

**İNSANSIZ HAVA ARACI, FOTOGRAMETRİ VE
COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİ UYGULAMALARI
KULLANILARAK ÇAY BARAJI'NIN 2-D BARAJ
YIKILMA ANALİZLERİNİN YAPILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Soner CELEP

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Murat KİLİT

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Haziran 2026

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**İNSANSIZ HAVA ARACI, FOTOGRAMETRİ VE COĞRAFİ BİLGİ
SİSTEMLERİ UYGULAMALARI KULLANILARAK ÇAY
BARAJI'NIN 2-D BARAJ YIKILMA ANALİZLERİNİN
YAPILMASI**

Soner CELEP

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Murat KİLİT

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Haziran 2026

TEZ ONAY SAYFASI

Soner CELEP tarafından hazırlanan “İnsansız Hava Aracı, Fotogrametri Ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Uygulamaları Kullanılarak Çay Barajı’nın 2-D Baraj Yıkılma Analizlerinin Yapılması” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca ... / ... / tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Murat KİLİT

Başkan : Dr. Öğr. Üyesi Murat KİLİT İmza
Afyon Kocatepe Üniv., Müh. Fakültesi

Üye : Prof. Dr. İsmail ZORLUER İmza
Afyon Kocatepe Üniv., Müh. Fakültesi

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Tülay Suğra İmza
KÜÇÜKERDEM ÖZTÜRK
Süleyman Demirel Üniv., Müh. Fakültesi

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
..... /..... /..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....

Enstitü Müdürü
Prof. Dr. Bekir YALÇIN

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

30 / 06 / 2026

Soner CELEP

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

İNSANSIZ HAVA ARACI, FOTOGRAMETRİ VE COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİ UYGULAMALARI KULLANILARAK ÇAY BARAJI'NIN 2-D BARAJ YIKILMA ANALİZLERİNİN YAPILMASI

Soner CELEP

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Hidrolik Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Murat KİLİT

Bu çalışmada, Afyonkarahisar ili Çay ilçesinde bulunan Çay Barajı'nın olası yıkılması sonucunda mansap bölgesinde meydana gelebilecek hidrolik tehlikeler ile sosyoekonomik etkiler araştırılmıştır. Modelleme sürecinde, Harita Genel Müdürlüğünden temin edilen Sayısal Yükseklik Modeli verileri ile insansız hava aracı kullanılarak fotogrametrik yöntemlerle üretilen yüksek çözünürlüklü sayısal yükseklik verileri bütünleştirilerek hibrit bir arazi modeli oluşturulmuştur. CORINE arazi örtüsü verileri kullanılarak farklı arazi kullanım sınıflarına uygun Manning pürüzlülük katsayıları belirlenmiş ve iki boyutlu kararsız akım analizleri HEC-RAS 6.2 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Baraj yıkılma gedğine ilişkin parametreler; MacDonald ve Langridge-Monopolis, Froehlich (1995), Froehlich (2008), Von Thun ve Gillette ile Xu ve Zhang tarafından geliştirilen beş farklı ampirik yaklaşım kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen taşkın hidrografları, pik debi değerlerinin ve pik debiye ulaşma sürelerinin kullanılan gedik tahmin yöntemine bağlı olarak önemli ölçüde değiştiğini göstermiştir. En yüksek taşkın etkisini veren Froehlich (2008) yaklaşımında pik debi yaklaşık 5 600 m³/s olarak hesaplanmış ve bu değere gedik oluşumunun başlamasından yaklaşık 20 dakika sonra ulaşılmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre taşkın dalgasının ilk 30 dakika içerisinde Çay ilçe merkezindeki yoğun yerleşim alanlarına ulaştığı ve daha sonra Eber Gölü havzasına doğru ilerlediği belirlenmiştir. Coğrafi bilgi sistemleri ortamında gerçekleştirilen konumsal analizler, yaklaşık 16 000 kişinin taşkından doğrudan veya dolaylı olarak etkilenebileceğini ortaya koymuştur.

Özellikle Tekke ve Cedit mahalleleri, kısa taşkın ulaşma süreleri ve yüksek su derinlikleri nedeniyle en kritik bölgeler arasında belirlenmiştir. Çalışma sonuçları, yüksek çözünürlüklü İHA tabanlı topoğrafik verilerin farklı gedik senaryolarıyla birlikte kullanılmasının iki boyutlu baraj yıkılma analizlerinin güvenilirliğini artırdığını göstermektedir. Elde edilen taşkın yayılımı ve ulaşma süresi haritaları; acil durum eylem planlarının güncellenmesi, erken uyarı sistemlerinin geliştirilmesi, tahliye güzergâhlarının belirlenmesi ve mansap bölgesindeki risklerin azaltılması için bilimsel bir altlık sunmaktadır.

2026, xiii + 98 sayfa

Anahtar Kelimeler: Çay Barajı, Baraj Yıkılması, HEC-RAS, Taşkın Analizi, Risk Değerlendirmesi.

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

2-D DAM BREACH ANALYSIS OF ÇAY DAM USING UNMANNED AERIAL VEHICLE , PHOTOGRAMMETRY, AND GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS APPLICATIONS

Soner CELEP

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Asst.Prof Murat KİLİT

This study investigates the potential hydraulic hazards and socioeconomic impacts that could occur in the downstream region as a result of the possible failure of the Çay Dam, located in the Çay District of Afyonkarahisar Province. During the modeling process, a hybrid terrain model was created by integrating Digital Elevation Model (DEM) data obtained from the General Directorate of Mapping with high-resolution digital elevation data generated using photogrammetric methods via unmanned aerial vehicles (UAVs). Manning roughness coefficients appropriate for different land-use classes were determined using CORINE land cover data, and two-dimensional unsteady flow analyses were performed using HEC-RAS 6.2 software. Parameters related to the dam failure breach were calculated using five different empirical approaches developed by MacDonald and Langridge-Monopolis, Froehlich (1995), Froehlich (2008), Von Thun and Gillette, and Xu and Zhang. The resulting flood hydrographs showed that peak discharge values and the time to reach peak discharge varied significantly depending on the breach prediction method used. In the Froehlich (2008) approach, which produced the highest flood impact, the peak discharge was calculated to be approximately 5 600 m³/s, and this value was reached approximately 20 minutes after the onset of the breach. According to the simulation results, the flood wave reached the densely populated areas in the Çay district center within the first 30 minutes and subsequently moved toward the Eber Lake basin. Spatial analyses conducted in a geographic information system (GIS) environment revealed that approximately 16 000 people could be directly or indirectly

affected by the flood. In particular, the Tekke and Cedit neighborhoods were identified as among the most critical areas due to short flood arrival times and high water depths. The study results show that the use of high-resolution UAV-based topographic data in conjunction with different breach scenarios enhances the reliability of two-dimensional dam failure analyses. The resulting flood spread and arrival time maps provide a scientific basis for updating emergency action plans, developing early warning systems, determining evacuation routes, and mitigating risks in the downstream area.

2026, xiii + 98 pages

Keywords: Çay Dam, Dam Breach, HEC-RAS, Flood Analysis, Risk Assessment.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının konu seçiminden başlayarak, araştırmanın yürütülmesi, analiz sonuçlarının değerlendirilmesi ve tezin yazım aşamasına kadar her adımda bilgi, birikim ve kıymetli vaktini esirgemeyerek beni yönlendiren, akademik desteğiyle ufkumu açan değerli danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Murat Kilit'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışma süresince öneri, yapıcı eleştiri ve destekleriyle sürece katkı sağlayan tüm hocalarıma teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, araştırmanın temel yapı taşlarını oluşturan verilerin teminindeki katkılarından dolayı Harita Genel Müdürlüğü'ne ve Devlet Su İşleri (DSİ)'ne şükranlarımı sunarım.

Eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini her daim yanımda hissettiğim kıymetli aileme teşekkür ederim. Son olarak, bu zorlu çalışma sürecinde gösterdikleri sabır ve anlayışla en büyük motivasyon kaynağım olan canım eşime; varlıklarıyla hayatıma anlam katan, geleceğe dair umudum biricik oğullarım Ömer Alp ve Kaan Ahlas'a bu çalışmayı armağan ediyorum.

Soner CELEP

Afyonkarahisar 2026

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Barajların Fonksiyonel Katkıları ve Çevresel Etkileri	1
1.2 Baraj Güvenliği ve Mansap Bölgesi Risk Yönetimi	2
1.3 Çalışmanın Amacı	3
1.3.1 Çalışma Alanının Hidro-Meteorolojik Karakteristiği ve Barajın Teknik Verileri	3
1.3.2. Metodoloji: Sayısal Modelleme ve Risk Analizi	3
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	4
2.1 Küresel Ölçekte Yaşanmış Kritik Baraj Yıkılma Hadiseleri	4
2.1.1 Türkiye’de Meydana Gelen Taşkın Hadiseleri ve Bölgesel Riskler	5
2.2 Afyonkarahisar ve Çay Barajı Özelinde Risk Değerlendirmesi	5
2.3 Literatürde Baraj Yıkılma Senaryoları ve Modelleme Çalışmaları	6
2.3.1 Ulusal Literatürdeki Örnek Çalışmalar	6
2.4 Çalışma Alanı ve Risk Altındaki Yerleşim Birimleri	9
2.5 Çay Barajı Sismik Risk ve Tektonik Konum Analizi.....	13
3. MATERYAL ve METOT	15
3.1 Baraj Yıkılma Mekanizmalarının Teorik Altyapısı	15
3.1.1 Üstten Aşma (Overtopping) ve Borulanma (Piping) Süreçlerinin Karşılaştırmalı Analizi.....	16
3.2 Gedik Parametrelerinin Kestirimi ve Ampirik Modelleme Yaklaşımları.....	18
3.2.1 Regresyon Analizine Dayalı Ampirik Denklemler ve Sensitivite Analizi... 19	
3.2.1.1 MacDonald ve Langridge–Monopolis (1984) Yaklaşım.....	19
3.2.1.2 Von Thun ve Gillette (1990) Yaklaşımı.....	20
3.2.1.3 Xu ve Zhang (2009) Yaklaşımı	21
3.2.1.4 Froehlich (1995 ve 2008) Denklemleri	22

3.3. Taşkın Yayılımının Hidrodinamik Formülasyonu.....	22
3.3.1 Navier – Stokes Denklemleri ve Sayısal Çözüm Yöntemleri	23
3.3.2 Saint – Venant Denklemleri ve Sayısal Çözüm Yöntemleri.....	23
3.3.3 Difüzyon Dalga Yaklaşımı.....	25
3.3.4 Manning Pürüzlülük Katsayısı (n) ve Arazi Örtüsü İlişkisi.....	26
3.4 Çay Barajı Teknik Karakteristikleri ve Yüksek Çözünürlüklü Veri Seti Modellemesi.....	27
3.4.1 Yapısal Karakteristikler ve Tasarım Parametreleri	27
3.4.2 Genel Vaziyet ve Gövde Geometrisi.....	28
3.4.3 Rezervuar Hidrodinamiği ve Hacim-Alan Analizi	31
3.4.4 Giriş Hidrografi ve Taşkın Öteleme Parametreleri	32
3.4.5 Dijital Altlık ve Topoğrafik Veri Entegrasyonu	34
3.4.6 Corine Arazi Örtüsü ve Manning Pürüzlülük Analizi.....	36
3.5 Sayısal Veri İşleme ve Coğrafi Bilgi Sistemleri	36
3.5.1 Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve Mühendislik Analizleri	36
3.5.2 Çalışma Kapsamında ArcMap Kullanımı ve Veri Entegrasyonu	37
3.5.3 Hidrolik Modelleme Yazılımı: HEC-RAS 6.2.....	39
3.5.3.1. HEC-RAS 6.2 ile Gerçekleştirilen İşlemler	39
3.5.4 Agisoft Metashape (PhotoScan) ile Fotogrametrik Veri İşleme	40
3.5.5 Virtual Surveyor ile Sayısal Arazi Analizi ve Veri Ayıklama.....	41
4. BULGULAR	43
4.1 Uygulama Süreci ve Sayısal Modelin Kurulması.....	43
4.1.1 Projeksiyon Verisi ve Referans Sistemine Tanımlama.....	43
4.1.2 Arazi Örtüsü ve Pürüzlülük Verilerinin İşlenmesi.....	44
4.1.2.1 Corine Veri Temini ve Mekânsal Sınırlandırma	44
4.1.2.2 Vektörel Dönüşüm ve Sayısallaştırma	46
4.1.3 İHA Destekli Hibrit Sayısal Arazi Modelinin (Terrain) Oluşturulması.....	47
4.1.3.1 HGM Verilerinin Ön İşlemesi ve Optimizasyonu.....	48
4.1.3.2 İHA Veri Entegrasyonu ve Hibrit Model (Merging).....	49
4.2 HEC-RAS ile Modelleme	50
4.2.1 RAS Mapper: Veri Entegrasyonu ve Arazi Hazırlığı	50
4.2.2 Geometrik Verilerin Oluşturulması ve Sınır Şartları	54
4.2.3 Baraj Gedik (Breach) Parametrelerinin Tanımlanması.....	55
4.2.3.1 Ampirik Yaklaşımlar ve Parametre Girişi.....	55

4.2.3.2 Hesaplanan Gedik Karakteristikleri	56
4.2.4 Taşkın Hidrograflarının Elde Edilmesi ve Sınır Şartlarının Tanımlanması	62
4.2.5 Unsteady Flow Data: Kararsız Akış Verilerinin Girilmesi	63
4.2.6 Unsteady Flow Analysis: Zamana Bağlı Akış Analizi Ayarları	64
4.2.6.1 Zaman Adımı: Computation Interval Seçimi	65
4.2.6.2 Simülasyon Kontrol ve Çıktı Ayarları.....	65
4.3 Analiz Bulguları ve Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	65
4.3.1 Pik Debi ve Zaman Karşılaştırması.....	65
4.3.2 Mansap Bölgesi Risk Yorumlaması.....	66
4.4. Taşkın Etki Analizi	83
5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	86
5.1. Metodolojik Bulguların Tartışılması	86
5.2. Taşkın Yayılımı ve Mansap Riskinin Değerlendirilmesi	87
5.3. Sonuç ve Öneriler	89
5.3.1 Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler.....	90
5.3.1.1 Deprem etkisiyle oluşabilecek yıkılma mekanizmasının modellenmesi	91
5.3.1.2 Farklı rezervuar seviyelerinin incelenmesi.....	91
5.3.1.3 Model çözünürlüğü ve sayısal yöntemlerin karşılaştırılması	91
5.3.1.4 Manning pürüzlülük katsayısının duyarlılık analizi	91
5.3.1.5 Modelin saha verileriyle doğrulanması	92
5.3.1.6 Can kaybı ve ekonomik zarar analizleri	92
5.3.1.7 Mahalle bazlı tahliye modeli geliştirilmesi	92
5.3.1.8 Gerçek zamanlı erken uyarı sistemi	92
6. KAYNAKLAR.....	93
İnternet Kaynakları	97
ÖZGEÇMİŞ.....	98

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

%	Yüzde
1D	Bir Boyutlu
2D	İki Boyutlu
3D	Üç Boyutlu
B _{ave}	Genişlik
B _{top}	Gedik Üst Genişlik
C _b	Gedik Katsayı
ha	Hektar
h _b	Gedik Yükseklik
h _d	Gövde Yükseklik
h _r	Referans Yükseklik
h _w	Efektif Yükseklik
j	Eğim
K ₀	Yıkılma Katsayısı
K _c	Taşınasal İvme
K _f	Sürtünme Katsayısı
K _p	Basınç Gradyanı
km	Kilometre
k _t	Yerel İvme
m	Metre
m ²	Metrekare
m ³	Metreküp
Max	Maksimum
mm	Milimetre
n	Pürüzlülük Kat Sayısı
p	Statik Basınç
R	Hidrolik Yarıçap
S ₀	Taban Eğimi
S _f	Sürtünme Eğimi
sn	Saniye
t _f	Gedik Süresi
V	Akışkanın Hız Vektörü
V _{eroded}	Erozyon Hacim
V _{out}	Boşalan Hacim
V _w	Depo Hacim
Q	Debi

Kısaltmalar

CBS	Coğrafi Bilgi Sistemi
CFRD	Curve Number Flood Risk Determination
CORINE	Coordination of Information on the Environment
DEM	Digital Elevation Model
DSM	Digital Surface Model
DSİ	Devlet Su İşleri

Kısaltmalar (devamı)

EEA	European Environment Agency
GIS	Geographical Information System
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Center - River Analysis System
HES	Hidroelektrik Santrali
HGM	Harita Genel Müdürlüğü
İHA	İnsansız Hava Aracı
MGM	Meteoroloji Genel Müdürlüğü
MTA	Maden Tetkik ve Arama
SMS	Sayısal Yükseklik Modeli
SYM	Surface Water Modeling System
TIN	Triangulated Irregular Network
USACE	United States Army Corps of Engineers

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Çalışma alanına ait lokasyon haritası ve havza 3B modeli	11
Şekil 2.2 Çay Barajı ve Yakın Çevresinin Tektonik ve Sismik Haritası	13
Şekil 3.1 Baraj gövdesi üzerinden aşan suların (overtopping) neden olduğu gedik (breach) oluşum safhaları ve erozyon ilerleme mekanizması.....	17
Şekil 3.2 Baraj gövdesi veya temelinde gelişen içsel erozyon borulanma süreci ve hidrolik boru hattının genişlemesiyle oluşan yapısal göçme mekanizması	18
Şekil 3.3 Çay Barajı genel yerleşim planı	29
Şekil 3.4 Baraj Gövdesi maksimum enkesiti	30
Şekil 3.5 Çay Barajı Kot-Alan-Hacim Grafiği	31
Şekil 3.6 Katastrofal Taşkın Hidrografi.....	33
Şekil 3.7 Baraj Uydu Görüntüsü (Map Data © 2025 Google, Image©CNES/Airbus). ...	34
Şekil 3.8 Sayısal Yükseklik Modeli.....	35
Şekil 3.9 CORINE arazi pürüzlülük haritası	36
Şekil 3.10 ArcMap İş Akış Diyagramı	38
Şekil 4.1 Türkiye Pafta Bölümlemesi.....	44
Şekil 4.2 Raster to Polygon ekran görüntüsü.....	45
Şekil 4.3 ArcMap pürüzlülük haritası ekran görüntüsü.....	46
Şekil 4.4 Fotogrametri yer kontrol noktaları tesisi ve İHA ile SYM üretim aşaması	47
Şekil 4.5 İHA veri seti Çay Barajı Sayısal yükseklik modeli.....	48
Şekil 4.6 uygulamaya hazır DEM verisi ekran görüntüsü	49
Şekil 4.7 HEC-RAS 6.2 Açılış ekran görüntüsü.....	50
Şekil 4.8 Ras Mapper ekran görüntüsü.....	51
Şekil 4.9 HEC-RAS programı dem verisi ekran görüntüsü.....	52
Şekil 4.10 HEC-RAS programı arazi pürüzlülük haritası	53
Şekil 4.11 Manning değerleri tablosu.....	53
Şekil 4.12 taşkın sınırı ve baraj rezervuarının çizimlerinin görüntüsü.....	55
Şekil 4.13 MacDonald et al yöntemiyle elde edilen ve modele entegre edilen baraj gedik parametreleri.....	57
Şekil 4.14 MacDonald et al oluşan gedik hali	57
Şekil 4.15 Froehlich 1995 yöntemiyle elde edilen ve modele entegre edilen baraj gedik parametreleri.....	58
Şekil 4.16 Froehlich 1995 oluşan gedik hali	58

Şekil 4.17 Froehlich 2008 yöntemiyle elde edilen ve modele entegre edilen baraj gedik parametreleri.....	59
Şekil 4.18 Froehlich 2008 yöntemiyle oluşan gedik hali	59
Şekil 4.19 Von Thun & Gillette yöntemiyle elde edilen ve modele entegre edilen baraj gedik parametreleri.....	60
Şekil 4.20 Von Thun & Gillette yöntemiyle oluşan gedik hali	60
Şekil 4.21 Xu & Zhang yöntemiyle elde edilen ve modele entegre edilen baraj gedik parametreleri.....	61
Şekil 4.22 Xu & Zhang oluşan gedik hali.....	61
Şekil 4.23 Beş farklı denklem setine göre hesaplanan taşkın hidrograflarının karşılaştırılması.	63
Şekil 4.24 Unsteady Flow Analisis ekran görüntüsü.....	64
Şekil 4.25 MacDonald ve Langridge-Monopolis yaklaşımı ile elde edilen su derinlik haritası.	67
Şekil 4.26 Froehlich 1995'in yaklaşımı ile elde edilen	69
Şekil 4.27 Froehlich 2008'in yaklaşımı ile elde edilen su derinlik haritası.....	70
Şekil 4.28 Von Thun ve Gillette'nin yaklaşımı ile elde edilen su derinlik haritası.....	71
Şekil 4.29 Xu ve Zhang'nin yaklaşımı ile elde edilen su derinlik haritası.	72
Şekil 4.30 MacDonald ve Langridge-Monopolis denklemleri ile modellenen maksimum akış hızları haritası.....	73
Şekil 4.31 Froehlich 1995'in denklemleri ile modellenen maksimum akış hızları haritası.	74
Şekil 4.32 Froehlich 2008'in denklemleri ile modellenen maksimum akış hızları haritası.	75
Şekil 4.33 Von Thun ve Gillette'e denklemleri ile modellenen maksimum akış hızları haritası.	76
Şekil 4.34 Xu ve Zhang'in denklemleri ile modellenen maksimum akış hızları haritası.	77
Şekil 4.35 MacDonald ve Langridge-Monopolis senaryosu altında Çay ilçesi taşkın etki alanı ve yayılım sınırları.	78
Şekil 4.36 Froehlich (1995) senaryosu altında Çay ilçesi taşkın etki alanı ve yayılım sınırları.....	79
Şekil 4.37 Froehlich (2008) senaryosu altında Çay ilçesi taşkın etki alanı ve yayılım sınırları.	80
Şekil 4.38 Von Thun ve Gillette senaryosu altında Çay ilçesi taşkın etki alanı ve yayılım sınırları.....	81
Şekil 4.39 Xu ve Zhang'in senaryosu altında Çay ilçesi taşkın etki alanı ve yayılım sınırları.....	82

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Küresel Ölçekte En Yüksek Can Kaybına Yol Açan Baraj Yıkılma	4
Çizelge 2.2 Taşkın Sahası Meskun Mahalleri Nüfus Verisi.	10
Çizelge 2.3 Çalışma alanı arazi kullanım dağılımı.....	12
Çizelge 3.1: Baraj Gövde Tiplerine Göre Kritik Arıza Modları	16
Çizelge 3.2: Çay Barajı Teknik Karakteristik Veri Seti.....	28
Çizelge 4.1: Uygulanan yöntem sonuçları.	67
Çizelge 4.2 Çeşitli hesaplama yöntemlerine göre bulgular	84
Çizelge 4.3 Taşkın karakteristikleri.....	84
Çizelge 4.4 Taşkın karakteristikleri.....	85

1. GİRİŞ

Su kaynaklarının verimli yönetimi ve enerji üretimi amacıyla akarsu vadilerinin fiziksel yapılarla kapatılması sonucu oluşturulan rezervuar sistemleri, modern mühendisliğin en temel taşlarından biridir. Etimolojik kökeni Fransızca "engel" kelimesine dayanan baraj kavramı, literatürde sadece su depolama işleviyle değil, aynı zamanda su kotunu yükseltme ve geniş bir su yüzeyi tesis etme fonksiyonlarıyla da tanımlanmaktadır (Ağırlioğlu 2007).

Baraj yapılarının boyutlandırılması ve mühendislik karakteristikleri incelenirken yükseklik kavramı iki farklı referans noktasına göre değerlendirilmektedir. Bu bağlamda, akarsu tabanının en derin noktası olan talvegden kret seviyesine kadar olan dikey mesafe "talvegten yükseklik" olarak adlandırılırken; yapının oturduğu en alt temel seviyesinden kret noktasına kadar olan mesafe ise "temelden yükseklik" veya "yapı yüksekliği" olarak ifade edilmektedir (Ağırlioğlu 2007).

Su yapılarının ölçeksel sınıflandırmasında ise belirli hacimsel ve geometrik eşik değerleri esas alınmaktadır. Devlet Su İşleri (1978) tarafından belirlenen standartlara göre; temelden yüksekliği 15 metreyi aşan, gövde hacmi $5 \times 10^5 \text{ m}^3$ 'den büyük ve göl hacmi $5 \times 10^6 \text{ m}^3$ değerinin üzerinde olan yapılar "Baraj" kategorisinde yer almaktadır. Bu teknik kriterlerin altında kalan su yapıları ise "Gölet" olarak nitelendirilir. Yapısal bütünlük açısından değerlendirildiğinde bir baraj veya gölet tesisi; temel ve gövde ana kütlelerinin yanı sıra dolu savak, dip savak, derivasyon yapıları ile inşaat sürecinin güvenliğini sağlayan memba ve mansap batardoları gibi kritik bileşenlerin entegrasyonundan meydana gelmektedir (DSİ 1978).

1.1 Barajların Fonksiyonel Katkıları ve Çevresel Etkileri

Baraj yapıları, bölge ekonomisine ve sosyal kalkınmaya sunduğu doğrudan ve dolaylı katkılar bakımından stratejik öneme sahiptir. Bu yapıların doğrudan faydaları; tarımsal alanların sistematik sulanması, hidroelektrik enerji üretimi, evsel ve endüstriyel kullanım için sürekli su temini ile yerleşim birimlerinin taşkın riskinden korunması şeklinde özetlenebilir. Bu temel işlevlerin yanı sıra; iklimsel dengenin sağlanması, su

taşımacılığına imkan tanınması, akuakültür ve balıkçılık faaliyetlerinin gelişimi, yeni rekreasyon alanlarının oluşturulması ve bölgesel istihdamın artırılması gibi dolaylı sosyal ve çevresel katkılar da mevcuttur (İnt. Kyn. 8).

Baraj inşa süreçlerinin beraberinde getirdiği çevresel ve teknik zorluklar titizlikle analiz edilmelidir. Doğal dengenin modifikasyonu, tarım arazilerinin ve tarihi değerlerin rezervuar altında kalması, nüfus transferi ihtiyacı ve altyapı tesislerinin yeniden inşası gibi unsurlar projelendirme aşamasının en kritik maliyet kalemlerini oluşturmaktadır. Ayrıca, geniş su yüzeylerinde artan buharlaşma kaybı, su yükünün etkisiyle tetiklenebilen jeolojik hareketlilikler ve yeraltı su seviyesindeki değişimlerin neden olabileceği olumsuzluklar planlama sürecinde göz önünde bulundurulması gereken teknik değişkenlerdir (İnt. Kyn. 8).

1.2 Baraj Güvenliği ve Mansap Bölgesi Risk Yönetimi

Barajlar, rezervuarlarında depoladıkları devasa boyuttaki su kütleleri nedeniyle potansiyel bir risk unsuru barındırmaktadır. Her ne kadar yüksek mühendislik standartlarına göre inşa edilen güvenli yapılar olsalar da, çeşitli çevresel veya yapısal faktörler neticesinde meydana gelebilecek olası bir tahribat, depolanan suyun mansap bölgesine kontrolsüz ve yüksek hızla deşarj edilmesine yol açabilir. Bu durum, mansap bölgesindeki yerleşim birimlerinde büyük ölçekli can ve mal kayıplarına neden olma potansiyeline sahiptir.

Literatürde baraj yıkılmalarının en yaygın nedenleri arasında; ekstrem yağış olayları, iklim değişikliğinin hidrolojik etkileri, yetersiz tasarım kriterleri ve operasyonel bakım eksiklikleri gösterilmektedir. Olası bir yıkılma durumunda oluşacak taşkın dalgasının etkilerinin önceden bilimsel yöntemlerle tahmin edilmesi, hem yapısal zarar görebilirliğinin azaltılması hem de erken uyarı sistemlerinin geliştirilmesi açısından elzemdir. (DSİ 2018).

1.3 Çalışmanın Amacı

Bu çalışma, Türkiye'nin stratejik ulaşım ağlarının kesişim noktasında yer alan Afyonkarahisar ili Çay ilçe merkezinde kritik önem taşıyan Çay Barajı'nın olası bir yıkılma senaryosunu sayısal modeller üzerinden analiz etmeyi amaçlamaktadır. Barajın ilçe merkezine kuş uçuşu yaklaşık 2 km mesafede bulunması ve bu güzergâh üzerinde çok sayıda yerleşim biriminin yer alması, olası bir felaketin sosyo-ekonomik etkilerinin önceden kestirilmesini zorunlu kılmaktadır.

1.3.1 Çalışma Alanının Hidro-Meteorolojik Karakteristiği ve Barajın Teknik Verileri

Afyonkarahisar ili Çay ilçesinin uzun dönem (2002-2024) meteorolojik verileri incelendiğinde, yıllık ortalama günlük yağış miktarının 38,1 mm olduğu, ancak ekstrem durumlarda bu değerin 81,8 mm'ye mevsim normallerinin yaklaşık iki katına ulaştığı görülmektedir (MGM, 2024). Baraj yapıları, 10.000 yıllık tekerrür periyoduna sahip taşkın debilerini güvenle tahliye edecek statik ve hidrolik kapasitede inşa edilseler de (DSİ, 2018), değişen iklim koşulları ve ekstrem yağış olasılıkları risk analizlerinin güncel tutulmasını gerektirmektedir. Analize konu olan Çay Barajı; temelden 105,5 metre gövde yüksekliği, 329 metrelik kret uzunluğu ve maksimum su seviyesinde $16,46 \times 10^6 \text{ m}^3$ depolama hacmi ile bölge için büyük bir su yükü potansiyeli taşımaktadır.

1.3.2. Metodoloji: Sayısal Modelleme ve Risk Analizi

Araştırma kapsamında, kompleks hidrodinamik denklemleri çözme kapasitesine sahip olan ve ABD Ordu Mühendisler Birliği tarafından geliştirilen HEC-RAS yazılımı kullanılmıştır. Modelleme sürecinde drone ile (3D) sayısal yükseklik modelleri (DEM) verileri elde edilmiş ve hassasiyet maksimum düzeye çıkarılmış İki Boyutlu (2D) analiz ile hassas sayısal yükseklik modelleri (DEM), pürüzlülük haritaları ve projeksiyon verileri entegre edilerek taşkın dalgasının ilerleyişi simüle edilmiştir. Ayrıca Taşkın yayılım haritaları ile analiz neticesinde elde edilen yayılım alanları, CORINE (Arazi Örtüsü Sınıflandırması) verileriyle karşılaştırılmış sosyal etki analizi yapılmak istenmiştir.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Küresel Ölçekte Yaşanmış Kritik Baraj Yıkılma Hadiseleri

Baraj yapıları, modern mühendislik standartları çerçevesinde yüksek güvenlik katsayıları ile inşa edilseler de, tarihsel süreçte meydana gelen yıkılma olayları bu yapıların taşıdığı risk potansiyelini açıkça ortaya koymaktadır. Baraj güvenliği disiplininin gelişiminde ders niteliği taşıyan bu hadiseler; genellikle ekstrem meteorolojik olaylar, tasarımsal zayıflıklar, jeolojik faktörler veya operasyonel hatalar neticesinde gerçekleşmiştir.

Tarihteki baraj felaketleri incelendiğinde, can ve mal kaybının boyutunun sadece yapının büyüklüğüne değil, aynı zamanda mansap bölgesindeki yerleşim yoğunluğuna ve erken uyarı sistemlerinin kapasitesine bağlı olduğu görülmektedir. Çizelge 2.1 deki, dünya genelinde can kaybı oranının en yüksek olduğu ilk 20 baraj yıkılma olayı ve temel yıkılma nedenleri sunulmuştur.

Çizelge 2.1 Küresel Ölçekte En Yüksek Can Kaybına Yol Açan Baraj Yıkılma Hadiseleri (İnt.Kyn. 1’den güncellenmiştir).

Sıra	Baraj Adı	Yıl	Ülke	Ölü sayısı	Yıkılma Nedeni
1	Banqiao/Shimantan	1975	Çin	90 000-230 000	Katastrofik yağışlar
2	Derna	2023	Libya	11 300	Katastrofik yağışlar
3	Machchu-2	1979	Hindistan	5 000	Katastrofik yağışlar
4	South Fork	1889	ABD	2 208	Katastrofik yağışlar
5	Vajont	1963	İtalya	2 000	Üstten su aşması
6	Möhne	1943	Almanya	1 579	Sabotaj
7	Tigra	1917	Hindistan	1 000	Temele su sızması
8	Panşet	1961	Hindistan	1 000	Gövde yıkılması
9	Iruka Gölü	1868	Japonya	941	Katastrofik yağışlar
10	Puentes	1802	İspanya	608	Uygunsuz zemin
11	St. Francis	1928	ABD	600	Heyelan
12	Malpasset	1959	Fransa	423	İnşaat sırasında
13	Gleno	1923	İtalya	356	Hatalı imalat - tasarım
14	El Cobre	1965	Şili	400	Deprem
15	Brumadinho	2019	Brezilya	270	Aşırı atık yüklemesi
16	Val di Stava	1985	İtalya	268	Bakım-tasarım hatası
17	Koshi	2008	Nepal	250	Katastrofik yağışlar
18	Dale Dike	1864	İngiltere	244	Hatalı inşaat
19	Kanyon Gölü	1972	ABD	238	Katastrofik yağışlar
20	Vega de Tera	1959	İspanya	144	Gövde yıkılması

2.1.1 Türkiye’de Meydana Gelen Taşkın Hadiseleri ve Bölgesel Riskler

Türkiye, topoğrafik yapısı ve iklimsel çeşitliliği nedeniyle tarih boyunca ciddi taşkın felaketleriyle karşı karşıya kalmıştır. Ülkemizde barajların tamamen yıkılması olayına çok sık rastlanmasa da, ekstrem yağışlar sonucu barajların emniyetli tahliye kapasitelerinin (dulusavak) zorlanması veya kontrolsüz deşarjlar, mansap bölgesinde ciddi yıkımlara yol açmıştır. Özellikle Karadeniz Bölgesi’nde yaşanan taşkınlar, su yapılarının ve yerleşim planlamasının önemini acı bir şekilde göstermiştir.

2021 Kastamonu-Bozkurt Felaketi Ezine Çayı üzerindeki hidroelektrik santrali (HES) ve regülatör yapılarının ekstrem yağış karşısındaki durumu, mansaptaki yerleşim birimlerinin ne kadar savunmasız kalabileceğini kanıtlamıştır.

Giresun ve Sinop Taşkınları kısa sürede düşen ve mevsim normallerinin çok üzerindeki yağışlar, dere yatağı üzerindeki sanat yapılarının yetersiz kalmasına ve baraj işletme kriterlerinin hayati önemine dikkat çekmiştir.

2.2 Afyonkarahisar ve Çay Barajı Özelinde Risk Değerlendirmesi

Küresel iklim değişikliğinin bir sonucu olarak, Afyonkarahisar gibi karasal iklimin hakim olduğu bölgelerde "anlık ve yoğun" yağış karakteristiği artış göstermektedir. Meteoroloji Genel Müdürlüğü (2024) verilerine göre bölgede kaydedilen 1 günde 81,8 mm’lik ekstrem yağış değeri, havzadaki barajların operasyonel güvenliğinin statik bir veri değil, dinamik bir süreç olduğunu göstermektedir. Çay Barajı’nın Çay ilçe merkezine olan 2 kilometrelik mesafesi ve bu hat üzerindeki yerleşim yoğunluğu, olası bir yapısal hasar durumunda taşkın dalgasının ilçeye ulaşma süresini ve etkisini kritik bir parametre haline getirmektedir. Türkiye’deki tecrübeler; sadece barajın sağlam olmasının yeterli olmadığını, aynı zamanda Baraj Yıkılma Analizleri ve Taşkın Yayılım Haritaları aracılığıyla mansap bölgesindeki risk altındaki nüfusun CORINE verileriyle desteklenerek önceden belirlenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır (DSİ 2018). Taşkın Yayılım Haritalarının üretilmesi acil afet planını destekleyecektir.

2.3 Literatürde Baraj Yıkılma Senaryoları ve Modelleme Çalışmaları

Türkiye’de günümüze kadar tam ölçekli bir baraj yıkılma hadisesi yaşanmamış olsa da, mühendislik emniyeti ve afet yönetimi kapsamında birçok stratejik baraj Atatürk, Porsuk, Yuvacık, Kartalkaya vb. için olası yıkılma senaryoları üzerine akademik çalışmalar yürütülmektedir. Bu çalışmalar, yıkılma mekanizmalarının sayısal modellerle HEC-RAS, FLO-2D, Flow 3D vb. simüle edilmesi ve mansap bölgesindeki sosyo-ekonomik risklerin belirlenmesi odağında toplanmaktadır.

2.3.1 Ulusal Literatürdeki Örnek Çalışmalar

Bharath (2021), Hindistan Hidkal Barajı Analizi Bu çalışma, HEC-RAS yazılımının 1 Boyutlu (1D) tam dinamik dalga yöntemini kullanması bakımından önemlidir. Yazarın Froehlich (2008) denklemlerine dayanarak gedik parametrelerini belirlemesi, literatürdeki standart ampirik yaklaşımların güvenilirliğini vurgulamaktadır. Çalışmanın en güçlü yönü, hem borulanma iç erozyon hem de üstten aşma senaryolarını ayrı ayrı incelemiş olmasıdır. 22 km’lik bir hat üzerinde 20 köyün etkilenme durumunu sayısal olarak ortaya koymuştur.

Gündüzalp (2020), bu çalışmaya en yakın örneklerden biridir; çünkü 2 Boyutlu (2D) analiz yöntemini seçmiş ve CBS (Coğrafi Bilgi Sistemleri) verilerinden yoğun şekilde faydalanmıştır. Düzce Ovası gibi geniş bir alanda 110 km²’lik bir yayılım tespit etmesi, 2D modellemenin düz alanlardaki hassasiyetini göstermektedir. Ayrıca 85 bin kişinin doğrudan etkileneceği bulgusu, çalışmanın sosyal boyutunu (nüfus analizi) ön plana çıkartmıştır.

Kocaman (2019), Kartalkaya Barajı için HEC-RAS ve FLO-2D gibi iki farklı profesyonel yazılımın sonuçlarını karşılaştıran karşılaştırmalı bir analiz sunmaktadır. Çalışmanın sunduğu en önemli çıktı; HEC-RAS’ın ovalık alanlarda daha hızlı çözüm üretmesi ve dar vadilerde hız parametrelerinin yazılımdan yazılıma değişebileceğidir. Ayrıca pürüzlülük Manning n katsayısının yayılım üzerindeki etkisini vurgulamıştır.

Kocaman (2002), Adanada bulunan Kozan Barajı üzerinde matematiksel çözümler sunan WS FLDWAV yazılımı ile ağırlıklı dört noktalı sonlu farklar ve Newton Raphson iterasyon teknikleri gibi daha ağır matematiksel altyapıya odaklanmıştır. Çalışma, baraj yıkılması analizlerinin sadece görsel bir haritalama değil, kütle ve momentumun korunumu gibi fiziksel temellere dayandığını hatırlatır. Pürüzlülük değerindeki küçük değişimlerin suyun öteleme hızını nasıl etkilediğine dair tespit yapmıştır.

Arkış (2020), İzmir ili Seferihisar ilçesinde buluna Ürkmez Barajı fiziksel modellemesini sayısal modellerin aksine, 1/150 ölçekli fiziksel bir laboratuvar modeli oluşturmuştur. Sayısal analiz sonuçlarını (Flow 3D), laboratuvarda ölçülen su derinlikleriyle doğrulaması literatürde çok değerli bir veridir.

Marangoz (2020), Trabzon ili merkez Atasu Barajında dinamik ve difüzyon dalga metotlarını süre bazlı kıyaslamıştır. Taşkın dalgasının şehre ulaşma süresindeki 15 dakikalık fark, modelleme yönteminin seçimi kadar hayati olduğunu göstermiştir.

Yıldız (2021), Bursa ilinde yapımı devam eden Yeşildere Barajı'nda yıkılma analizi yaparak acil eylem planı için öneriler de bulunmuştur. Bu çalışma, baraj analizlerinin sadece mevcut yapılar için değil, yapım aşamasında da planlanması gerektiğini vurgular. Taşkın suyunun Bursa Çanakkale arasındaki otoyola ulaşım süresi tespitini yapmıştır.

Froehlich (2008), 74 farklı dolgu barajın yıkılması üzerinden ampirik regresyon denklemleri geliştirmiştir. Literatürdeki en güvenilir gedik tahmini yöntemidir. Gediğin üçgen formdan başlayıp trapeze dönmesi teorisi, HEC-RAS modelimizde gedik verilerini girerken kullanacağımız temel teorik bilgiyi sağlar.

MacDonald ve Langridge-Monopolis (1984), Toprak dolgu barajlarda erozyon ve malzeme aşınma hacmi üzerine odaklanmışlardır. Gedik şev eğimlerinin (h:v) 1:1, 1:2, 1:3 gibi barajın yapışkanlık ve kohezyon özelliklerine göre nasıl seçilmesi gerektiğini rehber haline getirmişlerdir.

Von Thun ve Gillette (1990) ve Dewey ve Gillette (1993), Gedik şev eğimlerini ve orta yükseklikteki gedik genişliğini tahmin etmeye yönelik kapsamlı rehberler geliştirmişlerdir. Bu araştırmacılar, kendi modellerini oluştururken Froehlich (1987) ile MacDonald ve Langridge-Monopolis (1984) tarafından derlenen geniş veri setlerinden yararlanmışlardır. Söz konusu çalışmaların literatüre en önemli katkısı, gedik geometrisini barajın inşa edildiği malzemenin kohezyon (yapışkanlık) özelliğiyle ilişkilendirmeleridir. Yazarlar, gedik yan şevleri için genel olarak 1:1 (h:v) eğiminin varsayılabileceğini öne sürmüşlerdir. Ancak, barajın yapısal karakteristiğine bağlı olarak yapışkan kabuklu veya geniş yapışkan çekirdekli olmayan barajlarda 1:1 eğimi genel geçer kabul olarak sunulmuştur. Yüksek kohezyona sahip kil çekirdekli veya geniş yüzeyli kohezyonlu malzemeden inşa edilen barajlarda, erozyon direncinin daha yüksek olması nedeniyle şev eğimlerinin 1:2 veya 1:3 (h:v) olarak alınmasının simülasyon doğruluğu açısından daha uygun olacağını belirtmişlerdir.

Xu ve Zhang (2009), 182 baraj vakasını inceleyerek baraj yüksekliğine dayalı yeni formüller önermişlerdir. Yıkılmanın nedeninin insanın teknik hatası sensör arızası ve üstten aşma olduğunu belirtmesi, baraj güvenliğinin sadece statik hesap değil, işletme hatasına da açık olduğunu göstermişlerdir.

Mei, Zhong, Yang, Chen, Shan ve Zhang (2023), Modern literatürde baraj yıkılma olayları, sadece teorik yaklaşımlarla değil, yaşanmış vakaların sayısal modellerle yeniden kurgulanması yoluyla da incelenmektedir. Bu kapsamda Mei ve diğerleri (2023), 2005 yılında Çin’de yıkılan Taum Sauk Barajı felaketini fiziksel tabanlı sayısal bir modelleme ile analiz etmişlerdir. Söz konusu çalışma, baraj yıkılmalarında mekanik arızaların ve işletme hatalarının oynadığı kritik rolü ortaya koyması bakımından literatürde özgün bir yere sahiptir. Taum Sauk Barajı’nın yıkılma nedeni; rezervuara su taşıyan pompaların arızalanması ve sensör hataları nedeniyle su akışının kesilememesi sonucu meydana gelen üstten aşma olayıdır. Ön yüzü beton kaplı kaya dolgu tipindeki bu yapıda, suyun kret kotunu aşmasıyla gövde dolgusu hızla aşınmış, başlangıçta ayakta kalan beton parapet ise artan su yüküne dayanamayarak yapısal bütünlüğünü kaybetmiştir. Yazarlar, bu tez çalışmasında da izlenen metodolojiye benzer şekilde, ampirik denklemlerin doğruluğunu vaka verileriyle test etmişlerdir.

Çalışma kapsamında kullanılan temel parametrik hesaplamalar Pik Debi Analizi Kirkpatrick, Costa, USBR, Froehlich, Xu ve Zhang, Azimi ve ark. ile Rong ve ark. tarafından geliştirilen çoklu denklem setleri kullanılarak karşılaştırmalı analizler yapılmıştır. Gedik parametreleri ortalama gedik genişliği ve gediğin oluşum süresi hesaplamalarında USBR, Froehlich, Xu ve Zhang ile Rong ve ark. yöntemlerine başvurulmuştur. Araştırmanın sonuçları; şev dengesizliği, sediment taşınımı ve beton yüzey plakasının deformasyonu gibi kompleks değişkenlerin modele entegre edilmesi durumunda, sayısal modelden elde edilen gedik hidrografi verilerinin gerçek yıkılma anındaki ölçümlerle yüksek korelasyon gösterdiğini kanıtlamışlardır.

2.4 Çalışma Alanı ve Risk Altındaki Yerleşim Birimleri

Bu araştırmanın çalışma sahası, Afyonkarahisar ili Çay ilçe merkezi içerisinde yer alan Çay Barajı ve bu yapının mansap bölgesinde (aşağı akış yönünde) bulunan, olası bir taşkın dalgasından doğrudan etkilenme riski taşıyan güzergâhı kapsamaktadır. Çay Barajı, konumu itibarıyla sadece tarımsal ve içme suyu temini açısından değil, aynı zamanda çevresindeki yerleşim yoğunluğu nedeniyle yüksek risk profilli bir su yapısı niteliğindedir.

Barajın olası bir yıkılma senaryosunda, deşarj olacak su kütlesinin izleyeceği vadi boyunca çok sayıda insan, mahalle okul ve idari binalar yer almaktadır. Taşkın yayılım hızı ve su derinliği analizi yapılırken, bu yerleşim birimlerinin baraja olan mesafeleri ve topoğrafik konumları en kritik değişkenleri oluşturmaktadır. Mansap bölgesindeki topoğrafik eğim kırılmaları ve vadi morfolojisi, taşkın dalgasının ilerleme hızını ve hidrolik pik debinin sönümlenme derecesini doğrudan belirleyen ana etkenlerdir. Baraj aksından itibaren ani eğim azalmalarının yaşandığı ve vadinin genişleyerek kentsel dokuyla birleştiği kesimler, su derinliğinin ve taşkın yayılım alanının maksimum düzeye ulaşabileceği hassas bölgeler olarak öne çıkmaktadır. Dolayısıyla, potansiyel bir yıkılma dinamiğinde ortaya çıkacak hidrodinamik yüklerin ve hidrolik yayılımın hassas bir şekilde simüle edilmesi, risk altındaki bu kentsel alanlarda can ve mal kayıplarını asgari düzeye indirecek erken uyarı sistemlerinin planlanması ve acil eylem planlarının rasyonel bir zeminde hazırlanması açısından hayati bir önem arz etmektedir.

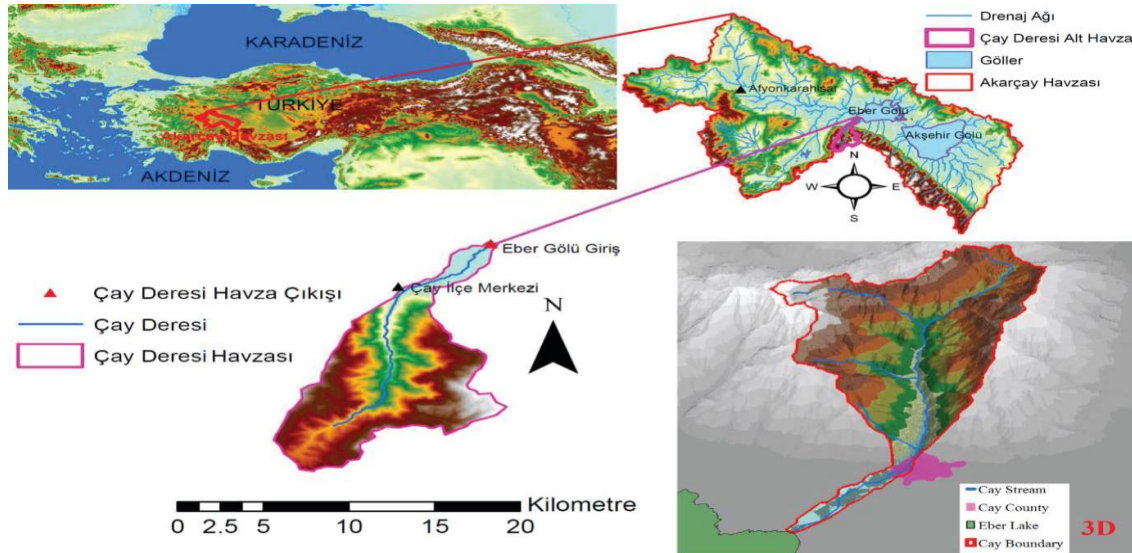
Çizelge 2.2 Taşkın Sahası Meskun Mahalleri Nüfus Verisi (<https://www.nufusune.com>)

Sıra	Yerleşim yeri	Güncel nüfusu
1	Şirinevler Mah.	2 910
2	Vakıf Mah.	2 194
3	Bahçelievler Mah.	2 040
4	Cedit Mah.	1 162
5	Köprübaşı Mah.	895
6	Orta Mah.	886
7	Aktaş Mah.	807
8	Aşağı Mah.	768
9	Yaka Mah.	609
10	Orta Mah.	608
11	Ali İhsan Paşa Mah.	531
12	Aşağı Mah.	460
13	Yeşilevler Mah.	458
14	Dumlupınar Mah.	423
15	Demirağaç Mah.	357
16	Ali Kaleli Mah.	263
17	Tekke Mah.	170
18	İstasyon Mah.	147
19	Yeşilyurt Köyü	147

Şehirler, tarihsel süreç içerisinde sürekli olarak yenilenen, dönüşen ve toplumsal ihtiyaçlara göre şekillenen dinamik organizmalar olarak tanımlanmaktadır. Bu bağlamda, yaklaşık on bin yıllık köklü bir geçmişe sahip olan Çay ilçesi, zamana karşı direnerek varlığını sürdüren ve bölgenin sosyo-ekonomik yapısında kilit rol oynayan bir yerleşim merkezidir. Afyonkarahisar il merkezinin yaklaşık 48 km doğusunda, Sultan Dağları'nın eteklerinde konumlanan Çay ilçesi; topoğrafik olarak Karamık ve Eber Gölleri arasında, İç Ege Bölgesi'nin İç Anadolu ve Akdeniz Bölgeleri ile kesiştiği stratejik bir noktada yer almaktadır. Ege, Akdeniz ve İç Anadolu bölgelerini birbirine bağlayan ana karayolu güzergâhları üzerinde bulunması ve demiryolu ulaşım ağına sahip olması, bölgeye lojistik ve ekonomik açıdan büyük avantajlar sağlamaktadır. Çay ilçesinin toplam nüfusu 29 254 olarak kaydedilmiştir. İlçe merkezi 14 599 kişi, belde ve köyler 16 178 kişi 20 köy ve 26 mahalle şeklindedir. (TÜİK, 2025).

İlçenin ekonomik hayatı büyük ölçüde tarım ve hayvancılık faaliyetlerine dayalı olmakla birlikte, stratejik konumu gereği hizmet sektörü de önemli bir istihdam alanıdır. Çay Barajı'nın olası bir yıkılma senaryosu kapsamında yapılacak taşkın yayılım analizi,

sadece ilçe merkezindeki 16 bin üzerindeki nüfusu değil, aynı zamanda geçim kaynağı tarım olan geniş kırsal nüfusu ve bölgedeki kritik ulaşım altyapısını da kapsamaktadır.



Şekil 2.1 Çalışma alanına ait lokasyon haritası ve havza 3B modeli (Taş ve Zorluer, 2016).

Çalışma alanı sınırlarının hassas bir şekilde belirlenmesinde, bölgeye ait sayısal yükseklik modeli (DEM) temel belirleyici unsur olmuştur. Analiz sürecini daha spesifik ve verimli hale getirmek amacıyla; topoğrafik yapı incelenerek taşkın dalgasının fiziksel ve teknik olarak ulaşmasının mümkün olmadığı yüksek kotlu bölgeler çalışma sınırları dışına çıkarılmıştır. İlerleyen bölümlerde sunulan HEC-RAS simülasyon sonuçları, bu sınırlandırmanın doğruluğunu ve hidrolik açıdan tutarlılığını destekler niteliktedir.

Taşkın etkilenme analizinin sosyo-ekonomik boyutunu ortaya koymak için CORINE (Coordination of Information on the Environment) Avrupa Çevre Ajansı arazi sınıflandırma sisteminden yararlanılmıştır. Bu veri seti, çalışma alanı sınırlarına indirgenerek bölgedeki arazi kullanım tiplerinin dağılımı ve yüzey pürüzlülüğü karakteristikleri tespit edilmiştir. Elde edilen veriler, taşkın yayılımının hem fiziksel hızını pürüzlülük katsayısı üzerinden hem de etki edeceği alanın ekonomik değerini belirlemektedir. Bölgedeki arazi kullanım tiplerine göre oransal dağılım verileri Çizelge 2.3'te sunulmuştur

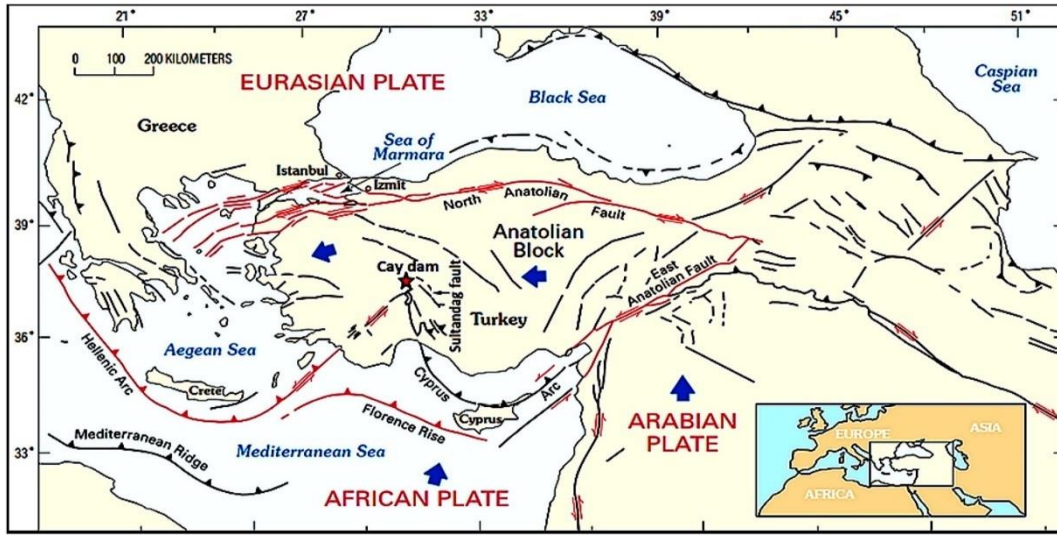
Çizelge 2.3 Çalışma alanı arazi kullanım dağılımı

“	Arazi Örtüsü Tipi	Alan (km ²)	Alan (%)
1	Sulanamayan Tarım Arazisi	398,40	48,00
2	Doğal Çayırliklar	132,80	16,00
3	Sulanabilir Tarım Arazisi	124,50	15,00
4	Meralar ve Otlatma Alanları	58,10	7,00
5	Kentsel Yerleşim ve Sanayi alanları	53,95	6,50
6	Ormanlık alanlar(Sultan Dağları)	37,35	4,50
7	Sulak Alanlar ve Su Kütleleri (Eber)	24,90	3,00

Çay ilçesine özgü bu dağılım, taşkın risk analizi için İlçenin yaklaşık %63'ü tarım arazisidir. Özellikle %15'lik "Sulanabilir Tarım Arazisi" payı, Türkiye'nin önemli vişne ve kiraz üretim merkezlerinden biri olan Çay ilçesinin ekonomik hassasiyetini göstermektedir. Olası bir taşkın durumunda bu alanlar en yüksek ekonomik zarar potansiyeline sahiptir. %6,50'lik kentsel ve ticari alan payı, Çay ilçe merkezinin yanı sıra bölgeden geçen uluslararası karayolu D300 ve demiryolu hattını da kapsamaktadır. Bu bölgeler, HEC-RAS modellemesinde can kaybı riskinin en yüksek olduğu "yüksek hassasiyetli" alanlar olarak tanımlanmıştır. Sultan Dağları yamaçlarındaki ormanlık alanlardan %4,5 Eber Gölü kıyısındaki sulak alanlara %3 geçişteki ani kot farkı ve pürüzlülük değişimi, taşkın dalgasının yayılım mekanizmasını doğrudan etkilemektedir. Özellikle kuru tarım arazilerinin ve meraların yoğunluğu, taşkın suyunun yerleşim yerlerine doğru daha az dirençle ilerlemesine neden olabilecek bir yüzey özelliği sunmaktadır. Arazi kullanım dağılımının %63'ünün tarımsal nitelikte olması, hidrolojik modellemede SCS-CN (Soil Conservation Service- Curve Number / Toprak Koruma Servisi - Akış Eğrisi Numarası) parametresinin optimizasyonunda da kritik rol oynamaktadır. Kuru tarım ve mera alanlarının toprak hidrolojik grubunun (genellikle C veya D grubu agrikültürel topraklar) sızma (infiltrasyon) kapasitesinin düşük olması, yoğun yağışlar esnasında yüzeysel akışa geçen su hacmini (net yağış) artırmaktadır. Bu durum, bitki örtüsünün zayıf olduğu dönemlerde interseptasyon (yağışın bitki tarafından tutulması) kayıplarını minimuma indirerek, havza ölçeğinde üretilen hidrografın pik debisini büyütmede ve kentsel alanlar üzerindeki hidrolik baskıyı doğrudan tırmandırmaktadır.

2.5 ay Barajı Sismik Risk ve Tektonik Konum Analizi

ay Barajı sahası, Anadolu'nun tektonik açıdan en aktif ve karmaşıık yapılarından biri olan Isparta Büklümü içerisinde, yüksek sismik risk taşıyan bir noktada yer almaktadır. Bölge, Doğu Anadolu Fay Hattı (DAFZ) sistemiyle ilişkili olan Kıbrıs-Helenik Zonu (Bindirme Fay Hattı Zonu) ile doğrudan bağlantılıdır. şekil 2.2'de gösterilen Helenik yay silsilesi, baraj sahasındaki lokal faylarla sismik bir etkileşim halindedir ve bu durum bölgeyi Anadolu'nun en kritik tektonik yapılarından biri yapmaktadır.



şekil 2.2 ay Barajı ve Yakın evresinin Tektonik ve Sismik Haritası (avuş ve Kilit,2025).

6 şubat 2023 tarihinde meydana gelen şiddetli depremler, barajlar gibi stratejik altyapıların sismik dayanıklılığının yeniden incelenmesi zorunluluğunu ortaya koymuştur. Bu kapsamda, yakın fay etkisi ve yüksek yer ivmelerini (PGA) temel alan olasılığa dayalı sismik tehlike analizleri güncellenmeye başlanmıştır. ay Barajı, 105,5 metre yüksekliğinde, betonarme kaplamalı kaya dolgu (CFRD) tipinde inşa edilmiştir. Barajın yapısal güvenliği, bulunduğu sismik bölgenin 350 km²'lik bir alan içerisinde 602 adet aktif fay hattı tespit edilmiştir. 2000 ve 2003 yıllarında, baraja yalnızca 10 km² mesafedeki dar bir alanda, sırasıyla M_w: 6,3 ve M_w: 6,5 büyüklüğünde iki yıkıcı deprem kaydedilmiştir. Bölge, tarihsel olarak 40 km'lik bir yarıçap içerisinde büyüklüğü M_w: 4,0 ile 6,5 arasında değişen çok sayıda sarsıntıya maruz kalmıştır. (Kalafat vd, 2007).

Çay Barajı'nın yapısal güvenliği ve sismik hassasiyeti üzerine yapılan güncel çalışmalardan biri olan Çavuş ve Kilit 2025'de bölgenin en önemli tektonik unsurlarından biri olan aktif Sultandağı Fayı'na yalnızca 1,6 km mesafede konumlanmış bu stratejik su yapısını detaylıca ele almaktadır. Temelden yüksekliği 105 metreye ulaşan ve beton yüzölçümlü kaya dolgu (CFRD) tipinde inşa edilen Çay Barajı'nın, olası bir sismik aktivite esnasında hem memba hem de mansap şevlerinde meydana gelebilecek kayma ve duraysızlık riskleri dinamik analizlerle irdelenmiştir. Söz konusu araştırmada sismotektonik veri tabanı geniş tutulmuş; baraj aksını merkez alan 350 kilometrelik bir yarıçap içerisindeki toplam 602 aktif fay hattı simülasyonlara dahil edilerek deterministik ve olasılıksal sismik tehlike analizleri gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen sismik tehlike parametreleri ışığında, farklı pik zemin ivmesi (PGA) değerleri altında baraj gövdesinin güvenilirlik esaslı şev yenilme olasılıkları (Pf) matematiksel modellerle hesaplanmıştır. Analiz sonuçlarına göre, 1.4H:1V eğimine sahip olan memba şevinin kütleli geometrisi, yüksek sismik ivmelere maruz kaldığında dahi kararlılığını büyük oranda koruyarak güvenli sınırlar içerisinde kalmaktadır. Buna karşın, geometrik olarak üst kısmı 1.6H:1V ve alt kesimleri 1.8H:1V şeklinde kademelendirilmiş olan mansap şevinin, yaklaşık 0.25 g ivme eşiği aşıldıktan sonra kayma ve stabilite kaybı eğiliminin lineer olmayan bir ivmeyle arttığı tespit edilmiştir. Proje sahasına olan ekstrem yakınlığı nedeniyle Sultandağı Fayı'nın baraj lokasyonunda 0,65 g ile 0,67 g gibi son derece yüksek zemin ivmeleri üretme potansiyelinin bulunması, Çay Barajı'nın özellikle mansap şevi geometrisi açısından kritik bir sismik risk altında olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Bu hayati bulgular neticesinde araştırma, potansiyel bir katastrofik duraysızlığın önüne geçilebilmesi adına, mansap şev eğiminin daha güvenli bir profil olan 1V:1,8–2,0H aralığına çekilerek yatıklaştırılmasını veya mevcut şev topuğunu gövdesini destekleyecek ilave bir kaya dolgu imalatının gerçekleştirilmesini yapısal bir zorunluluk olarak önermektedir.

3. MATERYAL ve METOT

3.1 Baraj Yıkılma Mekanizmalarının Teorik Altyapısı

Barajlar, sivil mühendisliğin en kritik yapıları arasında yer almakla birlikte, olası bir göçme durumunda mansap bölgesinde yaratacakları riskler bakımından sürekli denetim altında tutulmalıdır. Tarihsel perspektiften bakıldığında, tüm baraj tiplerinde yapısal stabilite kaybı yaşanabileceği görülse de, dünya baraj envanterinin büyük bir kısmını oluşturan dolgu barajlar, özellikle hidrolojik ve sismik yüklemelere karşı daha duyarlı bir profil sergilemektedir (USACE, 2014). Çay Barajı gibi beton yüzeyli kaya dolgu (CFRD) yapılar, kaya dolgunun sağladığı stabilite ile beton yüzeyin sağladığı sızdırmazlık avantajını birleştirse de, beton plakadaki çatlamlar veya kret kotunu aşan feyezan suları yapısal bütünlüğü tehdit edebilmektedir. Bu bağlamda, barajların gövde malzemesine göre kagir, beton, dolgu, ahşap ve çelik gibi sınıflara ayrılması, her bir tip için özgün bir yıkılma mekanizmasının tanımlanmasını zorunlu kılmaktadır (Ağralıoğlu, 2007).

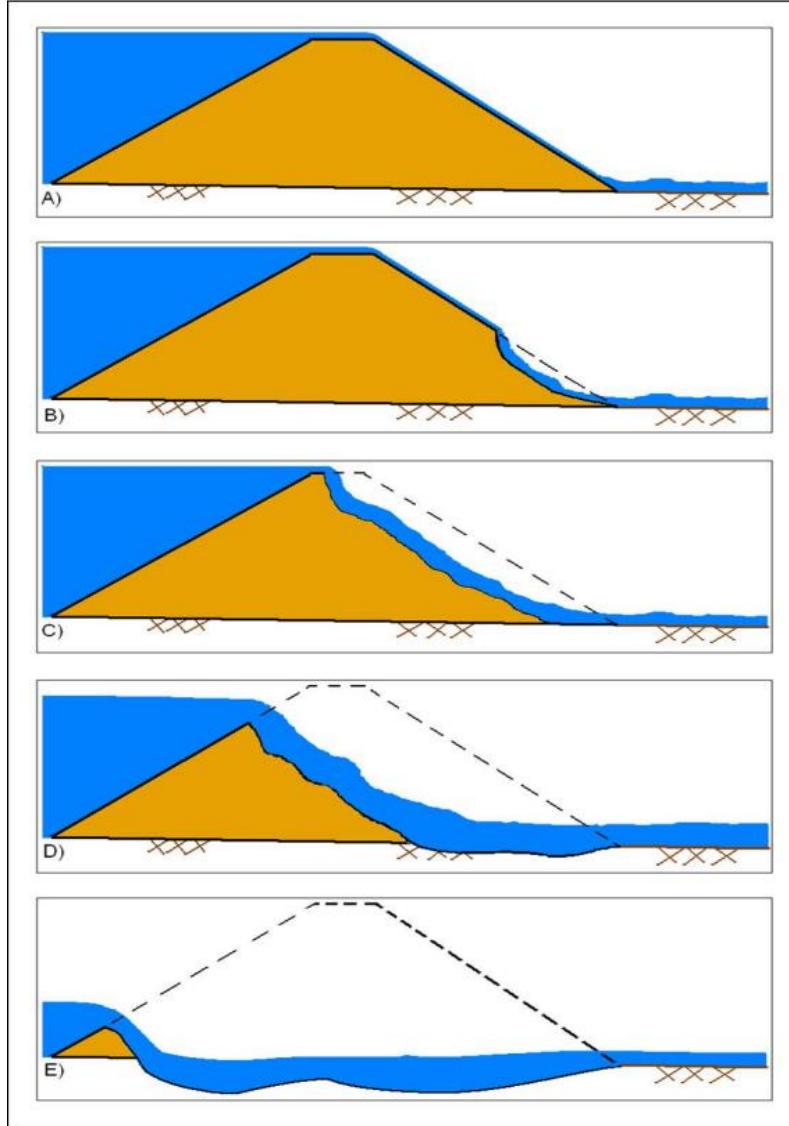
Baraj yıkılmalarına sebebiyet veren mekanizmalar incelendiğinde; ekstrem meteorolojik olaylar sonucu oluşan taşkınlar, yetersiz dolusavak kapasitesi, gövde içi sızmaların neden olduğu borulanma olayları ve işletme hataları başı çekmektedir. Özellikle sismik aktivitenin yoğun olduğu bölgelerde, deprem kaynaklı şev kaymaları veya çatlaklar da yıkılma sürecini tetikleyebilmektedir. Baraj türlerine göre bu yıkılma risklerinin dağılımı, modelleme sürecinde hangi parametrelere odaklanılması gerektiğini belirlemektedir. Çizelge 3.1 literatürdeki yaygın kabul görmüş arıza tiplerini yapısal formlarla korele ederek sunmaktadır. Söz konusu risklerin sayısal hidrolik modellerle simüle edilmesi aşamasında; gövde geometrisi, memba-mansap su seviyeleri, sızma debileri ve temel zemin katsayıları gibi parametrelerin dinamik etkileşimi kritik önem taşımaktadır. Kil çekirdekli kaya dolgu barajlarda iç erozyon ve duraylılık analizleri ön plana çıkarken, beton ağırlık barajlarında ise aşılma (overtopping) esnasında gövde arkasında oluşacak hidrolik yükler ve kayma stabilitesi hesaplamaların merkezini oluşturmaktadır.

Çizelge 3.1: Baraj gövde tiplerine göre kritik arıza modları (Costa, 1985; Atallah, 2002)

Arıza tipi	Toprak dolgu	Beton ağırlık	Beton kemer	Beton payanda
Üstten aşma	X	X	X	X
Borulanma	X	X	X	X
Temel hataları	X	X	X	X
Heyelan	X	X		X
Devrilme		X	X	
Çatlama	X	X	X	X

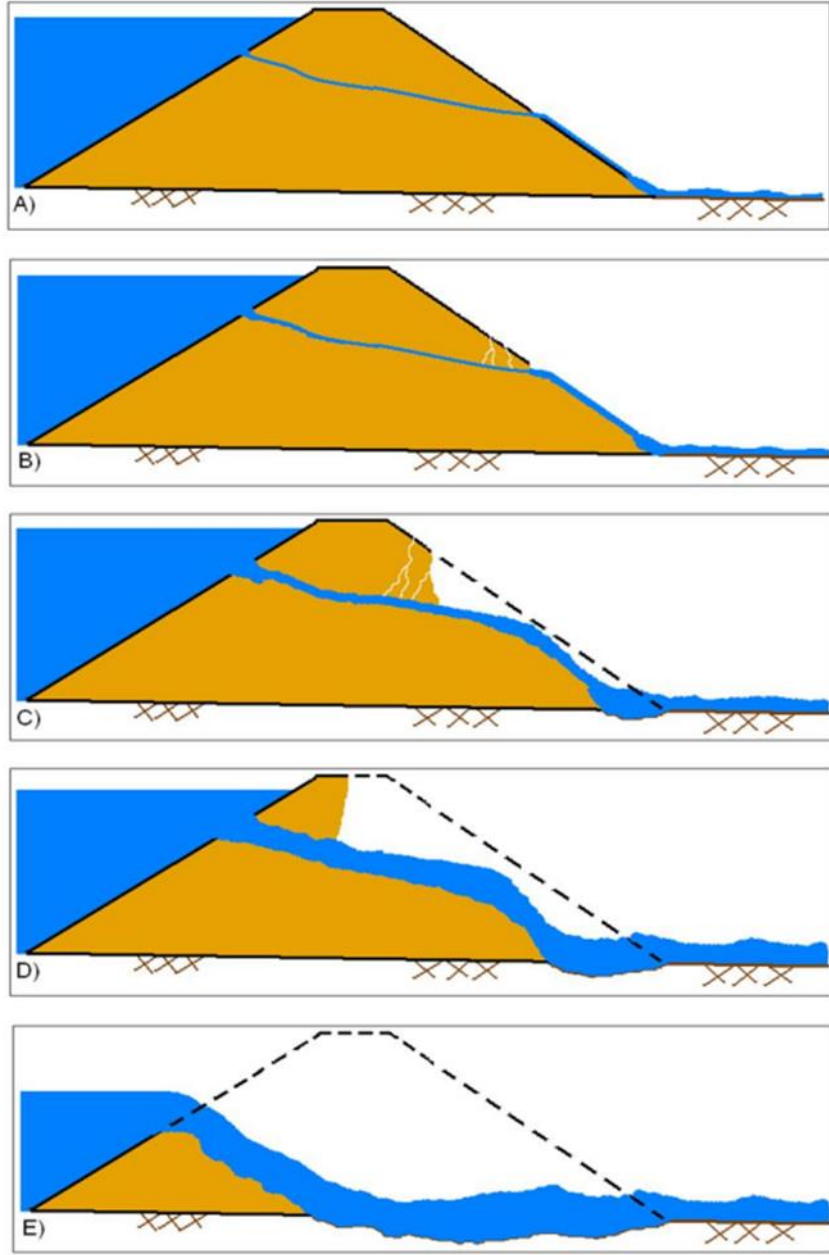
3.1.1 Üstten Aşma (Overtopping) ve Borulanma (Piping) Süreçlerinin Karşılaştırmalı Analizi

Baraj yıkılma senaryoları içerisinde en sık karşılaşılan durum olan üstten aşma, rezervuar su seviyesinin barajın en üst noktası olan kret kotunu aşarak gövde üzerinden kontrolsüzce akmasıdır. Bu akış, öncelikle mansap şevinde topuk erozyonuna neden olmakta ve bu erozyon diyagonal bir hat izleyerek baraj kretine doğru ilerlemektedir. Gövde üzerinden aşan suyun kazandığı yüksek kinetik enerji, malzemenin kritik kayma gerilmesi (t_c) eşik değerini aştığında, mansap yüzeyindeki koruyucu katmanları hızla tahrip ederek "ilerleyen oyulma" (progressive erosion) mekanizmasını tetikler. Bu süreçte akışın yarattığı hidrolik yük ve malzemelerin duraylılığını kaybetmesi, şev geometrisinin dikleşmesine ve küçük ölçekli kütle hareketlerinin (yerel şev kaymalarının) oluşmasına yol açar. Geriye doğru ilerleyen bu aşınma hattı, barajın en kesit yapısını zayıflatarak yapısal bütünlüğü geri döndürülemez bir boyuta taşır. Kret hattının yarılmasıyla birlikte "gedik" (breach) adı verilen boşluk oluşmakta, suyun bu boşluktan geçiş hızı arttıkça gedik hem düşey hem de yatay doğrultuda genişleyerek akarsu tabanına ulaşmaktadır (Fread, 1991). Gediğin bu dinamik büyüme evresi, rezervuardan boşalan suyun debisi ile gediğin erozyon hızı arasındaki karşılıklı bir besleme mekanizmasına dayanır; hidrolik bası altındaki su yanal aşındırmayı büyütürken, genişleyen kesit ani bir pik debinin (Q_{peak}) oluşmasına ve mansaba doğru yıkıcı bir taşkın dalgasının ötelenmesine neden olur.



Şekil 3.1 Baraj gövdesi üzerinden aşan suların (overtopping) neden olduğu gedik (breach) oluşum safhaları ve erozyon ilerleme mekanizması (USACE, 2014).

Buna karşılık borulanma mekanizması, daha sinsi bir ilerleyiş sergiler. Gövde içerisinde sızan suyun ince malzemeyi mansaba taşımasıyla başlayan bu süreç, zamanla gövde içerisinde basınçlı tüneller oluşturur. Bu kanallar genişlediğinde kret aniden çökerek yerini büyük bir gedik oluşumuna bırakır (USACE, 2014). Üstten aşma durumu senaryolar dahilinde incelenmiş olup, modellemede gediğin barajın maksimum kesitinin bulunduğu vadi tabanı hizasında oluşacağı varsayılmıştır.



Şekil 3.2 Baraj gövdesi veya temelinde gelişen içsel erozyon borulanma süreci ve hidrolik boru hattının genişlemesiyle oluşan yapısal göçme mekanizması (USACE, 2014).

3.2 Gedik Parametrelerinin Kestirimi ve Ampirik Modelleme Yaklaşımları

Baraj yıkılması anında mansaba deşarj edilecek suyun debisini belirleyen en temel değişkenler; gediğin ortalama genişliği (B_{ave}), şev eğimleri ve gediğin tam gelişimine kadar geçen süredir (t_f). Ancak, doğası gereği oldukça kaotik olan bu süreç için kesin bir matematiksel yargıya varmak günümüz hidrolik mühendisliği sınırları içerisinde

güçtür. Bu nedenle literatür, geçmişte yaşanmış gerçek baraj yıkılma vakalarından elde edilen verilere dayanan ampirik regresyon denklemlerini önermektedir.

3.2.1 Regresyon Analizine Dayalı Ampirik Denklemler ve Sensitivite Analizi

Bu çalışma kapsamında, model hassasiyetini ve güvenilirliğini artırmak amacıyla tek bir yöntemle yetinilmemiş, HEC-RAS yazılımının da desteklediği beş farklı denklem seti üzerinden duyarlılık analizi yürütülmüştür. MacDonald ve Langridge-Monopolis (1984), Von Thun ve Gillette (1990), Froehlich (1995/2008) ve Xu ve Zhang (2009) tarafından geliştirilen bu denklemler, barajın hacmi, su yüksekliği ve malzemenin erozyon direnci gibi parametreleri farklı ağırlıklarla işlemektedir. Özellikle Von Thun ve Gillette yöntemi, Çay Barajı'nın kohezyonlu çekirdek yapısını dikkate alarak, yan şevlerin erozyona dirençli olması durumunda 1:1 yerine 1:2 veya 1:3 eğimle modellenmesi gerektiğini savunarak daha gerçekçi bir geometrik yaklaşım sunmaktadır.

3.2.1.1 MacDonald ve Langridge–Monopolis (1984) Yaklaşım

Yazarlar, 42 farklı baraj yıkılma vakası inceleyerek gövdeden ayrılan parça hacmi, ortalama gedik genişliği ve oluşma zamanı için şu bağıntıları önermişlerdir.

$$V_{eroded} = 0,00348(V_{out}h_w)^{0,852} \quad (3.1)$$

$$B_{ave} = \frac{V_{eroded} - h_b^2 CZ_b + \frac{h_b Z_b Z_3}{3}}{h_b(C + \frac{h_b Z_3}{2})} \quad (3.2)$$

$$t_f = 0,0179(V_{eroded})^{0,364} \quad (3.3)$$

V_{eroded} : Baraj gövdesinden erozyon yoluyla uzaklaşan toplam malzeme hacmi (m³).

V_{out} : Gedik oluşumu süresince rezervuardan boşalan toplam su hacmi (m³).

h_w : Yıkılma anında gedik tabanı üzerinde ölçülen efektif su yüksekliği (m).

h_b : Baraj temelinden kretine kadar olan toplam gedik yüksekliği (m).

t_f : Gediğin başlangıç anından nihai formuna ulaşmasına kadar geçen toplam oluşum süresi (saat).

B_{ave} : Gediğin düşey kesitindeki ortalama genişlik (m).

K_0 : Yıkılma moduna (üstten aşma veya borulanma) bağlı olarak değişen ampirik katsayı.

Burada, V_{out} gedikten geçen su hacmini, h_w gedik üzerindeki su yüksekliğini, z ise gövde yan şev eğimini temsil etmektedir.

3.2.1.2 Von Thun ve Gillette (1990) Yaklaşımı

Bu yöntem, özellikle gediğin yan şev eğimlerini malzemenin kohezyon özelliğine göre sınıflandırmasıyla öne çıkar. Yazarlar, erozyona dirençli ve kolay aşınan yüzeyler için farklı katsayılar içeren şu setleri geliştirmişlerdir.

Erozyona dirençli yüzeyler için;

$$B_{ave} = 2,5h_w + C_b \quad (3.4)$$

$$t_f = 0,020h_w + 0,025 \quad (3.5)$$

$$t_f = \frac{B_{ave}}{4h_w} \quad (3.6)$$

Kolay aşınan yüzeyler için;

$$t_f = 0,015h_w \quad (3.7)$$

$$t_f = \frac{B_{ave}}{4h_w + 61,0} \quad (3.8)$$

B_{ave} : Gediğin düşey kesitindeki ortalama genişlik (m).

h_w : Yıkılma anında gedik tabanı üzerinde ölçülen efektif su yüksekliği (m).

C_b : Rezervuar depolama kapasitesine bağı olarak seçilen ampirik gedik genişliği katsayısı (m).

t_f : Gediğin başlangıç anından nihai formuna ulaşmasına kadar geçen toplam oluşum süresi (saat).

3.2.1.3 Xu ve Zhang (2009) Yaklaşımı

Çok sayıda parametreyi sürece dahil eden bu yöntem, erozyon katsayısını (B_{3-2-5}) dikkate alarak daha spesifik bir analiz sunar.

$$\frac{B_{ave}}{h_b} = 0,787 \left(\frac{h_d}{h_r} \right)^{0,133} \left(\frac{V_w^{1/3}}{h_w} \right)^{0,652} e^{B_3} \quad (3.9)$$

$$\frac{B_t}{h_b} = 1,062 \left(\frac{h_d}{h_r} \right)^{0,092} \left(\frac{V_m^{1/3}}{h_w} \right)^{0,508} e^{B_2} \quad (3.10)$$

$$\frac{T_f}{T_r} = 0,304 \left(\frac{h_d}{h_r} \right)^{0,707} \left(\frac{V_w^{1/3}}{n_m} \right)^{1,228} e^{B_5} \quad (3.11)$$

B_{ave} : Gediğin düşey kesitindeki ortalama genişlik (m).

B_{top} : Gediğin kret kotundaki nihai üst genişliği (m).

t_f : Gediğin başlangıç anından nihai formuna ulaşmasına kadar geçen toplam oluşum süresi (saat).

h_b : Baraj temelinden kretine kadar olan toplam gedik yüksekliği (m).

h_d : Barajın temelden kret kotuna kadar olan toplam gövde yüksekliği (m).

h_w : Yıkılma anında gedik tabanı üzerinde ölçülen efektif su yüksekliği (m).

h_r : Formülasyonda kullanılan ve 15 metre olarak kabul edilen referans yükseklik sabiti (15m).

V_w : Yıkılma anında rezervuarda depolanan ve deşarja maruz kalan aktif su hacmi (m^3).

B_3, B_2, B_5 : Baraj gövde malzemesinin erozyon direncine, baraj tipine ve zemin karakteristiklerine bağı olarak tayin edilen ampirik erozyon katsayılarıdır.

3.2.1.4 Froehlich (1995 ve 2008) Denklemleri

Froehlich, veri setini zamanla genişleterek iki farklı revizyon sunmuştur. 1995 çalışmasında 63 barajı, 2008 çalışmasında ise 74 barajı temel almıştır.

1995 Formülasyonu;

$$B_{ave} = 0,1803K_0V_w^{0,32}h_b^{0,19} \quad (3.12)$$

$$t_f = 0,00254V_w^{0,53}h_b^{-0,90} \quad (3.13)$$

2008 Güncellemesi;

$$B_{ave} = 0,27K_0V_w^{0,32}h_b^{0,04} \quad (3.14)$$

$$t_f = 63,2\sqrt{\frac{V_w}{gh_b^2}} \quad (3.15)$$

B_{ave} : Gediğin düşey kesitindeki ortalama genişlik (m).

K_0 : Yıkılma moduna (üstten aşma 1.4 veya borulanma 1.0) bağlı olarak değişen ampirik katsayı.

V_w : Yıkılma anında rezervuarda depolanan ve deşarja maruz kalan aktif su hacmi (m^3).

h_b : Baraj temelinden kretine kadar olan toplam gedik yüksekliği (m).

t_f : Gediğin başlangıç anından nihai formuna ulaşmasına kadar geçen toplam oluşum süresi (saat). Bu çalışmada, Çay Barajı'nın fiziksel özellikleri dikkate alınarak, yukarıdaki beş farklı yaklaşımın ürettiği sonuçlar HEC-RAS ortamında karşılaştırmalı olarak simüle edilmiştir.

3.3. Taşkın Yayılımının Hidrodinamik Formülasyonu

Bir barajın gövde bütünlüğünü kaybetmesi neticesinde rezervuarda depolanan potansiyel enerjinin kinetik enerjiye dönüşümü, mansap bölgesinde yüksek debili ve

değişken bir akım rejimi oluşturur. Oluşan bu taşkın dalgasının vadi boyunca ilerleyişini, sönümlenmesini ve yayılım alanlarını belirleyebilmek için gedikten geçen taşkın hidrografının akarsu yatağı boyunca ötelenmesi gerekmektedir. Literatürde kullanılan basit hidrolojik öteleme yöntemleri, sadece süreklilik denkleminde ve hacim-debi ilişkisine dayanması sebebiyle, baraj yıkılması gibi ani gelişen ve kararsız akım özelliği gösteren kompleks hidrolik olayları simüle etmekte yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle, çalışmada akışın zaman ve mekana bağlı değişimlerini fiziksel olarak tanımlayan hidrolik taşkın öteleme teknikleri esas alınmıştır (Kocaman, 2007).

3.3.1 Navier – Stokes Denklemleri ve Sayısal Çözüm Yöntemleri

Akışkanlar mekaniğinin temelini oluşturan Navier – Stokes denklemleri, kütle, momentum ve momentimin korunumu prensiplerini temel almaktadır. Bu denklemler, akımdaki türbülans etkilerini dikkate alması ve üç boyutlu (3D) analiz imkanı sunması bakımından doğadaki karmaşık akış olaylarını en hassas şekilde tanımlayan matematiksel modellerdir.

Navier – Stokes Formülasyonu;

$$\text{Kütle korunumu} \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho V) = 0 \quad (3.16)$$

$$\text{Momentum korunumu} \quad \rho \frac{dV}{dt} = -\nabla p + \nabla \tau + \rho g \quad (3.17)$$

V: Akışkanın hız vektörü

ρ : Akışkan yoğunluğu

τ : Viskoz gerilim tansörü

g: Yerçekimi ivmesi

p: Statik basınç

3.3.2 Saint – Venant Denklemleri ve Sayısal Çözüm Yöntemleri

Düşey ivme bileşenlerinin ihmal edilerek Navier – Stokes denklemlerinin yatay

doğrultuya indirgenmesiyle elde edilen Saint – Venant denklemleri sığ su denklemleri, nehir hidroliği ve taşkın analizlerinde standart kabul edilmektedir. Tek boyutlu (1D) formda bu denklemler süreklilik ve momentum bileşenleri olarak ifade edilmiştir.

Baraj yıkılması gibi ani değişimlerin yaşandığı akımların mansap yönlü ötelenmesinde, Navier-Stokes denklemlerinin basitleştirilmiş bir formu olan Saint-Venant denklemleri kullanılmaktadır. Bu denklemler; akımın tek boyutlu, su yüzeyinin düz ve düşey ivmelerin ihmal edilebilir olduğu varsayımları altında kütle ve momentumun korunumunu esas alır.

Kütlenin korunumu

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (3.17)$$

Momentumun korunumu

$$(kt) \frac{\partial Q}{\partial t} + (kc) \left(\frac{\partial(QV)}{\partial x} - V_x q \right) + (kp) g \cdot A \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right) - (kf) g \cdot A (S_0 - S_f) = 0 \quad (3.18)$$

k_t : Yerel ivme (Local acceleration) terimi, akımın zamana bağlı değişimini ifade eder.

k_c : Taşınasal ivme (Convective acceleration) terimi, hızın mekana bağlı değişimini temsil eder.

k_p : Basınç gradyanı (Pressure gradient) terimi, su derinliğindeki değişimi yansıtır.

k_f : Yerçekimi ve sürtünme (Gravity and friction) faktörleri; taban eğimi (S_0) ve sürtünme eğimi (S_f) arasındaki ilişkiyi kurar.

Saint-Venant denklemlerinin sayısal çözümünde kullanılan dalga yaklaşımları, yukarıdaki katsayıların analiz kapsamına dahil edilip edilmemesine göre farklılık göstermektedir. Bu yaklaşımlar ve katsayı atamaları aşağıda sunulmuştur;

(1) Kinematik Dalga: $k_t=k_c=k_p=0$ ve $k_f=1$. Sadece yerçekimi ve sürtünme kuvvetlerinin dengede olduğu durumdur.

(2) Ataletsiz (Non-Inertial) Dalga: $k_t=k_c=0$ ve $k_p=k_f=1$.

(3) Ağırlık Dalgası: $k_t=k_c=k_p=1$ ve $k_f=0$.

(4) Yarı Kararlı Dinamik Dalga: $k_t=0$ ve $k_c=k_p=k_f=1$.

(5) Dinamik Dalga (Full Saint-Venant): $k_t=k_c=k_p=k_f=1$. Atalet kuvvetlerinin tamamını dikkate alan en kapsamlı modeldir.

3.3.3 Difüzyon Dalga Yaklaşımı

Momentum denkleminde yerel (k_t) ve taşınasal (k_c) ivme faktörlerinin ihmal edilip, diğer terimlerin dikkate alınmasıyla elde edilen doğrusallaştırılmış çözüm "Difüzyon Dalga Yaklaşımı" olarak tanımlanmaktadır (Kaya ve Ülke, 2012). Bu yaklaşım, kinematik dalgaya ek olarak basınç terimini de içerdiği için daha hassas, dinamik dalgaya göre ise daha stabil bir çözüm sunmaktadır.

Analizde kullanılan temel akış bağıntısı aşağıda sunulmuştur;

$$Q = K \cdot \sqrt{S_f} \quad (3.19)$$

Q: Akış kesitinden geçen anlık debiyi (m^3/sn).

K: Kesitin iletim kapasitesini (Conveyance) (m^3/sn).

S_f : Sürtünme eğimini (Enerji gradyanı) (m/m) temsil etmektedir.

Burada iletim kapasitesi (K), Manning denklemi prensiplerine dayanarak şu şekilde hesaplanmaktadır;

$$K = \frac{1}{n} \cdot A \cdot \sqrt[3]{R^2} \quad (3.20)$$

n: Manning pürüzlülük katsayısını.

A: Akış kesit alanını (m^2).

R: Hidrolik yarıçapı (m) ifade eder.

HEC-RAS yazılımı, kullanıcıya "Diffusion Wave" ve "Full Saint-Venant" denklemleri arasında seçim yapma imkanı tanımaktadır. Bu çalışma kapsamında incelenen havzanın

topoğrafik ölçeği ve mansap bölgesindeki düzlük alanların genişliği göz önüne alındığında, Difüzyon Dalga Yaklaşımı'nın tam dinamik denklemlere oranla daha stabil ve hesaplama açısından daha verimli (*computationally efficient*) bir çözüm sunduğu saptanmıştır. Özellikle ani derinlik değişimlerinin yaşandığı baraj yıkılma senaryolarında, bu yöntem sayısal salınımları (oscillation) sönümleyerek modelin yakınsama (convergence) başarısını artırmaktadır. Bu nedenle, taşkın yayılım analizlerinde bu denklem seti tercih edilmiştir. Modelleme arayüzünde yapılan bu seçim ve sınır şartlarının belirlenme aşamaları "4. Bulgular" bölümünde görsellerle desteklenerek açıklanacaktır.

3.3.4 Manning Pürüzlülük Katsayısı (n) ve Arazi Örtüsü İlişkisi

Açık kanal hidroliği ve taşkın yayılım modellemelerinde, akışın yüzeyle olan sürtünme direncini tanımlayan en temel parametre Manning pürüzlülük katsayısıdır. Robert Manning (1889) tarafından geliştirilen ve ampirik bir temele dayanan bu katsayı, suyun hızını ve dolayısıyla taşkın dalgasının yayılma karakteristiğini doğrudan belirlemektedir.

Analizlerde kullanılan Manning denklemi şu şekildedir;

$$Q = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} J^{\frac{1}{2}} A \quad (3.21)$$

V: Akışın ortalama hızı (m/sn),

n: Boyutsuz pürüzlülük katsayısı,

R: Hidrolik yarıçap (m),

J: Enerji eğimidir (m/m)

Baraj yıkılmalarında tek bir pürüzlülük değeri kullanmak, heterojen bir yapısına sahip olan Çay ilçesi havzası için gerçekçi sonuçlar üretmeyecektir. Bu nedenle çalışmada, Avrupa Çevre Ajansı (EEA) tarafından standartlaştırılan CORINE (Coordination of Information on the Environment) arazi sınıflandırma sistemi kullanılmıştır.

Havza üzerindeki yerleşim alanları, tarım arazileri, meyve bahçeleri ve su kütleleri gibi

farklı arazi örtüsü tipleri, ArcMap yazılımı kullanılarak "sayısallaştırılmış" ve HEC-RAS 2D modeline bir pürüzlülük katmanı (Land Cover Layer) olarak entegre edilmiştir. Her bir CORINE koduna karşılık gelen Manning değerleri, literatürde kabul görmüş (Chow, 1959; USACE, 2014) referans aralıklar dahilinde belirlenmiştir.

Bu yöntem sayesinde, taşkın sularının örneğin "Sulu Tarım Arazileri" üzerinden geçerken karşılaştacağı direnç ile "Kentsel Dokuda" (binalar, yollar vb.) karşılaştacağı direnç ayrı ayrı hesaplanarak model hassasiyeti maksimize edilmiştir. Uygulama bölümünde bu kodların Manning değerlerine dönüştürüldüğü tablo detaylı olarak sunulacaktır.

3.4 Çay Barajı Teknik Karakteristikleri ve Yüksek Çözünürlüklü Veri Seti Modellemesi

Çay Barajı, Akarçay Havzası içerisinde yer alan ve bölgenin içme suyu ile tarımsal sulama ihtiyacını karşılayan, yapısal olarak Ön Yüzü Beton Kaplı Kaya Dolgu (CFRD) tipinde tasarlanmış stratejik bir hidrolik yapıdır. Barajın yıkılma simülasyonu için gerekli olan geometrik, hidrolojik ve topografik veri setleri; DSİ Genel Müdürlüğü Kati Proje verileri ve yüksek çözünürlüklü dijital yükseklik modelleri (DEM) ve bu çalışmada, klasik harita verilerinin ötesine geçilerek, baraj gövdesi ve yakın mansap bölgesi için İnsansız Hava Aracı (İHA) yardımıyla üretilen yüksek hassasiyetli veriler kullanılmıştır.

3.4.1 Yapısal Karakteristikler ve Tasarım Parametreleri

Barajın 105,5 metrelik temelden yüksekliği, olası bir yapısal stabilite kaybı durumunda mansap bölgesine aktarılabilecek olan potansiyel enerjinin ve pik debinin büyüklüğünü belirleyen temel değişkendir. Baraj gövdesinin beton yüzlü inşa edilmiş olması, sismik ve hidrolik yükler altındaki duraylılık mekanizmasını doğrudan etkilemektedir. 105,5 metrelik bu yüksek yapısal ölçek, hazne hacminde depolanan milyonlarca metreküp suyun katastrofik bir yıkılma senaryosunda çok kısa bir zaman diliminde (pik süresi) kinetik enerjiye dönüşme potansiyelini barındırmaktadır. Bölgenin en aktif tektonik

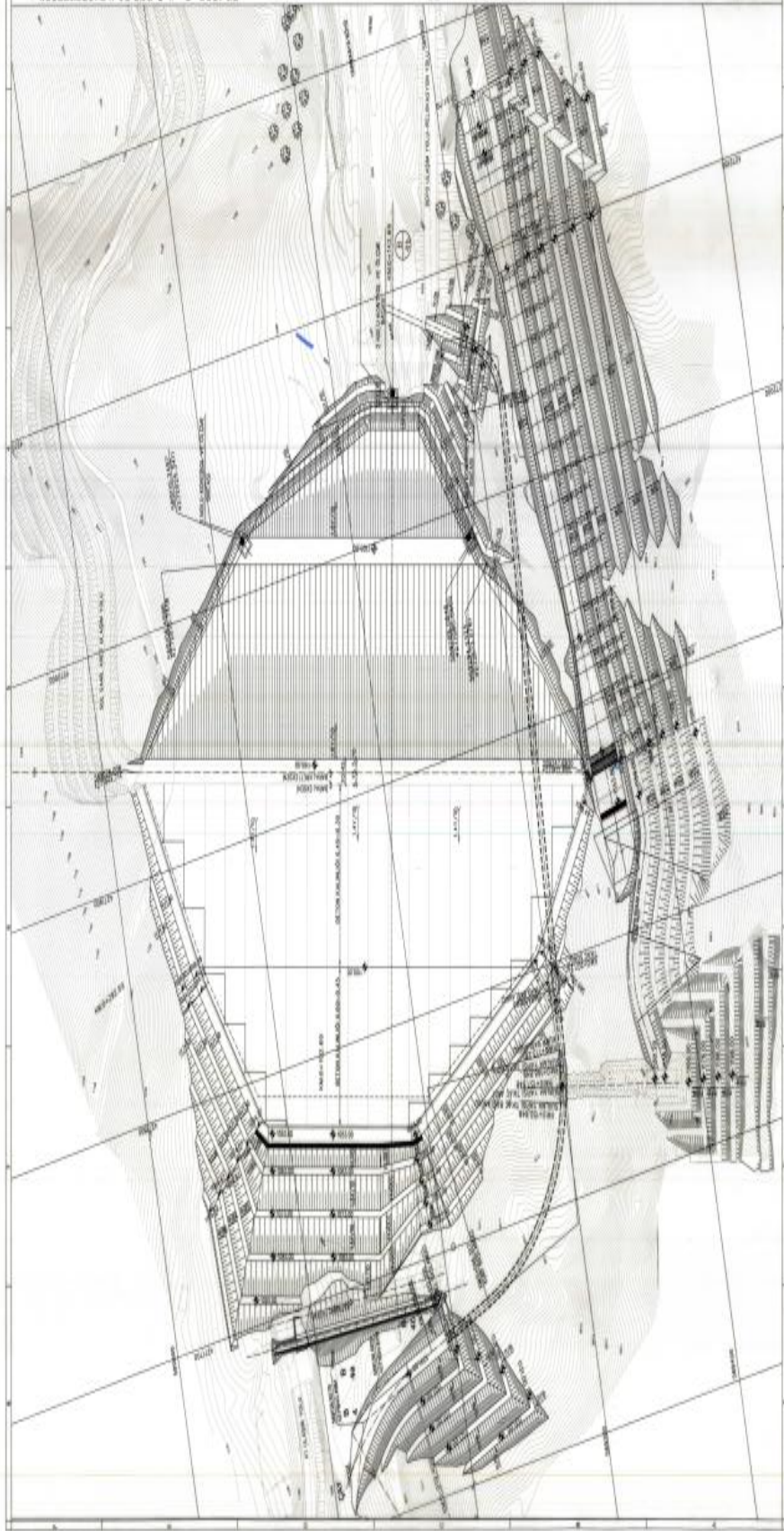
unsurlarından olan ve baraj aksına yalnızca 1,6 km mesafede konumlanan Sultandağı Fayı'nın üretebileceği yüksek yer ivmeleri (PGA), gövde şevlerinde (özellikle mansap şevinde) kayma ve stabilite kaybı riskini artırarak yapının risk profilini maksimum düzeye çıkarmaktadır. Bu doğrultuda, barajın mansap topuk geometrisi, kütleli dolgu hacmi ve kentsel yerleşime olan topoğrafik eğim kesintileri, taşkın dalgasının hidrodinamik yayılım modellemesinde rasyonel sınır şartlarının belirlenmesi adına en kritik tasarım parametrelerini teşkil etmektedir. Çay Barajı'na ait spesifik mühendislik verileri Çizelge 3.2'de sunulmuştur.

Çizelge 3.2: Çay Barajı Teknik Karakteristik Veri Seti (DSİ, 2024)

Sıra	Karakteristik	
1	Projenin adı	Çay Barajı
2	Barajın yeri	Çay İlçesi
3	Amacı	Sulama/ İçme Suyu
4	Kadastral Fıyazan Piki	77,82 m ³ /sn
5	Maksimum su seviyesi	1157,83
6	Maksimum Göl Hacmi	16,46x10 ⁶ m ³
7	Kret Kotu	1155,50
8	Kret Uzunluğu	329 m
9	Kret Genişliği	10,45 m
10	Temelden yükseklik	105,5 m
11	Talvegten yükseklik	74,5 m
12	Dolusavak deşarj kap.	209,9 m ² /sn

3.4.2 Genel Vaziyet ve Gövde Geometrisi

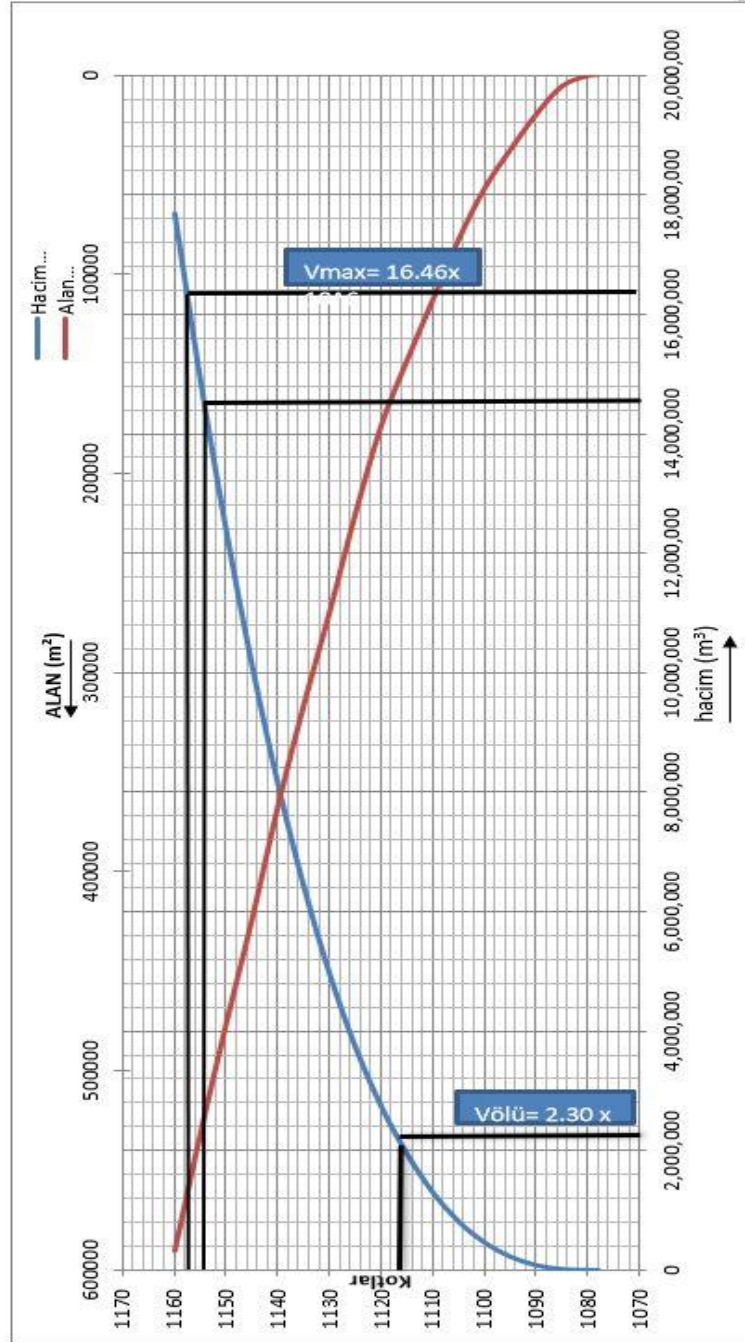
Simülasyonun mekansal doğruluğu için ilk aşamada barajın kret uzunluğu, dolusavak lokasyonu ve nehir yatağı ile olan etkileşimi incelenmiştir. şekil 3.3'te sunulan genel vaziyet planı, nehrin baraj eksenini keştiği noktayı ve gövde üzerindeki kritik kesitleri göstermektedir. Baraj yıkılma literatürü ve geçmiş vaka analizleri ışığında, olası geğiğin (breach) hidrostatik basıncın ve gövde dolgu yüksekliğinin maksimum olduğu dere yatağı hizasında oluşacağı ngrlmştir. Gövde iç yapısının ve zonlarının analizi için ise şekil 3.4'teki baraj gövde enkesiti kullanılmıştır. Bu kesit üzerinden kret genişliği ve dolgu zonları tespit edilerek, gedik üst kotu ve geğiğin düşeyde ilerleyeceğihat belirlenmiştir.



Şekil 3.3 Çay Barajı genel yerleşim planı (Dsi, 2024).

3.4.3 Rezervuar Hidrodinamiği ve Hacim-Alan Analizi

Modellemede memba sınır şartını belirleyen rezervuar depolama kapasitesi, Şekil 3.5'te yer alan "Hacim-Satıh Eğrisi" aracılığıyla sisteme tanımlanmıştır. Bu eğri, belirli irtifalardaki su yüzey alanı ve buna karşılık gelen birikmiş hacim verilerini içermektedir.



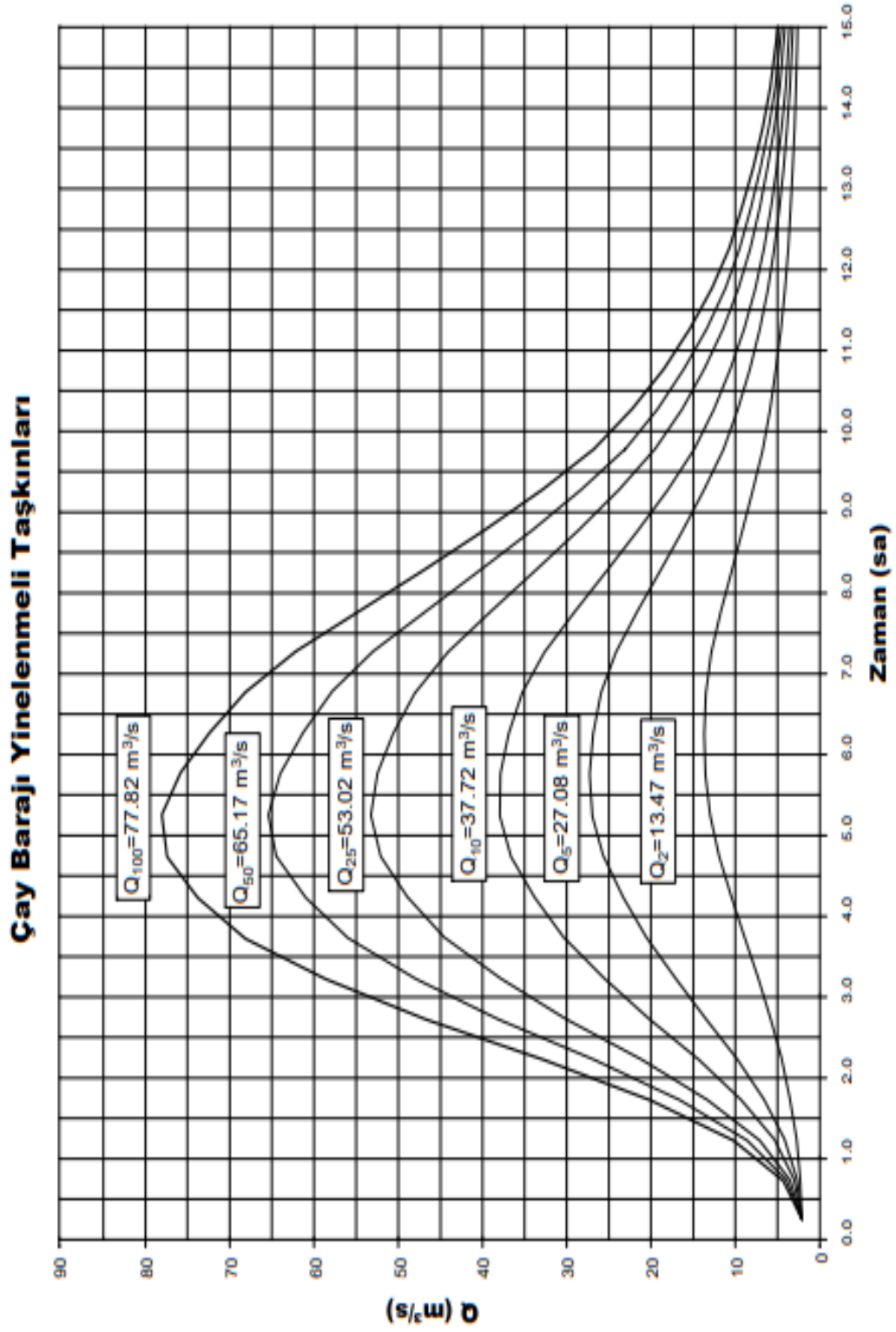
Şekil 3.5 Çay Barajı Kot-Alan-Hacim Grafiği

DSİ kati projesinde normal su seviyesine kadar sunulan veriler, bu çalışmada ele alınan "üstten aşma" senaryosu gereği kret kotuna (1155,50 m) kadar interpolasyon yöntemiyle güncellenmiştir. Yapılan hesaplamalar neticesinde kret kotundaki aktif göl hacmi $V_{1155,50} = 16,46 \times 10^6 \text{ m}^3$ olarak saptanmıştır.

3.4.4 Giriş Hidrografi ve Taşkın Öteleme Parametreleri

Analiz sürecinde baraj gediğinden geçecek akımı temsil etmek üzere **Şekil 3.6'**da sunulan katastrofal taşkın hidrografi baz alınmıştır. Taşkın dalgasının mansap bölgesindeki ilerleyişini ve pik değer sonrası sönümlenme evresini daha hassas gözlemleyebilmek adına, hidrograf süresi 25 saate çıkarılmıştır. Sayısal kararlılığı korumak amacıyla 10. saatten itibaren akış $1,5 \text{ m}^3/\text{sn}$ seviyesinde sabitlenerek analiz tamamlanmıştır. Hidrograf süresinin bu şekilde uzatılması, pik debinin mansaba doğru ötelenmesi (routing) esnasında Çay ovası genelinde oluşacak havza depolama etkilerinin ve Eber Gölü'ne ulaşan toplam taşkın hacminin hidrodinamik olarak eksiksiz izlenebilmesini sağlamıştır. Ayrıca, iki boyutlu (2D) sıg su denklemlerinin (Saint-Venant) çözümünde karşılaşılan sayısal yakınsaklık problemlerini ve kütle dengesi hatalarını (mass balance errors) minimize etmek amacıyla modelin zamansal diskretizasyonu (time step) dinamik olarak ayarlanmıştır.

Ani debi değişimlerinin yaşandığı yükselme eğrisi boyunca Courant kriteri sıkı bir şekilde takip edilmiş; modelin ıslak-kuru (wet-dry) alan geçişlerinde kararsızlığa düşmesi engellenmiştir. Bu doğrultuda, taşkın dalgasının çekilme fazını simüle eden hidrografın kuyruk kısmında sayısal kararlılığı korumak amacıyla 10. saatten itibaren akış $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ seviyesinde sabitlenerek analiz tamamlanmıştır. Böylece, model alanındaki hücrelerin aniden kuruması (drying) sebebiyle matris çözücülerinde oluşabilecek tekilliklerin (singularity) önüne geçilmiş ve simülasyonun kararlı bir baz akış rejimiyle sonlandırılması tescillenmiştir.



Şekil 3.6 Katastrofal Taşkın Hidrografı (Dsi 2024).

3.4.5 Dijital Altlık ve Topoğrafik Veri Entegrasyonu

Çay Barajı rezervuar alanı ve gövdesinin mevcut durumunu yansıtan uydu görüntüsü Şekil 3.7'de sunulmuştur. Bu görsel veri, sayısal yükseklik modeli (DEM) ile üst üste bindirilerek taşkın sahası sınırlarının ve göl alanının koordinat bazlı doğrulanmasını sağlamıştır.

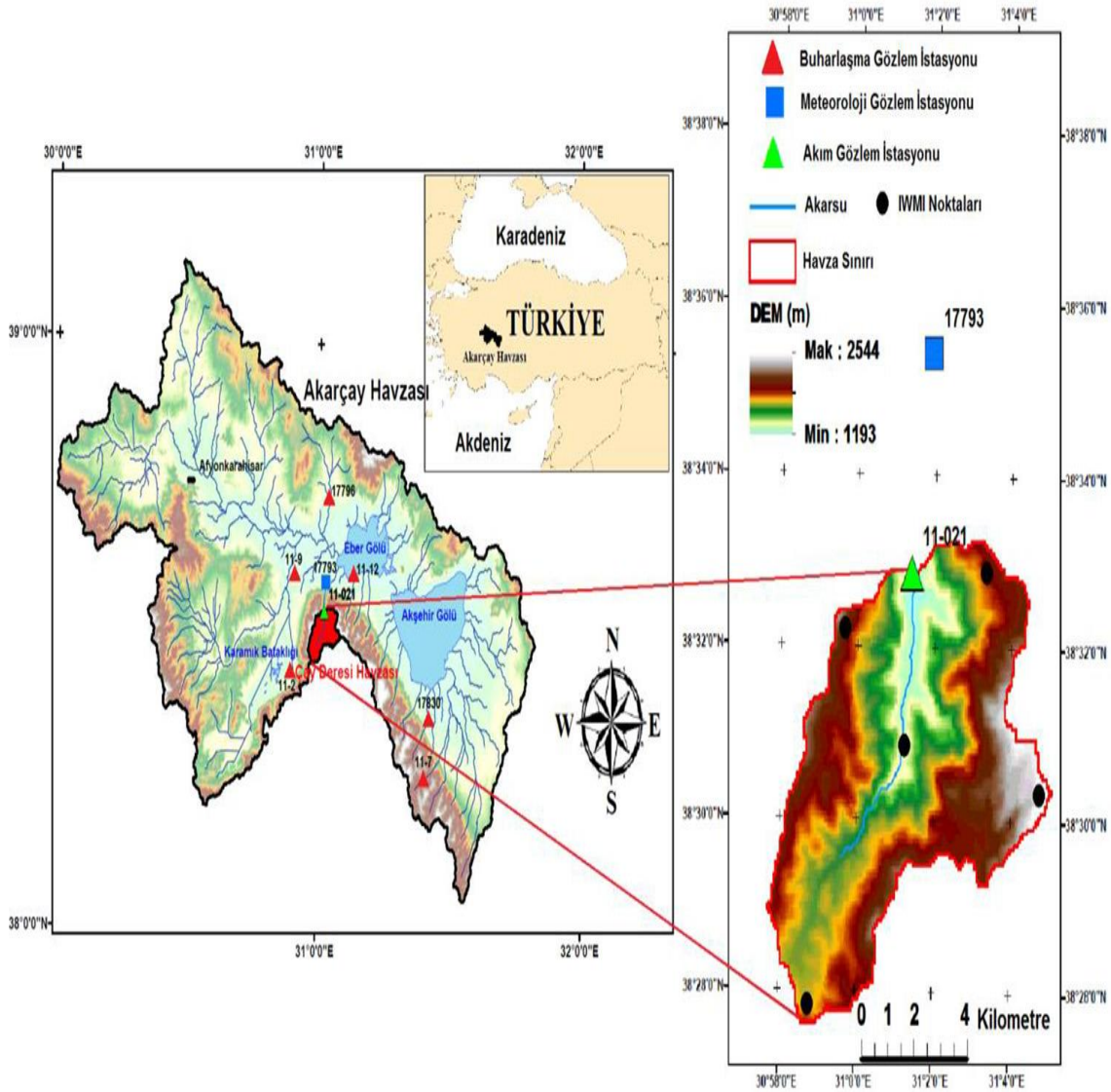


Şekil 3.7 Baraj Uydu Görüntüsü (Map Data © 2025 Google, Image©CNES/Airbus).

Söz konusu uydu görüntüsü, yalnızca görsel bir referans sağlamakla kalmayıp, HEC-RAS modelinin geometri editöründe (RAS Mapper) baraj gövde aksının, kret uzunluğunun ve dip savak/dolusavak gibi hidrolik sanat yapılarının konumlarının yüksek doğrulukla sayısallaştırılmasına (vektörleştirilmesine) altlık oluşturmuştur. Rezervuar alanının maksimum su kotundaki yayılım geometrisi ile uydu görüntüsündeki ıslak alan sınırlarının örtüştürülmesi, modelin başlangıç hacimsel koşullarının (initial conditions) kalibrasyonunda kritik bir rol oynamıştır. Ayrıca, güncel arazi örtüsü değişimleri ve kentsel yayılım trendleri bu yüksek çözünürlüklü veri üzerinden kontrol edilerek, hidrolik pürüzlülük alanlarının (Manning regions) mekânsal sınırları dinamik olarak güncellenmiştir.

Harita Genel Müdürlüğü'nden temin edilen yaklaşık 5 m çözünürlüklü DEM verisi (Şekil 3.8), havzadaki doğal ve beşeri unsurların 3 boyutlu yükseklik bilgisini modele aktarmaktadır.

Analiz verimliliğini artırmak ve donanım kaynaklarını optimize etmek amacıyla, bu geniş veri seti ArcMap yazılımında "Clip" komutu kullanılarak sadece taşkın yayılımının beklendiği kritik koridor boyunca kırpılmıştır. Bu işlem, hem simülasyon süresini kısaltmış hem de hesaplama ağının bu bölgede daha spesifik kurgulanmasına olanak tanımıştır.



Şekil 3.8 Sayısal Yükseklik Modeli (DEM Verisi)

sistemdir (Bulan, 2019). CBS; akarsu ağıları, parsel sınırları, bina envanteri ve taşkın koruma yapıları gibi heterojen veri gruplarını ortak bir referans sisteminde birleştirme yeteneğine sahiptir.

ArcMap, ArcGIS yazılım bileşenlerinin çekirdek kütüphanesi olan ArcObjects mimarisi üzerine kurgulanmış olup; kullanıcılara grafiksel (vektörel ve raster) verileri görüntüleme, güncelleme, mekansal sorgulama yapma ve yüksek kalitede kartografik sunumlar hazırlama imkanı tanır (Töreyen vd., 2010).

3.5.2 Çalışma Kapsamında ArcMap Kullanımı ve Veri Entegrasyonu

Bu çalışmada ArcMap 10.8 yazılımı, sadece bir haritalama aracı olarak değil, aynı zamanda HEC-RAS 2D modeline girdi sağlayacak bir veri işleme merkezi olarak kullanılmıştır. Yazılımın sunduğu ileri seviye araç kutuları (ArcToolbox) yardımıyla şu işlemler gerçekleştirilmiştir:

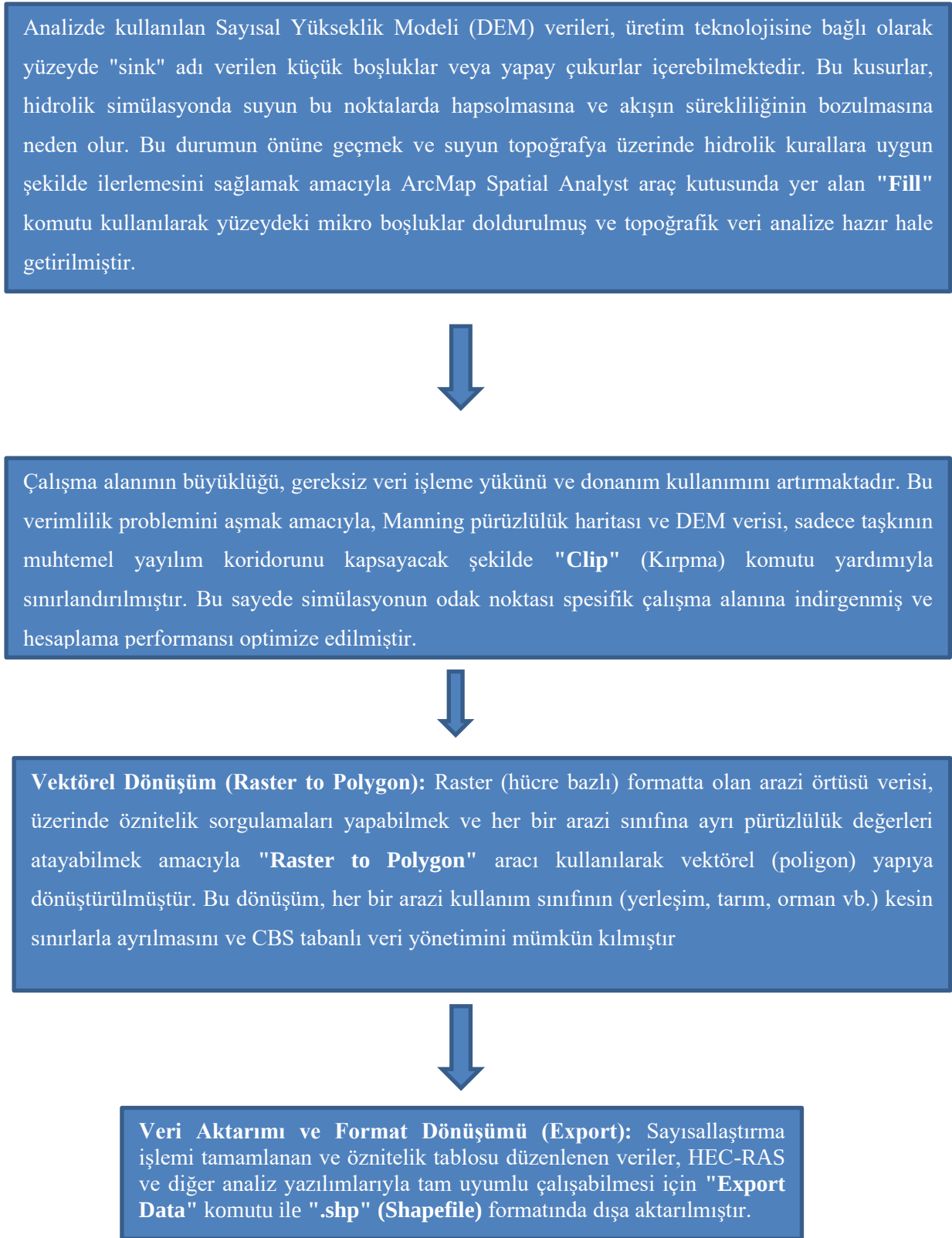
Veri Harmonizasyonu: Farklı kaynaklardan (DSİ, HGM, CORINE) gelen verilerin koordinat sistemleri (UTM Zone 30N - TUREF) uyumlu hale getirilmiştir.

Raster Analizleri: 5 m çözünürlüklü DEM verisi ile İHA kaynaklı yüksek hassasiyetli veriler birleştirilerek taşkın koridoru için optimize edilmiş sayısal yükseklik modeli üretilmiştir.

Vektörel Sayısallaştırma: Baraj gövdesi, nehir eksen ve arazi örtüsü gibi unsurlar sayısallaştırılarak hidrolik modele altlık oluşturulmuştur.

Alan Kırpma (Clip): Havza ölçeğindeki geniş veri setleri, simülasyon performansını artırmak amacıyla çalışma sınırlarına göre maskelenmiş; böylece hesaplama süresi ve sistem kaynağı kullanımı optimize edilmiştir.

Bu çalışmada yapılan iş akış diyagramı Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10 ArcMap İş Akış Diyagramı

3.5.3 Hidrolik Modelleme Yazılımı: HEC-RAS 6.2

HEC-RAS (USACE HEC,2023). (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System), ABD Ordusu Mühendisler Birliği (USACE) bünyesindeki Hidrolojik Mühendislik Merkezi tarafından geliştirilen, dünya çapında standart kabul edilen bir nehir analiz sistemidir. Yazılım; tek boyutlu (1D) sabit akış hidroliği, bir ve iki boyutlu (1D/2D) kararsız (zamana bağlı değişken) akış hidroliği, sediment taşınımı, su kalitesi ve su sıcaklığı analizleri gibi kapsamlı bir modelleme yelpazesine sahiptir.

Bu çalışma kapsamında, Çay Barajı'nın yıkılma senaryolarını gerçeğe en yakın şekilde simüle edebilmek amacıyla yazılımın 2D Kararsız Akış (Unsteady Flow) modülü kullanılmıştır. Geleneksel 1D modellerden farklı olarak 2D modelleme, taşkın sularının vadi tabanındaki yanal yayılımını, sokak aralarındaki ilerleyişini ve topoğrafik engeller etrafındaki karmaşık hidrolik davranışını daha hassas bir şekilde hesaplamaktadır.

3.5.3.1. HEC-RAS 6.2 ile Gerçekleştirilen İşlemler

Çalışmanın 4. Bölümünde detaylandırılacak olan modelleme süreci, şu temel aşamaları kapsamaktadır:

RAS Mapper Entegrasyonu: İHA verileri ve HGM'den temin edilen DEM verileri, RAS Mapper arayüzünde birleştirilerek baraj ve mansap bölgesinin yüksek çözünürlüklü dijital arazi modeli (Terrain) oluşturulmuştur.

Hesaplama Ağı (2D Flow Area) Tasarımı: Taşkın yayılım alanı üzerinde, akışın karakteristiğine uygun hücre boyutlarına sahip bir hesaplama ağı (mesh) kurgulanmıştır.

Gedik Parametrelerinin Tanımlanması (Dam Breach): Froehlich, Von Thun & Gillette gibi ampirik denklemlerden elde edilen gedik genişliği ve oluşum süresi gibi veriler, yazılımın "Breach" editörü aracılığıyla sisteme girilmiştir.

Sınır Şartlarının Atanması: Memba sınır şartı olarak barajın rezervuar hacim-satış eğrisi

ve katastrofal taşkın hidrografi; mansap sınır şartı olarak ise normal derinlik (Normal Depth) tanımlanmıştır

Hidrolik Çözüm ve Görselleştirme: Difüzyon Dalga (Diffusion Wave) denklemleri kullanılarak yapılan çözümleme neticesinde; maksimum su derinliği, akış hızı ve taşkın varış süreleri haritalandırılmıştır.

3.5.4 Agisoft Metashape (PhotoScan) ile Fotogrametrik Veri İşleme

İnsansız Hava Aracı (İHA) ile elde edilen hava fotoğraflarının üç boyutlu (3D) metrik verilere dönüştürülmesi sürecinde, "Structure from Motion" (SfM) algoritmasını temel alan Agisoft Metashape (eski adıyla PhotoScan) yazılımı kullanılmıştır. Bu yazılım, bindirmeli olarak çekilen dijital görüntüleri işleyerek yüksek hassasiyetli coğrafi ürünler üretilmesine olanak tanır.

Bu çalışma kapsamında, Çay Barajı gövdesi ve mansap bölgesine ait veriler yazılım aracılığıyla şu işlem adımlarından geçirilmiştir.

Fotoğraf Hizalama ve İç-Dış Yönelme (Alignment): İHA tarafından çekilen bindirmeli fotoğraflar yazılıma aktarılmış, pikseller arasındaki ortak noktalar üzerinden kamera konumları ve yönelimleri hesaplanarak seyrek nokta bulutu (sparse cloud) oluşturulmuştur.

Yoğun Nokta Bulutu Üretimi (Dense Point Cloud): Hizalama sonrası, her bir pikselin derinlik bilgisi hesaplanarak milyonlarca noktadan oluşan yüksek yoğunluklu nokta bulutu elde edilmiştir. Bu veri, arazideki en küçük topoğrafik değişimleri bile temsil etme kabiliyetine sahiptir.

Sayısal Yüzey ve Yükseklik Modelleri (DSM/DEM): Yoğun nokta bulutu üzerinden, yeryüzündeki tüm unsurları (bitki örtüsü, yapılar vb.) içeren Sayısal Yüzey Modeli (DSM) ve bu unsurların filtelenmesiyle elde edilen çıplak arazi modelini temsil eden Sayısal Yükseklik Modeli (DEM) üretilmiştir.

Ortofoto Mozaik Oluşturma: Geometrik bozulmaları giderilmiş, koordinatlı ve yüksek çözünürlüklü birleştirilmiş hava görüntüsü (ortofoto) elde edilerek havzanın güncel arazi kullanımı doğrulanmıştır.

Agisoft Metashape kullanılarak üretilen bu veriler, klasik 5 m çözünürlüklü DEM verilerine kıyasla cm mertebesinde dikey hassasiyet sunmaktadır. Bu hassasiyet, özellikle baraj kret yapısı ve vadi tabanındaki mikro-topoğrafyanın HEC-RAS modeline "Terrain" katmanı olarak aktarılmasında kritik rol oynamış, taşkın sularının ilerleyişindeki küçük bariyerlerin (yol setleri, kanal kenarları vb.) analiz edilmesini mümkün kılmıştır.

3.5.5 Virtual Surveyor ile Sayısal Arazi Analizi ve Veri Ayıklama

İHA yardımıyla Agisoft Metashape yazılımında üretilen yoğun nokta bulutu ve ortofoto verilerinin, hidrolik modellemeye uygun "akıllı" mühendislik verilerine dönüştürölmesi sürecinde Virtual Surveyor yazılımı kullanılmıştır. Bu yazılım, karmaşık ve yoğun veri setlerini daha yönetilebilir altlıklara dönüştürerek analiz hassasiyetini artırmaktadır. Çalışma kapsamında Virtual Surveyor bünyesinde gerçekteştirilen temel işlemler aşağıda sunulmuştur:

Veri Temizleme ve Sınıflandırma: Nokta bulutu içerisindeki gürültüler, bitki örtüsü ve geçici nesneler (araçlar, ekipmanlar vb.) filtrelenerek "çıplak yer" (bare earth) verisi elde edilmiştir. Bu işlem, suyun arazi üzerindeki ilerleyişini engelleyecek yapay yükseltilerin modelden arındırılmasını sağlamıştır.

Topografik Kesit Alımı: Baraj gövdesi ve mansap bölgesindeki kritik vadi kesitleri üzerinden sanal survey (ölçüm) teknikleri ile kesitler alınmıştır. Bu kesitler, HEC-RAS modelindeki nehir yatağı geometrisinin doğrulanmasında referans olarak kullanılmıştır.

Hacimsel Hesaplamalar ve Kot Kontrolü: Yazılımın sunduğı hassas ölçüm araçları ile baraj kret kotu ve talveg kotları üzerinden kontrol ölçümleri yapılarak, DSİ kati proje verileriyle olan uyumu denetlenmiştir.

TIN (Triangulated Irregular Network) Modeli Üretimi: Nokta bulutu verileri, hidrolik modellerin daha hızlı ve stabil çalışmasına olanak tanıyan, araziye üçgen yüzeylerle temsil eden TIN modellerine dönüştürülmüştür.

Virtual Surveyor, özellikle baraj yıkılması gibi hassas topoğrafya gerektiren çalışmalarda, İHA'dan gelen devasa veri yığınının HEC-RAS'ın "Terrain" editöründe sorunsuz işlenebilecek, düşük veri boyutlu ancak yüksek geometrik doğruluklu altlıklara indirgememize olanak tanımıştır. Bu sayede simülasyonun sayısal kararlılığı korunurken, arazinin fiziksel detayları modele maksimum düzeyde yansıtılmıştır.

4. BULGULAR

4.1 Uygulama Süreci ve Sayısal Modelin Kurulması

Hidrolik modelleme çalışmalarında, farklı kaynaklardan elde edilen verilerin (DEM, İHA verileri, uydu görüntüleri ve baraj geometrisi) birbiriyle mekânsal olarak tam örtüşmesi simülasyonun doğruluğu açısından kritiktir. Bu uyumu sağlamak için analizlerin başlangıcında projeksiyon verisi tanımlanmıştır.

4.1.1 Projeksiyon Verisi ve Referans Sistemine Tanımlama

Yeryüzünün üç boyutlu kavisli yapısının, matematiksel transformasyon yöntemleri kullanılarak iki boyutlu bir düzleme aktarılmasına projeksiyon adı verilmektedir. Bu çalışma kapsamında, tüm coğrafi verilerin aynı referans sisteminde toplanması amacıyla aşağıdaki adımlar izlenmiştir:

Referans Dosyasının Temini: Uygulamada kullanılacak verilerin koordinat birliğini sağlamak amacıyla, içerisinde coğrafi referans bilgilerini barındıran projeksiyon dosyası (.prj) oluşturulmuştur.

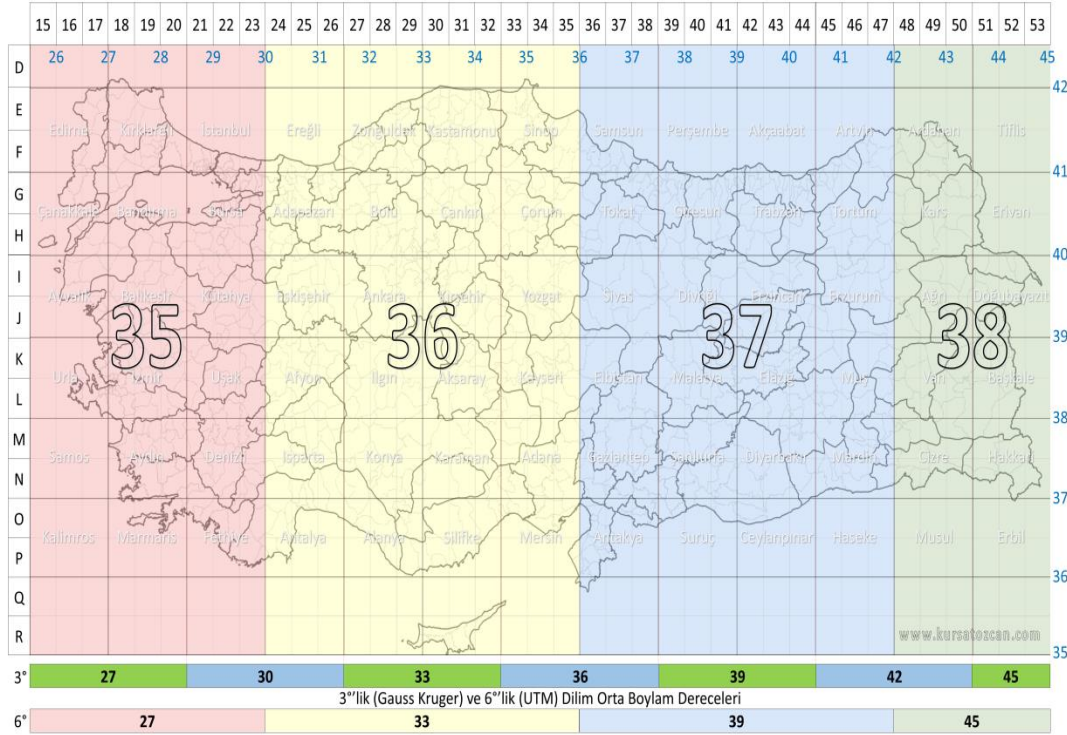
Projeksiyon Seçimi: Türkiye pafta bölümlene sistemine göre Afyonkarahisar ili 36. Bölgede (Zone 36) yer almaktadır.

Parametrelerin Belirlenmesi: Gerekli referans dosyasının temini için spatialreference.org veri tabanı üzerinden Türkiye spesifik aramalar gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın hassasiyeti ve ulusal standartlara uyumu gözetilerek ITRF96 UTM Zone 36 projeksiyon sistemi seçilmiştir.

Dosya Oluşturma: İlgili platform üzerinden ".prj" uzantılı dosya indirilerek hem ArcMap hem de HEC-RAS yazılımlarında projenin ana koordinat sistemi olarak tanımlanmıştır.

Bu tanımlama sayesinde, İHA'dan gelen yerel koordinatlı veriler ile Harita Genel Müdürlüğü'nden temin edilen ulusal veriler aynı düzlem üzerinde hatasız bir şekilde karşılaştırılmıştır.

TÜRKİYE PAFTA BÖLÜMLEMESİ



Şekil 4.1 Türkiye Pafta Bölümlemesi (İnt. Kyn. 6).

4.1.2 Arazi Örtüsü ve Pürüzlülük Verilerinin İşlenmesi

Taşkın yayılım hızını ve derinliğini etkileyen en temel hidrolik parametre olan yüzey pürüzlülüğünü (Manning) belirlemek amacıyla, Avrupa Çevre Ajansı (EEA) tarafından sunulan yüksek çözünürlüklü arazi örtüsü verileri kullanılmıştır.

4.1.2.1 Corine Veri Temini ve Mekânsal Sınırlandırma

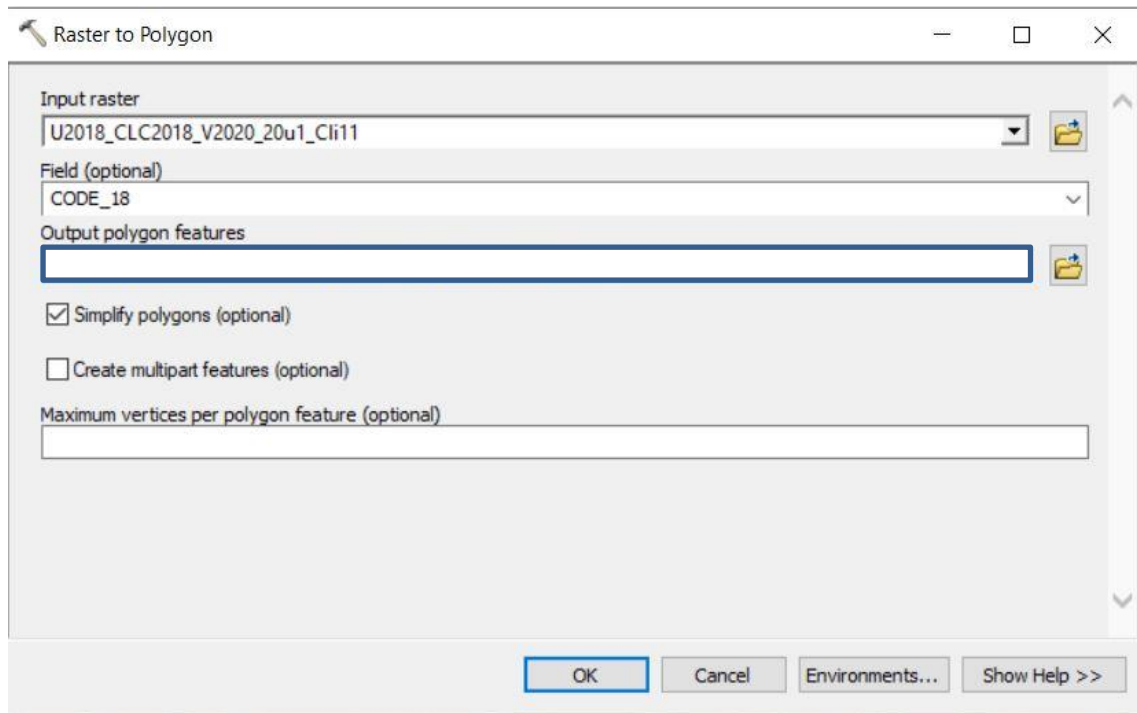
Uygulama sürecinde izlenen metodolojik adımlar aşağıda sıralanmıştır:

Veri Kaynağı: Çalışma alanına ait arazi kullanım verileri, Copernicus Land Monitoring

Service (CLMS) veri tabanı üzerinden raster formatında temin edilmiştir (CORINE,2026).

Çalışma Alanının Tanımlanması: Google Earth ortamında hassas bir şekilde belirlenen çalışma alanı sınırları, "KML to Layer" dönüşüm aracı kullanılarak ArcMap 10.8 ortamına aktarılmıştır.

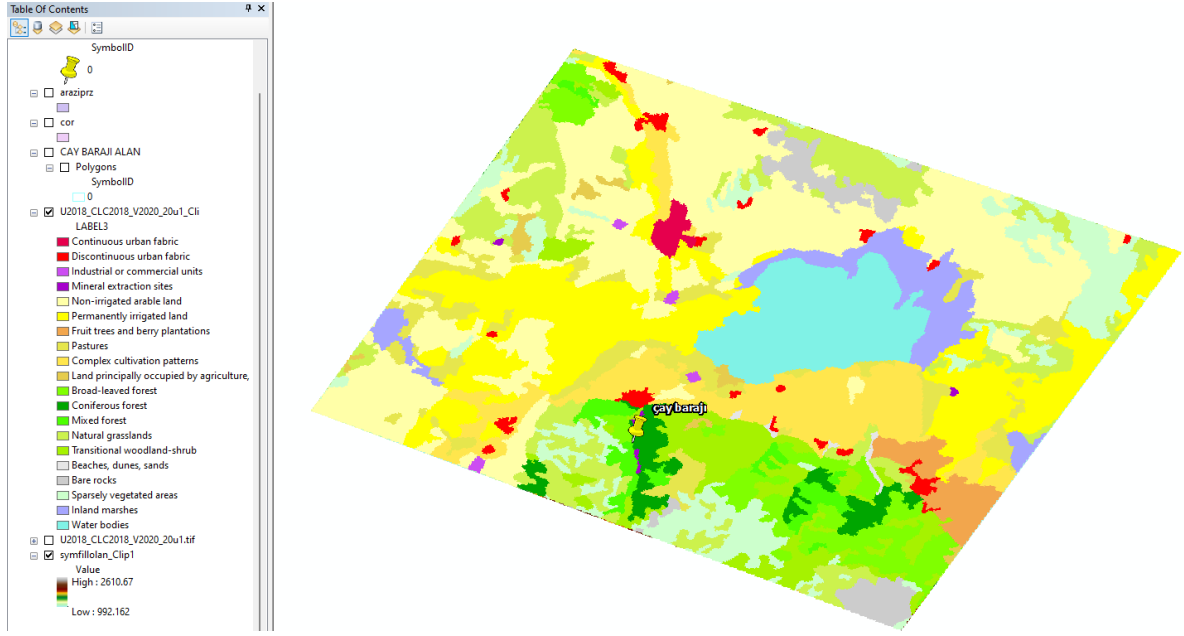
Raster Kırpma (Clip): Havza ölçeğindeki geniş raster verisi, analiz performansını artırmak ve odak alanına indirgemek amacıyla Data Management Tools - Raster - Raster Processing - Clip yolu izlenerek çalışma alanı sınırlarına göre kırpılmıştır.



Şekil 4.2 Raster to Polygon ekran görüntüsü

data - export data - shapefile komutları uygulanarak hazır hale geldi.

Veri boyutunun bu şekilde minimize edilmesi, modelin iterasyonel matris çözümlerinde işlemci (\$CPU\$) üzerindeki hesaplama yükünü hafifletmiş ve çoklu senaryo simülasyonlarının sürekliliğinde operasyonel verimlilik sağlamıştır.



Şekil 4.3 ArcMap pürüzlülük haritası ekran görüntüsü

4.1.2.2 Vektörel Dönüşüm ve Sayısallaştırma

Kırpma işlemi sonucunda elde edilen lokal raster verisi, HEC-RAS modeline pürüzlülük katmanı olarak aktarılmadan önce vektörel bir yapıya kavuşturulmuştur:

Raster to Polygon Dönüşümü: Hücre bazlı (raster) veriler, her bir arazi kullanım sınıfının kesin sınırlarını temsil eden poligonlara dönüştürülmüştür. Bu aşamada her bir poligon, CORINE sınıflandırma sistemindeki özgün arazi kodlarını bünyesinde barındırmaktadır.

Manning Katsayılarının Atanması: Elde edilen sayısal poligon tablosu üzerinden, her bir arazi kullanım tipine (yerleşim, tarım, orman vb.) karşılık gelen Manning (n) pürüzlülük değerleri atanmıştır.

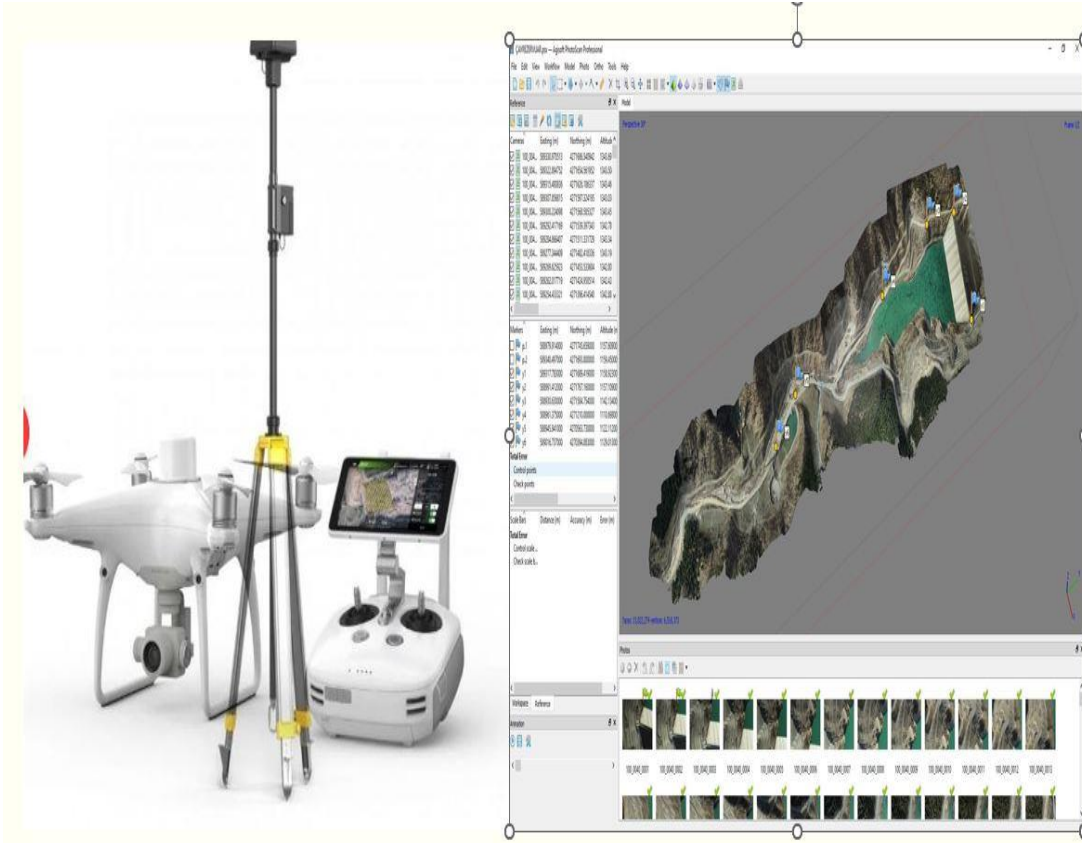
Bu işlemler neticesinde hazırlanan sayısallaştırılmış arazi örtüsü katmanı, ".shp" formatında dışa aktarılarak HEC-RAS 2D modelinde hidrolik hesaplamaları için temel altlık olarak kullanılmıştır.

4.1.3 İHA Destekli Hibrit Sayısal Arazi Modelinin (Terrain) Oluşturulması

Yeryüzü üzerindeki doğal ve yapay unsurların coğrafi koordinat bilgileriyle 3 boyutlu modellenmesi olan Sayısal Yükseklik Modeli (DEM), taşkın analizlerinin geometrik temelini oluşturur. Bu çalışmada, geniş ölçekli topoğrafyayı temsil eden 5 m çözünürlüklü veriler ile baraj gövdesi ve yakın çevresindeki mikro-topoğrafyayı temsil eden yüksek hassasiyetli İHA verileri entegre edilmiştir. Çay Barajı mansap bölgesine ait yüksek çözünürlüklü ve hassas Sayısal Yükseklik Modeli (SYM/DEM) verisinin üretilmesi amacıyla, çalışma alanında hidrolik morfolojiyi temsil edecek kritik kırılma noktalarında Yer Kontrol Noktaları (YKN) ve detay alımları gerçekleştirilmiştir. Arazi ölçümlerinde donanım olarak Topcon FC-500 kontrol ünitesi ve buna entegre çalışan GNSS alıcı sistemi kullanılmıştır. Bu doğrultuda, arazi tarama çalışmalarında DJI Phantom 4 RTK İHA sistemi donanım olarak tercih edilmiştir



Şekil 4.4 Fotogrametri yer kontrol noktaları tesisi ve İHA ile SYM üretim aşaması



Şekil 4.5 İHA veri seti Çay Barajı Sayısal yükseklik modeli

4.1.3.1 HGM Verilerinin Ön İşlemesi ve Optimizasyonu

Harita Genel Müdürlüğü'nden temin edilen Afyonkarahisar ili kapsamındaki 5 m çözünürlüklü DEM verisi üzerinde şu teknik adımlar uygulanmıştır:

Veri Aktarımı ve Sınırlandırma: Ham DEM verisi ArcMap programına "Add Data" ile yüklenmiş; ardından Data Management Tools-Raster-Raster Processing -Clip yolu izlenerek çalışma alanı sınırlarına göre kırpılmıştır.

Hidrolojik Düzeltme (Fill): Veri setindeki üretim kaynaklı boşlukları ve ani yükseklik değişimlerini (sinks) gidermek amacıyla Spatial Analyst Tools -Hydrology-Fill komutu uygulanmıştır. Bu işlem, suyun yapay çukurlarda hapsolmasını engelleyerek akış sürekliliğini sağlamıştır. İşlem sonunda veri, modelleme için ".tif" formatında dışa aktarılmıştır.

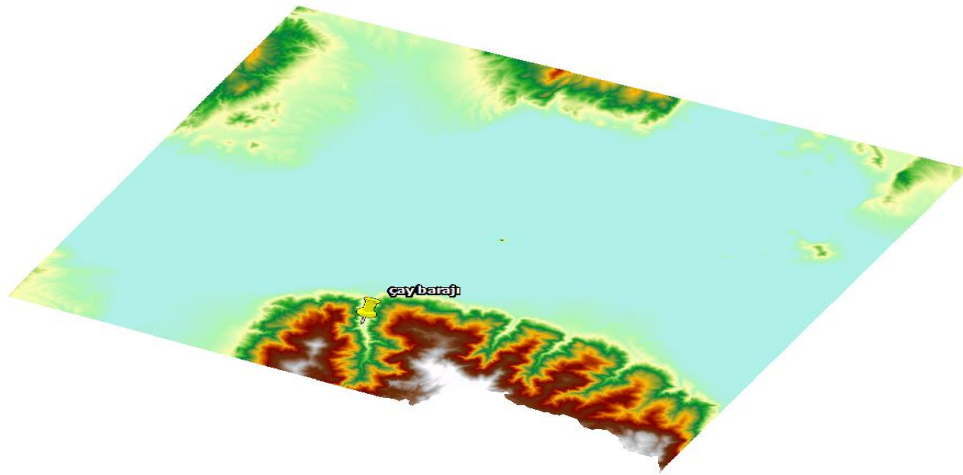
4.1.3.2 İHA Veri Entegrasyonu ve Hibrit Model (Merging)

Baraj yıkılması gibi yüksek hassasiyet gerektiren senaryolarda, gövde geometrisinin ve mansap koridorundaki detayların doğru temsil edilmesi için İHA verileri hiyerarşik bir yapıda sürece dahil edilmiştir:

Hassas Veri İşleme: İHA fotogrametrisi ile elde edilen milyonlarca noktadan oluşan yoğun nokta bulutu, Virtual Surveyor yazılımında optimize edilerek HEC-RAS'ın performansını düşürmeyecek ancak geometrik detayları koruyacak bir yapıya dönüştürülmüştür.

Veri Birleştirme: HEC-RAS yazılımının RAS Mapper arayüzünde, İHA verilerinden gelen cm hassasiyetindeki arazi modeli (öncelikli katman) ile HGM'den gelen 5 m çözünürlüklü model (taban katman) çakıştırılmıştır.

Bu hibrit yaklaşım, Virtual Surveyor sayesinde veri boyutunun optimize edilmesini sağlarken, baraj gedikinin oluşacağı bölgedeki fiziksel detayların (şevler, yol setleri, kret yapısı) modele maksimum sadakatle aktarılmasına ve simülasyonun sayısal kararlılığının korunmasına olanak tanımıştır.



Şekil 4.6 uygulamaya hazır DEM verisi ekran görüntüsü

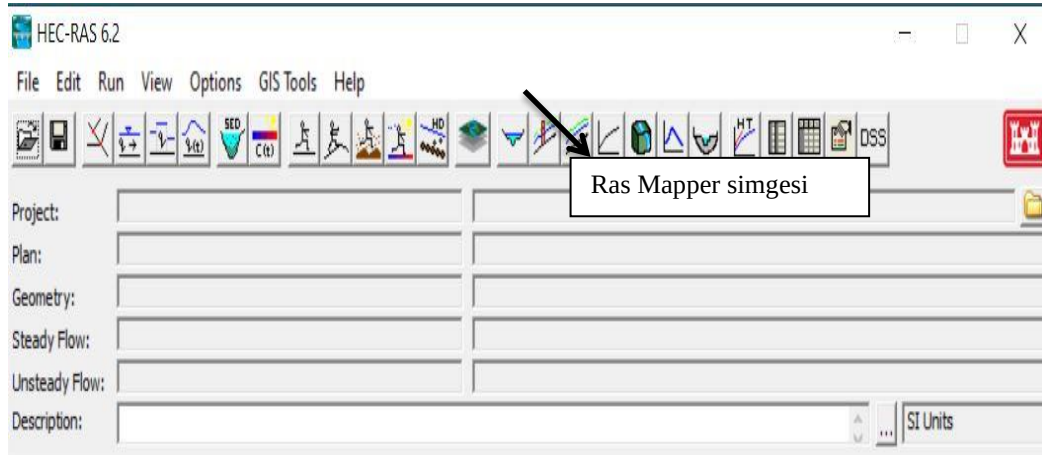
"Mekânsal verilerin ArcMap ortamındaki ön işleme ve optimizasyon süreçlerinin tamamlanmasıyla birlikte, baraj yıkılma senaryolarının koşturulacağı hidrolik modelleme aşamasına (HEC-RAS) geçiş için gerekli sayısal altlıklar hazır hale getirilmiştir."

4.2 HEC-RAS ile Modelleme

Çay Barajı yıkılma analizleri, USACE tarafından geliştirilen HEC-RAS 6.2 yazılımının iki boyutlu (2D) kararsız akış modülü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Modelleme süreci; veri entegrasyonu, geometrik tanımlamalar ve sınır şartlarının belirlenmesi olmak üzere üç temel aşamadan oluşmaktadır.

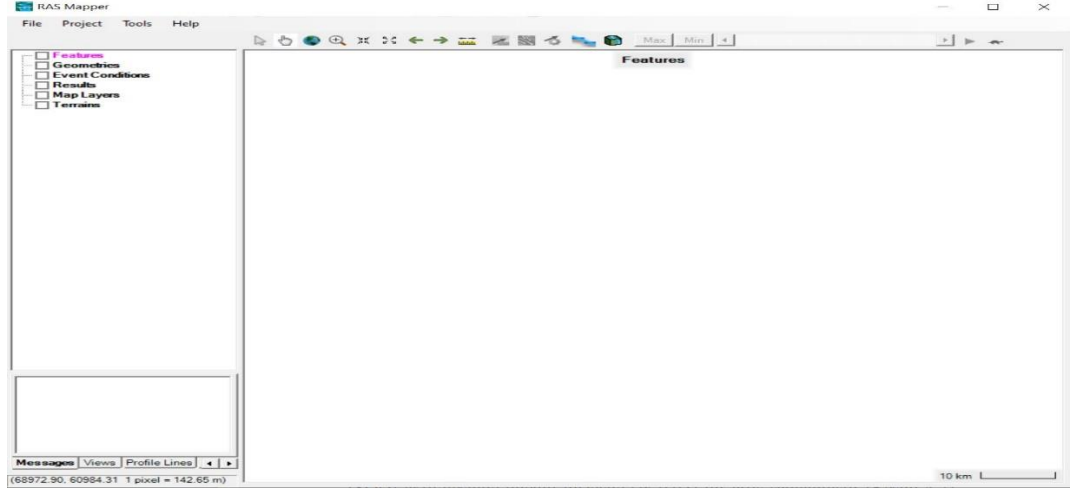
4.2.1 RAS Mapper: Veri Entegrasyonu ve Arazi Hazırlığı

Proje Kurulumu ve Birim Sistemi: Yazılımın açılış ekranında (Şekil 4.7), "Options - Unit System" sekmesinden uluslararası standartlara uygun olarak "Metric System" (SI) seçilmiş ve proje dizini tanımlanmıştır.



Şekil 4.7 HEC-RAS 6.2 Açılış ekran görüntüsü

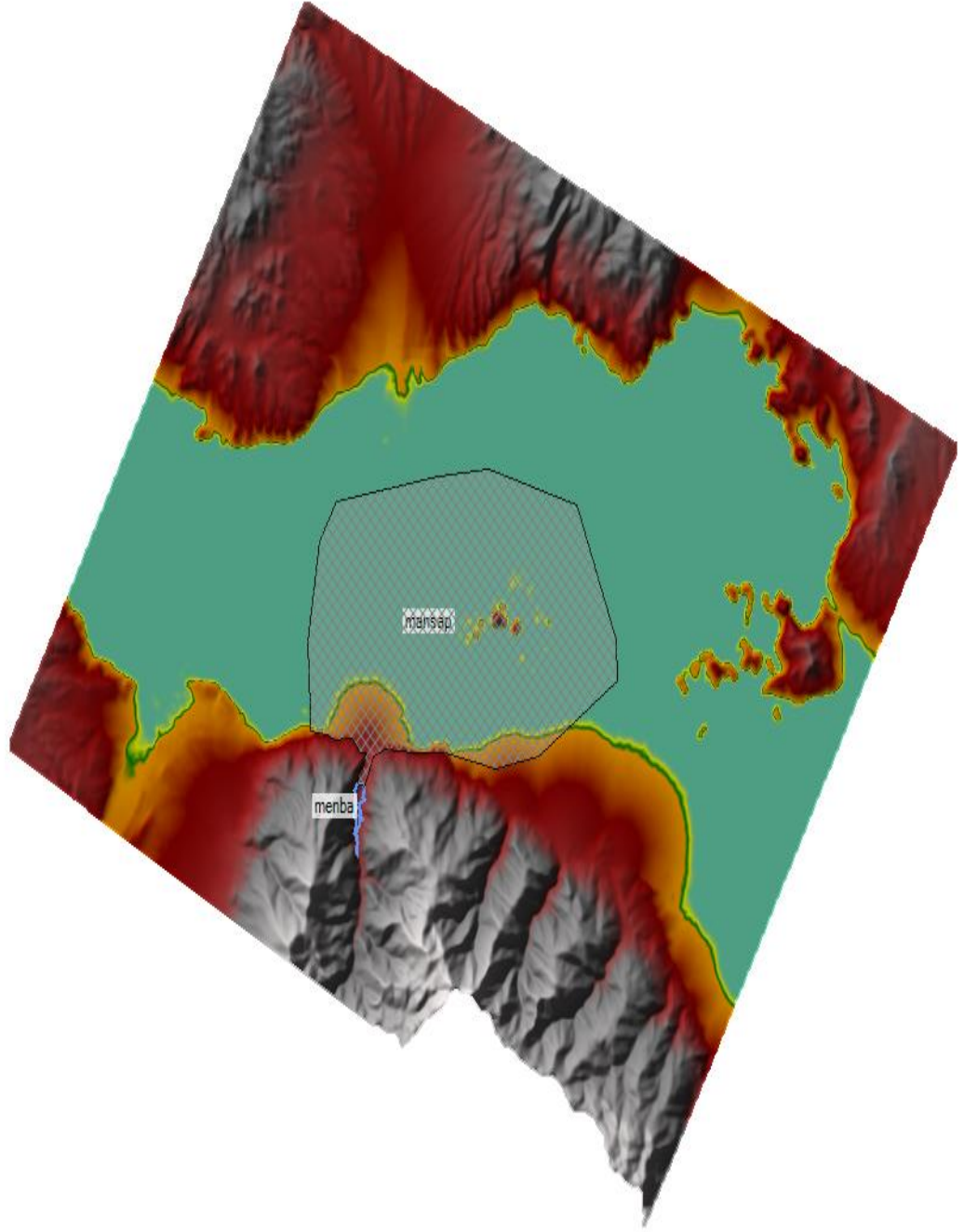
Projeksiyon ve Koordinat Tanımlama: Verilerin çıkışma hassasiyeti için "Project – Set Projection" yoluyla, daha önce temin edilen ITRF96 UTM Zone 36 projeksiyon dosyası sisteme yüklenmiştir.



Şekil 4.8 Ras Mapper ekran görüntüsü

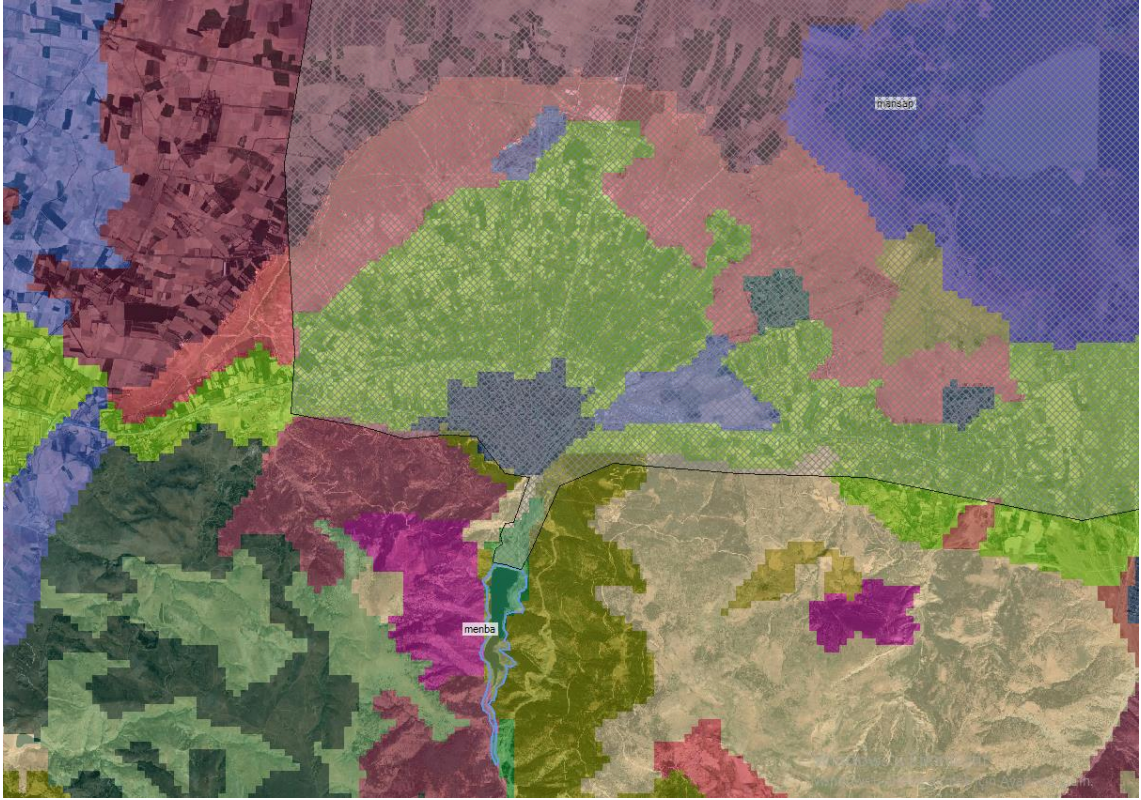
Hibrit Terrain (Arazi) Oluşturulması: "Terrains" modülü altında, HGM'den temin edilen 5 m çözünürlüklü DEM ile İHA verilerinden üretilen yüksek çözünürlüklü veriler birleştirilerek "Create a New RAS Terrain" komutuyla ana model oluşturulmuştur (Şekil 4.9).

HEC-RAS'ta terrain, çalışma alanının topoğrafik yapısını ve her noktadaki zemin kotunu temsil eden sayısal arazi modelidir. Genellikle DEM, DTM, LiDAR veya insansız hava aracı fotogrametrisi verilerinden oluşturulan terrain yüzeyi; akarsu yatağı, taşkın ovası, vadi tabanı, yol dolguları, seddeler ve diğer topoğrafik unsurların modele aktarılmasını sağlar. İki boyutlu hidrolik modellemelerde suyun akış yönü, yayılma alanı, su derinliği, akım hızı ve su yüzü kotu büyük ölçüde terrain verisine bağlı olarak hesaplanmaktadır. HEC-RAS, terrain verisini kullanarak her hesaplama hücresi için kot-hacim ve kot-alan ilişkilerini oluşturmakta, su derinliğini ise hesaplanan su yüzü kotu ile arazi kotu arasındaki farktan belirlemektedir. Bu nedenle terrain verisinin doğruluğu ve çözünürlüğü, özellikle baraj yıkılması ve taşkın yayılımı analizlerinde model sonuçlarının güvenilirliğini doğrudan etkilemektedir. Terrain ile hesaplama ağı birbirinden farklı kavramlardır; terrain arazi yüzeyini temsil ederken, mesh bu yüzey üzerinde hidrolik hesaplamaların gerçekleştirildiği hücrelerden oluşmaktadır. Ayrıca uydu tabanlı sayısal yükseklik modellerinde akarsu yatağının gerçek derinliğinin yeterince temsil edilememesi durumunda, mümkün olduğu durumlarda terrain verisinin arazi ölçümleri, enkesitler ve batimetrik verilerle iyileştirilmesi önerilmektedir.



Şekil 4.9 HEC-RAS programı dem verisi ekran görüntüsü

Arazi Pürüzlülük Katmanı (Land Cover): CORINE tabanlı pürüzlülük haritası, "Map Layers > Create a New RAS Layer" yoluyla sisteme aktarılmıştır. "Edit Land Cover Data Table" sekmesinde, Pinto (2014) ve literatür çalışmaları referans alınarak arazi kodlarına (CODE_18) karşılık gelen Manning (n) değerleri tanımlanmıştır (Şekil 4.10, 4.11).



Şekil 4.10 HEC-RAS programı arazi pürüzlülük haritası

Code	Designation	n	Code	Designation	n
111	Continuous urban fabric	0.230	242	Complex cultivation patterns	0.023
112	Discontinuous urban fabric	0.115	243	Agriculture, w/significant natural vegetation	0.058
121	Industrial or commercial units	0.230	244	Agro-forestry areas	0.058
122	Roads and rail networks and associated land	0.038	311	Broad-leaved forest	0.230
124	Airports	0.230	312	Coniferous forest	0.127
131	Mineral extraction sites	0.104	313	Mixed forest	0.230
132	Dump sites	0.115	321	Natural grasslands	0.039
133	Construction sites	0.115	322	Moors and heathland	0.058
142	Sport and leisure facilities	0.023	323	Sclerophyllous vegetation	0.058
211	Non-irrigated arable land	0.043	324	Transitional woodland-shrub	0.058
212	Permanently irrigated land	0.043	331	Beaches, dunes, sands	0.138
213	Rice fields	0.023	332	Bare rocks	0.104
221	Vineyards	0.043	333	Sparsely vegetated areas	0.104
222	Fruit trees and berry plantations	0.043	334	Burnt areas	0.104
223	Olive groves	0.043	411	Inland marshes	0.115
231	Pastures	0.298	511	Water courses	0.035
241	Annual crops associated w/permanent crops	0.043	512	Water bodies	0.035

Şekil 4.11 Manning değerleri tablosu (Pinto 2014)

4.2.2 Geometrik Verilerin Oluşturulması ve Sınır Şartları

Barajın fiziksel özellikleri ve hidrolik bağlantıları bu modül üzerinden sisteme girilmiştir.

SA/2D Connection (Baraj Aksı): Rezervuar (Storage Area) ve taşkın sahası (2D Flow Area) arasına, baraj kret uzunluğu boyunca baraj aksı yerleştirilmiştir.

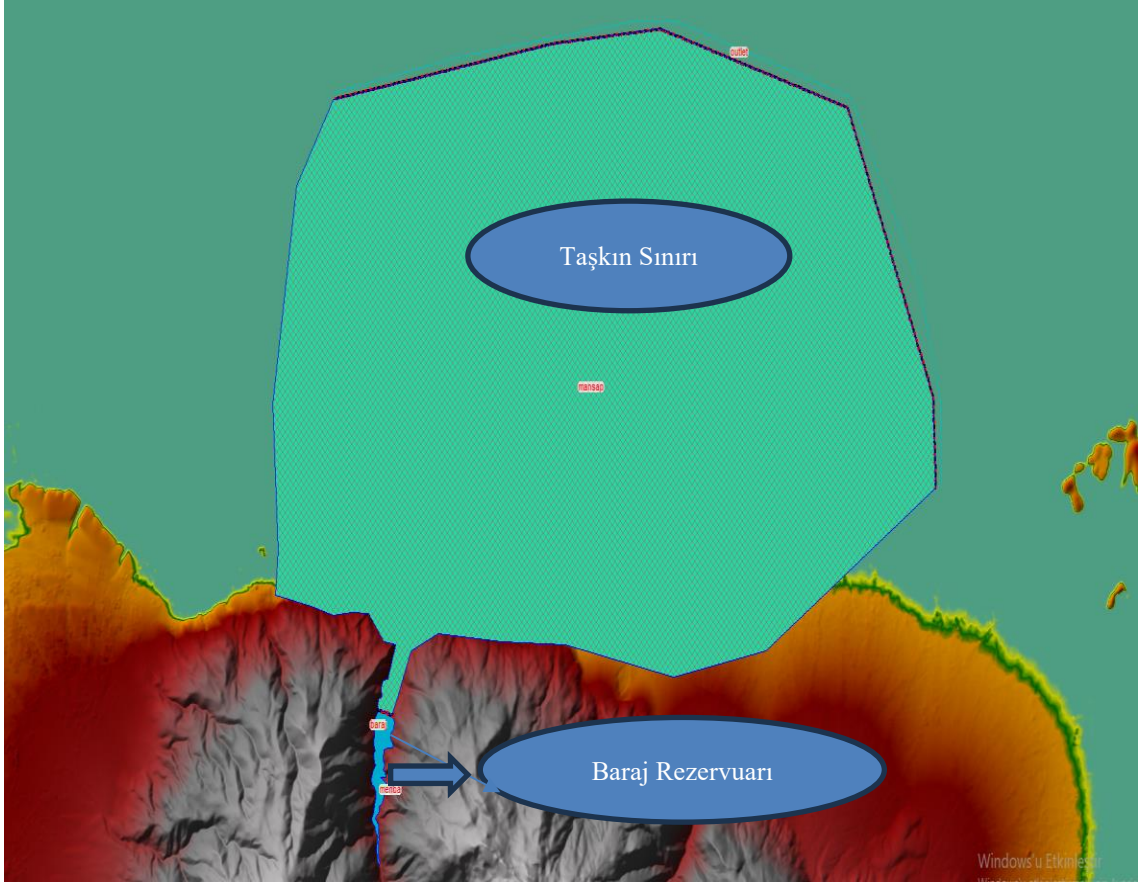
Gövde Yapısı (Weir/Embankment): "Edit SA/2D Conn" editörü içerisinde baraj kret kotu, kret genişliği ve dolusavak geometrisi tanımlanmıştır.

Rezervuar Dinamiğı: DSI kati projesinden alınan ve kret kotuna kadar enterpole edilerek güncellenen Hacim-Kot-Alan grafiğı, "Storage Area" editörüne girilerek göl hacmi sayısal olarak oluşturulmuştur.

Gedik Parametreleri (Breach Data): Analizin kalbi olan "Breach Plan Data" sekmesine geçilerek, farklı ampirik denklemlerden (Froehlich, Von Thun vb.) elde edilen gedik genişliği, yan şev eğimleri ve oluşum süresi verileri sisteme girilmeye hazır hale getirilmiştir.

2D Flow Area ile taşkın bölgesini çizdik. Mesh yapısını topoğrafyayı ve sokakları en hassas şekilde yakalamak ama bilgisayarı da kilitlememek için 20x20 seçtik ve kırılma hatları (breaklines) ekledik. CORINE verilerini suyun binalara ve tarım arazilerine çarptığındaki sürtünme yavaşlamasını Manning (n) modele dahil etmek için kullandık.

Taşkın sınırını ise baraj yıkılma debisinin vadi boyunca Saint-Venant denklemleriyle çözülmesi neticesinde, su derinliğinin sıfırdan büyük olduğı ve topoğrafik engellere çarpıp durduğı nihai hidrolik ıslak alan sınırına göre belirledik.



Şekil 4.12 taşkın sınırı ve baraj rezervuarının çizimlerinin görüntüsü

4.2.3 Baraj Gedik (Breach) Parametrelerinin Tanımlanması

Baraj yıkılma analizlerinin doğruluk derecesi, gediğin fiziksel boyutlarının ve oluşum süresinin ne derece gerçekçi tahmin edildiğine bağlıdır. HEC-RAS 6.2 yazılımı, kullanıcı tarafından girilen temel baraj verileri ve gedik taban kotu tahmini doğrultusunda, literatürde kabul görmüş ampirik denklemleri kullanarak gedik geometrisini hesaplamaktadır.

4.2.3.1 Ampirik Yaklaşımlar ve Parametre Girişi

Bu çalışmada, tek bir yönteme bağlı kalmanın getirebileceği hata payını minimize etmek amacıyla beş farklı denklem seti üzerinden analizler gerçekleştirilmiştir;

Çoklu senaryo analizi gedik parametrelerinin belirlenmesinde Froehlich (1995, 2008), Von Thun & Gillette (1990), MacDonald & Langridge-Monopolis (1984) ve Xu & Zhang (2009) gibi literatürde yaygın kullanılan denklemlerden yararlanılmış; elde edilen bulguların ortalama değerleri nihai analiz için kabul edilmiştir.

Breach plan data editörü hesaplanan bu değerler HEC-RAS bünyesindeki "Breach Plan Data" editörüne aktarılmıştır. Bu aşamada, simülasyonun baraj yapısı üzerindeki yıkılma mekanizmasını tetiklemesi için "Breach this structure" seçeneği aktif hale getirilmiştir.

Gedik gelişim süreci gediğin enine ve boyuna ilerleyişi (overtopping senaryosuna göre), "Failure Mode" kısmında tanımlanmış ve suyun kret kotuna ulaştığı andaki hidrolik basınçla eş zamanlı olarak başlatılmıştır.

4.2.3.2 Hesaplanan Gedik Karakteristikleri

Aşağıdaki şekillerde, Çay Barajı'nın fiziksel özellikleri ve literatürdeki yaygın ampirik denklemlerin istatistiksel ortalaması neticesinde elde edilen, hidrolik modele girdi olarak sağlanan temel parametreler özetlenmiştir. Şekil 4.13'te baraj kret uzunluğu, barajın talvegden olan yapısal yüksekliği, şev eğimleri gibi geometrik veriler ile rezervuar hacim-alan ilişkileri tanımlanmıştır. Ampirik literatürde yer alan her bir denklem setinin ürettiği farklı gedik parametreleri hassasiyet analizine tabi tutulmuş ve en kritik senaryoyu temsil eden deterministik gedik denklem seti simülasyonlar için seçilmiştir. Şekil 4.14'te ise seçilen bu yöntem doğrultusunda hesaplanan nihai gedik yükseklikleri, taban genişlikleri ve yan şev eğimleri uzamsal olarak tanımlanmıştır. Çay Barajı'nın homojen olmayan dolgu yapısı göz önünde bulundurularak, gediğin oluşum süresi ile zamana bağlı genişleme hızı arasındaki doğrusal olmayan korelasyon model interpolasyonuna dahil edilmiştir. Çalışmanın tutarlılığını ve güvenilirliğini artırmak adına, literatürde kabul görmüş diğer ampirik yaklaşımlar için de aynı parametrik hesaplama aşamaları ve geometri kurguları tekrarlanarak çoklu senaryo analizleri tamamlanmıştır..

Storage Area Connection Breach Data

SA Connection: [baraj] [Delete this Breach ...] [Delete all Breaches ...]

☒ **Breach This Structure**

Breach Method: [User Entered Data]

Center Station: [230]

Final Bottom Width: [12]

Final Bottom Elevation: [1081]

Left Side Slope: [1.4]

Right Side Slope: [1.4]

Breach Weir Coef: [1.44]

Breach Formation Time (hrs): [0.35]

Failure Mode: [Overtopping]

Piping Coefficient: [0.5]

Initial Piping Elev: []

Trigger Failure at: [WS Elev]

Starting WS: [1155.5]

Breach Plot | Breach Progression | Simplified Physical | Physical Breaching (DLBreach) | Parameter Calculator | Breach Repair (optional)

Input Data

Top of Dam Elevation (m): [1155.5] Breach Bottom Elevation (m): [1081]

Pool Elevation at Failure (m): [1155.5] Pool Volume at Failure (1000 m3): [16400]

Failure mode: [Overtopping]

MacDonald

Dam Crest Width (m): [10.45] Slope of US Dam Face Z1 (H:V): [1.4]

Earth Fill Type: [Non-homogeneous or Rockfill] Slope of DS Dam Face Z2 (H:V): [1.6]

Xu Zhang (and Von Thun)

Dam Type: [Concrete-faced dam] Dam Erodibility: [Medium]

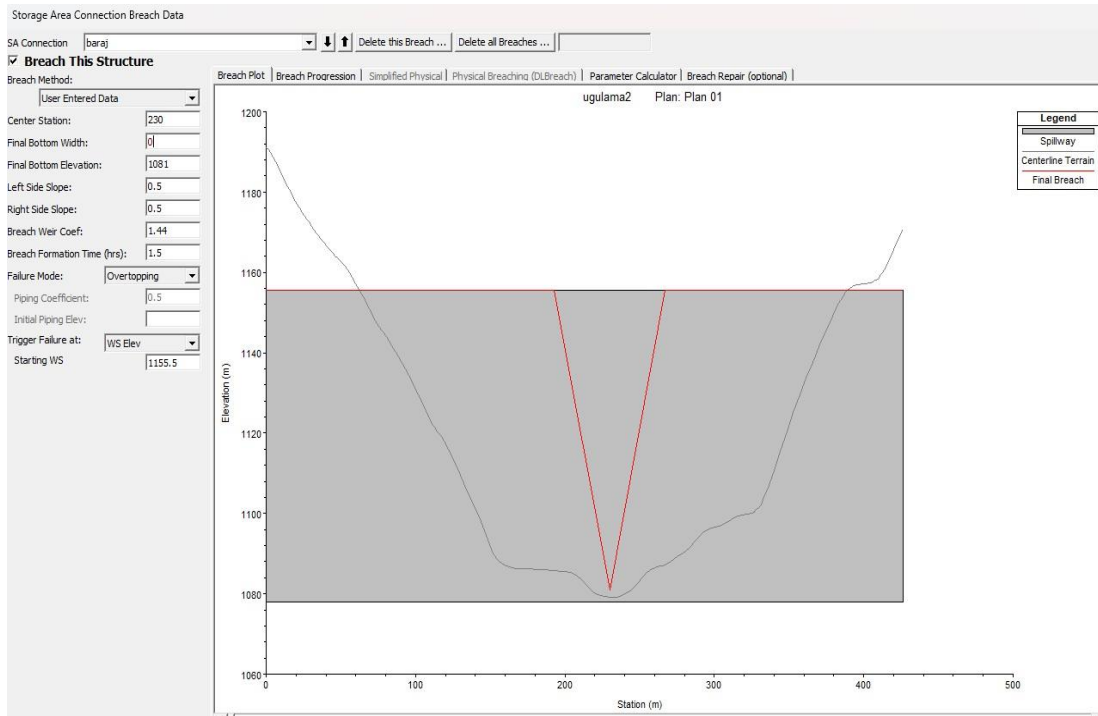
Method	Breach Bottom Width (m)	Side Slopes (H:V)	Breach Development Time (hrs)	
MacDonald et al	-5	0.5	1.50	Select
Froehlich (1995)	12	1.4	0.35	Select
Froehlich (2008)	10	1	0.30	Select
Von Thun & Gillette	204	0.5	1.74	Select
Xu & Zhang	98	0.93	0.69 *	Select

* Note: the breach development time from the Xu Zhang equation includes more of the initial erosion period and post erosion than what is used in the HEC-RAS breach formation time.

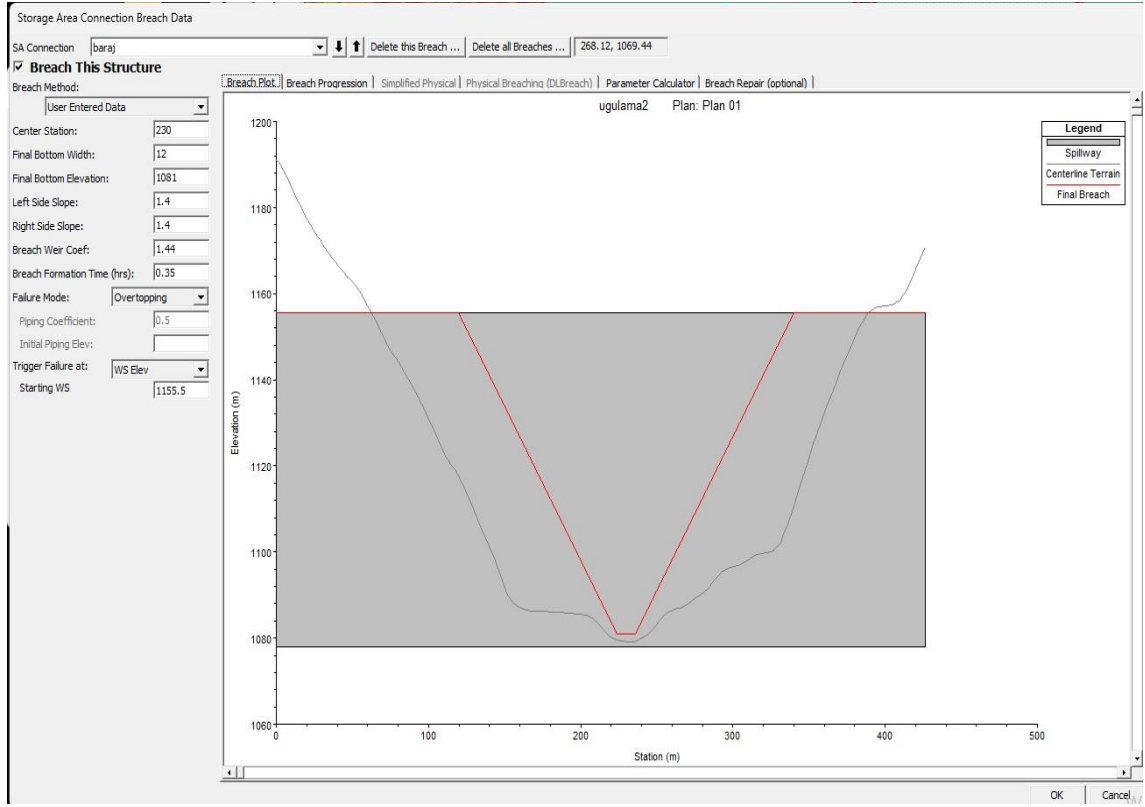
Wind

OK Cancel

Şekil 4.13 MacDonald et al yöntemiyle elde edilen ve modele entegre edilen baraj gedik parametreleri.



Şekil 4.14 MacDonald et al oluşan gedik hali



Şekil 4.15 Froehlich 1995 yöntemiyle elde edilen ve modele entegre edilen baraj gedik parametreleri.

Storage Area Connection Breach Data

SA Connection: [baraj] [Delete this Breach ...] [Delete all Breaches ...]

Breach This Structure

Breach Method: [User Entered Data]

Center Station: 230

Final Bottom Width: 12

Final Bottom Elevation: 1081

Left Side Slope: 1.4

Right Side Slope: 1.4

Breach Weir Coef: 1.44

Breach Formation Time (hrs): 0.35

Failure Mode: [Overtopping]

Piping Coefficient: 0.5

Initial Piping Elev: []

Trigger Failure at: [WS Elev]

Starting WS: 1155.5

Breach Plot: [Breach Progression] [Simplified Physical] [Physical Breaching (DLBreach)] [Parameter Calculator] [Breach Repair (optional)]

Input Data:

Top of Dam Elevation (m): 1155.5 Breach Bottom Elevation (m): 1081

Pool Elevation at Failure (m): 1155.5 Pool Volume at Failure (1000 m³): 16400

Failure mode: [Overtopping]

MacDonald:

Dam Crest Width (m): 10.45 Slope of US Dam Face Z1 (H:V): 1.4

Earth Fill Type: [Non-homogeneous or Rockfill] Slope of DS Dam Face Z2 (H:V): 1.6

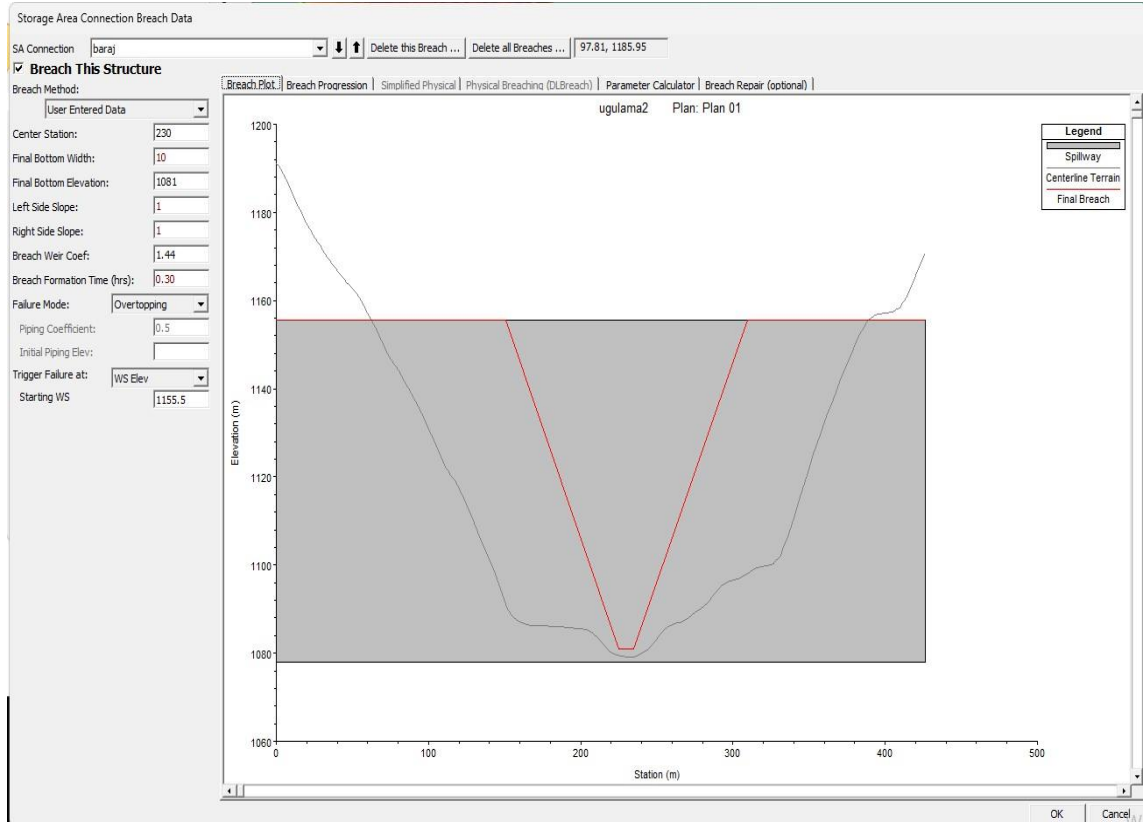
Xu Zhang (and Von Thun):

Dam Type: [Concrete-faced dam] Dam Erodibility: [Medium]

Method	Breach Bottom Width (m)	Side Slopes (H:V)	Breach Development Time (hrs)	
MacDonald et al	-5	0.5	1.50	Select
Froehlich (1995)	12	1.4	0.35	Select
Froehlich (2008)	10	1	0.30	Select
Von Thun & Gillete	204	0.5	1.74	Select
Xu & Zhang	98	0.93	0.69 *	Select

* Note: the breach development time from the Xu Zhang equation includes more of the initial erosion period and post erosion than what is used in the HEC-RAS breach formation time.

Şekil 4.16 Froehlich 1995 oluşan gedik hali



Şekil 4.17 Froehlich 2008 yöntemiyle elde edilen ve modele entegre edilen baraj gedik parametreleri.

Storage Area Connection Breach Data

SA Connection: [baraj] [Delete this Breach ...] [Delete all Breaches ...]

☒ Breach This Structure

Breach Method: [User Entered Data]

Center Station: [230]
 Final Bottom Width: [10]
 Final Bottom Elevation: [1081]
 Left Side Slope: [1]
 Right Side Slope: [1]
 Breach Weir Coef: [1.44]
 Breach Formation Time (hrs): [0.30]
 Failure Mode: [Overtopping]
 Piping Coefficient: [0.5]
 Initial Piping Elev: []
 Trigger Failure at: [WS Elev]
 Starting WS: [1155.5]

Breach Plot | Breach Progression | Simplified Physical | Physical Breaching (DLBreach) | Parameter Calculator | Breach Repair (optional)

Input Data

Top of Dam Elevation (m): [1155.5] Breach Bottom Elevation (m): [1081]
 Pool Elevation at Failure (m): [1155.5] Pool Volume at Failure (1000 m3): [16400]
 Failure mode: [Overtopping]

MacDonald
 Dam Crest Width (m): [10.45] Slope of US Dam Face Z1 (H:V): [1.4]
 Earth Fill Type: [Non-homogeneous or Rockfill] Slope of DS Dam Face Z2 (H:V): [1.6]

Xu Zhang (and Von Thun)
 Dam Type: [Concrete-faced dam] Dam Erodibility: [Medium]

Method	Breach Bottom Width (m)	Side Slopes (H:V)	Breach Development Time (hrs)	
MacDonald et al	-5	0.5	1.50	Select
Froehlich (1995)	12	1.4	0.35	Select
Froehlich (2008)	10	1	0.30	Select
Von Thun & Gillette	204	0.5	1.74	Select
Xu & Zhang	98	0.93	0.69 *	Select

* Note: the breach development time from the Xu Zhang equation includes more of the initial erosion period and post erosion than what is used in the HEC-RAS breach formation time.

OK Cancel

Şekil 4.18 Froehlich 2008 yöntemiyle oluşan gedik hali

Storage Area Connection Breach Data

SA Connection: [baraj] [Delete this Breach ...] [Delete all Breaches ...]

☒ **Breach This Structure**

Breach Method: [User Entered Data]

Center Station: [230]
 Final Bottom Width: [204]
 Final Bottom Elevation: [1081]
 Left Side Slope: [0.5]
 Right Side Slope: [0.5]
 Breach Weir Coef: [1.44]
 Breach Formation Time (hrs): [1.74]
 Failure Mode: [Overtopping]
 Piping Coefficient: [0.5]
 Initial Piping Elev: []
 Trigger Failure at: [WS Elev]
 Starting WS: [1155.5]

Breach Plot | Breach Progression | Simplified Physical | Physical Breaching (DLBreach) | Parameter Calculator | Breach Repair (optional)

Input Data

Top of Dam Elevation (m): [1155.5] Breach Bottom Elevation (m): [1081]
 Pool Elevation at Failure (m): [1155.5] Pool Volume at Failure (1000 m3): [16400]
 Failure mode: [Overtopping]

MacDonald
 Dam Crest Width (m): [10.45] Slope of US Dam Face Z1 (H:V): [1.4]
 Earth Fill Type: [Non-homogeneous or Rockfill] Slope of DS Dam Face Z2 (H:V): [1.6]

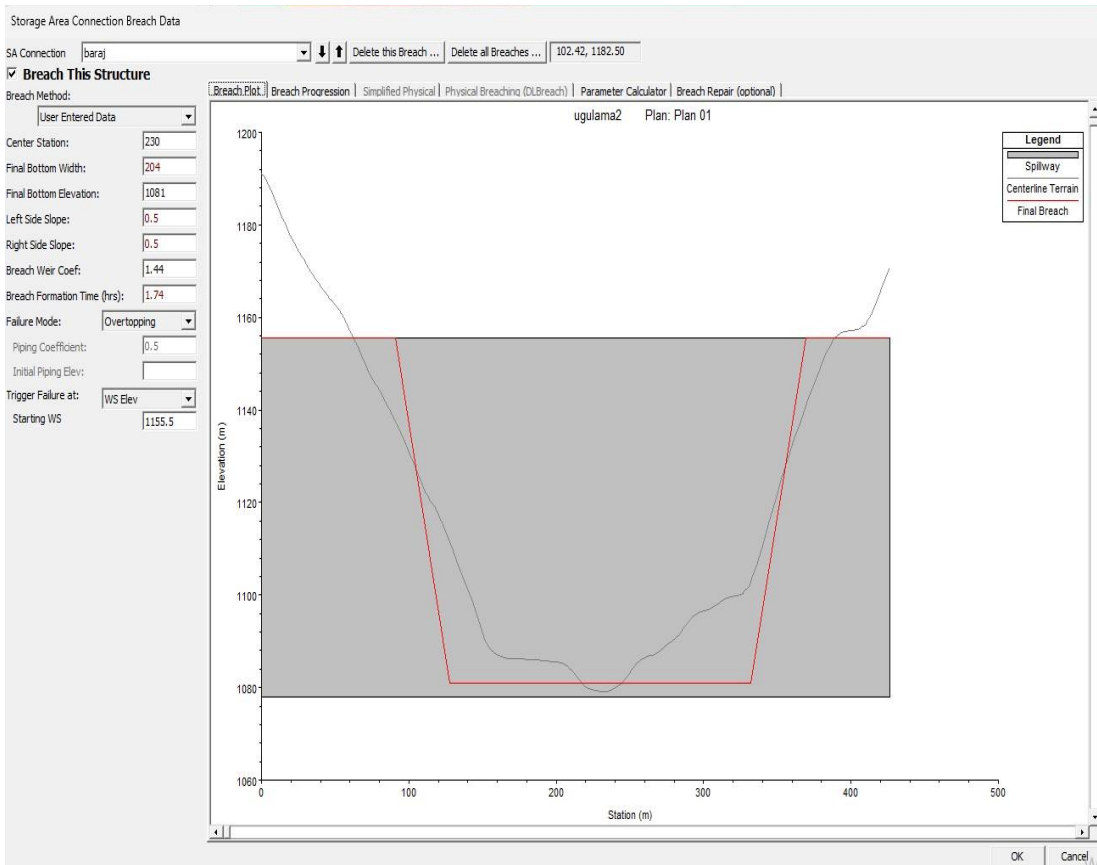
Xu Zhang (and Von Thun)
 Dam Type: [Concrete-faced dam] Dam Erodibility: [Medium]

Method	Breach Bottom Width (m)	Side Slopes (H:V)	Breach Development Time (hrs)	
MacDonald et al	-5	0.5	1.50	Select
Frøehlich (1995)	12	1.4	0.35	Select
Frøehlich (2008)	10	1	0.30	Select
Von Thun & Gillette	204	0.5	1.74	Select
Xu & Zhang	98	0.93	0.69 *	Select

* Note: the breach development time from the Xu Zhang equation includes more of the initial erosion period and post erosion than what is used in the HEC-RAS breach formation time.

OK Cancel

Şekil 4.19 Von Thun & Gillette yöntemiyle elde edilen ve modele entegre edilen baraj gedik parametreleri.



Şekil 4.20 Von Thun & Gillette yöntemiyle oluşan gedik hali

Storage Area Connection Breach Data

SA Connection:

☒ **Breach This Structure**

Breach Method:

Center Station:

Final Bottom Width:

Final Bottom Elevation:

Left Side Slope:

Right Side Slope:

Breach Weir Coef:

Breach Formation Time (hrs):

Failure Mode:

Piping Coefficient:

Initial Piping Elev:

Trigger Failure at:

Starting WS:

Breach Plot | Breach Progression | Simplified Physical | Physical Breaching (DLBreach) | Parameter Calculator | Breach Repair (optional)

Input Data

Top of Dam Elevation (m): Breach Bottom Elevation (m):

Pool Elevation at Failure (m): Pool Volume at Failure (1000 m³):

Failure mode:

MacDonald

Dam Crest Width (m): Slope of US Dam Face Z1 (H:V):

Earth Fill Type: Slope of DS Dam Face Z2 (H:V):

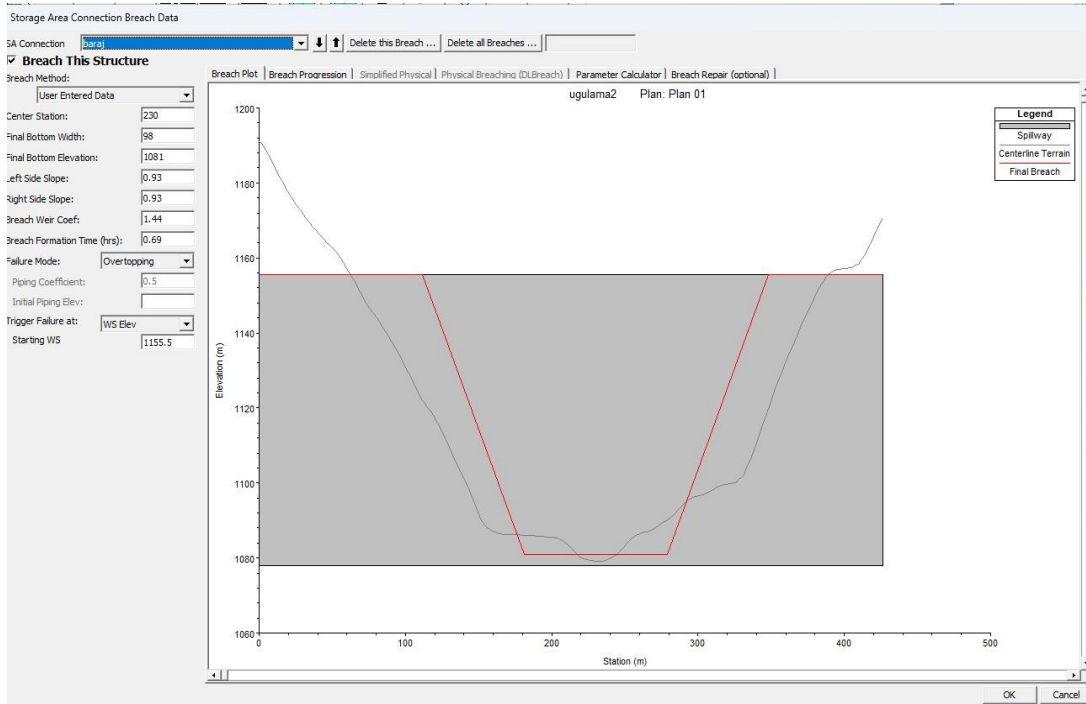
Xu Zhang (and Von Thun)

Dam Type: Dam Erodibility:

Method	Breach Bottom Width (m)	Side Slopes (H:V)	Breach Development Time (hrs)	
MacDonald et al	-5	0.5	1.50	Select
Froehlich (1995)	12	1.4	0.35	Select
Froehlich (2008)	10	1	0.30	Select
Von Thun & Gillete	204	0.5	1.74	Select
Xu & Zhang	98	0.93	0.69 *	Select

* Note: the breach development time from the Xu Zhang equation includes more of the initial erosion period and post erosion than what is used in the HEC-RAS breach formation time.

Şekil 4.21 Xu & Zhang yöntemiyle elde edilen ve modele entegre edilen baraj gedik parametreleri.



Şekil 4.22 Xu & Zhang oluşan gedik hali

Baraj yıkılma mekanizmasını temsil eden ampirik denklemlerin (Froehlich 1995, 2008; Von Thun & Gillette; MacDonald vd.; Xu & Zhang) her biri için "Gedik Oluşum Süresi" ve "Ortalama Gedik Genişliği" parametreleri ayrı ayrı hesaplanmıştır.

4.2.4 Taşkın Hidrograflarının Elde Edilmesi ve Sınır Şartlarının Tanımlanması

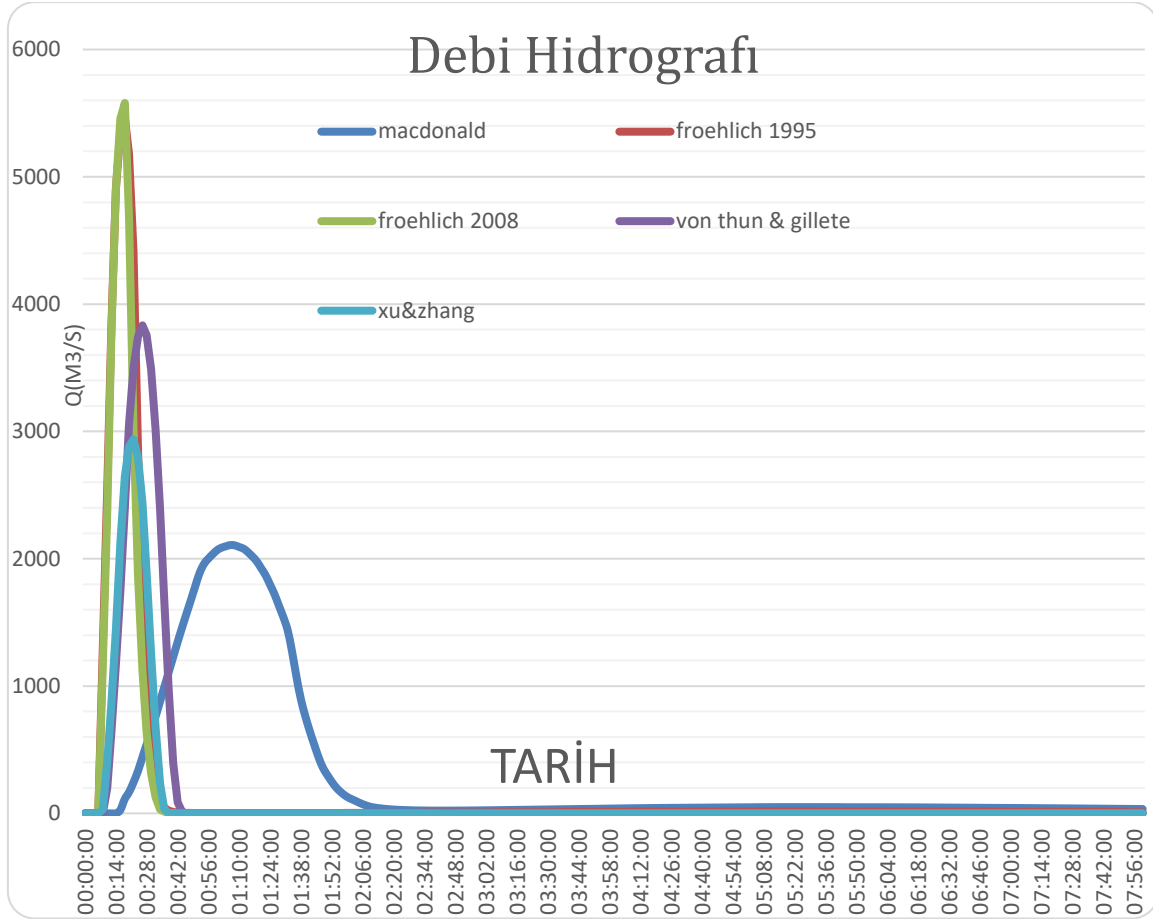
Hidrograf Analizi: Beş farklı denklem seti kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlar neticesinde, baraj aksından mansaba boşalan suyun zamana bağlı değişimini gösteren taşkın hidrografları üretilmiştir. Bu farklı yaklaşımların sonuçları, pik debi ve varış süresi açısından karşılaştırmalı olarak tek bir grafik üzerinde sunulmuştur.

Geometri Verisinin Nihai Hale Getirilmesi: Gedik parametrelerinin geometri editörüne (Geometric Data Editor) işlenmesinin ardından, modelin fiziksel sınırları kaydedilerek bu modülden çıkılmıştır.

Farklı ampirik denklem setleriyle hesaplanan gedik parametrelerinin Geometri Editörüne işlenmesiyle, modelin hidrodinamik girdisini oluşturacak taşkın hidrografları üretilmiştir. Taşkın hidrografının elde edilme nedeni baraj yıkılması anında vadiye deşarj olacak maksimum anlık pik debiyi (Q_p) ve rezervuarın boşalma süresini saptamaktır. Bu debi-zaman serisi, mansap bölgesindeki taşkın derinliği ve yayılım hızının hesaplanabilmesi için sisteme aktarılması gereken temel kütle ve enerji girdisini oluşturur. Üretilen hidrografların HEC-RAS 2B ortamında çözülebilmesi için akış alanının giriş ve çıkış hatlarına iki temel sınır şartı tanımlanmıştır:

Memba Sınır Şartı (Unsteady Flow Hydrograph): Baraj aksının hemen aşağısındaki giriş çizgisine tanımlanmıştır. Yıkılma dalgasının zamana bağlı olarak vadiye bırakacağı değişken su kütlesini modele dinamik olarak yansıtmak amacıyla, Şekil 4.23'teki zaman-debi ($Q-t$) verileri sisteme zaman serisi olarak işlenmiştir.

Mansap Sınır Şartı (Normal Depth) 2B akış alanının bittiği en uç çıkış kesitine tanımlanmıştır. Taşkın dalgasının alanı terk ederken yapay bir su kabarmasına (geri tepmeye) yol açmasını engellemek amacıyla kullanılmıştır. Çay ilçesi çıkışındaki arazi topoğrafyasından hesaplanan ortalama enerji çizgisi eğimi (S_f) sisteme girilerek suyun doğal akışıyla çıkması sağlanmıştır.



Şekil 4.23 Beş farklı denklem setine göre hesaplanan taşkın hidrograflarının karşılaştırılması.

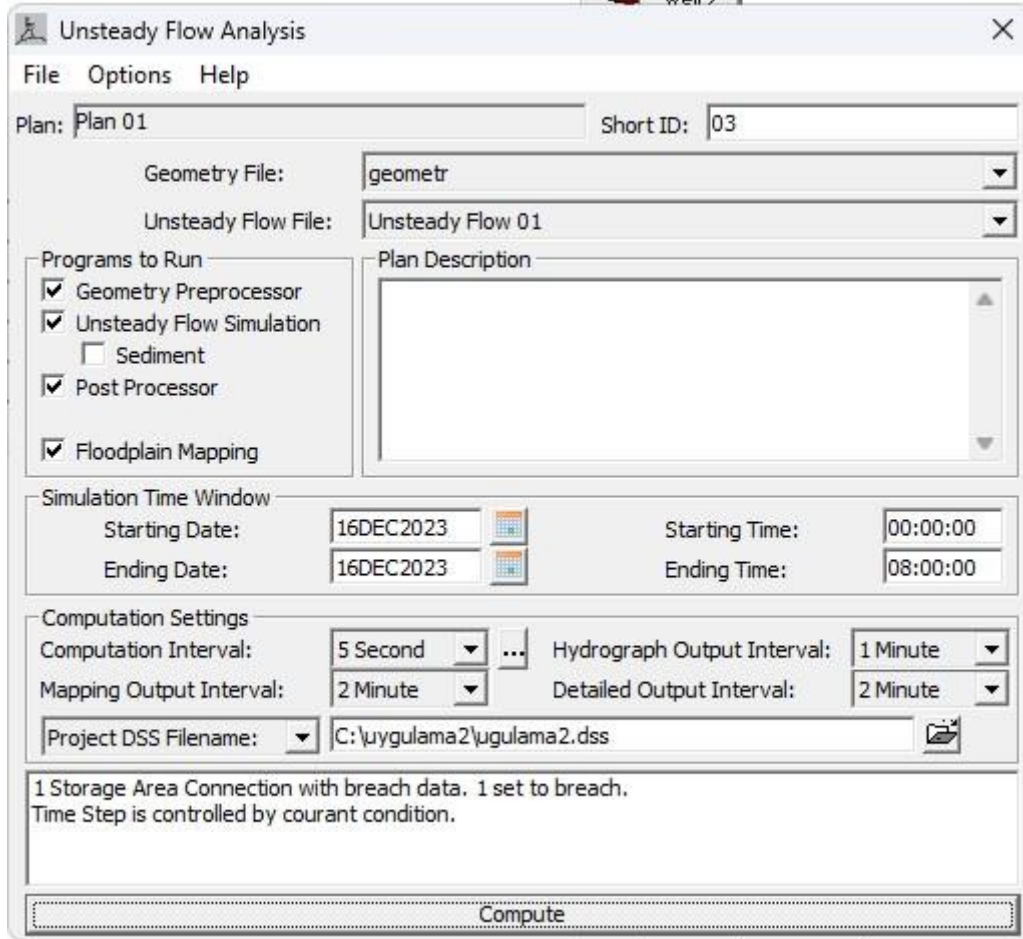
4.2.5 Unsteady Flow Data: Kararsız Akış Verilerinin Girilmesi

Statik geometri verilerinin ardından, taşkın hidrolojisine ve sınır koşullarına (Boundary Conditions) ait dinamik verilerin girilmesi amacıyla "Unsteady Flow Data" editörüne geçiş yapılmıştır. Bu bölümde modelin kararlılığını etkileyen şu parametreler tanımlanmıştır.

Üst sınır koşulu (Upstream Boundary) baraj rezervuar alanı için göl hacmi-kot verileri ve başlangıç su seviyesi (kret kotu veya işletme kotu) tanımlanarak sistemin başlangıçtaki potansiyel enerjisi belirlenmiştir.

Alt sınır koşulu (Downstream Boundary) Taşkın sularının çalışma alanını terk ettiği

noktada, akışın doğal eğimine uygun olarak "Normal Depth" (Manning Denklemi) sınır şartı atanmıştır.



Şekil 4.24 Unsteady Flow Analisis ekran görüntüsü.

4.2.6 Unsteady Flow Analysis: Zamana Bağlı Akış Analizi Ayarları

Modelin geometrik ve hidrolojik verileri tanımlandıktan sonra, denklemlerin zamana bağlı olarak çözümleneceği simülasyon ayarları aşamasına geçilmiştir. Baraj yıkılması gibi debinin saniyeler içinde ekstrem değerlere ulaştığı (yüksek gradyanlı akışlar) analizlerde, modelin "patlamaması" (numerical instability) için hesaplama ayarları titizlikle belirlenmiştir.

4.2.6.1 Zaman Adımı: Computation Interval Seçimi

Analiz kararlılığını sağlamak amacıyla en kritik parametre olan zaman adımı belirlenmiştir. 20x20 m hücre boyutuna sahip modelde, dalga hızının hücreyi geçme süresi hesaplanmış ve simülasyonun yakınsaması için zaman adımı 2 saniye olarak ayarlanmıştır.

4.2.6.2 Simülasyon Kontrol ve Çıktı Ayarları

"Unsteady Flow Analysis" editörü üzerinden şu konfigürasyonlar yapılmıştır:

Analiz süresi simülasyonun başlangıç zamanı, barajdaki yıkılma anından makul bir süre önce başlatılmış; bitiş zamanı ise taşkın dalgasının çalışma alanının en mansabındaki yerleşim yerlerini terk etmesine yetecek olan 8 saate göre ayarlanmıştır.

Mapping Output Interval: Taşkın yayılım animasyonlarının akıcı bir şekilde izlenebilmesi ve pik değerlerin kaçırılmaması için harita çıktı aralığı 2 dakika olarak belirlenmiştir.

Detailed Log Output: Olası hataları ve "water surface error" (su yüzeyi hataları) takibi için detaylı raporlama aktif edilmiştir.

4.3 Analiz Bulguları ve Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Simülasyonların tamamlanmasının ardından; MacDonald, Froehlich (1995), Froehlich (2008), Von Thun & Gillette ve Xu & Zhang ampirik denklemleri kullanılarak elde edilen taşkın karakteristikleri incelenmiş ve mansap bölgesindeki riskler açısından yorumlanmıştır.

4.3.1 Pik Debi ve Zaman Karşılaştırması

Şekil 4.25'te sunulan karşılaştırmalı hidrograf incelendiğinde, yöntemler arasında pik debi (Q_p) ve pikin oluşma süresi (t_p) açısından belirgin farklar gözlemlenmiştir:

En konservatif yaklaşım Froehlich (2008) denklemi, yaklaşık 5 600 m³/s ile en yüksek pik debi değerini üretmiştir. Bu durum, mansap bölgesindeki yapılar için "en kötü senaryo" (worst-case scenario) olarak değerlendirilmelidir.

Hız ve ani etki Froehlich (2008) ve Froehlich (1995) yöntemleri taşkın pikine en kısa sürede (yaklaşık 20-25. dakikalar arasında) ulaşırken; MacDonald yöntemi piki daha geniş bir zamana yaymış ve yaklaşık 2 100 m³/s ile daha düşük bir pik değeri vermiştir.

Orta segment sonuçlar Von Thun & Gillette yöntemi yaklaşık 3 800 m³/s ile, Xu & Zhang ise yaklaşık 3 000 m³/s ile ara değerler sunarak literatürdeki diğer ampirik yaklaşımlarla tutarlılık göstermiştir.

4.3.2 Mansap Bölgesi Risk Yorumlaması

Elde edilen sonuçlar, mansap bölgesindeki yerleşim birimleri ve tarım arazileri için şu riskleri öngörmektedir:

Erken uyarı süresi Froehlich denklemlerine göre taşkın dalgasının ilk 30 dakika içerisinde maksimum seviyeye ulaşması, tahliye ve erken uyarı sistemlerinin kritik öneme sahip olduğunu kanıtlamaktadır.

Yatak kapasitesi MacDonald yöntemi dışındaki tüm senaryolarda debi değerleri oldukça yüksek seyretmektedir. Bu debilerin nehir yatağı kapasitesini aşarak geniş çaplı taşkın yayılımlarına neden olacağı öngörülmektedir.

Yıkıcı güç pik debinin 5 000 m³/s üzerine çıktığı senaryolarda, akış hızının artmasıyla birlikte mansap bölgesindeki sanat yapılarında (köprü, menfez vb.) yapısal hasar riski maksimuma çıkmaktadır.

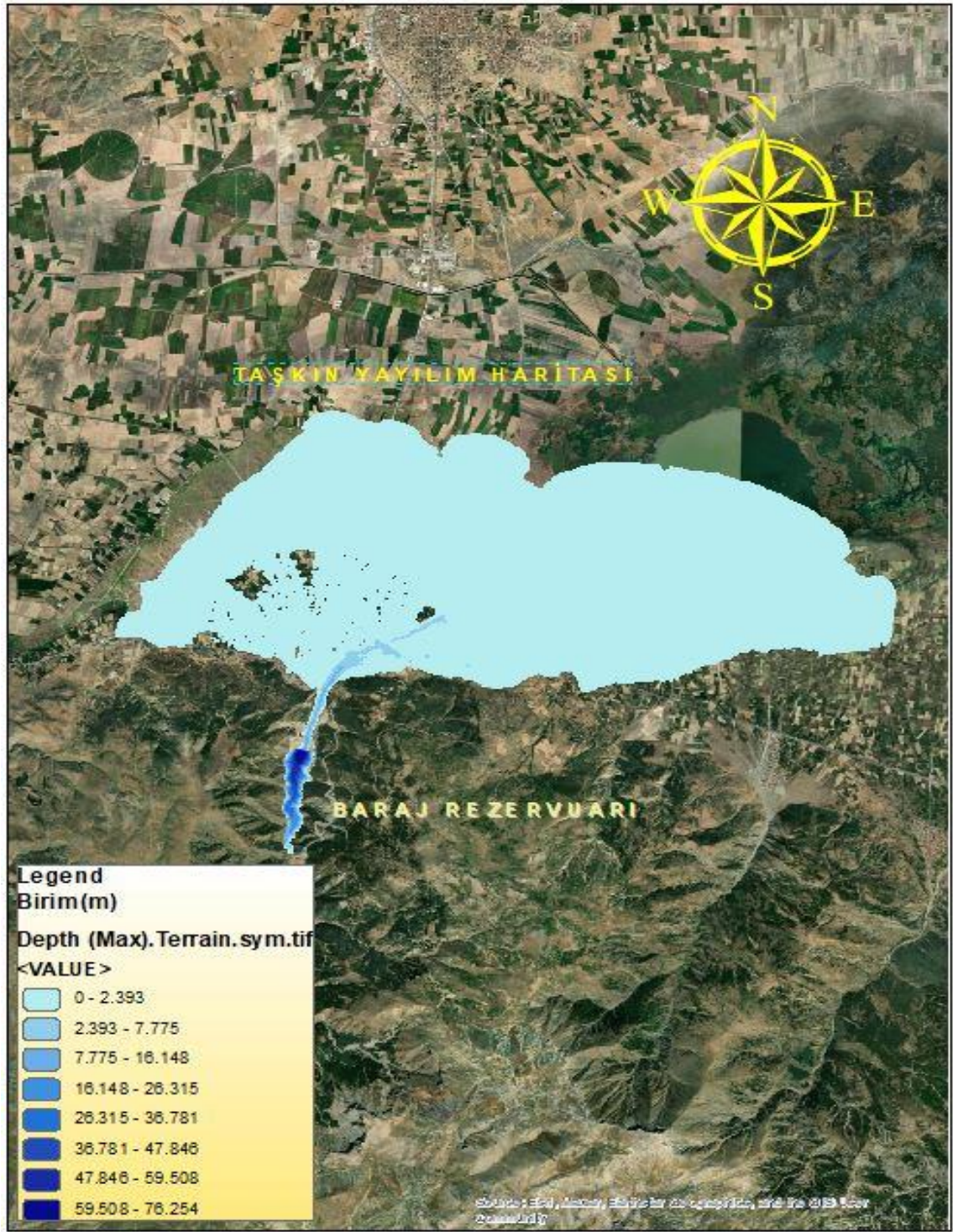
Çizelge 4.1: Uygulanan yöntem sonuçları.

Yöntem No	Ampirik Denklem	Pik (m ³ /s)	Debi (Q _p)	Pike Ulaşma Süresi (t _p) (dakika)	Karakteristik Özellik
1	Froehlich (2008)	5 600		20	En yüksek pik, en kısa süre (Kritik)
2	Froehlich (1995)	5 300		24	Yüksek debi, ani yükselim
3	Von Thun & Gillette	3 800		28	Orta-yüksek şiddetli akış
4	Xu & Zhang	3 000		22	Hızlı yükselim, orta debi
5	MacDonald	2 100		65-70	En düşük pik, en geniş yayılım

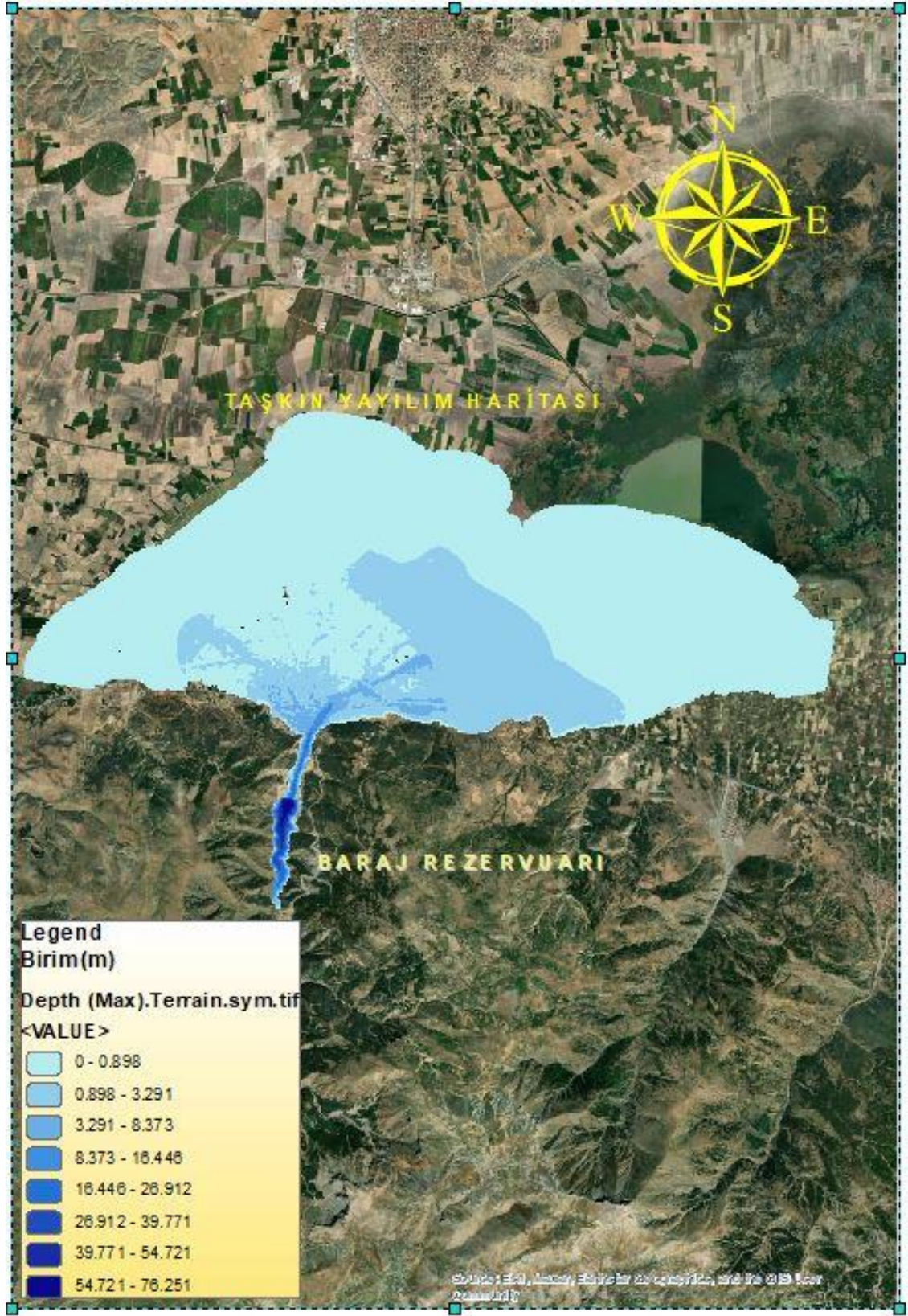
Bu veriler ışığında model hassasiyeti incelendiğinde; Froehlich (2008) ve MacDonald & Langridge-Monopolis (1984) yöntemleri arasında ortaya çıkan 3500 m³/s'lik devasa pik debi farkı, ampirik denklem seçiminin taşkın risk planlamasında ne kadar hayati ve belirleyici olduğunu açıkça göstermektedir. Gediğin geometrik gelişim hızı ve nihai genişlik formülasyonlarındaki kabullerden kaynaklanan bu varyasyon, hidrolik modelin mansap geometrisine enjekte ettiği kütleli momentumu doğrudan değiştirmektedir.

Mansap güvenlik sınırı açısından, Çay ilçe merkezi ve yakın çevresindeki yerleşim birimleri ile kritik altyapı projeleri için yapılacak risk haritalandırmasında, en yüksek pik akışı üreterek en muhafazakar (en kötü durum senaryosu / *worst-case scenario*) sonucu veren Froehlich (2008) değerlerinin baz alınması, can ve mal güvenliği açısından "güvenli tarafta" kalmayı sağlayacaktır. Bu yaklaşım, acil durum eylem planlarında tahliye koridorlarının ve taşkın setlerinin tasarlanmasında olası belirsizlik marjlarını absorbe edecek yapısal bir emniyet payı sunmaktadır.

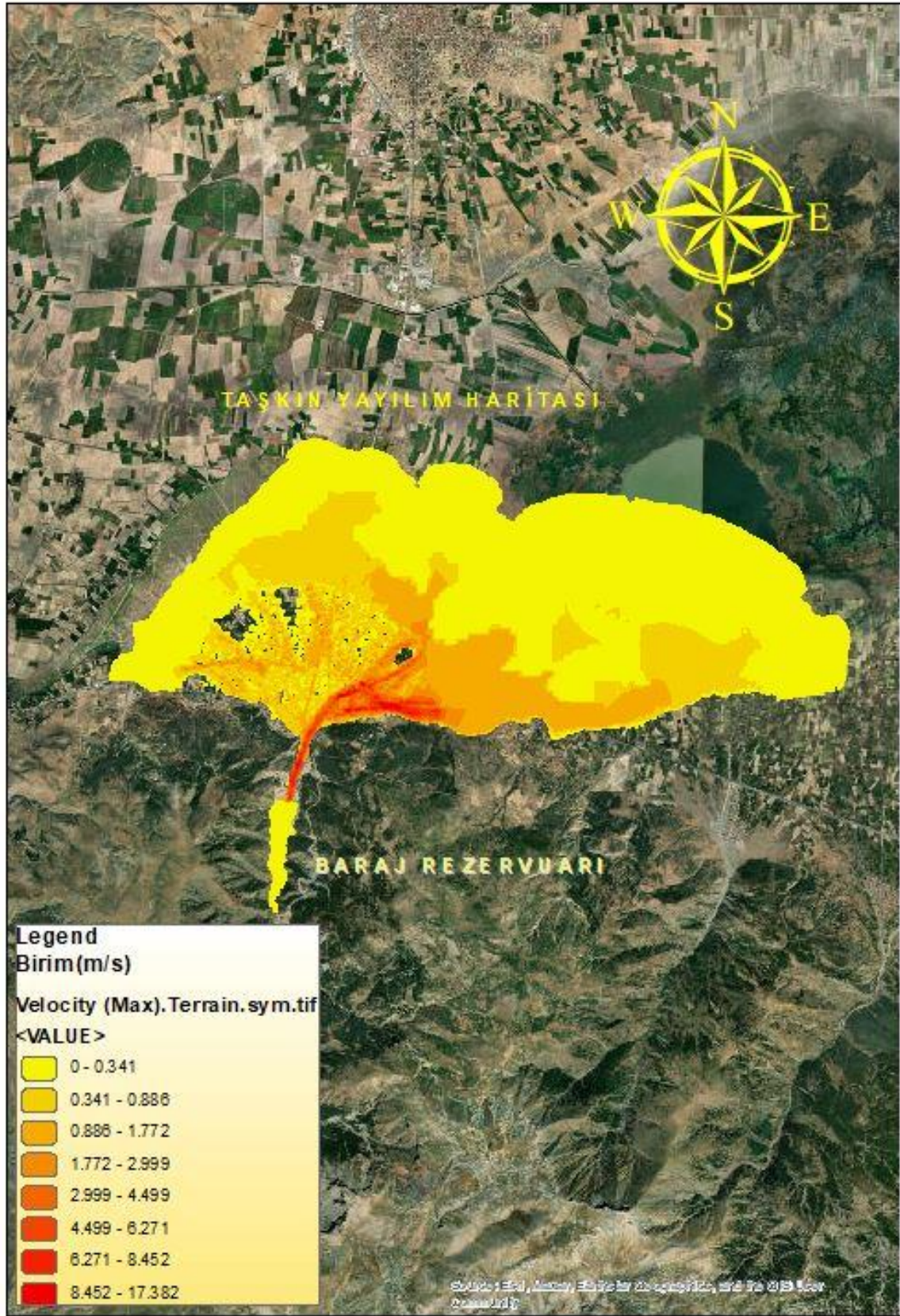
Sönümlenme analizi açısından bakıldığında ise, MacDonald yöntemi gediğin zamana yayılı ve daha yavaş bir erozyon mekanizmasıyla açılacağını öngördüğünden, pik debiyi zamana yayarak sönümlenme eğrisinde daha yayvan bir hidrograf morfolojisi sergilemiştir.



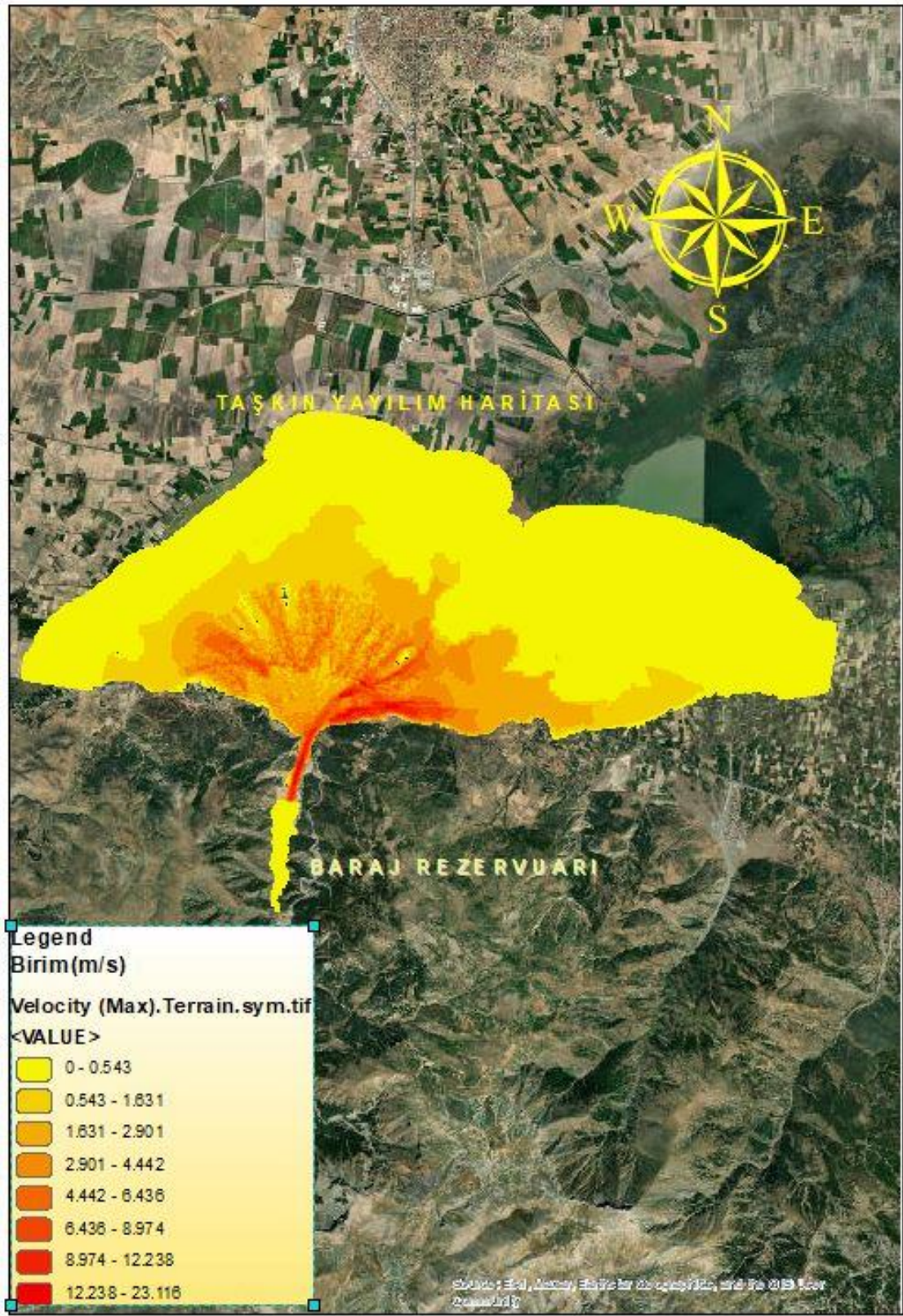
Şekil 4.25 MacDonald ve Langridge-Monopolis yaklaşımı ile elde edilen su derinlik haritası.



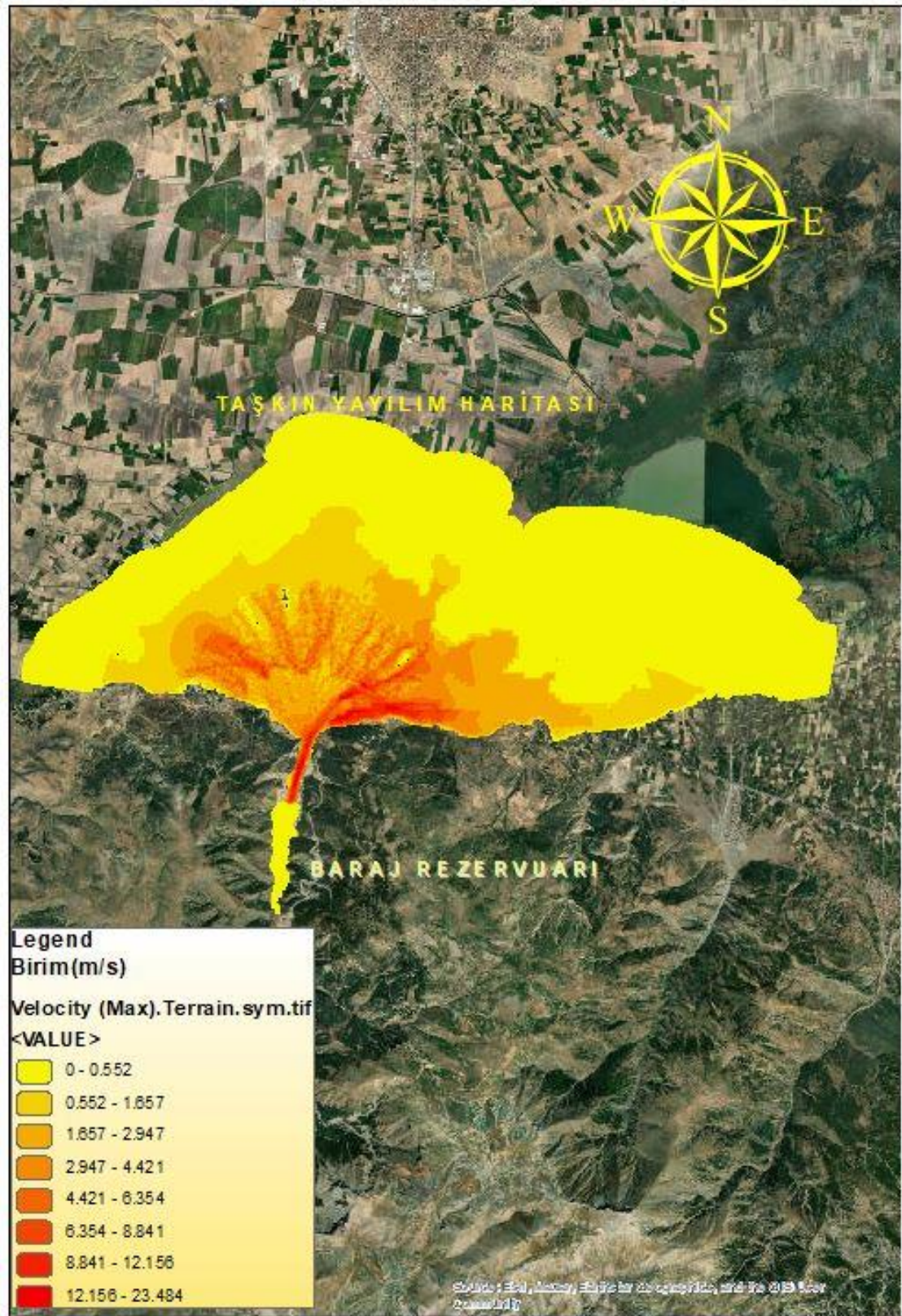
Şekil 4.26 Froehlich 1995'in yaklaşımı ile elde edilen su derinlik haritası.



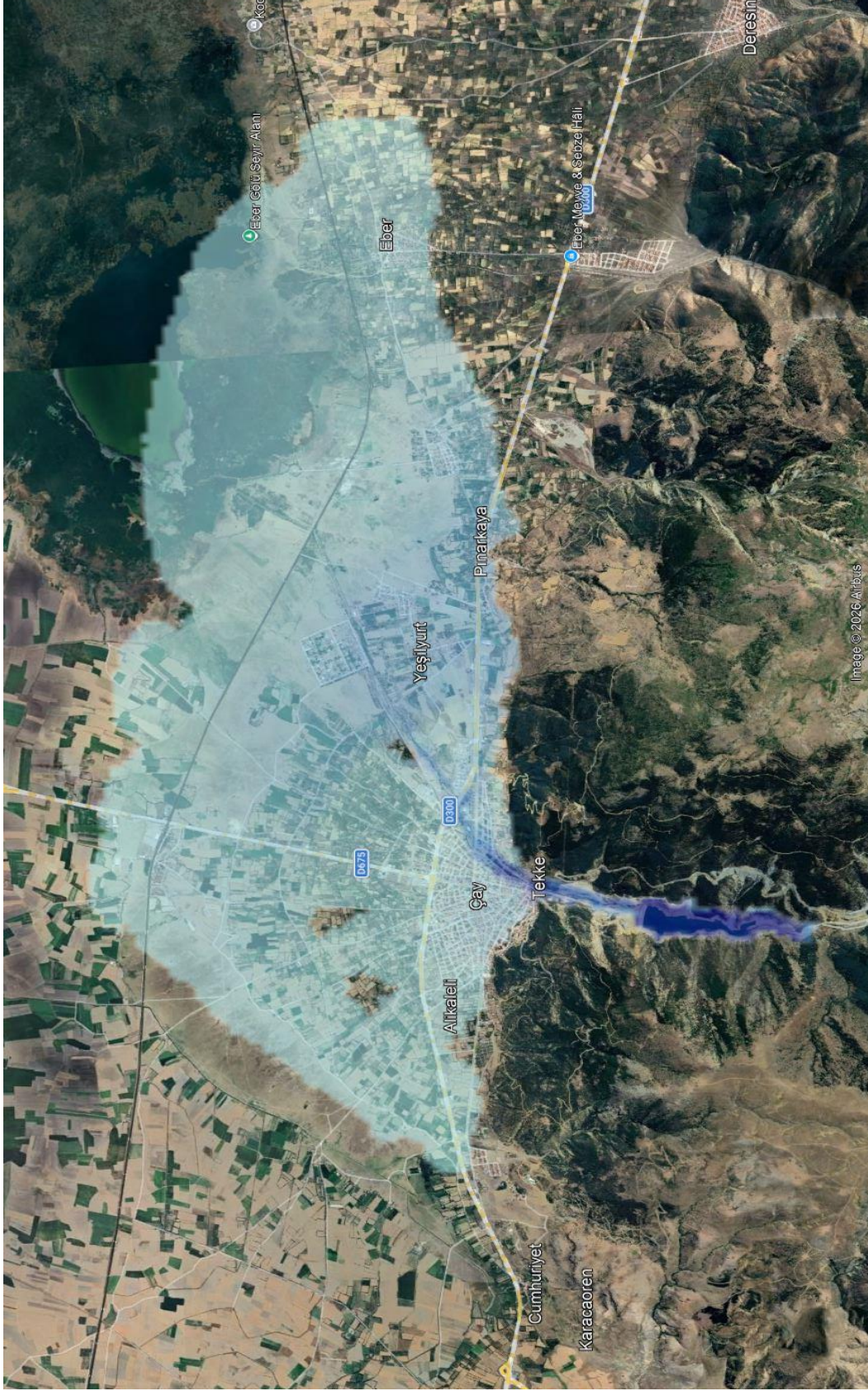
Şekil 4.30 MacDonalld ve Langridge-Monopolis denklemleri ile modellenen maksimum akış hızları haritası.



Şekil 4.31 Froehlich 1995'in denklemleri ile modellenen maksimum akış hızları haritası.



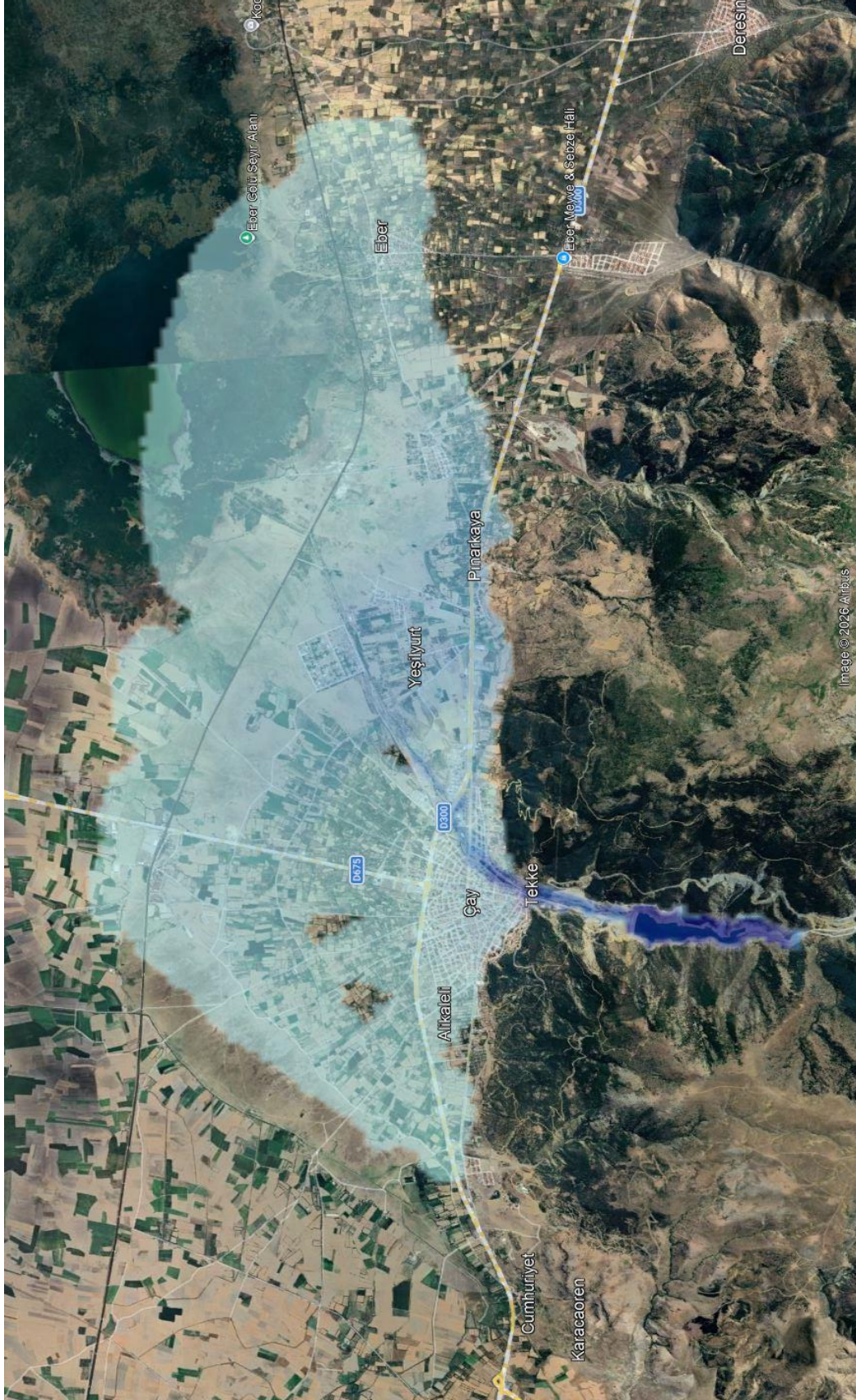
Şekil 4.32 Froehlich 2008'in denklemleri ile modellenen maksimum akış hızları haritası.



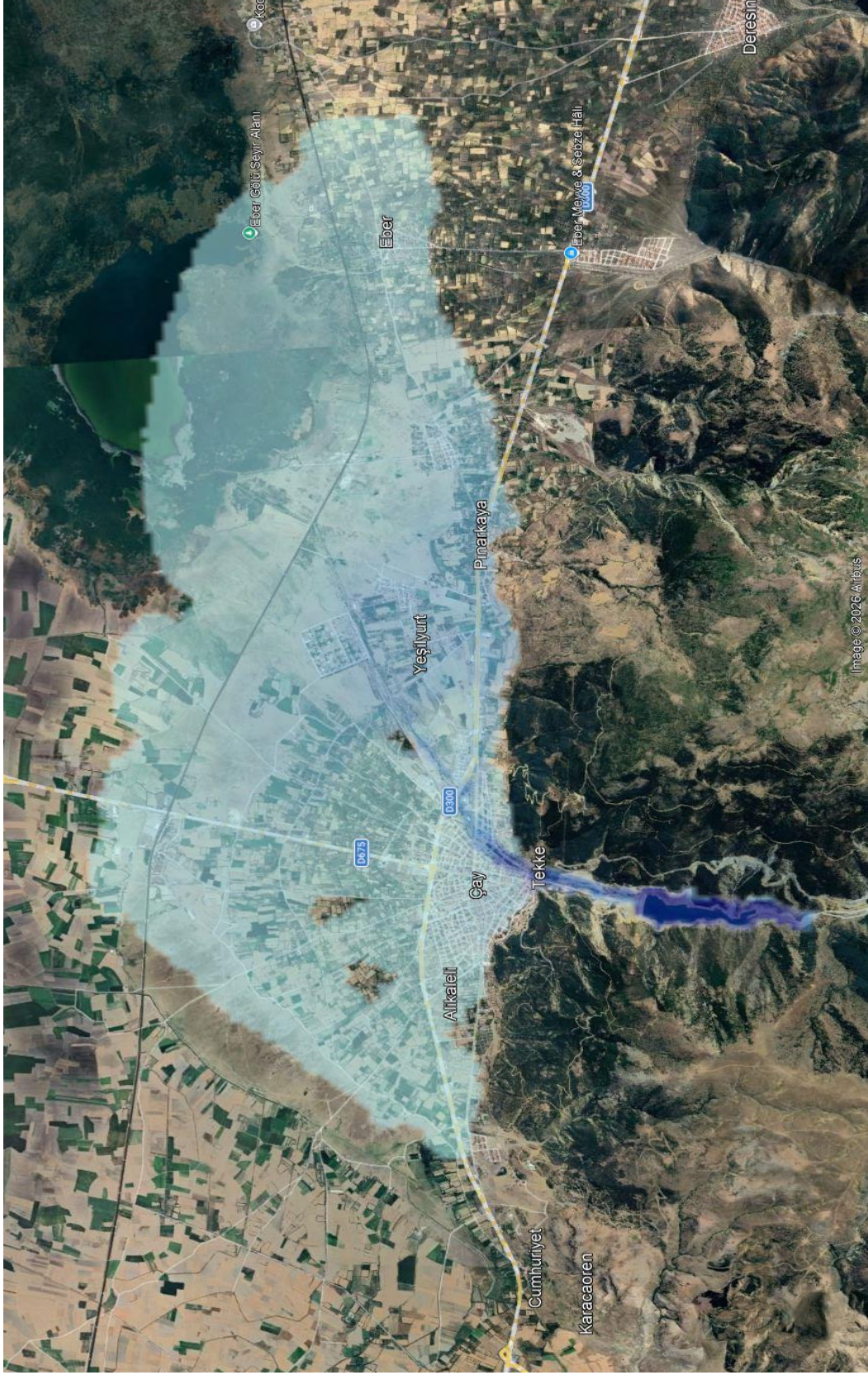
Şekil 4.35 MacDonald ve Langridge-Monopolis senaryosu altında Çay ilçesi taşkın etki alanı ve yayılım sınırları.



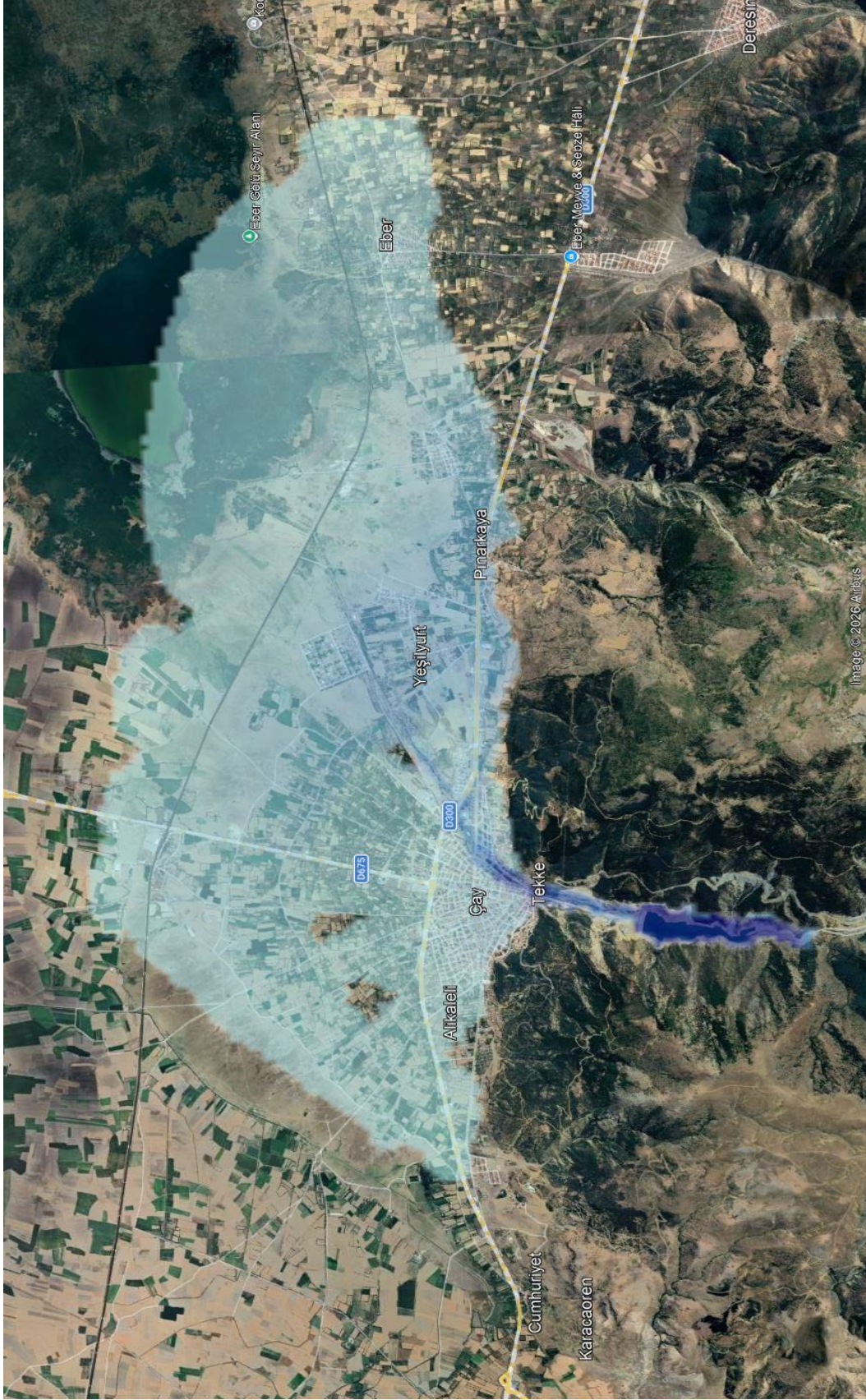
Şekil 4.36 Froehlich (1995) senaryosu altında Çay ilçesi taşkın etki alanı ve yayılım sınırları.



Şekil 4.37 Froehlich (2008) senaryosu altında Çay ilçesi taşkın etki alanı ve yayılım sınırları.



Şekil 4.38 Von Thun ve Gillette senaryosu altında Çay ilçesi taşkın etki alanı ve yayılım sınırları.



Şekil 4.39 Xu ve Zhang'in senaryosu altında Çay ilçesi taşkın etki alanı ve yayılım sınırları.

4.4. Taşkın Etki Analizi

Baraj yıkılması simülasyonu sonucunda oluşan taşkın dalgasının sosyal ve demografik etkilerini belirlemek amacıyla CBS (Coğrafi Bilgi Sistemleri) tabanlı bir nüfus analiz süreci yürütülmüştür. Bu kapsamda izlenen metodolojik adımlar aşağıda özetlenmiştir

Sınırların belirlenmesi ve veri hazırlığı HEC-RAS yazılımından elde edilen taşkın yayılım verilerinin sosyo-ekonomik etkilerini ölçmek adına, Çay ilçe sınırlarına ait idari sınırlar öncelikle ".kmz" formatında dijitalize edilmiştir.

CBS ortamına aktarım hazırlanan kmz dosyası, konumsal analizlerin gerçekleştirilmesi amacıyla ArcMap (ArcGIS) platformuna aktarılmış; bu süreçte veri bütünlüğünü korumak için "KML to Layer" fonksiyonu kullanılarak vektörel katmanlar oluşturulmuştur.

Taşkın yayılım ve nüfus çakıştırması (Overlay Analysis) HEC-RAS simülasyonundan elde edilen maksimum su derinliği ve yayılım sınırları, oluşturulan bu idari katmanlar ile üst üste bindirilmiştir. Bu analiz sayesinde taşkın dalgasının hangi mahalle veya yerleşim birimlerini doğrudan etkilediği belirlenmiştir.

ArcMap ortamında gerçekleştirilen çakıştırma analizi (overlay analysis) sonucunda, baraj yıkılması senaryosuna bağlı olarak Çay ilçesinde taşkından etkilenecek mahalleler, nüfus sayıları ve taşkın karakteristikleri belirlenmiştir.

Kritik süreler taşkın dalgası, bazı mahallelere (Tekke ve Cedit Mah.) 8-10 dakika gibi çok kısa bir sürede ulaşmaktadır. Bu durum, tahliye için gereken sürenin son derece kısıtlı olduğunu göstermektedir.

Maksimum su derinlikleri Tekke Mahallesi'nde su derinliği 19.00-20.00 metre gibi ekstrem seviyelere ulaşırken, Cedit Mahallesi'nde 10.00-11.00 metre seviyeleri görülmektedir. Bu derinlikler, söz konusu mahallelerdeki yapı stoğunun tamamen su altında kalma riskini kanıtlamaktadır.

Çizelge 4.2 Risk seviyesine göre etkilenen malhaller listesi

Risk Seviyesi	Etkilenen Mahalleler	Öne Çıkan Risk Parametresi
Çok Yüksek	Tekke Mah., Cedit Mah., Köprübaşı Mah.	Çok kısa ulaşım süresi (<15 dk) ve yüksek derinlik.
Yüksek Nüfus Etkisi	Şirinevler Mah., Vakıf Mah., Bahçelievler Mah.	Toplamda 7 000'den fazla nüfus doğrudan risk altındadır.
Geniş Yayılım	Vakıf, Bahçelievler, Orta ve Aktaş Mah.	Mahalle alanlarının %100'ü taşkın yayılım sınırları içerisinde.

Demografik Etki: Analiz edilen 18 yerleşim biriminde (17 mahalle ve 1 köy), toplamda yaklaşık 16 000 kişinin yaşadığı bölgeler taşkın sularından farklı derecelerde etkilenmektedir. Özellikle nüfusu en yoğun olan Şirinevler (2 910 kişi) ve Vakıf (2 194 kişi) mahallelerinde suların %75 ile %100 oranında yayılım göstermesi, sosyal yıkımın boyutunu artırmaktadır.

Çizelge 4.3 Yıkılma senaryosu sonrası taşkından etkilenecek yerleşimler.

Mahal Adı	Nüfus	Taşkın Alanı	Derinlik (m)	Taşkın Ulaşım Süresi
Şirinevler Mh	2 910	75	0,60- 4,00	30 dk
Vakıf Mah.	2 194	100	0,01- 0,60	45 dk
Bahçelievler Mah.	2 040	100	0,80- 1,10	30 dk
Cedit Mah.	1 162	100	10,00-11,00	10 dk
Köprübaşı Mah.	895	100	3,50- 4,00	15 dk
Orta Mah.	886	100	2,50- 3,00	30 dk
Aktaş Mah.	807	100	0,01- 0,50	3 saat 30 dk
Aşağı Mah.	768	100	0,25- 0,80	30 dk
Yaka Mah.	609	75	1,15- 1,35	20 dk
Orta Mah.	608	100	0,60- 3,50	30 dk
Ali İhsan Paşa Mah.	531	100	0,50- 4,00	30 dk
Aşağı Mah.	460	100	2,00- 2,50	25 dk
Yeşilevler	458	80	0,01- 1,25	45 dk
Dumlupınar Mah.	423	100	0,80- 1,00	38 dk
Demirağaç Mah.	357	100	0,30- 0,75	7 saat
Ali Kaleli Mah.	263	100	0,20- 0,50	5 saat
Tekke Mah.	170	100	19,00- 20,00	8 dk
İstasyon Mah.	147	50	0,01- 0,15	3 saat 10 dk
Yeşilyurt Köyü	147	100	2,00- 3,00	45 dk

*Analizlerde kullanılan batimetri verileri ve taşkın karakteristikleri Froehlich (1995) yaklaşımıyla modellenmiştir. ArcMap üzerinde gerçekleştirilen çakıştırma analizleri sonucunda belirlenen etkilenme alanları, muhafazakar bir yaklaşımla yukarı yuvarlanarak tabloya yansıtılmıştır.

Çizelge 4.4 Taşkın karakteristikleri.

Mahal Adı	Nüfus	Taşkın Alanı (%)	Su Derinliği Aralığı (m)	Taşkın Ulaşım Süresi
Şirinevler Mah.	2 910	85	1,10 - 5,50	25 dk
Vakıf Mah.	2 194	100	0,40 - 1,20	40 dk
Bahçelievler Mah.	2 040	100	1,20 - 1,80	25 dk
Cedit Mah.	1 162	100	12,00- 13,50	7 dk
Köprübaşı Mah.	895	100	4,50 - 5,50	12 dk
Orta Mah.	886	100	3,50 - 4,50	25 dk
Aktaş Mah.	807	100	0,20 - 0,80	3 saat 10 dk
Aşağı Mah.	768	100	0,50 - 1,20	25 dk
Yaka Mah.	609	85	1,60 - 2,10	15 dk
Orta Mah.	608	100	1,10 - 4,80	25 dk
Ali İhsan Paşa Mah.	531	100	1,00 - 5,20	25 dk
Aşağı Mah.	460	100	2,50 - 3,20	20 dk
Yeşilevler Mah.	458	90	0,30 - 1,80	40 dk
Dumlupınar Mah.	423	100	1,10 - 1,60	32 dk
Demirağaç	357	100	0,60 - 1,10	6 saat15 dk
Ali Kaleli Mah.	263	100	0,40 - 0,80	4 saat 30 dk
Tekke Mah.	170	100	22,00- 24,00	6 dk
İstasyon Mah.	147	65	0,10 - 0,35	2 saat 50 dk
Yeşilyurt Köyü	147	100	2,80 - 4,20	40 dk

*Analizlerde kullanılan batimetri verileri ve taşkın karakteristikleri Froehlich (2008) yaklaşımıyla modellenmiştir. ArcMap üzerinde gerçekleştirilen çakıştırma analizleri sonucunda belirlenen etkilenme alanları, muhafazakar bir yaklaşımla yukarı yuvarlanarak tabloya yansıtılmıştır.

Gerçekleştirilen bu analiz, olası bir baraj yıkılması senaryosunda risk altındaki nüfusun tespiti amacıyla yürütülen metodolojik bir yaklaşımdır. Söz konusu veriler, can kaybı veya doğrudan maddi zarar miktarını kesin olarak tayin etmekten ziyade, afetin sosyo-demografik etki potansiyelini nicel olarak ortaya koymaktadır. Analiz sonuçları, tehlikenin mekânsal dağılımını belirlemek ve hangi yerleşim birimlerinin öncelikli risk altında olduğunu saptamak noktasında karar vericiler için stratejik bir rehber niteliğindedir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, Afyonkarahisar ili Çay ilçesinde bulunan Çay Barajı'nın olası yıkılması sonucunda meydana gelebilecek taşkın dalgasının mansap bölgesindeki yayılımı, iki boyutlu hidrodinamik modelleme yaklaşımıyla incelenmiştir. Çalışma kapsamında Harita Genel Müdürlüğünden temin edilen sayısal yükseklik verileri, İHA tabanlı fotogrametrik ölçümlerden üretilen yüksek çözünürlüklü arazi modeliyle birleştirilmiş; arazi örtüsüne bağlı Manning pürüzlülük katsayıları CORINE verileri kullanılarak tanımlanmıştır. Oluşturulan hibrit arazi modeli üzerinde HEC-RAS 6.2 yazılımı kullanılarak MacDonald ve Langridge-Monopolis, Froehlich (1995), Froehlich (2008), Von Thun ve Gillette ile Xu ve Zhang yaklaşımlarına dayalı beş farklı baraj yıkılma senaryosu analiz edilmiştir. Bu yönüyle çalışma, yalnızca tek bir ampirik gedik denklemine bağlı kalmamış, farklı yöntemlerin hidrograf ve taşkın yayılımı üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak değerlendirmiştir.

5.1. Metodolojik Bulguların Tartışılması

Baraj yıkılma analizlerinde elde edilen sonuçların doğruluğu; arazi modelinin çözünürlüğü, gedik geometrisi, gedik oluşum süresi, rezervuar su seviyesi, yüzey pürüzlülüğü ve sayısal çözüm parametreleri gibi birçok değişkene bağlıdır. Bu çalışmada İHA ile elde edilen yüksek çözünürlüklü topoğrafik verilerin bölgesel sayısal yükseklik modeliyle bütünleştirilmesi, özellikle barajın yakın mansabında bulunan dar vadi kesimlerinin, doğal akış yollarının ve ani kot değişimlerinin daha ayrıntılı biçimde temsil edilmesini sağlamıştır. Bu durum, taşkın dalgasının izlediği güzergâhın ve yerleşim alanlarındaki su derinliklerinin daha gerçekçi olarak belirlenmesine katkıda bulunmuştur.

Bununla birlikte, farklı ampirik gedik tahmin yöntemlerinden elde edilen sonuçlar arasında belirgin farklılıklar ortaya çıkmıştır. Froehlich (2008) yaklaşımı yaklaşık 5 600 m³/s ile en yüksek pik debiyi üretirken, Froehlich (1995) yaklaşımı da buna yakın bir düzeyde, yaklaşık 5 300 m³/s pik debi vermiştir. Von Thun ve Gillette yöntemi yaklaşık 3 800 m³/s, Xu ve Zhang yöntemi yaklaşık 3 000 m³/s değerinde sonuç üretmiş; MacDonald ve Langridge-Monopolis yaklaşımında ise pik debi yaklaşık 2 100 m³/s

düzeyinde kalmıştır. Froehlich yaklaşımlarında pik debiye yaklaşık 20–25 dakika içerisinde ulaşılırken, MacDonald yönteminde hidrografın daha geniş bir zaman aralığına yayıldığı ve pikin yaklaşık 65–70 dakikalarda oluştuğu belirlenmiştir. En yüksek ve en düşük senaryolar arasındaki yaklaşık 3 500 m³/s’lik fark, gedik parametrelerinin seçimindeki belirsizliğin taşkın hidrografını ve mansap risk değerlendirmesini doğrudan etkilediğini göstermektedir.

Froehlich (2008) yaklaşımının çalışma kapsamında incelenen yöntemler arasında en yüksek pik debiyi üretmesi nedeniyle bu yöntem, mansap güvenliği bakımından en elverişsiz senaryo olarak değerlendirilmiştir. Ancak bu sonuç, söz konusu yöntemin Çay Barajı için kesin olarak gerçekleşecek yıkılma davranışını temsil ettiği anlamına gelmemektedir. Ampirik denklemler, geçmiş baraj yıkılma olaylarından elde edilen regresyon ilişkilerine dayandığından, baraj gövde malzemesi, beton yüzey kaplamasının davranışı, gedik gelişim mekanizması ve yerel yapısal koşullar tam olarak temsil edilemeyebilir. Bu nedenle tek bir senaryonun kesin sonuç olarak kabul edilmesi yerine farklı yöntemlerin oluşturduğu sonuç aralığının birlikte değerlendirilmesi daha doğru bir yaklaşım olacaktır.

Çalışmada iki saniyelik hesaplama zaman adımı ve iki dakikalık haritalama çıktı aralığı kullanılması, taşkın dalgasındaki hızlı değişimlerin izlenmesine olanak sağlamıştır. Bununla birlikte, model sonuçlarının gerçek bir baraj yıkılması olayıyla doğrulanması mümkün olmadığından analizler senaryo temelli bir risk değerlendirmesi niteliğindedir. Ayrıca Manning pürüzlülük katsayıları, arazi örtüsü sınıflarına göre atanmış; bina, duvar, yol dolgusu, köprü ve menfez gibi küçük ölçekli yapıların tamamı geometrik olarak ayrı ayrı modellenmemiştir. Bu unsurlar, yerleşim alanlarında akım yönünü, yerel su derinliğini ve taşkın ulaşma süresini etkileyebileceğinden sonuçlar belirli bir model belirsizliği içerisinde değerlendirilmelidir.

5.2. Taşkın Yayılımı ve Mansap Riskinin Değerlendirilmesi

Simülasyon sonuçları, olası bir baraj yıkılması durumunda taşkın dalgasının öncelikle Çay ilçe merkezine yöneldiğini, daha sonra topoğrafik eğime bağlı olarak ova kesiminde yayılarak Eber Gölü havzasına doğru ilerlediğini göstermiştir. Barajın ilçe

merkezine yakın olması, bazı yerleşim birimlerinde taşkın dalgasının ulaşma süresini son derece kısaltmaktadır. Özellikle Tekke Mahallesi'ne taşkın yaklaşık 8 dakika, Cedit Mahallesi'ne 10 dakika ve Köprübaşı Mahallesi'ne 15 dakika içerisinde ulaşması, bu alanlarda olay başladıktan sonra gerçekleştirilecek tahliyenin oldukça güç olacağını ortaya koymaktadır.

Tekke Mahallesi'nde hesaplanan 19–20 m ve Cedit Mahallesi'nde hesaplanan 10–11 m arasındaki maksimum su derinlikleri, söz konusu alanların topoğrafik olarak taşkın akımının yoğunlaştığı güzergâhlarda bulunduğunu göstermektedir. Köprübaşı Mahallesi'nde 3,50–4,00 m, Şirinevler Mahallesi'nde ise yer yer 4,00 m'ye ulaşan derinliklerin meydana gelmesi beklenmektedir. Bu büyüklükteki su derinlikleri, yalnızca konutlar için değil; ulaşım yolları, köprüler, menfezler, enerji ve haberleşme hatları gibi kritik altyapı bileşenleri için de yüksek düzeyde yapısal hasar potansiyeli oluşturmaktadır.

Taşkından etkilenmesi öngörülen yerleşim birimlerinde yaşayan toplam nüfus 15 835 kişi olarak hesaplanmış olup, yaklaşık 16 000 kişilik bir nüfusun doğrudan veya dolaylı olarak taşkın tehlikesine maruz kalabileceği anlaşılmaktadır. Şirinevler, Vakıf ve Bahçelievler mahallelerinde toplam nüfusun 7 000'in üzerinde olması, bu alanlardaki orta veya nispeten düşük su derinliklerinin dahi yüksek bir toplumsal risk oluşturmaya neden olmaktadır. Vakıf ve Bahçelievler mahallelerinin tamamının, Şirinevler Mahallesi'nin ise yaklaşık %75'inin taşkın alanı içerisinde kalması, riskin yalnızca en yüksek su derinliğine sahip mahallelerle sınırlı olmadığını göstermektedir.

Yerleşim alanlarında riskin yalnızca su derinliğine göre değerlendirilmesi yeterli değildir. Taşkın dalgasının ulaşma süresi, akış hızı, su derinliği, taşkın altında kalan alan oranı ve nüfus büyüklüğü birlikte ele alınmalıdır. Bu kapsamda Tekke ve Cedit mahalleleri çok kısa ulaşma süreleri ve aşırı su derinlikleri nedeniyle en yüksek fiziksel tehlikeye sahip alanlardır. Şirinevler, Vakıf ve Bahçelievler mahalleleri ise yüksek nüfusları nedeniyle toplumsal maruziyetin en fazla olduğu alanlar olarak öne çıkmaktadır. Aktaş, Demirağaç, Ali Kaleli ve İstasyon mahallelerinde taşkın ulaşma sürelerinin daha uzun olması tahliye açısından belirli bir avantaj sağlasa da, bu durum söz konusu alanlarda risk bulunmadığı anlamına gelmemektedir.

Çalışmanın sonuçları, Çay ilçesinde acil durum planlamasının tek tip bir tahliye

yaklaşımına dayandırılmayacağını göstermektedir. Tekke, Cedit ve Köprübaşı mahalleleri gibi taşkın ilk 15 dakika içerisinde ulaşabileceği bölgelerde olay sonrasında tahliye yerine, önceden tanımlanmış otomatik erken uyarı sistemleri, toplanma alanları ve düşey tahliye seçenekleri değerlendirilmelidir. Taşkın dalgasının 30 dakika veya daha uzun sürede ulaştığı mahallelerde ise güzergâh bazlı tahliye planlarının uygulanması daha mümkün görünmektedir.

5.3. Sonuç ve Öneriler

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen analizler sonucunda aşağıdaki temel sonuçlara ulaşılmıştır;

Çay Barajı'nın olası yıkılması, barajın ilçe merkezine yakınlığı ve rezervuarda depolanan su hacmi nedeniyle mansap bölgesi açısından yüksek düzeyde taşkın tehlikesi oluşturmaktadır. Beş farklı ampirik yöntemin sonuçları, baraj gedik parametrelerinin pik debi ve hidrografın gelişimi üzerinde önemli bir belirsizlik kaynağı olduğunu göstermiştir. Pik debinin yöntemler arasında yaklaşık 2 100 ile 5 600 m³/s arasında değişmesi nedeniyle, mansap etkilerinin değerlendirilmesinde en yüksek debiyi üreten Froehlich (2008) senaryosunun esas alınması, can ve mal güvenliği açısından güvenli tarafta kalınmasını sağlamaktadır.

Taşkın dalgasının baraja yakın bazı mahallelere 8–15 dakika gibi çok kısa sürelerde ulaşabileceği belirlenmiştir. Bu nedenle yalnızca olay sonrasında verilecek tahliye kararlarına dayanan bir afet yönetim yaklaşımı yeterli olmayacaktır. Baraj gövdesi, rezervuar su seviyesi ve olası deformasyonların sürekli izlenmesi; erken uyarının yıkılma gerçekleşmeden önce verilmesine olanak sağlayacak bir izleme sisteminin oluşturulması gerekmektedir.

Tekke ve Cedit mahalleleri su derinliği ve ulaşma süresi bakımından en kritik alanlar olarak belirlenmiştir. Şirinevler, Vakıf ve Bahçelievler mahalleleri ise yüksek nüfus ve geniş taşkın yayılımı nedeniyle öncelikli tahliye planlamasına ihtiyaç duymaktadır. Taşkından etkilenebilecek nüfusun yaklaşık 16 000 kişi olması, Çay Barajı için hazırlanacak Acil Durum Eylem Planı'nın mahalle ölçeğinde ayrıntılandırılmasını gerekli kılmaktadır.

Elde edilen taşkın derinliği, yayılım alanı ve ulaşma süresi haritalarının DSI, AFAD, Çay Belediyesi, emniyet, jandarma ve sağlık kuruluşlarının ortak kullanabileceği bütünleşik bir karar destek sistemine aktarılması önerilmektedir. Tahliye güzergâhlarının taşkın sınırları dışında kalması sağlanmalı; köprü, menfez ve ana ulaşım yollarının taşkın sırasındaki kullanılabilirliği ayrıca değerlendirilmelidir. Riskli mahallelerde yönlendirme levhaları, sesli uyarı sistemleri ve düzenli tahliye tatbikatları planlanmalıdır.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda farklı rezervuar seviyeleri, alternatif gedik başlangıç konumları, borulanma ve üstten aşma mekanizmaları ile deprem sonrası gövde deformasyonuna bağlı yıkılma senaryolarının ayrı ayrı incelenmesi önerilmektedir. Gedik genişliği, gedik oluşum süresi ve Manning pürüzlülük katsayıları için duyarlılık ve belirsizlik analizlerinin gerçekleştirilmesi, sonuçların güven aralıklarıyla sunulmasına imkân sağlayacaktır. Ayrıca bina ve altyapıların yüksek çözünürlüklü sayısal yüzey modeli içerisine dâhil edilmesi, akış hızı ve su derinliği sonuçlarının özellikle kentsel alanlarda daha ayrıntılı hesaplanmasını sağlayabilir.

Sonuç olarak bu çalışma, İHA tabanlı fotogrametrik veriler, coğrafi bilgi sistemleri ve iki boyutlu hidrodinamik modellemenin bütünleşik biçimde kullanılmasının baraj yıkılma analizlerinde uygulanabilir ve etkili bir yöntem olduğunu ortaya koymuştur. Hazırlanan taşkın yayılımı, su derinliği ve ulaşma süresi haritaları; Çay ilçesi için erken uyarı, tahliye ve afet risk azaltma çalışmaları için önem arz etmektedir.

5.3.1 Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler

Bu tez kapsamında, Çay Barajı'nın olası yıkılması sonucunda meydana gelebilecek taşkın yayılımı, farklı ampirik gedik tahmin yöntemleri kullanılarak iki boyutlu olarak modellenmiştir. Beş farklı yaklaşımın farklı pik debi, gedik geometrisi ve oluşma süresi üretmesi, model sonuçlarının gedik parametrelerine karşı duyarlı olduğunu göstermektedir. Ayrıca taşkın dalgasının bazı yoğun yerleşim alanlarına 30 dakikadan daha kısa sürede ulaşması ve yaklaşık 16 000 kişinin etkilenme potansiyelinin bulunması, konunun daha ayrıntılı araştırılmasını gerekli kılmaktadır.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda aşağıdaki konuların ele alınması önerilmektedir.

5.3.1.1 Deprem etkisiyle oluşabilecek yıkılma mekanizmasının modellenmesi

Çay Barajı'nın aktif faylara yakınlığı ve bölgenin yüksek sismik tehlikesi dikkate alınarak, baraj yıkılması senaryoları deprem kaynaklı deformasyonlarla ilişkilendirilmelidir. Özellikle kret oturması, mansap şevinde stabilite kaybı, beton yüzey kaplamasında çatlama veya kırılma ve parapet duvarında hasar oluşması sonucunda gelişebilecek üstten aşma süreci ayrı bir senaryo olarak incelenebilir. Bu amaçla şev stabilitesi analizleriyle belirlenen deprem sonrası deformasyonlar, HEC-RAS modelinde başlangıç gedik geometrisi olarak kullanılabilir.

5.3.1.2 Farklı rezervuar seviyelerinin incelenmesi

Yıkılma analizleri yalnızca maksimum rezervuar seviyesi için değil; minimum işletme seviyesi, normal su seviyesi, maksimum su seviyesi ve taşkın sırasında oluşabilecek daha yüksek su seviyeleri için tekrarlanabilir. Böylece rezervuar işletme koşullarının pik debi, taşkın yayılım alanı ve ulaşma süresi üzerindeki etkisi belirlenebilir. Bu çalışmalar sonucunda kritik rezervuar seviyeleri tanımlanarak baraj işletme kurallarına yönelik öneriler geliştirilebilir.

5.3.1.3 Model çözünürlüğü ve sayısal yöntemlerin karşılaştırılması

Farklı hesaplama ağı büyüklükleri ve zaman adımlarının sonuçlar üzerindeki etkisi araştırılmalıdır. Örneğin baraja yakın dar vadi kesimlerinde ve kentsel bölgelerde daha küçük, tarım alanlarında ise daha büyük hücrelerden oluşan değişken çözünürlüklü hesaplama ağı kullanılabilir. Ayrıca HEC-RAS içerisindeki difüzyon dalga ve tam momentum denklemleri karşılaştırılarak çözüm süresi ile model doğruluğu arasındaki denge değerlendirilebilir.

5.3.1.4 Manning pürüzlülük katsayısının duyarlılık analizi

Arazi örtüsü sınıflarına göre tanımlanan Manning katsayıları belirli bir belirsizlik taşımaktadır. Gelecek çalışmalarda her arazi kullanım sınıfı için farklı alt ve üst pürüzlülük değerleri denenebilir. Bu değerlerin taşkın yayılım alanı, su derinliği, akış hızı ve ulaşma zamanı üzerindeki etkileri belirlenebilir. Özellikle kentsel alanlar, tarım arazileri ve doğal akış yatağı için ayrı duyarlılık analizlerinin yapılması önerilmektedir.

5.3.1.5 Modelin saha verileriyle doğrulanması

Çay Barajı için gerçek bir yıkılma verisi bulunmadığından modelin doğrudan doğrulanması mümkün değildir. Bununla birlikte, geçmişte Çay Deresi'nde meydana gelen taşkınlara ait su izleri, köprü açıklıklarındaki seviyeler, fotoğraflar, uydu görüntüleri ve akım gözlem verileri kullanılarak arazi modelinin ve pürüzlülük katsayılarının kısmi kalibrasyonu yapılabilir.

5.3.1.6 Can kaybı ve ekonomik zarar analizleri

Bu tezde taşkından etkilenebilecek nüfus ve yerleşim alanları belirlenmiştir. Bir sonraki aşamada günün farklı saatlerine göre nüfus dağılımı, bina türleri, kat sayıları, hassas nüfus grupları ve tahliye gecikme süreleri dikkate alınarak olası can kaybı tahminleri yapılabilir. Tarım alanları, konutlar, sanayi tesisleri, yollar, demiryolları ve diğer altyapı unsurları için derinlik–hasar eğrileri kullanılarak ekonomik kayıp hesaplanabilir.

5.3.1.7 Mahalle bazlı tahliye modeli geliştirilmesi

Taşkın ulaşma sürelerinin mahalleler arasında 8 dakikadan birkaç saate kadar değişmesi nedeniyle her yerleşim için farklı tahliye stratejileri hazırlanmalıdır. Tekke, Cedit ve Köprübaşı gibi taşkın çok kısa sürede ulaştığı mahallelerde düşey tahliye, önceden belirlenmiş güvenli yapılar ve otomatik uyarı sistemleri araştırılabilir. Ulaşma süresinin daha uzun olduğu mahallelerde ise yol kapasitesi, nüfus yoğunluğu ve trafik koşulları dikkate alınarak güzergâh tabanlı tahliye benzetimleri gerçekleştirilebilir.

5.3.1.8 Gerçek zamanlı erken uyarı sistemi

Baraj gövdesine ve rezervuara yerleştirilecek su seviyesi, deformasyon, oturma, sızıntı ve titreşim sensörlerinden elde edilen verilerin gerçek zamanlı olarak izlenmesi önerilmektedir. Belirlenen eşik değerlerin aşılması durumunda HEC-RAS sonuçlarıyla bağlantılı otomatik uyarı ve tahliye mekanizmaları geliştirilebilir. Taşkın bazı yerleşimlere çok kısa sürede ulaşması nedeniyle uyarının gedik tamamen geliştikten sonra değil, olağan dışı deformasyonların başladığı aşamada verilmesi önem taşımaktadır.

6. KAYNAKLAR

- Abay O, Baykan N, Baykan N O, 2015, Tarih Boyunca Barajların Elden Çıkma Nedenleri. 4. Su Yapıları Sempozyumu, 157–166.
- Ağırlioğlu N, 2007, Baraj Planlama ve Tasarımı Cilt 1 Genişletilmiş 2. Baskı, Su Vakfı, 254s, İstanbul.
- Alpay H, 2019, Baraj Yıkılması Taşkın Risk Değerlendirmesi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 79s, Sakarya.
- Arkış T, 2020, Baraj yıkılması sonucu oluşan taşkın dalgalarının deneysel ve nümerik metodlar ile araştırılması / Experimental and numerical investigation of propagation of flood waves due to dam break, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Doktora Tezi, 142s, İzmir.
- Atallah T A, 2002, A Review on dams and breach parameters estimation, Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 120s.
- Bharath A, Shivapur A V, Hiremath C G, & Maddamsetty R, 2021, Dam Break Analysis Using HEC-RAS And HEC-Georas: A Case Study of Hidkal Dam, 14s Karnataka State India.
- Bulan, R. 2019. Coğrafi Bilgi Sistemleri yardımıyla taşkın risk alanlarının belirlenmesi: Ağrı Murat Nehri örneği (Yüksek lisans tezi). Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- CORINE, 2026, Copernicus Land Monitoring Service. *CORINE Land Cover*. European Environment Agency. Retrieved July 6, 2026, from
- Costa J E, 1985, Floods from dam failures, Open file report 85–560, Secretary, 59s.
- Cavus, U.S.; Kilit, M. Reliability-based seismic slope failure assessment of a high concrete-face rockfill dam close to an active fault zone. **Soils Found.** **2025**, **65**, 101653.
- DSİ, 1978, Su Yapıları Cilt - 1 (Baraj ve Göletler), DSİ Yayınları, Ankara, 1-6.

DSİ, 2018, DSİ Teknik Bülteni, Sayı 127, DSİ Matbaası, 45s.

DSİ, 2024, Çay Barajı, İş Sonu Projeleri.

Fread Dr Danny L, 1988 (revised 1991), BREACH: An Erosion Model for Earth Dam Failures, Hydrologic Research Laboratory, National Weather Service, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Silver Springs MD, 1988 (revised August 1991). 35s

Froehlich D, 1995, Embankment Dam Breach Parameters Revisited, 1 st Annual Conf. on Water Resources Engineering, American Society of Civil Engineers, New York, 887-891.

Froehlich D, 2008, Embankment Dam Breach Parameters And Their Uncertainties. Journal of Hydraulic Engineering, 1708-1721.

Gündüzalp G, 2020, İki Boyutlu (2D) Analiz ile Baraj Yıkılma Taşkınının Havza Üzerinde İncelenmesi: Melen Çayı Örneği, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 73s, Sakarya.

Kalafat D, Güneş Y, Kara M, & Kekovalı K. Sultandağı Fay Zonu'nun (Afyonkarahisar-Konya, Batı Anadolu) güncel depremselliğine bir bakış An overview of the current seismicity of the Sultandağı Fault Zone (Afyonkarahisar-Konya, Western Anatolia).

Kaya B, Ülke A, 2012, Diferansiyel Kuadratur Yöntemi Kullanılarak Difüzyon Dalga Yaklaşımı ile Taşkınların Ötelenmesi, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, cilt 27 sayı 2, 313–322.

Kocaman B, 2019, Baraj Yıkılması Sonucu Taşkın Yayılım Alanının İki Farklı Hidrodinamik Modelle Belirlenmesi Kıyaslanması ve Yüzey Pürüzlülüğünün Taşkın Üzerindeki Hassasiyetinin İncelenmesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 109s, Ankara.

- Kocaman S, 2002, Baraj Yıkılması Analizi ve Uygulaması. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 157s, Adana.
- Kocaman S, 2007, Baraj Yıkılma Probleminin Deneysel ve Teorik Olarak İncelenmesi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi, Adana, 303s.
- MacDonald C T ve Langridge-Monopolis J, 1984, Breaching Characteristics of Dam Failures, Journal of Hydraulic Engineering, 567-586.
- Marangoz H O, 2020, Baraj yıkılma sonrası oluşacak taşkın dalgasının difüzyon ve momentum dalga yaklaşımlarıyla modellenmesi / Modelling of dam break induced flood wave using diffusion and momentum wave approaches, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 178s, Trabzon.
- Mei S, Zhong Q, Yang M, Chen S, Shan Y, Zhang L, 2023, Overtopping-Induced breaching process of concrete-faced rockfill dam: A case study of Upper Taum Sauk dam, Engineering Failure Analysis, Sayı 144, 21s
- Pinto R P A, 2014, Floodplain Inundation Models and SAR Imagery Analysis, Universidade Técnica de Lisboa UTL, Master's thesis, 85s, Lisbon
- T.C. Afyonkarahisar Valiliği İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü, 2020, İRAP İl Afet Risk Azaltma Planı, 239s.
- Taş, E., İçağa, Y., & Zorluer, İ. (2016). Taşkın yayılım haritalarının oluşturulması ve taşkın zarar analizi: Akarçay Afyon Alt Havzası Örneği. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 16(3), 711-721.
- Töreyn, M., Özdemir, S., & Kurt, M. (2010). ArcGIS 10 Desktop Uygulama Dokümanı. Ankara.
- Türkiye İstatistik Kurumu. (2025, 6 Şubat). Adrese dayalı nüfus kayıt sistemi sonuçları, (Haber Bülteni Sayı: 53783).
- Te Chow, V. (1959). Open channel hydraulics.

- Usace, 2014, Using HEC-RAS for Dam Break Studies T-39, Us Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center, 74s.
- Usace HEC. (2023). HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System) (Version 6.4.1) [Software]. Davis, CA: U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.
- Von Thun J L ve Gillette D R, 1990, Guidance on Breach Parameters, Internal Memorandum, U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver Colorado, 1-5.
- Yıldız A, Dumlupınar İ, Bağcı M, Ulutürk Y, Başaran C, Erdoğan E, 2012, Afyonkarahisar ve Çevresinin Depremselliği, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 1-7.
- Yıldız C, 2021, Baraj yıkılması taşkın risk analizi yeşildere barajı örneği / Dam break flood risk analysis; An example of yeşildere dam, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 69s, Elazığ.
- Zhang L M, Xu Y ve Jia J S, 2009, Analysis of Earth Dam Failures: A Database Approach, Georisk, 184-189.

İnternet Kaynakları

- 1- https://en.wikipedia.org/wiki/Dam_failure#List_of_major_dam_failures/, 05.12.2025
- 2- <https://www.nufusune.com/>, 05.12.2025
- 3- <http://www.cay.bel.tr/ilcemiz/>, 05.12.2025
- 4- https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/hizmetler/doc/diri_fay_haritalari/afyon.pdf
/01.02.2026
- 5- [https://www.hec.usace.army.mil /](https://www.hec.usace.army.mil/),01.02.2026
- 7- [https://avesis.yildiz.edu.tr /](https://avesis.yildiz.edu.tr/),01.02.2026
- 8- [https://www.kursatozcan.com/turkiye_pafta_bolumlemesi_google_earth /](https://www.kursatozcan.com/turkiye_pafta_bolumlemesi_google_earth/),01.02.2026
- 9- <https://www.nufusu.com/cay-afyonkarahisar-mahalleleri-nufusu/>,01.02.2026
- 10- <https://veriportali.tuik.gov.tr/tr/press/53783/>,06.02.2025
- 11-<https://doi.org/10.1016/j.sandf.2025.101653/>,07.02.2026
- 12-<https://land.copernicus.eu/en/products/corine-land-cover/>,06.02.2025

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Soner CELEP
Doğum Yeri ve Tarihi : Afyonkarahisar/ Merkez, 24.06.1991
Yabancı Dili : İngilizce
İletişim (Telefon / e-posta) : 5370100345, sonercelep@dsi.gov.tr

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Atatürk Anadolu Lisesi (2005 – 2009)
Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Harita Mühendisliği Böl.,
(2010 – 2014)
:Afyon Kocatepe Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Böl.,
(2021 – 2024)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

: Sayın İnşaat (Afyonkarahisar) (2014-2018)
: Hakkari üniversitesi (2018 – 2019)
: Devlet Su İşleri (Ankara) (2019 – 2021)
:Devlet Su İşleri (Afyonkarahisar) (2021 – Devam Ediyor)