}$ $k_m = 1.85 \text{ (OT); } 1.0 \text{ (P)}$ $k_h = \left(\frac{H_b}{6.1} \right)^{1/8}$	41

Bu denklemlerde;

Q_p : taşkın pik debisi (m^3/sn)

V_r : yıkılma anında rezervuardaki su hacmi (m^3)

V_w : yıkılma anında gedik tabanının üzerindeki su hacmi (m^3)

h_w : yıkılma anında gedik tabanının üzerindeki su yüksekliği (m)

h_d : baraj yüksekliği (m)

H_b : gedik yüksekliği (m)

g : yerçekimi ivmesi m/sn^2

OT : üstünden su aşması durumu

P: borulanma durumu

W_{avg} : Ortalama gedik genişliği (m)

$e = 2.718$

Xu ve Zhang (2009) yönteminde kullanılan j, k, l değerleri sırasıyla baraj tipi, yıkılma şekli ve gövde aşınabilirlik durumuna bağlı katsayılardır. Söz konusu değerlere ilişkin bilgiler aşağıda Tablo 15'te verilmiştir.

Tablo 15. Xu ve Zhang (2009) yönteminde j, k ve l katsayılarına ait bilgiler

	DB	BKB	ZDB
j	-0.503	-0.591	-0.649
	O	P	
k	-0.705	-1.039	
	YA	OA	DA
l	-0.007	-0.375	-1.362

DB: Dolgu baraj, BKB: Ön yüzü beton kaplamalı baraj, ZDB: Zonlu dolgu baraj, O: Üstünden su aşma, P: Borulanma, YA: Gövde malzemesi yüksek aşınabilirlik, OA: Gövde malzemesi orta aşınabilirlik, DA: Gövde malzemesi düşük aşınabilirlik

Barajın karakteristik bilgileri ve 1., 2., 3. senaryolardaki gedik parametreleri kullanılarak, Tablo 14'te belirtilen yöntemlere göre pik debiler analitik olarak hesaplanmıştır. Elde edilen analitik sonuçlar, sayısal simülasyonlardan elde edilen pik debi değerleriyle karşılaştırılarak yöntem ve senaryo bazında yüzdesel hata oranları belirlenmiştir.

Analitik yöntemlere göre hesaplanan pik debi değerleri ve hata oranları aşağıda Tablo 16'da özetlenmiştir.

Tablo 16. Pik debi analitik ve sayısal çözümlerinin karşılaştırılması

Senaryo	Yöntem	Q_p (m³/sn) (Analitik)	Q_p (m³/sn) (Flow3D)	Hata Oranı
1. Senaryo	MacDonald ve LMonopolis (1984)	16357	51227 m ³ /sn	- % 68
	Singh ve Snorrason (1984)	17852		- % 65
	Costa (1985)	16741		- % 67
	USBR (1988)	21851		- % 57
	Froehlich (1995)	20798		- % 59
	Walder ve O'Connor (1997)	13128		- % 74
	Xu ve Zhang (2009)	49768		- % 3
	Pierce vd. (2010)	22483		- % 56
	De Lorenzo ve Macchione (2014)	41056		- % 20
	Froehlich (2016)	37063		- % 28
2. Senaryo	MacDonald ve LMonopolis (1984)	16357	69446 m ³ /sn	- % 76
	Singh ve Snorrason (1984)	17852		- % 74
	Costa (1985)	16741		- % 76
	USBR (1988)	21851		- % 69
	Froehlich (1995)	20798		- % 70
	Walder ve O'Connor (1997)	13128		- % 81
	Xu ve Zhang (2009)	71907		+ % 4
	Pierce vd. (2010)	22483		- % 68
	De Lorenzo ve Macchione (2014)	41056		- % 41
	Froehlich (2016)	37063		- % 46
3. Senaryo	MacDonald ve LMonopolis (1984)	16357	45591 m ³ /sn	- % 64
	Singh ve Snorrason (1984)	17852		- % 61
	Costa (1985)	16741		- % 63

Tablo 16. (devamı)

3. Senaryo	USBR (1988)	21851	45591 m ³ /sn	- % 52
	Froehlich (1995)	20798		- % 54
	Walder ve O'Connor (1997)	13128		- % 71
	Xu ve Zhang (2009)	35637		- % 22
	Pierce vd. (2010)	22483		- % 51
	De Lorenzo ve Macchione (2014)	43319		- % 5
	Froehlich (2016)	23108		- % 49

Baraj yıkılmalarında pik debinin tahmini ile ilgili yapılan ilk çalışmaların çoğu sadece rezervuar hacmi ve baraj yüksekliğine odaklanmıştır. Baraj yıkılmalarının kompleks yapısı ve çeşitliliği düşünüldüğünde söz konusu yöntemler ciddi sınırlamalar içermektedir. Pik debinin tahmini ile ilgili güncel çalışmalarda ise rezervuar hacmi ve baraj yüksekliği ile birlikte gedik boyutları, yıkılma şekli, baraj çeşidi, dolgu malzemesi gibi etkenler de dikkate alınmıştır.

Bu doğrultuda Tablo 16 incelendiğinde son yıllarda geliştirilen ampirik yöntemlerin sayısal simülasyon sonuçlarıyla daha uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle Xu ve Zhang (2009) yönteminin 1. ve 2. senaryolarda pik debiyi sırasıyla %3 ve %4, De Lorenzo ve Macchione (2014) yönteminin ise 3. senaryoyu %5 hata payıyla tahmin ettiği görülmüştür. Xu ve Zhang (2009) tarafından geliştirilen yöntem, literatürde benzer karşılaştırma içeren çalışmalarda da başarılı sonuçlar elde etmiştir (Abdulrahman, 2014).

4.4. Olası Can Kayıplarının Tahmini

Baraj yıkılmalarının meydana getirebileceği en olumsuz durum mansap bölgesinde yaratacağı can kayıplarıdır. Geçmişte yıkılan barajlar neticesinde birçok insan hayatını kaybetmiştir. Baraj yıkılmalarının neden olduğu can kaybı sayıları ile ilgili bilgiler bölüm 1, Tablo 1’de verilmiştir. Bu çalışma kapsamında 3D analiz sonuçları dikkate alınarak her bir senaryo için yerleşimlerdeki tahmini can kaybı sayıları hesaplanmıştır.

Literatürde baraj yıkılmaları sonucu meydana gelebilecek can kaybı sayısının tahmini ile ilgili birçok yöntem geliştirilmiştir (Lee vd., 1986; Dekay ve McClelland, 1993; Graham, 1999; Jonkman, 2007). Söz konusu yöntemler, geçmiş baraj yıkılmalarına ait veriler üzerinden regresyon analizleri yapılarak geliştirilmiş ampirik formüllerdir. Bu yöntemlerle; risk altındaki nüfus ve uyarı vakti gibi sınırlı parametreler üzerinden hesaplanan can kaybı tahmini, gerçek bir baraj yıkılmasının karmaşık etkilerini tam olarak yansıtamayabilmektedir.

Yapılan araştırmalar sonucu can kaybı sayısının tahmini için modifiye edilmiş Graham yönteminin kullanılmasına karar verilmiştir. Söz konusu yöntem baraj

yıkılmasının sayısal simülasyonuna dayalı olup, geçmişte birçok baraj yıkılmasının meydana geldiği Çin'de yaygın olarak kullanılmaktadır (Xiaoling vd., 2012; Sun vd., 2014a). Bu yöntemde risk altındaki nüfus ve uyarı vaktinin yanı sıra; yıkılma zamanı, sel şiddeti, genç nüfus oranı, barajdan uzaklık, baraj yüksekliği, depolama kapasitesi, mansap eğimi, binaların aşınma dayanımı ve bölge halkının baraj yıkılmaları hakkındaki farkındalığı gibi önemli parametreler de kullanılmaktadır.

Sun vd. (2014b) tarafından Haihe havzasında (Çin) bulunan 5 barajın yıkılma analizinde kullanılan yöntem, bu çalışmada Tuzluca Barajı'nın olası yıkılma durumunda meydana gelebilecek can kaybı sayısının tahmini için kullanılmıştır. Modifiye edilmiş Graham yönteminde can kaybı sayısı;

$$LOL = Par \cdot f \cdot a \quad (\text{Eşitlik 87})$$

Burada;

LOL : can kaybı sayısı

Par : risk altındaki nüfus

f : risk altındaki nüfusun ölüm oranı

a : diğer faktörlere bağlı katsayıdır.

$$a = m_1 + bm_2 \quad (\text{Eşitlik 88})$$

$$m_1 = \sum_{i=1}^4 s_i \theta_i \quad (\text{Eşitlik 89})$$

$$m_2 = \sum_{i=1}^9 n_i t_i \quad (\text{Eşitlik 90})$$

Bu denklemlerde, b sabit katsayısı 0.25, f sabit katsayısı ise 0.75 olarak önerilmiştir (Graham, 1999; Zhou, 2006; Sun vd. 2014a; Sun vd. 2014b). m_1 ve m_2 değerlerinin hesaplanmasında kullanılan s_i ve n_i , can kaybına etki eden faktörlerin değerini; θ_i ve t_i ifadeleri ise söz konusu faktörlerin etki derecesini temsil etmektedir.

m_1 değerinin hesaplanmasında kullanılan s_1, s_2, s_3 ve s_4 değerleri sırasıyla risk altındaki nüfus, taşkın şiddeti, uyarı vakti ve bölge halkının baraj yıkılmaları hakkındaki farkındalığına bağlı değerlerdir.

$\theta_1, \theta_2, \theta_3$ ve θ_4 değerleri ise sırasıyla s_1, s_2, s_3 ve s_4 değerlerinin etki derecesini göstermektedir. İlgili değerler literatürde yaygın bir şekilde kullanılan ve çok ölçütlü karar verme yöntemlerinden biri olan Analitik Hiyerarşi Prosesine (AHP) göre $\theta_1 = \theta_2 = 0.2$ ve $\theta_3 = \theta_4 = 0.3$ olarak belirlenmiştir.

Söz konusu değişkenlere göre s_i ve n_i katsayılarına ait değer aralıkları Tablo 17 ve Tablo 18’de verilmiştir.

Tablo 17. Önerilen s_i değerlerinin aralıkları (Sun vd. 2014a)

s_i	Risk altındaki nüfus (kişi)	Taşkın şiddeti	Uyarı vakti (saat)	Halkın baraj yıkılma farkındalığı
0.80-1.00	$>10^5$	Çok yüksek	$W_t < 0.25$	Çok yüksek
0.60-0.80	$10^4 - 10^5$	Yüksek	$0.25 < W_t < 0.50$	Yüksek
0.40-0.60	$10^3 - 10^4$	Normal	$0.50 < W_t < 0.75$	Normal
0.20-0.40	$10^2 - 10^3$	Düşük	$0.75 < W_t < 1.00$	Düşük
0.01-0.20	$1 - 10^2$	Çok Düşük	$W_t > 1.00$	Çok Düşük

m_2 değerinin hesaplanmasında kullanılan $n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6, n_7, n_8$ ve n_9 değerleri ise sırasıyla genç nüfus oranı, hava durumu, baraj yıkılmasının gerçekleşme zamanı, baraja olan uzaklık, tahliye ve kurtarma yeteneği, baraj yüksekliği, depolama kapasitesi, mansap eğimi ve binaların aşınma dayanımına bağlı değerlerdir.

Benzer şekilde $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7, t_8$ ve t_9 ise sırasıyla $n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6, n_7, n_8$ ve n_9 değerlerinin etki derecesini göstermektedir. Bu değerler AHP yöntemine göre $t_1 = t_3 = t_4 = 0.2$; $t_2 = t_5 = 0.1$ ve $t_6 = t_7 = t_8 = t_9 = 0.05$ olarak belirlenmiştir (Sun vd. 2014a).

Tablo 18. Önerilen n_i değerlerinin aralıkları (Sun vd. 2014a)

n_i	0.80-1.00	0.60-0.80	0.40-0.60	0.20-0.40	0.01-0.20
Genç nüfus oranı (%)	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100
Hava durumu	Şiddetli fırtına	Fırtına	Ortalama yağış	Çiseleme	Güneşli gün
Baraj yıkılma zamanı	Tatil günü sabah	İş günü sabah	Tatil günü gece	İş günü gece	Gündüz
Baraja olan uzaklık (km)	0-5	5-10	10-20	20-50	>50
Tahliye ve kurtarma yeteneği	Çok başarısız	Başarısız	Normal	Başarılı	Çok Başarılı
Baraj yüksekliği (m)	>70	30-70	15-30	10-15	<10
Rezervuar kapasitesi	Çok büyük	Büyük	Normal	Küçük	Çok Küçük
Mansap eğimi	Vadi	Dağlık	Yokuş	Düz	Sahil
Bina Aşınma Dayanımı	Çok zayıf	Zayıf	Orta	Güçlü	Çok Güçlü

Lokasyon ve ilgili senaryo koşulları dikkate alınarak taşkın sularının ulaştığı Halimcan ve Sürmeli yerleşimleri için belirlenen s_i ve n_i katsayıları aşağıda Tablo 19 ve Tablo 20’de verilmiştir.

Tablo 19. Simülasyon senaryolarına göre seçilen s_i değerleri (Akgün vd., 2023).

s_i	Halimcan			Sürmeli		
	1. Senaryo	2. Senaryo	3. Senaryo	1. Senaryo	2. Senaryo	3. Senaryo
s_1	0.10	0.10	0.10	0.30	0.30	0.30
s_2	0.60	0.80	0.50	0.60	0.80	0.50
s_3	0.70	0.90	0.65	0.10	0.20	0.05
s_4	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70

Tablo 20. Simülasyon senaryolarına göre seçilen n_i değerleri (Akgün vd., 2023).

n_i	Halimcan	Sürmeli
	Senaryo 1, 2 ve 3	Senaryo 1, 2 ve 3
n_1	0.50	0.50
n_2	0.40	0.40
n_3	0.50	0.50
n_4	0.90	0.50
n_5	0.40	0.40
n_6	0.65	0.65
n_7	0.60	0.60
n_8	0.80	0.90
n_9	0.80	0.80

Tablo 19 ve Tablo 20 ile Eşitlik 87-90 'daki veriler kullanılarak Tuzluca Barajı'nın yıkılması durumunda yerleşim yerlerine ve senaryolara göre olası can kayıpları hesaplanmıştır.

41 nüfuslu Halimcan ve 434 nüfuslu Sürmeli yerleşim birimlerinde tahmini can kayıpları Tablo 21'de sunulmaktadır.

Tablo 21. Tuzluca Barajı'nın yıkılması durumunda öngörülen can kayıpları (Akgün vd., 2023).

	Halimcan LoL (kişi)	Sürmeli LoL (kişi)	Toplam LoL (kişi)
1. Senaryo	22	179	201
2. Senaryo	25	202	227
3. Senaryo	21	170	191

Tablo 19 incelendiğinde Tuzluca Barajı'nın olası yıkılma durumunda ciddi can kayıplarının yaşanacağı öngörülmektedir. Baraj aksına yakın (1,6 km) Halimcan Köyü'nde 1., 2. ve 3. senaryolarda sırasıyla nüfusun %54, %61 ve %51'inin hayatını kaybetmesi öngörülmektedir. Baraj aksına yaklaşık 15 km uzaklıktaki Sürmeli Köyü'nde ise 1., 2. ve 3. senaryolarda sırasıyla nüfusun %41, %47 ve %39'unun hayatını kaybetmesi öngörülmektedir. Yıkılma süresinin daha kısa olduğu Senaryo 2'de (30 dakika) toplam can kaybı, aynı gedik geometrisine sahip Senaryo 1'e göre %13 daha yüksek çıkmıştır. Aynı yıkılma süresi ve farklı gedik geometrisine sahip senaryo 1 ve 3 karşılaştırıldığında ise gedik kesit alanının yaklaşık %30 daha küçük olduğu 3. senaryoda toplam can kaybının %5 daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durum baraj yıkılma süresinin ve gedik geometrisinin yaşanabilecek can kaybı üzerinde etkili olduğunu göstermektedir (Akgün vd., 2023).

4.5. İnsan Denge Kaybı ve Bina Yıkılma Analizi

Taşkınlarda insan stabilitesinin bozulmasına bağlı düşmeyle birlikte birçok boğulma vakası gerçekleşmiştir. Ayrıca taşkın sularının etkisiyle gerçekleşen bina yıkılmaları hem ölüm oranını hem de ekonomik kayıpların derecesini artırmaktadır. Bu konu özelinde yapılan çalışmalarda taşkın derinliği (h) ve su hızı (v) olmak üzere iki önemli parametre öne çıkmaktadır (Abt vd., 1989; Clausen 1989; Kelman, 2002; Jonkman vd., 2008; Jonkman ve Penning-Rowell, 2008; Pakniyat, 2015).

Japonya'da taşkın suları ve insanlarda denge kaybı üzerine yapılan deney sonuçlarına göre, derinlik-hız çarpımının $0.5 \text{ m}^2/\text{sn}$ 'den büyük olması durumunda insanların düşme ihtimalinin artacağı belirtilmiştir (Suetsugi, 1998).

Bununla birlikte Abt vd. (1989), taşkınlarda denge kaybı noktasında insan kütlesi ve boyuna bağlı olarak bir kritik derinlik hızı önermiştir.

$$hv_c = 0.0929(e^{0.001906Lm+1.09})^2 \quad (91)$$

Bu denklemlerde;

hv_c ; kritik derinlik hızı

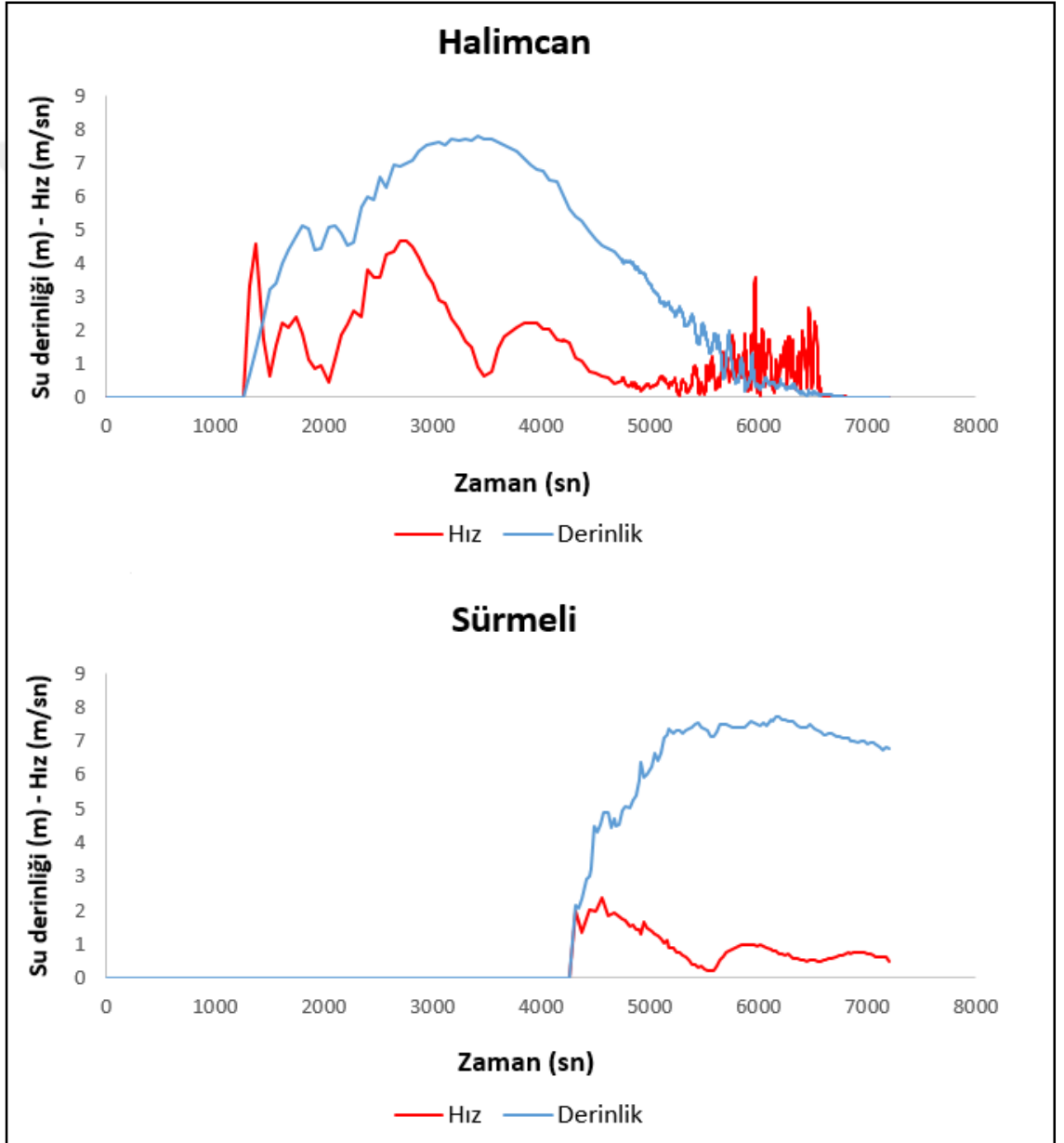
L (m) : kişinin boyu

m (kg) : kişinin kütlesini temsil etmektedir.

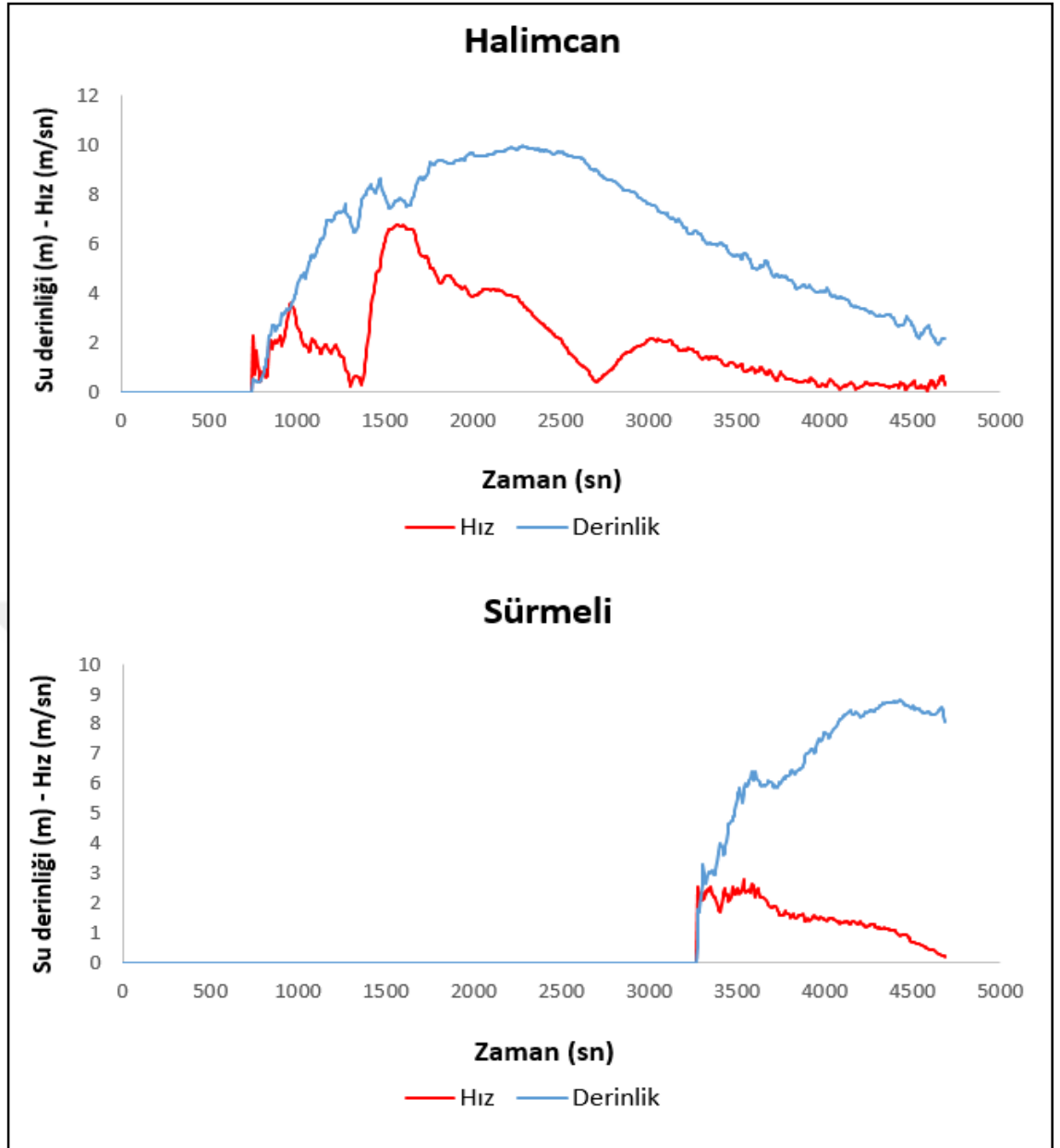
Taşkın durumlarında bina hasarlarıyla ilgili olarak ise Clausen (1989), su hızının 2 m/sn 'den büyük olması koşuluyla derinlik ve hız çarpımının $7 \text{ m}^2/\text{s}$ 'yi geçmesinin;

bölgedeki tüm yığma, beton ve tuğla evlerin yıkılmasına sebep olabileceğini belirtmiştir. Benzer şekilde HR Wallingford (2005) tarafından ortaya koyulan raporda, derinlik ve hız çarpımının $7 \text{ m}^2/\text{s}$ 'yi geçmesi durumunda taşkın bölgesindeki tüm yapıların yıkılma tehlikesi altında olduğu belirtilmiştir.

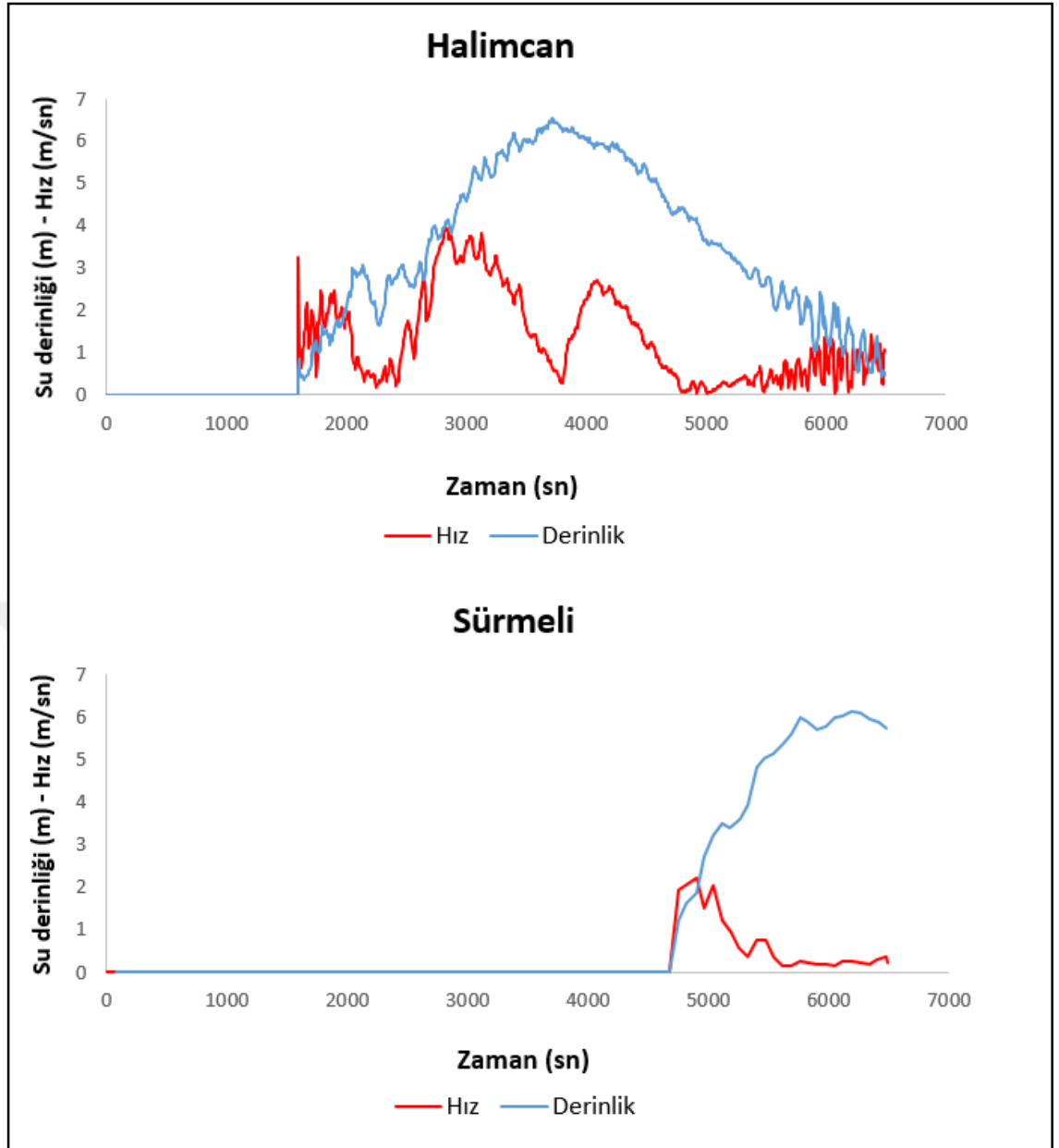
Çalışma kapsamında yapılan denge kaybı ve bina yıkılma analizleri için, 3D simülasyon sonuçları dikkate alınarak Halimcan ve Sürmeli yerleşimlerine ait derinlik - hız grafikleri elde edilmiştir. 1., 2. ve 3. senaryoya ait söz konusu grafikler Şekil 48, 49 ve 50'de verilmiştir.



Şekil 48. 1. Senaryo için derinlik-hız grafikleri



Şekil 49. 2. Senaryo için derinlik-hız grafikleri



Şekil 50. 3. Senaryo için derinlik-hız grafikleri

Şekil 48, 49 ve 50 incelendiğinde, tüm senaryolar için ciddi derinlik – hız çarpımlarının meydana geleceği gözlemlenmiştir. Halimcan yerleşimi için yapılan derinlik – hız çarpımlarında ortalama h_v değerlerinin 1., 2. ve 3. senaryolarda sırasıyla $7.48 \text{ m}^2/\text{sn}$, $15.15 \text{ m}^2/\text{sn}$ ve $5.22 \text{ m}^2/\text{sn}$ olduğu belirlenmiştir. Sürmeli yerleşiminde ise ortalama h_v değeri 1., 2. ve 3. senaryolarda sırasıyla $4.97 \text{ m}^2/\text{sn}$, $8.54 \text{ m}^2/\text{sn}$ ve $3.14 \text{ m}^2/\text{sn}$ olarak hesaplanmıştır.

Hesaplanan h_v değerleri, insanlar için denge kaybı sınırı olan kritik h_v değerinin çok üzerinde çıkmaktadır. Bu sonuçlar Clausen (1989) ve HR Wallingford (2005) yaklaşımlarına göre, 34 adet yapı bulunan Halimcan yerleşiminde 1. ve 2. senaryolarda

tüm binaların yıkılacağını göstermektedir. 89 yapının bulunduğu Sürmeli yerleşiminde ise sadece 2. Senaryo koşulları gerçekleşirse tüm binaların yıkılacağı tespit edilmiştir.

Aynı gedik geometrisi, farklı yıkılma sürelerine sahip 1. ve 2. senaryolar karşılaştırıldığında; baraj yıkılma süresinin, insan ve bina stabilitesini etkileyen en önemli faktör olan derinlik – hız çarpımını (hv) ciddi ölçüde etkilediği anlaşılmaktadır. Aynı yıkılma süresi, farklı gedik geometrisine sahip 1. ve 3. senaryolar karşılaştırıldığında ise daha büyük gedik boyutlarında daha yüksek hv değerlerinin olduğu görülmektedir.



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Türkiye'de Iğdır İli'ne yapılması planlanan Tuzluca Barajı'nın FLOW3D yazılımı kullanılarak 2 boyutlu ve 3 boyutlu baraj yıkılma simülasyonu yapılmıştır. İki farklı yıkılma şekli (üstünden su aşma, borulanma), farklı gedik boyutları ve farklı yıkılma süreleri üzerinden belirlenen üç senaryo iki farklı çözüm yöntemine (2D SWE ve 3D RANS) uygulanarak toplam 6 farklı simülasyon gerçekleştirilmiştir.

Simülasyonlarda topoğrafik koşulların temsili için baraj bölgesine ait 12.5 m çözünürlüğündeki sayısal yükseklik modeli (DEM), ALOS uydusuna ait verilerden elde edilerek STL formatına dönüştürülmüştür. Gedik parametrelerinin belirlenmesinde literatürde yaygın bir şekilde kullanılan 6 farklı yöntem incelenmiş, gedik boyutları ve yıkılma süresi için en olumsuz şartların olduğu Xu ve Zhang (2009) ile Von Thun ve Gillette (1990) yöntemleri seçilmiştir. Borulanma sebepli yıkılmalarda ise MacDonald ve Langridge-Monopolis (1984) yöntemi kullanılmıştır. Sayısal simülasyonda türbülans modeli olarak, literatürdeki baraj yıkılma analizlerinde yaygın bir şekilde kullanılan ve birçok çalışmada doğruluğu test edilen Renormalize Edilmiş (RNG) k- ϵ modeli seçilmiştir. Analizlerde 10 farklı mesh blokta 2D simülasyonlar için toplam 606,248; 3D simülasyonlar için toplam 14,823,728 mesh hücresi (çözüm ağı) oluşturulmuştur.

Sayısal modeli doğrulamak için Soares-Fraza (2007) tarafından gerçekleştirilen baraj yıkılma deneyi FLOW3D yazılımı kullanılarak sayısal olarak simüle edilmiştir. Her iki sayısal model de (2D ve 3D) deneysel sonuçlarla yeterli uyum sergilerken, 3D modelin ani topoğrafik değişikliklerde, hidrolik sıçramalarda ve su hareketinin zamanlamasında daha başarılı olduğu görülmüştür.

Çalışmanın esas konusu oluşturan Tuzluca Barajı'nın sayısal yıkılma simülasyonlarında, her iki yöntemde de (2D SWE ve 3D RANS) mansap bölgesindeki Halimcan ve Sürmeli yerleşimlerinde ciddi taşkın derinliklerinin olduğu tespit edilmiştir. 2D baraj yıkılma simülasyonu sonuçları incelendiğinde; Halimcan yerleşiminde senaryo 1, 2 ve 3 için sırasıyla 9.12 m, 11.26 m ve 8.68 m maksimum su derinliklerinin olduğu görülmüştür. Sürmeli köyünde ise senaryo 1, 2 ve 3 için sırasıyla 9.61 m, 8.15 m ve 8.20 m maksimum su derinlikleri gözlemlenmiştir. 3D simülasyon sonuçları incelendiğinde, Halimcan köyünde, 1., 2. ve 3. senaryolarda sırasıyla 7.8 m, 9.9 m ve 6.45 m; Sürmeli köyünde ise 7.6 m, 8.9 m ve 6.1 m maksimum su derinliklerinin olduğu görülmüştür. Baraj aksında meydana gelen pik debiler incelendiğinde, 2D simülasyonlarda 1., 2. ve 3. senaryolarda sırasıyla 52434 m³/sn, 67323 m³/sn ve 48090 m³/sn'lik pik debiler gözlemlenmiştir. 3D simülasyonlarda ise 1., 2. ve 3. senaryoda

sırasıyla 51227 m³/sn, 69446 m³/sn ve 45591 m³/sn'lik pik debiler oluşmuştur. 2D ve 3D simülasyonlar için taşkın sularının ulaştığı yerleşimlerde birkaç metrelik su derinliği farkı gözlemlense de çalışmanın genelinde sonuçların birbirine yakın olduğu görülmüştür. Özellikle taşkın yayılım haritaları incelendiğinde söz konusu benzerlik göze çapmaktadır. 2D ve 3D analizler çözüm süresi bakımından karşılaştırıldığında ise 3D analizlerin 2D analizlere kıyasla yaklaşık 20 kat daha uzun sürdüğü görülmüştür. 3D analizlerin çözüm süresi handikapı, çalışmalardaki senaryo sayısı ve farklı parametre etkilerinin incelenmesi olanağını sınırlandırmaktadır. Bu bakımdan baraj yıkılması gibi geniş ölçekli ve kapsamlı çalışmalarda 2D analizlerin daha kullanışlı olabileceği sonucuna varılmıştır. 3D analizlerin, daha küçük ölçekli senaryolar veya daha yüksek hassasiyet gerektiren durumlar için kullanılmasının uygun olacağı düşünülmektedir. Ek olarak, 32, 64 veya daha fazla çekirdek işlemcili, yüksek performanslı bilgisayarın varlığı durumunda 3D baraj yıkılma simülasyonlarının hesaplama süreleri kısaltılabilmektedir.

Ayrıca çalışma kapsamında literatürdeki yöntemler kullanılarak mansap bölgesinde olası can kayıpları hesaplanmış, Halimcan ve Sürmeli yerleşimlerinde öngörülen toplam can kaybı sayıları 1., 2. ve 3. senaryolarda sırasıyla 201, 227 ve 191 olarak belirlenmiştir. Analizler gedik geometrisi ve özellikle baraj yıkılma süresinin; taşkın yayılımı, yerleşimlerdeki taşkın derinlikleri, taşkın sularının yerleşimlere ulaşma süreleri ve potansiyel can kayıpları gibi kritik hususlar üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Çalışmada yapılan denge kaybı ve bina yıkılma analizleri için 3D simülasyon sonuçlarına ait zamana bağlı derinlik-hız grafikleri elde edilmiştir. Her bir senaryo için taşkın sularının ulaştığı yerleşimlerde derinlik-hız çarpımı (hv) değeri elde edilerek, literatürdeki kritik hv değerleriyle karşılaştırılmıştır. Buna göre tüm senaryolarda bir insanı yıkabilecek kritik hv değerinin aşıldığı görülürken, 1. ve 2. senaryo koşullarının oluşması durumunda Halimcan yerleşimindeki bütün binaların yıkılabileceği öngörülmektedir. Üç farklı senaryo için incelemeler yapıldığında gedik geometrisi ve baraj yıkılma süresinin kritik hv değeri ve yıkılması beklenen bina sayısını etkilediği de görülmüştür.

Çalışma kapsamında elde edilen taşkın hidrografları, yerleşim yerlerindeki taşkın derinlikleri ve hızları ile taşkın sularının yerleşim yerlerine ulaşması için geçen süreler Tuzluca Barajı'nın olası yıkılma senaryosuna ilişkin değerli bilgiler sunmaktadır. Elde edilen bilgilerin bölgeye yönelik afet ve acil durum eylem planlarının hazırlanmasında yol gösterici olacağına inanılmaktadır. Örneğin baraj aksının yaklaşık 1,6 km mansabında yer alan ve tüm senaryolarda ciddi taşkın derinliklerine maruz kalan Halimcan yerleşimi,

kamunun hazırladığı yeniden yerleşim planına dahil edilmemiştir. Halimcan'da nüfusun (41) az olması nedeniyle makul bir maliyetle yeniden yerleşim planına dahil edilerek boşaltılmasının, bölgedeki riski azaltıcı bir tedbir olabileceği düşünülmektedir. Diğer bir örnek ise tüm senaryolarda ciddi taşkın derinliklerinin meydana geldiği ve baraj aksının yaklaşık 15 km mansabında yer alan 434 nüfuslu Sürmeli Köyü olacaktır.

Bu bağlamda barajın yıkılması sonucu yerleşim yerlerinin uğrayacağı olası hasarın azaltılması için çeşitli önlemler önerilmektedir. Bu önlemler arasında, çalışma alanındaki mevcut bitki örtüsünün artırılması, baraj yıkılması durumunda halka hızlı ve etkili bilgi sağlayacak sesli ve görsel uyarı sistemlerinin kurulması, yerel halkın baraj yıkılması riski ile uygun tahliye ve müdahale prosedürleri konusunda eğitilmesi yer almaktadır. Ayrıca belirli alanlarda uygun maliyetli küçük ölçekli su tutma tesislerinin inşa edilmesi ve su emilimini artıracak toprak koruma tekniklerinin uygulanması da önerilmektedir. Tuzluca Barajı rezervuarının hemen yanında bulunan ve Iğdır-Erzurum illeri arası ulaşımı sağlayan D80 karayolunun, olası baraj yıkılmasında kullanılamaz hale geleceği düşünülmektedir. Bu durumda acil müdahale ve şehirlerarası ulaşımın sağlanması noktasında alternatif ulaşım güzergâhlarının belirlenip planlanması da öneriler arasında yer almaktadır.

Literatürde baraj yıkılma simülasyonları mevcut veya geçmişte yıkılmış barajlar için yapılmıştır. Geçmiş baraj yıkılmaları ve yıkıcı etkileri düşünüldüğünde, baraj inşaatı öncesinde gerekli risk koşullarının belirlenmesi, yeniden yerleşim ve acil eylem planlarına entegre edilmesi amacıyla bu çalışmaya benzer şekilde planlama aşamasındaki barajlar için de baraj yıkılma analizlerinin yapılması önerilmektedir.

Analizlerin uzun çözüm süresi gerektirmesi nedeniyle çalışma kapsamında 6 farklı simülasyon gerçekleştirilmiştir. Söz konusu durum çalışması, farklı mesh aralıkları veya farklı türbülans modelleriyle çözülerek ilgili parametrelerin taşkın yayılımına etkileri incelenebilecektir. Ayrıca FLOW3D'ye alternatif olarak farklı hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) yazılımları (FLUENT, MIKE3D, OPENFOAM vb.) ile de benzer çalışmalar yapılabilecek ve sonuçlar karşılaştırılabilecektir.

KAYNAKÇA

- 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.
- Abdulrahman, K.Z. Case study of the Chaq-Chaq dam failure: parameter estimation and evaluation of dam breach prediction models. *Int. Journal of Engineering Research and Applications*, 4(5), 109-116.
- Abt, S.R., Wittier, R.J., Taylor, A. and Love, D.J. (1989). Human stability in a high flood hazard zone. *Water Resources Bulletin*. 25(4), 881-890.
- Adamo, N., Al-Ansari, N., Sissakian, V., Laue, J. ve Knutsson, S. (2020). Dam Safety: the question of tailings dams, *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering*, 11(1), 1-26.
- Ağırlioğlu, N. (2007). Baraj Planlama ve Tasarımı, İstanbul, Türkiye, *Su Vakfı Yayınları*.
- Ajami, A. (2019). *Toprak dolgu barajların yıkılmasının modellenmesi, Yüksek lisans tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir*.
- Akgün, Ç. (2018). *Tuzluca Barajı çevresel etkilerinin maliyet analizi. Yüksek lisans tezi, Gümüşhane Üniversitesi. Gümüşhane, Türkiye*.
- 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.
- Aksoy, A.O., Dogan, M., Güven, S.O., Tanır, G., Guney, M.S. (2022). Experimental and numerical investigation of the flood waves due to partial dam break. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 46, 4689–4704.
- AK-TEL. (2015). Aşağı Aras Havzası Tuzluca Barajı ve HES Projesi Nihai Çed Raporu, AK-TEL Mühendislik Eğt. Tur. Gd. San. Tic. Ltd. Şti., Ankara.
- Al-Taiee, T.M. ve Rasheed, A.M.M. (2009). Simulation Tigris River flood wave in Mosul City due to a hypothetical Mosul Dam break. *Damascus University Journal*, 25(2), 17-36.
- Ashraf, M. (2021). *Numerical investigation of 2D dam-break failures by using GIS applications. Yüksek lisans tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Türkiye*.
- Aydemir, A. ve Güven, A. (2017). Baraj yıkılma modellerinde kullanılan debi tahmin yöntemlerinin karşılaştırılması. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 1, 22-29.

- Begnudelli, L. ve Sanders, F. (2007). Simulation of the St. Francis dam-break flood. *Journal of Engineering Mechanics*, 133(11), 1200-1212.
- Bell, S.W., Elliot, R.C. ve Chaudry, M.H. (1992). Experimental results of two dimensional dam-break flows. *Journal of Hydraulic Research*, 30(2), 225-252.
- Bellos, V. ve Hrissanthou, V. (2011). Numerical simulation of a dam-break flood wave. *European Water*, 33, 45-53.
- Berkün, M. (2005). Su Kaynakları Mühendisliği, İstanbul, Türkiye, *Birsen Yayınevi*.
- Berkün, M. (2019). Akışkanlar Mekaniği ve Hidrolik. İstanbul, Türkiye, *Literatür Yayıncılık*.
- Bharath, A., Shivapur, A.V., Hiremath, C.G. ve Maddamsetty, R. Dam break analysis using HEC-RAS and HEC-GeoRAS: A case study of Hidkal dam, Karnataka state, India. *Environmental Challenges*, 5, 100401.
- Bozkuş, Z. (2004). Afet Yönetimi İçin Baraj Yıkılma Analizleri 1, *İMO Teknik Dergi*, 15(4), 3335-3350.
- Brakensiek, D.L. ve Comer, G.H. (1965). A re-examination of a flood routing method comparison. *Journal of Hydrology*. 3, 225-230.
- Brunner, G.W. (2003). Dam and levee breaching with HEC-RAS. World Water & Environmental Resources Congress, 23-26 June 2003, Philadelphia.
- Chai, T. and Draxler, R.R. (2014). Root Mean Square Error (RMSE) or Mean Absolute Error (MAE)?—Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geoscientific Model Development*. 7, 1247-1250.
- Clausen, L.K. (1989). Potential dam failure: estimation of consequences, and implications for planning. Yayınlanmamış yüksek lisans tezi, School of Geography and Planning at Middlesex Polytechnic collaborating with Binnie and Partners, Redhill, London, U.K.
- Costa, J.E. (1985). Floods from dam failures. US Geological Survey, Open-File Report 85-560, Denver, Colorado.
- 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 Supply*. 20, 348-360
- De Lorenzo, G. ve Macchione, F. (2014). Formulas for the peak discharge from breached earthfill dams. *Journal of Hydraulic Engineering*. 140(1), 56-67.
- Dehdar-behbahani, S., Parsaie, A. (2016). Numerical modeling of flow pattern in dam spillway's guide wall. Case study: Balaroud dam, Iran. *Alexandria Engineering Journal*, 55, 467-473.

- DeKay, M.L. ve McClelland, G.H. (1993). Predicting loss of life in cases of dam failure and flash flood. *Risk Analysis*, 13, 193–205.
- Dressler, R. F. (1952). Hydraulic resistance effects upon the dambreak functions. *Journal of Research*, 49 (3), 217-225.
- Dursun, Ö.F. ve Gül, E. (2018). İki boyutlu baraj yıkılma modellemesi; Sürgü Barajı örneği. *Fırat Üniv. Müh. Bil. Dergisi Science*, 30(3), 97-104.
- EİE ve Dolsar. (2004). *Aşağı Aras Havzası Tuzluca Barajı ve Hidroelektrik Santrali Projesi Yapılabilirlik Raporu, Elektrik İşleri Etüt İdaresi ve Dolsar Müh. Ltd. Şti., Ankara, 298s.*
- Elçi, Ş., Tayfur, G., Haltaş, İ. ve Kocaman, B. (2017). Baraj yıkılması sonrası iki boyutlu taşkın yayılımının yerleşim bölgeleri için modellenmesi. *İMO Teknik Dergi*, 28(3), 7955-7975.
- Em, A. ve Hamidi, N. (2021). Kralkızı barajının olası yıkılması sonrası bir boyutlu taşkın analizi. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 12(3), 535-541.
- Erdoğan, M.A. (2017). CBS Tabanlı Modellemeler. *İstanbul Üniversitesi Açık ve Uzaktan Eğitim Fakültesi*. İstanbul, Türkiye.
- Erpicum, S., Dewals, B.J., Archambeau, P. ve Piroton, M. (2008). Dam-break flow computation using high resolution DEM. 4th International Conference on Advanced Computational Methods in Engineering, 26-28 May 2008, Liège, Belgium.
- Farooq, U., Taha, A.T.B., Tian, F., Yuani X., Ajmal, M., Ullah, I. ve Ahmad, M. (2023). Flood modelling and risk analysis of cinan feizuo flood protection area, Huaihe River Basin. *Atmosphere*, 14, 678.
- Fearnside, P.M. ve Pueyo, S. (2012). Underestimating greenhouse-gas emissions from tropical dams, *Nature Climate Change*, 2, 7–10.
- Federico, F. ve Cesali, C. (2020). Effects of dam failure mechanisms on downstream flood propagation. Proceedings of the First International Conference on Embankment Dams. Springer Pub. 149-162.
- FlowSimulation, LLC. (2006). Simulation of Kalihiwai Reservoir dam-break flooding, Final Report, California.
- Franco, A., Moernaut, J., Schneider-Muntau, B., Strasser, M. ve Gems, B. (2020). The 1958 Lituya Bay tsunami–prevent bathymetry reconstruction and 3D numerical modelling utilising the computational fluid dynamics software Flow-3D. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20, 2255–2279.

- Fread, D. L. (1984). DAMBRK: The NWS dam break flood forecasting model. National Weather Service Report, Silver Spring, Maryland, USA.
- Froehlich, D. C. (1995). Embankment dam breach parameters revisited. *ASCE Conf. on Water Resources Engineering, 14-18 August 1995, Texas*, 887-891.
- Froehlich, D. C. (2008). Embankment dam breach parameters and their uncertainties. *Journal of Hydraulic Engineering*. 134(12), 1708-1721.
- Froehlich, D.C. (2016). Predicting peak discharge from gradually breached embankment dam. *Journal of Hydrologic Engineering*. 21(11), 04016041.
- Ghasemlounia, R. (2021). Hidrolik ve Su Kaynakları Mühendisliğinde FLOW-3D. Ankara, Türkiye, *Nobel Yayınları*.
- Goodchild, M.F. (2009). Geographic information systems and science: today and tomorrow. *Annals of GIS*, 15(1), 3-9.
- Gouda, M., Karner, K. ve Tatschl, R. (2002). Dam flooding simulation using advanced CFD methods. 5th World Congress on Computational Mechanics, 2002, Vienna, Austria.
- Graham, W.J. (1999). A procedure for estimating loss of life caused by dam failure. *Sediment River Hydral*. 6, 1–43.
- Güngörmez, H. (2015). İktisadi açıdan bir faaliyet: Tuzluca kaya tuzlası. *Coğrafya Dergisi*, 30, 26-37.
- Güven, A. ve Mahmood, A.M. (2021). Numerical investigation of flow characteristics over stepped spillways. *Water Supply*, 21(3), 1344–1355.
- Hicks, F. E., Steffler, P.M. ve Yasmin, N. (1997). One-Dimensional dam-break solutions for variable width channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(5), 464-468.
- Hien, L.T.H. ve Nguyen, V.C. (2022). Numerical study of partial dam-break flow with arbitrary dam gate location using VOF method. *Applied Sciences*, 12, 3884.
- Hien, L.T.H.; Nguyen, V.C. (2021). Investigate impact force of dam-break flow against structures by both 2D and 3D numerical simulations. *Water*, 13, 344.
- HR Wallingford (2005). The Flood Risk to People Methodology. Flood Risks to People, Phase 2 R&D Output FD2321/TR1. Defra/ Environment Agency Flood and Coastal Defence R&D Programme.
- Hu, H., Zhang, J. ve Li, T. (2018). Dam-break flows: comparison between Flow-3d, Mike 3 FM, and analytical solutions with experimental data. *Applied Sciences*, 8, 2456.
- ICOLD (1995). *Dam failures - statistical analysis*, Bulletin No. 99, France.
- ICOLD (2011). *Small dams, Design, Surveillance and Rehabilitation*, France.

- İnal, N. (2006). *İnternet ortamında tematik harita sunumu. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi. İstanbul, Türkiye.*
- Jonkman, S. N., van Gelder, P.H.A.J.M ve Vrijling, J. K. (2002). Loss of life models for sea and river floods. In Wu, & et al. (Eds.), Proceedings of the 2nd international symposium on flood defence. Science Press Ltd.
- Jonkman, S. N., Vrijling, J. K. ve Vrouwenvelder, A.C.W.M. (2008). Methods for the estimation of loss of life due to floods: a literature review and a proposal for a new method. *Natural Hazards*. 46, 353–389
- Jonkman, S.N. ve Penning-Rowsell, E. (2008). Human instability in flood flows. *Journal of the American Water Resources Association*. 44(5), 1208-1218.
- Jonkman, S.N. (2007). *Loss of life estimation in flood risk assessment. Doktora tezi, Delft University, Delft, The Netherlands.*
- Kaheh, M., Kashefipour, S. M. ve Dehghani, A. (2010). Comparison of k- ϵ and RNG k- ϵ turbulent models for estimation of velocity profiles along the hydraulic jump. 6th International Symposium on Environmental Hydraulics, Athens, Greece. 23-25 June 2010.
- Karahan, M., Ersoy, H. ve Akgun, A. (2020). A 3D numerical simulation-based methodology for Assessment of landslide-generated impulse waves: A case study of the Tersun Dam reservoir (NE Turkey). *Landslides*, 17(12), 2777-2794.
- Karakaya, K. (2005). *Numerical simulation of the Kirazlıköprü dam failure on the Gökırmak River. Yüksek lisans tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Türkiye.*
- Kelman, I. (2002). *Physical vulnerability of residential properties in coastal, Eastern England. Doktora tezi, Cambridge University, Cambridge, U.K.*
- Khojeh, S., Ataie-Ashtiani, B. ve Hosseini, S.M. (2022). Effect of DEM resolution in flood modeling: a case study of Gorganrood River, Northeastern Iran. *Natural Hazards*, 112, 2673–2693.
- 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, Elsevier Pub.*
- Kirchherr J. ve Charles, K.J. (2016). The social impacts of dams: a new framework for scholarly analysis, *Environmental Impact Assessment Review*, 49p.
- Kocaman, S. (2007). *Baraj yıkılması probleminin deneysel ve teorik olarak incelenmesi. Doktora tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana.*

- 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., Dal, K. ve Yılmaz, A. (2021). Mansapta trapez daralma olması durumunda baraj yıkılması taşkın dalgası yayılımının sığ su denklemleri ile modellenmesi. *NÖHÜ Müh. Bilim. Dergisi*, 10(2), 695-703.
- Lauber, G. ve Hager, W. H. (1997). Ritter's dambreak wave revisited. 27th IAHR Congress, San Francisco, 258-262.
- Launder, B.E. ve Spalding, D.B. The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 3(2), 269-289.
- Lee, R., Hu, P. S., Neal, D. M., Ogles, M. R., Sorensen, J. H. ve Trumble, 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, Y., Gong, J. H., Zhu, J., Ye, L., Song, Y.Q. ve Yue, Y. J. (2012). Efficient dam break flood simulation methods for developing a preliminary evacuation plan after the Wenchuan Earthquake. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 97–106.
- Lü, G., Battyc, M., Strobl, J., Line, H., Zhu, A. ve Chen, M. (2019). Reflections and speculations on the progress in Geographic Information Systems (GIS): a geographic perspective. *International Journal of Geographical Information Science*, 33(2), 346-367.
- MacDonald, T.C. ve Langridge-Monopolis, J. (1984). Breaching characteristics of dam failures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(5), 567-586.
- Mahnamfar, F., Moradi, Y.A. ve Ağırlioğlu, N. (2020). Flood risk analysis of residential areas at downstream of the Elmalı Dam. *Academic Platform Journal of Natural Hazards and Disaster Management*, 1(1), 49-58.
- Marangoz, H.O. ve Anılan, T. (2022). Two-dimensional modeling of flood wave propagation in residential areas after a dam break with application of diffusive and dynamic wave approaches. *Natural Hazards*, 110, 429-449.
- Mohapatra, P. K. ve Bhallamudi, S. M. (1996). Computation of a dam-break flood wave in channel transitions. *Advances in Water Resources*, 19(3), 181-187.
- Najar, M. ve Gül, A. (2022). Investigating the influence of dam-breach parameters on dam-break connected flood hydrograph. *İMO Teknik Dergi*, 33(5), 12501 – 12524.
- Niazi, M. H. K., Khalid, M., Masood, A. ve Ijaz, Z. (2016). *Computational flow modeling of 1D Saint-Venant (shallow water) equations. Mezuniyet Tezi, National University of Computer And Emerging Sciences, Lahore, Pakistan.*

- Ogino, Y., Yoshinori, H., Shogo, K. ve Natsuki, N. (2018). Numerical simulation of free-flight transfer by a 3D metal transfer model. *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*. 36(1), 94-103.
- Oliva, J.B. ve Valentin, M.G. (2017). *Comparative evaluation of two different 3D Openfoam modules in a dam-break test. Mezuniyet tezi, Higher Technical School of Road, Canals Engineering, Barcelona, Spain.*
- Pakniyat, H. (2015). *Tahtalı Barajının yıkılması durumunda oluşacak taşkın dalgalarının modellenmesi. Yüksek lisans tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye.*
- Palamut, N. (2014). *Baraj yıkılma analizi ve uygulaması. Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.*
- Pierce, M. W., C. I. Thornton, ve S. R. Abt. (2010). Predicting peak outflow from breached embankment dams. *Journal of Hydrologic Engineering*. 15(5), 338–349.
- Qiu, W., Li, Y., Wen, L. ve Bu, P. (2021). Study on numerical simulation method of overtopping dam break of concrete faced sand-gravel dam. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 783, IOP Publishing, Bristol, UK, 2021.
- Quecedo, M., Pastor, M., Herreros, M. I., Merodo, J. A. F. ve Zhang, Q. (2005). Comparison of two mathematical models for solving the dam break problem using the FEM method. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 194, 3984-4005.
- 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.
- Ruan, H., Chen, H., Wang, T., Chen, J. ve Li, H. (2021). Modeling flood peak discharge caused by overtopping failure of a Landslide Dam. *Water*, 13, 921.
- Saint-Venant, A.J.C. (1871) Théorie du mouvement non permanent des eaux, avec application aux crues des rivières et a l'introduction de marées dans leurs lits. *Comptes Rendus des Séances de Académie des Sciences*, 73, 521- 528.
- Schoklitsch, A. (1917). Über Dambruchwellen. *Sitzungsberichten der Königlische Akademie der Wissenschaften*, 126, 1489-1514.
- Sena, N.C., Veloso, G.V., Fernandes-Filho, E.I., Francelino, M.R., ve Schaefer, C.E.G. (2020). Analysis of terrain attributes in different spatial resolutions for digital soil mapping application in southeastern Brazil. *Geoderma Regional*, 21, e00268.
- Shahrim, M.F., Ros, F.C. Estimation of breach outflow hydrograph using selected regression breach equations. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science; IOP Publishing, Bristol, UK, 2020; p. 476.

- Shamsi, U.M. (2002). GIS tools for water, wastewater, and stormwater systems. Virginia, USA, ASCE Press.
- Shivashankar, M. (2016). *3-Dimensional Analysis of Dam Break Flood Using ANSYS. Yüksek lisans tezi, National Institute of Technology Rourkela, India.*
- Singh, V. P. ve Scarlatos, P. D. (1988). Analysis of gradual earth-dam failure. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(1), 21-42.
- Soares-Frazão, S. (2007). Experiments of dam-break wave over a triangular bottom sill. *Journal of Hydraulic Research*. 45(1), 19–26.
- Su Yönetimi Genel Müdürlüğü. (2019). *Aras Havzası taşkın yönetim planı. T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Ankara.*
- Suetsugi, K. (1998). Control of floodwater and improvements of evacuation system for floodplain management. In: Floodplain risk management, Proceedings of an international workshop. 11–13 November 1996. Hiroshima.
- 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, 1547–1568.
- 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 II: Model application and results. *Natural Hazards*, 72, 675–700.
- Şimşek, O. (2017). Tuzluca İlçesinde nüfusun gelişimi. *Kafdağı*, 2(1), 38-58.
- Şimşek, O., Aköz, S.M. ve Gümüş, V. (2011). Eğrisel geniş başlıklı savak üzerinden geçen açık kanal akımının deneysel ve teorik analizi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*. 26(2), 47-55.
- Tahershamsi, A., Hooshyaripor, F. ve Razib, S. (2017). Reservoir's geometry impact of three dimensions on peak discharge of dam-failure flash flood. *Scientia Iranica A*, 25(4), 1931–1942.
- Tona, A.U., Demir, V., Kuşak, L. ve Yakar, M. (2022). Su kaynakları mühendisliğinde CBS'nin kullanımı. *Türkiye Coğrafi Bilgi Sistemleri Dergisi*, 4(1), 23-33.
- Tu, J., Yeoh, G.H. ve Liu, C. (2018). *Computational Fluid Dynamics A Practical Approach*. (Engin, T., Güneş, H., Çadircı, S., Kibar, A. ve Kemerli, M. Çev.) Palme Yayınevi, Ankara.
- Tu, J., Yeoh, G.H. ve Liu, C. (2018). *Computational Fluid Dynamics A Practical Approach*. Elsevier Pub.

- URL-1, (2023). <https://www.hurriyet.com.tr/gundem/10-kisinin-oldugu-baraj-faciasinin-sorumlularina-para-cezasi-28709225>, 13 Nisan 2023.
- URL-2, (2022) <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/ras1dtechref/latest/-performing-a-dam-break-study-with-hec-ras/estimating-dam-breach-parameters/-estimating-breach-parameters>, 13 Ekim 2022.
- URL-3. (2022). https://sylvestre.faculty.geol.ucsb.edu/Teton_Dam/narrative.html. 18 Ekim 2022.
- URL-4. (2022). <https://www.renewableenergyworld.com/baseload/dams-civil-structures-2/#gref>. 18 Ekim 2022.
- URL-5. (2023). <http://www.tuzluca.gov.tr/ilce-merkezi>. 17 Ekim 2023.
- USBR (1988). Downstream hazard classification guidelines, ACER Tech. Memorandum Rep. No. 11, Bureau of Reclamation: Denver, CO, USA.
- Uysal, G. ve Taşçı, E. (2023). Batman Barajı'nın yıkılması durumunda mansapta taşkın riskinin iki boyutlu hidrolik modelleme ve uydu verileri ile analizi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 9(1), 39-57.
- Uysal, T. (1977). Teton Barajı'nın yıkılma nedenleri üzerine araştırmalar ve sonuçlar, *Türkiye Mühendislik Haberleri, İnşaat Mühendisleri Odası*, 266, 22-31.
- Valiani, A., Caleffi, V. ve Zanni, A. (2002). Case study: Malpasset dam-break simulation using a two-dimensional finite volume method. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(5), 460-472.
- 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.
- Walder, J., O'Connor, J.E. (1997). Methods for predicting peak discharge of floods caused by failure of natural and constructed earthen dams. *Water Resources Research*. 33, 2337-2348.
- Wang, D., Zhou, Y., Pei, X., Ouyang, C., Du, J. ve Scaringi, G. (2021). Dam-break dynamics at Huohua Lake following the 2017 Mw 6.5 Jiuzhaigou earthquake in Sichuan, China. *Engineering Geology*, 289, 106145.

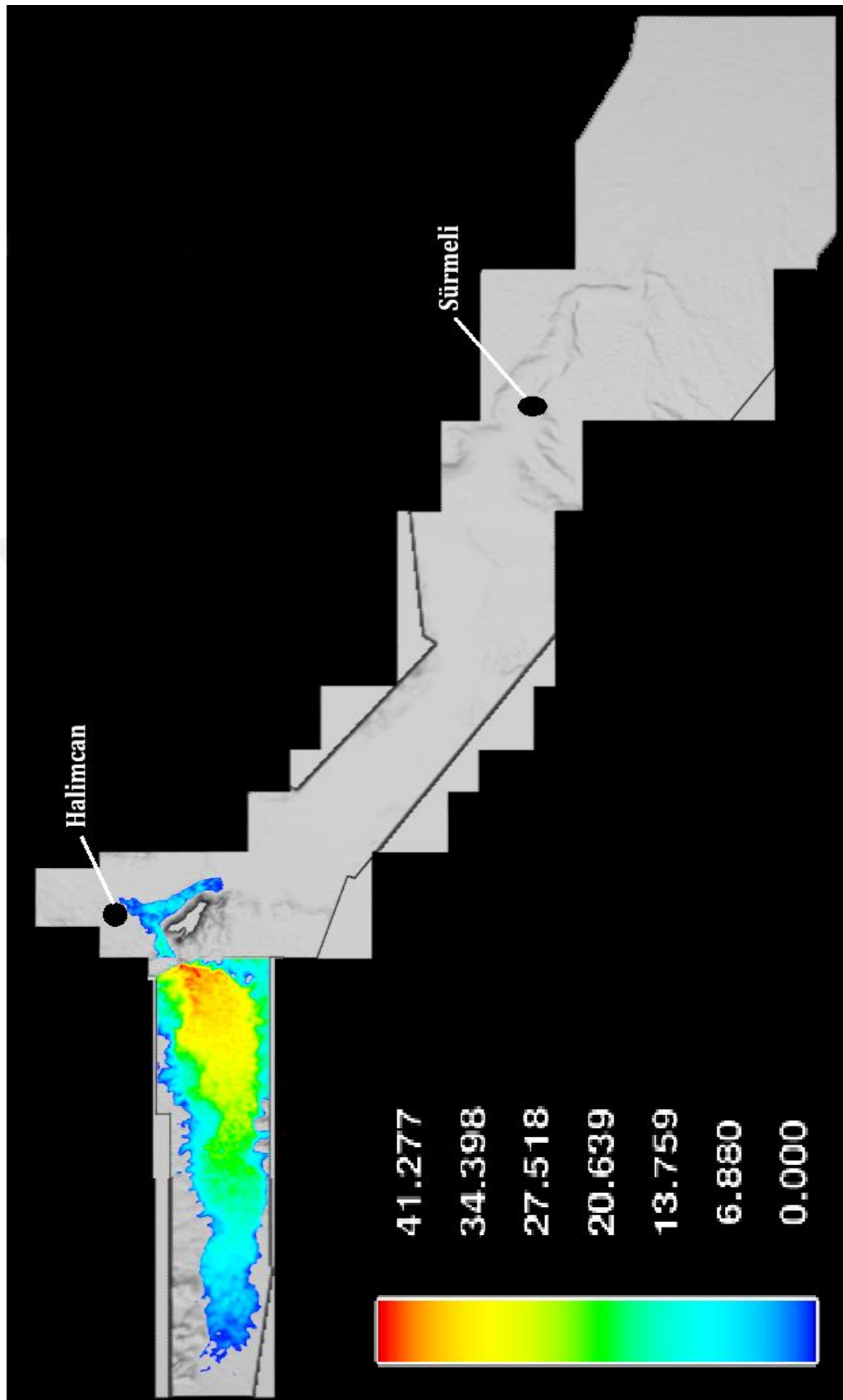
- Willmott, C.J. and Matsuura, K. (2005). Advantages of the Mean Absolute Error (MAE) over the Root Mean Square Error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research*, 30, 79-82.
- Wu, W. (2016). Introduction to DLBreach – a simplified physically-based dam/levee breach model, Technical Report, New York, USA.
- Wurbs, R.A. (1987). Dam-breach flood wave models. *Journal of Hydraulic Engineering*, 113(29), 29-46.
- 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, 1850–1853.
- Xu, Y. ve Zhang, L.M. (2009). Breaching parameters for earth and rockfill dams. *Journal Geotech. Geoenviron. Eng.* 2009, 135, 1957–1970.
- Yerramilli, S. (2013). Potential impact of climate changes on the inundation risk levels in a dam break scenario. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2, 110-134.
- Zagonjoli, M. (2007). *Dam break modelling, risk assessment and uncertainty analysis for flood mitigation. Doktora tezi, Delft University of Technology, Netherlands.*
- Zhang, T., Peng, L., Feng, P. (2018). Evaluation of a 3D unstructured-mesh finite element model for dam-break flood. *Computers & Fluids*. 160, 64–77.
- Zhao, Y., Sherman, B., Ford, P., Demarty, M., DelSontro, T., Harby, A., Tremblay, A., Øverjordet, I.B., Zhao, X., Hansen, B.H. ve Wu1, B. (2015). A comparison of methods for the measurement of CO₂ and CH₄ emissions from surface water reservoirs: Results from an international workshop held at Three Gorges Dam, June 2012. *Limnology And Oceanography: Methods*, 13, 15-29.
- Zhou, K.F. (2006). *Study on Analysis Method for Loss of Life Due to Dam Breach. Yüksek lisans tezi, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, China.*
- Zhou, R.D., Judge, D.G. ve Donnelly, C.R. (2005). Comparison of HEC-RAS with FLDWAV and DAMBRK models for dam break analysis. CDA 2005 Annual Conference, 3-6 October 2005, Alberta, Canada.
- Zienkiewicz, O. C. ve Taylor, R. L. (2000). Finite Element Method: Volume 3, Fluid Dynamics. *John Wiley & Sons*.
- Zoppou, C. ve Roberts, S. (2003). Explicit schemes for dam-break simulations. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(1), 11-34.

EKLER

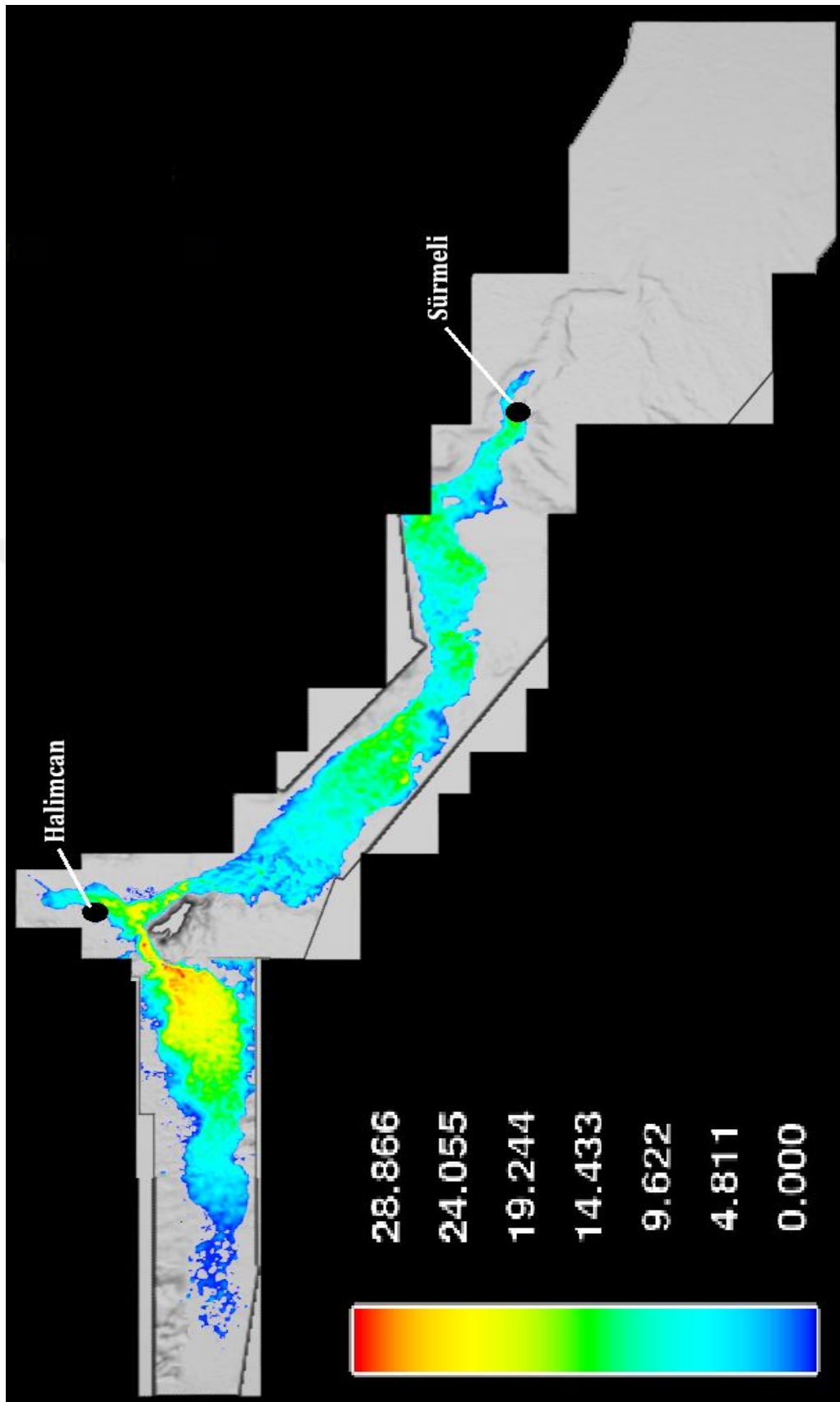
Ek 1. 2D simülasyonda 1. Senaryo için taşkın yayılımı ve su derinlikleri



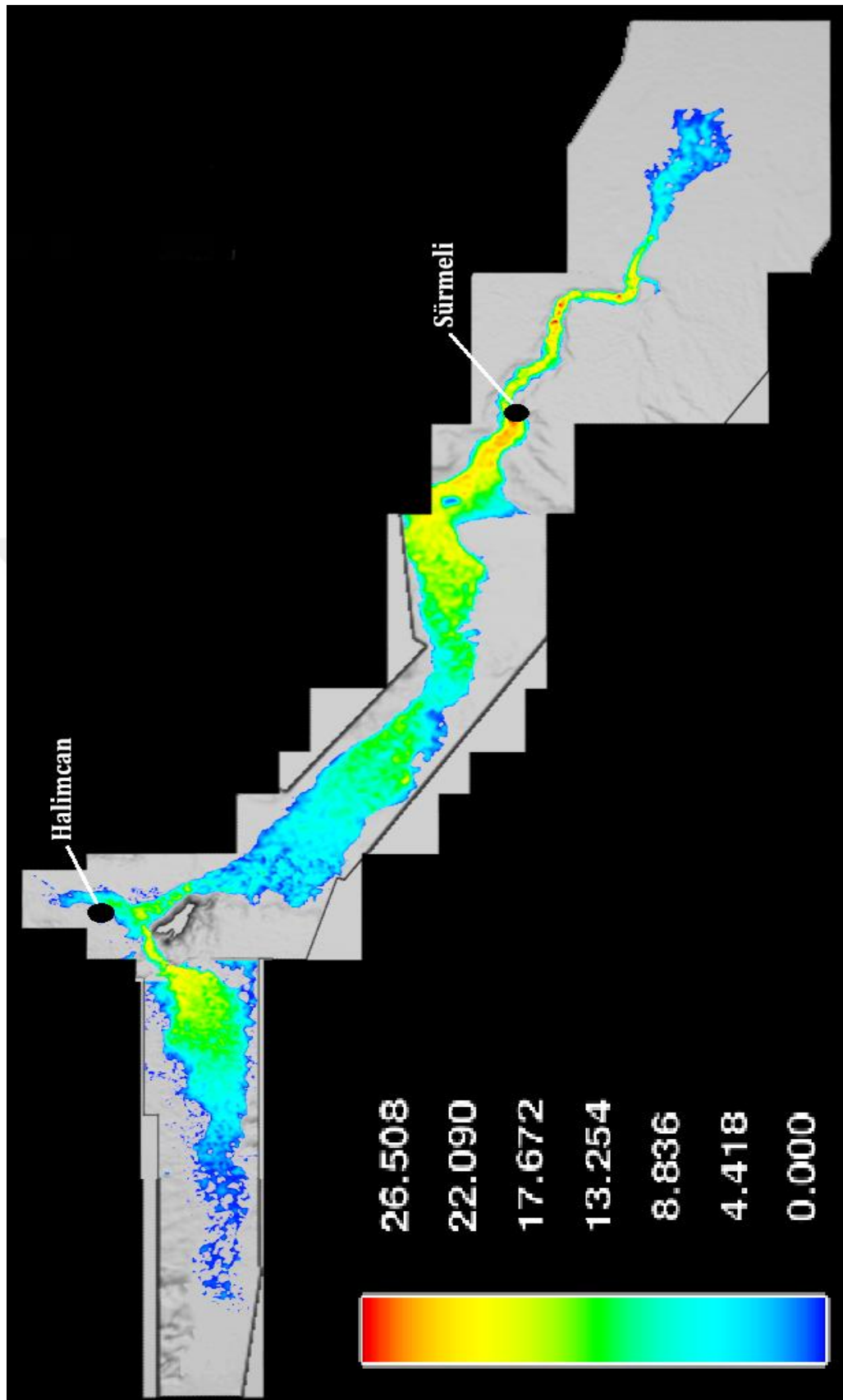
Ek 1(a) t=0 sn



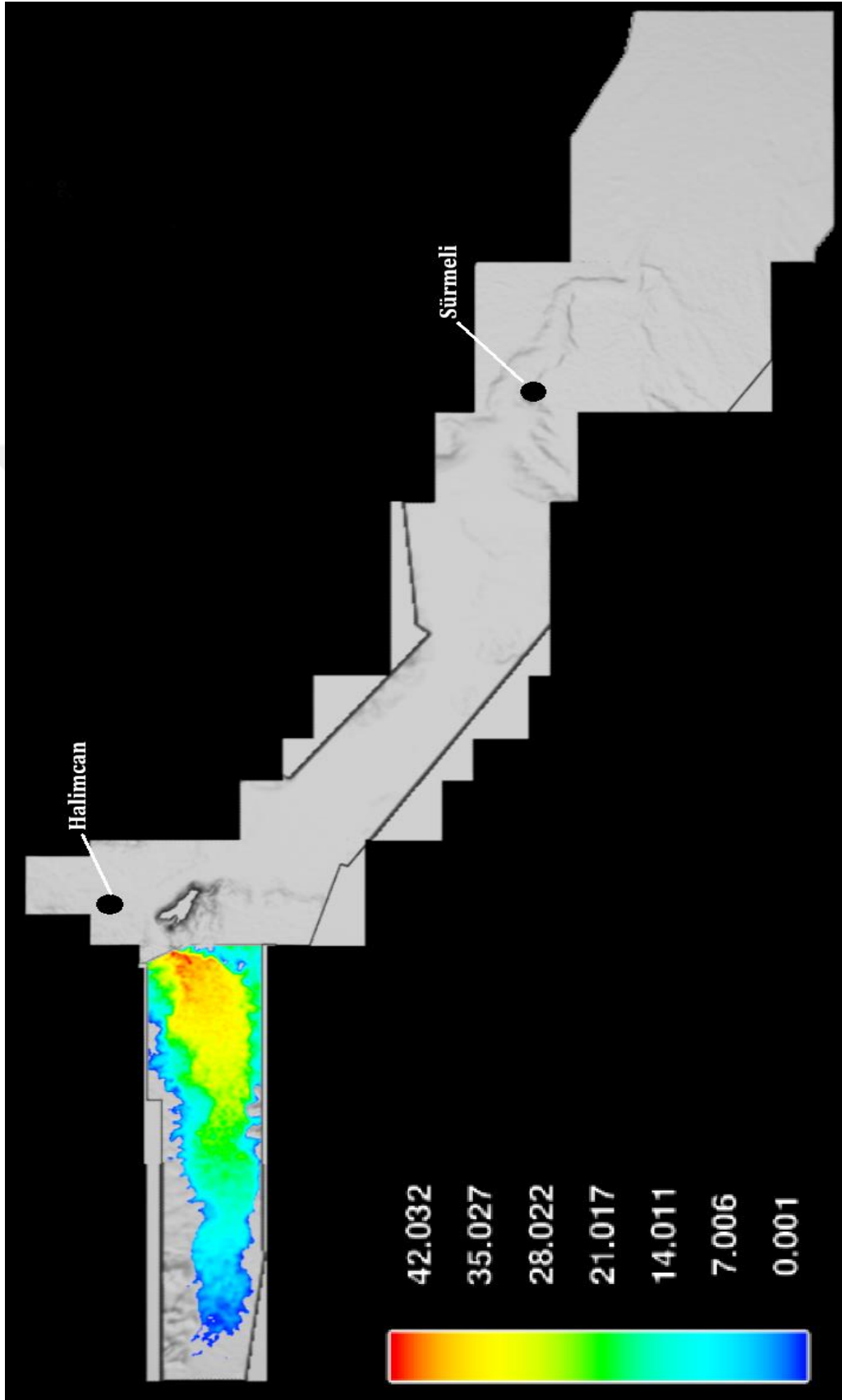
Ek 1(b) $t = 1240$ sn



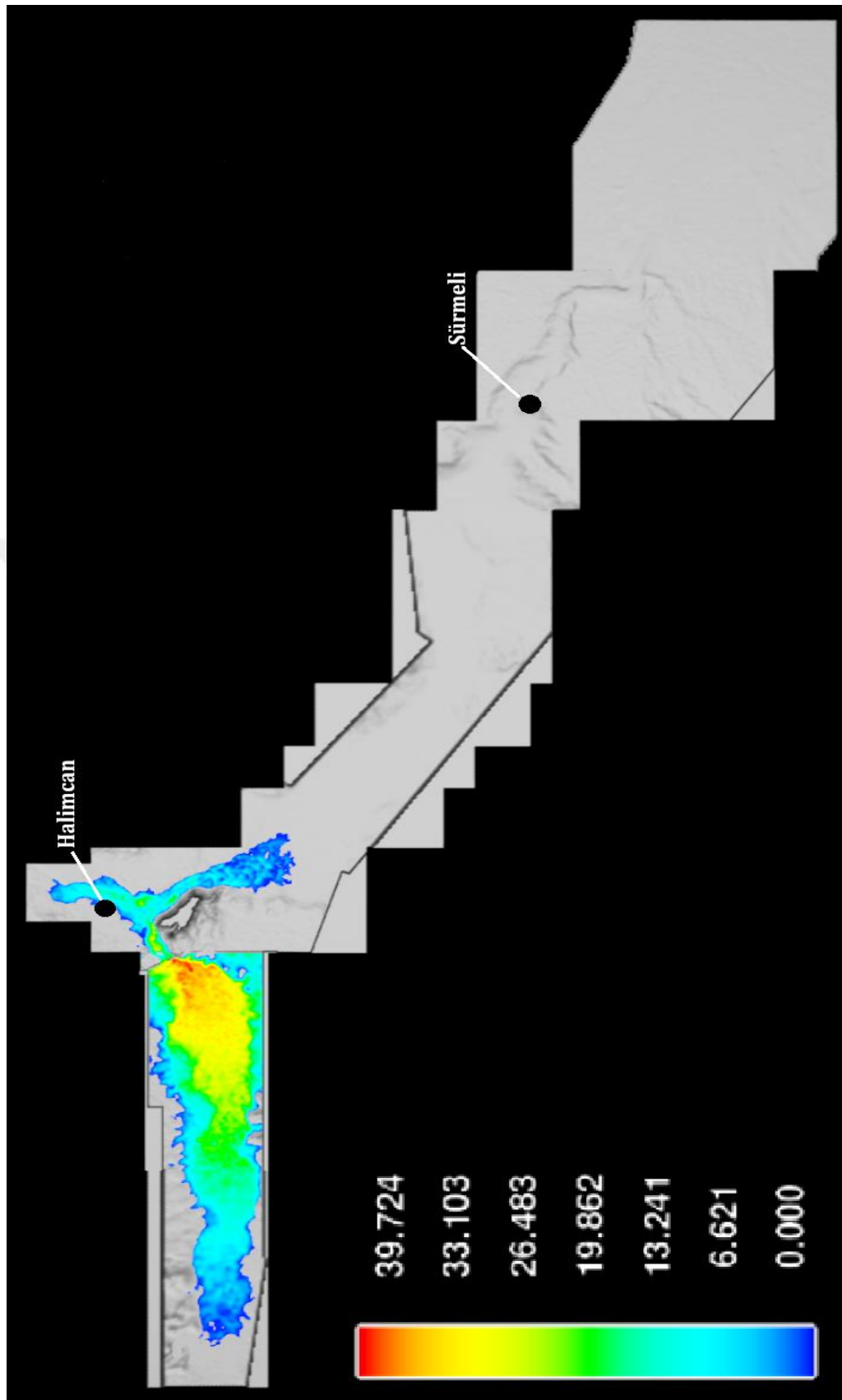
Ek 1(c) $t= 4700$ sn



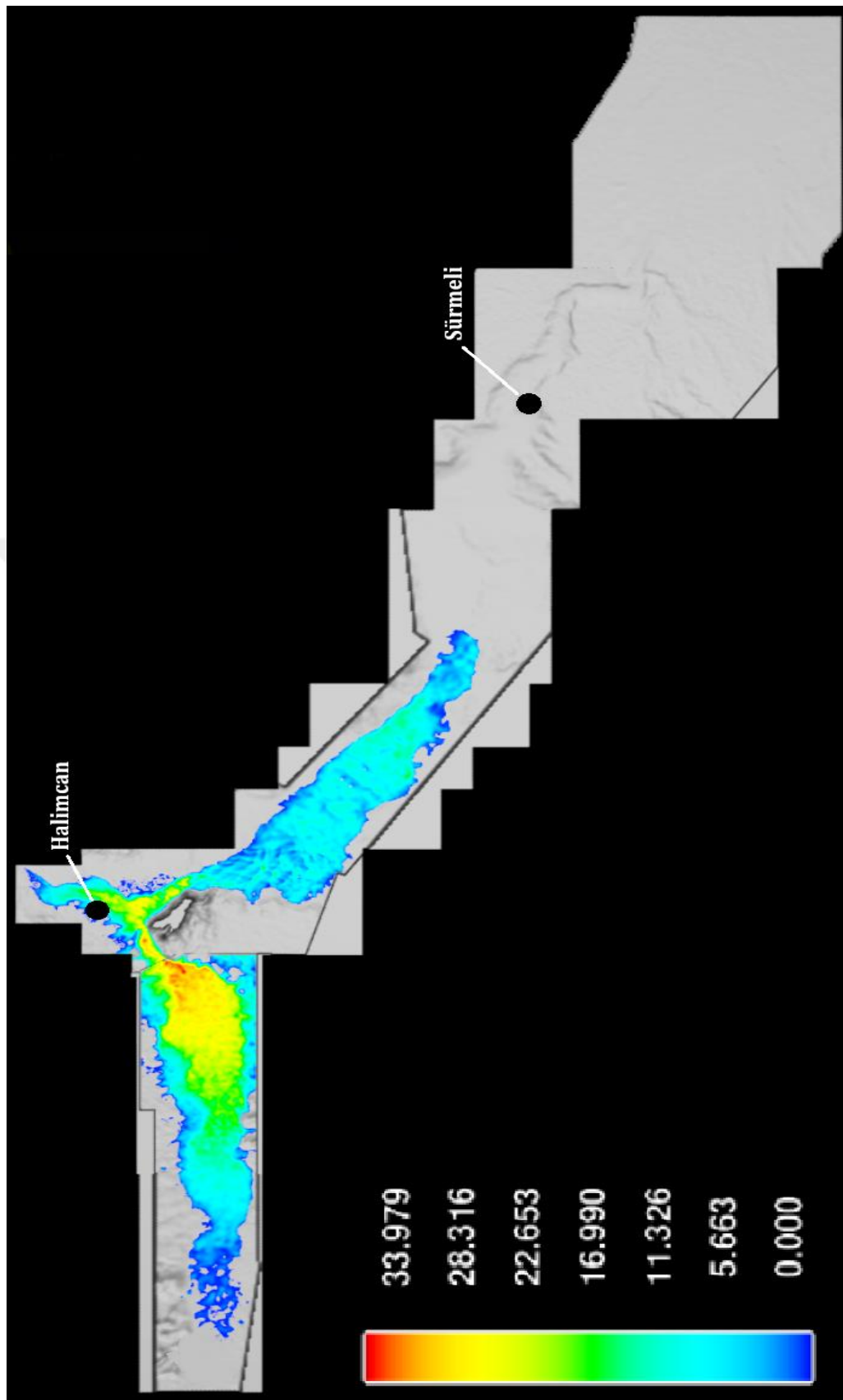
Ek 1(d) $t = 7200$ sn



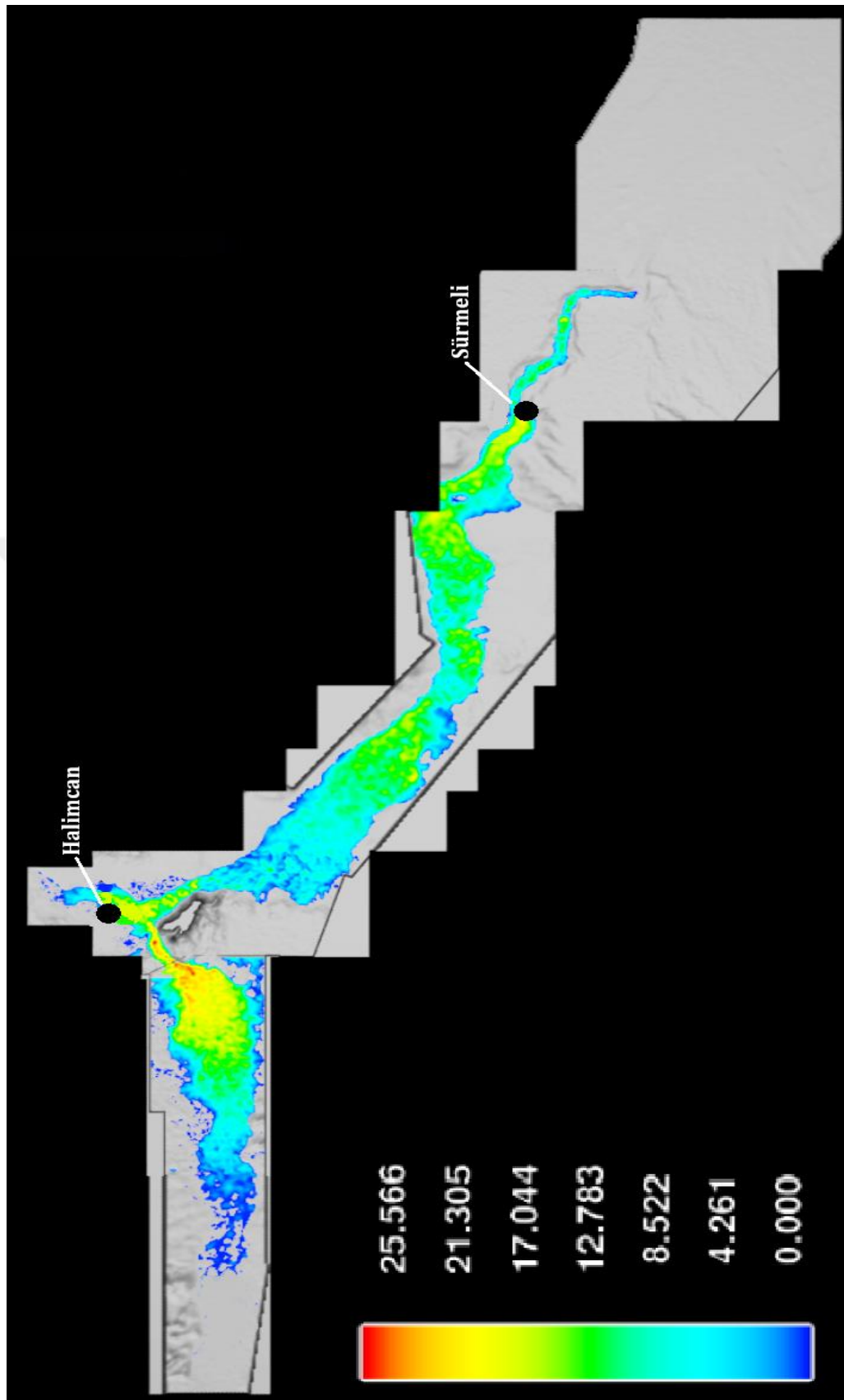
Ek 2(a) $t = 0$ sn



Ek 2(b) $t= 1240$ sn

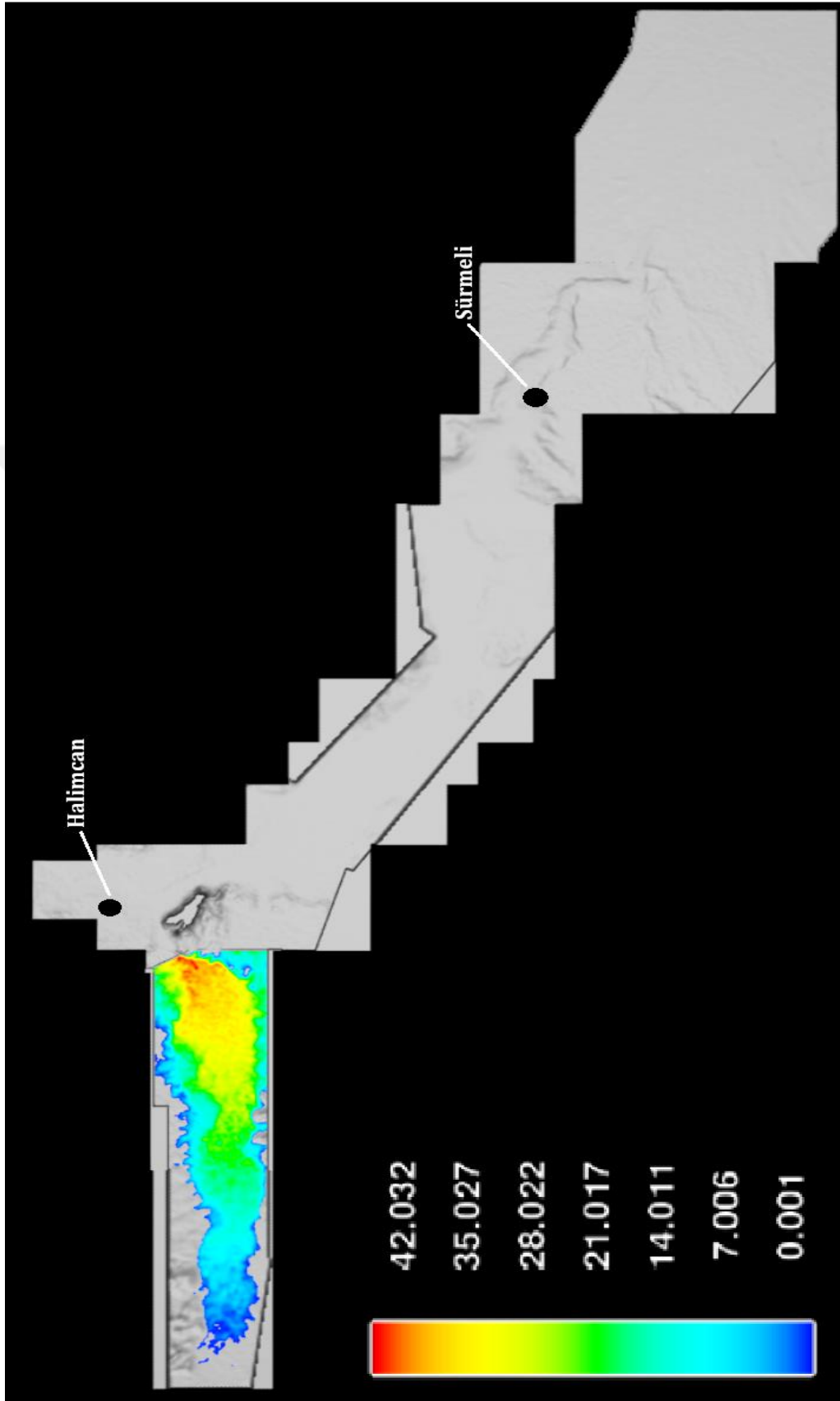


Ek 2(c) $t = 2500$ sn

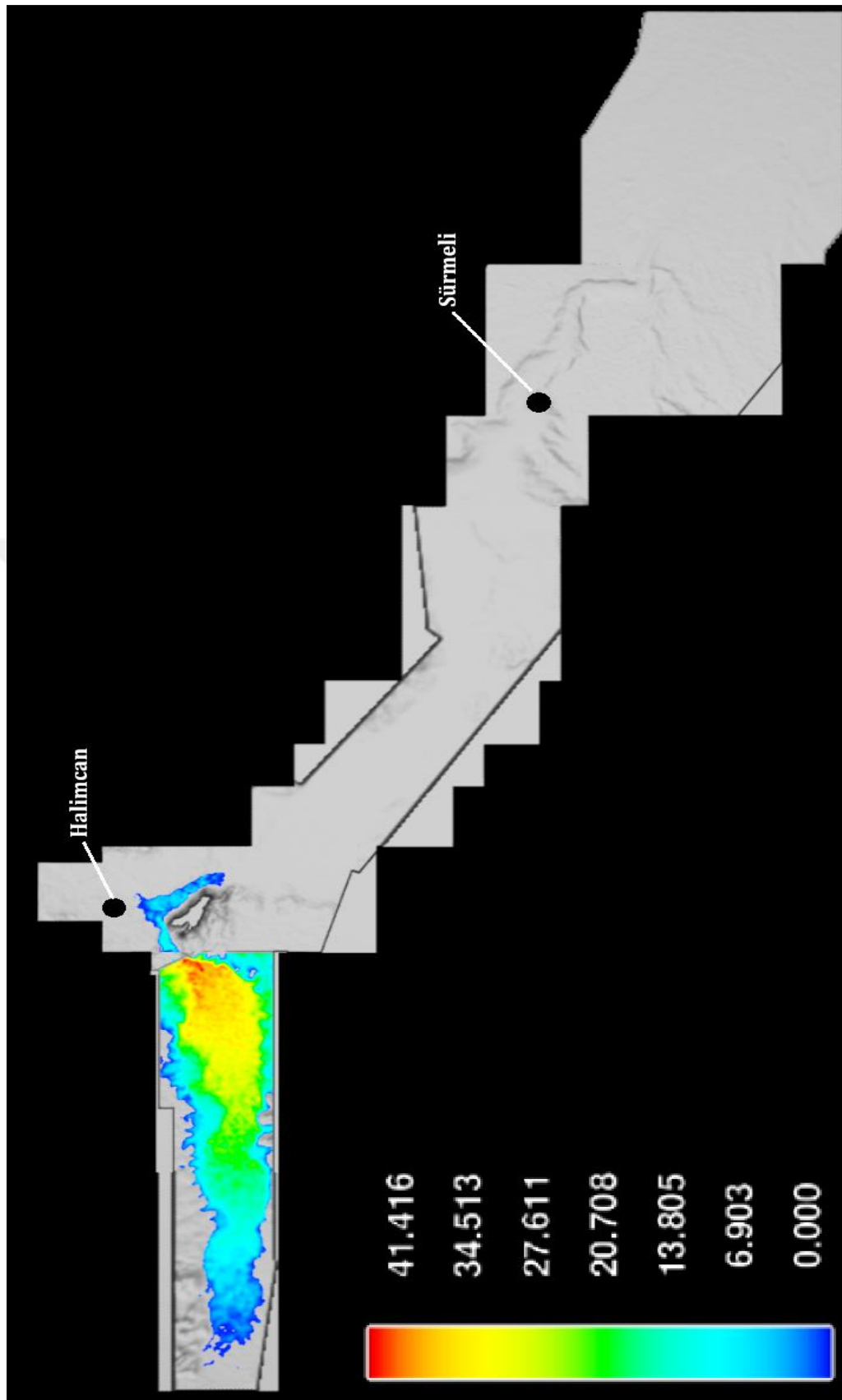


Ek 2(d) $t = 4700$ sn

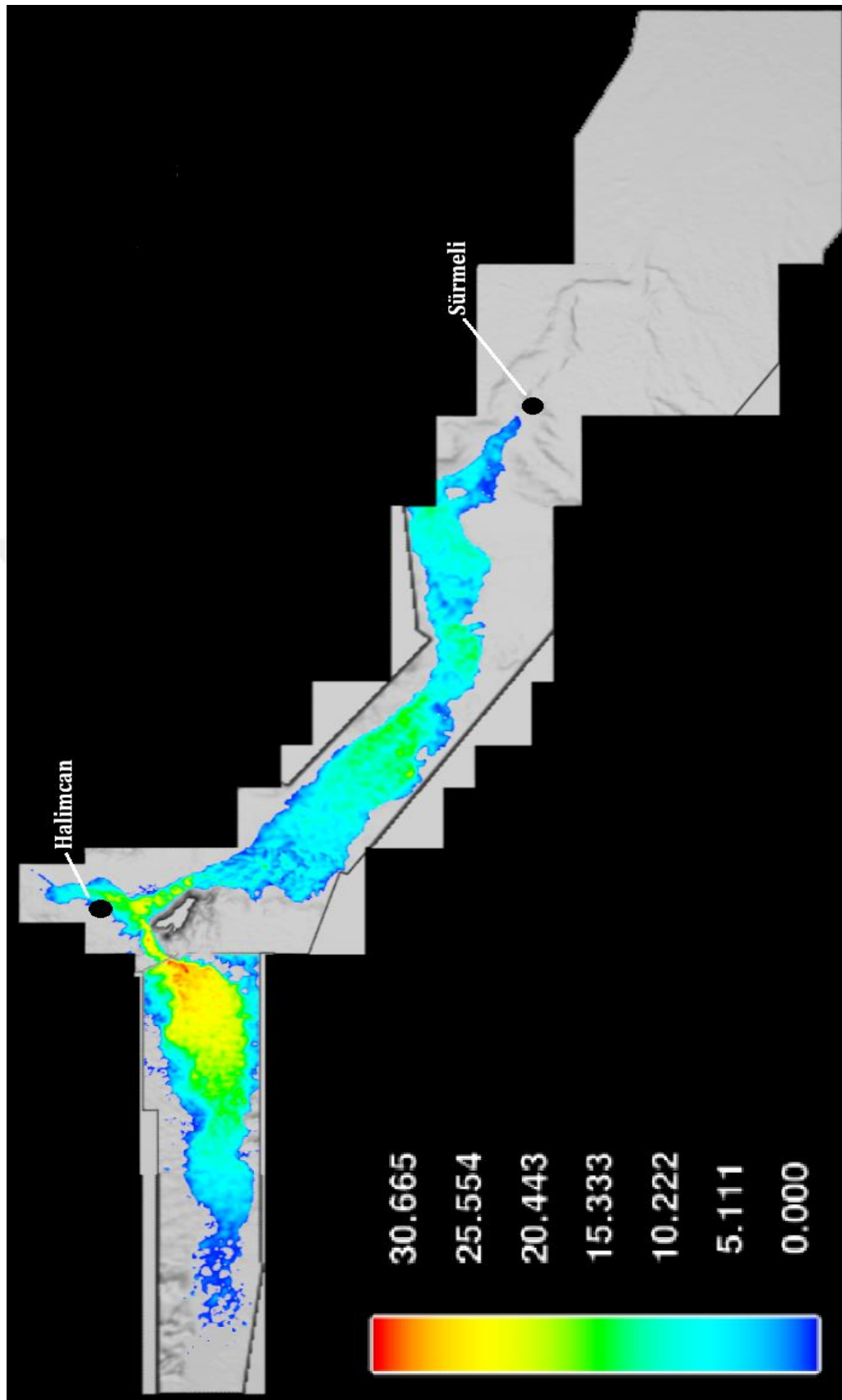
Ek 3. 2D simülasyonda 3. Senaryo için taşkın yayılımı ve su derinlikleri



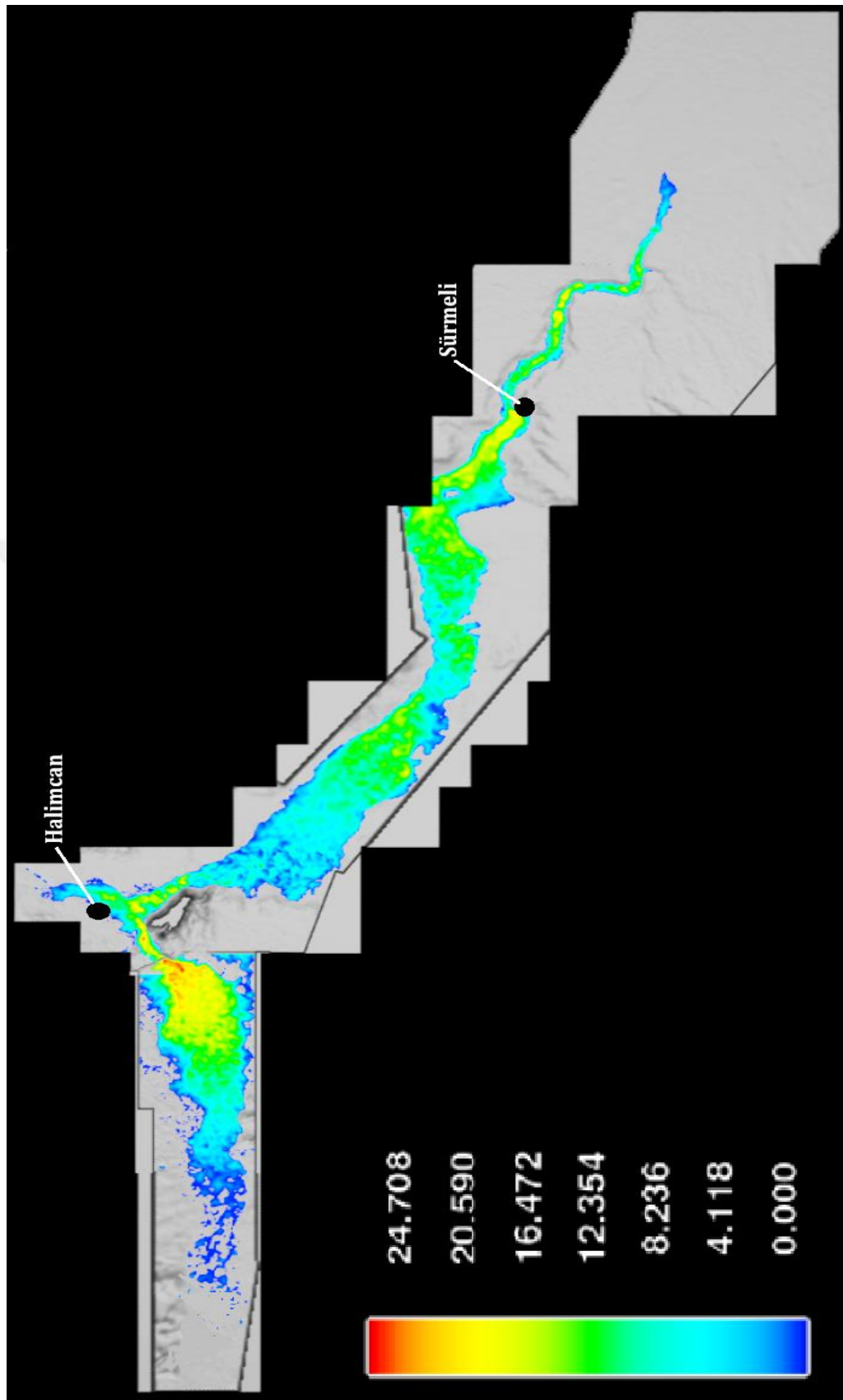
Ek 3(a) $t = 0$ sn



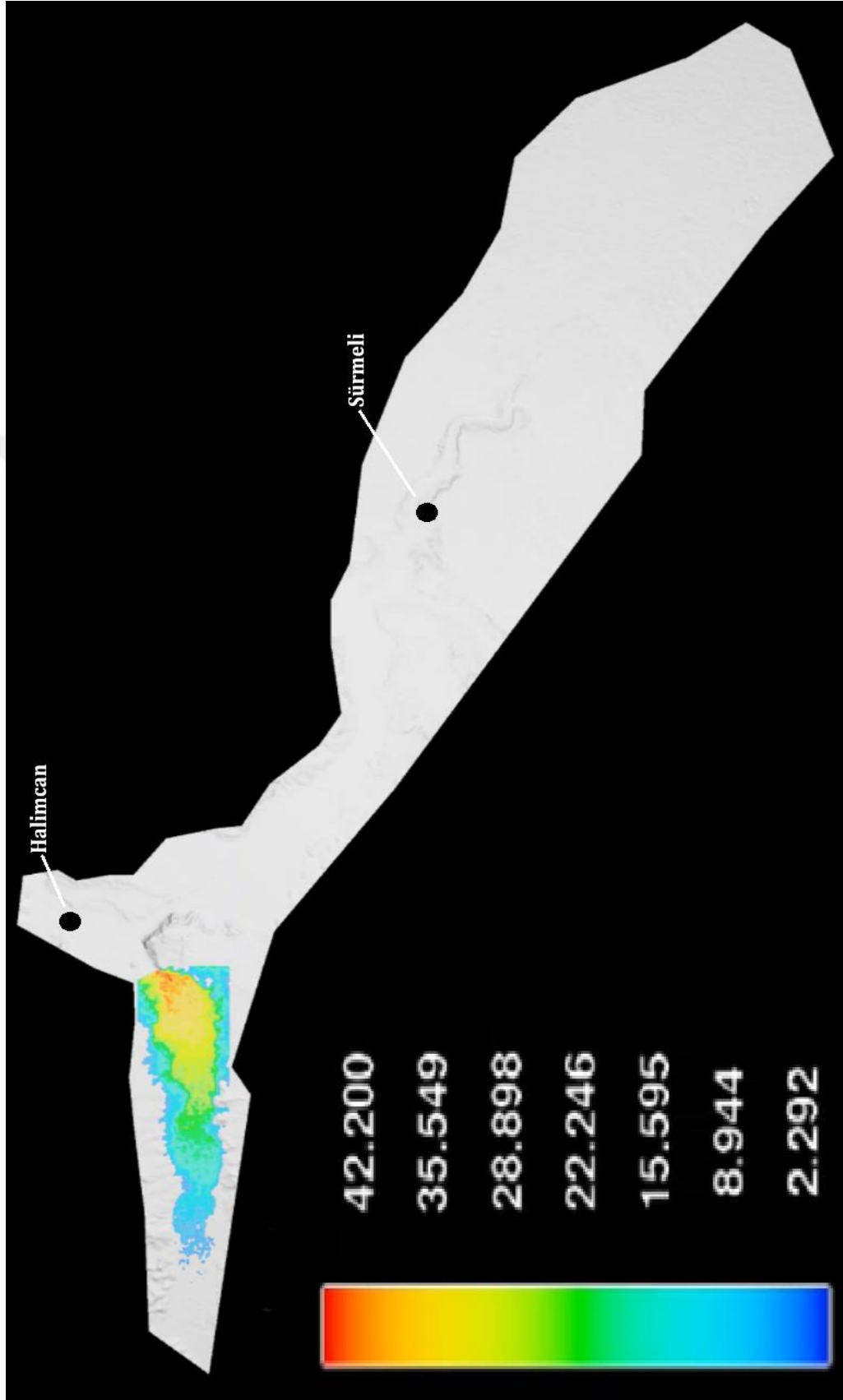
Ek 3(b) $t=1240$ sn



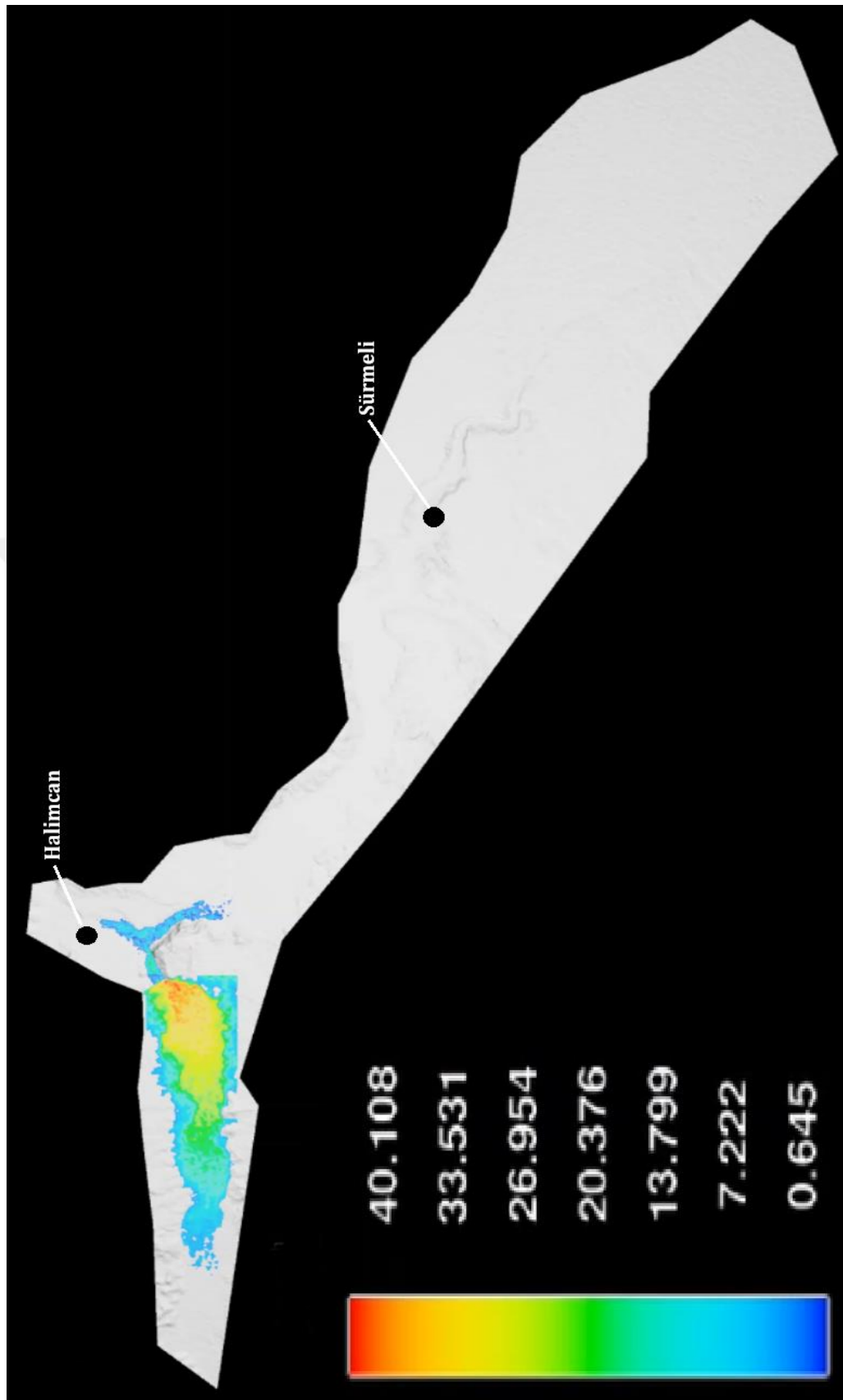
Ek 3(c) $t = 4700$ sn



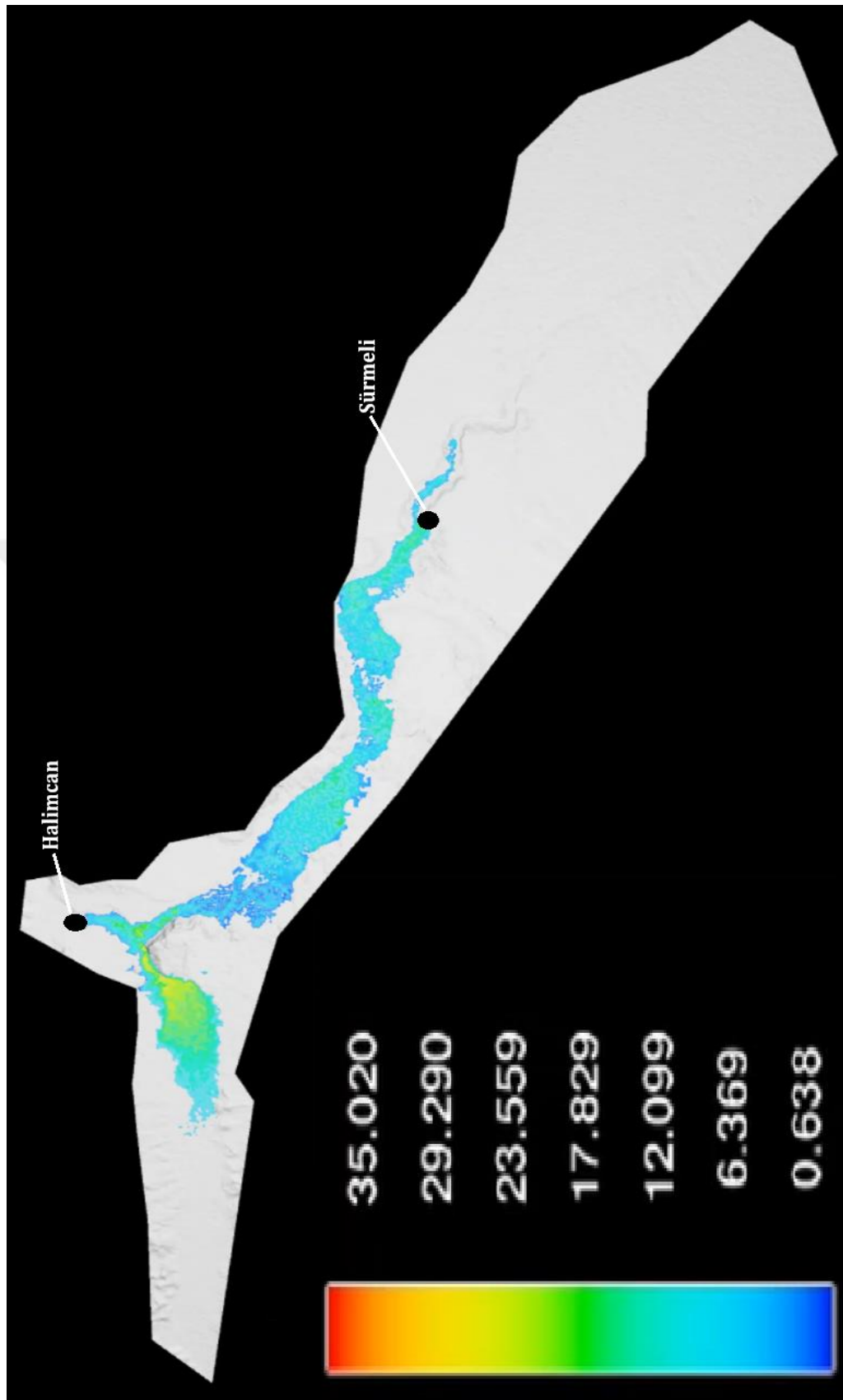
Ek 3(d) $t= 6500$ sn



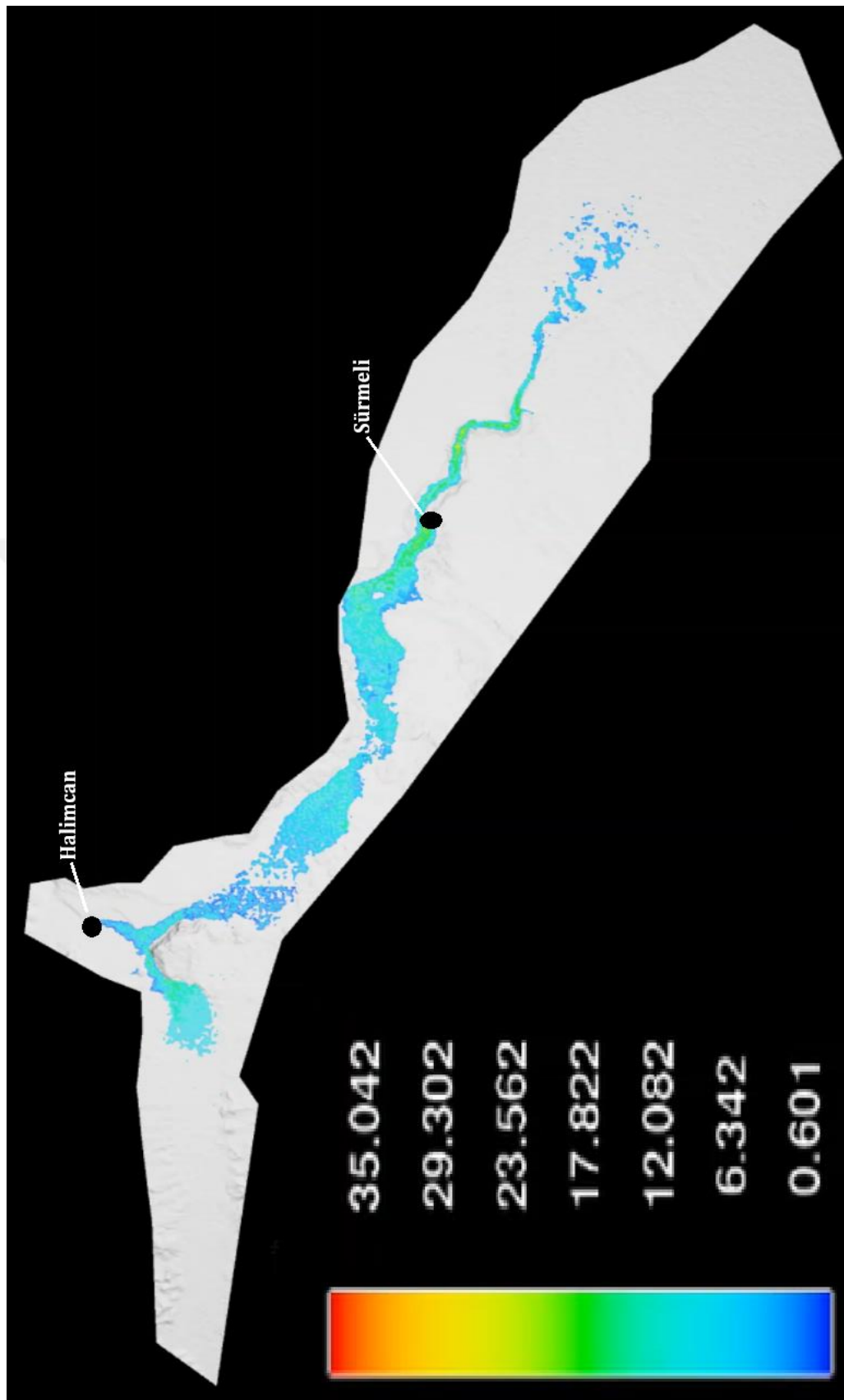
Ek 4(a) $t=0$ sn



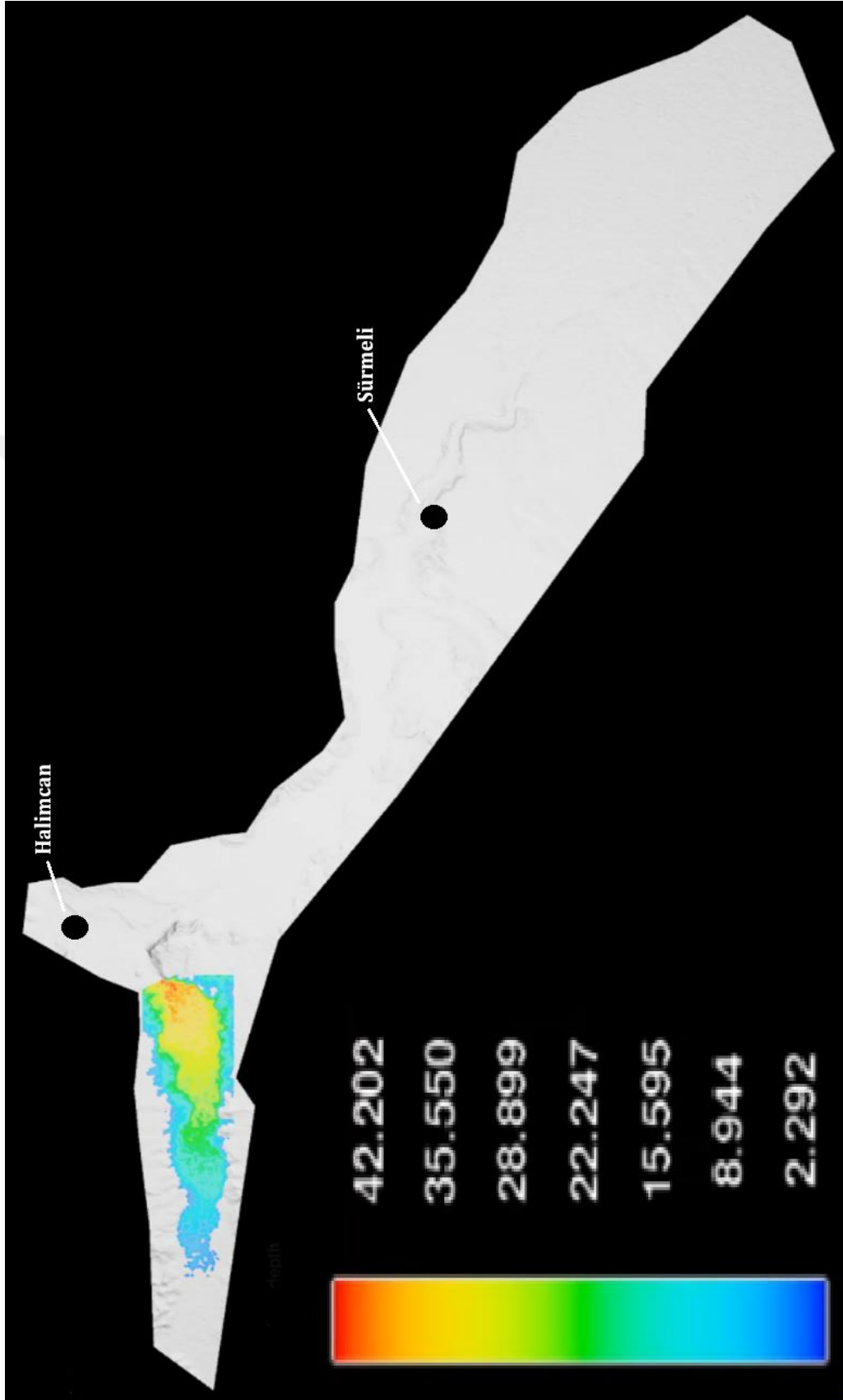
Ek 4(b) $t=1240$ sn



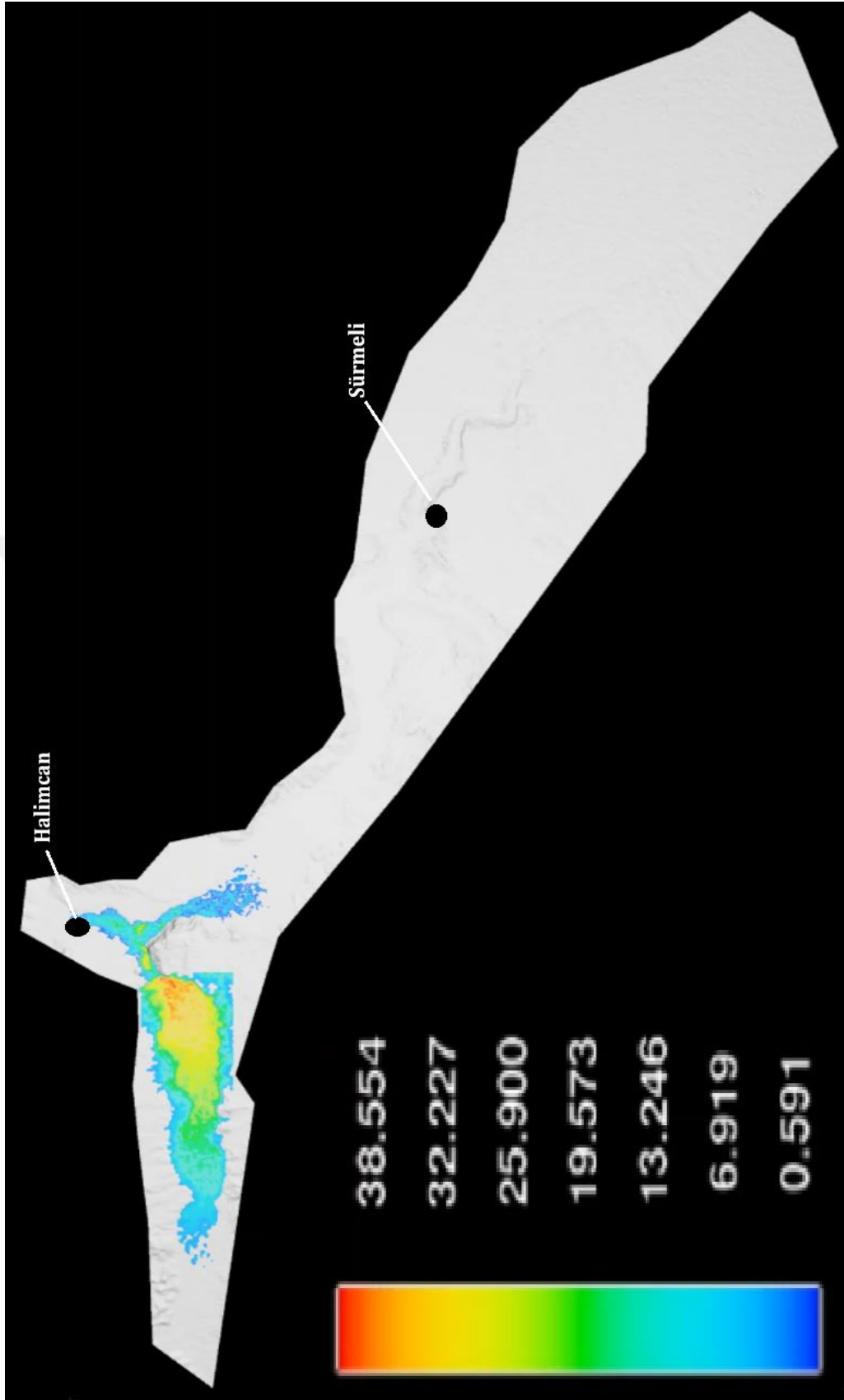
Ek 4(c) $t= 4700$ sn



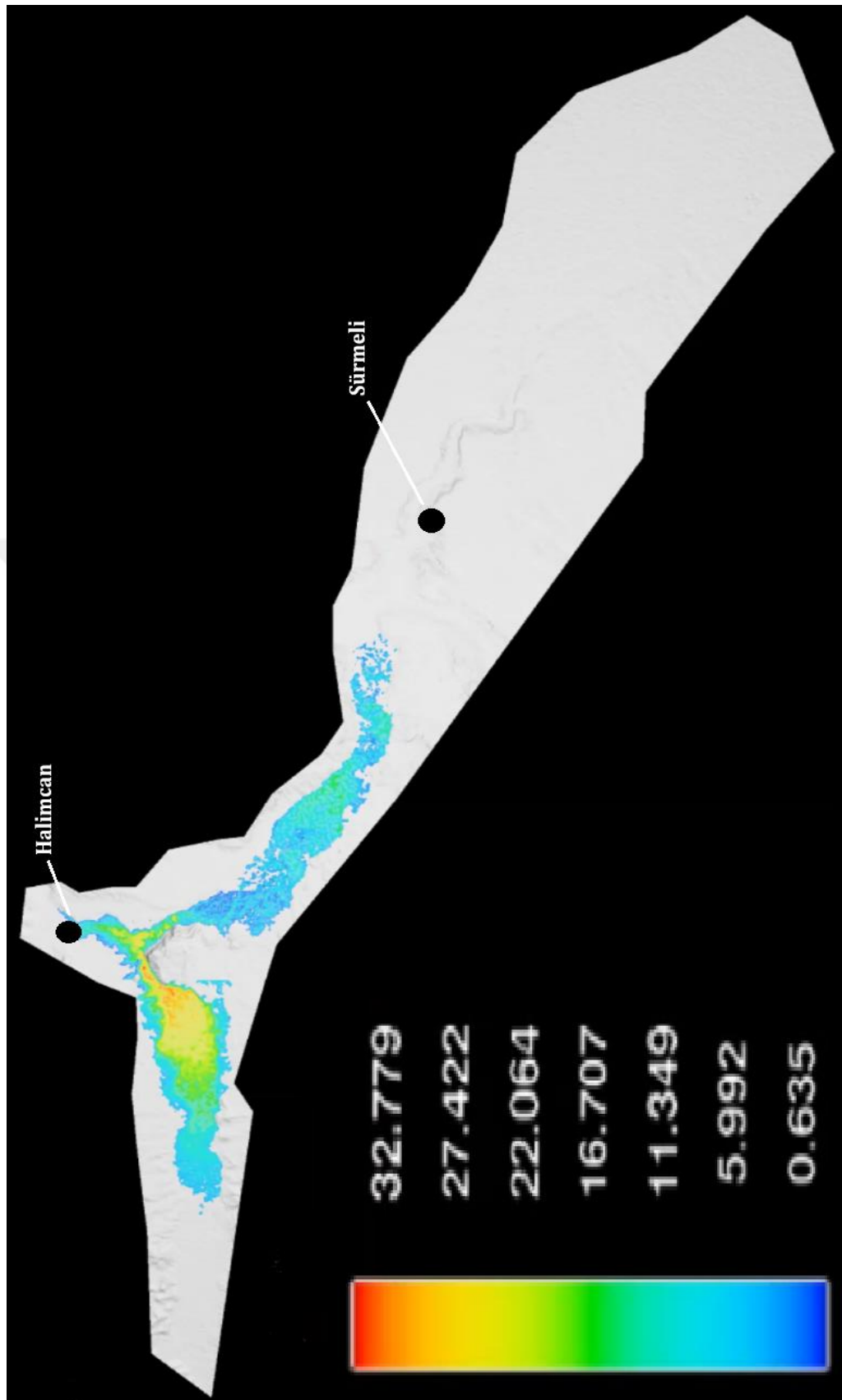
Ek 4(d) $t=7200$ sn



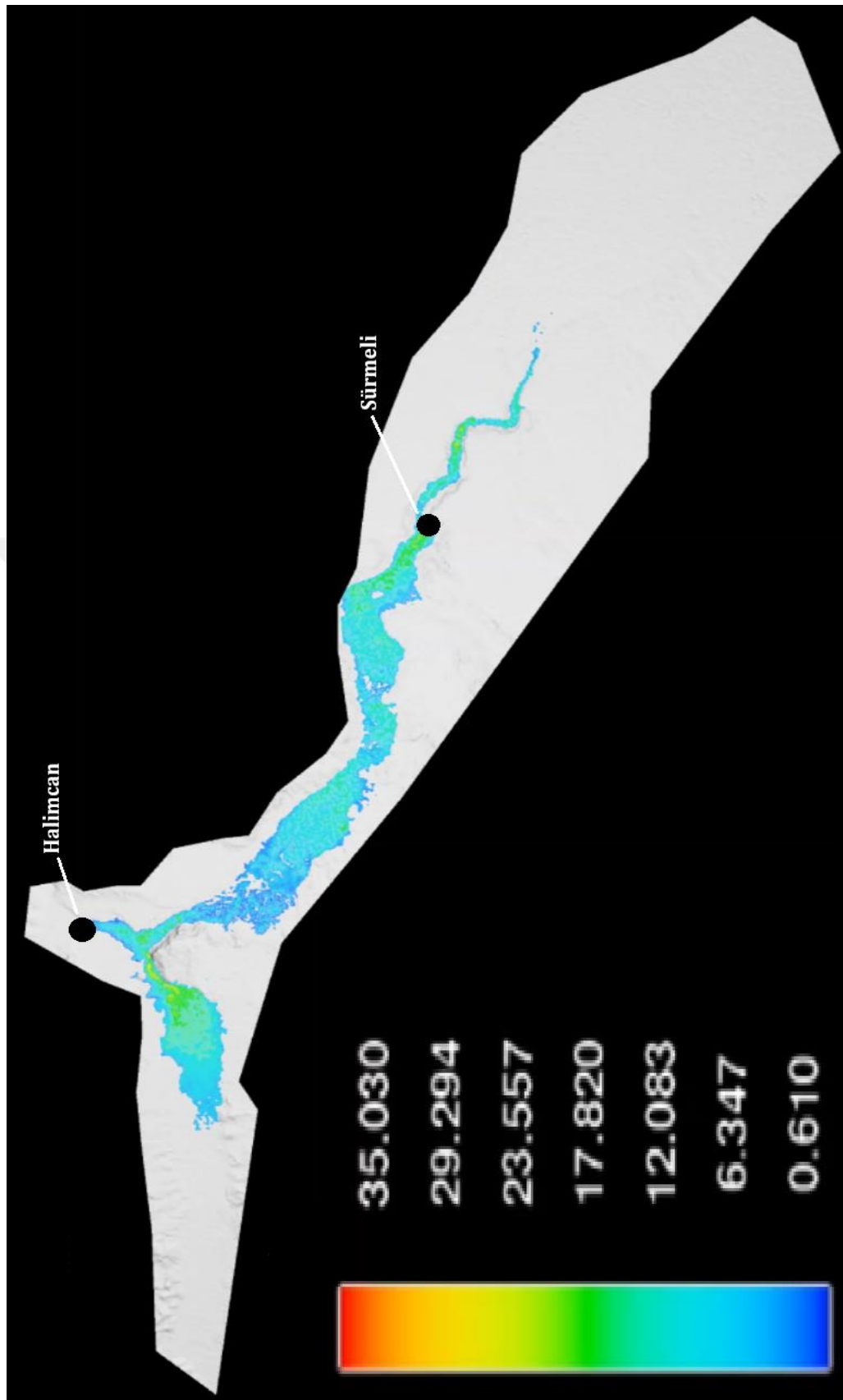
Ek 5(a) $t = 0$ sn



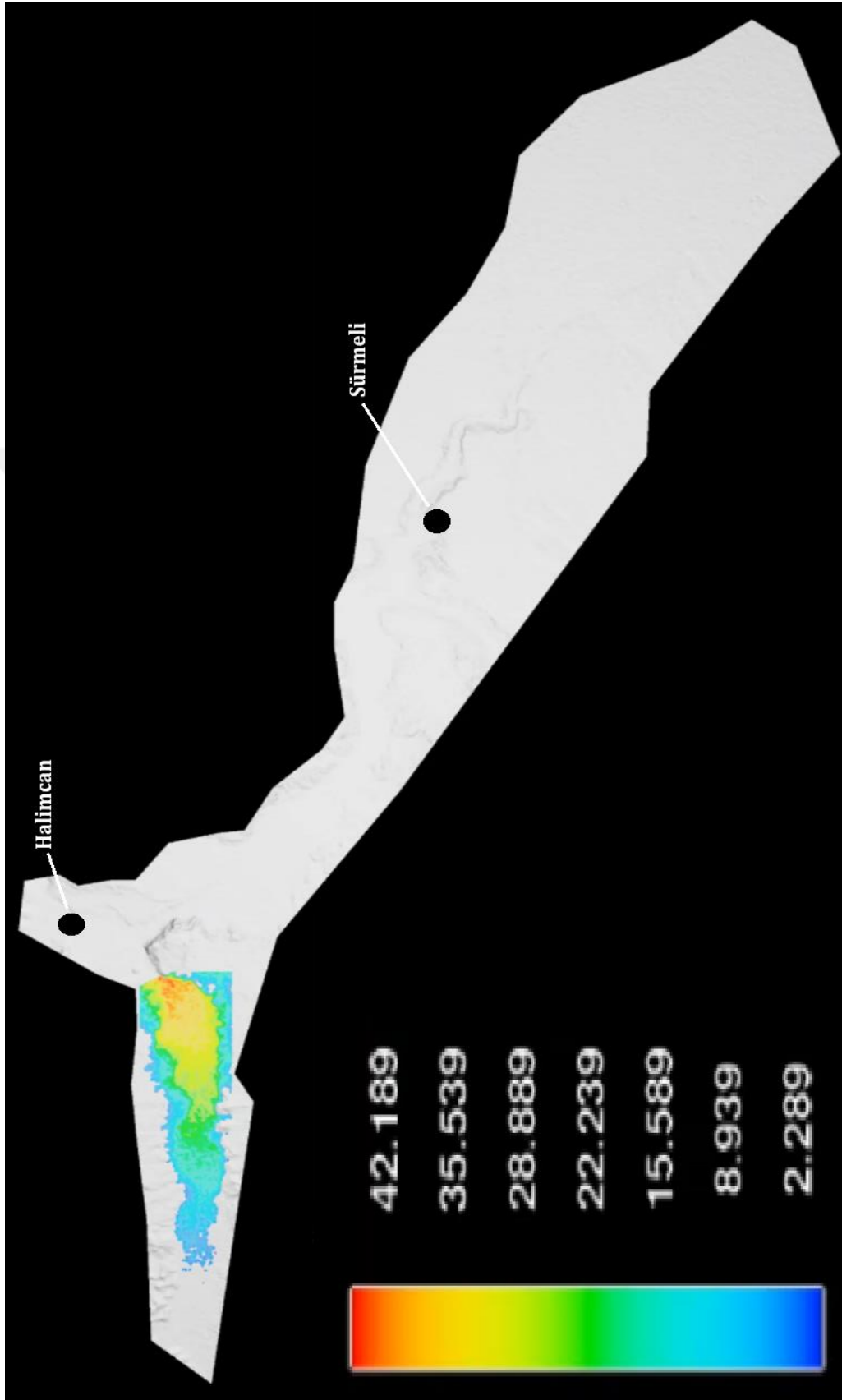
Ek 5(b) $t=1240$ sn



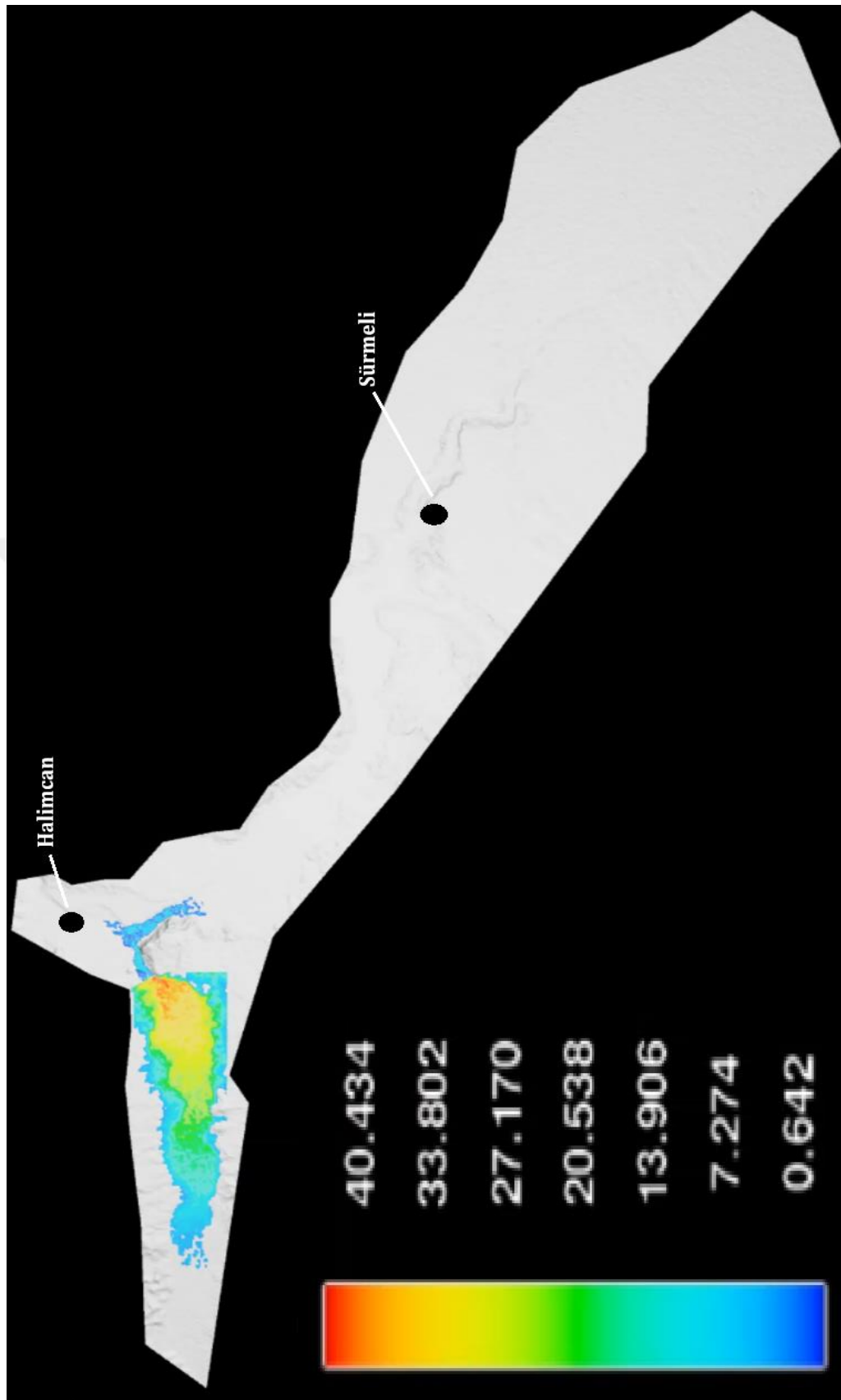
Ek 5(c) $t = 2500$ sn



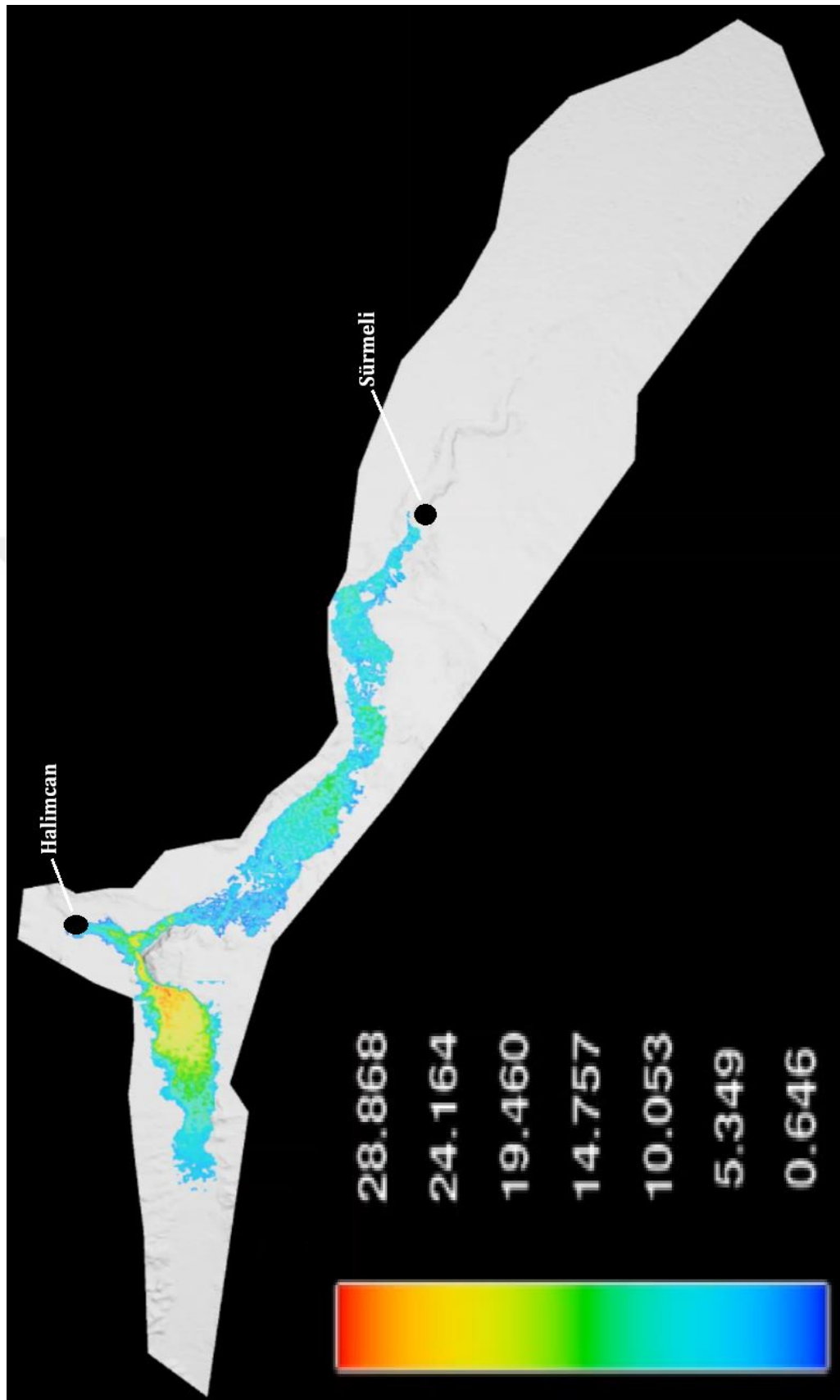
Ek 5(d) $t = 4700$ sn



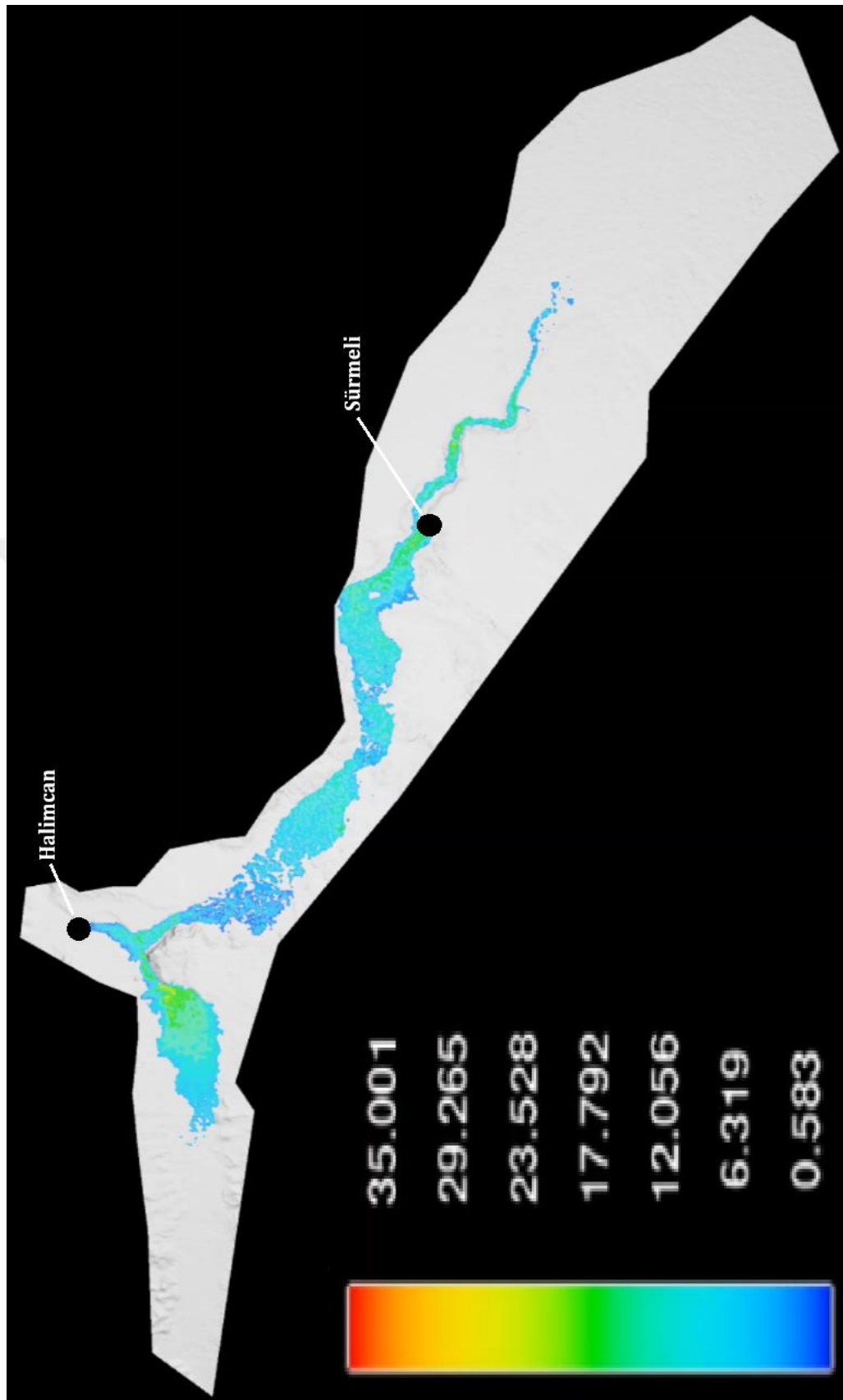
Ek 6(a) $t=0$ sn



Ek 6(b) $t = 1240$ sn



Ek 6(c) $t = 4700$ sn



Ek 6(d) $t= 6500$ sn

ÖZGEÇMİŞ

Çağrı AKGÜN, 2010 yılında Iğdır M.E.V. Anadolu Lisesi'nden, 2015 yılında Gümüşhane Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünden mezun olmuştur. 2018 yılında Gümüşhane Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisansını tamamlamıştır.

2018 yılında Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında doktora programına başlamıştır. İyi derecede İngilizce bilmektedir. Evlidir.

Bu doktora tezi, Gümüşhane Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'nde 21.F5110.02.01 proje kodlu GÜBAP2902 Hızlı 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.