



T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



TAŞKIN ŞOK DALGASI ETKİLERİNİN AZALTILMASINDA YAPISAL
ÖNLEMLERİN PERFORMANSININ DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK
ARAŞTIRILMASI

UĞUR ÜNAL

EYLÜL 2025

T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TAŞKIN ŞOK DALGASI ETKİLERİNİN AZALTILMASINDA YAPISAL
ÖNLEMLERİN PERFORMANSININ DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK
ARAŞTIRILMASI

UĞUR ÜNAL

Doktora Tezi

Danışman

Prof. Dr. Kutsi Savaş ERDURAN

Eylül 2025

Uğur ÜNAL tarafından **Prof. Dr. Kutsi Savaş ERDURAN** danışmanlığında hazırlanan “**Taşkın Şok Dalgası Etkilerinin Azaltılmasında Yapısal Önlemlerin Performansının DeneySEL ve Sayısal Olarak Araştırılması**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği** Anabilim Dalı’nda Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Kutsi Savaş ERDURAN, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Üye : Prof. Dr. Ahmet BİLGİL, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Üye : Prof. Dr. Yahya Erkan AKANSU, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Üye : Prof. Dr. Neslihan SEÇKİN, Çukurova Üniversitesi

Üye : Prof. Dr. Selahattin KOCAMAN, İskenderun Teknik Üniversitesi

ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından/....../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu’nun/....../20.... tarih ve sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../20...

Prof. Dr. Mustafa KARATEPE

MÜDÜR

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Uğur ÜNAL

ÖZET

TAŞKIN ŞOK DALGASI ETKİLERİNİN AZALTILMASINDA YAPISAL ÖNLEMLERİN PERFORMANSININ DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK ARAŞTIRILMASI

ÜNAL, Uğur

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman

: Prof. Dr. Kutsi Savaş ERDURAN

Eylül 2025, 247 sayfa

Bu çalışmada, tam ve kısmi baraj yıkılması sonucu oluşan taşkın şok dalgalarının olumsuz etkilerini azaltma amaçlı üretilen yapısal önlemlerin, hız, maksimum derinlik, maksimum yatay çarpma kuvveti, kuvvet şiddeti ve impuls kriterlerine göre performansı deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. Ayrıca, şok dalgalarının karakteristikleri üzerinde kapak açılma süresiyle, kuru/ıslak mansap yatağı koşullarının etkileri incelenmiştir. Deneyler, iki ayrı yatay ve dikdörtgen kanal üzerinde farklı başlangıç rezervuar su seviyelerinde gerçekleştirilmiştir. Görüntü işleme tekniği de kullanılarak şok dalgalarına ait akım derinlikleri ve su yüzü profilleri ile şok dalgalarının yayılma hızları ve model-yapı üzerinde oluşturdıkları yatay çarpma kuvvetleri elde edilmiştir. Sayısal çalışmalarda 2B ve 3B modeller kullanılmış ve elde olunan sonuçlar deney çıktıları ile karşılaştırılmıştır. Sayısal modellerin deneysel akım durumlarını ne derece yansıtabildiği gösterilmiştir. Ayrıca, görüntü işleme tekniğinin kullanımı üzerine değerlendirmeler yapılmıştır. Şok dalgası kaynaklı taşkınların olumsuz etkilerini azaltmada yapısal önlemlerin gösterdikleri performanslar karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur.

Anahtar Sözcükler: Deneysel ve sayısal modelleme, taşkın şok dalgası, yapısal önlemler, görüntü işleme tekniği, performans araştırması

SUMMARY

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF PERFORMANCES OF STRUCTURAL MEASURES TO REDUCE THE EFFECTS OF FLOOD SHOCK WAVE

ÜNAL, Uğur

Nigde Omer Halisdemir University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor : Prof. Dr. Kutsi Savaş ERDURAN

September 2025, 247 pages

In this study, the performances of structural measures produced to reduce the adverse effects of flood shock waves resulting from complete and partial dam-breaks were experimentally and numerically investigated based on the following criteria; celerity, maximum depth, maximum horizontal impact force, force intensity and impulse. Additionally, the effects of the gate opening time and dry/wet downstream bed conditions on the characteristics of the shock waves were examined. The experiments were conducted on two different horizontal and rectangular channels with various initial reservoir water levels. The shock waves flow depths and water surface profiles were determined using several methods including the image processing technique and in addition, their propagation celerities and the horizontal impact forces acting on the model-structure were obtained. In the numerical studies, 2D and 3D models were used and the results obtained were compared with the experimental outputs. The ability of the numerical models to reproduce the experimental outputs were demonstrated. Moreover, the applicability of image processing techniques was evaluated. The performances of structural measures with regard to the criteria in reducing the adverse effects of shock wave-induced floods were comparatively demonstrated.

Keywords: Experimental and numerical modeling, flood shock wave, structural measures, image processing technique, performance research

ÖN SÖZ

Doktora tez çalışmalarım sırasında, çalışma ve araştırmalarımaya yön veren, bilgi ve yardımlarını esirgemeyen, öğrencilerine her daim destek olan ve sadece bilgi değil aynı zamanda vizyon kazandıran, bilimsel yaklaşım ve etik değerler açısından örnek aldığım değerli hocam Prof. Dr. Kutsi Savaş ERDURAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca kuvvet ölçümünde özverili emekleri olan Prof. Dr. Yahya Erkan AKANSU'ya, Kanal-1'in projelendirilmesi ve kurulumunda değerli katkıları olan Prof. Dr. Selahattin KOCAMAN'a, görüntü işleme tekniği algoritmalarının geliştirilmesinde büyük emekleri olan Doç. Dr. Ahmet Şakir DOKUZ'a ve Arduino ölçüm sistemindeki yardımlarından dolayı Dr. Öğr. Üyesi Alper EMLEK'e teşekkürü bir borç bilirim. Bunun yanı sıra deneysel çalışmalarım esnasında yardımlarını esirgemeyen Arş Gör. Dr. Emre UÇAR'a, Arş. Gör. Kemal ULUSOY'a, Arş. Gör. Yunus Emre KEBELİ'ye, Arş. Gör. Metehan BULUT'a, doktora öğrencisi Olusola O. ADEKOYA'ya ve kan bağıımız olmasa da can bağıımız olan değerli kardeşim Talat Tuğberk KOYUNCU'ya gönülden teşekkür ederim.

Akademik hayata attığım ilk adımda yanımda olan sadece bir hoca değil aynı zamanda akademik yolcuğumun en başındaki ışık olan ve bu uzun yolculukta bana inanan ilk isimlerden biri olarak üzerimdeki emeğini her daim şükranla anacağım kıymetli hocam Doç. Dr. Dilek Eren AKYÜZ'e sevgi ve saygılarımı sunarım.

Bu çalışma, MMT 2021/3-BAGEP numaralı “Baraj Yıkılması Sonucu Oluşan Taşkın Dalgasının Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi” isimli BAP projesinden üretilmiş olup, projeye destek sağlayan Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Bu doktora tezimi tüm hayatım boyunca maddi ve manevi olarak her zaman yanımda bulunan desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen canım annem Fatma ÜNAL'a, kıymetli babam Mehmet ÜNAL'a ve sevgili ablam Ayşenur ÜNAL'a ithaf ediyorum. Onların sevgisi, sabrı ve inancı zorlu akademik yolculuğumda en büyük güç kaynağıım olmuştur. Bu başarı onlara olan minnettarlığımın bir göstergesidir.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
SUMMARY	v
ÖN SÖZ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
SİMGE VE KISALTMALAR	xxv
BÖLÜM I.....	1
GİRİŞ	1
1.1 Çalışmanın Önemi	1
1.2 Konu ile ilgili Yapılan Çalışmaların Özeti ve Görülen Eksiklikler.....	3
1.3 Amaç ve Hedefler	4
1.4 Tezin İçeriği.....	5
BÖLÜM II	6
KONU İLE İLGİLİ ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	6
2.1 Şok Dalgasının Karakteristik Yapısının ve Karakteristik Yapısı Üzerine Etki Ettiği Düşünülen Faktörlerin İncelendiği Çalışmalar	8
2.2 Şok Dalgasının Yıkıcı Etkilerinin Araştırıldığı Çalışmalar	29
2.3 Şok Dalgasının Etkilerinin Azaltılmasına Yönelik Çalışmalar	44
BÖLÜM III.....	51
MATERYAL VE METOT	51
3.1 Deneysel Çalışmalar	51
3.1.1 Deney düzeneklerinin kurulması.....	51
3.1.2 Yapısal önlemlerin üretimi.....	57
3.1.3 Deneyler öncesi son düzenlemeler	65
3.1.4 Deneysel veri toplama yöntemleri	69
3.1.5 Deneylerin yapılışı	85
3.1.6 Ölçek ve duvar Etkileri	94
3.1.7 Deneylerin tekrarlanabilirliği	98
3.2 Sayısal Çalışmalar.....	101
3.2.1 Flow-3D programı.....	101

3.2.1.1 Kuru ve ıslak mansap yatağında kısmi baraj yıkılması probleminin modellenmesi.....	103
3.2.1.2. Yapısal ortamların kullanıldığı 3B sayısal model çalışmaları.....	109
3.2.1.3 Gözenekli ve gözeneksiz yapıların kullanıldığı 3B sayısal model çalışmaları.....	113
3.2.2 İki boyutlu FVSSWE sayısal modeli	120
3.3 Analitik Yöntemler	123
3.3.1 Ortalama dalga yayılma hızının hesaplanması.....	123
3.3.2 Dalga önü hızları ve konumlarının hesaplanması	123
BÖLÜM IV	125
BULGULAR VE TARTIŞMA.....	125
4.1 Taşkın Şok Dalgası Karakteristiğinin Belirlenmesi.....	125
4.1.1 Kapak açılma süresinin etkisi.....	125
4.1.2 Kuru ve ıslak mansap yatağının etkisi	132
4.1.3 Taşkın şok dalgası karakteristiğinin analitik yöntemlerle incelenmesi.....	151
4.2 Yapısal Önlemlerin Performanslarının Araştırılması	155
4.2.1 Hız	155
4.2.2 Maksimum derinlik	173
4.2.3 Maksimum yatay çarpma kuvveti	195
4.2.4 Kuvvet şiddeti	201
4.2.5 İmpuls.....	217
4.2.6 Performans araştırmasından elde edilen yaygın çıkarımlar	220
BÖLÜM V	223
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	223
5.1 Sonuçlar	223
5.1.1 Taşkın şok dalgasına ait akım karakteristikleri ve bu karakteristikler üzerinde etkili olan faktörler	223
5.1.2 Görüntü işleme tekniğinin uygulanabilirliği	224
5.1.3 Sayısal modellerin deneysel sonuçları üretmedeki başarısı	225
5.1.4 Yapısal önlemlerin şok dalgasının olumsuz etkilerini azaltmadaki performansları.....	226
5.2 Öneriler	230
KAYNAKLAR	232
ÖZ GEÇMİŞ	247
TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN ESERLER	248

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Baraj yıkılması kaynaklı taşkın şok dalgası karakteristiğinin ve bu karakteristiği etkileyen unsurların incelenmesine yönelik çalışmalar	23
Çizelge 2.2. Baraj yıkılması kaynaklı taşkın şok dalgasının yıkıcı etkilerinin araştırıldığı çalışmalar	40
Çizelge 2.3. Baraj yıkılması kaynaklı taşkın şok dalgasının etkilerinin azaltılmasına yönelik çalışmalar	49
Çizelge 3.1. Kanal-1’de yürütülen deneysel çalışmalar ile aynı akım koşullarında gerçekleştirilen sayısal çalışmalarda kullanılan yapısal ortamlar ve kombinasyonları.....	58
Çizelge 3.2. Kanal-2’de yürütülen deneysel çalışmalar ile aynı akım koşullarında gerçekleştirilen sayısal çalışmalarda kullanılan yapısal ortamlar ve kombinasyonları.....	63
Çizelge 3.3. Kanal-2’de yürütülen deneysel çalışmalar ile aynı akım koşullarında gerçekleştirilen sayısal çalışmalarda kullanılan gözenekli ve gözeneksiz yapılar.....	64
Çizelge 3.4. Üst Kamera 1 için kalibrasyon çalışmalarına ait sonuçlar	75
Çizelge 3.5. Üst Kamera 2 için kalibrasyon çalışmalarına ait sonuçlar	76
Çizelge 3.6. Yan görünüş kalibrasyon çalışmalarına ait sonuçlar	77
Çizelge 3.7. Kısmi baraj yıkılması durumuna ait deneysel ve sayısal çalışmalarda göz önüne alınan başlangıç akım şartları	86
Çizelge 3.8. Ağ boyutunun maksimum akım derinliği üzerindeki etkisi	106
Çizelge 3.9. Yapısal ortamların kullanımı durumunda akım derinlikleri için ağdan bağımsızlık testi	110
Çizelge 3.10. Gözenekli/gözeneksiz yapıların kullanımı durumunda akım derinlikleri için ağdan bağımsızlık testi.....	116
Çizelge 3.11. Gözenekli/gözeneksiz yapıların kullanımı durumunda kuvvet ölçümü için ağdan bağımsızlık testi.....	119
Çizelge 3.12. α katsayıları	123
Çizelge 4.1. WebPlotDigitizer yazılımı kullanılarak elde edilen ve kapaktan itibaren ölçülen şok dalgası önünün ulaştığı maksimum mesafeler	127

Çizelge 4.2. Farklı kapak açılma süresi ve farklı zamanlarda hesaplanan dalga yayılma hızları	127
Çizelge 4.3. Görüntü işleme tekniği kullanılarak elde edilen ve kapaktan itibaren ölçülen şok dalgası önünün ulaştığı maksimum mesafeler.....	129
Çizelge 4.4. WebPlotDigitizer yazılımı ve görüntü işleme tekniği sonuçları arasında hesaplanan yüzde bağıl fark değerleri.....	129
Çizelge 4.5. Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen ve kapaktan itibaren ölçülen şok dalgası önünün ulaştığı maksimum mesafeler.....	133
Çizelge 4.6. 25 cm başlangıç rezervuar su seviyesi için şerit metre okuma sonuçları ile görüntü işleme tekniği sonuçları arasındaki maksimum yüzde bağıl farklar	135
Çizelge 4.7. 30 cm başlangıç rezervuar su seviyesi için şerit metre okuma sonuçları ile görüntü işleme tekniği sonuçları arasındaki maksimum yüzde bağıl farklar	136
Çizelge 4.8. Sayısal model ve görüntü işleme tekniği ile elde edilen akım derinliği değerlerinin yüzde bağıl farkları - K1 ve I1 durumları.....	144
Çizelge 4.9. Sayısal model ve görüntü işleme tekniği ile elde edilen akım derinliği değerlerinin yüzde bağıl farkları – K2 ve I2 durumları	145
Çizelge 4.10. Kanalda herhangi bir yapısal ortam yokken deneysel çalışmalardan elde edilen ortalama hızlar ve α katsayıları	152
Çizelge 4.11. Ritter (1892)'in analitik denklemleri kullanılarak hesaplanan dalga önü hızları	153
Çizelge 4.12. Deney sonuçlarından elde edilen dalga önü hızları ve yüzde bağıl farklar	153
Çizelge 4.13. Deneysel veriler baz alınarak dalga önü hızları için hesaplanan yüzde bağıl farklar	154
Çizelge 4.14. Dalga önü konumları	155
Çizelge 4.15. Dalga önü konumları için hesaplanan yüzde bağıl hata	155
Çizelge 4.16. Farklı yapısal ortamlar için kapaktan itibaren ölçülen şok dalgası önünün ulaştığı maksimum mesafeler ve hızlar.....	156
Çizelge 4.17. Yapısal ortamlardan geçen şok dalgası önünün model-yapıya çarpma süreleri - Konum-1	158
Çizelge 4.18. Yapısal ortamlardan geçen şok dalgası önünün model-yapıya çarpma süreleri - Konum-2	160

Çizelge 4.19. Deneysel ölçüm sonuçlarına göre elde edilen şok dalgası önünün ulaştığı maksimum mesafeler ve maksimum mesafeler arasındaki farklar	162
Çizelge 4.20. Deneysel ölçüm sonuçlarına göre elde edilen şok dalgası önünün kanalın 6.25 m'sine ulaşma süreleri	162
Çizelge 4.21. Farklı yapı tiplerinden geçen şok dalgası önünün deneysel ve sayısal sonuçlara dayalı olarak elde edilen model-yapıya çarpma süreleri	165
Çizelge 4.22. Yapısal ortam ve gözenekli-gözeneksiz yapılar olması durumunda deneysel ölçüm sonuçlarına göre elde edilen şok dalgası önünün ulaştığı maksimum mesafeler ve maksimum mesafeler arasındaki farklar	166
Çizelge 4.23. Yapısal ortam ve gözenekli-gözeneksiz yapılar olması durumunda sayısal model sonuçlarına göre elde edilen şok dalgası önünün ulaştığı maksimum mesafeler ve maksimum mesafeler arasındaki farklar	167
Çizelge 4.24. Kanal mansabında yapısal ortam ve gözenekli/gözeneksiz yapılar olması durumunda deneysel ölçüm sonuçlarına göre elde edilen şok dalgası önünün kanalın 6.25 m'sine ulaşma süreleri.....	168
Çizelge 4.25. Farklı yapısal ortamlar tipleri için yüzde ortalama bağıl fark değerleri .	180
Çizelge 4.26. Yapısal ortamların membaında ölçülen maksimum derinlikler	181
Çizelge 4.27. Yapısal ortamların mansabında ölçülen maksimum derinlikler	181
Çizelge 4.28. Yapısal ortamlar kullanılması durumunda model-yapının hemen membaında oluşan maksimum derinlikler	182
Çizelge 4.29. Gözeneksiz ve gözenekli yapılar için yüzde ortalama bağıl fark değerleri	187
Çizelge 4.30. Yapıların memba ve mansabında oluşan maksimum derinlikler.....	188
Çizelge 4.31. Gözenekli/gözeneksiz yapılar kullanılması durumunda model-yapının hemen membaında oluşan maksimum derinlikler	189
Çizelge 4.32. Ortam ve yapıların memba ve mansabında oluşan maksimum derinlikler	190
Çizelge 4.33. Yapısal ortam ve gözenekli/gözeneksiz yapılar için yüzde ortalama bağıl fark değerleri	195
Çizelge 4.34. Farklı rezervuar su seviyelerinde yapısal ortamlardan geçen şok dalgasının Konum-1'e yerleştirilen model-yapı üzerinde oluşturduğu maksimum yatay çarpma kuvvetleri.....	196

Çizelge 4.35. Farklı rezervuar su seviyelerinde yapısal ortamlardan geçen şok dalgasının Konum-2'ye yerleştirilen model-yapı üzerinde oluşturduğu maksimum yatay çarpma kuvvetleri	197
Çizelge 4.36. H10'a göre farklı rezervuar su seviyeleri için maksimum yatay çarpma kuvvetinin yüzdelik artışı oranları– Konum-1	197
Çizelge 4.37. H10'a göre farklı rezervuar su seviyeleri için maksimum yatay çarpma kuvvetinin yüzdelik artışı oranları– Konum-2	198
Çizelge 4.38. Farklı rezervuar su seviyelerinde gözenekli ve gözeneksiz yapılardan geçen şok dalgasının model-yapı üzerinde oluşturduğu maksimum yatay çarpma kuvvetleri	200
Çizelge 4.39. Farklı rezervuar su seviyelerinin H15'e göre maksimum yatay çarpma kuvvetindeki artış yüzdeleri	200
Çizelge 4.40. Farklı rezervuar su seviyelerinde yapısal ortamların kuvvet şiddetini azaltma yüzdeleri - Konum-1	205
Çizelge 4.41. Farklı rezervuar su seviyelerinde yapısal ortamların kuvvet şiddetini azaltma yüzdeleri - Konum-2	209
Çizelge 4.42. Farklı rezervuar su seviyelerinde oluşan kuvvet şiddetinin azalma yüzdeleri - Gözenekli/Gözeneksiz yapılar	216
Çizelge 4.43. Deneysel ve sayısal sonuçlara dayalı kuvvet şiddetleri arasındaki yüzde bağıl farklar	216
Çizelge 4.44. Yapısal ortamlardan geçen şok dalgasının model-yapı üzerinde oluşturduğu toplam impuls ve maksimum impuls	218
Çizelge 4.45. Gözenekli ve gözeneksiz yapılardan geçen şok dalgasının model-yapı üzerinde oluşturduğu toplam impuls ve maksimum impuls	219
Çizelge 4.46. Yapısal ortamların performans araştırmasından elde edilen yaygın çıkarımlar	221
Çizelge 4.47. Gözenekli ve gözeneksiz yapıların performans araştırmasından elde edilen yaygın çıkarımlar	222
Çizelge 4.48. Yapısal ortam ve gözenekli/gözeneksiz yapıların birlikte kullanımlarına ait performans araştırmasından elde edilen yaygın çıkarımlar	222

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Taşkınların sınıflandırılması (Tarım ve Orman Bakanlığı, 2022).....	7
Şekil 3.1. Kanal-1'e ait genel görünüm	52
Şekil 3.2. Kanal-1'e ait şematik plan görünüşü	53
Şekil 3.3. Kanal-1'e ait şematik boykesit	53
Şekil 3.4. Kanal-1'e ait kapak açılma mekanizması ve kanal ön görünüşü şematik enkesit çizimi	54
Şekil 3.5. Kanal-2'ye ait genel görünüm	55
Şekil 3.6. Kanal-2'ye ait kapak açılma mekanizması ve kanal ön görünüşü şematik enkesit çizimi	56
Şekil 3.7. Kapak açılma mekanizmasına ait değişik açılardan görünüm ve kılavuz raylar	57
Şekil 3.8. a) Zortrax M200 b) Creality Ender 3 S1 c) Filament	58
Şekil 3.9. Yapısal ortam tipleri (ölçüler cm) a) Tip YO-1.1 b) Tip YO-1.2 c) Tip YO 2.1 d) Tip YO-2.2 e) Tip YO-3.1 f) Tip YO-3.2 g) Tip YO-4.2 h) Tip YO-5.2 ..	59
Şekil 3.10. Kanal-1'e ait yapısal ortam tipleri için kullanılan şablonlar a) Tip YO-1.1 b) Tip YO-2.1 c) Tip YO-3.1 d) Tip YO-1.2 e) Tip YO-2.2 f) Tip YO-3.2 g) Tip YO-4.2 h) Tip YO-5.2	60
Şekil 3.11. Kanal-1 için yapısal ortam tiplerinin oluşturulması a) yüzeyin kaplanması b) şablon ile bölgelerin belirlenmesi c) üretilen yapısal elemanların yapıştırılması d) nihai yapısal ortam	61
Şekil 3.12. Deneysel çalışmalarda kullanılan Kanal-1'e ait düz dizilimdeki yapısal ortamlar a) Tip YO-1.1 b) Tip YO-2.1 c) Tip YO-3.1	61
Şekil 3.13. Deneysel çalışmalarda kullanılan Kanal-1'e ait şaşırtmalı dizilimdeki yapısal ortamlar a) Tip YO-1.2 b) Tip YO-2.2 c) Tip YO-3.2 d) Tip YO-4.2 e) Tip YO-5.2	62
Şekil 3.14. Deneysel çalışmalarda kullanılan Kanal-2'ye ait düz ve şaşırtmalı dizilimlerdeki yapısal ortamlar.....	63
Şekil 3.15. Gözeneksiz Yapı a) perspektif görünüm b) laboratuvar görünümü	64
Şekil 3.16. Eğri Yüzeyli Yapı a) perspektif görünüm b) laboratuvar görünümü	64
Şekil 3.17. Gözenekli Tip-I a) perspektif görünüm b) laboratuvar görünümü	64

Şekil 3.18. Gözenekli Tip-II a) perspektif görünüm b) laboratuvar görünümü.....	65
Şekil 3.19. Gözenekli Tip-III a) perspektif görünüm b) laboratuvar görünümü	65
Şekil 3.20. Yapısal ortamlara ait deney düzeneği a) Kanal-1 b) Kanal-2	66
Şekil 3.21. Kanal-1 içerisine yapısal ortamların yerleştirilmesi	66
Şekil 3.22. Kanal-1 için deneysel çalışmalarda kullanılan yapısal ortamlara ait şematik görünüm a) plan b) boykesit	66
Şekil 3.23. Kanal-2 içerisine yapısal ortamların yerleştirilmesi	67
Şekil 3.24. Kanal-2 için deneysel çalışmalarda kullanılan yapısal ortamlara ait şematik görünüm a) plan b) boykesit	67
Şekil 3.25. Kuvvet ölçümü a) yük hücresi ve model-yapı b) model-yapı boyutları c) traverse sistemi	68
Şekil 3.26. Kanal-2'ye ait a) deney kanalının bir bölümü b) yapı memba ve mansabına yerleştirilen şerit metreler	69
Şekil 3.27. Kanal-2 içerisine gözenekli ve gözeneksiz yapıların yerleştirilmesi.....	69
Şekil 3.28. Kanal-2 için deneysel çalışmalarda kullanılan gözenekli ve gözeneksiz yapılara ait şematik görünüm a) plan b) boykesit.....	69
Şekil 3.29. a) Kapak açılma mekanizması ve sınır anahtarlar b) Arduino ve 2x16'lık ekran c) Arduino ve güç kaynağı.....	70
Şekil 3.30. WebPlotDigitizer yazılımı a) görüntünün yüklenmesi ve çizim türünün seçilmesi b) sayısallaştırılması istenen bölgelerin belirlenmesi c) verilerin elde edilmesi.....	71
Şekil 3.31. Kanal-1'ait yapısız ortamlar için deneysel ölçüm noktaları ve kameraların yerleşimi	73
Şekil 3.32. Kanal-1'e ait deney düzeneği ve kameraların konumunu gösteren şematik çizim	73
Şekil 3.33. Kanal 1'e ait yapısal ortamlar için deneysel ölçüm noktaları ve kameraların yerleşimi (ÜK: Üst Kamera ve YK: Yan Kamera).....	74
Şekil 3.34. Kanal 1'de yapısal ortamların yerleştirilmesi ve iki boyutlu su yüzü profillerinin ölçülmesinde kullanılan kameraların konumu	74
Şekil 3.35. Üst Kamera 1 için belirlenen kalibrasyon noktaları	75
Şekil 3.36. Üst kamera 1 için kalibrasyon çalışmalarında elde edilen değerler	75
Şekil 3.37. Üst Kamera 2 için belirlenen kalibrasyon noktaları	76
Şekil 3.38. Üst kamera 2 için kalibrasyon çalışmalarında elde edilen değerler	76
Şekil 3.39. Yan görünüş için belirlenen kalibrasyon noktaları.....	77

Şekil 3.40. Yan görünüş kalibrasyon çalışmalarında elde edilen değerler	77
Şekil 3.41. Rezervuar arka köşe noktalarında bir noktadaki ölçümler için filtrelenmiş görüntüler.....	79
Şekil 3.42. Bir boyutlu görüntü elde etmede kullanılan yan kameraya ait a) deneysel görüntü b) yeşil renkli şeritlerin filtrelenmesi	79
Şekil 3.43. Bir boyutlu görüntü elde etmede kullanılan yan kameraya ait görüntünün kırmızı renk filtresiyle filtrelenmesi a) kuru durum b) ıslak durum	80
Şekil 3.44. İki boyutlu görüntü elde etmede kullanılan Kanal-1'e ait plan görünümü ve yeşil renkli işaretleyicilerin yerleşimi.....	82
Şekil 3.45. İki boyutlu görüntü elde etmede kullanılan Kanal-1'e ait görüntüler ve yeşil renkli işaretleyicilerin filtrelenmesi a) üst kamera 1 b) üst kamera 2 c) üst kamera 3.....	82
Şekil 3.46. 102 ms kapak açılma süresi ve belli zamanlar için kırmızı renkli suyun filtrelenmesi a) üst kamera 1 b) üst kamera 2 c) üst kamera 3	82
Şekil 3.47. USA ATI mark GAMMA model SI-32-2.5 yük hücresi.....	83
Şekil 3.48. Deneysel kurulum ve yük hücresine ait şematik çizim	83
Şekil 3.49. Yük hücresi açılı kalibrasyon testi.....	84
Şekil 3.50. İmpuls hesaplamasında kullanılan parametrelerin şematik gösterimi (Erduran vd., 2025)	85
Şekil 3.51. Kanal-1'in bir bölümüne ait kuru mansap yatağı a) üst görünüş b) yan görünüş	86
Şekil 3.52. Kanal-1'e ait kuru mansap yatağı ve başlangıç rezervuar su seviyesinin şematik gösterimi.....	87
Şekil 3.53. Islak mansap yatağı deneyleri için Kanal-1'e ait mansap ucunun pleksiglas ile kapatılması	87
Şekil 3.54. Kanal-1'e ait ıslak mansap yatağı ve başlangıç rezervuar su seviyesinin şematik gösterimi.....	88
Şekil 3.55. Kanal-1'in bir bölümüne ait ıslak mansap yatağı a) üst görünüş b) yan görünüş	88
Şekil 3.56. Kanal-1'de yapısal ortam (Tip YO-3.1) kullanımı ve kısmi baraj yıkılması deneyine ait görseller a) su yüzü profilleri b) ölçüm noktaları.....	89
Şekil 3.57. Kanal-1'de farklı şekillerde prizmatik elemanlarla oluşturulan yapısal ortamlar kullanılarak gerçekleştirilen kısmi baraj yıkılması deneylerine ait görüntüler.....	90

Şekil 3.58. Kanal-2'ye ait tam baraj yıkılması sonucu oluşan ve yapısal ortamdan geçerek ilerleyen şok dalgası ve model-yapıya çarpma anı	91
Şekil 3.59. a) kanal üzerine yeşil şerit uygulaması b) kanal arka cam yüzeyinin beyaz kağıtlarla kaplanması	92
Şekil 3.60. Kanal-2'ye ait tam baraj yıkılması sonucu oluşan ve Gözenekli Tip-II'den geçerek ilerleyen şok dalgasına ait deneysel görüntüler ve model yapıya çarpma anı	93
Şekil 3.61. Model-yapının kanal içindeki yerleşimine ait şematik çizim a) merkezde b) sol duvara 4.5 cm yakın	96
Şekil 3.62. Model-yapının kanalın merkezinde ve kanalın sol duvarına 4.5 cm yakınlıkta olması durumu - kanalda herhangi yapısal ortam yok	96
Şekil 3.63. Model-yapının kanalın merkezinde ve kanalın sol duvarına 4.5 cm yakınlıkta olması durumu - Gözenekli Tip-I	96
Şekil 3.64. Model-yapının kanalın merkezinde ve kanalın sol duvarına 4.5 cm yakınlıkta olması durumu - Gözenekli Tip-II	97
Şekil 3.65. Model-yapının kanalın merkezinde ve kanalın sol duvarına 4.5 cm yakınlıkta olması durumu - Gözenekli Tip-III	97
Şekil 3.66. Model-yapının kanalın merkezinde ve kanalın sol duvarına 4.5 cm yakınlıkta olması durumu - Gözeneksiz Yapı	97
Şekil 3.67. Model-yapının kanalın merkezinde ve kanalın sol duvarına 4.5 cm yakınlıkta olması durumu - Eğri Yüzeyli Yapı	98
Şekil 3.68. Gözenekli Tip-II'den geçen akımın mansap kısmındaki yayılımı	98
Şekil 3.69. Akım derinliği deneylerinin tekrarlanabilirliği a) kuru durum b) ıslak durum	99
Şekil 3.70. Kuvvet ölçümü deneylerinin tekrarlanabilirliği a) Tip YO-1.1 b) Gözenekli Tip-I	100
Şekil 3.71. Flow-3D ara yüzü ve model kurulum sekmesi	104
Şekil 3.72. Ağ boyutunun akım derinliği üzerindeki etkisi	105
Şekil 3.73. Ağ boyutunun simülasyon süresi ve maksimum akım derinliği üzerindeki etkisi	106
Şekil 3.74. Ağ boyutunun dalga önü konumu üzerindeki etkisi	106
Şekil 3.75. Flow-3D'de kuru mansap yatağı durumu için sınır koşullarının belirlenmesi	107

Şekil 3.76. Flow-3D’de kuru mansap yatağı durumu için başlangıç koşullarının belirlenmesi.....	107
Şekil 3.77. Flow-3D verilerin elde edilmesi	108
Şekil 3.78. Flow-3D’de ıslak mansap yatağı durumu için sınır koşullarının belirlenmesi	108
Şekil 3.79. Flow-3D’de ıslak mansap yatağı durumu için başlangıç koşullarının belirlenmesi.....	108
Şekil 3.80. Yapısal ortam Tip YO-1.1 için ortam membaında (kapaktan itibaren 146 cm) ölçülen akım derinliği üzerinde ağ boyutunun etkisi.....	110
Şekil 3.81. Yapısal ortam Tip YO-1.1 için ortam mansabında (kapaktan itibaren 254 cm) ölçülen akım derinliği üzerinde ağ boyutunun etkisi.....	110
Şekil 3.82. Yapısal ortamlar için kullanılan STL uzantılı geometriler	111
Şekil 3.83. Flow-3D’de mesh blok 2 için geometrinin oluşturulması	111
Şekil 3.84. Flow-3D’de geometri üzerine mesh blok 2’de ağ ataması	112
Şekil 3.85. Flow-3D ile tanımlanan kanal-1’e ait geometri.....	112
Şekil 3.86. Flow-3D’de yapısal ortamlar için sınır koşullarının belirlenmesi.....	113
Şekil 3.87. Flow-3D’de yapısal ortamlar için sınır koşullarının belirlenmesine ait şematik çizim ve ekran görünümü	113
Şekil 3.88. STL formatındaki a) kanal giriş haznesine ait geometri b) başlangıç aşamasında tanımlanan su c) giriş haznesi boyutları (mm)	114
Şekil 3.89. Flow-3D ile tanımlanan kanal-2’ye ait geometri.....	115
Şekil 3.90. Gözenekli ve gözeneksiz yapılar için kullanılan STL uzantılı geometriler	115
Şekil 3.91. Gözenekli Tip-I için yapının membaında ölçülen akım derinliği üzerinde ağ boyutunun etkisi.....	117
Şekil 3.92. Ağ boyutunun simülasyon süresi ve ortalama bağıl fark üzerindeki etkisi	117
Şekil 3.93. Model-yapı üzerinde kuvvet ölçümüne ait Flow-3D görüntüsü.....	118
Şekil 3.94. Kanal-2 üzerinde bölgelerin tanımlanması.....	119
Şekil 3.95. Gözenekli Tip-I için ağ boyutunun kuvvet üzerindeki etkisi	119
Şekil 3.96. FVSSWE modelinde kullanılan nümerik çözümler (Erduran, 2001).....	121
Şekil 3.97. FVSSWE modelinin çalışma şekli (Erduran, 2001)	122
Şekil 3.98. FVSSWE modeline ait a)3B görünüm b) Surfer 3B görünüm c) hız dağılımı d) Surfer kontur görünümü	122

Şekil 4.1. WebPlotDigitizer yazılımı kullanılarak elde edilen faklı kapak açılma süreleri için taşkın şok dalgasının 0.2 sn, 0.4 sn ve 0.6 sn'deki 2 boyutlu yayılım görüntüleri.....	126
Şekil 4.2. Görüntü işleme tekniği kullanılarak elde edilen faklı kapak açılma süreleri için taşkın dalgasının 0.2 sn, 0.4 sn ve 0.6 sn'deki 2 boyutlu yayılım görüntüleri	128
Şekil 4.3. 102 ms kapak açılma süresi için a) deneysel çalışmalara ait görüntüler b) 2 ve 3 boyutlu sayısal modele ait görüntüler.....	131
Şekil 4.4. Farklı kısmi baraj yıkılma senaryoları için ortalama şok dalgası hızları.....	134
Şekil 4.5. Rezervuarın sağ ve sol arka köşesi için deneysel ölçümlere dayalı akım derinliğinin zamansal değişimi - Durum K1	136
Şekil 4.6. Rezervuarın sağ ve sol arka köşesi için deneysel ölçümlere dayalı akım derinliğinin zamansal değişimi - Durum K2	136
Şekil 4.7. Rezervuarın sağ ve sol arka köşesi için deneysel ölçümlere dayalı akım derinliğinin zamansal değişimi - Durum I1	137
Şekil 4.8. Rezervuarın sağ ve sol arka köşesi için deneysel ölçümlere dayalı akım derinliğinin zamansal değişimi - Durum I2	137
Şekil 4.9. Taşkın şok dalgasının bir boyutlu yayılımı - Durum K1.....	138
Şekil 4.10. Taşkın şok dalgasının bir boyutlu yayılımı - Durum K2.....	138
Şekil 4.11. Taşkın şok dalgasının bir boyutlu yayılımı - Durum I1	139
Şekil 4.12. Taşkın şok dalgasının bir boyutlu yayılımı - Durum I2	139
Şekil 4.13. Taşkın şok dalgasının iki boyutlu yayılımı - Durum K1	140
Şekil 4.14. Taşkın şok dalgasının iki boyutlu yayılımı - Durum K2	141
Şekil 4.15. Taşkın şok dalgasının iki boyutlu yayılımı - Durum I1.....	141
Şekil 4.16. Taşkın şok dalgasının iki boyutlu yayılımı - Durum I2.....	142
Şekil 4.17. Rezervuarın sağ/sol arka köşesi için akım derinliğinin zamana göre değişimi - Durum K1.....	142
Şekil 4.18. Rezervuarın sağ/sol arka köşesi için akım derinliğinin zamana göre değişimi - Durum K2.....	143
Şekil 4.19. Rezervuarın sağ/sol arka köşesi için akım derinliğinin zamana göre değişimi - Durum I1	143
Şekil 4.20. Rezervuarın sağ/sol arka köşesi için akım derinliğinin zamana göre değişimi - Durum I2	143

Şekil 4.21. Rezervuar üzerindeki (1.055, 0) noktası için akım derinliğinin zamana göre değişimi - Durum K1	145
Şekil 4.22. Rezervuar üzerindeki (1.055, 0) noktası için akım derinliğinin zamana göre değişimi - Durum K2	146
Şekil 4.23. Rezervuar üzerindeki (1.055, 0) noktası için akım derinliğinin zamana göre değişimi – Durum I1	146
Şekil 4.24. Rezervuar üzerindeki (1.055, 0) noktası için akım derinliğinin zamana göre değişimi – Durum I2	146
Şekil 4.25. a) Deneysel görüntü b) Flow-3D RANS sayısal modeli - Durum K1	148
Şekil 4.26. a) Deneysel görüntü b) Flow-3D RANS sayısal modeli - Durum K2	149
Şekil 4.27. a) Deneysel görüntü b) Flow-3D RANS sayısal modeli - Durum I1	150
Şekil 4.28. a) Deneysel görüntü b) Flow-3D RANS sayısal modeli - Durum I2	151
Şekil 4.29. Kanalda herhangi bir yapısal ortam yokken ortalama dalga önü hızının rezervuar su seviyesine göre değişimi	152
Şekil 4.30. Kanalda herhangi bir yapısal önlem yokken dalga önü hızlarının rezervuar su seviyesine göre değişimi	154
Şekil 4.31. Kanalda farklı yapısal ortamlar olması durumunda 0.4 sn’de dalga önünün ulaştığı maksimum mesafeler	157
Şekil 4.32. Kanalda farklı yapısal ortamlar olması durumunda 0.6 sn’de dalga önünün ulaştığı maksimum mesafeler	157
Şekil 4.33. Farklı başlangıç rezervuar su seviyelerinde şok dalgalarının model-yapıya ulaşma süreleri - Konum-1	159
Şekil 4.34. Farklı başlangıç rezervuar su seviyelerinde şok dalgalarının model-yapıya ulaşma süreleri - Konum-2	160
Şekil 4.35. Kanalda farklı yapı tipleri olması durumunda deneysel ölçümlerle elde edilen su yüzü profilleri ve dalga önünün ulaştığı maksimum mesafeler a) 0.8 sn b) 1.0 sn c) 1.2 sn d) 1.4 sn e) 1.6 sn	163
Şekil 4.36. Kanalda yapısal ortam/gözenekli-gözeneksiz yapılar olması durumunda deneysel ölçümlerle ile elde edilen su yüzü profilleri ve dalga önünün ulaştığı maksimum mesafeler a) 1.8 sn b) 2.0 sn c) 2.2 sn	169
Şekil 4.37. Yapısal ortam ve gözenekli-gözeneksiz yapılar olması durumu için deneysel görüntülerden elde edilen su yüzü profilleri ve dalga önü konumları a) ortam/yapı yok b) Tip YO-5.2 + Gözenekli Tip-III c) Tip YO-5.2 + Gözeneksiz Yapı d) Tip YO-5.2 + Eğri Yüzeyli Yapı (t= 1.8 sn)	170

Şekil 4.38. Yapısal ortam ve gözenekli-gözeneksiz yapılar olması durumu için deneysel görüntülerden elde edilen su yüzü profilleri ve dalga önü konumları a) ortam/yapı yok b) Tip YO-5.2 + Gözenekli Tip-III c) Tip YO-5.2 + Gözeneksiz Yapı d) Tip YO-5.2 + Eğri Yüzeyli Yapı ($t= 2.0$ sn)	171
Şekil 4.39. Yapısal ortam ve gözenekli-gözeneksiz yapılar olması durumu için deneysel görüntülerden elde edilen su yüzü profilleri ve dalga önü konumları a) ortam/yapı yok b) Tip YO-5.2 + Gözenekli Tip-III c) Tip YO-5.2 + Gözeneksiz Yapı d) Tip YO-5.2 + Eğri Yüzeyli Yapı ($t= 2.2$ sn)	172
Şekil 4.40. Kanal mansabında yapısal ortam olmaması durumunda rezervuardan itibaren 146 cm’de ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi	173
Şekil 4.41. Kanal mansabında yapısal ortam olmaması durumunda rezervuardan itibaren 254 cm’de ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi	174
Şekil 4.42. Tip YO-1.1 için yapısal ortamın membaında ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi	174
Şekil 4.43. Tip YO-1.1 için yapısal ortamın mansabında ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi	174
Şekil 4.44. Tip YO-1.2 için yapısal ortamın membaında ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi	175
Şekil 4.45. Tip YO-1.2 için yapısal ortamın mansabında ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi	175
Şekil 4.46. Tip YO-2.1 için yapısal ortamın membaında ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi	175
Şekil 4.47. Tip YO-2.1 için yapısal ortamın mansabında ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi	176
Şekil 4.48. Tip YO-2.2 için yapısal ortamın membaında ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi	176
Şekil 4.49. Tip YO-2.2 için yapısal ortamın mansabında ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi	176
Şekil 4.50. Tip YO-3.1 için yapısal ortamın membaında ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi	177
Şekil 4.51. Tip YO-3.1 için yapısal ortamın mansabında ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi	177
Şekil 4.52. Tip YO-3.2 için yapısal ortamın membaında ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi	177

Şekil 4.53. Tip YO-3.2 için yapısal ortamın mansabında ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi	178
Şekil 4.54. Tip YO-4.2 için yapısal ortamın membaında ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi	178
Şekil 4.55. Tip YO-4.2 için yapısal ortamın mansabında ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi	178
Şekil 4.56. Tip YO-5.2 için yapısal ortamın membaında ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi	179
Şekil 4.57. Tip YO-5.2 için yapısal ortamın mansabında ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi	179
Şekil 4.58. Herhangi bir yapı yokken kapaktan itibaren 105 cm’de ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi.....	183
Şekil 4.59. Herhangi bir yapı yokken kapaktan itibaren 133 cm’de ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi.....	183
Şekil 4.60. Gözenekli Tip-I için yapının membaında ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi.....	183
Şekil 4.61. Gözenekli Tip-I için yapının mansabında ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi.....	184
Şekil 4.62. Gözenekli Tip-II için yapının membaında ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi.....	184
Şekil 4.63. Gözenekli Tip-II için yapının mansabında ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi.....	184
Şekil 4.64. Gözenekli Tip-III için yapının membaında ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi.....	185
Şekil 4.65. Gözenekli Tip-III için yapının mansabında ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi.....	185
Şekil 4.66. Gözeneksiz Yapı için yapının membaında ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi.....	185
Şekil 4.67. Gözeneksiz Yapı için yapının mansabında ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi.....	186
Şekil 4.68. Eğri Yüzeyli Yapı için yapının membaında ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi.....	186
Şekil 4.69. Eğri Yüzeyli Yapı için yapının mansabında ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi.....	186

Şekil 4.70. Yapısal ortam ve gözenekli/gözeneksiz yapıların birlikte kullanımına ait Flow-3D görüntüsü ve şematik çizim.....	190
Şekil 4.71. Tip YO-5.2 ve Gözenekli Tip-III için kapaktan itibaren 91 cm’de ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi.....	190
Şekil 4.72. Tip YO-5.2 ve Gözenekli Tip-III için kapaktan itibaren 196 cm’de ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi.....	191
Şekil 4.73. Tip YO-5.2 ve Gözenekli Tip-III için kapaktan itibaren 256 cm’de ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi.....	191
Şekil 4.74. Tip YO-5.2 ve Gözenekli Tip-III için kapaktan itibaren 284 cm’de ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi.....	191
Şekil 4.75. Tip YO-5.2 ve Gözeneksiz Yapı için kapaktan itibaren 91 cm’de ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi.....	192
Şekil 4.76. Tip YO-5.2 ve Gözeneksiz Yapı için kapaktan itibaren 196 cm’de ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi.....	192
Şekil 4.77. Tip YO-5.2 ve Gözeneksiz Yapı için kapaktan itibaren 256 cm’de ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi.....	192
Şekil 4.78. Tip YO-5.2 ve Gözeneksiz Yapı için kapaktan itibaren 284 cm’de ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi.....	193
Şekil 4.79. Tip YO-5.2 ve Eğri Yüzeyli Yapı için kapaktan itibaren 91 cm’de ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi.....	193
Şekil 4.80. Tip YO-5.2 ve Eğri Yüzeyli Yapı için kapaktan itibaren 196 cm’de ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi.....	193
Şekil 4.81. Tip YO-5.2 ve Eğri Yüzeyli Yapı için kapaktan itibaren 256 cm’de ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi.....	194
Şekil 4.82. Tip YO-5.2 ve Eğri Yüzeyli Yapı için kapaktan itibaren 284 cm’de ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi.....	194
Şekil 4.83. Rezervuar su seviyesi oranının maksimum yatay çarpma kuvveti oranıyla değişimi-Konum-1	198
Şekil 4.84. Rezervuar su seviyesi oranının maksimum yatay çarpma kuvveti oranıyla değişimi-Konum-2	199
Şekil 4.85. Farklı başlangıç rezervuar su seviyelerinde maksimum yatay çarpma kuvvetinin yapı tipi ile değişimi	200
Şekil 4.86. Kanalda herhangi bir yapısal ortam yokken Konum-1 için yatay çarpma kuvvetinin zamanla değişimi	201

Şekil 4.87. Kanalda Tip-YO-1.1 varken Konum-1 için yatay çarpma kuvvetinin zamanla değişimi.....	201
Şekil 4.88. Kanalda Tip-YO-1.2 varken Konum-1 için yatay çarpma kuvvetinin zamanla değişimi.....	202
Şekil 4.89. Kanalda Tip-YO-2.1 varken Konum-1 için yatay çarpma kuvvetinin zamanla değişimi.....	202
Şekil 4.90. Kanalda Tip-YO-2.2 varken Konum-1 için yatay çarpma kuvvetinin zamanla değişimi.....	202
Şekil 4.91. Kanalda Tip-YO-3.1 varken Konum-1 için yatay çarpma kuvvetinin zamanla değişimi.....	203
Şekil 4.92. Kanalda Tip-YO-3.2 varken Konum-1 için yatay çarpma kuvvetinin zamanla değişimi.....	203
Şekil 4.93. Kanalda Tip-YO-4.2 varken Konum-1 için yatay çarpma kuvvetinin zamanla değişimi.....	203
Şekil 4.94. Kanalda Tip-YO-5.2 varken Konum-1 için yatay çarpma kuvvetinin zamanla değişimi.....	204
Şekil 4.95. Farklı yapısal ortam tiplerinde oluşan kuvvet şiddetleri - Konum-1	205
Şekil 4.96. Kanalda herhangi bir yapısal ortam yokken Konum-2 için farklı rezervuar su seviyelerinde yatay çarpma kuvvetinin zamanla değişimi	206
Şekil 4.97. Kanalda Tip YO-1.1 varken Konum-2 için farklı rezervuar su seviyelerinde yatay çarpma kuvvetinin zamanla değişimi.....	206
Şekil 4.98. Kanalda Tip YO-1.2 varken Konum-2 için farklı rezervuar su seviyelerinde yatay çarpma kuvvetinin zamanla değişimi.....	206
Şekil 4.99. Kanalda Tip YO-2.1 varken Konum-2 için farklı rezervuar su seviyelerinde yatay çarpma kuvvetinin zamanla değişimi.....	207
Şekil 4.100. Kanalda Tip YO-2.2 varken Konum-2 için farklı rezervuar su seviyelerinde yatay çarpma kuvvetinin zamanla değişimi.....	207
Şekil 4.101. Kanalda Tip YO-3.1 varken Konum-2 için farklı rezervuar su seviyelerinde yatay çarpma kuvvetinin zamanla değişimi.....	207
Şekil 4.102. Kanalda Tip YO-3.2 varken Konum-2 için farklı rezervuar su seviyelerinde yatay çarpma kuvvetinin zamanla değişimi.....	208
Şekil 4.103. Kanalda Tip YO-4.2 varken Konum-2 için farklı rezervuar su seviyelerinde yatay çarpma kuvvetinin zamanla değişimi.....	208

Şekil 4.104. Kanalda Tip YO-5.2 varken Konum-2 için farklı rezervuar su seviyelerinde yatay çarpma kuvvetinin zamanla değişimi.....	208
Şekil 4.105. Farklı yapısal ortam tiplerinde oluşan kuvvet şiddetleri- Konum-2.....	209
Şekil 4.106. Kanalda Tip YO-5.2 varken Konum-2 için farklı rezervuar su seviyelerinde deneysel ve sayısal olarak kuvvetin zamanla değişimi.....	210
Şekil 4.107. Kuvvet şiddetlerinin Konum-1 ve Konum-2 için karşılaştırılması	211
Şekil 4.108. Kanalda herhangi bir gözenekli/gözeneksiz yapı yokken farklı rezervuar su seviyeleri için yatay çarpma kuvvetinin zamanla değişimi	212
Şekil 4.109. Kanalda Gözenekli-Tip-I varken farklı rezervuar su seviyeleri için yatay çarpma kuvvetinin zamanla değişimi	212
Şekil 4.110. Kanalda Gözenekli-Tip-II varken farklı rezervuar su seviyeleri için yatay çarpma kuvvetinin zamanla değişimi	212
Şekil 4.111. Kanalda Gözenekli-Tip-III varken farklı rezervuar su seviyeleri için yatay çarpma kuvvetinin zamanla değişimi	213
Şekil 4.112. Kanalda Gözeneksiz Yapı varken farklı rezervuar su seviyeleri için yatay çarpma kuvvetinin zamanla değişimi	213
Şekil 4.113. Kanalda Eğri Yüzeyli Yapı varken farklı rezervuar su seviyeleri için yatay çarpma kuvvetinin zamanla değişimi	213
Şekil 4.114. Tüm yapı tipleri için kuvvetin zamanla değişimi – H15	214
Şekil 4.115. Tüm yapı tipleri için kuvvetin zamanla değişimi – H20	214
Şekil 4.116. Tüm yapı tipleri için kuvvetin zamanla değişimi – H25	214
Şekil 4.117. Farklı rezervuar su seviyelerinde kuvvet şiddetinin yapı tipi ile değişimi	215
Şekil 4.118. Farklı rezervuar su seviyeleri için kuvvet şiddetinin yapı tipine göre azalış yüzdesi	215
Şekil 4.119. Yapısal ortam tipleri ve iki farklı konum için impuls oranının değişimi .	218
Şekil 4.120. Tüm yapı tipleri için rezervuar su seviyesi ile impuls oranının değişimi .	219

SİMGE VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
A_i	i doğrultusundaki her bir hücredeki akışkanın alanı
c	Teorik şok dalgası yayılma hızı
C_d	Direnç katsayısı
f	Sürtünme katsayısı
f_i	Reynolds gerilmeleri
F_i	i . andaki kuvvet
g	Yerçekimi ivmesi
g_i	Kütlesel kuvvetler
h	Su derinliği
h_0	Başlangıç rezervuar su seviyesi
h_d	Başlangıç mansap su seviyesi
I^*	Maksimum impulsun toplam impulsa oranı
I_{top}	Toplam impuls
I_{maks}	Maksimum impuls
$\dot{I}$	Kuvvet şiddeti
k	Kinetik enerji
k_s	Pürüzlülük yüksekliği
μ_T	Toplam türbülans dinamik viskozitesi
n	Toplam zaman adımı sayısı
n	Manning katsayısı
P	Basınç
Re	Reynolds sayısı
S_{0x}	x yönündeki yatak eğimi
S_{fx}	x yönündeki enerji çizgisi eğimi
S_{0y}	y yönündeki yatak eğimi
S_{fy}	y yönündeki enerji çizgisi eğimi
$t_{Açılma\ Süresi, kuru}$	Kuru mansap yatağı kapak açılma süresi
$t_{Açılma\ Süresi, ıslak}$	Islak mansap yatağı kapak açılma süresi

T	Boyutsuz zaman
T_i	i . andaki zaman
u	x yönündeki derinlik ortalamalı hız bileşeni
u_i	i doğrultusundaki akım hızı
U	Ortalama dalga önü hızı
v	y yönündeki derinlik ortalamalı hız bileşeni
V	Boyutsuz hız
V_F	Her bir hücredeki akışkan hacmi
x_S	Dalga önü konumu
X	Boyutsuz konum
λ	Ölçek faktörü
ε	Sönümleme oranı

Kısaltmalar	Açıklama
1B	Bir Boyutlu
2B	İki Boyutlu
3B	Üç Boyutlu
ADV	Acoustic Doppler Velocimeter
CTP	Cam Takviyeli Plastik
DPIV	Digital Particle Image Velocimetry
DPTV	Digital Particle Tracking Velocimetry
FAVOR	Fractional Area/Volume Obstacle Representation
FEMA	Federal Emergency Management Agency
FPS	Frame Per Second
FVS	Flux Vector Splitting
FVSSWE	Finite Volume Solution Shallow Water Equation
HAD	Hesaplama Akışkanlar Dinamiği
HLL	Harten, Lax and van Leer
IB	Immersed Boundary
LBM	Lattice Boltzmann Metot
LDV	Laser Doppler velocimetry
LES	Large Eddy Simulation
LIF	Laser Induced Fluorescence
MPS	Moving Particle-Semi Implicit

MS	Milisaniye
PIV	Particle Image Velocimetry
PPF	Paint Protection Film
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes
REF	Roe scheme with Entropy Fixed
RNG	Renormalization Group
SN	Saniye
SPH	Smoothed-Particle Hydrodynamics
SPSS	Statistical Package for the Social Sciences
STL	Standard Triangle Language
SWE	Shallow Water Equation
UVP	Ultrasonic Velocity Profiling
ÜK	Üst Kamera
VOF	Volume of Fluid
YK	Yan Kamera

BÖLÜM I

GİRİŞ

1.1 Çalışmanın Önemi

Taşkınlar, can kayıpları ve ekonomik problemler açısından depremlerle birlikte en fazla olumsuz etkiye sahip olan doğal afetlerdir (Tarım ve Orman Bakanlığı, 2022) ve genel olarak oluşum sürelerine göre ani taşkınlar ve uzun sürede oluşan olarak sınıflandırılmaktadırlar. Baraj yıkılması sonucu oluşan taşkınlar ani taşkınlar sınıfına giren taşkınlardır.

Barajlar; enerji üretimi, içme suyu temini, sulama ve taşkın kontrolü gibi amaçlarla inşa edilen görkemli, büyük ölçekli ve ülke ekonomisi açısından stratejik öneme sahip mühendislik yapılarıdır. Fakat bu önemli yapılar, zaman içerisinde doğal olaylar ya da insan kaynaklı hatalar sonucu sadece vermiş olduğu faydayı yitirmekle kalmazlar, beraberinde büyük tahribata, can ve mal kaybına sebep olan bir taşkın afeti meydana getirebilirler.

Barajlarda ağır hasarlara veya yıkılmalarına sebep olan faktörlerin başında borulanma, üstten su aşması, tasarımda yapılan hatalar, öngörülenin üzerinde meydana gelen şiddetli depremler ve aşırı yağışlar gelmektedir (Nema ve Desmukh, 2016; Garoosi vd., 2022; Liu vd., 2024, Erduran vd., 2024a). Her ne kadar bir barajın yıkılması nadiren gerçekleşen bir olay olsa da, yıkılma sonrasında baraj rezervuarında depolanan çok büyük miktardaki su kütlesi, oluşan taşkın şok dalgası nedeniyle mansapta büyük ölçekli taşkın afetine neden olur (Wüthrich vd., 2018a).

Taşkın şok dalgası, diğer taşkın dalgalarından farklı olarak akımın ani değişim gösterdiği, türbülans etkilerinin yoğun olduğu ve beraberinde katı madde taşınımı içeren oldukça karmaşık yapıda iki fazlı bir serbest yüzey akımıdır (Erduran vd., 2024a). Böylesi akımların yıkıcı etkileri de oldukça fazladır (Cao vd., 2014; Wüthrich vd., 2019). Bunun ana sebebi ise, yüksek hızlara ve dalga yüksekliklerine sahip taşkın şok dalgasının ve beraberinde sürüklediği katı maddelerin akım yönünde yer alan engeller/yapılar üzerinde oluşturduğu çarpma kuvvetleridir. Taşkın şok dalgası kaynaklı çarpma kuvveti, yatay

kuvvetler (impulsif, hidrostatik ve hidrodinamik kuvvetler) ve düşey kuvvetler (impulsif, hidrodinamik direnç, hidrodinamik kaldırma ve kaldırma kuvvetleri) olarak sınıflandırılmaktadır (Erduran vd., 2025). Tüm bu kuvvetler ve etkileri düşünüldüğünde taşkın şok dalgasının yapılar üzerindeki yıkıcı etkisinin ne kadar büyük olabileceği daha iyi anlaşılabilir.

Baraj yıkılması sonrası oluşan ani taşkınlarda, taşkın dalgasının bu karakteristik yapısından ötürü mansapta önlem alınması veya insanların bölgeden tahliye edilmesi için gereken süre daha kısa olurken, taşkın sırasında taşkın zararlarını azaltmak için kullanılacak iş gücü ve ekipman büyüklüğü de artmaktadır. Taşkın boyutunu belirleyen taşkın sınırları ve akım karakteristikleri açısından değerlendirildiğinde, diğer taşkınlardan farklı olarak baraj yıkılması kaynaklı ani taşkınlarda taşkın boyutu ani taşkın dalgasının cisimler üzerinde meydana getirdiği kuvvetler ile birlikte büyük oranda artmaktadır. Bunun doğal sonucu olarak bu tür ani taşkınlar çok büyük çaplı bir afete dönüşmekte, hatta taşkın koruma ve önlemede kullanılan bilinen yapısal veya yapısal olmayan uygulamaları etkisiz kılacak boyutlara ulaşabilmektedir.

Geçmişten günümüze kadar dünyada yaşanmış pek çok örneği de bulunan baraj yıkılması sonucu meydana gelen ani taşkınlar, beraberinde çok fazla can ve mal kaybına, çevresel tahribata ve ciddi ekonomik problemlere neden olmuştur (Liu vd., 2024). Örneğin, son yarım yüzyıl içerisinde 1975 yılında Çin'in Zhumadian Bölgesinde bulunan Banqiao ve Shimantan Barajları aşırı yağışlar neticesinde planlanan tasarım kapasitelerinin üstünde gelen akımdan dolayı yıkılmış ve bu olay sonucu 30 şehir sular altında kalarak 240 bin kişi yaşamını yitirmiştir (Hsiao vd., 2021). Yine, 2019 yılında Brezilya'da bulunan Brumadinho Barajının yıkılması ile rezervuarda depolanan 12 milyon metreküp su serbest kalmış ve 270 kişi hayatını kaybetmiştir (Anonim-1, Haziran 2025). Son yıllarda yaşanan baraj yıkılması olaylarına bakıldığında ise 2023 yılında Libya'nın Derna Bölgesinde yer alan Derna Barajının yıkılmasıyla 20 bin kişi hayatını kaybetmiş ve pek çok kişi bölgeden tahliye edilmiştir (Anonim-2, Haziran 2025). Benzer şekilde 2024 yılında Sudanda bulunan Arbaat Barajının yıkılmasıyla 148 kişi hayatını kaybetmiş ve bölgede maddi zarar oluşmuştur (Anonim-3, Haziran 2025).

Yaşanan bu olaylar, baraj yıkılması sonucu oluşan taşkın şok dalgasının hem neden olduğu can kayıpları, hem de ülke ekonomisine vermiş olduğu zararlar açısından ne

derece dikkate alınması gereken bir etkiye sahip olduğunu somut olarak göstermektedir. Günümüzde baraj yıkılmalarını tamamen önlemek oldukça zor olsa da, baraj yıkılması sonrası oluşan taşkın etkilerini en aza indirmek mümkün olabilir (FEMA, 2013). Bu da, öncelikle taşkın şok dalgasına ait akım karakteristiğinin ve etkilerinin deneysel ve sayısal çalışmalarla doğru bir şekilde ortaya konulması ve sonrasında alınacak yapısal veya yapısal olmayan koruma ve önleme maksatlı tedbirler ve taşkın anında atılması gereken adımların doğru tespiti ile sağlanabilir.

1.2 Konu ile ilgili Yapılan Çalışmaların Özeti ve Görülen Eksiklikler

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde tam ve kısmi baraj yıkılması ile ilgili deneysel, sayısal veya her ikisinin birlikte kullanıldığı pek çok çalışma olduğu görülmektedir. Bununla birlikte deneysel çalışmalar, ani değişen akım koşullarında ölçüm tekniklerinin uygulanmasındaki zorluklar ve deney düzeneklerinin oluşturulmasındaki problemler nedeniyle sayısal çalışmalara nazaran daha az sayıdadır (Kim vd., 2024).

Bu çalışmaların büyük bir bölümünün rezervuarda depolanan suyun ani olarak serbest bırakılması sonucu kuru ve/veya ıslak mansap yatağında ilerleyen şok dalgasının karakteristiğinin (yayılma hızı ve dalga yüksekliği) incelendiği çalışmalar olduğu görülmektedir. Bir diğer grup ise, şok dalgasının karakteristiği üzerinde rezervuar geometrisi, kanal geometrisi ve taban eğiminin etkilerinin incelendiği çalışmaları içermektedir. Şok dalgasının rijit veya esnek bir cisim üzerine çarpması sonucu oluşan basınçların ve yatay çarpma kuvvetinin araştırıldığı çalışmalar daha az sayıdadır. Baraj yıkılması sonucu oluşan şok dalgasının oluşturduğu taşkınların olumsuz etkisinin azaltılmasına dönük çalışmalar ise çok daha az sayıda olup, baraj yıkılması mekanizması kullanılarak tsunami dalgasının olumsuz etkilerini azaltmak maksadıyla yapılan çalışma sayısı çok daha fazladır.

Ani şok dalgası veya baraj yıkılma mekanizması kullanılarak üretilen tsunami dalgasının etkilerinin azaltılmasına yönelik çalışmalar incelendiğinde, korunacak yapılardan önce değişik tip, yoğunluk, rijitlik ve boyutlarda bitki örtüsü ile kaplı alan oluşturulduğu, tabanda çukur inşa edildiği ve farklı geometri ve dizilimde elemanlarla engel teşkil edildiği görülmektedir. Bu ortamlardan geçen şok/tsunami dalgasının yapılar üzerinde

oluşturduğu yatay kuvvetler/basınçlar ölçülerek bu ortamların akım karakteristikleri üzerinde ne derece etkili olduğu araştırılmıştır.

Ancak, bu çalışmalarda farklı geometrik tasarımlardaki ortamların birlikte değerlendirildiği ve taşkın şok/tsunami dalgasının etkilerinin incelendiği kapsamlı bir deneysel ve sayısal çalışmaya rastlanılmamış, pratik uygulamalara dönük çözüm önerisi niteliğinde bir çalışma tespit edilmemiştir.

1.3 Amaç ve Hedefler

Bu çalışmanın nihai amacı, baraj yıkılmalarının yol açtığı ani taşkınların çevre, toplum ve ekonomi üzerindeki olumsuz etkileri ile muhtemel can kayıplarını en aza indirmeye yönelik geliştirilecek stratejilere ışık tutmaktır.

Ayrıca, taşkın şok dalgasının, tsunami dalgasına olan benzerliği nedeniyle, bu çalışmanın tsunami dalgasının olumsuz etkilerini azaltmaya yönelik yapısal önlemler içeren çalışmalara da katkı sağlayacağı umulmaktadır.

Tezin yakın amacı ise, farklı geometriye, yoğunluğa ve dizilime sahip yapısal önlemlerin baraj yıkılması sonucu oluşan ani taşkın dalgasının yıkıcılığı üzerindeki etkisinin deneysel ve sayısal olarak araştırılması ve ani taşkınların olumsuz etkilerinin azaltılması açısından değerlendirilmesidir.

Bu tez çalışmasının ana hatları ile belirlenen hedefleri şu şekildedir:

- i)** Boş bir kanalda kuru ve ıslak mansap yatağı olması durumunda taşkın şok dalgası yayılımının deneysel ve sayısal olarak incelenmesi
- ii)** Farklı geometriye, yoğunluğa ve dizilime sahip yapısal önlemlerin şok dalgasının oluşturduğu yatay çarpma kuvveti üzerindeki etkilerinin deneysel ve sayısal olarak incelenmesi
- iii)** Sayısal ve deneysel sonuçların karşılaştırılması, sayısal modelin kullanılabilirliğinin araştırılması
- iv)** Denenen yapısal önleme yöntemlerinin taşkın şok dalgasının yıkıcı etkilerinin azaltılması açısından değerlendirilmesi

1.4 Tezin İçeriği

Tez çalışmasının ana hatları ile içeriği şu şekildedir:

Bölüm 1 - Giriş: Tez konusunun önemi, literatür özeti ve görülen eksiklikler, tezin amaç ve hedefleri ile tezin içeriğini kapsamaktadır.

Bölüm 2 - Konu ile ilgili Önceki alışmalar: Taşkınlar, taşkınların etkileri, taşkınların sınıflandırılması, ani taşkınlar ve baraj yıkılması sonucu oluşan taşkınları içeren genel bilgiler ile başlamaktadır. Daha sonra i) şok dalgasının karakteristik yapısının ve karakteristik yapısı üzerinde etki ettiği düşünölen faktörlerin incelendiği çalışmalar, ii) şok dalgasının yıkıcı etkilerinin araştırıldığı çalışmalar ve iii) şok dalgasının etkilerinin azaltılmasına yönelik çalışmalar olmak üzere üç ana başlık altında literatürde yapılan deneysel ve sayısal çalışmalardan bahsedilmektedir.

Bölüm 3 - Materyal ve Metot: Deneysel çalışmalarda kullanılan deney düzeneklerinin kurulumu, özellikleri, yapısal önlemlerin üretimi, deneysel veri toplama yöntemleri, deneylerin yapılışı, ölçek ve duvar etkilerinin incelenmesi, deneylerin tekrarlanabilirliği, iki ve üç boyutlu sayısal model çalışmaları ve analitik çözüm yöntemlerini içermektedir.

Bölüm 4 - Bulgular ve Tartışma: Taşkın şok dalgası karakteristiğinin belirlenmesi ve taşkın şok dalgasının etkilerini azaltmak üzere tasarlanan yapısal önlemlerin performansları araştırılmaktadır. Bu kısımda öncelikle taşkın şok dalgasının karakteristiği üzerinde kapak açılma süresi ile kuru ve ıslak mansap yatağının etkileri incelenmekte, ardından şok dalgasının bazı karakteristiklerinin analitik yöntemlerle hesabı anlatılmaktadır. Daha sonraki kısımlarda ise tezin ana konusu olan yapısal önlemlerin performansı belirlenen beş farklı kritere (hız, maksimum derinlik, maksimum yatay çarpma kuvveti, kuvvet şiddeti ve impuls) göre araştırılmaktadır.

Bölüm 5 - Sonuçlar ve Öneriler: Bu çalışmadan elde edilen sonuçları ve gelecekte yapılacak çalışmalar için kısa önerileri içermektedir.

BÖLÜM II

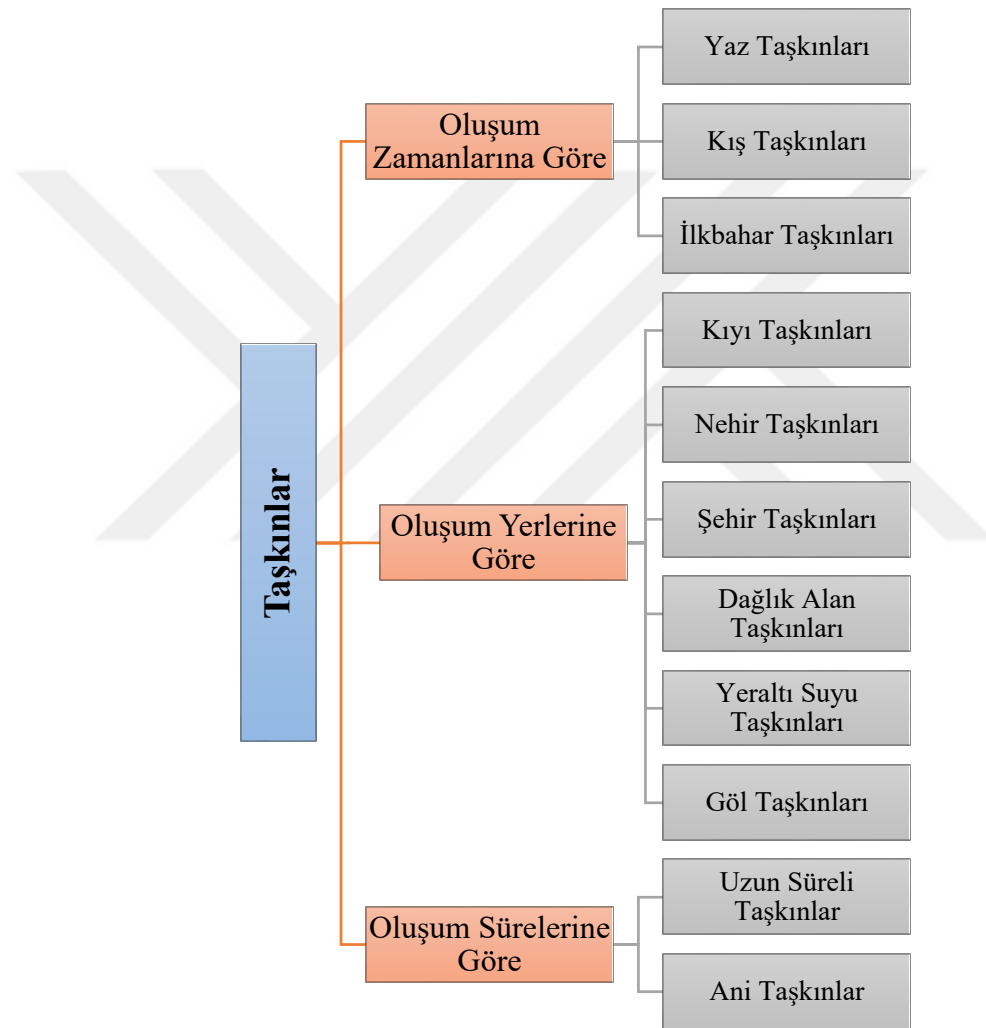
KONU İLE İLGİLİ ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Taşkınlar; bir akarsuyun farklı sebeplerden dolayı ana yatağından taşarak canlı yaşamına, çevresinde bulunan yapılara, yerleşim yerlerine, altyapı tesislerine, tarım arazilerine ve diğer bölgelere zarar veren doğal afetler olarak tanımlanmaktadır (Tarım ve Orman Bakanlığı, 2022). Tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de çok sayıda can kaybına ve büyük ekonomik zarara neden olan taşkınlar; oluşma sıklıkları, etkiledikleri alanların büyüklüğü ve ortaya çıkardığı zararlar bakımından dünya üzerinde en fazla olumsuz etkiye sahip doğal afetlerden biri olarak bilinmektedir (Akman, 2021). Dünya genelinde son 30 yılda yaşanan taşkınlar, her yıl ortalama 80 milyon insanı etkilemiş ve yıllık bazda 11 milyon doların üzerinde maddi zarara neden olmuştur (Akman, 2021). Tarım ve Orman Bakanlığı (2022) raporuna göre ise ülkemizde 1975-2021 yılları arasında 2603 adet taşkın meydana gelmiş, bu taşkınlarda 901 kişi hayatını kaybetmiş ve 987 bin 775 hektar alan sular altında kalmıştır. Aynı raporda taşkınların sebep olduğu ekonomik kaybın ise yıllık 300 milyon TL civarında olduğu belirtilmektedir. Bu veriler, taşkınların ne denli ciddi ve olumsuz sonuçlara yol açabileceğini açık bir şekilde ortaya koymaktadır.

Taşkınlar farklı şekillerde meydana gelmekle birlikte genel olarak Şekil 2.1’de gösterildiği üzere oluşum zamanlarına, oluşma yerlerine ve oluşma sürelerine göre değişik şekillerde sınıflandırılmaktadırlar (Tarım ve Orman Bakanlığı, 2022).

Baraj yıkılması sonucu oluşan taşkınlar, ani taşkın sınıfına giren taşkınlardır (Hong vd., 2013). Ani taşkınları diğer taşkınlardan ayıran en belirgin özellik çok kısa süre içinde oluşmaları ve meydana getirdikleri şok dalgalarının oldukça hızlı şekilde mansaba doğru yayılmalarıdır (Gruntfest ve Huber, 1991; Davis, 2001). Diğer taşkın türleri ile karşılaştırıldığında ani taşkınlar, büyük miktarda depolanmış su kütlelerinin ani olarak serbest kalması nedeniyle can kayıpları, etkilenen insan sayısı ve mansapta bulunan yerleşim yerleri ile doğal çevre üzerinde en yıkıcı etkiye sahip olan taşkın türü olarak bilinmektedir (Marchi vd., 2010). Ani taşkınların önceden tahmin edilmesindeki zorluklar, mansapta önlem alınması veya insanların bölgeden tahliye edilmesi için gereken sürenin diğer taşkınlara göre oldukça kısa oluşu ani taşkınların yönetimini de oldukça güçleştirmektedir (Gruntfest ve Huber, 1991). Bununla birlikte baraj yıkılması

sonucu oluşan ani taşkınlarda şok dalgasıyla birlikte meydana gelen büyük çaplı katı madde taşınımı nedeniyle mansapta oluşan tahribat ve kayıplar artar. Geçmişten günümüze pek çok can kaybına neden olan baraj yıkılmaları aynı zamanda ülke ekonomisi için büyük maddi zararlara da neden olmaktadır. Federal Acil Durum Yönetim Kurumu (Federal Emergency Management Agency-FEMA)’na göre orta büyüklükteki bir barajın yıkılmasının ortalama maliyetinin 150 milyon dolardan fazla olduğu bildirilmektedir (Ferreira Tomezani, 2025).



Şekil 2.1. Taşkınların sınıflandırılması (Tarım ve Orman Bakanlığı, 2022)

Baraj yıkılmalarını tamamen önlemek mümkün gözükmese de, baraj yıkılması sonrası oluşan taşkın zararlarını en aza indirmek mümkün olabilir (FEMA, 2013). Bunun için, birçok bilimsel yaklaşımda olduğu gibi öncelikle taşkın şok dalgasına ait akım karakteristiğinin ve etkilerinin deneysel ve sayısal çalışmalarla doğru bir şekilde ortaya konulması gerekir. Bu çalışmaların ardından elde olunan bulgular ışığında taşkın öncesi

arazide alınacak yapısal veya yapısal olmayan koruma ve önleme maksatlı tedbirler ile taşkın anında ve sonrasında atılması gereken adımların belirlenmesi gerekir.

Baraj yıkılmaları uzun yıllardır araştırmacıların ilgi odağı olmuş ve bu konuda gerek sayısal ve gerekse deneysel çok sayıda çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda araştırılan konuların çok geniş bir yelpaze çizdiği görülmektedir. Bölüm 1.3'te belirtilen amaç ve hedefler doğrultusunda bu yelpaze daraltıldığında bu çalışmalar üç başlık altında toplanabilir;

- i) Şok dalgasının karakteristik yapısının (yayılma hızı, dalga yüksekliği, su yüzü profili) araştırıldığı çalışmalar ve karakteristik yapısı üzerinde rol oynadığı düşünülen faktörlerin (kısmi ve tam baraj yıkılması durumu, kuru ve ıslak mansap yatağı durumu, rezervuar geometrisi ve rezervuar su seviyesi, mansap kanal geometrisi ve eğimi, baraj yıkılma süresi, engeller vb.) araştırıldığı çalışmalar (Çizelge 2.1)
- ii) Şok dalgasının yıkıcı etkilerinin (yapıları üzerindeki basınç ve kuvvet etkileri) araştırıldığı çalışmalar (Çizelge 2.2)
- iii) Şok dalgasının yıkıcı etkilerin azaltılmasına yönelik çalışmalar (Çizelge 2.3)

2.1 Şok Dalgasının Karakteristik Yapısının ve Karakteristik Yapısı Üzerine Etki Ettiği Düşünülen Faktörlerin İncelendiği Çalışmalar

Baraj yıkılması ile ilgili ilk deneysel ve analitik çalışmalar Ritter (1892), Dressler (1952) ve Stoker (1957) tarafından yapılan çalışmalardır. Bu çalışmalarda Ritter (1892) Saint-Venant denklemlerini kullanarak yatay, sürtünmesiz, dikdörtgen enkesitli ve kuru mansap yatağına sahip bir kanalda ani baraj yıkılması durumunda mansaba doğru ilerleyen şok dalgasının karakteristiğini tarif eden analitik bir çözüm üretmiştir. Dressler (1952) Ritter'in çözümünü genişleterek kuru, yatay ve dikdörtgen enkesitli bir kanalda baraj yıkılmasından kaynaklanan şok dalgasının sürtünmeli bir ortamda ilerlerken yüksekliği ve dalga hızını elde etmede kullanılan analitik bir çözüm geliştirmiştir. Öte yandan Stoker (1957) Ritter'in geliştirdiği çözümü ıslak mansap yatağı durumu için genişleterek benzer bir çözüm önermiştir. Yeh vd., (1989) baraj yıkılması yöntemiyle ürettikleri taşkın dalgasının yayılımını ve eğimli bir yüzey üzerindeki dalga tırmanmasını deneysel olarak incelemişlerdir. Deneysel çalışmalarında dalga yayılımını ve eğimli yüzey üzerine

tırmanma süreçlerini daha iyi tanımlayabilmek ve görselleştirebilmek için lazer ışığı, kamera ve ölçüm sensörlerinden yararlanmışlardır. Çalışmalarının sonucunda eğimli bir yüzeyde dalga yayılma hızının sığ su denklemlerinin öngördüğünden daha hızlı azaldığı tespit etmişlerdir. Alcrudo ve Garcia (1993) serbest su yüzü akımlarını tarif eden iki boyutlu sığ su denklemlerini sonlu hacimler yöntemi ve Godunov tipi bir şema kullanarak çözen bir model önermişlerdir. Önerdikleri modelin doğruluk testlerini, iki boyutlu kısmi baraj yıkılması ve dairesel baraj yıkılması problemlerine uygulayarak elde ettikleri su yüzü profillerini, önceki çalışmalardan elde olunan sonuçlar ile karşılaştırarak yapmışlardır. Bununla birlikte modellerini analitik çözümlerle de karşılaştırmışlar ve aralarındaki uyumun çok iyi olduğunu belirtmişlerdir. Zhao vd., (1994) sonlu hacimler yöntemi ve Osher şok yakalama şemasını kullanarak iki boyutlu zamanla değişen ve sığ su denklemlerini çözen bir akım modeli geliştirmişlerdir. Çalışmalarında, bir ve iki boyutlu kısmi baraj yıkılması sonrası kuru ve ıslak mansap yatağında ilerleyen şok dalgasının yayılımına ait su yüzü profilinin değişimini incelemişlerdir. Geliştirdikleri modelin, baraj yıkılması problemlerinin çözümünde tatmin edici sonuçlar ürettiğini ifade etmişlerdir. Fraccarollo ve Toro (1995) sığ su denklemlerinin çözümüne dayalı modellerinin iki boyutlu ve kuru mansap yatağına sahip baraj yıkılması problemlerinin benzeşim çalışmalarında uygulanabilirliğini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Sayısal modellerinde Godunov tipi bir şok yakalama yöntemi kullanmışlar ve yöntemin doğruluğunu laboratuvar deneyleri ile test etmişlerdir. Her ne kadar modelleri, su yüzü profilleri açısından deneysel sonuçlarla tam olarak örtüşmese de araştırmacılar akımın genel davranışının tatmin edici seviyede yakalanabildiğini belirtmişlerdir. Kumar Jha vd., (1995) dikdörtgen, yatay, sürtünmesiz ve ıslak mansap yatağına sahip bir kanalda baraj yıkılması durumunda akım karakteristiklerini elde etmede birinci ve ikinci dereceden Roe şemasının uygulanabilirliğini kapsamlı bir şekilde araştırmışlardır. Araştırmalarının sonucunda, ikinci dereceden şemaların şok yakalama açısından daha iyi sonuçlar verdiğini fakat buna karşın Roe'nin birinci dereceden şemasının hesaplama süresinin daha az olması, yeterli stabilite ve doğruluk sağlaması bakımından tercih edilebileceğini bildirmişlerdir. Zhao vd., (1996) iki boyutlu sığ su denklemlerine dayanan sonlu hacimler yöntemini kullanarak üç yaklaşık Riemann çözücüsünün (FVS, Roe ve Osher) şok yakalama performansını araştırmışlardır. Çalışmalarında Riemann çözücülerinin performansını bir ve iki boyutlu baraj yıkılması problemleri ile test etmişler ve bu üç çözücüyü doğruluk, stabilite ve hesaplama süresi açısından karşılaştırmışlardır. Bu karşılaştırma sonucunda Osher çözücüsünün en doğru, Flux Vector Splitting (FVS)

çözücüsünün en hızlı ve en stabil, Roe çözücüsünün ise en yavaş fakat yatak eğimi değişikliklerine karşı en stabil olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca her üç çözücünün de analitik çözümlerle uyum olduğunu ve şok yakalama problemlerinde kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Lauber ve Hager (1998a ve 1998b) sırasıyla yatay ve eğimli dikdörtgen enkesitli bir kanalda ani şekilde gerçekleşen baraj yıkılması problemi ile ilgili bir dizi deney yapmışlardır. Deneylerinde kanal taban eğimini, öncelikle yatay daha sonra ise $S_0 = 0.1$ ve $S_0 = 0.5$ alarak kuru mansap yatağında deneylerini yürütmüşlerdir. Çalışmalarında akım derinliği, ortalama hızlar, şok ve seyreltme dalgalarına ait hızlar, maksimum akım derinliği ve bu derinliğe ulaşma sürelerini ölçmüşlerdir. Ayrıca laboratuvar ortamında baraj yıkılması problemlerinin benzeşim modellerinde baraj gövdesini temsil eden kapağın maksimum açılma süresini belirleyen bir koşul olarak bir bağıntı önermişlerdir. Zoppou ve Roberts (1999) su temini amacıyla inşa edilmiş bir barajın yıkılması sonrası ortaya çıkan şok dalgasının kuru ve ıslak mansap yatağı üzerinde yayılımını tahmin eden bir model geliştirmişlerdir. Modellerinin kullanılabilirliğini, geçmiş çalışmalarda sıkça kullanılan baraj yıkılması problemlerine ait sonuçları kullanarak sınımışlardır ve modellerinde iki boyutlu sıg su denklemlerini çözmek için sonlu hacimler yöntemi ve Toro vd., (1994) tarafından geliştirilen birinci dereceden Riemann çözücüsünü kullanmışlardır. Geliştirdikleri modelin kuru ve/veya ıslak mansap yatağında engeller etrafındaki akımları taban eğimi ve sürtünme etkilerini dikkate alarak modelleme yeteğine sahip olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca modellerinin hem analitik çözümlerle hem de test edilen baraj yıkılması problemi sonuçlarıyla uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. Mingham ve Causon (2000) daralan-genişleyen bir kanaldan geçen ve silindir bir yapı ile çarpışan bore dalgasının zamana bağlı değişimini iki boyutlu sıg su denklemlerine dayanan yüksek çözünürlüklü sonlu hacimler yöntemiyle sayısal olarak incelemişlerdir. Kullandıkları yöntemin koordinat dönüşümü gerektirmediğini, her türlü ağ yapısı için kullanılabilir olduğunu, şok ve sıçrama gibi durumları yüksek doğrulukla yakalayabildiğini belirtmişlerdir. Ayrıca önerdikleri yöntemin baraj yıkılması, tsunami dalga yayılımı ve kıyı yapıları üzerinden dalga aşması gibi durumlar için kullanılabileceğini ifade etmişlerdir. Son olarak kullandıkları yöntemin test edilen senaryolarda başarılı sonuçlar verdiğini bildirmişlerdir. Nsom vd., (2000) yatay ve değişken kanal eğimlerinde baraj yıkılması sonucu oluşan taşkın şok dalgasını, dalga önünün ve bir noktadaki akım derinliklerinin değişimi açısından incelemişlerdir. Dalga önünün değişimini yüksek hızlı kameralardan aldıkları video kayıtlarını kullanarak, akım derinliklerinin değişimini ise ultrasonik cihazları kullanarak elde etmişlerdir. Ayrıca

Navier-Stokes ve süreklilik denklemlerini bir boyutlu sıg su yaklaşımı ile çözmüşlerdir. Deneysel ve teorik sonuçların akım derinliği ve dalga hızı açısından uyumlu olduğunu bildirmişlerdir. Erduran vd., (2002) sıg su denklemlerinin çözümünde sonlu hacimler yöntemini kullanmışlar ve farklı Riemann çözücülerinin performansını değerlendirmişlerdir. Çalışmalarında birinci ve ikinci dereceden doğrulukla kullandıkları beş Riemann çözücüsünü (Osher, HLL, HLLC, Roe and flux vector splitting) uygulama kolaylığı, doğruluk, uygulanabilirlik, stabilite ve simülasyon süresi açısından hem kendi arasında hem de literatürdeki çalışmalarla karşılaştırmışlardır. Literatürdeki çalışmalardan bir boyutlu tam baraj yıkılması, iki boyutlu kısmi baraj yıkılması ve iki boyutlu dairesel baraj yıkılması problemlerini modellerini test etmek için kullanmışlar ve sonuçları yorumlamışlardır. Çalışmalarının sonucunda, test edilen şemalar arasında doğruluk açısından Osher şemasının en iyi sonuçları verdiğini, uygulanabilirlik açısından test edilen tüm şemalar arasında sadece Entropi Düzeltmeli Roe Şemasının (Roe scheme with Entropy Fixed-REF) bazı koşullarda başarısız olduğunu, simülasyon süresi bakımından FVS şemasının en hızlı, REF şemasının ise en yavaş olduğunu ve stabilite bakımından ise tüm şemaların stabilite bölgelerinin neredeyse aynı olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca her türlü uygulamanın simülasyonu için Osher veya HLLC şemasını kullanan birinci dereceden doğruluklu bir çözüm algoritmasını önerdiklerini vurgulamışlardır. Zhou vd., (2002) yatak topografyasındaki eşik ve daralma gibi ani değişikliklerin neden olduğu fiziksel olmayan sayısal modelleme sonuçlarını önlemek için sıg su denklemlerinin çözümünde kullanılan yüzey eğimi metodunu geliştirmişlerdir. Bu metodun temel özelliği, su seviyesi hesaplanırken su yüzeyi eğimini kullanmasıdır. Geliştirdikleri metodu kuru ve ıslak mansap yatağına sahip, rezervuar tabanı ile kanal tabanı arasında yükseklik farkı bulunan ve kanal geometrisi 90^0 kıvrımlı olan bir baraj yıkılması deneyi ile belli noktalardaki akım derinliklerinin zamansal değişimi açısından test etmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre geliştirdikleri metodun, farklı ölçüm noktalarında alınan deneysel verilerle akım derinliklerinin değişimi bakımından uyumlu olduğunu açıklamışlardır. Ayrıca düşey ve yatay geometri değişimlerinden kaynaklanan etkileri modellemede ve üç boyutlu akım yapısını görselleştiren bir su yüzü profili elde etmede başarılı olduğunu belirtmişlerdir. Soares-Fraza vd., (2002) tabanında üçgen bir eşik bulunan eğimli ve mansap yatağı kuru bir kanalda baraj yıkılması problemini deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır. Deneysel çalışmalarında kanal boyunca farklı konumlardan su yüzü profiline ait görüntüler alarak bu görüntüleri birleştirmişler ve kesintisiz bir su yüzü profili elde etmişlerdir. Deneylerden elde ettikleri su yüzü profili

ve akım derinliklerini, sonlu hacimler yöntemi uygulanarak elde olunan sığ su denklemlerinin çözümüne dayalı sonuçlar ile karşılaştırmışlardır. Bu karşılaştırma neticesinde modelin su yüzü profillerini genel olarak yakalayabildiğini özellikle dalga yansıması, tırmanması ve eşik üzerinden geçiş gibi durumları başarıyla tespit edebildiğini ifade etmişlerdir. Bukreev (2005) yatay konumda ve dikdörtgen enkesitli bir kanalda kısmi baraj yıkılması problemini incelemiştir. Çalışmasında, kanal mansabına bir eşik yerleştirilerek taşkın şok dalgasının karakteristiğini araştırmıştır. Eşik üzerinde 4h/9 kritik akım koşulu oluşması sebebiyle eşik üzerindeki su derinliğini kullanarak akım debisini hesaplamıştır. Eaket vd., (2005) kuru ve ıslak mansap yatağı koşullarına sahip baraj yıkılması deneylerinde üç boyutlu su yüzü profilini ve akım hızlarını elde etmek için video stereoskopinin yönteminin uygulanabilirliğini araştırmışlardır. Baraj yıkılması olayına ait stereo görüntülerini tankın üzerine yerleştirilmiş ve zamanla senkronize edilmiş üç video kamera kaydını kullanarak elde etmişler ve görüntüden görüntüye bir referans noktası oluşturmak için su yüzüne yüzen plastik parçacıklar eklemişlerdir. Parçacıkların üç boyutlu koordinatlarını kamera konumları ve stereo görüntülerdeki tek tek plastik parçacıkların konumlarını kullanılarak hesaplamışlardır. Ardışık görüntülerin analizinden parçacık hızlarını tespit etmişlerdir. Bu ön araştırmaya dayanarak, video stereoskopinin dinamik akımları ölçmek için umut verici bir yöntem olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Aureli vd., (2008) kuru ve ıslak mansap yatağına sahip yatay bir kanalda kısmi baraj yıkılması sonucu oluşan şok dalgasının karakteristiğini deneysel ve iki boyutlu modelleme ile sayısal olarak incelemiştir. Çalışmalarında, kanalın mansap bölümüne dikdörtgen bir engel yerleştirmişler ve kanal boyunca video kayıtları alarak su seviyesi değişimini hem görüntü işleme tekniğiyle hem de ultrasonik ölçüm cihazlarıyla deneysel olarak ölçmüşlerdir. Ayrıca iki boyutlu ve sonlu hacimler yöntemine dayanan bir sayısal model aracılığıyla akım alanına ait hız dağılımını elde etmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda, görüntü işleme tekniğiyle elde ettikleri su seviyesi değişimlerinin ölçüm cihazı ile elde edilen sonuçlarla uyumlu olduğunu, bununla birlikte sayısal modelin su seviyesini deneysel sonuçlara göre daha düşük tahmin etme eğiliminde olduğunu açıklamışlardır. Ayrıca iki boyutlu sayısal modelin maksimum su seviyesi, maksimum hız ve varış zamanı gibi taşkın tehlikesi için kritik olan parametreleri yeterli doğrulukta üretebildiğini belirtmişlerdir. Chanson (2005 ve 2009) kuru ve ıslak mansap yatağına sahip yatay, eğimli ve dikdörtgen enkesitli bir kanalda baraj yıkılması sonucu oluşan şok dalgasına ait akım karakteristiklerini, Saint-Venant denklemleri ve karakteristikler yöntemini kullanarak analitik olarak tarif etmiştir. Çalışmasında dalga

önü hızı, konumu ve serbest su yüzü profilinin değişimini hesaplamada kullanılan analitik çözümler geliştirmiştir. Geliştirdiği bu çözümleri deneysel veriler ve teorik çözümlerle karşılaştırarak doğrulamıştır. Causon vd., (2010) serbest yüzeyli ve çok fazlı akımların çözümü için AMAZON-SC adında bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) çözücüsü geliştirmişler ve bunu baraj yıkılması, dalga aşması, çarpma ve çalkalanma problemleri gibi çeşitli durumlar için test etmişlerdir. Mansabında dikdörtgen bir engel bulunan baraj yıkılması probleminde biri rezervuar ve diğeri engel önünde olmak üzere iki farklı noktada akım derinliğinin zamanla değişimini ölçerek deneysel ölçümlerle karşılaştırmışlardır. Bu karşılaştırmanın sonucunda; rezervuardaki akım derinliği değişiminin deneysel ölçümlerle uyumlu olduğunu, engel önündeki ölçüm noktasında ise dalga önünün geliş zamanının doğru şekilde tahmin edildiğini ve deneysel ölçümlerle benzer eğilim sergilediğini fakat maksimum noktaların tam olarak yakalanamadığını raporlamışlardır. Yang vd., (2010) ıslak mansap yatağında kısmi baraj yıkılması sonucu oluşan taşkın dalgasına ait yayılım hızı ve akım derinliğinin kanal boyunca değişimini üç boyutlu bir sayısal model aracılığıyla araştırmışlardır. Sayısal modellerinde su yüzeyinin belirlenmesi için Akışkan Hacmi (Volume of Fluid-VOF) yöntemini kullanmışlar ve türbülans kapatma modeli olarak ise k-ε modelini tercih etmişlerdir. Çalışmalarında sayısal model sonuçlarını karşılaştırmak için hem dikdörtgen enkesitli bir kanala sahip klasik bir kısmi baraj yıkılması deneyini hem de kanal kısmı ani genişleyen baraj yıkılması deneylerini kullanmışlardır. Araştırmalarının sonucunda, dikdörtgen enkesitli kanalda modele ait yayılım hızı sonuçlarının deneysel sonuçlarla zayıf bir uyum içinde olduğunu fakat genel akım deseni açısından benzerlikler gösterdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca genişleyen kanalda üç boyutlu modelin, dalga önü su seviyesi profilinin değişimini ve hidrolik sıçramayı başarılı şekilde yakalayabildiğini ifade etmişlerdir. Feizi Khankandi vd., (2012) geniş-dikdörtgen, trapez, 90° kıvrımlı ve uzun olmak üzere dört farklı plan rezervuar geometrisi için kuru ve ıslak mansap koşulları altında baraj yıkılması problemini incelemişlerdir. Çalışmalarında ikisi rezervuarda ve yedi tanesi kanal boyunca olmak üzere belirledikleri dokuz noktalardaki akım derinlikleri ve hızların değişimini araştırmışlardır. Çalışmalarında akım seviyesinin zamanla değişimini ultrasonik sensörler ve yüksek hızlı kameralar ile ölçmüşler, hız ölçümlerinde ise Akustik Doppler Hız ölçüm (Acoustic Doppler Velocimetry-ADV) yöntemini kullanmışlardır. Araştırmalarının sonucunda kuru mansap yatağına sahip 90° kıvrımlı ve uzun rezervuarların bir noktadaki akım derinliği değişimlerinin Ritter (1892)'in analitik çözümüne yakın olduğunu, trapez ve geniş-dikdörtgen rezervuarların ise Ritter (1892) analitik çözümünden farklı olduğunu

tespit etmişlerdir. Bu farklılığın sebebinin ise kanal girişinde akımda daralma olmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Bununla birlikte geniş-dikdörtgen rezervuarın tüm rezervuarlar arasında en yüksek hız ve debi değerlerine sahip olduğunu, trapez rezervuar geometrisinin geniş-dikdörtgen rezervuara yakın sonuçlar verdiğini fakat kanal girişindeki daralmanın kademeli olması sebebiyle etkilerinin geniş-dikdörtgen rezervuara göre daha zayıf kaldığını bildirmişlerdir. LaRocque vd., (2013) kuru mansap yatağında tam baraj yıkılması kaynaklı şok dalgasına ait akım karakteristiklerinin değişimini farklı rezervuar su seviyeleri için deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Kanalin memba/mansap kısımlarında (kapağın membaında dört ve mansapta dört nokta) belirledikleri sekiz farklı noktadaki hız profilleri ve su yüzü profillerinin değişimini sırasıyla ultrasonik hız profil belirleyicileri (Ultrasonic Velocity Profiling-UVP) ve ultrasonik mesafe ölçüm sensörleri ile elde etmişlerdir. Deneysel bulgularını sayısal model çalışmalarında kullandıkları Ansys Fluent programı çıktıları ile karşılaştırarak yorumlamışlar ve farklı türbülans modellerinin hız profilleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre, türbülans modellemesinin mambadaki hız profillerini etkilemediğini fakat mansaptaki hız profilleri üzerinde etkili olduğunu, seçilen noktadaki hız profilleri şeklinin benzer olduğunu ancak büyüklüklerinin değiştiğini, ultrasonik mesafe ölçüm sensörleri ile elde edilen su yüzü profillerinin Chanson (2006)'nın analitik çözümüyle uyumlu olduğunu ve Ansys Fluent program çıktılarının ölçülen su yüzü profilleri ile tatmin edici derecede doğruluk sağladığını belirtmişlerdir. Ozmen-Cagatay vd., (2014) dikdörtgen enkesitli, eğimli, kuru mansap yatağına sahip ve mansabında üçgen eşik bulunan bir kanalda görüntü işleme tekniğini kullanılarak baraj yıkılması sonucu oluşan taşkın şok dalgasına ait karakteristikleri deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Su yüzeyi profilinin değişimini senkronize edilmiş ve eşzamanlı olarak kayıt alan kameralar ile izlemişler ve geliştirdikleri görüntü işleme tekniğine dayanan sanal dalga probu ile altı farklı noktada akım derinliklerini ölçmüşlerdir. Ayrıca, deneysel çalışmalarındaki koşulları Flow-3D ortamında Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (Reynolds Averaged Navier-Stokes-RANS) ve sığ su denklemlerini (Shallow Water Equations-SWEs) kullanarak modellemişlerdir. Genel olarak her iki model yaklaşımın da deneysel çalışmalardaki su yüzü profilini ve akım derinliklerini yeterli doğrulukta üretebildiğini belirtmişlerdir. Fakat üç boyutlu RANS modelinin, iki boyutlu SWE modelinden su yüzü profilinin değişimi, dalga önü hızı ve bir noktadaki akım derinliklerinin zamanla değişimi açısından deneysel ölçümlere daha yakın olduğunu bildirmişlerdir. Hooshyaripor ve Tahershamsi (2015) baraj yıkılması probleminde

rezervuar sağ ve sol kenar řev eğimlerinin belirledikleri noktalardaki akım derinliği, akım hızı ve debinin değişimi üzerindeki etkisini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. alışmalarında trapez enkesitli rezervuar geometrisi kullanmışlar ve bu geometriye ait řev eğimleri 30° , 45° , 60° , ve 90° olarak belirlemişlerdir. Aynı zamanda herhangi bir noktadaki akım karakteristiklerini belirlemek için Ansys Fluent ticari paket programından yararlanmışlar ve sayısal sonuçları deneysel çalışmalardan elde ettikleri sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Araştırmalarının sonucunda rezervuar řev eğiminin boşaltma sürecini etkileyen bir parametre olduğunu ve daha düşük řev eğimlerine sahip rezervuarların daha hızlı şekilde boşaldığını bildirmişlerdir. Elkholy vd., (2016) kısmi baraj yıkılması problemini farklı ölçüm tekniklerini kullanarak deneysel olarak araştırmışlardır. alışmalarında, farklı rezervuar su seviyeleri için dijital parçacık izlemeli hız ölçüm (Digital Particle Tracking Velocimetry-DPTV) tekniğini kullanarak şok dalgasına ait yayılma hızları ve derinlik ölçümlerini, UVP kullanarak hız profillerini, basınç sensörlerini kullanarak ise dokuz farklı noktada basınç yüksekliklerini ölçmüşlerdir. Ayrıca yüksek çözünürlüklü kameralardan su içine bıraktıkları plastik bilyeleri izlemek için faydalanmışlardır. alışmalarının sonucunda dalga önünün boyutsuz maksimum hızının yaklaşık bir olduğunu, dalganın yanlara yayılma hızının mansaba yayılma hızına oranının yaklaşık $1/3$ olduğunu ve farklı rezervuar su seviyelerinde normalize edilmiş hız profillerinin biribiyle uyumlu olduğunu bildirmişlerdir. Liu vd., (2017) kuru ve iki farklı kuyruk suyu seviyesi altında ıslak mansap yatağına sahip dikdörtgen enkesitli bir kanalda baraj yıkılması problemini deneysel olarak incelemişlerdir. alışmalarında kapak önünde belirledikleri bir noktadaki akım derinliğinin zamanla değişimini görüntü analiz teknikleri ile elde etmişlerdir. Aynı zamanda deneysel ölçümlerinde bir dalga ölçerden yararlanmışlar ve bu ölçüm cihazından elde ettikleri akım derinliğinin zamansal değişimini görüntü işlem tekniği sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. Bu karşılaştırmanın sonucunda görüntü işleme tekniğinin bir noktadaki akım derinliklerinin zamanla değişimini elde etmede oldukça iyi olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca elde ettikleri deneysel sonuçları literatürdeki kuru ve ıslak mansap yatağı koşullarına sahip Ritter (1892), Stoker (1957) ve Lin vd., (1980)'nin analitik özümüleriyle karşılaştırmışlardır. Bu kıyaslamanın neticesinde analitik çözümünün geçerliliklerinin mansap/memba su oranına göre değiştiğini ve Ritter (1892) özümünün kuru yatağa ait deneysel sonuçlarla, Stoker (1957) özümünün ıslak yatağa ait deneysel sonuçlarla ve Lin vd., (1980) özümünün ise her iki yatak durumuna ait deneysel sonuçlarla uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. Hernández vd., (2018) iki boyutlu

hidrodinamik deneylerde akım derinliğini ölçmek için ikili görüntü analizine dayalı ve açık kaynak kodlu alternatif bir yöntem sunmuşlardır. Çalışmalarının amacının fiziksel ölçüm aletlerine ihtiyaç duymadan video kayıtlarından güvenilir ve hassas şekilde akım derinliklerinin ölçülmesi olduğunu belirtmişlerdir. Önerdikleri yöntemde yapay görme sisteminin görüntü sayısallaştırma, işleme ve analiz olmak üzere üç ana aşamasını dikkate almışlardır. Görüntü sayısallaştırma kısmında görüntünün alınması, kalibre edilmesi ve Imagej/OpenCV kullanılarak gri tonlamalı görsellere dönüştürülmesi aşamalarının yer aldığını; görüntü işleme kısmında bir önceki aşamada elde edilen görsellerin yoğunluk modülasyonu ile kontrastının artırılması ve ikili (siyah-beyaz) görüntülere dönüştürülmesi aşamalarını kapsadığını ve son olarak analiz kısmının ise ikili görüntülerde seçilen bölgede morfolojik işlemler uygulayarak akım derinliği-zaman serilerinin elde edilmesi aşamalarından oluştuğunu açıklamışlardır. Yöntemlerinin doğruluğunu ıslak mansap yatağında ve kanal mansabında dikdörtgen bir yapı bulunan baraj yıkılması deneyi ile test etmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre, yöntemlerinin özellikle üç boyutlu akım etkileri oluşmadan önce akım derinliğinin zamanla değişimini elde etmede fiziksel ölçüm aletlerine ait sonuçlarla oldukça uyumlu olduğunu, dalga yansımaları ve sıçramaları gibi durumlarda dahi akım derinliklerini başarılı şekilde ölçebildiğini bildirmişlerdir. Wang vd., (2019) üçgen ve dikdörtgen kanallarda baraj yıkılması problemini deneysel olarak incelemişlerdir. Deneylerini iki farklı rezervuar derinliği ve dört farklı kuyruk suyu için yürütmüşlerdir. Deneysel çalışmalarda ölçüm tekniği olarak görüntü işleme tekniğini kullanmışlar ve sekiz adet kameradan video görüntüler alarak hem su yüzü profillerini hem de akım derinliğinin zamanla değişimini elde etmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda üçgen enkesitli kanalda oluşan seyreltme dalgasının dikdörtgen enkesitli kanala göre daha yavaş ilerlediğini, mansap/memba su oranı 0.1 ve 0.2 iken üçgen kanalda şok dalgasının dikdörtgen kanala göre daha hızlı yayıldığını, oran 0.3 olduğunda her iki kanaldaki şok dalgası yayılma hızının birbirlerine yaklaştığını ve oran 0.4 olduğunda dikdörtgen kanaldaki şok dalgasının daha hızlı yayıldığını belirtmişlerdir. Chumchan ve Rattanadecho (2020) dikdörtgen enkesitli bir kanalda kısmi baraj yıkılması sonucu oluşan taşkın şok dalgasının, kuru mansap yatağı ve kanal tabanında çeşitli engeller olması durumuna ait iki boyutlu yayılımını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Deneysel çalışmalarında su yüzü profillerini yüksek hızlı kameralardan faydalanarak izlemişler ve kayıt altına almışlar, sayısal modellerinde ise sonlu hacimler yöntemini kullanan Ansys Fluent ve Lattice Boltzmann Metodunu (LBM) kullanan XFlow ticari paket programlarından yararlanmışlardır. Sayısal

modellerinde serbest yüzeyin belirlenmesinde VOF yöntemini, türbülans kapatma modeli olarak ise Large Eddy Simulation (LES) modelini dikkate almışlardır. Çalışmalarında yayılma hızı ve iki boyutlu su yüzü profilinin değişimini incelemişler ve simülasyon sonuçlarıyla görsel ve nicel olarak karşılaştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre, her iki modelin de deneysel sonuçlara yakın şekilde iki boyutlu su yüzü profilini üretebildiğini fakat hesaplama zamanı açısından XFlow'un daha kısa sürede simülasyonu gerçekleştirdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca dalga önünün ulaştığı maksimum mesafeyi dört farklı zaman için incelemişler ve deneysel olarak dalga önünün daha önde olduğunu sayısal modellerin ise birbirine yakın fakat deneysel sonuçlardan daha geride kaldığını bildirmişlerdir. Kocaman vd., (2020) daralan bir yapıya sahip dikdörtgen enkesitli bir kanalda baraj yıkılması olayını incelemişlerdir. Laboratuvar deneylerinde kanalı üç farklı şekilde (üçgen ve iki farklı boyutta trapez daraltma) daraltmışlar ve deneylerini yatay bir kanalda kuru mansap yatağında yürütmüşlerdir. Kanal boyunca oluşan su yüzü profilleri ile belli noktalardaki akım derinliklerinin zamansal değişimini üç adet senkronize edilmiş kameradan aldıkları görüntüleri kullanarak görüntü işleme tekniği ile tespit etmişlerdir. Ayrıca deneysel koşullarını Flow-3D programının RANS ve SWE modellerini kullanarak sayısal olarak modellemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda kanal kesitinin daralmasının membaya doğru ilerleyen seyreltme dalgasının oluşumuna neden olduğunu bildirmişlerdir. Bununla birlikte üçgen daralmanın trapez daralmaya göre, daralma bölgesinin hemen girişinde daha güçlü dalga yansımalarına ve daha yüksek akım derinliklerine neden olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca RANS modeli sonuçlarının deneysel sonuçlarla SWE modeline göre daha uyumlu olduğunu, SWE modelinin seyreltme dalgasının ilk aşamalarında tutarsız sonuçlar ürettiğini ve maksimum akım derinliğini daha fazla tahmin ettiğini raporlamışlardır. Fakat buna rağmen SWE modelinin genel anlamda su yüzü profillerini kabul edilebilir doğrulukta üretebildiğini ve hızlı sonuçlar alınması gereken anlarda kullanılabileceğini ifade etmişlerdir. Liu vd., (2020) eğimli bir kanalda ıslak mansap koşulları altında gerçekleşen baraj yıkılması problemini akım derinliği ve akım hızlarının değişimi açısından araştırmışlardır. Çalışmalarını üç farklı taban eğimi ve on bir farklı mansap/memba su seviyesi oranı için yürütmüşler ve deneysel çalışmalarının sayısallaştırılmasında görüntü işleme tekniğini kullanmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre, eğim artışının şok dalgası önünün yayılma hızını arttırdığını ve bu artışın kuru mansap yatağında daha belirgin olduğunu, seyreltme dalgasının hızını ise azalttığını bildirmişlerdir. Ayrıca mansap/memba su seviyesi oranı arttıkça akım derinliği ve ortalama hızlarda dalgalanmaların/salınımların arttığını ve farklı

taban eğimleri için su yüzü profilinin zamansal değişiminin benzer olduğunu tespit etmişlerdir. Oertel ve Sufke (2020) parçacık görüntülemeli hız ölçüm tekniği (Particle Image Velocimetry-PIV) ile optik akış tekniğini karşılaştırarak üç farklı rezervuar su seviyesi için baraj yıkılması sonucu oluşan taşkın şok dalgasını analiz etmişlerdir. Optik akışı görsel bir analiz yöntemi olarak ifade etmişler ve bu yöntemden elde edilen sonuçların belirledikleri dört noktadaki hız profillerini doğru bir şekilde tahmin edebildiğini açıklamışlardır. Optik akış yönteminin parçacık takibine ihtiyaç duymadan görüntü temelli analiz yapabilmesi sayesinde görüntüdeki her piksel için hız vektörü ürettiğini, parçacık görüntülemeli hız ölçüm tekniğine kıyasla daha düşük hata oranına sahip olduğunu ve hızlarla ilgili daha fazla bilgi yoğunluğu sağladığını belirtmişlerdir. Pratiwi vd., (2020) yatay ve dikdörtgen enkesitli bir kanalda kuru mansap koşulları altında tam baraj yıkılması olayını incelemişlerdir. Çalışmalarında baraj gövdesini temsil eden kapağı salınlı (dönerek) şekilde açmışlar ve kanalın mansap bölümüne açılı şekilde duran dikdörtgen bir engel yerleştirmişlerdir. Engel çevresinde beş nokta belirleyerek bu noktalardaki akım derinlikleri ve hızların değişimini araştırmışlardır. Akım derinliği ölçümlerinde ultrasonik sensörlerden, akım hızı ölçümlerinde ise yüksek hızlı akım ölçerlerden yararlanmışlardır. Ayrıca elde ettikleri deneysel sonuçları Noel vd., (2003)'nin deneysel ve sayısal sonuçları ile kıyaslamışlardır. Araştırmalarının sonucunda ilk üç saniyede akımın oldukça türbülanslı olması nedeniyle ölçülen akım derinliği ve hız arasında düşük bir korelasyon elde etmişlerdir. Bununla birlikte Noel vd., (2003)'nin deneysel sonuçlarıyla karşılaştırıldığında grafiklerin benzer eğilim (artış ve azalış eğilimleri) sergilediğini fakat akım derinliği ve hız değerleri açısından farklılıklar olduğunu tespit etmişler, sayısal model sonuçları ile karşılaştırıldığında ise daha az bir uyum gözlemlemişlerdir. Oluşan bu farklılıkların baraj yıkılmasında kullanılan kapağın açılma şekli, ölçüm teknikleri ve veri toplama sistemindeki farklılıklardan kaynaklandığını belirtmişlerdir. Wang vd., (2020) ıslak mansap yatağı koşulları altında üç farklı memba su derinliği ve on farklı mansap/memba su derinliği oranı için tam baraj yıkılması problemini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Laboratuvar uygulamalarında sekiz farklı noktada konumlandıkları kameralardan aldıkları kayıtları kullanılarak görüntü işleme tekniğinden faydalanmışlar ve su yüzü profilleri, bir noktadaki akım derinlikleri ile kesitsel ortalama hızları elde etmişlerdir. Ayrıca laboratuvar ortamında test edilen akım durumlarını LES türbülans kapatma modelini kullanarak Flow-3D ile sayısal olarak modellemişlerdir. Capasso vd., (2021) kısmi bir baraj yıkılması sonucu oluşan taşkın şok dalgasının keskin kenarlı dikdörtgen bir engelle

olan etkileşimini incelemişlerdir. Çalışmalarında biri rezervuarda diğer dördü ise mansapta ve engel civarında olmak üzere belirledikleri beş noktadaki akım derinliklerinin zamanla değişimini Lagrange tabanlı DualSPHysics yazılımını kullanarak modellemişlerdir. Deneysel verilerini farklı hassasiyetlere sahip beş adet ultrasonik sensör kullanarak elde etmişlerdir ve deneysel görüntüleri ise yüksek hızlı kamera kullanarak almışlardır. DualSPHysics yazılımının baraj yıkılması sonucu oluşan üç boyutlu akım yapısının modellenmesinde başarılı sonuçlar ürettiğini ve parçacıklar arası mesafe azaldıkça daha iyi sonuçlar ürettiğini belirtmişlerdir. Espartel ve Manica (2021) kuru ve ıslak mansap yatağına sahip dikdörtgen enkesitli bir kanalda baraj yıkılması problemini incelemişlerdir. Çalışmalarında, efektif hız ve efektif yükseklik olmak üzere iki adet boyutsuz parametre belirlemişler ve deneysel çalışmalarında dalga yüksekliği ile dalga önü su yüzü profilinin değişimine ait sonuçları yüksek hızlı kameralar, Virtualdub ve Plot Digitizer yazılımlarını kullanarak görüntü işleme tekniği ile elde etmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda mansap/memba su oranının maksimum dalga yüksekliğini doğrudan etkilediğini, bu oran arttıkça maksimum dalga yüksekliğinin belirgin şekilde değiştiğini belirtmişlerdir. Bunun yanı sıra efektif yüksekliğin sözü edilen oranla ters orantılı olduğunu ve efektif hızın 0.1-0.2 aralığında maksimum değere ulaştığını ifade etmişlerdir. Son olarak kuyruk suyu derinliği arttıkça dalga önü su yüzü profilinin değiştiğini ve dalga kırılma tipinin farklılaştığını bildirmişlerdir. Ferdowsi vd., (2021) farklı tipteki rezervuar geometrileri için baraj yıkılması kaynaklı taşkın şok dalgasına ait akım karakteristiklerini Flow-3D ile modellemişler ve literatürdeki deneysel çalışma sonuçları ve Fluent sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Çalışmalarında iki adet trapez, iki adet asimetrik, bir adet dikdörtgen (uzun ve dar) ve bir adet 90° kıvrımlı olmak üzere altı adet rezervuar geometrisinin beş farklı noktadaki akım derinliği ve hız üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarının sonucunda rezervuar şeklinin akım hızı ve akım derinliği üzerinde önemli rol oynadığını belirtmişlerdir. Ölçüm alınan noktalarda maksimum akım derinliğinin planda yatayla 30° açı yapan rezervuar geometrisinde oluştuğunu, maksimum akım hızının yatayla 45° açı yapan rezervuar geometrisinde meydana geldiğini, uzun ve dar geometriye sahip rezervuarın ölçüm alınan ilk noktada (rezervuarın içinde belirlenen nokta) maksimum akım hızına neden olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca sayısal model sonuçlarının genel olarak deneysel sonuçlarla uyumlu olduğunu fakat Flow-3D'nin Fluent'e göre daha iyi bir performans sergilediğini ifade etmişlerdir. Khoshkonesh vd., (2021) kısmi baraj yıkılması probleminde şok dalgasının mansapta yayılması için oluşturulan tam ve üç farklı kısmi açıklık genişliğinin akım karakteristikleri üzerindeki

etkilerini sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında Flow-3D programından yararlanmışlar ve LES türbülans kapatma modelini kullanmışlardır. Araştırmalarının sonucunda kısmi açıklık genişliği azaldıkça; dalga önü yayılma mesafesinin, rezervuardaki su yüzü eğiminin, çıkış debisinin ve Froude sayısının azaldığını türbülans ve hava kabarcığı oluşumunun ise arttığını tespit etmişlerdir. Kocaman vd., (2021) kısmi baraj yıkılması problemini kuru ve iki farklı ıslak mansap yatağı durumu için üç boyutlu deneysel ve sayısal modelleme çalışmaları ile araştırmışlardır. Deneysel çalışmalarının sayısallaştırılmasında, görüntü işleme tekniğinden ve beş farklı noktaya yerleştirdikleri ultrasonik sensörlerden faydalanmışlardır. Sayısal modellemelerinde ise Flow-3D programının iki ve üç boyutlu SWE ve RANS çözümlerinden yararlanmışlardır. Şok ve seyreltme dalgalarının yayılımı ile mansapta oluşan yansımayı inceledikleri çalışmalarında, deneysel çalışmaların sonuçlarını Flow-3D programından elde olunan sonuçlar ile karşılaştırmışlar ve sonuçların makul düzeyde uyumlu olduğunu ifade etmişlerdir. Bununla birlikte kuru mansap yatağında dalga önünün daha hızlı ilerlediğini, ıslak mansap yatağında ise kuyruk suyu derinliği arttıkça dalga önü hızının azaldığını belirtmişlerdir. Ayrıca ıslak mansap yatağında kanal sonundaki duvardan yansıyan seyreltme dalgasının mansap/memba su oranı arttıkça daha hızlı ilerlediğini ve deneysel sonuçlara uyum açısından üç boyutlu RANS sonuçlarının iki boyutlu SWE sonuçlarından daha iyi olduğunu bildirmişlerdir. Nguyen-Thi vd., (2021) viskozitenin baraj yıkılması sonucu oluşan taşkın şok dalgasının yayılımı üzerindeki etkisini deneysel ve sayısal çalışmalarla araştırmışlardır. Deneysel çalışmalarında yüksek hızlı bir kamera kullanarak şok dalgasının yayılımını izlemişler ve elde ettikleri görüntüleri analiz ederek su yüzü profilini belirlemişlerdir. Deneylerinde viskozite ve yüzey gerilimi değişikliklerinin taşkın şok dalgası davranışı üzerindeki etkisini vurgulamak için suya polimer eklemişler ve viskozitesini değiştirmişlerdir. Çalışmalarının nümerik kısmını OpenFOAM’da yürütmüşler analitik çözümlerde ise Stoker (1957) ve Huppert (1982) tarafından önerilen çözümleri kullanmışlardır. Araştırmalarının sonucunda su yüzü profilleri açısından deneysel, sayısal ve analitik sonuçların uyumlu olduğunu, mansaptaki su derinliği arttıkça ortalama hızın azaldığını ve viskozitenin artmasıyla birlikte dalga önü yayılımının yavaşladığını ifade etmişlerdir. Ozmen-Cagatay vd., (2022) baraj yıkılması mekanizmasıyla üç farklı yoğunluktaki sıvının (su, tuzlu su ve sıvı yağ) kuru mansap yağındaki yayılımını ve akım derinlikleri üzerindeki etkisini deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır. Çalışmalarında su yüzü profillerini yüksek hızlı kameralarla izlemişler ve dört farklı konumda seçtikleri bir noktadaki akım derinliklerinin zamanla değişimini

görüntü işleme tekniği ile elde etmişlerdir. Ayrıca problemlerinin sayısal simülasyonu için Flow-3D programını kullanmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre, başlangıç durumunda tüm sıvıların benzer davranış gösterdiğini fakat akım ilerledikçe türbülans ve sürtünme etkileri nedeniyle davranışın farklılaştığını ve dalga önü hızı ile su yüzü profilinin her akışkan tipi için farklı olduğunu belirtmişlerdir. Bununla birlikte Flow-3D sonuçlarının genel anlamda deneysel sonuçlarla uyumlu olduğunu fakat türbülans ve sürtünme etkilerini tahmin etmede problem yaşadığını bildirmişlerdir. Yang vd., (2022a) kuru ve ıslak mansap yatağına sahip klasik bir baraj yıkılması probleminde dalga yüksekliği ve dalga önü su yüzü profilinin değişimine odaklanmışlardır. Çalışmalarında, maksimum dalga yüksekliği ve maksimum dalga önü su yüzü profili eğimini hızlı şekilde belirlemeye yönelik pratik bir yöntem önermişlerdir. Ayrıca deneysel çalışmalarından elde ettikleri sonuçları literatürdeki analitik çözüm sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. Çalışmalarının sonucunda; kuru mansap yatağında taban sürtünmesinin dalga yayılma hızı ve su yüzü profili üzerinde etkili olduğunu, sürtünme katsayısı doğru tahmin edildiğinde Chanson (2005) çözümü ile sonuçların uyumlu olduğunu ve dalga önü su yüzü profili eğiminin rezervuar su seviyesi arttıkça arttığını fakat zamanla sürtünme etkisinden dolayı azaldığını ifade etmişlerdir. Bununla birlikte ıslak mansap yatağı durumunda Arnason (2005) çözümünün dalga önü su yüzü profilini ve yansıyan dalgaların geliş zamanını doğru tahmin ettiğini, Stoker (1957) çözümünün ise dalga profilini tam olarak tahmin edemediğini fakat dalga yayılma hızını belirlemede başarılı olduğunu bildirmişlerdir. Chang ve Wu (2023) baraj yıkılması mekanizmasının kullanarak ürettikleri taşkın dalgasının hem pürüzsüz hem de farklı dizilimlerde pürüzlülük elemanları ile oluşturulmuş eğimli yüzeyler üzerindeki yayılımını su yüzü profilleri, hız profilleri ve maksimum tırmanma yüksekliği açısından Düzleştirilmiş Parçacık Hidrodinamiği (Smoothed-Particle Hydrodynamics-SPH) sayısal modeli ile incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda SPH modelinin deneysel sonuçlara göre pürüzsüz yüzeylerde dalga tırmanma yüksekliğini %19'luk bir farkla hesaplayabildiğini, pürüzlü yüzeylerde su yüzü profillerinin ve akımın yayılım desenlerinin deneysel sonuçlarla uyumlu olduğunu, maksimum tırmanma yüksekliğini %12 farkla yakalayabildiğini ve pürüzlü yüzeylerin tırmanma yüksekliğini pürüzsüz yüzeylere göre maksimum %25 oranında azalttığını ifade etmişlerdir. Erduran vd., (2024a) kısmi baraj yıkılması sonucu oluşan şok dalgasının kuru ve ıslak mansap yatağındaki yayılımını hem bir noktadaki akım derinliklerinin hem de bir ve iki boyutlu su yüzü profillerinin zamanla değişimi açısından deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Deneysel çalışmalarında

kanalın farklı noktalarına konumlandıkları kameralardan aldıkları su yüzü profillerinin değişimini gösteren kayıtları görüntü işleme tekniği ile sayısallaştırmışlardır. Deneyler esnasında baraj gövdesini temsil eden kapağın açılma süresini ise Arduino sistemi ile ölçmüşlerdir. Sayısal çalışmalarında Erduran (2001) tarafından geliştirilen iki boyutlu sıg su denklemlerini sonlu hacimler yöntemiyle çözen (Finite Volume Solution Shallow Water Equations-FVSSWE) sayısal modelinden ve ticari bir paket program olan üç boyutlu çözümler üreten Flow-3D programından yararlanmışlardır. Deneysel ve sayısal çalışmalarının sonucunda kuru mansap yatağında ilerleyen ortalama şok dalgası hızlarının ıslak mansap yatağına göre daha yüksek olduğunu, rezervuar su seviyesi artışının kuru ve ıslak mansap yatağında ilerleyen ortalama şok dalgası hızını arttırdığını, üç boyutlu modelin iki boyutlu modellere göre performansının daha iyi olduğunu ve görüntü işleme tekniğinin deneysel sonuçlara yakın sonuçlar ürettiğini bildirmişlerdir. Zhou vd., (2024) eğimli ve mansap yatağı ıslak olan bir kanal üzerinde baraj yıkılması problemini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmalarını farklı rezervuar ve kuyruk suyu seviyeleri ile farklı kanal taban eğimleri altında yürütmüşlerdir. Mansap/memba su oranı ve taban eğiminin, dalga önü hızı ile dalga yüksekliğini nasıl değiştirdiğini araştırmışlardır. Çalışmalarının sonucunda taban eğimi arttıkça deneysel ölçümlerle analitik çözümler arasındaki ortalama bağıl hatanın önce azaldığını sonra arttığını bildirmişlerdir. Ayrıca Stoker'in (1957) analitik çözümüyle elde ettikleri dalga yüksekliğini deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlar ve %12.05 bağıl hata hesaplamışlardır. Bunun yanı sıra mansap/memba su oranını kullanarak maksimum dalga yüksekliğini hesaplamak için yeni bir bağıntı önermişlerdir.

Şok dalgasının karakteristik yapısının (yayılma hızı, dalga yüksekliği, ilerleyen dalgaya ait su yüzü profili) araştırıldığı çalışmalar ile karakteristik yapısı üzerinde rol oynadığı düşünülen faktörlerin (kısmi ve tam baraj yıkılması durumu, kuru ve ıslak mansap durumu, rezervuar geometrisi ve rezervuar su seviyesi, mansap kanal geometrisi ve eğimi, baraj yıkılma süresi, şok dalgasının ilerleme yönüne yerleştirilen çeşitli engeller, pürüzlülükler vb.) araştırıldığı çalışmaların özeti, yapılan çalışmaların benzer ve farklı yönlerini açık bir şekilde ortaya koymak adına Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Baraj yıkılması kaynaklı taşkın şok dalgası karakteristiğinin ve bu karakteristiği etkileyen unsurların incelenmesine yönelik çalışmalar

Yazar(lar)	Yıl	Kanal Boyutları (m) L x W x H	Yıkılma Türü	Kanal Eğimi	Mansap Özelliği	Mansapta Engel Durumu	Deneysel Ölçüm Tekniği	Sayısal Model	Analitik / Teorik Çözüm	Araştırılan Parametre
Ritter	1892	Dikdörtgen enkesitli sürtünmesiz kanal	Tam	Yatay	Kuru	-	-	-	Saint-Venant Denklemleri	Su Yüzü Profilinin Değişimi
Dressler	1952	Dikdörtgen enkesitli kanal	Tam	Yatay	Kuru	-	-	-	-	Şok Dalgası Yüksekliği ve Dalga Hızının Değişimi
Stoker	1957	Dikdörtgen enkesitli sürtünmesiz kanal	Tam	Yatay	Islak	-	-	-	Karakteristikler Yöntemi	Su Yüzü Profilinin Değişimi
Yeh vd.,	1989	9.0x1.2x0.9	Tam	Yatay	Islak	Eğimli Yüzey	Lazer Aydınlatması, Video Kayıtları Dalga Ölçer	-	-	Maksimum Dalga Yükseklikleri ve Dalga Yayılım Hızının Değişimi
Alcrudo ve Garcia	1993	200x200	Kısmi	Yatay	Kuru	-	-	2B Boyutlu Sığ Su Denklemleri- Sonlu Hacimler Yöntemi	-	Su Yüzü Profilinin Değişimi
Zhao vd.,	1994	200x200	Kısmi	Yatay	Kuru ve Islak	-	-	2B Sığ Su Denklemlerini Sonlu Hacimler ile Çözen bir Model	-	Su Yüzü Profilinin Değişimi
Fraccarollo ve Toro	1995	3.0x2.0x0.8	Tam	Yatay	Kuru	-	Basınç Dönüştürücü Dalga ölçer Hız ölçer	2B Sığ Su Denklemlerine Dayanan Bir Model	-	Farklı Noktalardaki Basınç, Hız ve Akım Derinliğinin Değişimi
Kumar Jha vd.,	1995	Dikdörtgen enkesitli sürtünmesiz kanal	Tam	Yatay	Islak	-	-	1.ve 2. Dereceden Roe Şeması	-	Su Yüzü Profilinin Değişimi

Çizelge 2.1. (Devam) Baraj yıkılması kaynaklı taşkın şok dalgası karakteristiğinin ve bu karakteristiği etkileyen unsurların incelenmesine yönelik çalışmalar

Yazar(lar)	Yıl	Kanal Boyutları (m) L x W x H	Yıkılma Türü	Kanal Eğimi	Mansap Özelliği	Mansapta Engel Durumu	Deneysel Ölçüm Tekniği	Sayısal Model	Analitik / Teorik Çözüm	Araştırılan Parametre
Zhao vd.,	1996	200x200	Kısmi	Yatay	Kuru ve Islak	-	-	2B Sığ Su Denklemlerini Sonlu Hacimler ile Çözen bir Model	-	Dalga Yüksekliği, Dalga Hızı ve Su Yüzü Profiline Değişimi
Lauber ve Hager	1998a 1998b	14.0 x 0.50 x 0.70	Tam	Yatay ve eğimli	Kuru	-	Video Kayıtları PIV	-	-	Akım Derinliğinin, Ortalama Hızların, Dalga Önü Hızlarının Değişimi
Zoppou ve Roberts	1999	200x200	Kısmi	Yatay ve eğimli	Kuru ve Islak	-	-	2B Sığ Su Denklemlerine Dayanan Bir Model	-	Su Yüzü Profiline Değişimi
Mingham ve Causon	2000	Daralan ve Genişleyen kanal	Tam	Yatay	Kuru	-	-	2B Sığ Su Denklemlerine Dayanan Bir Model	-	Su Yüzü Profiline Değişimi
Nsom vd.,	2000	5.0 x 0.30 x 0.08	Tam	Yatay ve Eğimli	Kuru	-	Ultrasonik Cihazlar ve Video Kayıtları	Navier-Stokes ve Süreklilik Denklemlerine Dayanan Bir Boyutlu Sığ Su Yaklaşımı	-	Dalga Önü Su Yüzü Profiline Değişimi
Erduran vd.,	2002	300 (1B Yıkılma) 200x200 (2B Yıkılma) 25 (Dairesel Yıkılma)	Tam ve Kısmi	Yatay	Kuru ve Islak	-	-	2B Sığ Su Denklemlerini Sonlu Hacimler ile Çözen bir Model	-	Su Yüzü Profili Akım derinliği ve Hızın Değişimi
Zhou vd.,	2002	Dikdörtgen enkesitli rezervuar ve 90 ⁰ kıvrımlı kanal	Tam	Yatay	Kuru ve Islak	Rezervuar ve Kanal Tabanı Arasında 90 ⁰ lik Yükseklik Farkı	Dalga Ölçerler	Sığ Su Denklemlerinin Çözümü	-	Akım Derinliklerinin Değişimi

Çizelge 2.1. (Devam) Baraj yıkılması kaynaklı taşkın şok dalgası karakteristiğinin ve bu karakteristiği etkileyen unsurların incelenmesine yönelik çalışmalar

Yazar(lar)	Yıl	Kanal Boyutları (m) L x W x H	Yıkılma Türü	Kanal Eğimi	Mansap Özelliği	Mansapta Engel Durumu	Deneysel Ölçüm Tekniği	Sayısal Model	Analitik / Teorik Çözüm	Araştırılan Parametre
Soares-Fraza vd.,	2002	5.60 x 0.50 x 0.30	Tam	Eğimli	Kuru	Üçgen Eşik	Yüksek Hızlı Kameralar ve Görüntüleme Teknikleri	Sığ Su Denklemleri	-	Su Yüzü Profili ve Akım Derinliklerinin Değişimi
Bukreev	2005	7.20 x 0.20 x 0.24	Kısmi	Yatay	Kuru	Dikdörtgen Eşik	Dalga Ölçerler ve Video Kayıtları	-	-	Eşik Üzerindeki Derinliği Kullanarak Akım Debisini Elde Etme
Eaket vd.,	2005	4.75 x 2.31 x 1.23	Kısmi	Yatay	Kuru ve ıslak	-	Video Stereoskopi	-	-	Su Yüzeyi Profilinin ve Hızın Değişimi
Aureli vd.,	2008	2.6x1.2	Kısmi	Yatay	Kuru ve Islak	Dikdörtgen Engel	Görüntü işleme Ultrasonik Sensörler	2B Sığ Su Denklemlerini Sonlu Hacimler ile Çözen bir Model	-	Akım Derinliği ve Hız Değişimi
Chanson	2005 2009	Dikdörtgen enkesitli kanal	Tam	Yatay ve Eğimli	Kuru ve Islak	-	-	-	Saint-Venant denklemleri ve Karakteristikler Yöntemi	Dalga Önü Hızı, Konumu ve Su Yüzü Profilinin Değişimi
Causon vd.,	2010	3.22x1.0x1.0	Tam	Yatay	Kuru	Dikdörtgen Engel	-	AMAZON-SC	-	Akım Derinliğinin Değişimi
Yang vd.,	2010	28.0x1.6x1.0	Kısmi	Yatay	Islak	-	Video Kayıtları, PIV Basınç Sensörleri	VOF Yöntemini Kullanan 3B bir Nümerik Model	-	Akım Derinliği ve Yayılım Hızının Değişimi
Feizi Khankandi vd.,	2012	Dört farklı rezervuar geometrisi	Tam	Yatay	Kuru ve Islak	-	Ultrasonik Sensörler, Dijital Görüntüleme Teknikleri ADV	-	Ritter (1892)	Belli Noktalardaki Akım Derinliğinin ve Hızın Değişimi

Çizelge 2.1. (Devam) Baraj yıkılması kaynaklı taşkın şok dalgası karakteristiğinin ve bu karakteristiği etkileyen unsurların incelenmesine yönelik çalışmalar

Yazar(lar)	Yıl	Kanal Boyutları (m) L x W x H	Yıkılma Türü	Kanal Eğimi	Mansap Özelliği	Mansapta Engel Durumu	Deneysel Ölçüm Tekniği	Sayısal Model	Analitik / Teorik Çözüm	Araştırılan Parametre
LaRocque vd.,	2013	7.31x0.8x0.42	Tam	Yatay	Kuru	-	Ultrasonik Sensörler Ultrasonik Hız Ölçer	Ansys Fluent	Chanson (2006)	Su Yüzü Profili ve Hız Profillerinin Değişimi
Ozmen-Cagatay vd.,	2014	8.9 x 0.3 x 0.34	Tam	Yatay	Kuru	Üçgen Eşik	Görüntü işleme	Flow-3D	-	Akım Derinliklerinin Değişimi
Hooshyaripor ve Tahershamsi	2015	13.8x0.51x0.7	Tam	Yatay	Kuru	-	Ultrasonik Sensörler ADV	Ansys Fluent	-	Akım Derinliği, Hız ve Debi Değişimleri
Elkholy vd.,	2016	12x4.3x0.75	Kısmi	Yatay	Kuru	-	Video Kayıtları, DPTV Basınç Dönüştürücüler	-	-	Su Yüzü Profili Yayılım Hızları ve Hız Profillerinin Değişimi
Liu vd.,	2017	6.5x0.4x0.4	Tam	Yatay	Kuru ve Islak	-	Video Kayıtları Görüntü İşleme Dalga Ölçer	-	Ritter (1892) Stoker (1957) Lin vd., (1980)	Akım Derinliğinin Değişimi
Hernández vd.,	2018	1.0 x 3.35 x 4.50	Tam	Yatay	Islak	Dikdörtgen Yapı	Dalga Ölçerler Görüntü Analizi	Imagej ve OpenCV	-	Su Yüzü Profiline Değişimi
Wang vd.,	2019	18.0 x 1.0 x 1.09	Tam	Yatay	Islak	-	Görüntü İşleme	-	-	Su Yüzü Profili ve Akım Derinliğinin Değişimi
Chumchan ve Rattanadecho	2020	0.984x0.484x0.2	Kısmi	Yatay	Kuru	Küp Engeller	Video kayıtları	Ansys Fluent, XFlow	-	Su Yüzü Profiline Değişimi
Kocaman vd.,	2020	7.12x0.30x 0.34	Tam	Yatay	Kuru	Farklı Boyutlarda Daraltma Yapıları	Görüntü İşleme	Flow-3D	-	Su Yüzü Profili ve Akım Derinliklerinin Değişimi

Çizelge 2.1. (Devam) Baraj yıkılması kaynaklı taşkın şok dalgası karakteristiğinin ve bu karakteristiği etkileyen unsurların incelenmesine yönelik çalışmalar

Yazar(lar)	Yıl	Kanal Boyutları (m) L x W x H	Yıkılma Türü	Kanal Eğimi	Mansap Özelliği	Mansapta Engel Durumu	Deneysel Ölçüm Tekniği	Sayısal Model	Analitik / Teorik Çözüm	Araştırılan Parametre
Liu vd.,	2020	18.0x1.0x1.09	Tam	Eğimli	Islak	-	Görüntü İşleme	-	-	Akım Derinliği ve Hız Değişimi
Oertel ve Söfke	2020	12.5 x 0.3 x 0.5	Tam	Yatay	Kuru	-	PIV ve Optik akış yöntemi	-	-	Hız Profillerinin Değişimi
Pratiwi vd.,	2020	10.0x1.0x0.5	Tam	Yatay	Kuru	Dikdörtgen Engel	Ultrasonik Aensörler ve Yüksek Hızlı Akım Ölçer	-	-	Akım Derinliği ve Hız Değişimi
Wang vd.,	2020	18x1.0x1.09	Tam	Yatay	Islak	-	Video kayıtları ve Görüntü İşleme	Flow-3D	-	Su Yüzü Profilinin Değişimi
Capasso vd.,	2021	1.0x0.5x0.35	Kısmi	Yatay	Kuru	Açılı Yerleştirilmiş Dikdörtgen Engel	Ultrasonik Sensör	SPH	-	Akım Derinliğinin Değişimi
Espartel ve Manica	2021	6.0x0.24x0.49	Tam	Yatay	Kuru ve Islak	-	Yüksek Hızlı Kameralar Görüntü İşleme	Virtualdub Plot Digitizer	-	Efektif Hız ve Efektif Derinlik
Ferdowsi vd.,	2021	Altı farklı rezervuar geometrisi	Tam	Yatay	Kuru	-	-	Flow-3D	-	Akım Derinliği ve Hız Değişimi
Khoshkonesh vd.,	2021	10x0.5x0.5	Kısmi	Yatay	Kuru	-	-	Flow-3D	-	Su Yüzü Profilinin Değişimi, Dalga Önü Konumu ve Çıkış Debisi
Kocaman vd.,	2021	0.1x0.5x0.35	Kısmi	Yatay	Kuru ve Islak	-	Görüntü işleme ve Ultrasonik Sensör	Flow-3D	-	Su Yüzü Profili ve Akım Derinliğinin Değişimi

Çizelge 2.1. (Devam) Baraj yıkılması kaynaklı taşkın şok dalgası karakteristiğinin ve bu karakteristiği etkileyen unsurların incelenmesine yönelik çalışmalar

Yazar(lar)	Yıl	Kanal Boyutları (m) L x W x H	Yıkılma Türü	Kanal Eğimi	Mansap Özelliği	Mansapta Engel Durumu	Deneysel Ölçüm Tekniği	Sayısal Model	Analitik / Teorik Çözüm	Araştırılan Parametre
Nguyen-Thi vd.,	2021	2.0x0.55x0.12	Tam	Yatay	Kuru ve Islak	-	Görüntü Analizi Teknikleri	OpenFOAM	Stoker (1957) Huppert (1982)	Su Yüzü Profilinin Değişimi
Ozmen-Cagatay vd.,	2022	1.216x0.20x0.32	Tam	Yatay	Kuru	-	Görüntü İşleme	Flow-3D	-	Su Yüzü Profillerinin ve Akım Derinliklerinin Değişimi
Yang vd.,	2022a	10.72x1.485x0.6	Tam	Yatay	Kuru ve Islak	-	Dalga Ölçerler, ADV	-	Stoker (1957) Aranson (2005) Chanson (2005)	Dalga Yüksekliği ve Dalga Önü Su Yüzü Profilinin Değişimi
Chang ve Wu	2023	25x0.5x0.6	Tam	Yatay	Islak	Farklı Dizilimlerle Oluşturulmuş Pürüzlü Eğimli Yüzeyler	-	SPH	-	Su Yüzü Profili, Hız profilleri ve Tırmanma Yüksekliğinin Değişimi
Erduran vd.,	2024a	6.0x1.2x0.5	Kısmi	Yatay	Kuru ve Islak	-	Video kayıtları ve Görüntü İşleme	Flow-3D	-	Su Yüzü Profilleri ve Akım Derinliği Değişimi
Zhou vd.,	2024	62x1.2x1.0	Tam	Eğimli	Islak	-	Video kayıtlar ve Dalga Ölçerler	-	Stoker (1957)	Dalga Önü Hızı ve Dalga Yüksekliğinin Değişimi

2.2 Şok Dalgasının Yıkıcı Etkilerinin Araştırıldığı Çalışmalar

Baraj yıkılması sonucu oluşan şok dalgasının baraj mansabındaki yapılar ve baraj yıkılması mekanizması ile üretilen ve şok dalgasına benzer özellik taşıyan tsunami dalgasının kıyı şeridindeki yapılar üzerinde oluşturduğu basınç ve çarpma kuvvetleri eskiden olduğu gibi günümüzde de araştırmacıların ilgi odağı olmuştur. Ramsden (1996) kuru ve ıslak mansap yatağında baraj yıkılması sonucu oluşan taşkın dalgasının düşey bir duvar üzerindeki etkisini basınç ve kuvvet değişkenleri açısından deneysel olarak araştırmıştır. Araştırmalarının sonucunda hidrostatik kabule dayanan ve maksimum tırmanma yüksekliğini kullanılarak hesaplanan kuvvet ve moment değerlerinin ölçülen maksimum değerlerden daha büyük olduğunu görmüşlerdir. Ayrıca %2 eğime sahip bir kıyıda ilerleyen dalgaanın düşey bir duvar üzerinde oluşturduğu kuvvet ve tırmanma yüksekliği verilerinin yatay bir kanalda elde edilen sonuçlarla uyumlu olduğunu, bu sebeple eğimi %2'yi geçmeyen kıyılarda yatay kanal verilerinin kullanılabileceğini bildirmişlerdir. Shige-eda ve Akiyama (2003) kısmi baraj yıkılması sonucu oluşan iki boyutlu taşkın şok dalgasının yayılımını ve kare enkesitli yapılar üzerine uyguladığı kuvvetleri deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Bununla birlikte taşkın dalgası önü su yüzü profilinin, belli noktalardaki su seviyesinin ve yayılım hızlarının değişimini araştırmışlardır. Deneysel çalışmalarında kanal mansabında iki sıra halinde düz yerleştirilmiş kare enkesitli yapılar olması durumu ile bu yapıların olmaması durumlarını ele almışlar ve sayısal çalışmalarında sonlu hacimler yöntemine dayanan bir model kullanmışlardır. Yayılım hızlarını ölçmek için parçacık görüntülemeli hız tekniğinden, kuvvet ölçümlerinde ise yük hücresinden yararlanmışlardır. Model sonuçlarının iki boyutlu taşkın yayılımını ve yapılar üzerine etkileyen kuvvetleri deneysel verilerle uyumlu olacak şekilde üretebildiğini açıklamışlardır. Arnason vd., (2009) ıslak mansap yatağında farklı rezervuar su seviyeleri için baraj yıkılması sonucu oluşan tsunami dalgasının kare ve dairesel enkesite sahip kolonlarla olan etkileşimini deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmalarında su yüzü profilinin değişimini lazer kaynaklı floresan (Laser Induced Fluorescence-LIF) tekniği ile belirlemişler ve hız ölçümlerinde digital parçacık görüntülemeli hız (Digital Particle Image Velocimetry-DPIV) ve Lazer Doppler Hız (Laser Doppler Velocimetry-LDV) ölçüm tekniklerini kullanmışlardır. Kuvvet ölçümlerinde ise yük hücresinden yararlanmışlardır. Elde ettikleri deneysel sonuçların yapılar üzerine etkileyen kuvveti tahmin eden sayısal modellerin doğrulanmasında kullanılabileceğini bildirmişlerdir. Bununla birlikte rezervuar su seviyesi artıkça kare ve

daireysel yapılara etkiyen kuvvetin arttığını, kare kolonun düz yüzeyi akım doğrultusuna dik yerleştirildiğinde özellikle küçük rezervuar su seviyelerinde ilk çarpma kuvvetinin yarı-kararlı bölgede oluşan kuvvetten yaklaşık %50 daha büyük olduğunu ve kare kolon 45⁰ döndürüldüğünde yapı üzerinde oluşan ilk çarpma kuvvetinin hiç gözlemlenmediğini belirtmişlerdir. Benzer şekilde daireysel kolon için de ilk çarpma kuvvetinin belirgin şekilde oluşmadığını bildirmişlerdir. Son olarak kare kolonlar için direnç katsayısının yaklaşık olarak 2, daireysel kolon için ise 1-2 arasında değiştiğini ifade etmişlerdir. Lukunaprasit vd., (2009) Tayland, Phuket'teki Kamala Plajına benzer plaj koşullarını laboratuvar ortamında oluşturarak, FEMA P646'da tsunami kuvvetlerinin hesabı için önerilen yöntemin, laboratuvar deneyleri aracılığıyla doğruluğunu test etmeye odaklanmışlardır. Araştırmalarının sonucunda FEMA tarafından önerilen yönteme ait kuvvet değerlerinin, deneysel ölçüm sonuçlarına göre kabul edilebilir bir üst sınırdan olduğunu bildirmişlerdir. Nistor vd., (2009) baraj yıkılması mekanizması ile farklı rezervuar su seviyelerinde ürettikleri tsunami kaynaklı dalganın farklı yapı tipleri üzerindeki etkisini bir dizi laboratuvar deneyleriyle basınç ve çarpma kuvvetlerinin zamanla değişimlerini ölçerek incelemişlerdir. Deneysel çalışmalarında daireysel yapı üzerine farklı yüksekliklerde basınç ölçüm sensörleri, kare yapının ön yüzüne ise alt ve üst konumlarda olmak üzere bölgesel yük hücreleri yerleştirmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda, daireysel yapıda rezervuar su seviyesine bağlı olarak çarpma kuvveti büyüklüğünün arttığını, kuvvet profilinde ise önce yüksek bir çarpma kuvveti oluştuğunu sonrasında geçici bir azalma yaşandığını ve ardından dalganın yapı üzerinde tırmanması sonucu kuvvetin tekrar arttığını ve yarı kararlı hale geldiğini açıklamışlardır. Ayrıca silindirik yapıdaki basınç dağılımının yapı üzerine farklı konumlarda yerleştirilen sensörler aracılığıyla ölçüldüğünü ve basıncın tabandaki sensörde en yüksek yukarı doğru gidildikçe ise azaldığını tespit etmişlerdir. Kare yapıda ise ön yüzün alt ve üst bölgelerine yerleştirilen yük hücreleri ile bölgesel kuvvetler ölçülmüştür. Alt bölümdeki kuvvetlerde doğrudan dalga çarpması nedeniyle ani ve büyük artışlar gerçekleşirken üst bölümdeki kuvvetlerde sadece dalga tırmanma etkisiyle daha düşük değerler kaydedildiğini bildirmişlerdir. Nouri vd., (2010) baraj yıkılması kaynaklı şok dalgası ile kare ve daireysel yapılar arasındaki etkileşimi incelemişlerdir. Çalışmalarında dalga yüksekliği, hız, yapılara etkiyen basınç ve kuvvet ile yüzen cisimlerin (ahşap kütükler) etkisini kapsamlı şekilde deneysel olarak ölçmüşlerdir. Elde ettikleri sonuçlar açısından dalga yüksekliği ve akım hızlarının literatürdeki deneylerle uyumlu olduğunu ve maksimum basıncın ilk çarpma anında şok dalgası yüksekliğinin yaklaşık %40'ında meydana geldiğini

bildirmişlerdir. Ayrıca yüzen cisimlerin ikinci bir çarpma etkisi oluşturduğunu ve bunun ilk çarpma etkisinden daha küçük olduğunu ifade etmişlerdir. Yang vd., (2010) kuru mansap yatağında tam baraj yıkılması sonucu oluşan şok dalgasının dikdörtgen enkesitli bir engel üzerindeki çarpma kuvvetini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Deneysel çalışmalarında farklı rezervuar su seviyeleri kullanmışlar ve her rezervuar su seviyesinde ani kapak açılma koşulunu sağlayarak engelin hareketini kayıt altına almışlardır. Engelin hareket etmesine neden olan kritik rezervuar su seviyesini 0.123 m olarak bulmuşlar ve bu değeri doğrulamak için deneylerini tekrarlamışlardır. Sayısal çalışmalarında ise üç boyutlu VOF yöntemine dayanan bir model kullanmışlar ve akım yönündeki çarpma kuvveti ile engelin hareketine karşı koyan direnç kuvvetini hesaplamışlardır. Farklı rezervuar su seviyeleri için sayısal simülasyonlar yapmışlar ve çarpma kuvvetinin direnç kuvvetinde büyük olduğu anda engelin hareket edeceğini ifade etmişlerdir. Model sonucuna göre engeli hareket ettirecek kritik rezervuar su seviyesini 0.135 m olarak elde etmişlerdir. Elde ettikleri bu sonucun deneysel çalışmalardan elde ettikleri kritik rezervuar seviyesinden %9.76 daha fazla olduğunu belirtmişlerdir. Dolayısıyla modelin, deneylerle nispeten iyi bir uyum içinde olduğunu ve üç boyutlu VOF modelinin baraj yıkılması kaynaklı dalganın neden olduğu etkiyi belirlemede kullanılabileceğini bildirmişlerdir. Al-Faesly vd., (2012) üç farklı rezervuar su seviyesinde ıslak ve kuru mansap yatağında ilerleyen baraj yıkılması kaynaklı dalganın yapısal modellerle (kare ve silindir) olan etkileşimini araştırmışlardır. Çalışmalarında dalga yükseklikleri ve hızlarını, yapılara etkiyen kuvveti, kare yapının ön yüzünde farklı konumlardaki basınç değişimini ve farklı şekillerde oluşturulan koruma duvarlarının etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre; rezervuar su seviyesi arttıkça dalga yüksekliği ve hızının arttığını, yüksekliği daha fazla olan dalganın yapısal modeller üzerinde daha büyük kuvvetler oluşturduğunu, kare yapının ön yüzündeki en büyük basıncın tabana en yakın ölçüm noktasında meydana geldiğini ve tabandan itibaren yukarıya doğru ilk beş basınç ölçüm sensöründe basınçta ani bir artış olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca koruma duvarlarının yüksekliği, eğim açısı, konumu ve yüzey şeklinin tsunami kaynaklı kuvvet ve devrilme momentleri üzerinde etkili olduğunu ve bazı durumlarda yapıya etkiyen kuvvet ve momenti azaltılabileceğini bildirmişlerdir. Lobovský vd., (2014) kuru mansap yatağında ve yatay bir kanalda tam baraj yıkılması problemini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında baraj yıkılması kaynaklı şok dalgasına ait su yüzü profilini, belli noktalardaki akım derinliklerinin zamansal değişimini ve şok dalgasının düşey bir duvar üzerinde beş farklı

noktada oluşturduğu basıncı deneysel olarak incelemişler ve hesaplamalı modellerin doğrulanması için kapsamlı bir veri seti sağlamışlardır. Deneysel çalışmalarını iki farklı rezervuar su seviyesi için yürütmüşler ve basınç ölçümlerinde basınç ölçüm sensörleri ile yüksek örnekleme hızına sahip veri toplama sistemlerini kullanmışlardır. Ayrıca su yüzü profillerini izlemek için yüksek hızlı kameralardan yararlanmışlardır. Çalışmalarının sonucunda, maksimum çarpma basıncının beklendiği üzere duvarın en altında bulunan sensörde meydana geldiğini ve duvarın üst kısmına doğru gidildikçe maksimum çarpma basıncının azaldığını tespit etmişlerdir. Bununla birlikte rezervuar su seviyesi ve çarpma basıncı arasında tabanda bulunan sensör hariç doğrusal bir orantı olmadığını belirtmişlerdir. Aureli vd., (2015) baraj yıkılması mekanizması ile elde ettikleri şok dalgasının geçirimsiz/katı bir engele çarpmasıyla oluşan kuvveti deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır. Deneysel çalışmalarında engele etkiyen çarpma kuvvetini yük hücresi yardımıyla ölçmüşler, sayısal modelleme çalışmalarında ise iki boyutlu sığ su modeli ile üç boyutlu SPH ve Euler modellerini kullanmışlardır. Çalışmalarının sonucunda maksimum çarpma kuvveti ile rezervuar su seviyesi arasında ikinci dereceden bir ilişki olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca üç boyutlu modellerin iki boyutlu modele nazaran çarpma kuvvetini daha iyi tahmin ettiğini fakat hesaplama maliyetlerinin daha fazla olduğunu bildirmişlerdir. Wei vd., (2015) kare, dairesel ve elmas (45^0 döndürülmüş) enkesitli köprü ayaklarına etkiyen çarpma kuvvetini ve su yüzü profillerini SPH yöntemiyle sayısal olarak araştırmışlardır. Çalışmalarında, tsunami dalgasını ıslak mansap yatağı üzerinde baraj yıkılması mekanizmasıyla üretmişlerdir. Araştırmalarının sonucunda; SPH modelinin tsunami-köprü ayağı etkileşimini modellemede iyi bir araç olduğunu, kare enkesitli köprü ayağının en yüksek, elmas enkesitli köprü ayağının ise en düşük çarpma kuvvetine maruz kaldığını tespit etmişlerdir. Ayrıca köprü ayağı genişliğinin kanal genişliğine olan oranı arttıkça blokajdan kaynaklanan kuvvetin de arttığını belirtmişlerdir. Arimitsu ve Kawasaki (2016) yapının membaındaki akım derinliği ve yatay akım hızını kullanarak tsunami dalgası tarafından bir yapı üzerinde oluşan basıncı tahmin etmek için iki boyutlu sayısal bir model önermişlerdir. Önerdikleri modelin doğruluğunu iki farklı laboratuvar deneyi (baraj yıkılması ve soliter (tekil) dalga deneyleri) ile test etmişlerdir. Deneysel veriler ve sayısal sonuçları karşılaştırıldığında modellerinin yapıya uygulanan maksimum tsunami dalga basıncının düşey dağılımını makul bir şekilde yeniden üretebildiğini ifade etmişlerdir. Shafiei vd., (2016) baraj yıkılması benzeri bir mekanizma ile ürettikleri tsunami dalgasının altı farklı açıda (0^0 , 30^0 , 45^0 , 60^0 , 90^0 ve 135^0) yerleştirilmiş kare yapı üzerinde oluşturduğu basınç, çarpma

kuvveti, dalga yükseklikleri ve hızlarını farklı rezervuar su seviyelerinde ölçmüşlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre, ilk çarpma anında 0^0 açığa sahip yapının en büyük çarpma kuvvetine sebep olduğunu ve bu kuvvetin diğer açılara göre yaklaşık 15ms daha uzun süreyle etkili olduğunu, en az çarpma kuvvetinin ise 45^0 açıyla yerleştirilmiş yapıda meydana geldiğini bildirmişlerdir. Aynı zamanda yapının 0^0 , 30^0 , 45^0 lik açılarda yerleştirildiği durumlar için sırasıyla 1.65, 1.40 ve 1.15 direnç katsayılarını önermişlerdir. Wüthrich vd., (2018b) binalardaki boşlukların kuru ve ıslak mansap yatağında ilerleyen şok dalgasının olumsuz etkisini ne kadar azalttığı üzerine odaklanmışlardır. Çalışmalarında farklı boşluk oranlarına sahip binalar kullanarak bu binalara etkiyen çarpma kuvveti ve eğilme momentlerini incelemişlerdir. Boşluklar nedeniyle binanın membaında su derinliklerinin azaldığını ve boşluksuz bina ile karşılaştırıldığında bina üzerine etkiyen maksimum kuvvette azalma olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca maksimum yatay kuvvetin, bina olmadan ölçülen maksimum dalga yüksekliğinin 2/3'ünden daha fazla bir dalga yüksekliğinde oluştuğunu belirtmişlerdir. Ayrıca boşluklu binalarda ıslak mansap yatağında maksimum kuvvetin, kuru mansap yatağına göre daha önce meydana geldiğini bildirmişlerdir. Mokhtar vd., (2019) farklı rezervuar su seviyelerinde ve ıslak mansap yatağında tsunami dalgasının gözenekli bir deniz duvarı üzerinde oluşturduğu basıncı deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmalarında baraj yıkılması mekanizmasını kullanarak çeşitli yükseklik ve hızlarda tsunami dalgaları üretmişler ve ön yüzü %20 gözenekliliğe sahip arka yüzü ise gözeneksiz olan bir deniz duvarı kullanmışlardır. Kullandıkları deniz duvarının arka yüzü üzerine farklı yüksekliklerde basınç ölçüm sensörleri yerleştirilerek farklı noktalarda basınç ölçümleri almışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre tüm sensörlerde ilk çarpma anında ani ve kısa süreli maksimum basınçlar gözlemlenmişler ve deniz duvarı üzerindeki konumlarına göre ölçüm sensörlerinin kaydettikleri basınç değerlerinin değiştiğini belirtmişlerdir. Buna göre tabana en yakın sensörde en yüksek, diğer sensörlerde ise yukarı doğru gidildikçe basınç değerlerinin azaldığını tespit etmişlerdir. Ayrıca çoklu regresyon analizini kullanılarak gözenekli bir deniz duvarındaki maksimum basıncı tahmin etmek için ampirik bir denklem önermişlerdir. Shen vd., (2020) baraj yıkılması kaynaklı şok dalgasının düşey bir duvar üzerinde farklı noktalarda oluşturdukları basıncın zamanla değişimini incelemişler ve deneysel ölçümlerinde basınç sensörlerinden faydalanmışlardır. Çalışmalarında, düşey duvarı alt çarpma bölgesi ve üst dış bölge olarak ikiye ayırmışlar, şok dalgasının duvar üzerinde oluşturduğu basınç zaman grafiklerini ise ilk çarpma (initial impact), yansıma (reflection) ve ikinci çarpma (second impact)

aşamaları olarak sınıflandırmışlardır. İlk çarpma bölgesinde duvarın alt kısmında bulunan üç sensördeki maksimum basınç değerlerinin, Mokhtar vd., (2019)'nin çalışmasında olduğu gibi en alttaki sensörde en yüksek ve yukarı doğru gidildikçe azaldığını tespit etmişlerdir. Duvarın üst dış bölgesinde bulunan basınç ölçüm sensörlerinde ölçülen basınçların ise oldukça düşük düzeyde kaldığını belirtmişlerdir. Ayrıca hem ilk çarpma hem de ikinci çarpma aşamasında duvara uygulanan toplam kuvvette asıl olarak alt çarpma bölgesi etkiliyken, yansıma aşamasında alt çarpma bölgesi ve üst dış bölgenin toplam kuvvet üzerinde etkili olduğunu açıklamışlardır. Wüthrich vd., (2020) klasik bir baraj yıkılmasına benzer olarak ürettikleri dalganın kuru ve ıslak mansap yatağında bulunan bir bina üzerindeki çarpma etkisini farklı rezervuar su seviyeleri ve kuyruk suyu derinlikleri için deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmalarında iki farklı bina yüksekliği (30 cm ve 60 cm) kullanarak dalganın bina üzerinden aşması ve aşmaması durumlarında binaya etkileyen çarpma kuvveti ve momenti incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre; aşma durumunda binaya etkileyen yatay kuvvetlerin daha az olduğunu ve bunun binanın memba ve mansap kısımları arasındaki su derinliği farkının daha küçük olmasından kaynaklandığını bildirmişlerdir. Ayrıca ıslak mansap yatağında aşma olması durumunda maksimum kuvvetin daha erken oluştuğunu ve aşma olmaması durumunda ıslak mansap yatağında çarpma anında daha büyük yatay kuvvetin meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Yu vd., (2020) baraj yıkılması sonucu oluşan taşkın dalgasının binalar üzerindeki etkisini üç boyutlu olarak modellemek amacıyla VOF ve Immersed Boundary (IB) yöntemlerinin birlikte kullanıldığı sayısal bir model geliştirilmişlerdir. VOF yöntemini su/hava ara yüzünü izlemek, IB yöntemini ise su/yapı etkileşimini simüle etmek amacıyla kullanmışlardır. Modellerini Soares-Frazão ve Zech (2008)'nin farklı noktalardaki akım seviyesinin zamansal değişimlerine ait deneysel sonuçlarıyla karşılaştırarak doğrulamışlardır. VOF/IB yöntemini kullanan modellerinin dalga kırılması ve binalara çarpma gibi karmaşık akım davranışlarını yeterli doğrulukta üretebildiğini ve kuyruk suyu derinliklerinin bina üzerindeki çarpma kuvvetlerini önemli ölçüde etkilediğini ifade etmişlerdir. Hien ve Van Chien (2021) kısmi baraj yıkılması sonucu oluşan şok dalgasının bir grup binayla olan etkileşimini iki ve üç boyutlu sayısal modellerle incelemişlerdir. İki boyutlu modellerinde sığ su denklemlerini sonlu hacimler yöntemiyle çözen bir model kullanmışlar, üç boyutlu modellerinde ise Renormalization Group (RNG) ve LES türbülans kapatma modelleriyle Flow-3D yazılımından yararlanmışlardır. Çalışmalarının sonucunda, bina üzerine etkileyen çarpma kuvvetini üç boyutlu modellerin iki boyutlu modellere kıyasla daha doğru tahmin ettiğini, rezervuar su seviyesi ve kısmi açıklığın

kuvvet şiddeti üzerinde etkili olduğunu, akım hızı, akım derinliği ve dolayısıyla Froude sayısının yapılar üzerindeki çarpma kuvvetini belirlemede önemli bir rol oynadığını bildirmişlerdir. Peng vd., (2021) farklı rezervuar derinliklerinde baraj yıkılması problemini sayısal olarak araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada kanalın mansabına rezervuardan 3 m uzaklığa 0.74x0.69x0.52 m boyutlarında bir yapı konumlandırmışlar ve bu yapının belirli noktalarındaki basınçların zamanla değişimini, rezervuar su seviyesinin maksimum basınç üzerindeki etkisini ve taşkın dalgasının yayılımını incelemişlerdir. Yapının memba ve mansap kesitlerinde su yüzeyi profillerinin tamamen farklı olduğunu, taşkın dalgası yapıyla ilk temas ettiğinde yapının büyük bir anlık darbe basıncına maruz kaldığını ve bu basıncın değerinin ilk çarpmadan sonraki maksimum basıncın 1.5–3.0 katına ulaşabileceğini ifade etmişlerdir. Takagi ve Furukawa (2021) baraj gövdesini temsil eden kapağın açılma hızının 0.20 ile 2.50 m/s aralığında değiştiği 290 adet deneysel çalışma yürütmüşlerdir. Çalışmalarında kapak açılma hızı ile kanal tabanına gömülü olarak yerleştirdikleri 4 adet basınç ölçüm sensörünün verilerini karşılaştırarak kapağın açılma hızının taban basıncı üzerindeki etkisini deneysel ve istatistiksel olarak test etmişlerdir. Kapağın açılma süresini yüksek hızlı bir kamera ile izlemişler ve elde ettikleri bulgulara göre maksimum basıncın istatistiksel değişkenliğinin kapağa en yakın sensörde en yüksek, en uzak sensörde ise en düşük olduğunu ifade etmişlerdir. Bahsedilen istatistiksel değişkenliğin kapak açılma hızına bağlı olduğunu, açılma hızı arttıkça kapak yakınındaki sensörde maksimum basıncın arttığını ve belirsizliğin (değişkenliğin) büyüüğünü, dalga mansaba doğru ilerledikçe basıncın ve belirsizliğin azaldığını bildirmişlerdir. Xu vd., (2021a) çeşitli engel durumları için SPH modelini kullanarak üç boyutlu baraj yıkılması problemini modellemişlerdir. Çalışmalarında, çeşitli eğim açılara sahip (60^0 , 45^0 , 30^0) eğik ve farklı yay açılara sahip (90^0 , 60^0 , 45^0) kavisli engeller kullanarak baraj yıkılması sonucu oluşan taşkın şok dalgasının engellerin belli noktalarında oluşturduğu basınçları ölçmüşlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre; baraj yıkılması gibi üç boyutlu karmaşık akımları SPH yönteminin başarılı şekilde modelleyebildiğini, 60^0 yay açısına sahip engelin çarpma kuvvetini azaltmak için en uygun engel şekli olduğunu ve bu engelde ölçülen maksimum basıncın dik açılı engele kıyasla %40 daha az olduğunu ifade etmişlerdir. Watanabe vd., (2021) tam baraj yıkılması olayında düşey bir silindir kolon ile taşkın şok dalgasının etkileşimini Lattice Boltzmann metodunu kullanarak incelemişlerdir. Deneysel çalışmalar ve LBM sayısal modellerinden elde olunan bulgulara göre hem serbest su yüzü profillerinin hem de darbe basınçlarının birbirine yakın olduğunu bildirmişlerdir. Garoosi vd., (2022) kuru ve ıslak

mansap yatağında baraj yıkılması problemini deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmalarında, su yüzü profilini ve kanal sonundaki düşey duvar üzerine farklı noktalarda etkiyen basınçları sırasıyla yüksek hızlı kameralar ve basınç ölçüm sensörleri yardımıyla elde etmişlerdir. Bununla birlikte, mansapta tanımladıkları beş ölçüm noktasındaki akım derinliklerini görüntü işleme tekniğiyle belirlemişlerdir. Ayrıca duvar üzerinde farklı noktalarda oluşan basınç değişimlerini ve dalga önü su yüzü profilinin değişimini incelemişlerdir. Deneysel ölçümlerin tekrarlanabilirliğini ve güvenilirliğini gösterebilmek için Eulerian ve Lagrange yaklaşımlarına dayanan iki farklı yöntem (VOF ve MPS) kullanmışlardır. Her iki yöntemin de basıncın ve su yüzü profilinin zamansal değişimini yeterli doğrulukta tahmin edebildiğini fakat Moving Particle Semi-Implicit (MPS)'nin genel olarak VOF yönteminden daha iyi bir performans gösterdiğini bildirmişlerdir. Ayrıca ıslak mansap yatağı durumunda duvar üzerinde oluşan darbe basıncının büyüklüğünün kuru mansap yatağına kıyasla daha düşük olduğunu tespit etmişlerdir. Deneysel çalışmalarından elde ettikleri veri setinin sayısal çalışmaların doğrulanmasında ve baraj yıkılması veya benzeri olayların karmaşık fiziğini anlamada referans olarak kullanılabileceğini ifade etmişlerdir. Dumergue ve Abadie (2022) ıslak mansap yatağında baraj yıkılması sonucu oluşan dalganın farklı konumlara yerleştirilen engel üzerindeki etkilerini, sabit rezervuar seviyesi ve farklı kuyruk suyu derinliklerinde sayısal olarak incelemişlerdir. Sayısal çalışmalarında çok fazlı Navier-Stokes denklemlerine dayanan ve VOF yöntemiyle çalışan bir model kullanmışlardır. Elde ettikleri sonuçlar açısından çarpma etkilerini farklı şekillerde sınıflandırmışlar ve maksimum çarpma basıncının 10.36 kPa olarak tespit etmişlerdir. Ayrıca ıslak mansap yatağında ilerleyen baraj yıkılması akımlarıyla kısa sürede güçlü dalga çarpmaları üretmenin mümkün olduğunu belirtmişlerdir. Yang vd., (2022b) kuru ve ıslak mansap yatağında baraj yıkılması problemini incelemişlerdir. Çalışmalarında baraj yıkılması kaynaklı dalganın dairesel bir köprü ayağı üzerinde oluşturduğu basınç ve kuvvetleri araştırmışlardır. Araştırmalarının sonucunda dairesel ayağın ön tarafında ani basınç artışlarının, arka tarafında salınımlı basınç değişimlerinin ve yan taraflarında ise negatif basınçların oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Islak mansap yatağında kuvvet ve momentumun maksimum değerlerinin çoğunlukla impuls aşamasında oluştuğunu, kuru mansap yatağında ise belirgin bir tepe noktasının oluşmadığını açıklamışlardır. Zhu vd., (2022) baraj yıkılması kaynaklı taşkın dalgasının farklı boşluk (kapı ve pencere) oranlarına sahip binalar üzerinde meydana getirdiği basınç ve çarpma kuvvetlerini Ansys Fluent ticari paket programını kullanarak sayısal olarak elde etmişlerdir. Çalışmalarının

sonucunda yapı üzerine etkiyen çarpma kuvvetinin ön ve arka kapı boşluklarıyla, yanal kuvvetlerin ise yan pencere konum ve boyutlarıyla ilişkili olduğunu ifade etmişler. Ön ve arka kapı boşluklarının artmasının çarpma kuvvetini, pencere boşluklarının artmasının ise yanal kuvvetleri azalttığını bildirmişlerdir. Mu vd., (2023) baraj yıkılması kaynaklı şok dalgasının farklı açılarda yerleştirilmiş kare ve silindir yapılar üzerindeki toplam çarpma kuvvetini yapısal geometri ve çarpma açısını dikkate alarak OpenFOAM’da sayısal olarak incelemişlerdir. Araştırmalarının neticesinde kare yapı üzerine etkiyen toplam kuvvetin, silindir yapıya etkiyen kuvvetin yaklaşık iki katı olduğunu tespit etmişlerdir. Bununla birlikte akım alanını yakından inceleyerek silindir yapıdaki akış ayrılması biçiminin basınç alanını ve toplam kuvveti belirlemede önemli olduğunu belirtmişlerdir. Peng vd (2023) literatürde yer alan üç farklı baraj yıkılması deneyi için akım derinliği ile yapı üzerine etkiyen basınç ve kuvveti, farklı türbülans kapatma modellerini (standart k- ϵ , RNG k- ϵ ve LES) kullanarak Flow-3D’de yaptıkları sayısal benzeşim çalışmaları ile araştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlar açısından tüm simülasyonlarda türbülans modellerinin birbirlerine çok yakın sonuçlar ürettiğini belirtmişlerdir. Bununla birlikte tam baraj yıkılması kaynaklı dalganın düşey bir duvar üzerinde oluşturduğu basınç ve akım derinliğini LES modelinin, bir engel üzerinde oluşturduğu basınç ve akım derinliğini standart k- ϵ modelinin ve kısmi yıkılma sonucu oluşan dalganın engel üzerindeki çarpma kuvvetini yine standart k- ϵ modelinin tahmin etmede diğer modellere göre daha iyi olduğunu bildirmişlerdir. Zhen vd., (2023) salınımlı tip bir kapak açılma mekanizması kullanarak baraj yıkılması sonucu oluşan taşkın şok dalgasının farklı tipteki binalar üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında üç farklı rezervuar su seviyesinde %0 ile %35 arasında değişen bina boşlukları ve 0^0 ile 90^0 arasında değişen bina duruş açıları için çarpma kuvvetleri ve devrilme momentlerini araştırmışlardır. Deneysel çalışmalarını sayısallaştırmak için dalga ölçer, hız ölçer ve dinamometreden yararlanmışlardır. Çalışmalarının sonucunda binadaki boşlukların veya binanın akım doğrultusu ile yapmış olduğu açının çarpma kuvveti ve moment üzerinde azaltıcı bir etkiye sahip olduğunu ve bu etkinin büyüklüğünün taşkın şiddetiyle ters orantılı olduğunu ifade etmişlerdir. Erduran vd., (2024b) baraj yıkılması sonucu oluşan taşkın şok dalgasının bir kıyı yapısı üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında değişen rezervuar su seviyeleri ile birlikte yapının hem yataydaki hem de düşeydeki konumunu değiştirerek yapı üzerine etkiyen yatay çarpma kuvvetinin düşey ve yatay doğrultuda nasıl değişim gösterdiğini yük hücresi yardımıyla ölçmüşlerdir. Çarpma anındaki akım derinliğini ise görüntü işleme tekniği ile elde etmişlerdir. Rezervuar su

seviyesi arttıkça yapı üzerine etkiyen derinlik ortalamalı kuvvetin arttığını ve bu kuvvetin yapı kapaktan uzaklaştıkça sürtünme etkisi nedeniyle azaldığını belirtmişler. Ayrıca yine rezervuar su seviyesi arttıkça kuvvet şiddetinin arttığını, bununla birlikte kuvvet şiddetinin yapı konumundan önemli ölçüde etkilenmediğini bildirmişlerdir. Del Gaudio vd., (2024) bir, iki ve üç boyutlu nümerik modeller kullanarak baraj yıkılması kaynaklı dalganın kanal sonunda bulunan düşey bir duvar üzerinde oluşturduğu basınç ve çarpma kuvvetini incelemişlerdir. Navier-Stokes üç boyutlu modelinin diğer modellere nazaran hesaplama açısından daha maliyetli olduğunu fakat su yüzü profilinin değişimini, basınç dağılımını ve duvar üzerinde oluşan çarpma kuvvetini daha doğru şekilde üretebildiğini belirtmişlerdir. Kim vd., (2024) farklı rezervuar su seviyelerinde baraj yıkılması sonucu meydana gelen akımının kinematiği ve basınç özellikleri üzerine deneysel çalışmalar yürütmüşlerdir. Kinematik çalışmalarda dalga önü su yüzü ve hız profillerini incelemişler ve bunun için parçacık görüntülemeli hız ölçüm tekniğini kullanmışlardır. Basınç dağılımını belirlemek için ise, kanal sonundaki düşey duvara ve kanal tabanına basınç ölçüm sensörleri yerleştirmişlerdir. Duvar ve tabanda ölçtükleri basınçları; çarpma, tırmanma, devrilme (geri dönme) ve yere düşme (touchdown) olmak üzere dört kısma ayırmışlardır. Çalışmalarının sonucunda Mokhtar vd., (2019) ve Shen vd., (2020)'nin çalışmalarında olduğu gibi, maksimum basıncın duvarın en alt kısmındaki sensörde en yüksek, duvarın üst kısımlarında yer alan sensörlerde ise giderek azaldığını ve en üst noktadaki sensörde en düşük olduğunu tespit etmişlerdir. Kanal tabanında ölçtükleri basınçların ise hidrostatik basınç nedeniyle devrilme aşamasına kadar kademeli bir artış gösterdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca duvara çarpma fazında, duvar ve kanal tabanın köşeleri etrafında ölçülen basınçların hidrostatik basınçtan 4 ile 6 kat arasında daha fazla olduğunu bildirmişlerdir. Erduran vd., (2025) farklı rezervuar su seviyelerinde ve kuru mansap yatağında, baraj yıkılmasıyla oluşan şok dalgasının neden olduğu yatay çarpma kuvveti üzerinde köprü ayağı şeklinin etkisini deneysel olarak incelenmişlerdir. Deneysel çalışmalarında akım derinliğinin zamansal değişimini görüntü işleme tekniğini kullanarak elde etmişler ve kuvvet ölçümünde ise yük hücresinden yararlanmışlardır. Farklı geometrilerdeki yedi adet köprü ayağının performansını yapı stabilitesi açısından önemli olan maksimum kuvvet, maksimum kuvvetin oluşma zamanı ve belli bir zaman süresince kuvvetin değişiminden elde olunan kuvvet şiddeti parametrelerini kullanarak araştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre; tüm rezervuar su seviyelerinde dikdörtgen ve kare köprü ayaklarının daha yüksek çarpma kuvveti oluşturduğunu, memba ve mansap yüzü üçgen enkesitli olan (ogival) köprü ayağının ise daha düşük çarpma kuvvetine neden

olduğunu tespit etmişlerdir. Bununla birlikte dikdörtgen köprü ayağına etkiyen kuvvet şiddetinin en yüksek ve ogival köprü ayağına etkiyen kuvvet şiddetinin en düşük olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca kuvvet şiddetine benzer şekilde dikdörtgen köprü ayağının en fazla, ogival köprü ayağının ise en düşük toplam impulse maruz kaldığını ifade etmişlerdir. Burada bahsedilen şok dalgasının yıkıcı etkilerinin araştırıldığı çalışmalar Çizelge 2.2’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Çizelge 2.2. Baraj yıkılması kaynaklı taşkın şok dalgasının yıkıcı etkilerinin araştırıldığı çalışmalar

Yazar(lar)	Yıl	Kanal Boyutları (m) L x W x H	Yıkılma Türü	Kanal Eğimi	Mansap Özelliği	Mansapta Engel Durumu	Deneysel Ölçüm Tekniği	Sayısal Model	Analitik / Teorik Çözüm	Araştırılan Parametre
Ramsden	1996	36.6x0.396x0.61	Tam	Yatay	Kuru ve Islak	Kanal Sonunda Düşey Duvar	Video kayıtları Kuvvet ve Basınç dönüştürücüler	-	-	Duvar Üzerine Etkiyen Kuvvet ve Basınç
Shige-eda ve Akiyama	2003	4.72 x 3.0 x 1.0	Kısmi	Yatay	Kuru	Kare Yapı	Video kayıtları Parçacık Görüntülemeli Hız Yük Hücresi	Sonlu Hacim Metoduna Dayalı Bir Model	-	Su Yüzü Profilinin Değişimi, Yayılım Hızları Kuvvetler
Arnason vd.,	2009	16.6x0.6x0x45	Tam	Yatay	Islak	Kare ve Dairesel Kolon	LIF LDV DPIV Yük Hücresi	-	-	Su Yüzü Profili ve Hızın Değişimi, Kuvvet
Lukkunaprasit vd.,	2009	40.0x1.0x1.0	Tam	Yatay	Kuru	Eğimli Kıyı Üzerinde Bulunan Kübik Bina Modeli	Dalga Ölçerler Hız Ölçer Yük Hücresi	-	-	Su Yüzü Profilinin ve Hızın Değişimi Kuvvet
Nistor vd.,	2009	10.0x2.7x1.4	Tam	Yatay	Kuru	Kare, Dairesel ve Elmas Başlıklı Yapılar	ADV Dalga Ölçerler Basınç Dönüştürücüler Dinamometre Yük Hücresi	-	-	Basınç ve Kuvvet
Nouri vd.,	2010	10.6x2.7x1.4	Tam	Yatay	Kuru	Kare ve Silindir Yapılar	Dalga Ölçerler Basınç Dönüştürücüler Dinamometre Yük Hücresi	-	-	Şok Dalgası Yüksekliği, Basınç ve Kuvvet
Yang vd.,	2010	7.0.x0.3x0.5	Tam	Yatay	Kuru	Dikdörtgen Engel	Dinamometre	VOF Yöntemini Kullanan 3B Bir Model	-	Engel Üzerine Etkiyen Kuvvet
Al-Faesly vd.,	2012	14.56x2.70x1.4	Tam	Yatay	Kuru ve Islak	Kare ve Silindir Yapılar	Yük Hücresi LVDT Basınç Dönüştürücüler Dalga Ölçerler	-	FEMA P646 SMBTR	Şok Dalgası Yüksekliği, Basınç ve Kuvvet

Çizelge 2.2. (Devam) Baraj yıkılması kaynaklı taşkın şok dalgasının yıkıcı etkilerinin araştırıldığı çalışmalar

Yazar(lar)	Yıl	Kanal Boyutları (m) L x W x H	Yıkılma Türü	Kanal Eğimi	Mansap Özelliği	Mansapta Engel Durumu	Deneysel Ölçüm Tekniği	Sayısal Model	Analitik / Teorik Çözüm	Araştırılan Parametre
Lobovský vd.,	2014	1.61x0.15x0.6	Tam	Yatay	Kuru	Kanal Sonunda Düşey Duvar	Video Kayıtları, Görüntü İşleme, Basınç Dönüştürücüler	-	-	Su Yüzünün ve Akım Derinliklerinin Değişimi Basınç
Aureli vd.,	2015	2.6x1.2	Kısmi	Yatay	Kuru	Dikdörtgen Engel	Yük Hücresi	2B ve 3B Modeller	-	Engel Üzerine Etkiyen Çarpma Kuvveti
Wei vd.,	2015	16.6x0.6x0.45	Tam	Yatay	Islak	Dairesel, Kare ve 45° açılı Kare Köprü Ayağı	-	SPH	-	Köprü Ayaklarına Etkiyen Tsunami Kuvveti
Arimitsu ve Kawasaki	2016	18x0.5x0.5	Tam	Yatay	Islak	Düşey Duvar ve Dikdörtgen Yapı	Dalga Ölçer, Basınç Ölçerler, Muline	2B Derinlik Ortalamalı Nümerik Model	-	Akım Derinliği ve Basınç
Shafiei vd.,	2016	14x1x2x0x8	Tam	Yatay	Kuru	Farklı açılarda duran kare yapı	Basınç Sensörleri, Yük Hücresi	-	-	Şok Dalgası Akım Derinliği, Basınç ve Kuvvet
Wüthrich vd.,	2018b	15.5x1.4	Tam	Yatay	Kuru ve ıslak	Boşluklu ve Boşluksuz Binalar	Ultrasonik Mesafe Sensörleri, Kuvvet Plakası	-	-	Boşluklu ve Boşluksuz Binalara Etkiyen Yatay Kuvvetler
Mohktar vd.,	2019	100x1.5x2.0	Tam	Yatay	Islak	Gözenekli Deniz Duvarı	Dalga Ölçer, Basınç Ölçerler ADV	-	-	Akım Derinliği ve Basınç
Shen vd.,	2020	4x0.4x0.4	Tam	Yatay	Kuru	Düşey Duvar	Dalga Ölçer, Basınç Dönüştürücüler, Video Kayıtları	-	-	Akım Derinliği Basınç ve Kuvvet
Wüthrich vd.,	2020	15.5x1.4	Tam	Yatay	Kuru ve ıslak	Dikdörtgen Bina	Ultrasonik Sensörler, Kuvvet Plakası	-	-	Bina Üzerine Etkiyen Kuvvet ve Moment
Yu vd.,	2020	35.8x3.6x1.0	Kısmi	Yatay	Kuru	Eşit Aralıklarla Dizilmiş Kare Binalar	-	3B Hidrodinamik Bir Model	-	Çarpma Kuvveti

Çizelge 2.2. (Devam) Baraj yıkılması kaynaklı taşkın şok dalgasının yıkıcı etkilerinin araştırıldığı çalışmalar

Yazar(lar)	Yıl	Kanal Boyutları (m) L x W x H	Yıkılma Türü	Kanal Eğimi	Mansap Özelliği	Mansapta Engel Durumu	Deneysel Ölçüm Tekniği	Sayısal Model	Analitik / Teorik Çözüm	Araştırılan Parametre
Hien ve Van Chien	2021	2.6x1.2x0.3	Kısmi	Yatay	Kuru	Katı Dikdörtgen Engel	-	Flow-3D	Sonlu Hacimler	Yapıya Etki Eden Çarpma Kuvveti
Peng vd.,	2021	14.0x1.5x1.8	Tam	Yatay	Kuru	Dikdörtgen Yapı	-	-	Sonlu Hacimler Euler yöntemi	Yapı Üzerine Etkiyen Basınçlar ve Rezervuar Su Seviyesinin Maksimum Basınç Üzerindeki Etkisi
Takagi ve Furukawa	2021	3.0x0.38x0.6	Tam	Yatay	Kuru	-	Yüksek Hızlı Kameralar ve Basınç Ölçüm Sensörleri	-	-	Maksimum Basınç
Watanabe vd.,	2021	0.8x0.6x0.2	Tam	Yatay	Kuru	Kare ve Dairesel Silindir	-	-	LBM	Su Yüzü Profilleri ve Çarpma Basınçları
Xu vd.,	2021a	1.18x0.68x1.2	Tam	Yatay	Kuru	Eğik ve Kavisli Engeller	Basınç Ölçüm Sensörleri	SPH	-	Engel Üzerinde Belli Noktalardaki Basınçlar
Garoosi vd.,	2022	0.7x0.4x0.3	Tam	Yatay	Kuru ve Islak	Kanal Sonunda Düşey Duvar	Basınç Ölçüm Sensörleri	-	-	Düşey Duvar Üzerindeki Farklı Noktalara Etkiyen Basınçlar
Dumergue ve Abadie	2022	2.38x0.3	Tam	Yatay	Islak	Dikdörtgen Engel	-	-	Navier-Stokes VOF model	Basınç
Yang vd.,	2022b	10.72x1.485x0.60	Tam	Yatay	Kuru ve Islak	Dairesel Köprü Ayağı	Basınç Ölçüm Sensörleri Yük Hücresi	-	-	Basınç, Kuvvet ve Momentler
Zhu vd.,	2022	17x5x1.5	Tam	Yatay	Kuru	Farklı Boşluk Oranlarına Sahip Binalar	-	Ansys Fluent	-	Boşluklu Binalara Etkiyen Basınç ve Kuvvet
Mu vd.,	2023	0.8x0.2x0.6	Tam	Yatay	Kuru	Farklı Açılarda Yerleştirilmiş Kare ve Silindir Yapı	-	OpenFOAM	-	Yapılar Üzerine Etkiyen Basınç

Çizelge 2.2. (Devam) Baraj yıkılması kaynaklı taşkın şok dalgasının yıkıcı etkilerinin araştırıldığı çalışmalar

Yazar(lar)	Yıl	Kanal Boyutları (m) L x W x H	Yıkılma Türü	Kanal Eğimi	Mansap Özelliği	Mansapta Engel Durumu	Deneyisel Ölçüm Tekniği	Sayısal Model	Analitik / Teorik Çözüm	Araştırılan Parametre
Peng vd.,	2023	3.22x1.0 x1.8 3.22x1.0x1.0 2.60x1.20	Tam ve Kısmi	Yatay	Kuru	Kanal Sonunda Duvar ve Dikdörtgen Engeller	Yük Hücresi	Flow-3D	-	Akım Derinliğinin Değişimi, Çarpma Kuvveti
Zhen vd.,	2023	16.3x0.8x1.25	Tam	Yatay	Kuru	Boşluklu ve Boşluksuz Binalar	Dalga Ölçer ADV Dinamometre	-	-	Boşluklu ve Boşluksuz Binalara Etkiyen Kuvvet ve Devrilme Momenti
Erduran vd.,	2024b	10x0.309x0.5	Tam	Yatay	Kuru	Yatay ve Dikdörtgen Bir Kıyı Yapısı	Görüntü İşleme Tekniği Yük Hücresi	-	-	Akım Derinliğinin Değişimi ve Kuvvet
Del Gaudio vd.,	2024	2.92x0.4x0.5	Tam	Yatay	Kuru	Kanal Sonunda Düşey Duvar	Basınç ölçüm sensörleri	1B, 2B ve 3B nümerik modeller	-	Kanal Sonunda Bulunan Düşey Duvar Üzerine Etkiyen Basınç ve Kuvvetler
Kim vd.,	2024	2.0x0.3x0.5	Tam	Yatay	Kuru	Kanal Sonunda Düşey Duvar	Parçacık Görüntülemeli Hız, Basınç Ölçüm Sensörleri	-	-	Dalga Önü Su Yüzü Profili, Hız Profilleri, Duvar ve Tabandaki Basınç Dağılımı
Erduran vd.,	2025	10.0x0.309x0.45	Tam	Yatay	Kuru	Farklı Tipte Köprü Ayakları	Video Kayıtları Yük Hücresi	2B FVSSWE Modeli	-	Ortalama Dalga Hızı, Dalga Önü Konumu ve Kuvvet

2.3 Şok Dalgasının Etkilerinin Azaltılmasına Yönelik Çalışmalar

Son yıllarda laboratuvar ortamında baraj yıkılması benzeşim modeli ile üretilen şok dalgalarının veya aynı mekanizma ile üretilen tsunami dalgalarının yıkıcı etkilerini azaltmaya yönelik yapısal önlem içeren çalışmaların ön plana çıktığı görülmektedir. Triatmadja ve Nurhasanah (2012) baraj yıkılmasını temsil eden deney düzeneği yöntemiyle ürettikleri tsunami benzeri dalgaanın boşluksuz ve farklı oranlarda boşluk içeren yapılar üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışmalarında, bu yapıları hem doğrudan tsunami dalgası etkisine maruz bırakarak hem de bu yapıların önüne yerleştirdikleri üç farklı boyuta sahip engellerle bu yapıları koruyarak yapılar üzerine etkiyen kuvveti incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre; yapıya etkiyen kuvvetin boşluk oranına, yapının önündeki engelin yapıya olan uzaklığına ve Froude sayısına bağlı olarak önemli ölçüde değiştiğini gözlemlemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda denedikleri boşluk oranları arasında maksimum boşluk oranına (%81) sahip olan yapının en fazla kuvvet azaltımı sağladığını ve yapı önünde engel olması durumunda ilk 1 saniyelik süre içinde ölçülen kuvvetlerin engelsiz duruma göre daha az olduğunu rapor etmişlerdir. Ayrıca engelin yapıya olan uzaklığı, Froude sayısı ve dalga yüksekliğine bağlı olarak belirlenen oranın 2'nin üstüne çıkması durumunda yapıya etkiyen kuvvet azaltımında önemli bir değişiklik olmadığı tespit etmişlerdir. Nurhasanah ve Triatmadja (2014) baraj yıkılması yöntemiyle ürettikleri tsunami dalgasının bir bina modeli üzerinde oluşturduğu kuvveti incelemişlerdir. Çalışmalarında bina modelini hem doğrudan tsunami dalgasına maruz bırakarak hem de farklı konumlara yerleştirilen bir deniz duvarı ile koruyarak deneysel çalışmalar yürütmüşlerdir. Deniz duvarının yüksekliğinin ve konumunun bina modeline etkiyen tsunami kuvvetinin büyüklüğü üzerindeki etkisini aratmışlar ve deniz duvarıyla korunan binadaki tsunami kuvvetini hesaplamak için basitleştirilmiş bir denklem önermişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre, tsunami kuvvetindeki azalmanın deniz duvarı yüksekliğiyle ilişkili olduğunu ve duvar yüksekliği ile tsunami dalga yüksekliği oranına (h/h_0) bağlı olarak bina üzerine etkiyen kuvvet azalmasının değiştiğini ifade etmişler. Bu oran 0.77 olduğunda kuvvetin %24-%35 aralığından azaldığını, oran 0.50 olduğunda kuvvetin %50-%60 aralığından azaldığını ve oran 0.38 olduğunda kuvvetin %75-%80 aralığında azaldığını bildirmişlerdir. Ayrıca bina deniz duvarına ne kadar yakınsa kuvvetteki azalmanın da o kadar fazla olacağını belirtmişlerdir. Rahman vd., (2014) kıyı yapıları üzerine etkiyen tsunami kaynaklı riskleri azaltmak için farklı yüksekliklerde (4 cm ve 8 cm) deniz duvarları kullanarak bir dizi

fiziksel deney yürütmüşlerdir. Deneylerinde baraj yıkılması mekanizmasını kullanarak dört farklı rezervuar su seviyesi için şok dalgası üretmişler ve deniz duvarlarını kapaktan itibaren farklı konumlara yerleştirerek bir model-yapı üzerine etkiyen kuvveti yük hücresi yardımıyla ölçmüşlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre deniz duvarlarının model-yapı üzerine etkiyen kuvveti, kanalda deniz duvarı olmaması durumuna göre önemli ölçüde azalttığını tespit etmişlerdir. Deniz duvarlarının model-yapıya en yakın olduğu konum ve 30 cm rezervuar su seviyesi için 8 cm yüksekliğindeki deniz duvarının model-yapı üzerindeki kuvveti %41 ve 4 cm yüksekliğindeki deniz duvarının ise %27 oranında azalttığını bildirmişlerdir. Aynı zamanda, deniz duvarlarının model-yapıdan uzaklaştıkça kuvvet azaltma oranlarının azaldığını ifade etmişlerdir. Rahman vd., (2017) baraj yıkılması yöntemiyle ürettikleri tsunami dalgasının olumsuz etkisini akım derinliği ve hız parametreleri açısından azaltma üzerine odaklanmışlardır. Bunun için kanal tabanına farklı boyutlarda dikdörtgen enkesitli çukurlar ve sedde inşa etmişlerdir. Deneysel olarak akım derinliği ile hız parametrelerini sırasıyla dalga ve hız ölçerler ile elde etmişler, aynı koşulları MPS yöntemini kullanarak sayısal olarak modellemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre çukur ve seddenin birlikte kullanımının tsunaminin olumsuz etkisini azaltmada etkili olduğunu bildirmişlerdir. Tar vd., (2017) petrol ve gaz tankları üzerindeki tsunami dalgasının olumsuz etkisini azaltmak için esnek çubukların kullanımının etkili olup olmadığını araştırmışlardır. Çalışmalarında, tsunami benzeri dalgayı sabit rezervuar su seviyesinde ve baraj yıkılması mekanizmasını kullanarak üretmişlerdir. Deneysel düzenekte, tank önüne üç farklı tipte, iki farklı uzunlukta ve şaşırtmalı dizilimde esnek çubuklar yerleştirilerek tanka etkiyen yatay kuvveti yük hücresi yardımıyla ölçmüşlerdir. Esnek çubukların önündeki ve arkasındaki akım hızı ile tanka etki eden yatay kuvvetleri elde etmişlerdir. Bu deneysel sonuçlara göre, esnek çubukların tank üzerine etkiyen maksimum kuvveti yaklaşık %30 ile %44 oranında azalttığını bildirmişlerdir. Moon vd., (2019) baraj yıkılması yöntemiyle ürettikleri dalga'nın büyük ölçekli pürüzlülük elemanları ile olan etkileşimini incelemişlerdir. Çalışmalarında, dikdörtgen enkesitli bir kanalın mansap bölgesinde farklı dizilimlerde bulunan yapıların/binaların oluşturduğu engelleri büyük ölçekli pürüzlü yüzeyler olarak tanımlamışlar ve bu yüzeylerden geçen su yüzü profillerini, akım hızlarını ve her bir farklı dizilim için belirledikleri bir bina üzerine etkiyen basınçların zamanla değişimini incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda, ölçüm alınan bina için maksimum memba yüzü basıncının %38 oranında azaldığını ve dalga yüksekliği arttıkça bu oranın %15'e düştüğünü bildirmişlerdir. Xu vd., (2021b) baraj yıkılması mekanizması ile ürettikleri

tsunami dalgasının düşey bir duvar üzerinde meydana getirdiği kuvveti ve momenti gözeneksiz/katı bir engelin ne derece azalttığını deneysel olarak irdelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda, engelin yeterince yüksek olmasının duvara etkiyen yatay kuvvetleri ve devrilme momentlerini önemli ölçüde azalttığını, fakat engel yüksekliğinin az olması durumunda duvar üzerine daha büyük yatay kuvvetlerin ve devrilme momentlerinin etkidiğini vurgulamışlardır. Maggi vd., (2022) baraj yıkılması mekanizmasıyla üretilen dalganın, pürüzlülük elemanları ile kaplı bir ortam üzerindeki yayılımını incelemişlerdir. Çalışmalarında şaşırtmalı dizilimde yerleştirilmiş üç farklı yüksekliğe ($R1=0.64$ cm, $R2=1.6$ cm ve $R3=2.56$ cm) sahip kare enkesitli pürüzlülük elemanlarını hem tek tip yükseklikte hem de rastgele kullanarak pürüzlü yüzeyler oluşturmuşlardır. Araştırmalarında, akım hızı ve su yüzü profilinin değişimi üzerine odaklanmışlar ve akım hızını parçacık görüntülemeli hız ölçüm tekniği ile ölçmüşlerdir. Yaptıkları analizler sonucunda, dalga önü hızının ve pürüzlülük elemanları etrafındaki/arasındaki hızın pürüzlülük elemanının yüksekliği arttıkça azaldığını vurgulamışlardır. En yüksek yatak pürüzlülüğü ile karakterize edilen R3 taban pürüzlülüğüne sahip yüzeyin, akım hızını maksimum %40 oranında azalttığını tespit etmişlerdir. Golda Percy vd., (2023) beş farklı rezervuar su seviyesinde baraj yıkılması mekanizması ile ürettikleri tsunami benzeri dalganın mansapta bulunan ve beş farklı dizilimde yerleştirilen koruyucu/tampon blok grubu ile etkileşimini sayısal olarak çalışmışlardır. Çalışmalarında koruyucu/tampon blok grubunun akım derinliği ve akım hızını azaltmadaki etkisine odaklanmışlar ve bloklara etkiyen basınç ve kuvveti incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda, akım derinliği ve momentum akısındaki maksimum yüzdelik azalmanın üç sıra halinde şaşırtmalı olarak yerleştirilen ve sıralar arasında 20 cm boşluk bulunan (makalede C5 olarak tanımlanan) dizilimde gerçekleştiğini tespit etmişlerdir. Akım derinliğindeki maksimum yüzdelik azalmanın %10 ile %40 arasında ve momentum akısındaki maksimum yüzdelik azalmanın ise %15 ile %65 arasında değiştiğini bildirmişlerdir. Bununla birlikte bahsedilen diziliminin tsunami dalgasını geciktirmede en iyi dizilim olduğu ifade etmişlerdir. Mahmoud ve Uchida (2024) sabit yoğunluk ve dizilimlerdeki bitki örtüsüyle kaplı farklı yüzey uzunluklarının, ıslak mansap yatağında baraj yıkılması sonucu oluşan taşkın dalgasının yayılımı üzerindeki etkisini dalga yükseklikleri ve dalga yayılım hızlarının değişimi açısından incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre, bitki örtüsünün dalga yüksekliği ve dalga yayılma hızında azalmaya neden olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca bitki örtüsüyle kaplı yüzey uzunluğunun artırılmasının, mansaba doğru ilerleyen şok dalgası

yüksekliğini önemli ölçüde azalttığını fakat membaya doğru ilerleyen seyreltme dalgası yüksekliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığını tespit etmişlerdir. Alijani vd., (2025), baraj yıkılması probleminde gözenekli ortam ve yatak eğiminin model-yapı üzerindeki kuvveti nasıl etkilediğini sayısal olarak araştırmışlardır. Çalışmalarında, hem farklı gözeneklilik oranlarına sahip ortamlar oluşturarak hem de farklı yatak eğimleri kullanarak model-yapı üzerindeki çarpma kuvvetini incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre model-yapı önünde gözenekli ortamların olmasının yapıya etkiyen çarpma kuvvetini maksimum %39.2 oranında azaltılabileceğini ve azalma miktarının gözeneklilik oranına bağlı olarak değiştiğini bildirmişlerdir. Bununla birlikte yatak eğiminin artmasıyla model-yapıya etkiyen kuvvetin arttığını, kuvvetteki maksimum artışın yatak eğimindeki artışla doğru orantılı olmadığını ve model-yapıdaki maksimum artışın %11.3 olduğunu tespit etmişlerdir. Arefi vd., (2025) üç farklı rezervuar su seviyesi için baraj yıkılması yöntemiyle ürettikleri tsunami dalgasının kare enkesitli bir model-yapı üzerine uyguladığı yatay kuvveti incelemişlerdir. Çalışmalarında öncelikle kanal tabanına içi su dolu olacak şekilde farklı uzunluk ve derinliklerde dikdörtgen enkesitli çukurlar inşa etmişler ve hemen sonrasına bir model-yapı yerleştirmişlerdir. Çalışmanın amacı, bu çukurların model-yapı üzerine etkiyen yatay kuvveti ne derece azaltacağını belirlemektir. Elde ettikleri sonuçlara göre, kanal tabındaki çukurun hız ve kuvvet azaltımında etkili olduğunu, kanal uzunluğu arttıkça yatay kuvvetin azaldığını ve en uzun kanal durumu için model-yapıya etkiyen maksimum kuvvetin %25 oranında azaltılabileceğini ifade etmişlerdir. Triatmadja vd., (2025) kuru mansap yatağına sahip bir kanalda baraj yıkılması mekanizması ile ürettikleri tsunami benzeri dalganın büyük ölçekli pürüzlülük elemanları olarak değerlendirdikleri farklı dizilimlerde yerleştirilmiş kare şekilli binalar üzerindeki etkisini sayısal olarak modellemişlerdir. Çalışmalarında, üzerlerinden dalganın aşıp aşamaması durumlarını da dikkate alarak, farklı dizilimlerde yerleştirilmiş pürüzlülük elemanlarının tsunami kuvvetini azaltmadaki rolü üzerine odaklanmışlardır. Elde ettikleri bulgulara göre, pürüzlülük elemanlarının dalga davranışını önemli ölçüde değiştirdiğini ve pürüzlülük elemanlarının doğrudan ölçüm elemanının önüne yerleştirildiğinde, artan yansıma ve direnç sebebiyle dalga yüksekliğini ve hızını önemli ölçüde azalttığını belirlemişlerdir. Bununla birlikte farklı dizilimlerdeki yerleşimlerin dalga hızını azaltarak ölçüm elemanı üzerindeki etkiyi hafiflettiğini ifade etmişlerdir. Triatmadja ve Rana (2025) baraj yıkılması mekanizması ile ürettikleri tsunami dalgalarının farklı yüksekliklerdeki deniz duvarları üzerindeki hidrodinamik etkisini SPH modeli ile sayısal olarak incelemişlerdir. Deniz duvarlarının dalga yüksekliği ve dalga

hızını azaltmadaki verimliliğini araştırmışlardır. Elde ettikleri verilere göre deniz duvarının tsunami dalga hızını azaltmadaki etkinliğinin deniz duvarı ile rezervuar su seviyesi arasındaki orana bağlı olarak değiştiğini ve oran arttıkça deniz duvarının genellikle dalga hızını azaltmada daha etkili olduğunu belirtmişlerdir. Udarika ve Tanaka (2025) baraj yıkılması mekanizması ile ürettikleri tsunami benzeri dalgaların kıyı yapıları üzerine uyguladıkları kuvveti, farklı dizilim ve yoğunluklarda bitki örtüsü kullanarak azaltma üzerine odaklanmışlardır. Çalışmalarında, dört farklı rezervuar su seviyesi ve dört farklı yoğunluk için şaşırtmalı, düz ve rastgele yerleştirilmiş bitki örtüsü dizilimleri kullanarak bir model-yapı üzerine etkiyen kuvveti yük hücresi yardımıyla ölçmüşlerdir. Elde ettikleri bulgulara göre tüm yoğunluk ve yerleşim düzeninde bitki örtüsünün model-yapıya etkiyen çarpma kuvvetini, bitki örtüsü olmaması durumuna göre azalttığını tespit etmişlerdir. Çarpma kuvvetini, en fazla %56.9-%84.0 oranında düz yerleşime sahip bitki örtüsünün azalttığını daha sonra ise sırasıyla şaşırtmalı ve rastgele yerleşimin olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca çarpma kuvvetindeki azalmanın yoğunluk artışıyla azaldığını ifade etmişlerdir. Burada bahsedilen şok dalgasının etkilerinin azaltılmasına yönelik çalışmalar Çizelge 2.3'te karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Çizelge 2.3. Baraj yıkılması kaynaklı taşkın şok dalgasının etkilerinin azaltılmasına yönelik çalışmalar

Yazar(lar)	Yıl	Kanal Boyutları (m) L x W x H	Yıkılma Türü	Kanal Eğimi	Mansap Özelliği	Mansapta Engel Durumu	Deneysel Ölçüm Tekniği	Sayısal Model	Analitik / Teorik Çözüm	Araştırılan Parametre
Triatmadja ve Nurhasanah	2012	24x1.5x1.45	Tam	Yatay	Kuru	Farklı Boşluk Oranlarına Sahip Binalar	Dalga Ölçerler Yük Hücresi	-	-	Bina Boşluğunun Kuvvet Üzerindeki Etkisi
Nurhasanah ve Triatmadja	2014	24x1.45x1.5	Tam	Yatay	Kuru	Deniz Duvarı ve Bina Modeli	Dalga Ölçerler, Yük Hücresi	-	Bilinen Analitik Denklemler	Akım Derinliği, Yatay Kuvvet
Rahman vd.,	2014	17.5x0.60x0.45	Tam	Yatay	Kuru	Farklı Tipte Deniz Duvarları ve Model Yapı	Yük Hücresi	-	-	Model-Yapıya Etkiyen Yatay Kuvvet
Rahman vd.,	2017	10.0x0.6x0.4	Tam	Yatay	Kuru	Kanal Tabanında Dikdörtgen Çukur ve Sedde	Video Kayıtları, Dalga Ölçer ve Hız Ölçer	MPS	-	Akım Derinliği ve Hız
Tar vd.,	2017	44.0x0.7x0.9	Tam	Yatay	Islak	Üç Farklı Esneklikte Şaşırtmalı Dizilimde Çubuklar ve Tank Modeli	Hız Ölçer, Yük Ölçer	OpenFOAM	-	Akım Hızı ve Model-Tanka Etki Eden Yatay Kuvvetler
Moon vd.,	2019	40x1.0x1.0	Tam	Yatay	Kuru	Makro Pürüzlülük Elemanları	Dalga Ölçer Yük Hücresi	-	-	Serbest Yüzey, Akım Hızı, Basınç ve Yatay Kuvvet
Xu vd.,	2021b	19.2x1.2x1.2	Tam	Yatay	Kuru	Dikdörtgen Engel ve Düşey Duvar	Dalga Ölçer Basınç Dönüştürücüler	-	-	Basınç, Kuvvet ve Devrilme Momentleri
Maggi vd.,	2022	6.0x0.5x0.5	Tam	Yatay	Kuru	Farklı Boyutlarda Pürüzlülük Elemanları	Video kayıtları PIV	-	-	Su Yüzü Profilinin Değişimi ve Akım Hızı
Golda Percy vd.,	2023	35x1.0x1.0	Tam	Yatay	Kuru	Farklı Dizilimlerde Yerleştirilmiş Tampon Bloklar	-	OpenFOAM	-	Maksimum Akım Derinliği, Hız, Momentum Akısı ve Basınç
Mahmoud ve Uchida	2024	16.10x0.4x0.4	Tam	Yatay	Islak	Dört Farklı Bitki Örtüsü Yüzey Uzunluğu	Dalga Ölçerler	-	Dalga hızı Hesabı için Teorik Bir Çözüm	Dalga Yüksekliğinin Zamanla Değişimi ve Hız

Çizelge 2.3. (Devam) Baraj yıkılması kaynaklı taşkın şok dalgasının etkilerinin azaltılmasına yönelik çalışmalar

Yazar(lar)	Yıl	Kanal Boyutları (m) L x W x H	Yıkılma Türü	Kanal Eğimi	Mansap Özelliği	Mansapta Engel Durumu	DeneySEL Ölçüm Tekniği	Sayısal Model	Analitik / Teorik Çözüm	Araştırılan Parametre
Alijani vd.,	2025	1.6x0.61x0x75	Tam	Yatay ve Eğimli	Kuru ve Islak	Gözenekli Ortam ve Kare Yapı	-	OpenFOAM	-	Yapı Üzerine Etkiyen Çarpma Kuvveti
Arefi vd.,	2025	15.6x0.38x0.6	Tam	Yatay	Kuru	Kanal Tabında Su Dolu Dikdörtgen Enkesitli ve Farklı Uzunluklarda Çukur	Video kayıtları, Ultrasonik sensörler ve Yük hücresi	-	-	Akım Derinliği, Akım Hızı ve Yatay Kuvvet
Triatmadja vd.,	2025	20.7x1.45x1.50	Tam	Yatay	Kuru	Tek ve Farklı Dizilimlerde Yerleştirilmiş Makro Pürüzlülük Elemanları	-	SPH	-	Makro Pürüzlülüğün Test Edilen Model Üzerindeki Kuvvet Azaltımına Etkisi
Triatmadja ve Rana	2025	15x0.3x0.44	Tam	Yatay	Islak	Deniz Duvarları	-	SPH	-	Dalga Yüksekliği ve Dalga Hızı
Udarika ve Tanaka	2025	18x0.4x0.6	Tam	Yatay	Kuru	Farklı Dizilim ve Yoğunlukta Bitki Örtüsü ve Bina Modeli	Dalga Ölçer LDV Yük Hücresi	-	-	Bitki Örtüsünün Akım Derinliği, Akım Hızı ve Bina Üzerine Etkiyen Kuvvet Üzerindeki Etkisi

BÖLÜM III

MATERYAL VE METOT

Bu bölümde, Bölüm 1’de bahsedilen amaç ve hedeflere ulaşmak için deneysel, sayısal ve analitik çalışmalarda kullanılan yöntemler, kabuller ve materyallere yer verilmiştir.

3.1 Deneysel Çalışmalar

Deneysel çalışmalar başlığı altında, deney düzeneklerinin kurulum aşamaları, şok dalgası etkilerini azaltmak ve şok dalgası karakteristiği üzerinde rijit yapıların etkilerini araştırmak amacıyla üretilen yapısal önlemler, deneyler öncesi son düzenlemeler, ölçüm yöntemleri, deneylerin yapılışı, deneylerin tekrarlanabilirliği ile ölçek ve duvar etkileri hakkında bilgi verilmektedir.

3.1.1 Deney düzeneklerinin kurulması

Deneysel çalışmalar, Kanal-1 ve Kanal-2 olmak üzere iki farklı kanal üzerinde yürütülmüştür. Bu bölümde Kanal-1 ve Kanal-2’ye ait özelliklerden ve bu kanallara ait kapak açılma mekanizmalarından söz edilmektedir.

Kanal-1’e ait özellikler: Bu tez çalışmasında öngörülen amaç ve hedeflere ulaşabilmek ve benzeri kısmi baraj yıkılması durumunu temsil eden fiziksel model çalışmalarında kullanılmak üzere hazırlanan, yürütücülüğünü doktora danışmanının yaptığı, benim de araştırmacı olduğum Üniversitemiz Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından MMT 2021/3-BAGEP numarasıyla finansal olarak desteklenen ve 2023 yılında tamamlanan proje kapsamında laboratuvar ortamında bir kanal imal edilmiştir. Bu kanal, bu çalışmada Kanal-1 olarak adlandırılmıştır. Kanalin taşıyıcı sistemi sigma profillerden kendisi ise pleksiglas malzeme kullanılarak oluşturulmuştur. Sigma profiller; kurulum kolaylığı, hafifliği ve başka projeler için yapılması muhtemel değişikliklere kolay adapte olması ve kaynaklı birleşimlere nazaran kullanıcılara daha rahat bir hareket ortamı sağlaması açısından kanalin taşıyıcı sisteminde tercih edilmiştir. Pleksiglas malzemeler ise; deneylerin gözlemlenebilmesi için rahat bir ortam oluşturması, cam malzemeye göre daha az yansıması yapması, hafif olması, pürüzlülüğünün az olması ve yine cam malzemeye

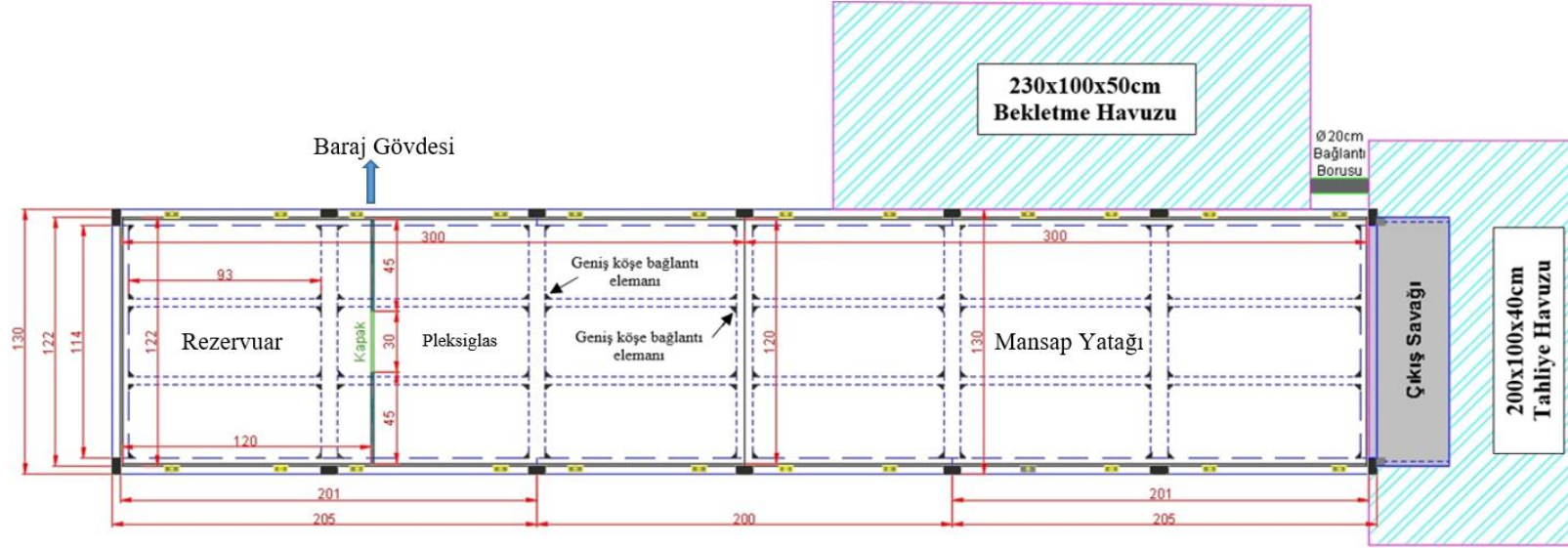
nazaran kırılma/çatlama/darbe gibi etkilere karşı daha dayanıklı olması nedenleriyle seçilmiştir.

Kanal-1 yatay taban eğimine sahip, dikdörtgen enkesitli, 6.0 m uzunluğunda 1.2 m genişliğinde ve 0.5 m derinliğindedir. Kanalın memba uç noktasından itibaren 120x120 cm'lik kare enkesitli kısmı rezervuar olarak düzenlenmiştir. Rezervuar mansap uç kısmında ve kanal merkezinde olacak şekilde 30 cm'lik bir kısım baraj gövdesinde meydana gelen kısmi açıklığı temsil etmek üzere 3 mm kalınlığında sacdan imal edilmiş düşey yönde hareket edebilen bir kapak ile kapatılmıştır (Şekil 3.1).

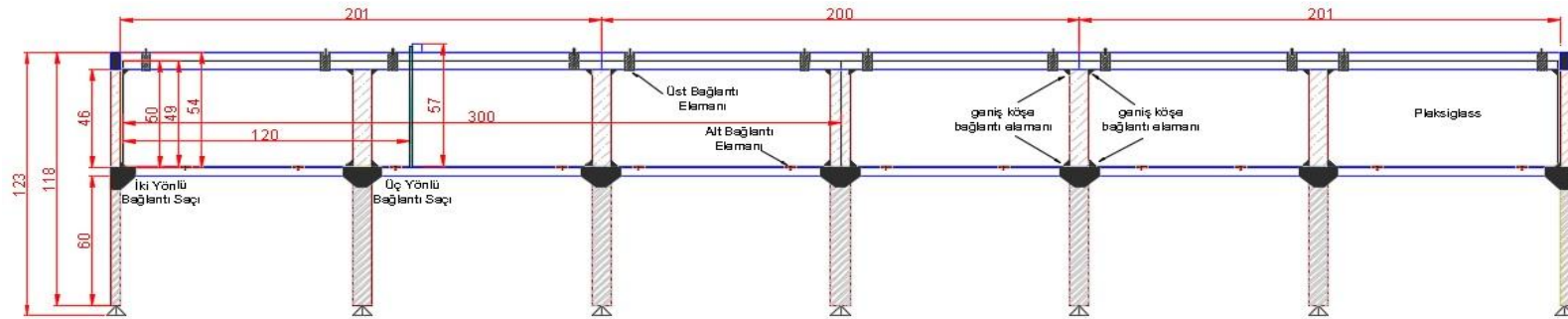
Ayrıca kanal içi su sirkülasyonun sağlanması, tahliye edilmesi ve bekletilmesi amacıyla biri kanalın çıkış kesitinde diğeri ise ona bağlantılı olacak şekilde yan tarafında olmak üzere, 2 mm kalınlığında sacdan imal edilmiş iki adet su tankı bulunmaktadır. Kanalın mansap ucunda yer alan ve 800 L hacme sahip olan tank 2.0x1.0x0.4 m boyutlarında ve buna bir bağlantı borusu ile bağlı olup 1150 L hacme sahip olan ikinci tank ise 2.3x1.0x0.5 m boyutlarındadır (Şekil 3.1). Kanalın mansap ucunda yer alan ilk tank tahliye, ikinci tank ise bekletme havuzu olarak kullanılmaktadır. Tahliye havuzuna suyun rahat bir şekilde dökülmesi için kanalın mansap ucunda yine sac malzemeden imal edilmiş bir çıkış savağı yer almaktadır.



Şekil 3.1. Kanal-1'e ait genel görünüm



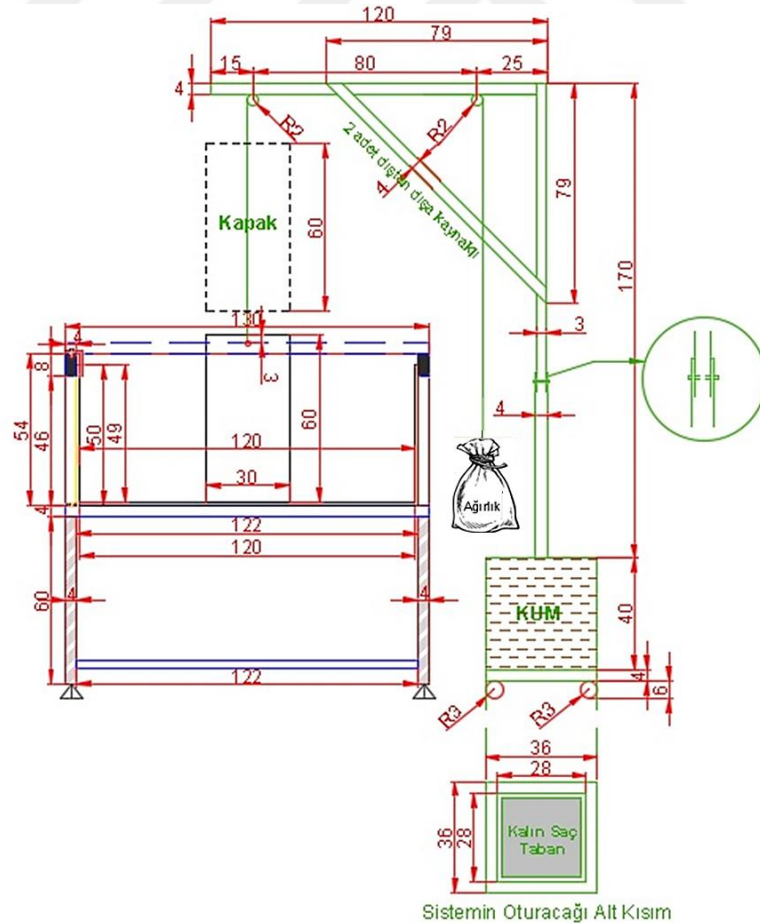
Şekil 3.2. Kanal-1'e ait şematik plan görünüşü



Şekil 3.3. Kanal-1'e ait şematik boykesit

Kanal-1'e ait plan ve boykesite ilişkin şematik çizimler sırasıyla Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'te verilmektedir. Şekil 3.2'den de görüleceği üzere Kanal-1 rezervuar, baraj gövdesi ve mansap yatağı olmak üzere üç ana bölümden meydana gelmektedir.

Kanal-1'e ait kapak açılma mekanizması: Kapak açılma mekanizması, bir makara sistemine bağlı olan ağırlığın belli bir yükseklikten serbest olarak düşürülmesi ve bu ağırlığın bir ip ile bağlı olduğu hareketli kapağın yukarı yönde ani olarak çekilerek kaldırması prensibine dayanmaktadır. Bu sistem Şekil 3.4'ten de görüleceği üzere ters L şeklindedir ve istenilen yöne kolaylıkla taşınması amacıyla 4 adet hareketli ayak üzerine oturmaktadır. Farklı seviyelerdeki yüksekliklere ayarlanabilen bu sistem, kaynaklı birleşim ile imal edilmiş olup tabandan itibaren 40 cm yüksekliğinde kum ile dolu olan bir haznedan oluşmaktadır (Şekil 3.4). Bu hazne, mekanizmanın stabilizasyonunu sağlamak amacıyla oluşturulmuştur. Ayrıca, mekanizmanın kapağı taşıyan ucunun deneyler esnasında hareket etmemesi/titrememesi için mekanizmanın uç kısmı bir tij yardımıyla tavana sabitlenmiştir.



Şekil 3.4. Kanal-1'e ait kapak açılma mekanizması ve kanal ön görünüşü şematik enkesit çizimi

Kanal-2'ye ait özellikler: Bu tez çalışmasında kullanılan bir diğer kanal ise Üniversitemiz İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarında bulunan ve açık kanal hidroliği ile ilgili birçok deneyin yapılabilirdiği, GUNT firması tarafından HM 162 koduyla üretilen dikdörtgen enkesitli kanaldır. Bu kanal her biri 2.5 m uzunluğunda olan dört bölümden oluşmaktadır ve toplamda 10 m uzunluğundadır. Kanalın genişliği 30.9 cm derinliği ise 45 cm olup her biri yaklaşık 1100 L hacme sahip olan birbiri ile bağlantılı üç adet cam takviyeli plastikten (CTP) üretilmiş su tanklarına sahiptir (Şekil 3.5). Kanala bu tanklardan su alınması ve su sirkülasyonun sağlanması için ortadaki tankta pompa bağlantısı bulunmaktadır. Ayrıca ilgili kanal farklı deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere çeşitli ölçüm aletlerine (limnimetre, hız ve basınç ölçer) ve hidrolik yapıları temsil eden düzenek ve yapılara sahiptir.

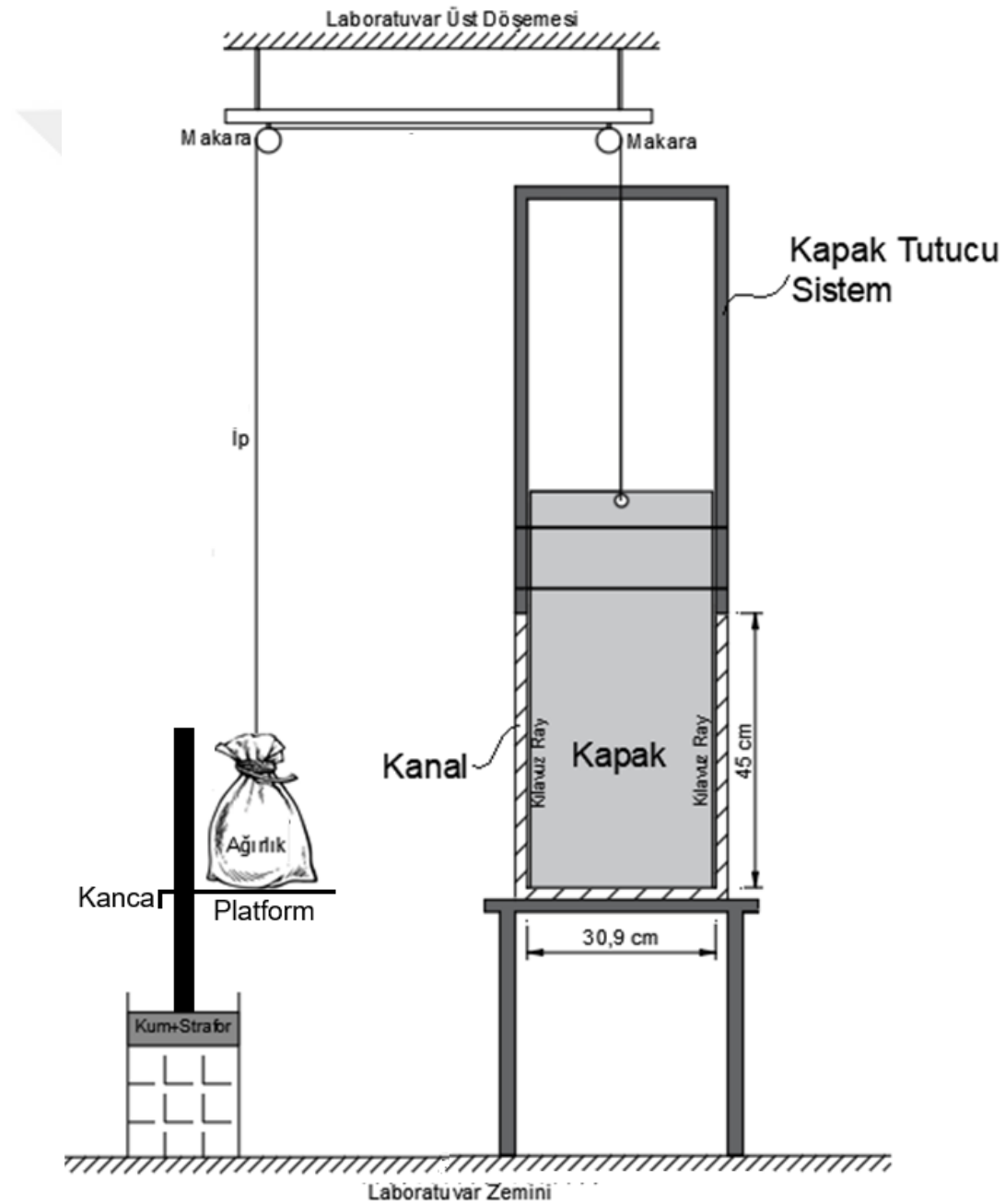


Şekil 3.5. Kanal-2'ye ait genel görünüm

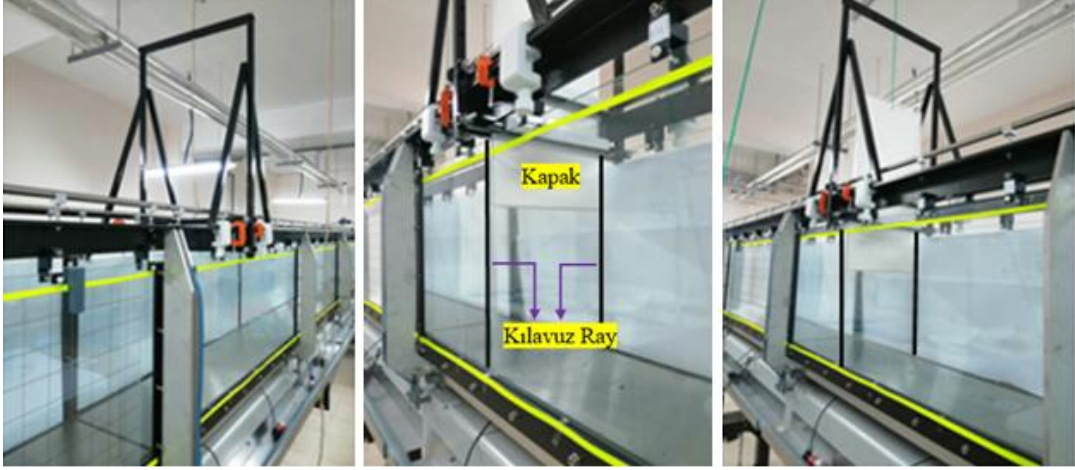
Kanal, kontrol panosundan manuel olarak ayarlanabilen maksimum $100 \text{ m}^3/\text{sa}$ debiyle çalışabilmekte ve kanala verilen bu debi, kanalı besleyen boru üzerinde bulunan debimetre yardımıyla kontrol edilebilmektedir. Kanalın tabanı paslanmaz çelikten yan duvarları ise temperlenmiş cam malzeme kullanılarak üretilmiştir. Bu sebeple kanalın Manning katsayısı (n) oldukça küçüktür ve yapılan bir dizi üniform akım deneylerinden elde edilen sonuçlara göre 0.009 civarındadır. Ayrıca, kanalın sonunda kontrollü bir savak bulunmakta ve bu savak istenilen seviyede kaldırılarak kanalın çıkış kesitindeki su seviyesi ayarlanabilmektedir. Kanal, %-0.5 ile %2.5 arasında değişen farklı kanal taban eğimlerinde deneysel çalışmalara izin vermektedir. Kanal taban eğimi hem manuel olarak hem de GUNT firması tarafından üretilen bir yazılım kullanılarak bilgisayar yardımıyla ayarlanabilmektedir.

Kanal-2'ye ait kapak açılma mekanizması: Kanal-2 üzerinde tam baraj yıkılması olayını temsil edebilmek için Kanal-1'de olduğu gibi bir kapak açılma mekanizması yapılmış ve

bu sayede tam baraj yıkılması olayı laboratuvar ortamında temsil edilmiştir (Şekil 3.6). Bu kanalda yapılan kapak açılma mekanizması için öncelikle kanal üzerine Şekil 3.7’de görüldüğü gibi bir sistem oluşturulmuş ve kapak her iki taraftan kılavuz raylar üzerinde hareket ettirilmiştir (Şekil 3.7). Kapağın açılma şekli ise önceki deney düzeneğine benzer olacak şekilde 15 kg kütleli bir yükün 40 cm yükseklikten serbest düşmeye bırakılması ile gerçekleştirilmiştir. Burada ağırlığın her seferinde aynı yükseklikten düşmesi için kapak açılma mekanizmasının alt kısmına 40x40 cm boyutlarında bir platform ve bu platformu açan bir kanca yapılmıştır.



Şekil 3.6. Kanal-2’ye ait kapak açılma mekanizması ve kanal ön görünüşü şematik enkesit çizimi



Şekil 3.7. Kapak açılma mekanizmasına ait değişik açılardan görünüm ve kılavuz raylar

3.1.2 Yapısal önlemlerin üretimi

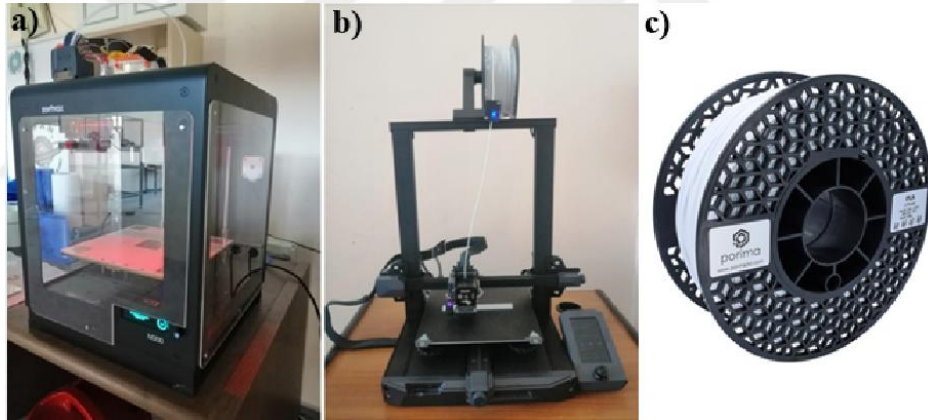
Şok dalgasının yıkıcı etkilerinin azaltılmasında yapısal önlemlerin rolünü (etkinliğini, yerini) araştırmak amacıyla 3 boyutlu yazıcılar kullanılarak bir dizi üretim gerçekleştirilmiştir. Kullanılan yazıcı markaları Zortrax M200 ve Creality Ender 3 S1 olup yapısal önlemler beyaz renkte filamentler kullanılarak elde edilmiştir (Şekil 3.8). Dilimleme programı olarak ise Cura ve Creality Slicer 4.8.2 programlarından yararlanılmıştır.

Bu tez çalışmasında kullanılan yapısal önlemler iki gruba ayrılmaktadır. İlk gruptaki yapısal önlemler, 1 cm yüksekliğinde ve beş farklı enkesit şekli ile iki farklı dizilime sahip prizmatik yapısal elemanlar kullanılarak oluşturulan yapısal ortamları ifade etmektedir. Bu ortamlar Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2’de tanımlanan enkesit şekli ve dizilimlerine göre “Tip YO-Numara” şeklinde isimlendirilmiştir. Burada “Tip-YO” yapısal ortam tipini “Numara” ise enkesit ve dizilim şeklini temsil etmektedir. Kanalda herhangi bir yapısal ortam yoksa Tip YO-0.0 olarak isimlendirilmiştir. İkinci grup ise 8 cm yüksekliğinde ve kanal enkesitini tamamen kapatan üç farklı gözenekli ve iki farklı gözeneksiz yapıdan oluşmaktadır. Prizmatik yapısal elemanlar ile oluşturulan ortamlar, Kanal-1 için Çizelge 3.1’de ve Kanal-2 için Çizelge 3.2’de tanımlanan boyut ve enkesitlerde üretilmiştir. Bu ortamlar Şekil 3.9 - Şekil 3.11’de gösterildiği gibi bir plaka şeklinde yüzey üzerine yerleştirilmiş ve Şekil 3.12 - Şekil 3.14’te gösterildiği üzere deneysel çalışmalarda kullanılmıştır. Gözenekli ve gözeneksiz yapılar ise Kanal-2 için Çizelge 3.3’te belirtilen

boyutlarda ve Şekil 3.15 - Şekil 3.19’da verilen şekillerde üretilmiş ve deneysel çalışmalarda kullanılmıştır.

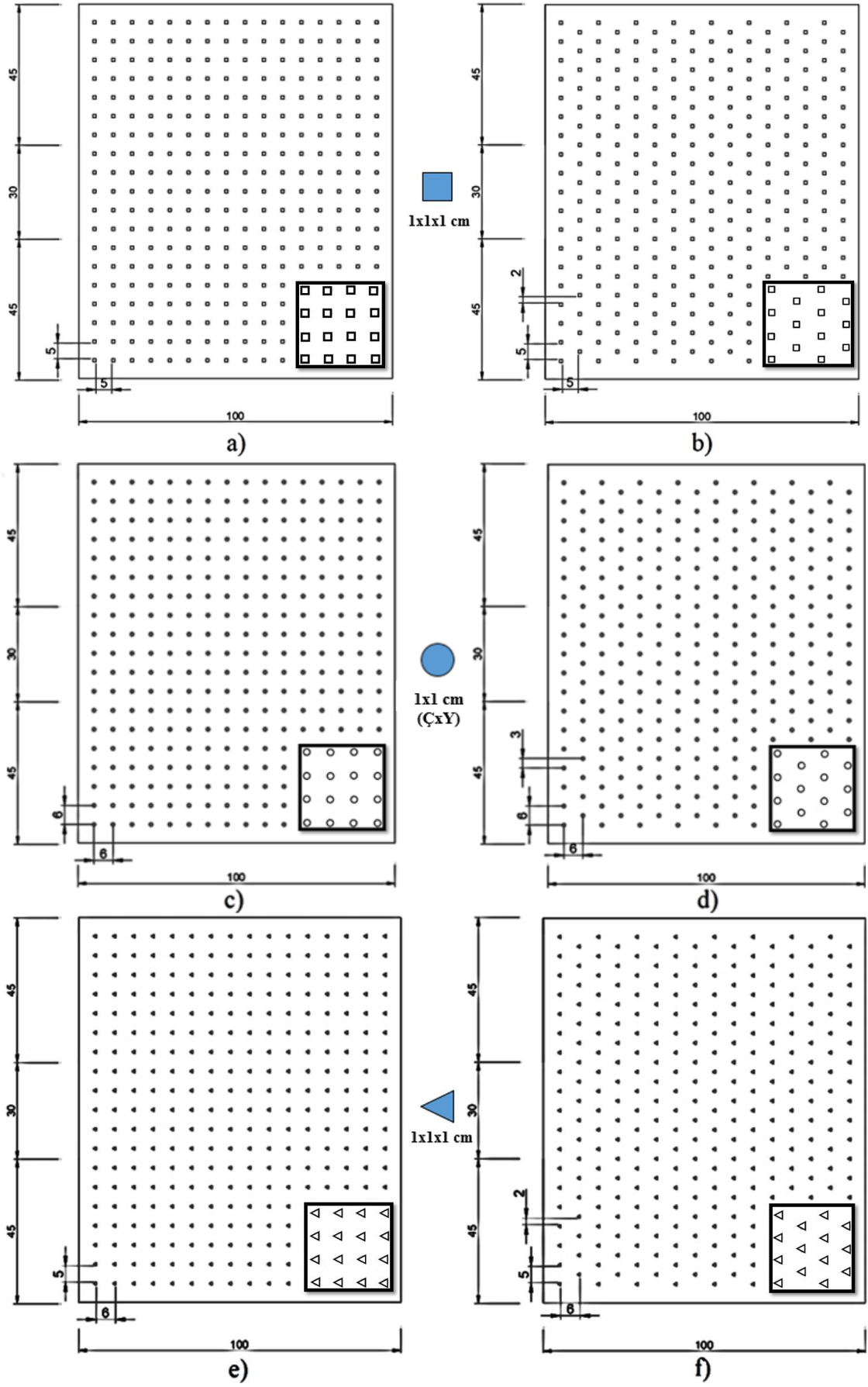
Çizelge 3.1. Kanal-1’de yürütülen deneysel çalışmalar ile aynı akım koşullarında gerçekleştirilen sayısal çalışmalarda kullanılan yapısal ortamlar ve kombinasyonları

Yapısal Ortam Tipi	Yapısal Elemanın Enkesit Şekli	Boyutlar		Adet	Dizilim
		(UxGxY) (cm)	(ÇxY) (cm)		
Tip YO-1.1	Kare	1x1x1	-	304	Düz
Tip YO-1.2				296	Şaşırtmalı
Tip YO-2.1	Daire	-	1x1	304	Düz
Tip YO-2.2				296	Şaşırtmalı
Tip YO-3.1	Eşkenar Üçgen	1x1x1	-	304	Düz
Tip YO-3.2				296	Şaşırtmalı
Tip YO-4.2	Dikdörtgen	30x1x1	-	14	Şaşırtmalı
Tip YO-5.2	Daire Dilimi	32.04x1x1	-	14	Şaşırtmalı

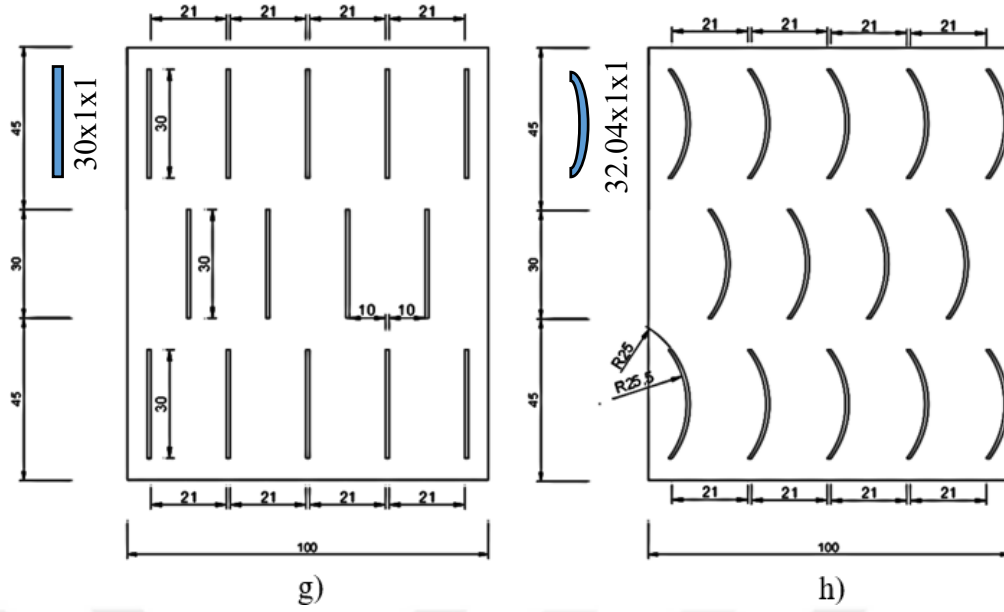


Şekil 3.8. a) Zortrax M200 b) Creality Ender 3 S1 c) Filament

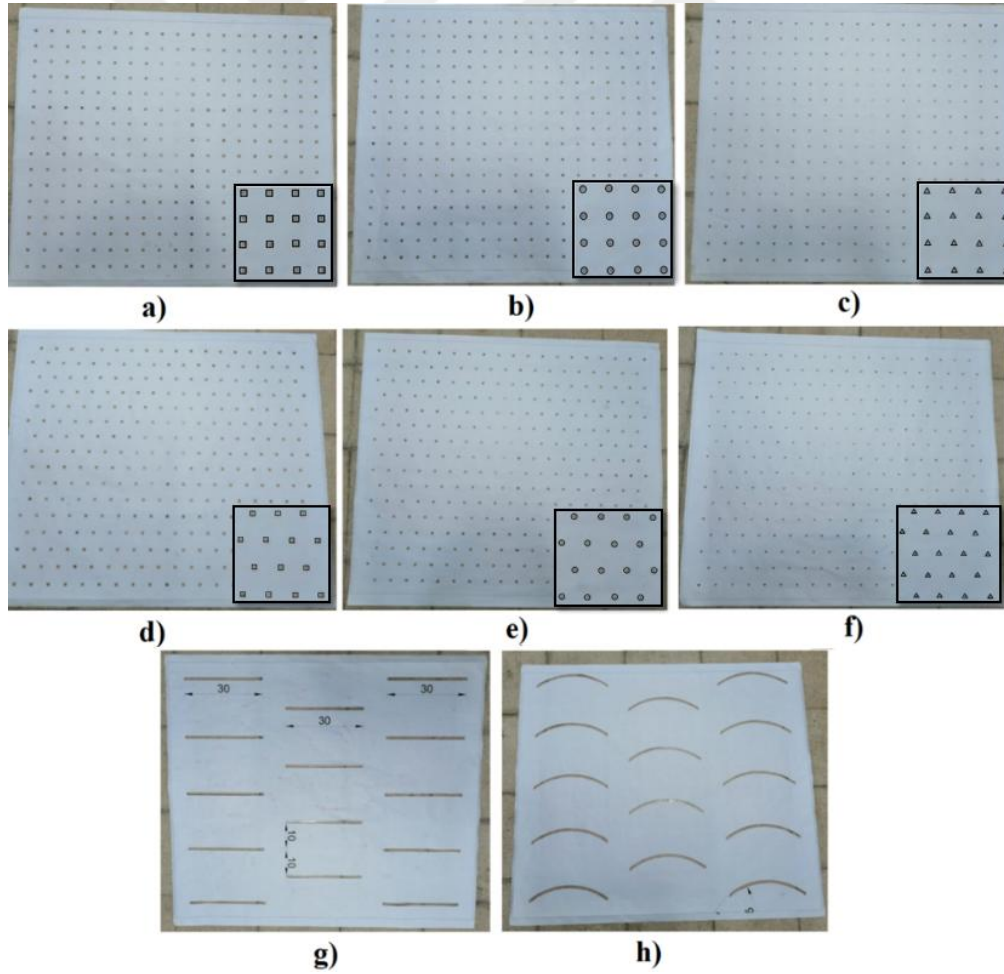
Yapısal ortamlar için üretilen her bir elemanın konumu (plaka yüzey üzerindeki dizilimi) Şekil 3.9’da verilmektedir. Şekil 3.9’da verilen dizilimlerin Kanal-1 içerisinde istenilen bölgede rijit bir şekilde durması için öncelikle 120x100x0.12 cm boyutlarında galvanizli saçtan üretilmiş dikdörtgen yüzeyler temin edilmiştir. Oluşturulan bu yüzeyler görüntü işleme tekniğinin kullanımı açısından beyaz boya koruma (Paint Protection Film-PPF) film ile kaplanmıştır. Daha sonra Şekil 3.10’da verilen dizilimlere uygun bir şablonla ilgili yapısal elemana ait kısımlar bu yüzeyler üzerine işaretlenmiş ve en son işaretlenen bu bölgelere 3 boyutlu yazıcılarda üretilen farklı enkesitlerdeki prizmatik yapısal elemanlar yapıştırılmıştır (Şekil 3.11). Böylece Kanal-1’in deneysel çalışmalarında kullanılmak üzere farklı tipte yapısal ortamlar elde edilmiştir (Şekil 3.12 ve Şekil 3.13).



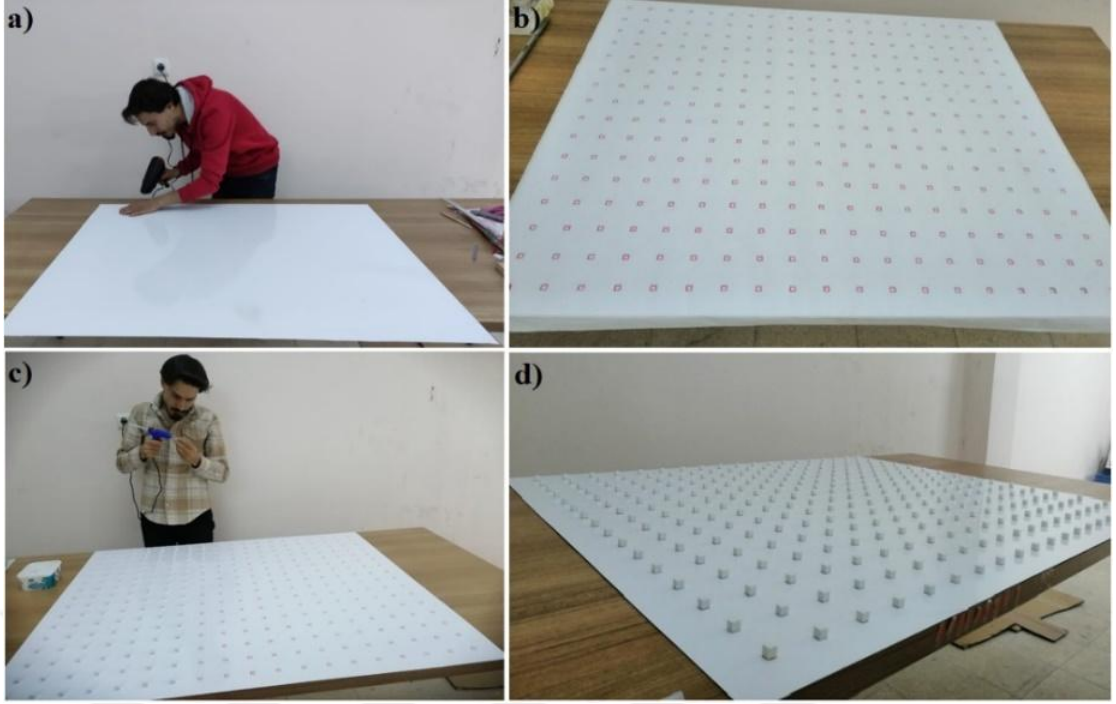
Şekil 3.9. Yapısal ortam tipleri (ölçüler cm) a) Tip YO-1.1 b) Tip YO-1.2 c) Tip YO 2.1 d) Tip YO-2.2 e) Tip YO-3.1 f) Tip YO-3.2 g) Tip YO-4.2 h) Tip YO-5.2



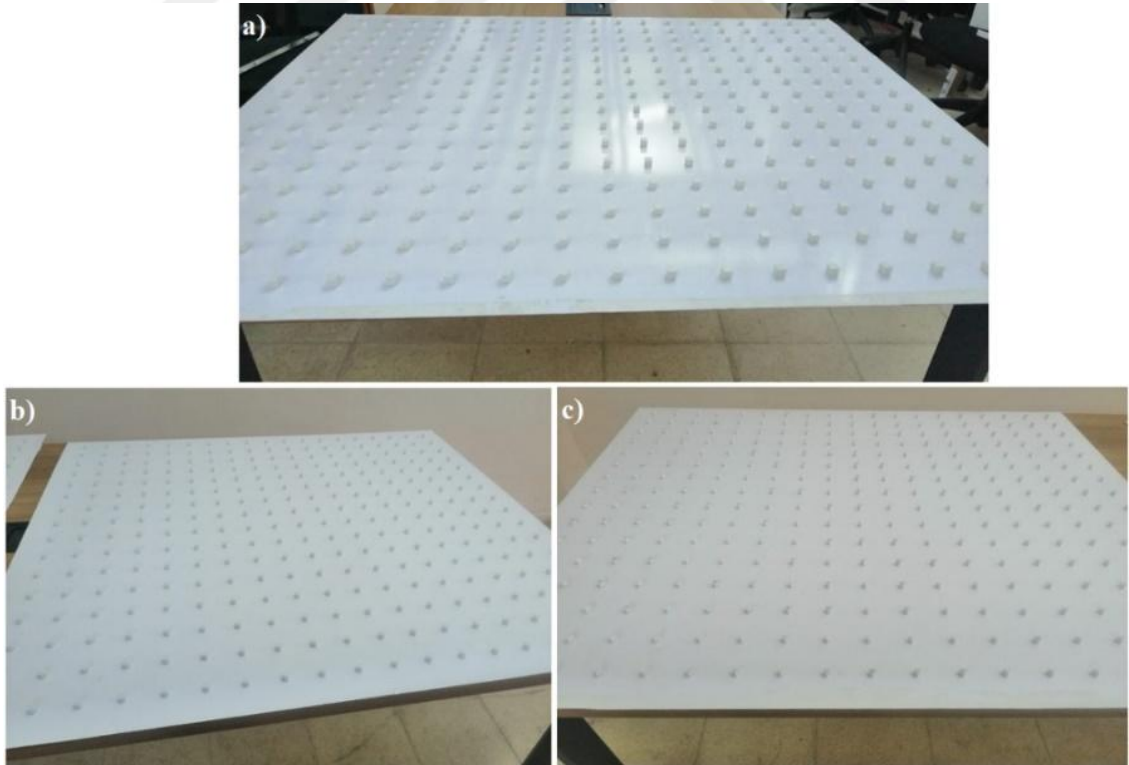
Şekil 3.9. (Devam) Yapısal ortam tipleri (ölçüler cm) a) Tip YO-1.1 b) Tip YO-1.2 c) Tip YO 2.1 d) Tip YO-2.2 e) Tip YO-3.1 f) Tip YO-3.2 g) Tip YO-4.2 h) Tip YO-5.2



Şekil 3.10. Kanal-1'e ait yapısal ortam tipleri için kullanılan şablonlar a) Tip YO-1.1 b) Tip YO-2.1 c) Tip YO-3.1 d) Tip YO-1.2 e) Tip YO-2.2 f) Tip YO-3.2 g) Tip YO-4.2 h) Tip YO-5.2



Şekil 3.11. Kanal-1 için yapısal ortam tiplerinin oluşturulması a) yüzeyin kaplanması b) şablon ile bölgelerin belirlenmesi c) üretilen yapısal elemanların yapıştırılması d) nihai yapısal ortam



Şekil 3.12. Deneysel çalışmalarda kullanılan Kanal-1'e ait düz dizilimdeki yapısal ortamlar a) Tip YO-1.1 b) Tip YO-2.1 c) Tip YO-3.1



Şekil 3.13. Deneysel çalışmalarda kullanılan Kanal-1'e ait şaşırtmalı dizilimdeki yapısal ortamlar a) Tip YO-1.2 b) Tip YO-2.2 c) Tip YO-3.2 d) Tip YO-4.2 e) Tip YO-5.2

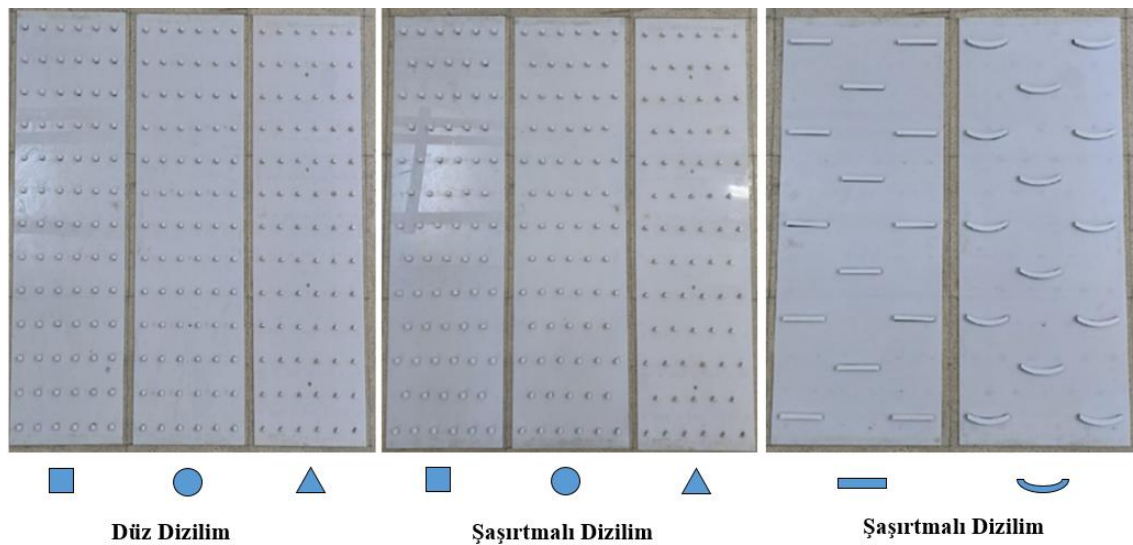
Benzer şekilde Çizelge 3.2'de verilen prizmatik elemanlardan oluşan yapısal ortamlar Kanal-2 için üretilmiş ve bu kanala uygun olacak şekilde 3 mm kalınlığında 1 m uzunluğunda ve 30.7 cm genişliğindeki beyaz pleksiglas üzerine benzer dizilimlerde yerleştirilmiştir (Şekil 3.14).

Yapısal ortamlar oluşturulurken seçilen kare, daire ve üçgen enkesit şekline sahip prizmatik yapısal elemanlar literatürdeki çalışmalar dikkate alınarak belirlenmiştir (Chaudhuri vd., 2013; Maggi vd., 2022; Chang ve Wu, 2023; Golda Percy vd., 2023; Udarika ve Tanaka, 2025). Dikdörtgen ve daire dilimi yapısal elemanların kullanımına ise danışman hocamın önerisi ve yönlendirmesi doğrultusunda karar verilmiştir. Burada kullanılan kare, daire ve üçgen enkesit şekline sahip elemanlar düz ve şaşırtmalı bir dizilimle, dikdörtgen ve daire dilimi elemanlar ise şaşırtmalı şekilde yüzey üzerine yerleştirilmiştir.

Çizelge 3.2. Kanal-2’de yürütülen deneysel çalışmalar ile aynı akım koşullarında gerçekleştirilen sayısal çalışmalarda kullanılan yapısal ortamlar ve kombinasyonları

Yapısal Ortam Tipi	Yapısal Elemanın Enkesit Şekli	Boyutlar		Adet	Dizilim
		(UxGxY) (cm)	(ÇxY) (cm)		
Tip YO-1.1	Kare	1x1x1	-	78	Düz
Tip YO-1.2				72	Şaşırtmalı
Tip YO-2.1	Daire	-	1x1	78	Düz
Tip YO-2.2				72	Şaşırtmalı
Tip YO-3.1	Eşkenar Üçgen	1x1x1	-	78	Düz
Tip YO-3.2				72	Şaşırtmalı
Tip YO-4.2	Dikdörtgen	7.5x1x1		14	Şaşırtmalı
Tip YO-5.2	Daire Dilimi	8.08x1x1		14	Şaşırtmalı

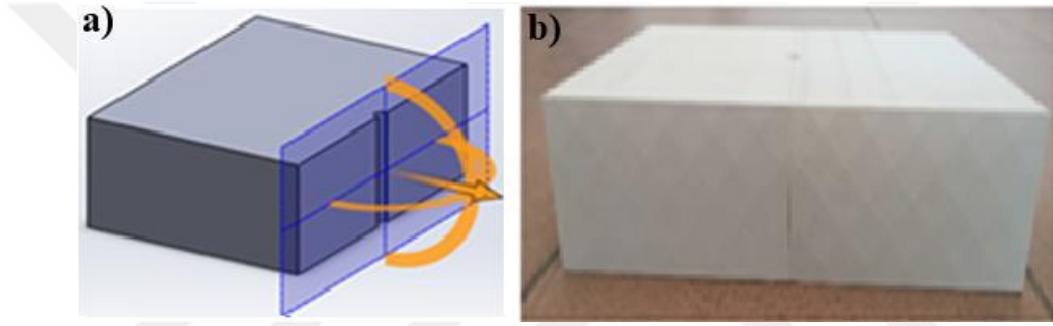
Yapısal elemanlarla oluşturulan yapısal ortamlara benzer şekilde gözenekli ve gözeneksiz yapılar da Solidworks programında çizilmiş ve 3 boyutlu yazıcılar kullanılarak Çizelge 3.3’te verilen boyutlarda üretilmiştir. Bu tez çalışmasında kullanılan gözenekli ve gözeneksiz yapısal önlemler, doktora danışman hocam tarafından gerçek hayatta akımın/dalgaların enerjini kırmak veya kıyı yapılarını korumak amacıyla kullanılan yapısal çözümler göz önüne alınarak, onun önerisi ve yönlendirmesi doğrultusunda üretilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere simetrisi alınarak iki parça halinde üretilen tüm yapılar Şekil 3.15 - Şekil 3.19 ‘da verilmektedir.



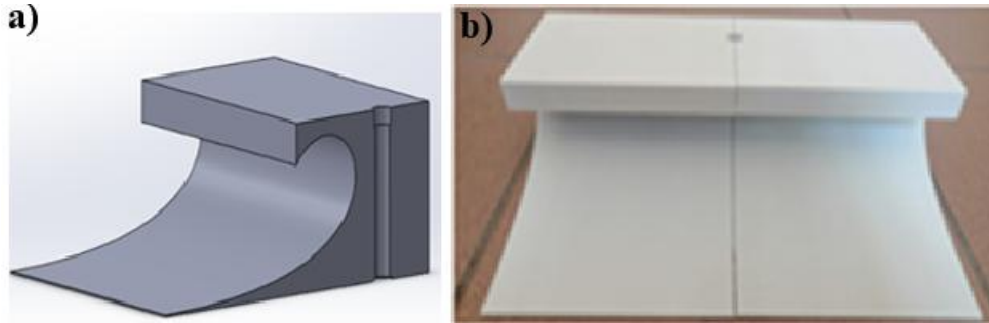
Şekil 3.14. Deneysel çalışmalarda kullanılan Kanal-2’ye ait düz ve şaşırtmalı dizilimlerdeki yapısal ortamlar

Çizelge 3.3. Kanal-2’de yürütülen deneysel çalışmalar ile aynı akım koşullarında gerçekleştirilen sayısal çalışmalarda kullanılan gözenekli ve gözeneksiz yapılar

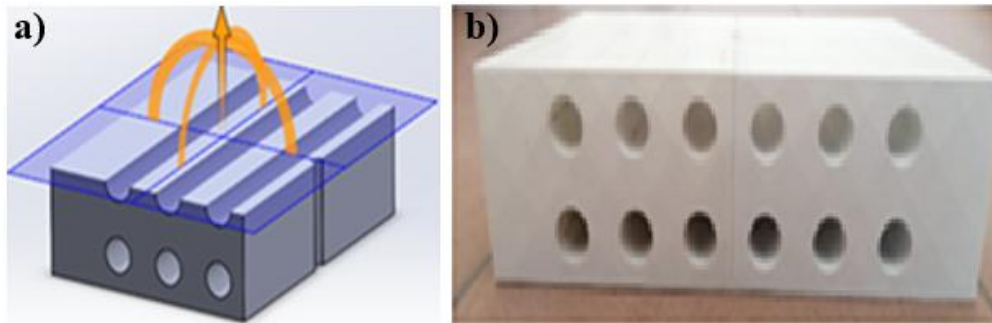
Yapı Tipi	Gözenek Şekli	Boyutlar		Gözenek Adedi	Gözenek Çıkış Durumu
		(UxGxY) (cm)	(Ç) (cm)		
Gözeneli Tip-I	Daire	20x30.7x8	2	12	Doğrusal
Gözeneli Tip-II	Daire	20x30.7x8	2	12	Çarpırmalı
Gözeneli Tip-III	Daire	20x30.7x8	1.414	24	Geri Döndürmeli
Gözeneksiz Yapı	-	20x30.7x8	-	-	-
Eğri Yüzeyle Yapı	-	20x30.7x8	-	-	-



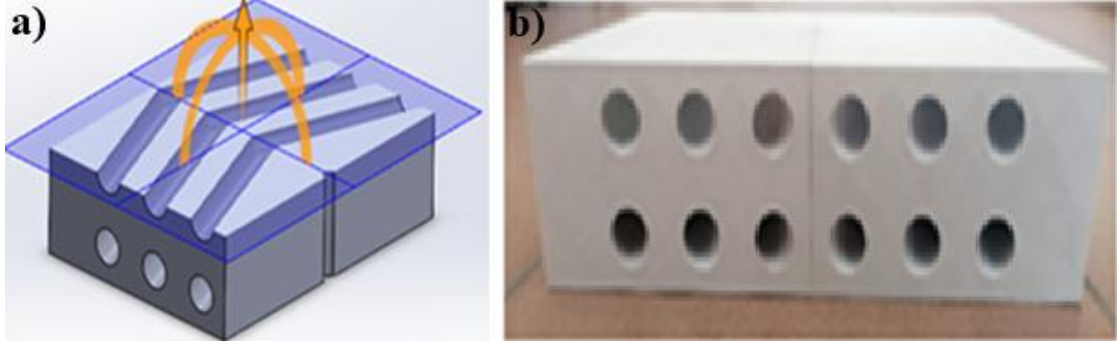
Şekil 3.15. Gözeneksiz Yapı a) perspektif görünüm b) laboratuvar görünümü



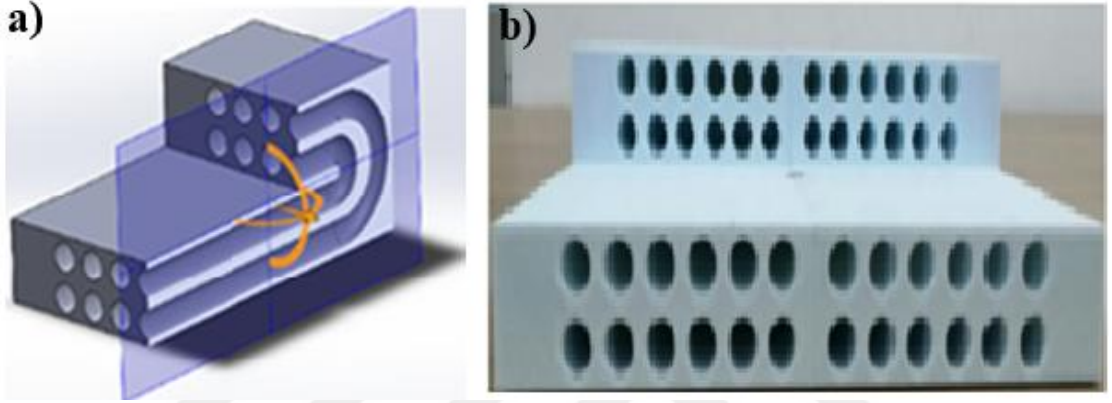
Şekil 3.16. Eğri Yüzeyle Yapı a) perspektif görünüm b) laboratuvar görünümü



Şekil 3.17. Gözenekli Tip-I a) perspektif görünüm b) laboratuvar görünümü



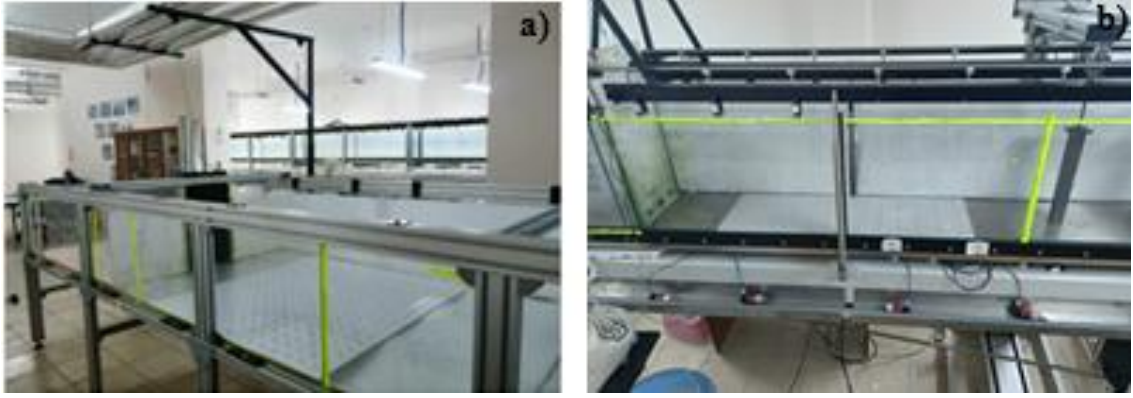
Şekil 3.18. Gözenekli Tip-II a) perspektif görünüm b) laboratuvar görünümü



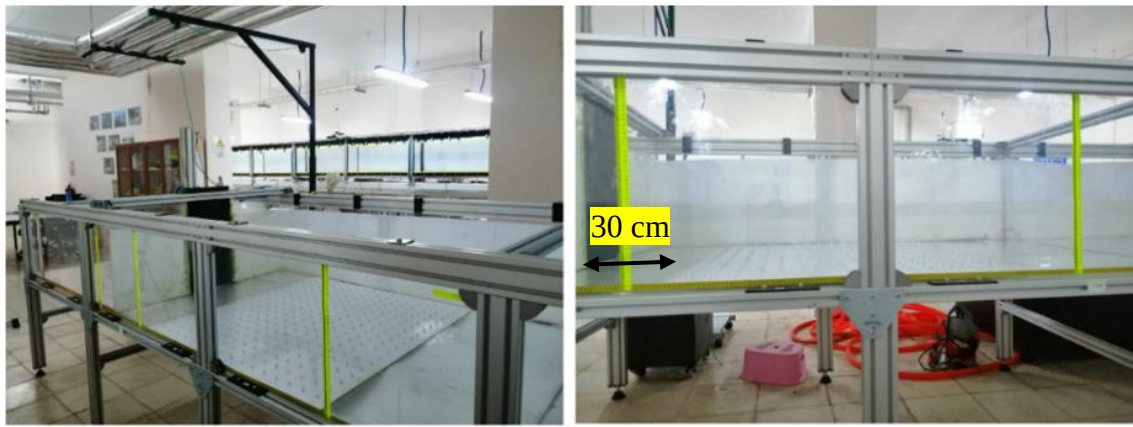
Şekil 3.19. Gözenekli Tip-III a) perspektif görünüm b) laboratuvar görünümü

3.1.3 Deneyler öncesi son düzenlemeler

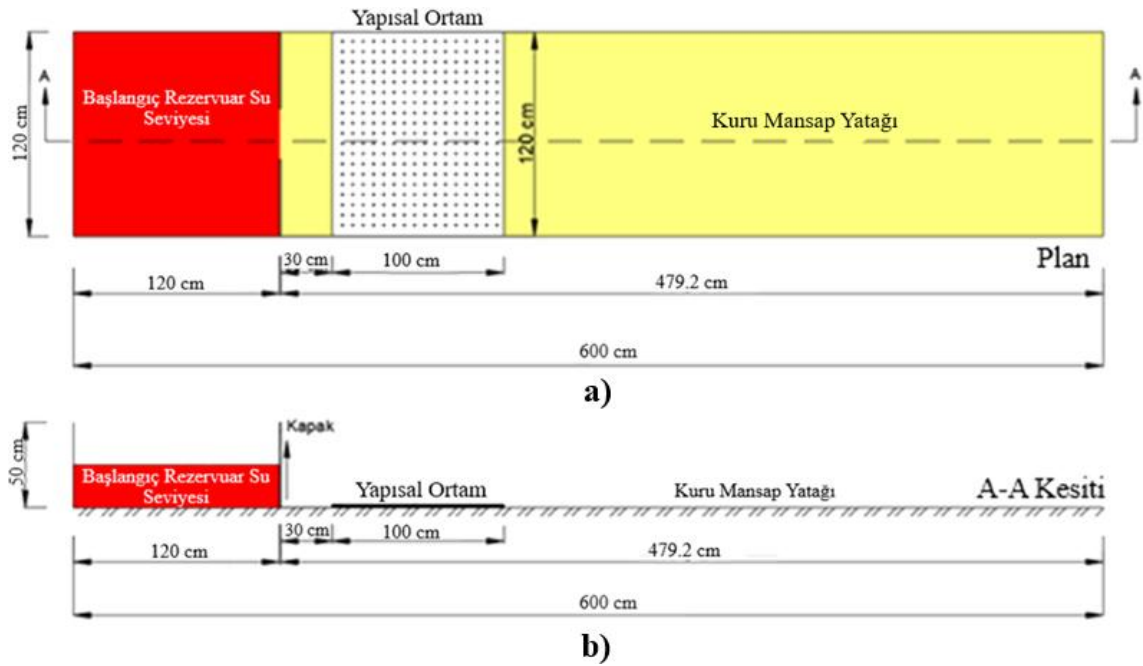
Deney düzeneklerinin kurulumu ve yapısal önlemlerin üretiminden sonra Kanal-1 ve Kanal-2 için elde edilen tamamlanmış deney düzeneklerine ait son görünüm Şekil 3.20’de verilmektedir. Şekil 3.21 ve Şekil 3.22 incelendiğinde Kanal-1 içerisine yerleştirilen yapısal ortamların kapaktan itibaren 30 cm uzaklığa yerleştirildiği görülmektedir. Bu mesafe, kısmi baraj yıkılması sonucu oluşan taşkın şok dalgası önünün kanal yan duvarlarından önce yapısal ortamlara çarpmasını sağlayacak şekilde belirlenmiştir. Ayrıca yapısal ortamların hemen memba ve mansap noktalarında akım derinliklerini ölçmek amacıyla kanal duvarlarına yeşil şerit metreler yapıştırılmış ve böylece akım derinliklerinin zamanla değişimi elde edilebilmiştir (Şekil 3.21).



Şekil 3.20. Yapısal ortamlara ait deney düzenekleri a) Kanal-1 b) Kanal-2

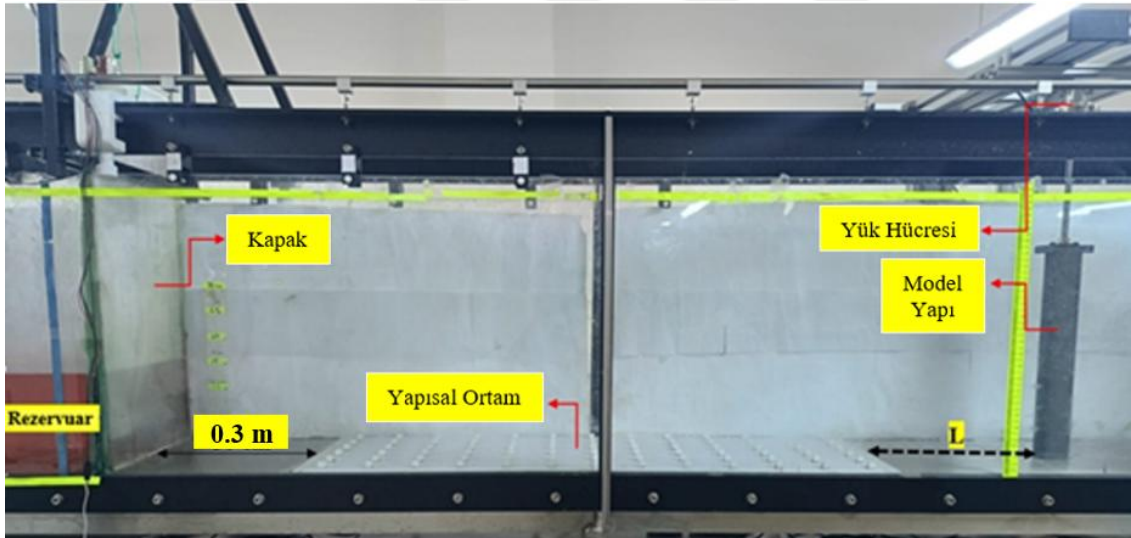


Şekil 3.21. Kanal-1 içerisine yapısal ortamların yerleştirilmesi

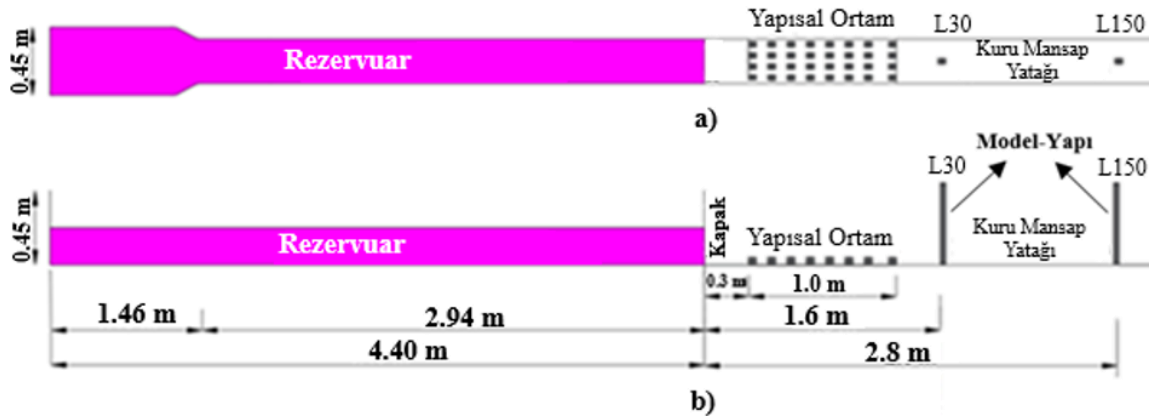


Şekil 3.22. Kanal-1 için deneysel çalışmalarda kullanılan yapısal ortamlara ait şematik görünüm a) plan b) boykesit

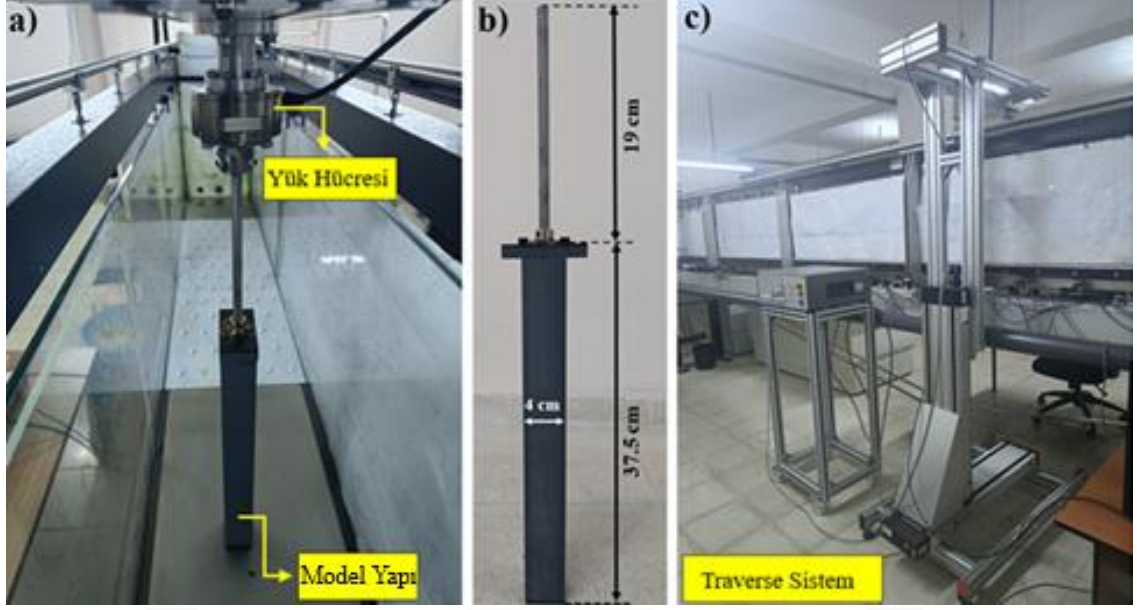
Benzer şekilde, Kanal-2 için üretilen yapısal ortamların kanal içindeki konumları Şekil 3.23 ve Şekil 3.24'te verilmektedir. Burada da yine yapısal ortamlar kapaktan itibaren 30 cm uzaklığa yerleştirilmiş ve bu ortamlardan itibaren mansapta iki farklı mesafeye bir model-yapı yerleştirilerek her bir konum için model-yapı üzerine etkiyen kuvvetin zaman geçmişi yük hücresi yardımıyla ölçülmüştür (Şekil 3.25). Bu tez çalışmasında kullanılan model-yapıdan, taşkına maruz kalan yapıları/binaları temsil etmek amacıyla yararlanılmıştır. Model-yapı, yapısal ortamların mansap ucundan itibaren 30 cm ve 150 cm uzağa (kapaktan itibaren ise sırasıyla 1.6 m ve 2.8 m) yerleştirilmiş ve bu konumlar sırasıyla L30 ve L150 olarak isimlendirilmiştir (Şekil 3.23 ve Şekil 3.24). Böylece, yapısal önlemlerin ve yapısal önlemlerden olan uzaklığın şok dalgasının yıkıcı etkilerini azaltmadaki rolü incelenebilmiştir.



Şekil 3.23. Kanal-2 içerisine yapısal ortamların yerleştirilmesi

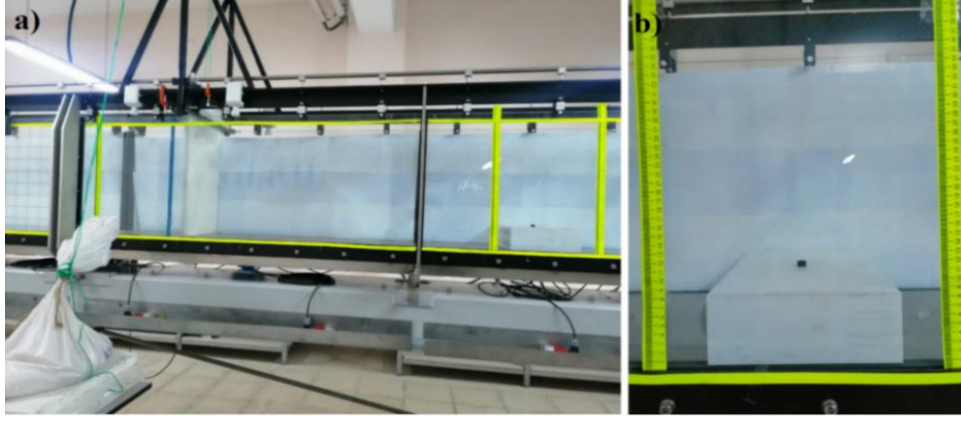


Şekil 3.24. Kanal-2 için deneysel çalışmalarda kullanılan yapısal ortamlara ait şematik görünüm a) plan b) boykesit

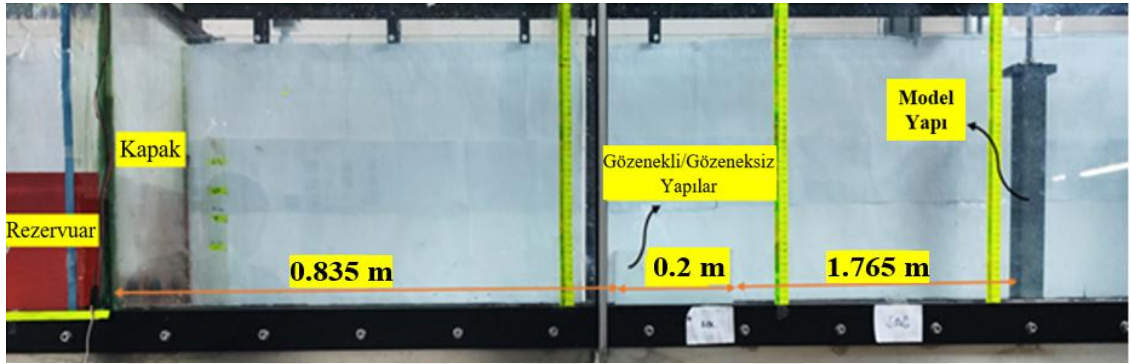


Şekil 3.25. Kuvvet ölçümü a) yük hücresi ve model-yapı b) model-yapı boyutları c) traverse sistemi

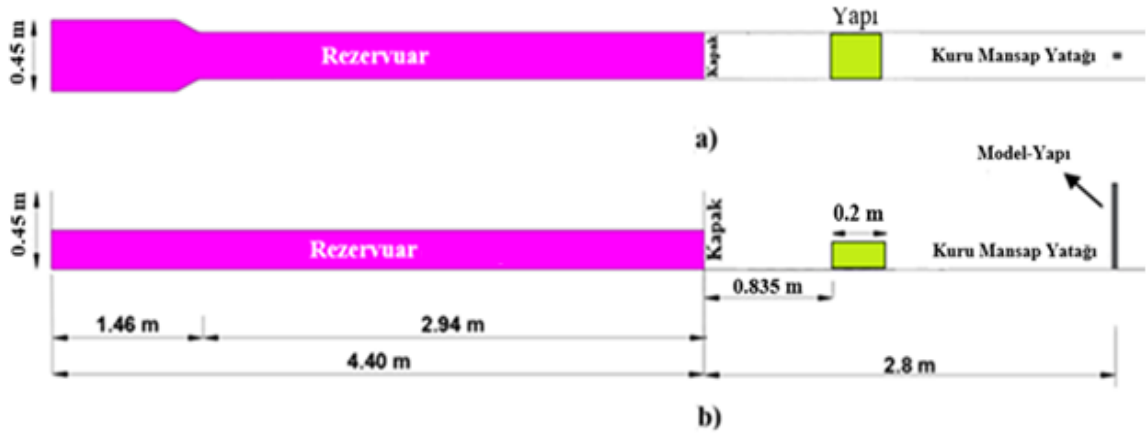
Gözenekli ve gözeneksiz yapılarla ilgili tüm deneyler Kanal-2 üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu yapılar kapaktan itibaren 109 cm uzaklığa yerleştirilerek gözenekli ve gözeneksiz yapıların hemen memba ve mansabında belirlenen noktalarda akım derinlikleri ve memba ve mansap su yüzü profilleri elde edilmiştir. Yapıların giriş ve çıkış noktalarındaki akım derinliklerini ölçmek için yapıların hemen memba ve mansabına şerit metreler yapıştırılmıştır (Şekil 3.26). Daha sonra gözenekli ve gözeneksiz yapıların şok dalgasının yıkıcı etkisini ne derece azalttığını ölçebilmek için bir model-yapı bu yapıların mansabına yerleştirilmiş ve bu model-yapıya etkiyen kuvvetler kanalda gözenekli ve gözeneksiz yapılar olması ve olmaması durumunda ölçülmüştür. Benzer şekilde gözenekli ve gözeneksiz yapıların olması ve olmaması durumunda dalga önü konumu ve model-yapıya şok dalgasının ulaşma süresi ölçülerek bu tür yapısal önlemlerin şok dalgasını ne derece geciktirdiği araştırılmıştır. Deneylerde gözenekli/gözeneksiz yapılar kapaktan itibaren 0.835 m uzaklığa, model-yapı ise 2.8 m (yapıdan sonra ise $L = 1.765$ m) uzaklığa yerleştirilmiştir (Şekil 3.27 ve Şekil 3.28).



Şekil 3.26. Kanal-2'ye ait a) deney kanalının bir bölümü b) yapı memba ve mansabına yerleştirilen şerit metreler



Şekil 3.27. Kanal-2 içerisine gözenekli ve gözeneksiz yapıların yerleştirilmesi

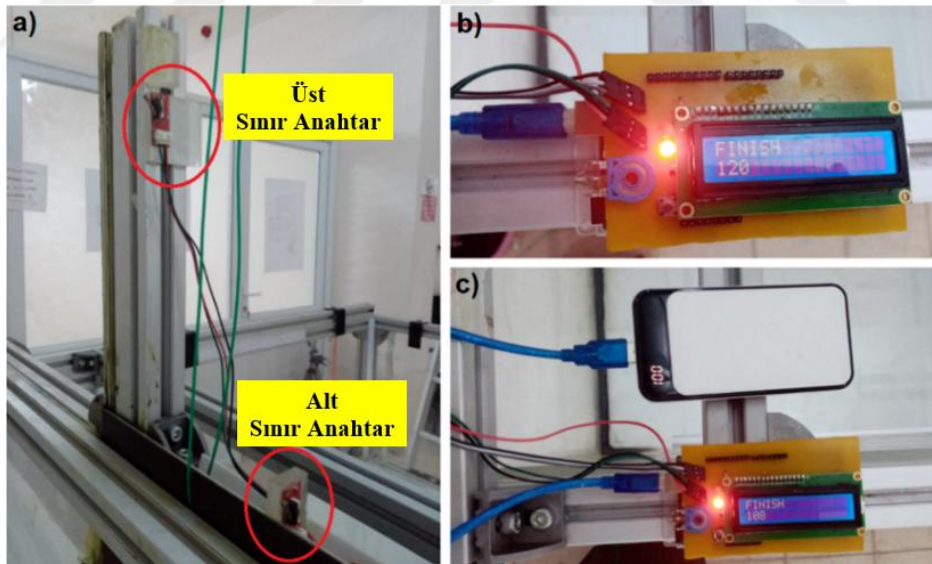


Şekil 3.28. Kanal-2 için deneysel çalışmalarda kullanılan gözenekli ve gözeneksiz yapılara ait şematik görünüm a) plan b) boykesit

3.1.4 Deneysel veri toplama yöntemleri

Bu bölümde kapak açılma süresi, akım derinlikleri, su yüzü profilleri ve kuvvet ölçümünde kullanılan aletler ve yöntemleri açıklanmaktadır.

Kapak açılma süresinin ölçülmesi: Kapağın açılma süresi Erduran vd., (2024a) tarafından belirtildiği şekilde Arduino ve yardımcı elemanlar kullanılarak ölçüldü. Bunun için, öncelikle biri kapak kapalı konumdayken altta diğeri ise kapak açıldığından üstte olmak üzere iki adet sınır anahtarı (limit switch) kullanıldı (Şekil 3.29a). Kapağın alttaki ilk anahtara çapmasından hemen sonra anahtarın aktif hale gelmesiyle başlayan süre kapağın üst tarafındaki ikinci anahtara çarpmasıyla sonlandı ve geçen süre milisaniye cinsinden 2x16'lık bir ekrana yansıtılarak kapağın ortalama açılma süresi belirlendi (Şekil 3.29b). Kapağın ani şekilde açılması sonucunda oluşan titreşimin etkisiyle kapağın üstteki anahtara birden fazla kez çarpması sonucu oluşan hatalı okumalar, yazılım kodlarında yapılan düzenleme ile sadece ilk çarpmanın dikkate alınmasıyla giderildi. Bununla birlikte kapak açılma süreleri kuru durumlar için Lauber ve Hager (1998a) tarafından geliştirilen ve maksimum süre koşulunu veren Denklem (3.1) kullanılarak ıslak durumlar için ise Yang vd., (2020) tarafından geliştirilen ve maksimum süre koşulunu veren Denklem (3.2) kullanılarak hesaplandı. Bu süre deneyler esnasında ölçülen kapak açılma süreleri ile karşılaştırıldı. Böylece deneysel çalışmalardaki baraj yıkılması olayının ani yıkılma koşulunu sağlayıp sağlamadığı belirlendi.



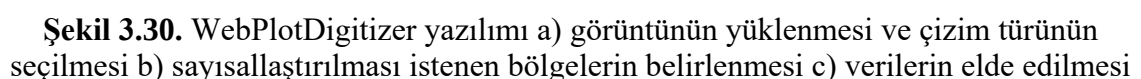
Şekil 3.29. a) Kapak açılma mekanizması ve sınır anahtarlar b) Arduino ve 2x16'lık ekran c) Arduino ve güç kaynağı

$$t_{\text{Açılma Süresi, Kuru}} = 1.25 * \sqrt{h_0/g} \quad (3.1)$$

$$t_{\text{Açılma Süresi, Islak}} = \sqrt{(2 * (h_0 - h_d))/g} \quad (3.2)$$

Akım derinliklerinin ve su yüzü profillerinin ölçülmesi: bu tez çalışmasında akım derinlikleri üç farklı şekilde elde edilmiştir. Birinci yöntemde, deneyler esnasında çekilen video kayıtları yardımcı bir video-çerçeve düzenleme programı aracılığıyla çerçevelere ayrılmış ve daha sonra her bir çerçevedeki su derinliğinin şerit metre üzerindeki yeri tek tek okunarak akım derinliğinin zamanla değişimi elde edilmiştir. Tez kapsamında bu ölçüm yöntemi “şerit metre okuması” olarak isimlendirilmiştir. İkinci yöntemde WebPlotDigitizer yazılımı kullanılmış, üçüncü olarak ise görüntü işleme tekniğinden yararlanılmıştır.

Bu yazılım web tabanlı açık kaynak kodlu ve ücretsiz bir çizim sayısallaştırma yazılımı olarak tanımlanmaktadır (Rohatgi, 2022). Yazılım araştırmacılar tarafından başlangıç ve sınır değerleri bilinen grafik veya görüntülerin sayısallaştırılması amacıyla 2 boyutlu olarak X - Y dağılım, bar veya polar grafikler elde etmek için tercih edilmektedir (Şekil 3.30). Bu tez çalışmasında da taşkın şok dalgasının 1 ve 2 boyutlu su yüzü profillerinin belli zamanlardaki deneysel görüntülerini sayısallaştırmak ve görüntü işleme tekniği sonuçlarına alternatif olması bakımından bu yazılımdan yararlanılmıştır.



Görüntü İşleme Tekniği

Görüntü işleme tekniği, deneysel çalışmalardan elde edilen görüntülerin dijital hale dönüştürülmesi ve sonrasında bu görüntülerin bilgisayar ortamında işlenmesi sürecidir. Bu süreçte, arka plan gürültüsünü giderme, istenmeyen yansımaları kaldırma ve çeşitli filtreleme yöntemleri kullanılabilir. Akıma müdahale etmeyen yöntemlerden biri olan görüntü işleme tekniği, deneysel çalışmaların tekrarlanmasını ortadan kaldırmakta ve bir noktadaki ölçümler ile birlikte istenilen her noktadan ölçüm alınmasına imkân sağlamaktadır (Erduran vd., 2024a). Görüntü işleme tekniği ile zamanla değişen akıma ait görüntünün bir defa alınması ile deneylerin tekrarlanması ortadan kalkmakta ve sadece bir noktadaki ölçümlerin değil aynı zamanda su yüzünün kanal boyunca anlık değişimi de izlenebilmektedir.

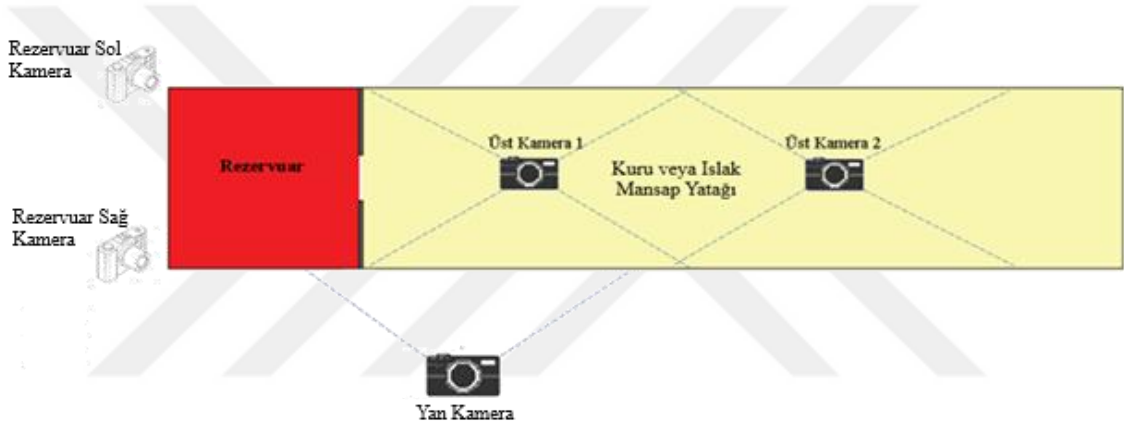
Görüntü işleme tekniği ile akım derinlikleri belirlenmeden önce bir takım ön hazırlık çalışmalarının yapılması gerekmektedir. Bu çalışmalar; video-kamera sisteminin ayarlanması, kamera konumlarının belirlenmesi, kameraların senkronizasyonu ve kalibrasyon çalışmalarını kapsamaktadır.

Bu çalışmada video kayıtlar cep telefonu kameraları kullanılarak alınmıştır. Deneylerde kullanılan kameralar 1280x720p çözünürlükte olup saniyede 30 çerçeve (Frame Per Second-FPS) yakalama özelliğine sahiptir.

Tüm deneylerde taşkın şok dalgasının yayılımının rahat bir şekilde gözlemlenmesi için rezervuardaki su deneye başlamadan önce kırmızı renkli gıda boyası ile renklendirilmiş ve kanalın taban ve sol yan duvarı beyaz renkli kağıtlarla kaplanmıştır. Ayrıca Kanal-1'e ait deney düzeneğinin üst kısmına 2 adet, yan kısmına 1 adet ve rezervuarın arka sağ ve sol köşe kenarlarına birer adet olmak üzere toplam 5 adet telefon kamerası yerleştirilmiştir (Şekil 3.31 ve Şekil 3.32). Bu kameralar aracılığıyla mansabında herhangi bir yapısal önlem olmadan sadece kuru ve ıslak mansap yatağı koşulları altında yatay kanal üzerinde deneysel çalışmalar kayıt altına alınmıştır. Böylece taşkın şok dalgasının yayılımı hem bir noktada hem de bir ve iki boyutlu olarak incelenmiştir.



Şekil 3.31. Kanal-1’ait yapısız ortamlar için deneysel ölçüm noktaları ve kameraların yerleşimi

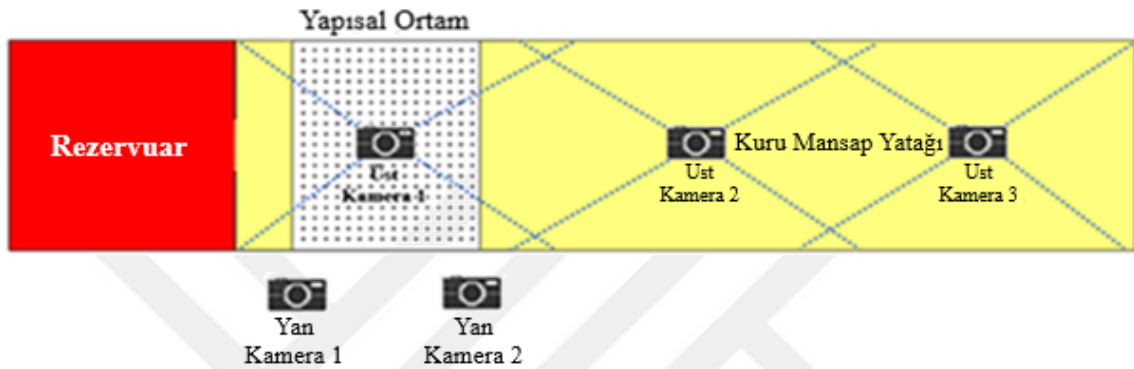


Şekil 3.32. Kanal-1’e ait deney düzeneği ve kameraların konumunu gösteren şematik çizim

Kuru mansap yatağında ve yapısal ortamların olduğu Kanal-1’e ait deneysel kurulumda, yapısal ortamların memba ve mansaplarında bir noktadaki akım derinlikleri 2 adet cep telefonu kamerasıyla izlenmiştir. Aynı düzenek üzerinde iki boyutlu şok dalgasının yayılımı ise kanalı plandan görececek şekilde kanalın üst kısmına yerleştirilen 3 adet cep telefonu kamerası ile kayıt altına alınmıştır (Şekil 3.33 ve Şekil 3.34). Tüm deneylerde üst kameralar birbirlerinin görüş açılarını kesecek şekilde yerleştirilmiş ve kesişim noktalarına yeşil kağıtlar yapıştırılmıştır. Kameralar arasındaki senkronizasyonu sağlamak amacıyla yapıştırılan bu yeşil kağıtlar kesintisiz panoramik görüntülerin elde edilmesinde kullanılmıştır. Bir boyutlu su yüzü profilleri ve bir noktada ölçüm alınan kısımlarda ise tek bir kameraya ait veriler kullanıldığından böyle bir senkronizasyon yapma ihtiyacı duyulmamıştır.

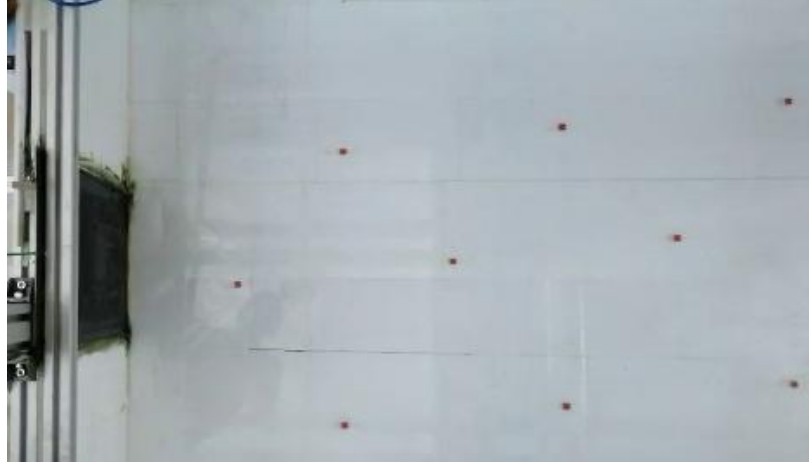


Şekil 3.33. Kanal 1'e ait yapısal ortamlar için deneysel ölçüm noktaları ve kameraların yerleşimi (ÜK: Üst Kamera ve YK: Yan Kamera)

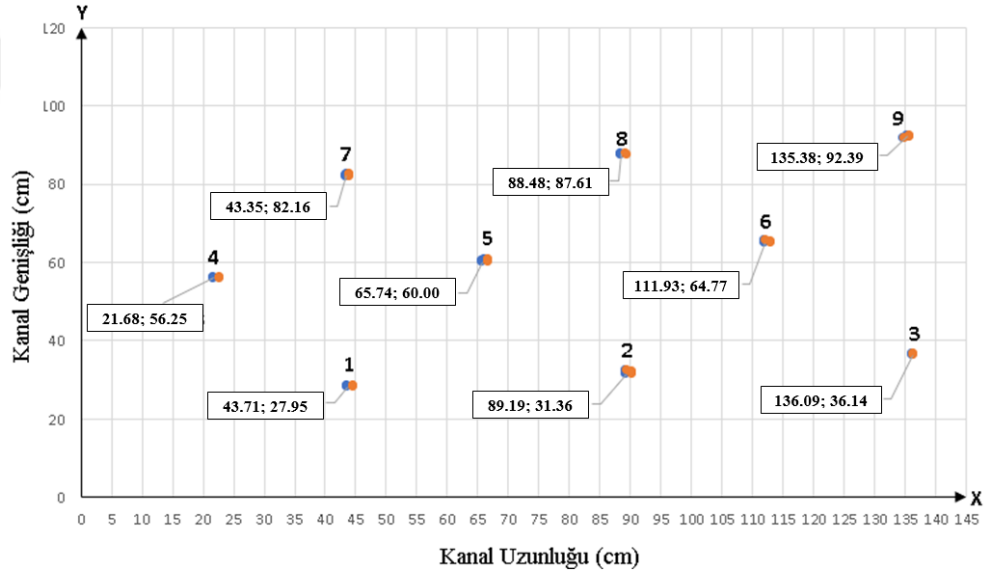


Şekil 3.34. Kanal 1'de yapısal ortamların yerleştirilmesi ve iki boyutlu su yüzü profillerinin ölçülmesinde kullanılan kameraların konumu

Görüntü işleme tekniği ile taşkın şok dalgasına ait yayılımın doğruluğunu tespit etmek amacıyla üst ve yan kameralardan alınan görüntüler için kalibrasyon çalışmaları yapılmıştır. Üst görünüşte hem üst kamera 1 hem de üst kamera 2 için kanal tabanına yerleştirilen ve koordinatları bilinen 9 nokta, yan görünüşte ise 8 nokta için kalibrasyon işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.35 - Şekil 3.40). Kalibrasyon sonrasında X ve Y koordinatlarında ölçülen değerler ile görüntü işleme tekniği ile belirlenen değerler karşılaştırılarak % mutlak bağıl hata değerleri hesaplanmış ve bu değerler her bir nokta için çizelgelerde sırasıyla X^* ve Y^* ile verilmiştir (Çizelge 3.4, Çizelge 3.5 ve Çizelge 3.6). Çizelgelerdeki değerler incelendiğinde ölçülen değerlerle görüntü işleme tekniği kullanılarak elde edilen değerlerin birçok noktada birbirine oldukça yakın sonuçlar verdiği ancak üst ve yan görünüşler için toplam dört noktada; üst kamera 1'de bir noktada %11.8, üst kamera 2'de iki noktada sırasıyla %17.3 ve %11.4 ve yan kamerada bir noktada %5.5 olmak üzere %5'ten daha büyük mutlak bağıl hata verdiği görülmektedir.



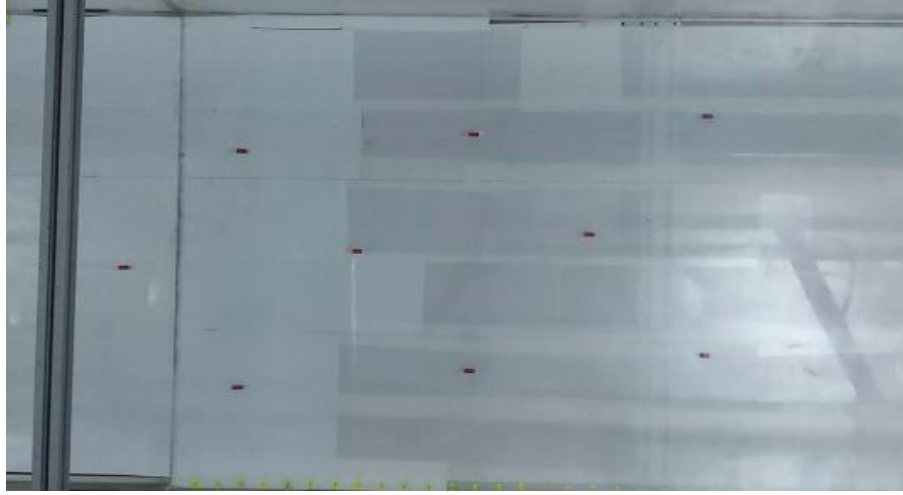
Şekil 3.35. Üst Kamera 1 için belirlenen kalibrasyon noktaları



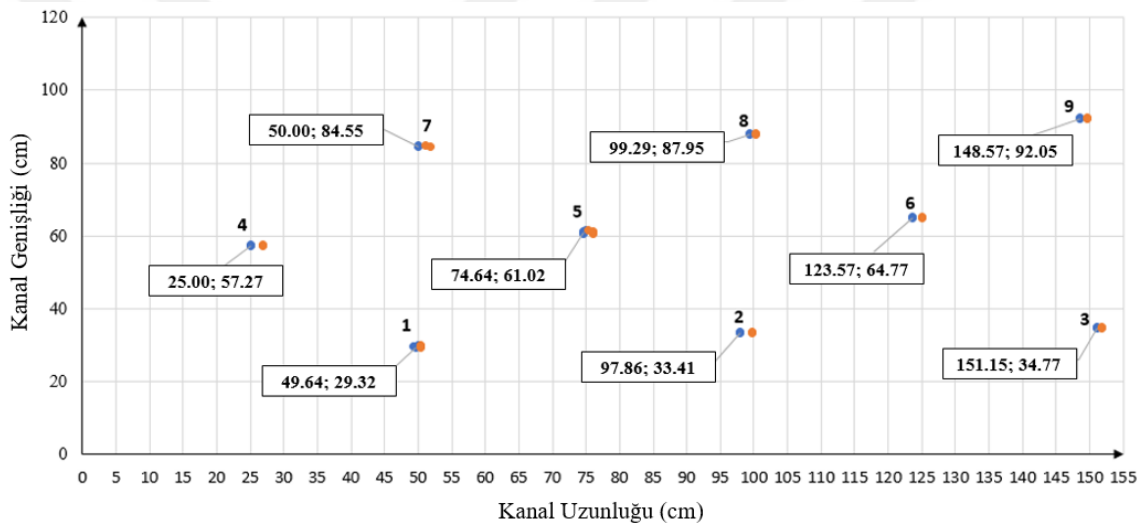
Şekil 3.36. Üst kamera 1 için kalibrasyon çalışmalarında elde edilen değerler

Çizelge 3.4. Üst Kamera 1 için kalibrasyon çalışmalarına ait sonuçlar

Nokta	Ölçülen Değerler (cm)		Görüntü İşleme ile Elde Edilen Değerler (cm)		% Mutlak Bağıl Hata	
	X	Y	X	Y	X *	Y*
1	45	25	43.71	27.95	2.9	11.8
2	90	30	89.19	31.36	0.9	4.5
3	135	35	136.09	36.14	0.8	3.3
4	22,5	55	21.68	56.25	3.6	2.3
5	67,5	60	65.74	60.00	2.6	0.0
6	112,5	65	111.93	64.77	0.5	0.4
7	45	85	43.35	82.16	3.7	3.3
8	90	90	88.48	87.61	1.7	2.7
9	135	95	135.38	92.39	0.3	2.7



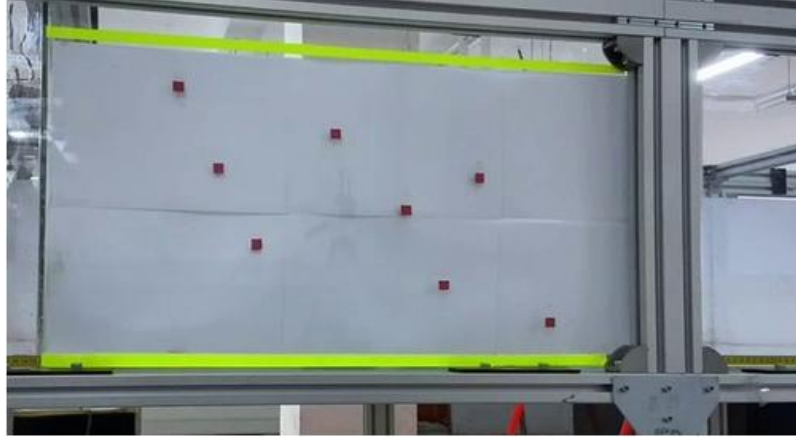
Şekil 3.37. Üst Kamera 2 için belirlenen kalibrasyon noktaları



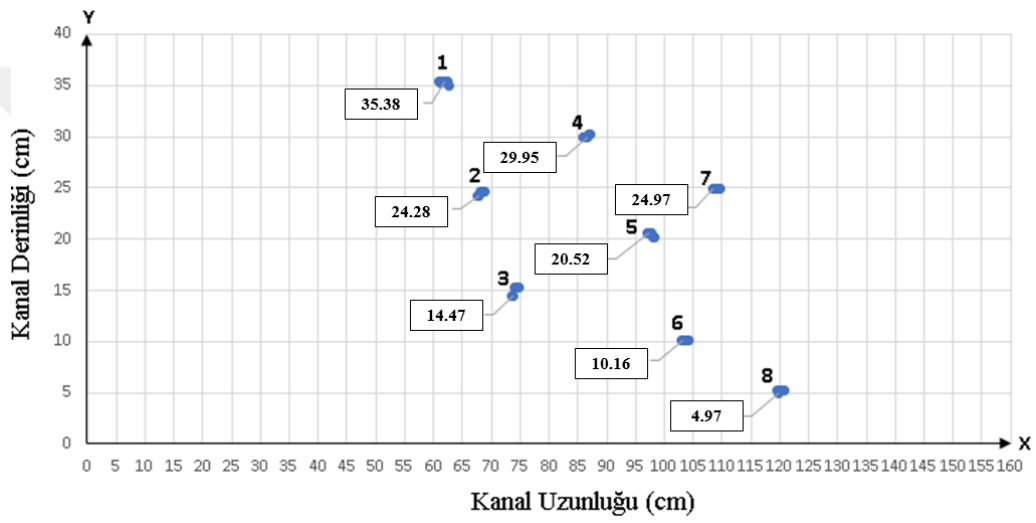
Şekil 3.38. Üst kamera 2 için kalibrasyon çalışmalarında elde edilen değerler

Çizelge 3.5. Üst Kamera 2 için kalibrasyon çalışmalarına ait sonuçlar

Nokta	Ölçülen Değerler (cm)		Görüntü İşleme ile Elde Edilen Değerler (cm)		% Mutlak Bağıl Hata	
	X	Y	X	Y	X*	Y*
1	50	25	49.64	29.32	0.7	17.3
2	100	30	97.86	33.41	2.1	11.4
3	150	35	151.15	34.77	0.8	0.7
4	25	55	25.00	57.27	0.0	4.1
5	75	60	74.64	61.02	0.5	1.7
6	125	65	123.57	64.77	1.1	0.4
7	50	85	50.00	84.55	0.0	0.5
8	100	90	99.29	87.95	0.7	2.3
9	150	95	148.57	92.05	1.0	3.1



Şekil 3.39. Yan görünüş için belirlenen kalibrasyon noktaları



Şekil 3.40. Yan görünüş kalibrasyon çalışmalarında elde edilen değerler

Çizelge 3.6. Yan görünüş kalibrasyon çalışmalarına ait sonuçlar

Nokta	Ölçülen Değer (Yükseklik, cm)	Görüntü İşleme ile Elde Edilen Değer (Yükseklik, cm)	% Mutlak Bağıl Hata
	Y	Y	Y *
1	35	35.38	1.1
2	25	24.28	2.9
3	15	14.17	5.5
4	30	29.95	0.2
5	20	20.52	2.6
6	10	10.16	1.6
7	25	24.97	0.1
8	5	4.97	0.6

Görüntü işleme tekniği ile akım derinliği ölçümleri ve su yüzü profilleri bir noktada, bir boyutlu ve iki boyutlu ölçüm yöntemleri için yazılan üç farklı algoritma ile elde edilmiştir (Erduran vd., 2024a). Bir noktadaki ölçüm yöntemi renk farkına dayalı olarak bir filtre

sistemi oluşturmakta ve yöntem bu filtre içerisinde kalan pikseller içerisinde en yüksekte olanın tespit edilmesi ve çıktı olarak yazılması temeline dayanmaktadır. Bu amaçla, su deneyi başlamadan önce kırmızı renkte gıda boyası ile renklendirilmiş ve kanalın noktasal ölçüm yapılacak kısmı yeşil renkte bir şerit metre ile ayırt edilmiştir. Deneylere ait videolar çerçevelere bölümlenerek her bir çerçeveye ait ilgili noktadaki ölçümlerin alınması için ilk olarak yeşil renk filtresi uygulanarak şeridin görüntü içerisinde bulunduğu pikseller tespit edilmiş, ardından kırmızı renk filtresi uygulanarak ilgili çerçevedeki suyun bulunduğu pikseller tespit edilmiştir (Şekil 3.41). Şerit için seçilen yönde (sağ veya sol) bulunan en düşük piksel değeri en yüksek su değerine karşılık gelecek şekilde ölçümler yapılmıştır. Uygulanan algoritmaya ait kaba kod Algoritma 1’de sunulmaktadır.

Algoritma 1. Bir noktadaki görüntünün sayısallaştırılmasında uygulanan algoritma

Girdiler:

V: Deney videosu

seritmetreYuksekligi: Videodaki şeritmetrenin üst sınırı

videoFPS: Videonun çekildiği saniye başına kare değeri

okumaYonu: Şeritmetrenin hangi yönünde okuma yapılacağı, sağ veya sol

Çıktı:

Yükseklikler: Tüm çerçevelerde ilgili şeritmetre yanında tespit edilen su yüksekliği

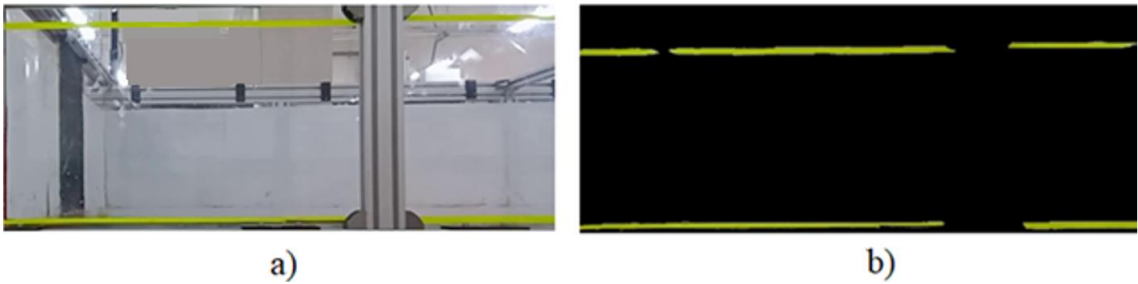
Algoritma:

1. Yükseklikler = []
 2. çerçeveler = çerçeve-çıkart(V, videoFPS)
 3. **for each** çerçeve **in** çerçeveler
 4. [XMin, XMax, YMin, YMax] = seritmetre-sinir-bul(çerçeve, maskeYesil)
 5. **if** okumaYonu == "sol":
 6. çerçeve = çerçeve[XMin:XMax, YMin-6:YMin-1]
 7. **else:**
 8. çerçeve = çerçeve[XMin:XMax, YMax+1:YMax+6]
 9. **end if**
 10. çerçeve_yukseklık = XMax - XMin
 11. kirmiziPikseller = kirmizi-piksel-bul(çerçeve, maskeKirmizi)
 12. XMinKirmizi = min-x(kirmiziPikseller)
 13. suYuksekligiPiksel = çerçeve_yukseklık - XMinKirmizi
 14. suYuksekligiCm = (suYuksekligiPiksel * *seritmetreYuksekligi*) / çerçeve_yukseklık
 15. Yükseklikler ← suYuksekligiCm
 16. **end for**
 17. **return** Yükseklikler
-

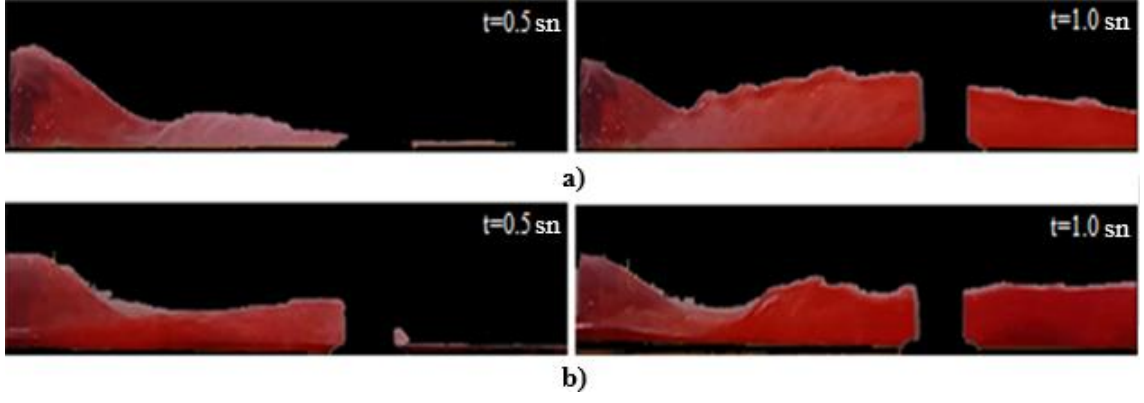


Şekil 3.41. Rezervuar arka köşe noktalarında bir noktadaki ölçümler için filtrelenmiş görüntüler

Bir boyutlu görüntünün sayısallaştırılması yönteminde şok dalgasının kanal içerisinde yayılımını gösteren su yüzü profili için görüntü işleme tekniğinden yararlanılmıştır. Yöntemde ilk olarak kanal içerisinde su yüksekliklerinin ölçülebilmesi için kanalın sağ yan cam yüzeyi üzerine 0. ve 40. cm'lere yeşil renkte işaretleyici şeritler yerleştirilmiştir. Birinci şerit kanalın en altına, ikinci şerit ise kanal üzerinde 40 cm yüksekliğe yapıştırılmıştır (Şekil 3.42). Bu iki yeşil şerit aracılığıyla şok dalgasının kanal içerisinde farklı noktalardaki ilerleyişine ait yüksekliklerin doğru bir şekilde sayısallaştırılması sağlanmıştır. Yeşil şeritlerin kullanılması, renk filtresi kullanarak ilgili noktaların doğru bir şekilde tespit edilmesi amacıyla seçilmiştir (Şekil 3.42). Benzer şekilde suyun daha net olarak tanımlanabilmesi için rezervuardaki su kırmızı gıda boyasıyla renklendirilmiş ve kırmızı renk filtresi kullanılarak suyun kanal içerisindeki ilerleyişi takip edilebilmiştir (Şekil 3.43). Yan görünüş için geliştirilen algoritmaya ait kaba kod Algoritma 2'de verilmektedir.



Şekil 3.42. Bir boyutlu görüntü elde etmede kullanılan yan kameraya ait a) deneysel görüntü b) yeşil renkli şeritlerin filtrelenmesi



Şekil 3.43. Bir boyutlu görüntü elde etmede kullanılan yan kameraya ait görüntünün kırmızı renk filtresiyle filtrelenmesi a) kuru durum b) ıslak durum

Algoritma 2. Bir boyutlu görüntünün sayısallaştırılmasında uygulanan algoritma

Girdiler:

V: Deney videosu

yukseklık: Kanaldaki yeşil işaretleyiciler arası yükseklik

videoFPS: Videonun çekildiği saniye başına kare değeri

Çıktı:

KirmiziMinMax: Kanal boyunca su yükseklikleri

Algoritma:

1. pikselYukseklıkleri = []
 2. çerçeveler = çerçeve-çıkart(V, videoFPS)
 3. **for each** çerçeve **in** çerçeveler
 4. yesilPikseller = yeşil-piksel-bul(çerçeve, maskeYesil)
 5. **for each** sutun **in** çerçeve
 6. [XMin, XMax] = minmax-yesil-bul(yesilPikseller)
 7. sutunPikselYukseklığıCm = $yukseklık / (XMax - XMin)$
 8. pikselYukseklıkleri.add(sutun, sutunPikselYukseklığı, XMin, XMax)
 9. **end for**
 10. kirmiziPikseller = kirmizi-piksel-bul(çerçeve, maskeKirmizi)
 11. **for each** sutun **in** pikselYukseklıkleri
 12. **if** sutun.contains(kirmiziPikseller)
 13. XMinKirmizi = min-x(kirmiziPikseller, sutun)
 14. suYukseklığıPiksel = sutun.XMin – XMinKirmizi
 15. suYukseklığıCm = sutun. sutunPikselYukseklığıCm *
 suYukseklığıPiksel
 16. dosyaya-yaz(KirmiziMinMax, sutun, suYukseklığıCm)
 17. **end if**
 18. **end for**
 19. **end for**
 20. **return** KirmiziMinMax
-

İki boyutlu görüntünün sayısallaştırılması için ise kanal tabanına yeşil renkte işaretleyici kâğıtlar yerleştirilmiştir. Üst kamera 1 için birinci kağıt kapak hizasındaki ilk noktaya, ikinci kağıt ise kapaktan itibaren 140 cm uzaklığa yerleştirilmiştir. Bu iki yeşil işaretleyici aracılığıyla suyun kanal içerisindeki ilerleyişinin doğru bir şekilde sayısallaştırılması sağlanmıştır. Aynı şekilde üst kamera 2 ve üst kamera 3 için de benzer şekilde kanal tabanına aralarındaki mesafe sırasıyla 200 cm ve 136 cm olacak şekilde yeşil kağıtlar yapıştırılmıştır (Şekil 3.44 ve Şekil 3.45). Burada da, bir boyutlu kullanımda olduğu gibi aynı amaçla yeşil işaretleyiciler, kırmızı gıda boyası ve renk filtresi kullanılmıştır (Şekil 3.46). Üst görünüş için geliştirilen algoritmaya ait kaba kod Algoritma 3’te verilmektedir.

Algoritma 3. İki boyutlu görüntünün sayısallaştırılmasında uygulanan algoritma

Girdiler:

V: Deney videosu

genislik: Kanaldaki yeşil işaretleyiciler arası mesafe

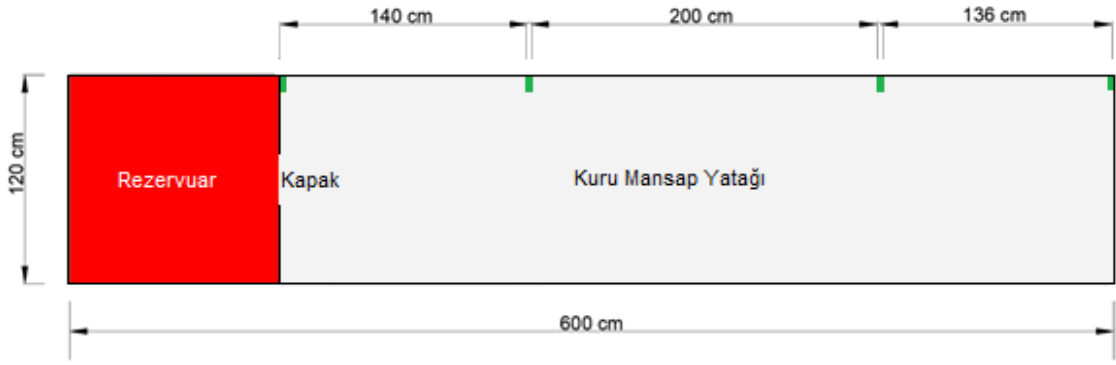
videoFPS: Videonun çekildiği saniye başına kare değeri

Çıktı:

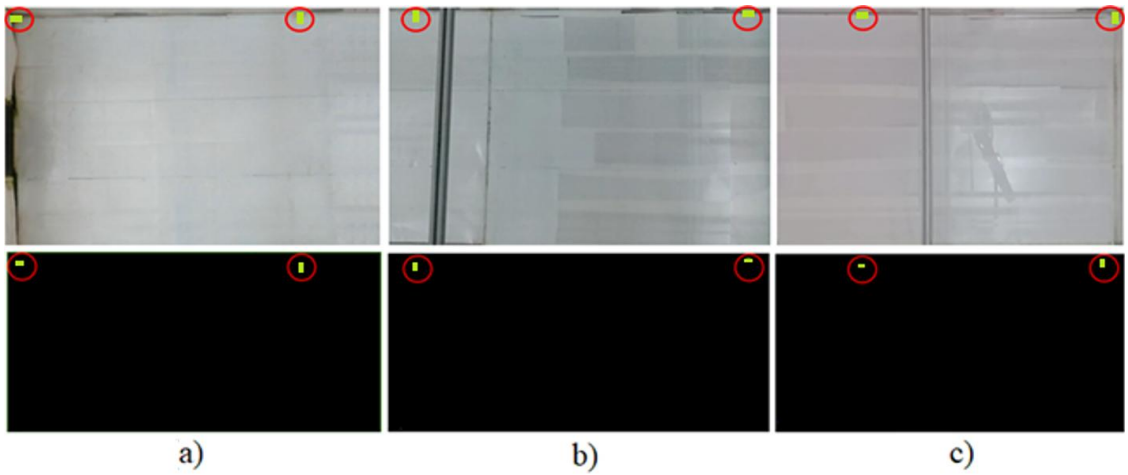
KirmiziMinMax: Her bir satıra ait minimum ve maksimum su ilerlemesini tutan dosya

Algoritma:

1. çerçeveler = çerçeve-çıkar(V, videoFPS)
 2. **for each** çerçeve **in** çerçeveler
 3. yesilPikseller = yeşil-piksel-bul(çerçeve, maskeYesil)
 4. [YMin, YMax] = minmax-yesil-bul(yesilPikseller)
 5. pikselUzunluguCm = genişlik / (YMax - YMin)
 6. kirpilmisCerceve = çerçeve[:, YMin:YMax]
 7. kirmiziPikseller = kirmizi-piksel-bul(kirpilmisCerceve, maskeKirmizi)
 8. **for each** satir **in** kirpilmisCerceve
 9. [XMin, XMax] = minmax-kirmizi-bul(satir)
 10. XMaxCm = (kirpilmisCerceve.genislik - XMax) * pikselUzunluguCm
 11. XMinCm = (kirpilmisCerceve.genislik - XMin) * pikselUzunluguCm
 12. dosyaya-yaz(KirmiziMinMax, satir, XMaxCm, XMinCm)
 13. **end for**
 14. **end for**
 15. **return** KirmiziMinMax
-



Şekil 3.44. İki boyutlu görüntü elde etmede kullanılan Kanal-1'e ait plan görünümü ve yeşil renkli işaretleyicilerin yerleşimi



Şekil 3.45. İki boyutlu görüntü elde etmede kullanılan Kanal-1'e ait görüntüler ve yeşil renkli işaretleyicilerin filtrelenmesi a) üst kamera 1 b) üst kamera 2 c) üst kamera 3

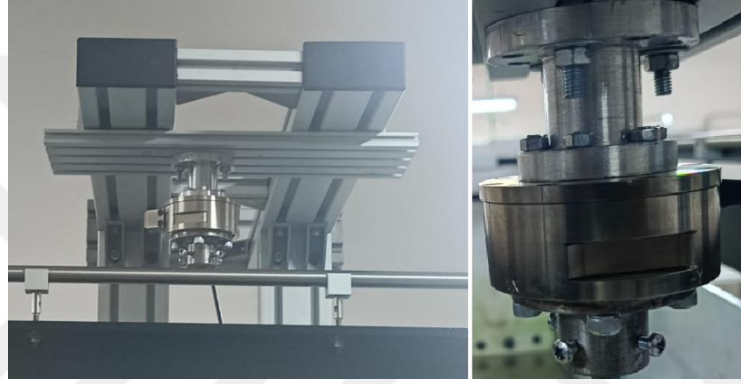


Şekil 3.46. 102 ms kapak açılma süresi ve belli zamanlar için kırmızı renkli suyun filtrelenmesi a) üst kamera 1 b) üst kamera 2 c) üst kamera 3

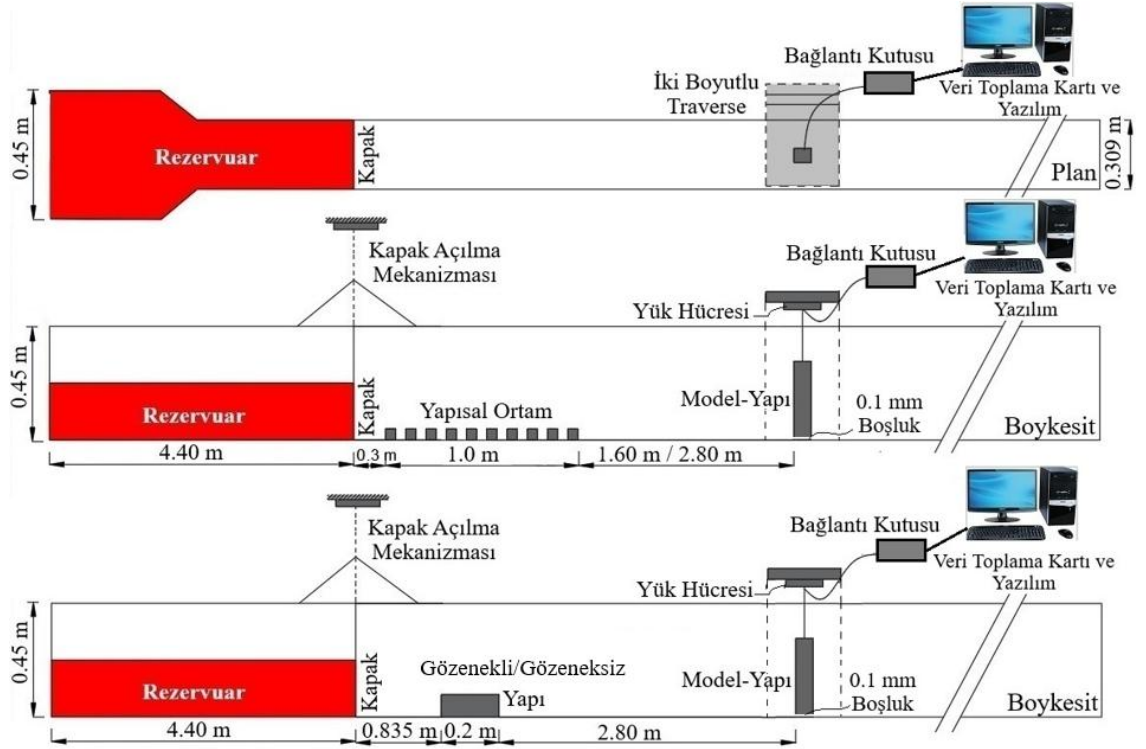
Kuvvet ölçümleri: Deneylerde yatay kuvvetler ATI Mark Gamma SI-32-2.5 model numaralı yük hücresi yardımıyla ölçülmüştür (Şekil 3.47 ve Şekil 3.48). Bu yük hücresi altı bileşenli olup x , y ve z yönlerinde kuvvet ve moment ölçümü yapabilmektedir. Yük hücresinin çapı 75.4 mm ve yüksekliği 33.3 mm'dir. Yatay yöndeki kuvvetlerde (F_x ve F_y) ± 32 N'a kadar düşey yöndeki (F_z) kuvvette ise ± 100 N'a kadar ölçüm

yapabilmektedir. Aynı zamanda üç eksen de momenti ± 2.5 Nm'ye kadar ölçebilmektedir. Yük hücresinden elde edilen veriler ise yük hücresinin ATIDAQ yazılımı kullanılarak NI PCIe-6323 DAQ kart veri toplama sistemi ile bilgisayara aktarılmaktadır (Şekil 3.48).

Deneylerde yük hücresiden saniyede 1000 veri alınmış ve yük hücresinin kanal içinde istenilen doğrultuda hareket ettirilebilmesi için yük hücresi bilgisayar kontrollü Dantec 41T32 model, x ve y yönlerinde 610 mm x 610 mm aralığında hareket edebilen traverse sistemine bağlanmıştır (Şekil 3.25c). Böylece model-yapının kanal tabanına temas etmeden kanal tabanına en yakın mesafeye hassas bir şekilde sabitlenmesi sağlanmıştır.

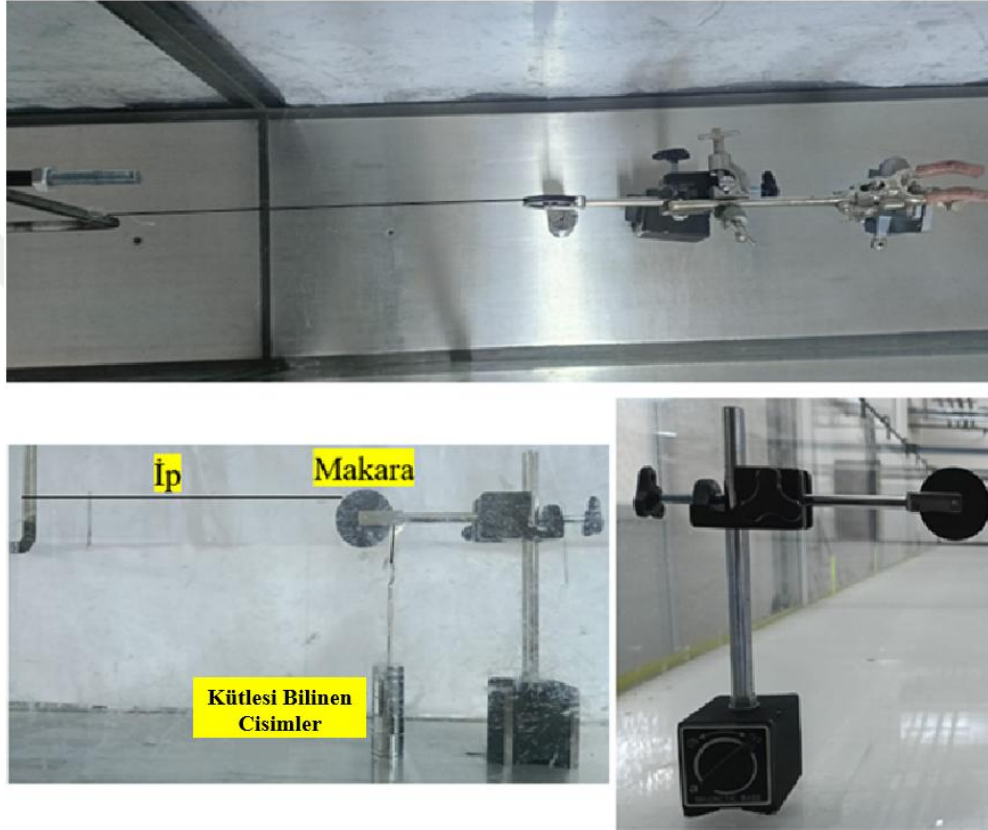


Şekil 3.47. USA ATI mark GAMMA model SI-32-2.5 yük hücresi



Şekil 3.48. Deneysel kurulum ve yük hücresine ait şematik çizim

Yük hücresinin açı ayarlaması ise Şekil 3.49’da gösterildiği gibi bir makara ve ucuna ipe bağlanmış kütlesi belli cisimler aracılığıyla yapılmıştır. Burada ipin bir ucu yük hücresine bağlı olan çubuğa, diğer ucu ise bir makaradan geçen cisimlere bağlı olacak şekilde bir sistem oluşturulmuştur. Daha sonra cisimlerin bilinen toplam kütlesi yerçekimi ivmesiyle çarpılarak kuvvete dönüştürülmüş ve yük hücresinden okunan yatay kuvvet değerleriyle karşılaştırılmıştır. Bu şekilde yük hücresinin açı kalibrasyon testi yapılmıştır.



Şekil 3.49. Yük hücresi açı kalibrasyon testi

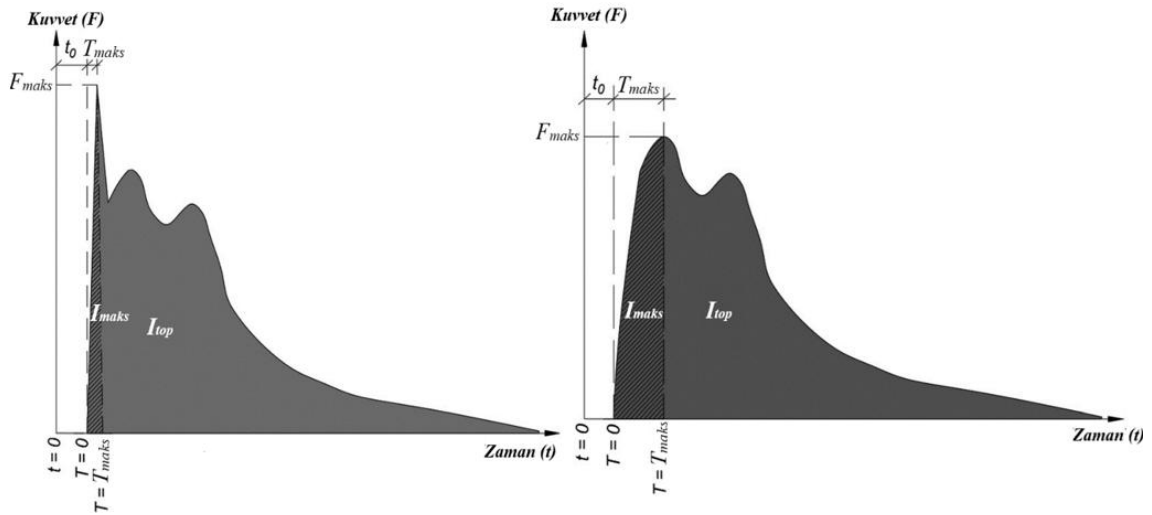
Kuvvet şiddetinin hesaplanması: 25 sn boyunca model-yapı üzerine etkiyen kuvvet şiddeti, Erduran vd., (2025) tarafından önerilen Denklem (3.3) kullanılarak hesaplanmıştır. Tüm deneylerde veriler 0.001 sn aralıklarla alınmıştır.

$$\dot{I} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i * F_i}{\sum_{i=1}^n T_i} \quad (3.3)$$

Burada; $\dot{I}$: kuvvet şiddetini, T_i : i . andaki zamanı, F_i : i . andaki kuvveti ve n toplam zaman adımı sayısını ifade etmektedir.

Toplam impuls ve maksimum impuls'un hesaplanması: Wüthrich vd., (2018a) ve Erduran vd., (2025)'nin çalışmalarında kullanılan bağıntılar (Denklem 3.4) örnek alınarak toplam impuls (I_{top}), maksimum impuls (I_{maks}) ve maksimum impulsun toplam impulsa oranı (I^*) yardımıyla ilave kuvvet analizi yapılmıştır . Burada toplam impuls kuvvet-zaman grafiğinin altında kalan tüm alanı, maksimum impuls ise kuvvetin maksimuma ulaştığı ana kadar olan grafiğin altında kalan alanı temsil etmektedir (Şekil 3.50).

$$I_{top} = \int_0^{T_{top.}} F(T) dT; \quad I_{maks} = \int_0^{T_{maks.}} F(T) dT; \quad I^* = \frac{I_{maks}}{I_{top}} \quad (3.4)$$



Şekil 3.50. İmpuls hesaplamasında kullanılan parametrelerin şematik gösterimi (Erduran vd., 2025)

3.1.5 Deneylerin yapılışı

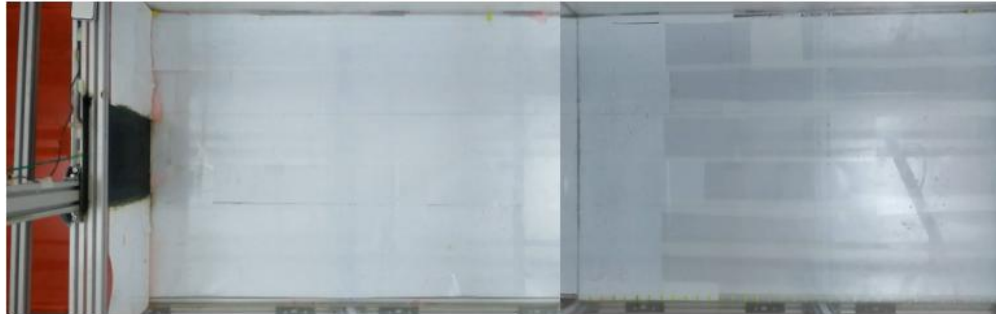
Bu bölümde öncelikle kuru ve ıslak mansap yatağı olması durumunda yürütülen kısmi baraj yıkılması deneylerinin yapılışı anlatılmaktadır. Daha sonra ise sırasıyla yapısal ortamların kısmi ve tam baraj yıkılması deneylerindeki kullanımı ile gözenekli ve gözeneksiz yapıların tam baraj yıkılması deneylerindeki kullanımı açıklanmaktadır.

Kuru ve ıslak mansap yatağı durumunda kısmi baraj yıkılması deneyleri: Bu bölümde mansap yatağının kuru ve ıslak olması durumunda, farklı başlangıç rezervuar su seviyeleri için Kanal-1 üzerinde kısmi baraj yıkılması problemi incelenmiştir. Çalışmalara ait başlangıç akım şartları Çizelge 3.7'de verilmektedir.

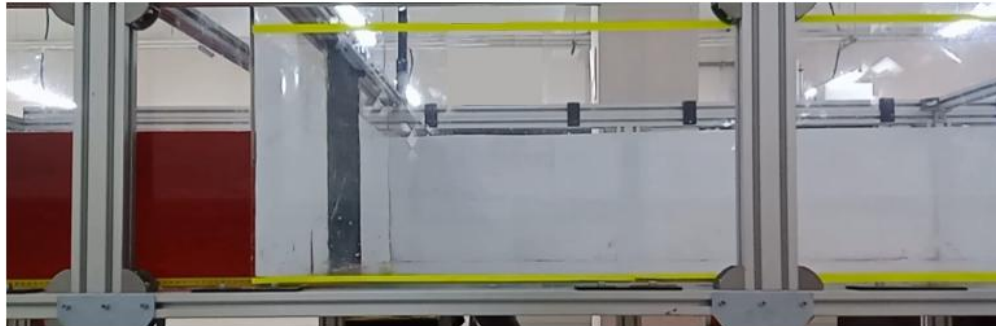
Deneyler öncelikle yatay kanalda, kuru mansap yatağında ve başlangıç rezervuar su seviyesinin 25 cm ve 30 cm olduğu durumlar için ayrı ayrı yürütülmüştür (Şekil 3.51 ve Şekil 3.52). Deneyler esnasında başlangıçta gıda boyasıyla renklendirilen ve rezervuardaki suyun ani olarak serbest bırakılmasıyla oluşan şok dalgasının yayılımı kayıt altına alınmış ve elde edilen bu kayıtlar bahsedilen akım derinliği ölçüm teknikleri ile sayısal değerlere dönüştürülmüştür. Deneylerde kapağın açılması için 15 kg kütleli bir yük 70 cm yükseklikten serbest bırakılarak düşürülmüş ve bu sayede kapağın ani olarak açılması sağlanmıştır. Kapağın açılma süresi milisaniye (ms) cinsinden Arduino ile belirlenmiştir.

Çizelge 3.7. Kısmi baraj yıkılması durumuna ait deneysel ve sayısal çalışmalarda göz önüne alınan başlangıç akım şartları

Durum	Rezervuar (Memba) Su Seviyesi (cm)	Mansap Su Seviyesi (cm)	Mansap/Memba Su Derinliği Oranı
K1 (Kuru)	25	0	0
K2 (Kuru)	30	0	0
I1 (Islak)	25	2.5	0.1
I2 (Islak)	30	3.0	0.1

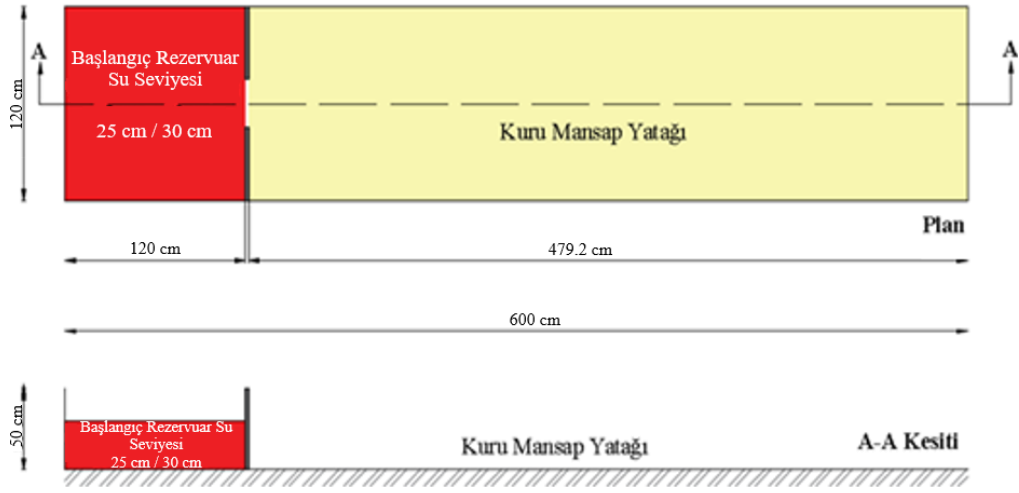


a)



b)

Şekil 3.51. Kanal-1'in bir bölümüne ait kuru mansap yatağı a) üst görünüş b) yan görünüş

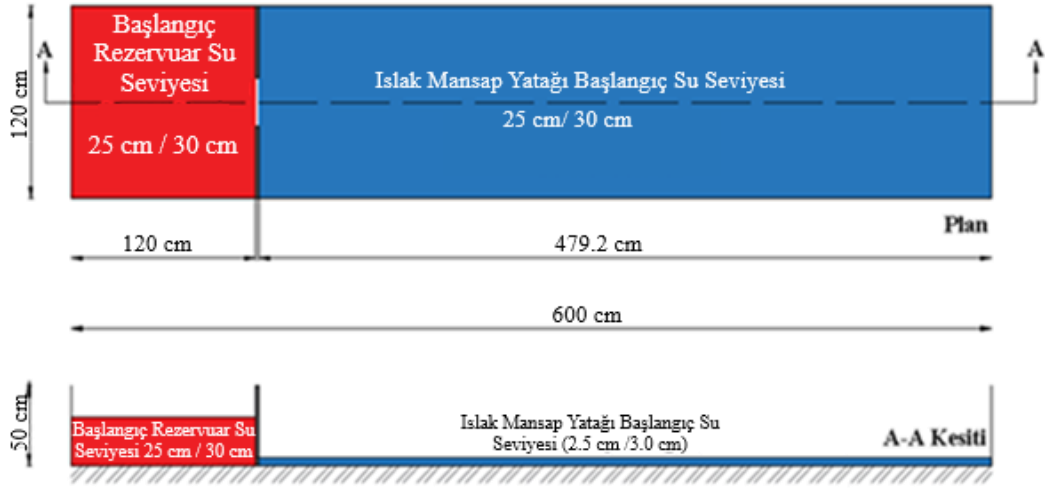


Şekil 3.52. Kanal-1'e ait kuru mansap yatağı ve başlangıç rezervuar su seviyesinin şematik gösterimi

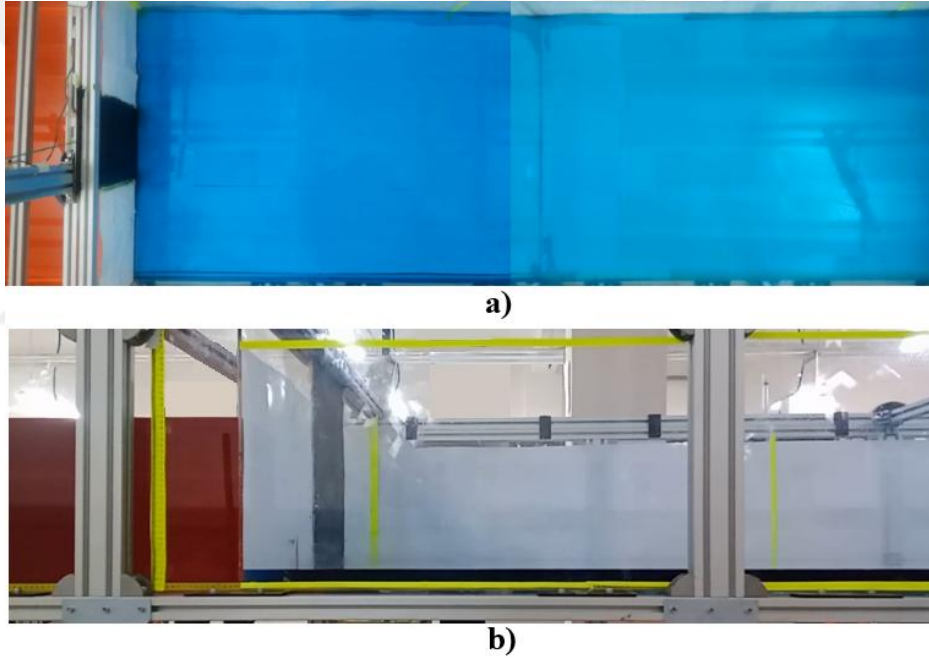
Islak mansap yatağı koşullarında kısmi baraj yıkılması problemini incelemek için Kanal-1'in mansap ucu pleksiglas malzeme ile kapatılmıştır (Şekil 3.53). Daha sonra, başlangıçta rezervuar seviyesi sırasıyla 25 cm ve 30 cm yüksekliğinde su ile mansap kısmı ise sırasıyla 2.5 cm ve 3.0 cm yüksekliğinde su ile doldurularak iki ayrı deney yapılmıştır. Dolayısıyla deneylerin başlangıcında mansap/memba su derinliği oranı 0.1 olacak şekilde deneyler gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.54). Deneylerde rezervuar ve mansaptaki suyun görüntü işleme tekniği ile daha iyi yakalanması için başlangıçta rezervuardaki suya kırmızı, mansaptaki suya ise mavi renkli gıda boyası eklenerek renk farkından yararlanılmıştır (Şekil 3.55). Yine bu çalışmada da deneysel çalışmaların izlenmesi için kuru durumda olduğu gibi 5 adet telefon kamerası kullanılmış ve kapağın açılma şekli kuru durumda olduğu gibi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.53. Islak mansap yatağı deneyleri için Kanal-1'e ait mansap ucunun pleksiglas ile kapatılması



Şekil 3.54. Kanal-1'e ait ıslak mansap yatağı ve başlangıç rezervuar su seviyesinin şematik gösterimi

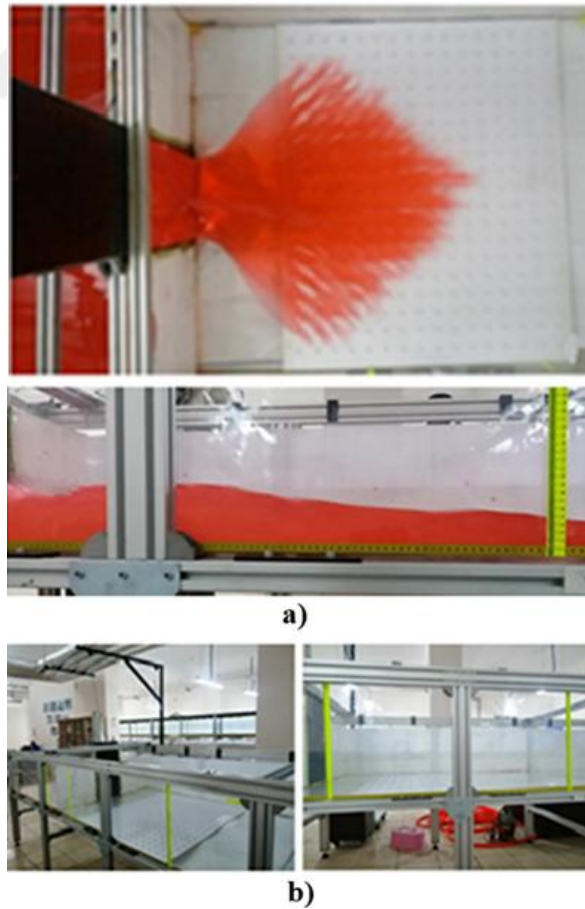


Şekil 3.55. Kanal-1'in bir bölümüne ait ıslak mansap yatağı a) üst görünüş b) yan görünüş

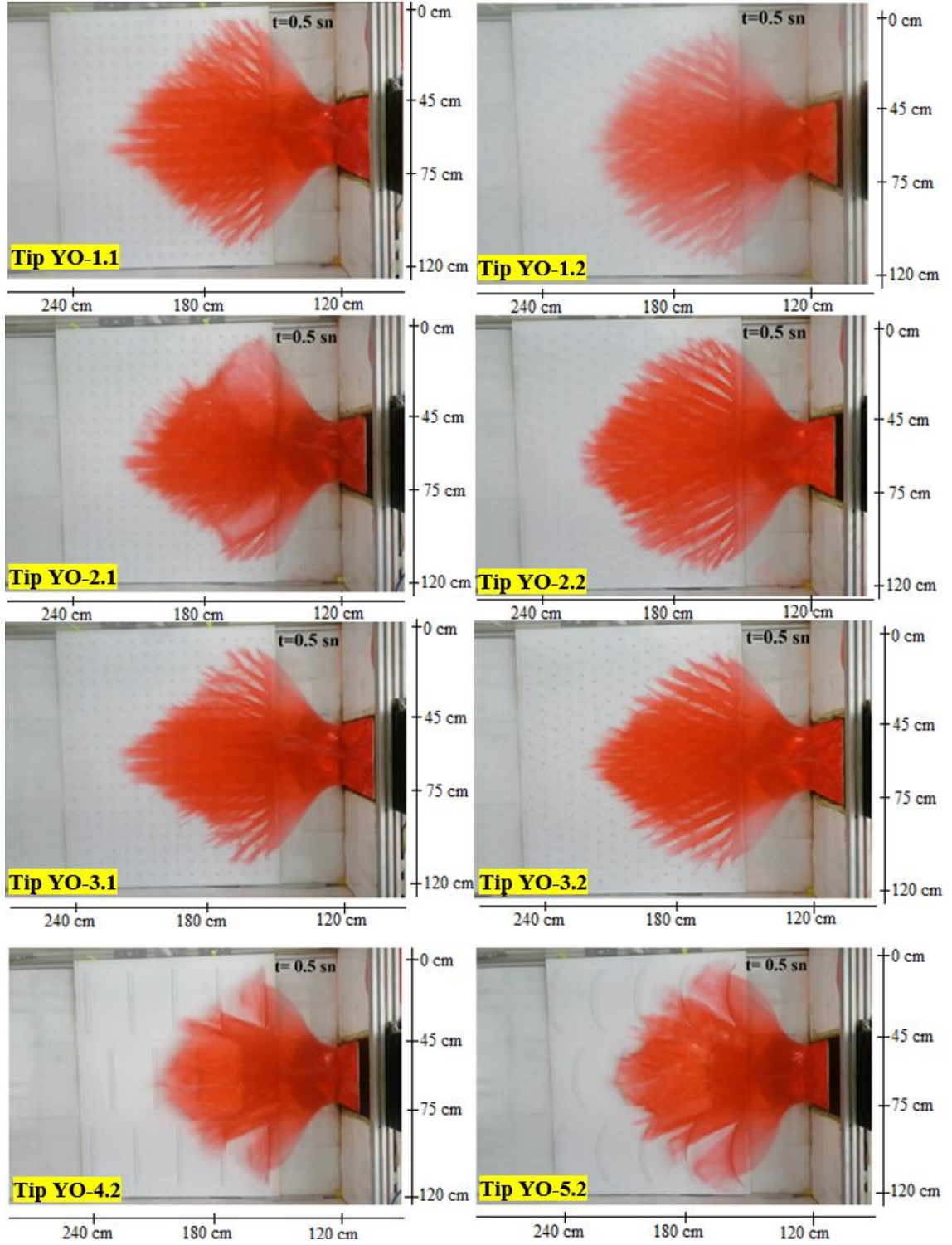
Yapısal ortamların kısmi ve tam baraj yıkılması deneylerinde kullanımı: Yapısal elemanlar kullanılarak oluşturulan ortamlara ait kısmi baraj yıkılması deneyleri Kanal-1 üzerinde yürütülmüştür. Deneyler başlangıç rezervuar su seviyesi 25 cm, kuru mansap yatağı ve yatay bir kanal üzerinde farklı tipte yapısal ortamlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerde rezervuardaki su daha önce belirtildiği gibi aynı amaç doğrultusunda deneyin başında kırmızı renkli gıda boyası ile renklendirilmiş ve yapısal ortamlar kanal tabanına uygun olacak şekilde beyaz renkte üretilerek deney düzeneğinin üst kısmına 3 adet telefon kamerası yerleştirilmiştir. Bu kameralar aracılığıyla deneysel

alışmalar kayıt altına alınmış ve taşkın şok dalgasının yayılımı iki boyutlu olarak incelenmiştir. Bununla birlikte yine kanalın yan tarafına yerleştirilen ve yapısal ortamın memba ve mansabındaki akım derinliklerinin zamanla değişimini elde etmek için 2 adet telefon kamerası daha kullanılarak video kayıtları alınmıştır. Daha sonra elde edilen tüm bu kayıtlar görüntü işleme tekniği yardımıyla sayısal değerlere dönüştürülmüştür. Böylece yapısal ortamlar etrafında taşkın şok dalgasının yayılımını gösterir su yüzü profilleri ve yapısal ortamların memba ve mansabında belirlenen noktalardaki akım derinliklerinin zamanla değişimi elde edilmiştir. Deneysel alışmalar sırasında elde edilen bir ve iki boyutlu su yüzü profilleri ile ölçüm alınan noktalar (yeşil şerit metreler), kanal tabanında Tip YO-3.1 olması durumu için şekil 3.56'da gösterilmiştir.

Deneylerde kapağın ani olarak açılması daha önceki çalışmalarda belirtildiği gibi gerçekleştirilmiş ve yapısal ortamlar kapaktan itibaren 30 cm uzaklığa yerleştirilmiştir. Kanal 1'de farklı yapısal ortamlar kullanılarak gerçekleştirilen deneylere ait görüntüler şekil 3.57'de verilmektedir.



şekil 3.56. Kanal-1'de yapısal ortam (Tip YO-3.1) kullanımı ve kısmi baraj yıkılması deneyine ait görseller a) su yüzü profilleri b) lm noktaları

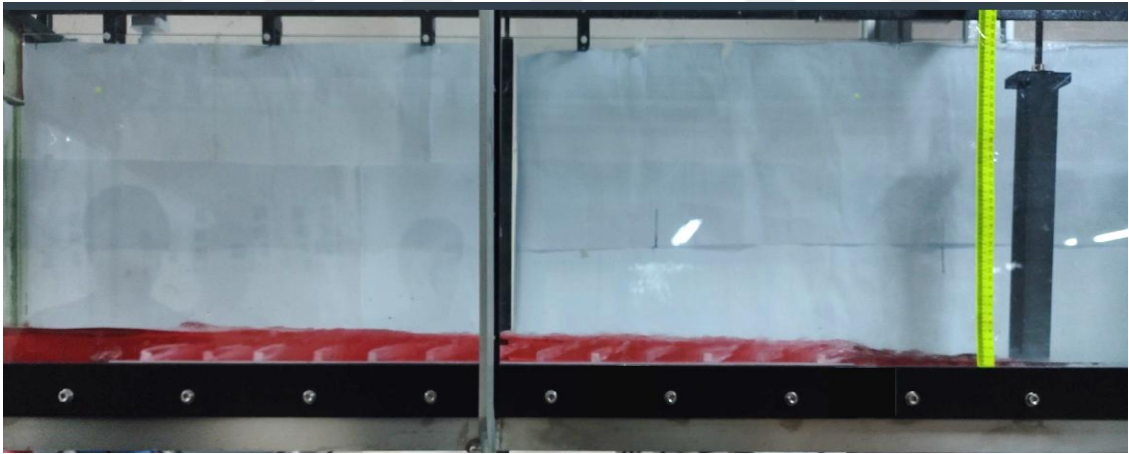


Şekil 3.57. Kanal-1’de farklı şekillerde prizmatik elemanlarla oluşturulan yapısal ortamlar kullanılarak gerçekleştirilen kısmi baraj yıkılması deneylerine ait görüntüler

Yapısal ortamlar kullanılarak gerçekleştirilen tam baraj yıkılması deneyleri; yatay kanal tabanı ve kuru mansap yatağı koşullarında Kanal-2 üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deneyler esnasında şok dalgasının bir boyutlu yayılımını izlemek için bir adet cep telefonu kamerası kullanılarak video kayıtları alınmıştır. Deneylerde baraj gövdesini

temsil eden 8 mm kalınlıındaki kapak, makara sistemine bağı 10 kg kütleli bir yükün 40 cm yüksekliğe sabitlenmiş bir platformdan serbest şekilde düşürölmesiyle açılmıştır. Kapağıın ani açılması sonucu serbest kalan rezervuardaki suyun oluşturduğu şok dalgası yapısal ortamlardan geçerek bir model-yapı üzerine çarptırılmıştır (Şekil 3.58). Model-yapıya etkiyen yatay kuvvetler farklı başlangıç rezervuar su seviyeleri, yapısal ortam tipleri ve model-yapı konumları dikkate alınarak her bir durum için ayrı ayrı yük hücresi yardımıyla ölçölmüştür.

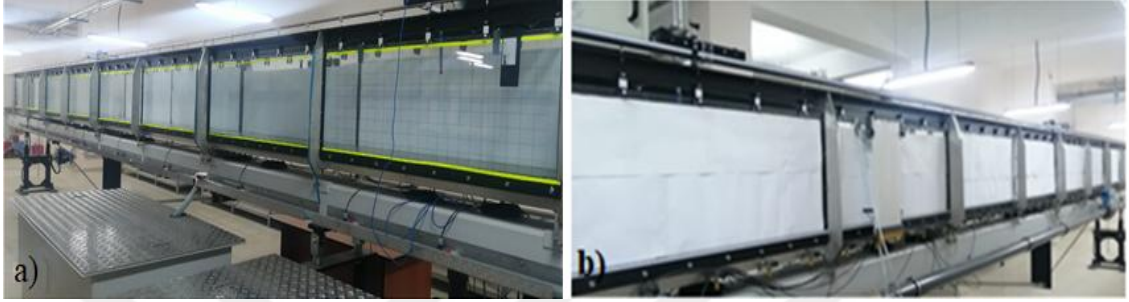
Deneyler; başlangıç rezervuar su seviyeleri 10 cm, 15 cm, 20 cm ve 25 cm olmak üzere dört farklı durumda yürütölmüş ve bu su seviyeleri H10, H15, H20 ve H25 olarak isimlendirilmiştir. Böylece, başlangıç rezervuar su seviyesi değışiminin kanalda yapısal ortamlar yokken ve varken şok dalgalarının model-yapı üzerinde oluşturduğu yatay kuvvetler ve bu kuvvetlerin etkime süreleri üzerindeki rolü ve yapısal ortamların yatay kuvvetlerin büyüklüğünü ve etkime sürelerini ne derece etkilediğı değıerlendirilmiştir. Ayrıca model-yapı konumunun bu kuvvetler ve etkime süreleri üzerindeki etkisi de incelenmiştir.



Şekil 3.58. Kanal-2’ye ait tam baraj yıkılması sonucu oluşın ve yapısal ortamdan geçerek ilerleyen şok dalgası ve model-yapıya çarpma anı

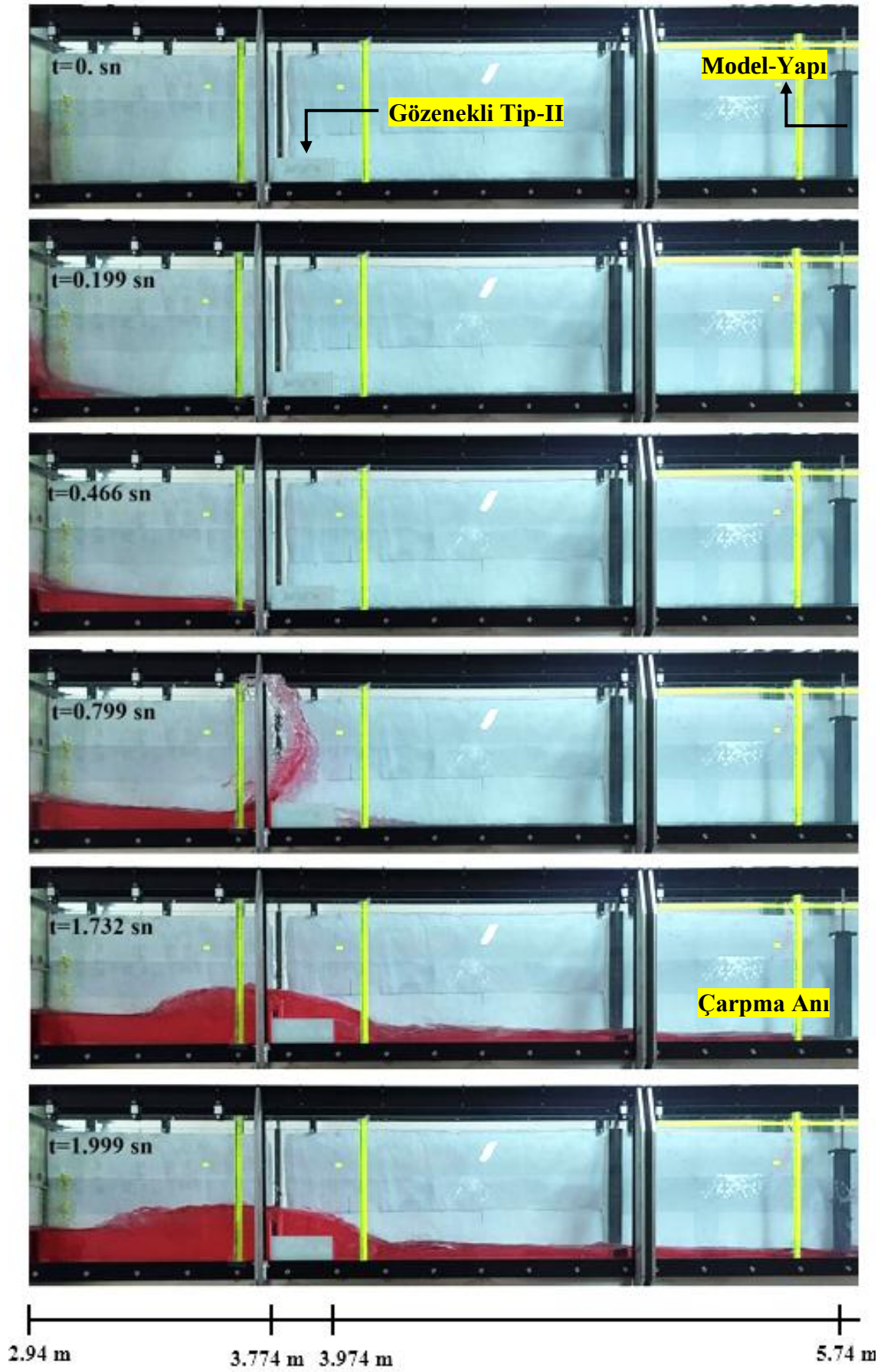
Gözenekli ve gözeneksiz yapıların tam baraj yıkılması deneylerinde kullanımı: Gözenekli ve gözeneksiz yapıların kullanıldığı tam baraj yıkılması deneyleri Kanal-2 üzerinde yürütölmüştür. Belirlenen noktalarda akım derinliklerinin zamanla değışiminin ölçöldüğü deneyler 25 cm başlangıç rezervuar su seviyesi, kuru mansap yatağı ve yatay kanal tabanı koşullarında gerçekleştirilmiştir. Tüm deneylerde olduğı gibi burada da rezervuarda depolanan su deneyler başlatılmadan önce kırmızı renkli gıda boyası ile renklendirilmiş,

kanalın arka duvarı beyaz renkli kağıtlarla kaplanmış ve kanalın sağ yan cam yüzeyi üzerine yatay vaziyette yükseklikleri bilinen yeşil şeritler yapıştırılmıştır (Şekil 3.59). Gözenekli ve gözeneksiz yapılar kapaktan itibaren 109 cm uzaklığa yerleştirilerek deneyler tekrarlanmıştır. Deneylerde yapıların memba ve mansabındaki akım derinliklerinin zamanla değişimi ile kanal boyunca oluşan su yüzü profilleri elde edilmiştir. Deneylere ait bazı görüntüler Şekil 3.60’da verilmektedir.



Şekil 3.59. a) kanal üzerine yeşil şerit uygulaması b) kanal arka cam yüzeyinin beyaz kağıtlarla kaplanması

Kuvvet ölçümlerine ait deneylerde ise şok dalgasının bir boyutlu yayılımı bir adet cep telefonu kamerası aracılığıyla izlenmiştir. Kapağın açılması Şekil 3.6’da verilen mekanizma kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Böylece şok dalgasının gözenekli ve gözeneksiz yapılardan geçerek bir model-yapı üzerine çarptırılması sağlanmıştır (Şekil 3.27 ve Şekil 3.28). Model-yapıya etkiyen yatay kuvvetler yük hücresi yardımıyla ölçülmüştür (Şekil 3.47). Deneylerde başlangıç rezervuar su seviyeleri sırasıyla 15 cm, 20 cm ve 25 cm alınmış ve bu su seviyeleri yine H15, H20 ve H25 olarak adlandırılmıştır. Bu sayede rezervuar su seviyesi değişiminin kanalda gözenekli ve gözeneksiz yapılar yokken ve varken şok dalgalarının model-yapı üzerinde oluşturduğu yatay kuvvetler ve bu kuvvetlerin etkiye süreleri üzerindeki rolü incelenmiştir. Ayrıca gözenekli ve gözeneksiz yapıların yatay kuvvetlerin büyüklüğünü ve etkiye sürelerini ne derece etkiledikleri değerlendirilmiştir.



Şekil 3.60. Kanal-2'ye ait tam baraj yıkılması sonucu oluşan ve Gözenekli Tip-II'den geçerek ilerleyen şok dalgasına ait deneysel görüntüler ve model yapıya çarpma anı

3.1.6 Ölçek ve duvar Etkileri

Deneyisel çalışmalarda, ölçek ve duvar etkilerinin deney sonuçlarını hangi ölçüde etkilediklerinin detaylı bir şekilde irdelenmesi ve ona göre ilerlenmesi çalışmaların güvenilirliği açısından büyük bir öneme sahiptir. Bu bölümde sunulan ölçek ve duvar etkileri üzerine değerlendirmeler doktora danışmanımın hazırlamış olduğu notlardan alınmıştır.

“Bilindiği üzere bir fiziksel model üç kriterden oluşan mekanik benzerliği (geometrik, kinematik ve dinamik benzerlikler) karşılıyorsa gerçek dünya prototipine tamamen benzerdir. Dolayısıyla ölçek etkilerini ihmal etmek için bahsedilen bu kriterlerin karşılanması gerekir. Burada en önemlisi, kinematik ve geometrik benzerlikleri de gerektiren dinamik benzerliğin sağlanmasıdır (Heller, 2011).”

“Dinamik benzerlik, Froude, Reynold, Weber, Cauchy ve Euler sayılarıyla gösterilebilen tüm kuvvetlerin sabit oranlarını gerektirir. Bu nedenle, geometrik ölçek oranı 1'den farklıysa fiziksel model testleri her zaman ölçek etkileri içerir. Fakat buna rağmen ölçek etkileri ihmal edilebilir büyüklükte olabilir.”

“Lauber ve Hager (1998a) tarafından belirtildiği gibi baraj yıkılması akımlarında akımı kontrol eden baskın faktör yerçekimi kuvveti olduğu için Froude benzerlik yasası kullanılır. Bu nedenle bu çalışmada olduğu gibi baraj yıkılması problemlerinde ölçümleri prototip niceliklerine dönüştürmek için Froude benzerlik yasası uygulanmalıdır. Froude benzerliği dışında diğer sayılardaki kuvvet oranları aynı olamaz ve ölçek etkileri üretirler. Ancak, bu etkiler ihmal edilebilir düzeyde olmalıdır.”

“Bu çalışmada akışkan sıkıştırılmaz olarak kabul edildiğinden Cauchy sayısı ve akım serbest su yüzüne sahip olduğundan Euler sayısı ihmal edilebilir düzeydedir. Mevcut çalışmada Reynold sayısı yaklaşık 10^4 - 10^5 mertebesinde olduğundan dolayı viskoz etkiler de önemsiz olarak kabul edilebilir (Heller, 2011; Mohamed ve El-Ghorab 2016; Pfister ve Chanson, 2012; Lobovský, 2014). Ayrıca Fritz ve Hager (1998) viskoziteden kaynaklanan ölçek etkilerinin ≥ 0.05 m akım derinlikleri için mevcut olmadığını belirtmiştir. Bu tez çalışmasında uygulanan en düşük su derinliği 0.1 m'dir. Weber sayısına gelince, Martin ve Pohl (2000), $h > 5$ mm ise yüzey gerilimi etkilerinin önemsiz

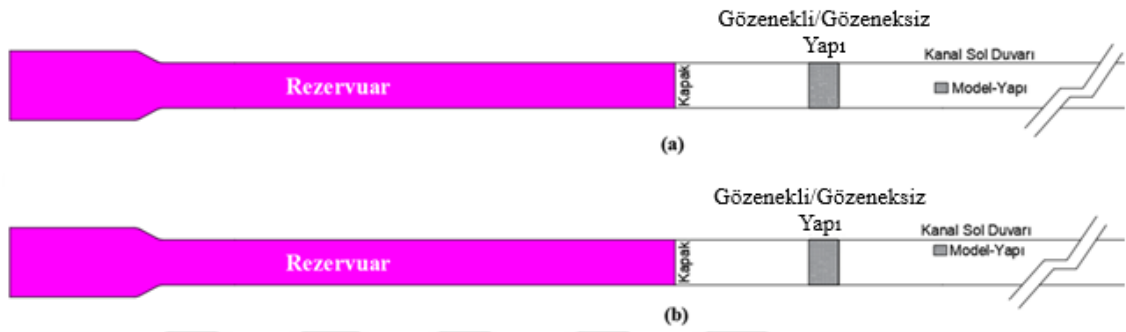
olabileceğini bildirmiştir. Sonuç olarak viskoz kuvvet, yüzey gerilimi kuvveti, basınç kuvveti ve sıkıştırma kuvvetinden kaynaklanan ölçek etkileri ihmal edilebilir olarak kabul edilebilir. Froude ölçekli modellemede geometrik ölçek faktörleri L_m/L_p (model karakteristik uzunluğu/prototip karakteristik uzunluğu) olarak tanımlanır ve λ ile gösterilir. Kuvveti (N) temsil eden ölçek faktörü λ^3 ve hız (m/s) $\lambda^{1/2}$ dir.”

“Bu çalışmada ölçümleri prototip niceliklerine dönüştürmek için Froude ölçekli modelleme kullanılmıştır. Geometrik benzerlik bu çalışmada üretilen maksimum ortalama dalga yüksekliğinin gerçek baraj yıkılması sırasında 3-9 m akım derinliğine eşit olduğu varsayımına dayanmaktadır. Bu varsayım önceki baraj yıkılması olaylarındaki akım derinliğinin saha ölçümlerine dayanmaktadır. Varsayım, bu çalışma için 1:40'lık bir geometrik ölçekle sonuçlanmıştır.”

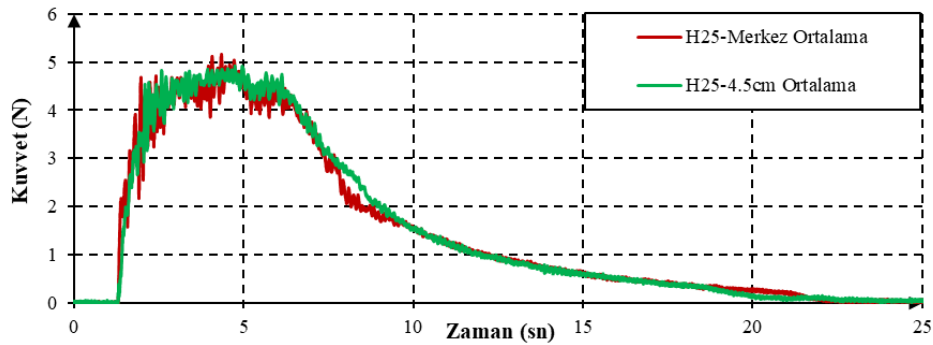
Ölçek etkisinin yanında deneysel çalışmalarda duvar etkisi de araştırılmıştır. Bunun için 25 cm başlangıç rezervuar su seviyesinde üretilen şok dalgası öncelikle gözenekli ve gözeneksiz yapılardan geçerek kanalın merkezine konumlandırılmış kare enkesitli bir model-yapıya çarptırılmış daha sonra ise aynı model-yapı kanalın sol duvarına 4.5 cm yakın olacak şekilde konumlandırılarak deneyler tekrar edilmiştir (Şekil 3.61). Şekil 3.62-Şekil 3.67 tekrarlanan üç deneyin ortalamasından elde edilen kuvvet-zaman grafiklerini göstermektedir. Şekil 3.62 - Şekil 3.67'den elde edilen sonuçlara göre Gözenekli Tip-II hariç model-yapının kanalın merkezinde veya sol duvara yakın olması durumları için akımın simetrisi bozulmamış ve model-yapı üzerine etkiyen kuvvet dikkate alınacak boyutta değişim göstermemiştir. Bu durum deneylere ait standart sapmanın deneye ait ortalamaya bölünerek hesaplanan tekrarlanabilirlik indeksi sonuçlarıyla da desteklemektedir. Gözenekli Tip-II hariç diğer tüm durumlarda tekrarlanabilirlik indeksi maksimum % 2.47 ve minimum %0.98 olarak elde edilmiş ve %5'in altında kalmıştır. Bu durum denenen yapı tiplerinin simetrik şekilde üretildiğini, kanal içine düzgün şekilde yerleştirildiğini ve bu tip ortamlardan geçen akımın kanal enkesiti boyunca benzer özellikler taşıdığını göstermektedir. Dolayısıyla tüm bu anlatılanlar ışığında duvar etkilerinin ihmal edilebilir düzeyde ve kabul edilebilir sınırlarda olduğu söylenebilir.

Gözenekli Tip-II'de ise tekrarlanabilirlik indeksi %8.93 olarak hesaplanmış ve %5'in üzerine çıkmıştır. Bunun nedeni Gözenekli Tip-II'den geçen akımın yapının mansabında çarpışarak sol ve sağ duvara doğru ayrışması ve çarpışmanın mansabında (kanal

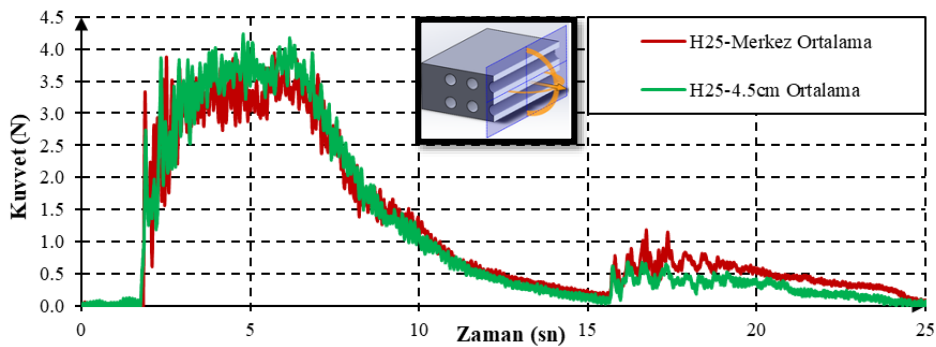
merkezinde) çevrintilerin ve ölü bölgelerin yoğun olduğu bir bölge oluşmasıdır. Gözenekli Tip-II'nin mansap kısmında oluşan akım durumu Şekil 4.68'de gösterilmektedir. Kanal merkezine yerleştirilen model-yapı, bu ölü bölgelerden geçerek gelen ve daha düşük hızlara sahip olan akıma maruz kalırken duvara yakın olarak yerleştirilen model-yapı çarpışmadan sonra ayrılan ve model-yapıya doğru ilerleyen daha yüksek hızların etkisi altında kalır. Bunun sonucunda da duvara yakın yerleştirilen model-yapı üzerinde oluşan yatay çarpma kuvvetleri daha büyük olur.



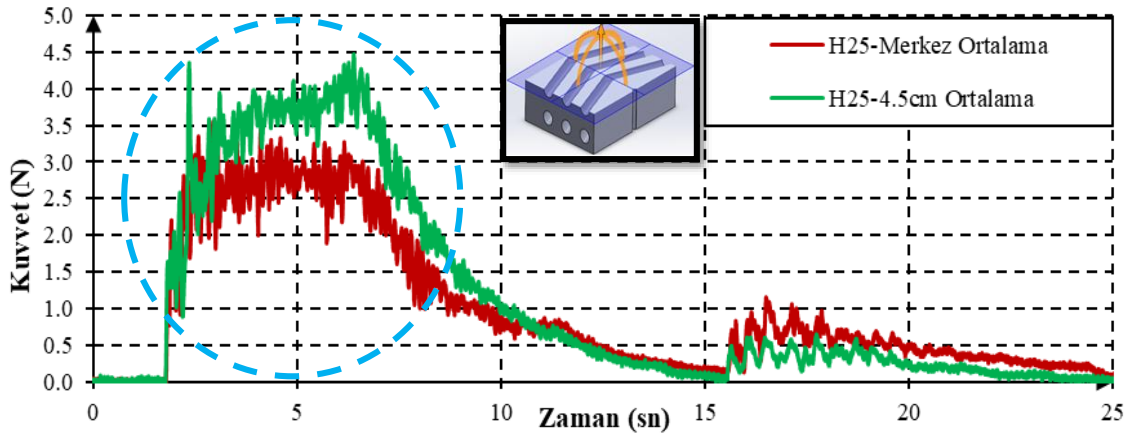
Şekil 3.61. Model-yapının kanal içindeki yerleşimine ait şematik çizim a) merkezde b) sol duvara 4.5 cm yakın



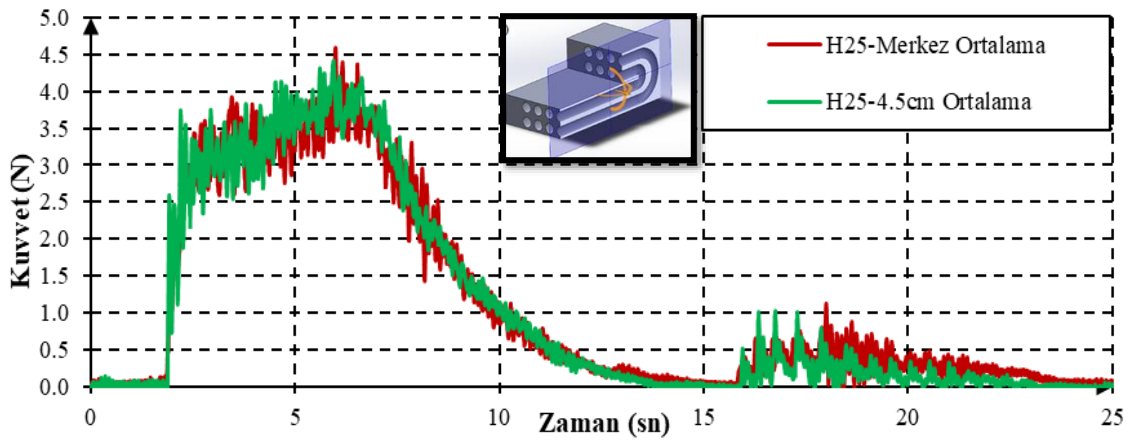
Şekil 3.62. Model-yapının kanalın merkezinde ve kanalın sol duvarına 4.5 cm yakınlıkta olması durumu - kanalda herhangi yapısal ortam yok



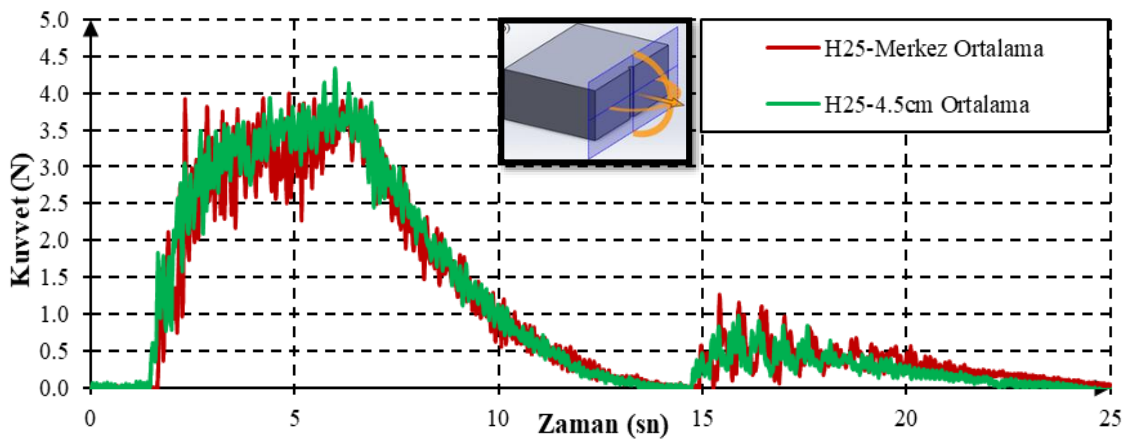
Şekil 3.63. Model-yapının kanalın merkezinde ve kanalın sol duvarına 4.5 cm yakınlıkta olması durumu - Gözenekli Tip-I



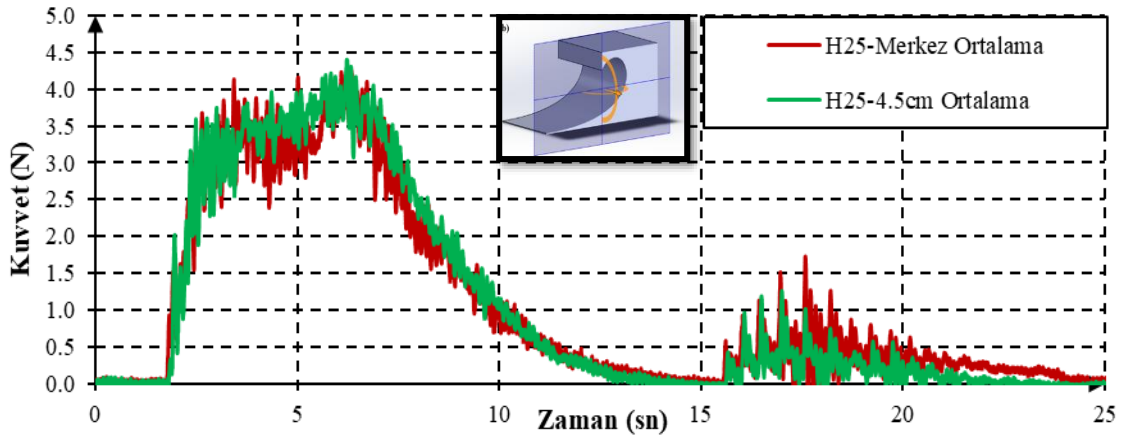
Şekil 3.64. Model-yapının kanalın merkezinde ve kanalın sol duvarına 4.5 cm yakınlıkta olması durumu - Gözenekli Tip-II



Şekil 3.65. Model-yapının kanalın merkezinde ve kanalın sol duvarına 4.5 cm yakınlıkta olması durumu - Gözenekli Tip-III



Şekil 3.66. Model-yapının kanalın merkezinde ve kanalın sol duvarına 4.5 cm yakınlıkta olması durumu - Gözeneksiz Yapı



Şekil 3.67. Model-yapının kanalın merkezinde ve kanalın sol duvarına 4.5 cm yakınlıkta olması durumu - Eğri Yüzeyli Yapı

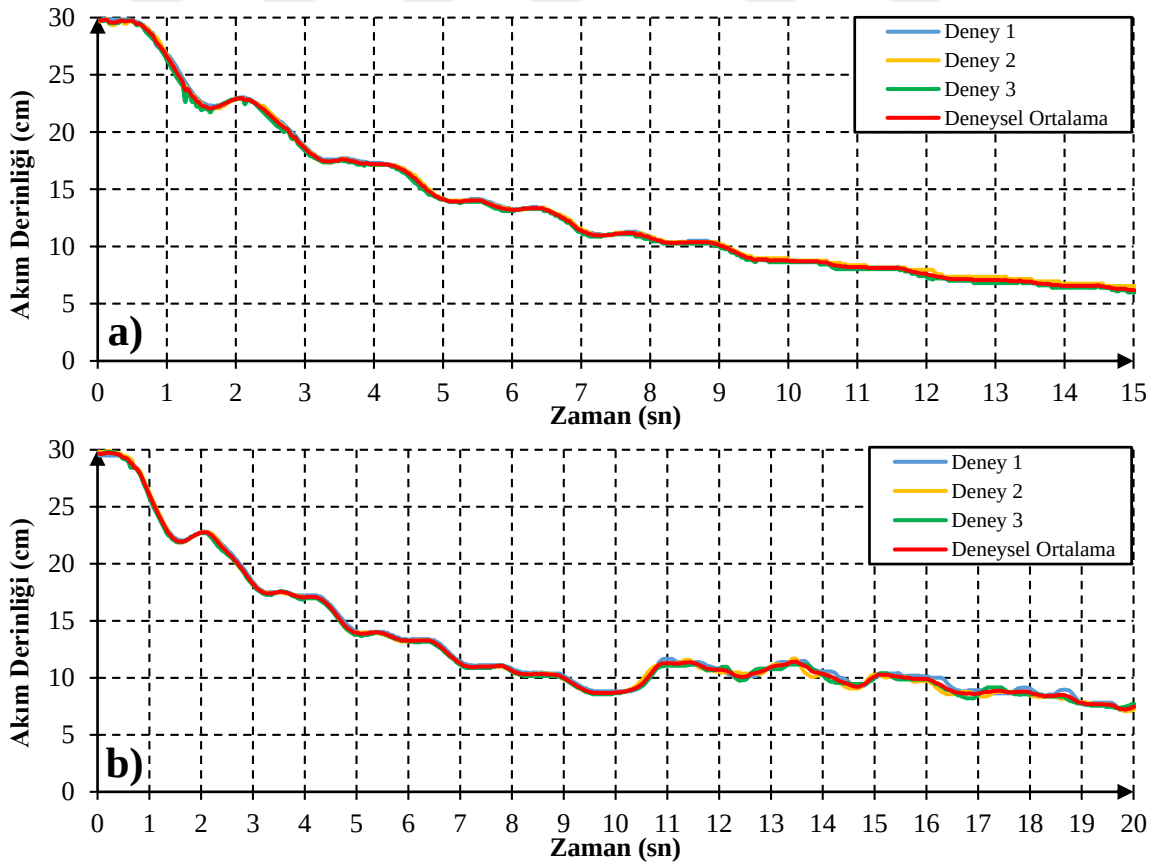


Şekil 3.68. Gözenekli Tip-II'den geçen akımın mansap kısmındaki yayılımı

3.1.7 Deneylerin tekrarlanabilirliği

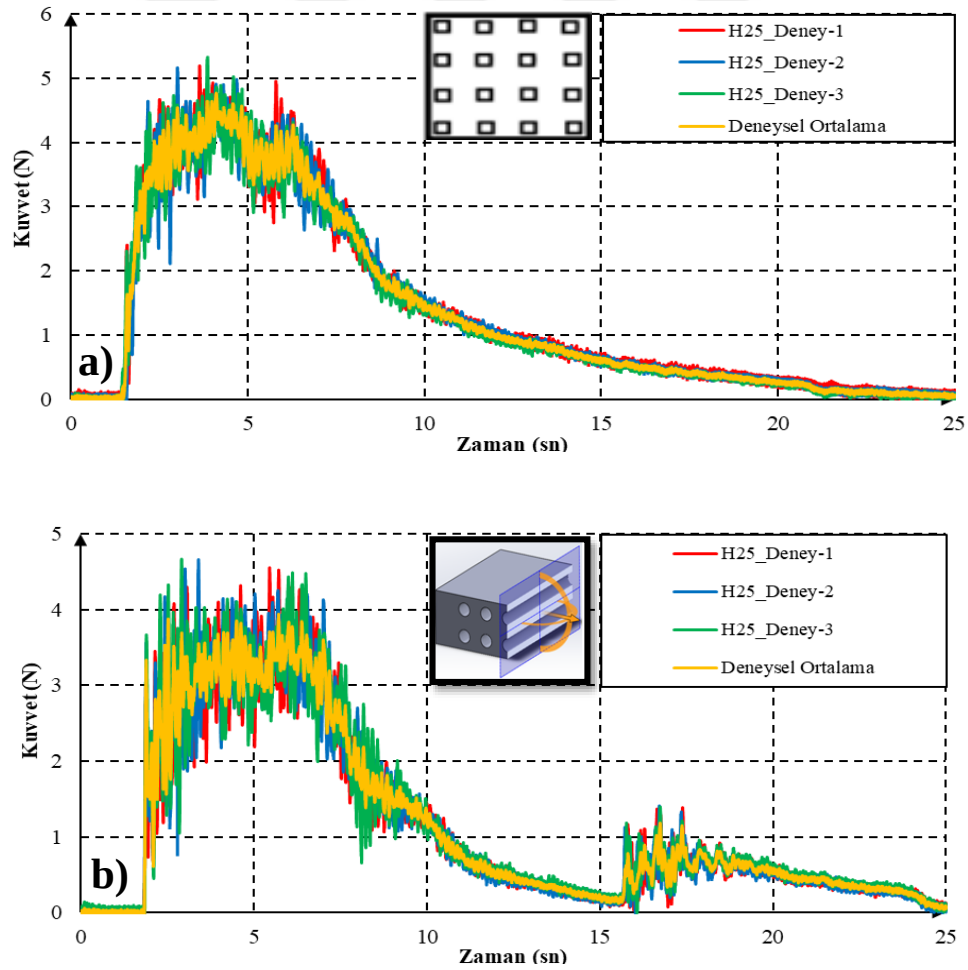
Yapılan tüm deneyler en az üçer kez tekrarlanmış ve tekrarlanan üç deneyin ortalaması alınarak deneysel ölçüm sonuçları elde edilmiştir. Şekil 3.69 Kanal-1 üzerinde kısmi baraj yıkılması durumunda 30 cm başlangıç rezervuar su seviyesi için kuru ve ıslak mansap yatağı koşullarında elde edilen ölçümleri göstermektedir. Ölçümler, rezervuarın arka sol köşe noktasında alınmış olup üç deneye ait akım derinliği ölçüm sonuçlarını ve deneysel ortalamayı kapsamaktadır. Şekil 3.69 incelendiğinde üç deneyin de birbiriyle uyumlu olduğu ve benzer eğilimlere sahip oldukları görülmektedir. Kuru durum için Deney-1 baz

alınarak deneyler arasında yapılan karşılaştırmada Deney-1 ile Deney-2 arasında %10.23 ve Deney-1 ile Deney-3 arasında %7.13 maksimum bağıl fark olduğu hesaplanmıştır. Islak durumda ise bu değerler sırasıyla %11.62 ve %10.38 olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte kuru durum için Deney-1 ile Deney-2 arasında hesaplanan her bir bağıl fark değerinin %97.78'nin %5'in altında kaldığı, Deney-1 ile Deney-3 arasında hesaplanan bağıl fark değerinin ise %93.57'sinin %5'in altında kaldığı görülmüştür. Benzer hesaplamalar ıslak durum için de yapılmış ve %5'in altında kalan değerler sırasıyla %83.86 ve %94.51 olarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte deneyler arasındaki uyumu daha iyi tarif edebilmek adına deneylerin standart sapmasını deneylerin ortalamasına bölerek bir tekrarlanabilirlik indeksi elde edilmiştir. Bu indeks kuru durum için %1.02 ıslak durum için ise %0.86 olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan tüm bu değerler ve grafikler arasındaki uyuma göre kuru ve ıslak mansap yatağındaki deneylerin tekrar edilebilir nitelikte olduğu açık şekilde görülmektedir. Ayrıca SPSS programında yapılan analizlerde hem istatistiksel parametreler hem de parametrik olmayan ve tekrarlı ölçümlerde kullanılan Friedman Testiyle Şekil 3.69'da verilen grafiklerin %95 oranında tekrar edilebilir nitelikte olduğu görülmüştür.



Şekil 3.69. Akım derinliği deneylerinin tekrarlanabilirliği a) kuru durum b) ıslak durum

Şekil 3.70, 25 cm başlangıç rezervuar su seviyesinde Kanal-2 üzerinde yürütülen tam baraj yıkılması deneylerine ait deneysel ölçüm sonuçlarını göstermektedir. Burada Şekil 3.70a kanalda Tip YO-1.1 olması durumunda model-yapıya etkiyen kuvvet ölçüm sonuçlarını, Şekil 3.70b ise kanalda Gözenekli Tip-II olması durumunda yine model-yapıya etkiyen kuvvet ölçüm sonuçlarını göstermektedir. Şekil 3.70a ve Şekil 3.70b incelendiğinde üç deneyin de artış azalış eğilimleri bakımından birbiriyle genel olarak uyumlu olduğu görülmektedir. Ayrıca yapısal ortam Tip YO-1.1 için Deney-1 ile Deney-2 arasında %1.74 ve Deney-1 ile Deney-3 arasında %1.35 ortalama bağıl fark olduğu hesaplanmıştır. Gözenekli Tip-I için de benzer şekilde Deney-1 ile Deney-2 arasında %0.89 ve Deney-1 ile Deney-3 arasında %2.02 ortalama bağıl fark olduğu tespit edilmiştir. Benzer şekilde burada da tekrarlanabilirlik indeksi hesaplanmış ve kanalda Tip YO-1.1 olması durumu için %1.76, Gözenekli Tip-I olması durumu için ise %1.37 olarak elde edilmiştir. Son olarak SPSS programında yapılan analizler sonucunda da deneylerin %95 oranında tekrar edilebilir nitelikte olduğu görülmüştür.



Şekil 3.70. Kuvvet ölçümü deneylerinin tekrarlanabilirliği a) Tip YO-1.1 b) Gözenekli Tip-I

3.2 Sayısal Çalışmalar

Tez çalışmasının bu bölümünde kısmi ve tam baraj yıkılmaları problemleri için hem 2 boyutlu hem de 3 boyutlu modeller kullanılmıştır. 3 boyutlu modelleme çalışmalarında Flow-3D programından, 2 boyutlu modelleme çalışmalarında ise Erduran (2001) tarafından geliştirilen ve sığ su denklemlerini sonlu hacimler yöntemiyle çözen (Finite Volume Solution Shallow Water Equation -FVSSWE) sayısal modelden yararlanılmıştır. Modelleme çalışmaları AMD Ryzen 7 3700 X 8-Core 3.6 GHz 32 GB RAM ve 64 bit işletim sistemine sahip bir bilgisayar üzerinde gerçekleştirilmiştir.

3.2.1 Flow-3D programı

Flow-3D süreklilik ve momentum denklemlerinden oluşan Reynolds-Ortalama Navier-Stokes (Reynolds-Averaged Navier-Stokes-RANS) denklemlerini sonlu hacimler yöntemini kullanarak çözen ve özellikle serbest yüzeye sahip akımların 3B modelleme çalışmalarında kullanılan ticari bir paket programdır. Program, sığ su denklemlerinin (Shallow Water Equation-SWE) çözümlerini içeren özelliği ile 2B sayısal model çalışmalarının yapılmasına da olanak sağlamaktadır. Program, kare veya dikdörtgen bir ağ yapısı kullanarak akışkanın üç yöndeki akım karakteristiklerini hesaplamaktadır.

Programda modellenecek geometrinin katı veya sıvı ile kaplı olan kısımları, engeli temsil eden alan/hacim oranları yöntemi (Fractional Area/Volume Obstacle Representation-FAVOR) kullanılarak elde edilmektedir. Bu yöntemde her bir hücre tamamen katı, tamamen sıvı veya bir kısmı katı bir kısmı sıvı olarak modellenir. Eğer hücre tamamen katı ile kaplı ise 0, tamamen boş ise 1 değerini alır. Hücrenin bir kısmı katı ile dolu bir kısmı boşsa 0 ile 1 arasında bir değer alır. Daha doğru bir çözüm için ağ yapısının sıklığının artırılmasıyla hücrelerin doluluk oranları daha doğru tespit edilebilmektedir.

Programda su-hava arakesiti ise Akışkan Hacmi (Volume of Fluid-VOF) yöntemi ile belirlenmektedir (Hirt ve Nichols, 1981). Bu yöntem de FAVOR metoduna benzer ve hücrelerin doluluk oranlarına göre akışkan hacmini tespit etmektedir. VOF yöntemine göre su-hava ara kesiti program tarafından belirlenir ve bu ara kesit serbest su yüzü olarak düşünülerek bu yüzeye sıfır kayma gerilmesi ile sabit basınç sınır şartları uygulanır. Programda duvar, simetri, hız, giriş debisi ve çıkış akımı gibi farklı sınır şartları

bulunmaktadır. Ayrıca RANS denklemlerinin çözümünde kullanılan $k-\varepsilon$, $k-w$, *Re-Normalization Group (RNG)* ve *Large Eddy Simulation (LES)* gibi türbülans kapatma modelleri yer almaktadır. Program RANS denklemlerinin çözümünde Denklem (3.5) ve Denklem (3.6)'da sırasıyla verilen süreklilik ve momentum denklemlerini kullanarak çözümler üretmektedir.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(u_i A_i) = 0 \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u_j A_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial x_i} \right) + g_i + f_i \quad (3.6)$$

Burada; u_i i doğrultusundaki akım hızını, P akımın basıncını, A_i i doğrultusundaki her bir hücredeki akışkanın alanı, V_F her bir hücredeki akışkan hacmini, g_i kütleli kuvvetleri, f_i herhangi bir türbülans modeli için Reynolds gerilmelerini ifade etmektedir. Reynolds gerilmeleri Denklem (3.7), τ_{ii} ve τ_{ij} gerilmeleri ise Denklem (3.8) ile hesaplanmaktadır.

$$f_i = \frac{1}{\rho V_F} \left[w s_i - \frac{\partial}{\partial x_i} (A_j \tau_{ij}) \right] \quad (3.7)$$

$$\tau_{ii} = -2\mu_T \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right], \tau_{ij} = -\mu_T \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (3.8)$$

Burada, μ_T toplam türbülans dinamik viskozitesini ifade etmektedir. Bu çalışmada türbülans kapatma modeli olarak $k-\varepsilon$ modeli kullanılmıştır. Bu modelin literatürde burada çalışılan akım durumları için denendiği ve makul sonuçlar verdiği bilindiğinden ve ayrıca model literatürde genel geçer kabul gördüğünden tercih edilmiştir. İki denklemlilik standart $k-\varepsilon$ türbülans modeli Denklem (3.9) ile hesaplanmaktadır.

$$\mu_T = \frac{\rho C_\mu k^2}{\varepsilon} \quad (3.9)$$

Burada, k kinetik enerji, ε ise sönmeme oranı olarak ifade etmektedir. Bu terimler için kapatma eşitlikleri sırasıyla Denklem (3.10) ve Denklem (3.11)'de verilmektedir.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(v + \frac{\partial v_i}{\partial x_i} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(v + \frac{\partial v_i}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (3.11)$$

Kapatma katsayıları ve diğer değişkenler şu şekildedir: $C_{\varepsilon 1} = 1.44$; $C_{\varepsilon 2} = 1.92$; $C_\mu = 0.09$, $\sigma_k = 1.0$ ve $\sigma_\varepsilon = 1.3$

Flow-3D programı ana hatlarıyla kısaca şu şekilde çalışmaktadır:

1. Öncelikle yeni bir çalışma alanı oluşturulur ve daha sonra bu alana yeni bir simülasyon eklenir.
2. Sonraki adımda model kurulumu bölümüne geçilir. Bu bölüm simülasyonun analiz edilmeden önce veri girişinin yapıldığı bölüm olarak tanımlanır. Burada simülasyonun toplam süresinin belirlenmesi, farklı fiziksel akım durumlarına ait modelleme seçenekleri, akışkan tipinin seçilmesi, geometrinin oluşturulması, ağ atanması, çıktıların elde edilmesi, ve çözüm yöntemlerinin seçilmesi gibi kısımlar bulunur.
3. Programda son aşama olarak elde edilen sonuçların alınması ve görselleştirilmesi bölümüne geçilir. Burada analiz sekmesi altında noktasal, 1, 2 ve 3 boyutlu verilere ulaşılabilir ve bu veriler farklı şekillerde (grafik, kontur veya 3 boyutlu görünüm) sunulabilir.

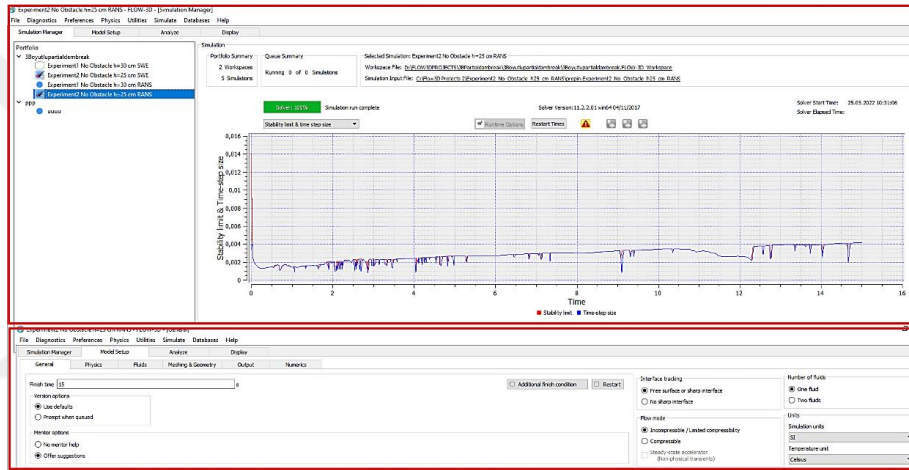
3.2.1.1 Kuru ve ıslak mansap yatağında kısmi baraj yıkılması probleminin modellenmesi

Bu bölümde laboratuvar ortamında deneyleri gerçekleştirilen yatay bir kanalda ve kuru mansap yatağında kısmi baraj yıkılması problemi için Flow-3D programı kullanarak sayısal modelleme çalışmalarının yapılaş şekli anlatılmaktadır. Flow-3D ortamında modellenen ilgili problem hem RANS hem de SWE modelleri yardımıyla çözülmüştür.

Modelleme için öncelikle yeni bir çalışma alanı oluşturulmuş ve bu alan üzerine yeni bir simülasyon eklenerek taslak bir çalışma ortamı hazırlanmıştır. Daha sonra “Model-Kurulum” bölümünden toplam simülasyon süresi 15 sn olarak belirlenmiş ve serbest

yüzeyli – sıkıştırılamaz akışkan tipi seçilerek tek bir akışkan için modelleme çalışmaları başlatılmıştır (Şekil 3.71).

Daha sonra “Fizik” sekmesinden yer çekimi ivmesi ve türbülans kapatma modeli seçimi gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde z yönündeki yerçekimi ivmesi değeri $-9.81 \text{ m}^2/\text{s}$ ve türbülans kapatma modeli olarak $k-\varepsilon$ modeli kullanılmıştır. Ayrıca yine bu bölümde SWE denklemlerinin çözümü için sıg su modeli aktif hale getirilmiş ve türbülanslı bir akım ortamı için direnç katsayısı (C_d) programa işlenerek kapalı çözüm uygulanmıştır. Sonraki aşamada “Akışkan” sekmesi üzerinden 20°C ’deki su seçilerek modele akışkan tanımlaması yapılmıştır.

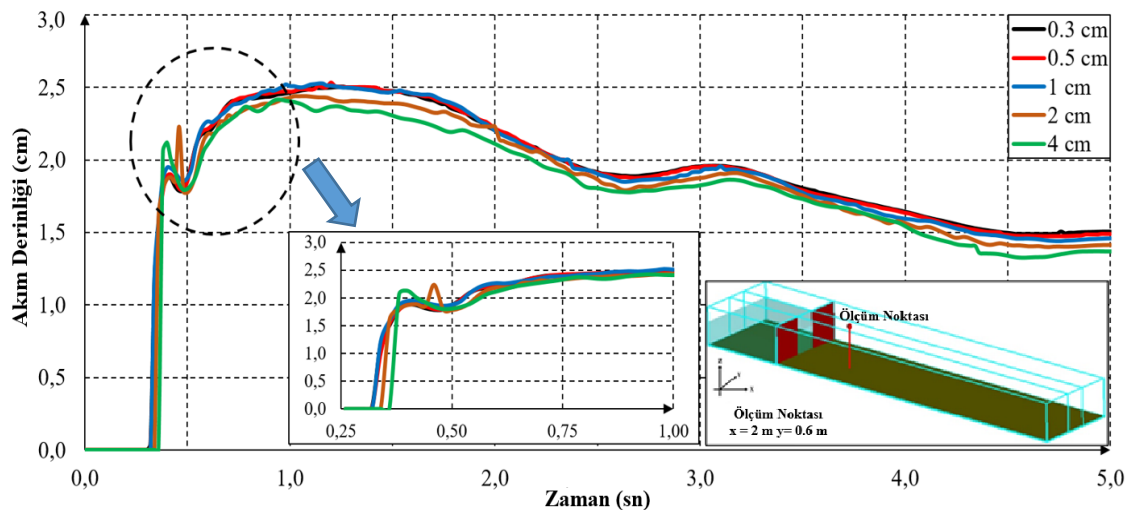


Şekil 3.71. Flow-3D ara yüzü ve model kurulum sekmesi

Bir sonraki adımda geometri ve mesh atama kısımlarına geçilmiştir. Bu bölümde öncelikle mesh blok ataması yapılarak x, y ve z doğrultularında Kanal-1’in boyutları düşünülerek sistemin geometrisi oluşturulmuştur. Sistemin ana hatları ile geometrisi oluşturulduktan sonra kanal tabanına ve kısmi yıkılma problemini tarif etmek için kanalın ilgili bölümlerine katı kısımlar oluşturulmuştur. Böylece kapak yeri açık kalacak şekilde modelin geometrisi tamamlanmıştır. Bunun dışında yine bu kısımda mesh blok üzerinde x, y ve z yönlerindeki hücre aralıkları yapılan ağdan bağımsızlık testleri sonucunda 1 cm seçilerek kare mesh ataması gerçekleştirilmiş ve RANS denklemleri için toplamda 3672000 hücre elde edilmiştir. Ayrıca yine mesh blok üzerinde SWE denklemlerinin çözümü yapılırken z yönü sıg su olarak kabul edilmiştir.

Burada yapılan ağdan bağımsızlık testleri 0.3 cm, 0.5 cm, 1 cm, 2 cm ve 4 cm olmak üzere beş farklı hücre boyutu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her bir ağdan bağımsızlık

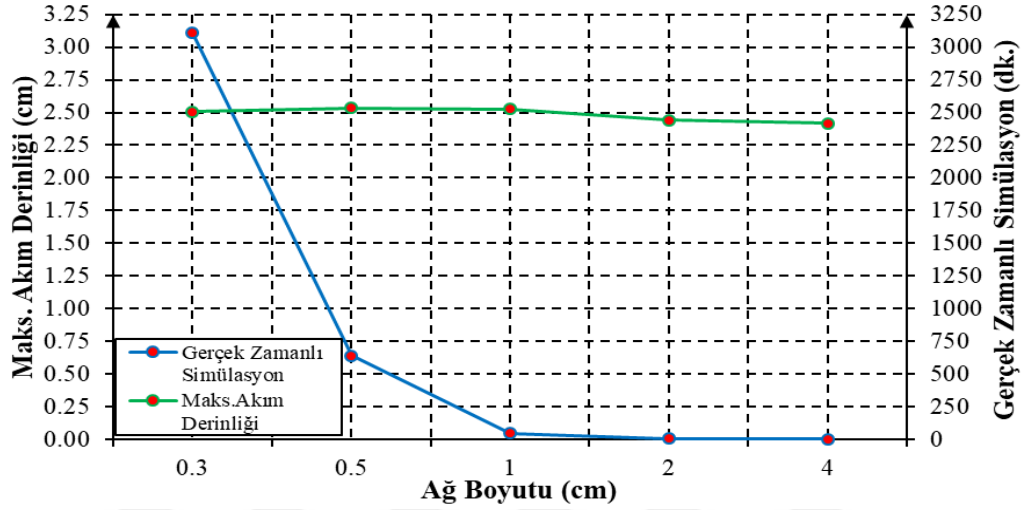
Farklı ağ boyutlarının kullanımının akım derinliği üzerindeki etkisi Şekil 3.72'de verilmiştir. Görüldüğü gibi, 0.5 cm ve 0.3 cm hücre boyutlarından elde edilen 5 sn'lik zaman içindeki akım derinliği değişimleri oldukça benzerdir ve 1 cm için akım derinliği değişiminin de bunlara oldukça yakın olduğu söylenebilir. 2 cm ve 4 cm hücre boyutlarının kullanımından ise diğerlerine kıyasla belirgin bir tutarsızlık tespit edilmiştir. Ayrıca ağ boyutunun maksimum akım derinliği ve gerçek zamanlı simülasyon üzerindeki etkisi de Çizelge 3.8 ve Şekil 3.73'te gösterilmiştir. Hücre boyutu 1 cm'den büyük olduğunda gerçek zamanlı simülasyonun önemli ölçüde arttığı net şekilde görülmektedir. Ayrıca, 0.3 cm, 0.5 cm ve 1 cm hücre boyutları için elde edilen maksimum akım derinlikleri uyumluyken 2 cm ve 4 cm hücre boyutları için elde edilen maksimum derinlikler diğer daha küçük hücre boyutlarıyla karşılaştırıldığında belirgin farklılıklar göstermektedir. Bununla birlikte kanal merkezinde ve 0.4 sn de ölçülen dalga önü konumu farklı ağ boyutları açısından incelendiğinde 2 cm ve 4 cm'ye ait sonuçların bir hayli geride kaldığı buna karşın 1 cm ve 0.5 cm ağ boyutuna sahip olan çözümlerin birbirlerine oldukça yakın olduğu görülmektedir (Şekil 3.74). Bahsedilen bu nedenlerden dolayı kuru ve ıslak mansap yatağında şok dalgasının yayılımı için Flow-3D RANS modelinde x , y ve z yönlerindeki hücre boyutu 1 cm seçilerek sayısal modelleme çalışmaları yapılmıştır.



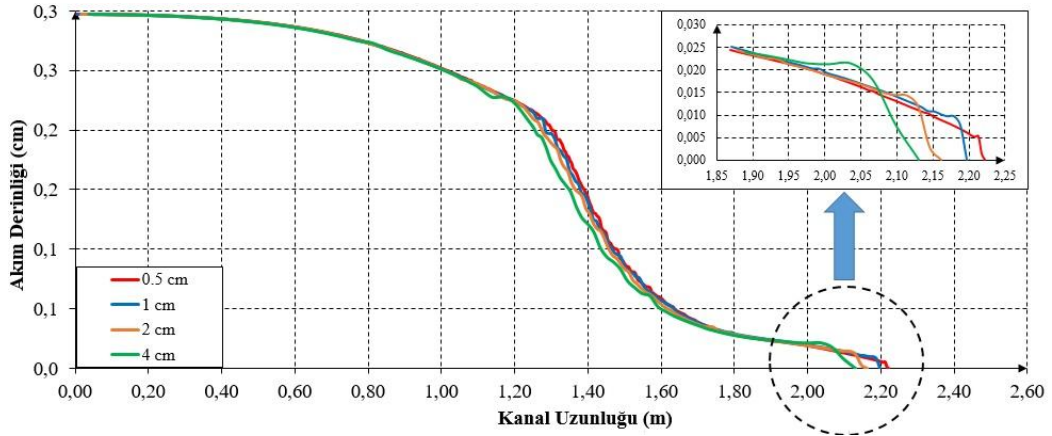
Şekil 3.72. Ağ boyutunun akım derinliği üzerindeki etkisi

Çizelge 3.8. Ağ boyutunun maksimum akım derinliği üzerindeki etkisi

Hücre Boyutu (cm)	Maks. Akım Derinliği (cm)	Çözüm Süresi	Hücre Sayısı	Simülasyon Süresi (sn)
0.3	2.51	2 gün 3 sa. 49 dk.	28975600	5
0.5	2.53	10 sa. 39 dk.	19584000	
1.0	2.53	46 dk.	2448000	
2.0	2.44	4 dk.	325080	
4.0	2.42	1 dk.	45300	



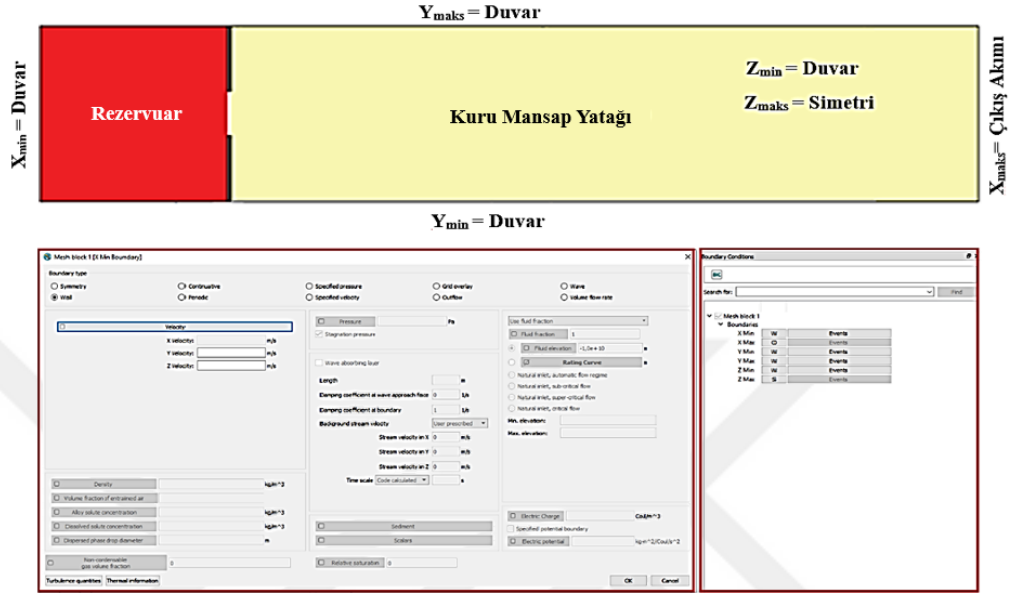
Şekil 3.73. Ağ boyutunun simülasyon süresi ve maksimum akım derinliği üzerindeki etkisi



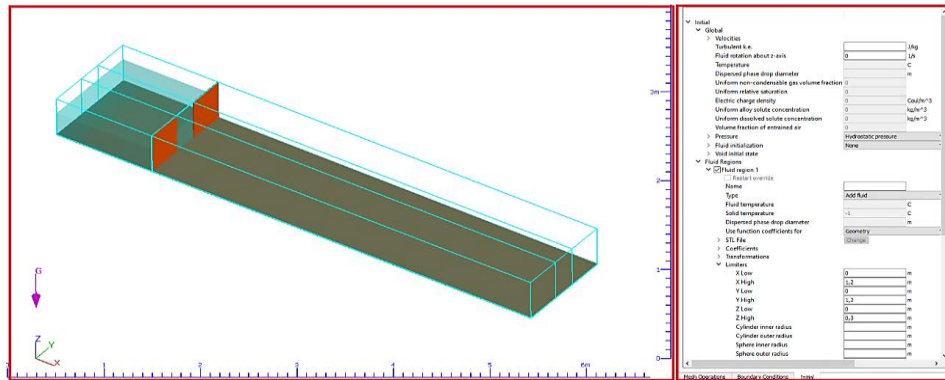
Şekil 3.74. Ağ boyutunun dalga önü konumu üzerindeki etkisi

Sonraki aşamada programa probleme özgü sınır koşulları girilmiştir. Bu aşamada X_{min} , Y_{min} , Y_{maks} ve Z_{min} sınır koşulları “duvar” (Wall) olarak tanımlanmış X_{maks} “çıkış akımı” (Outflow) ve Z_{maks} “Simetri” (Symmetry) olarak sisteme tanıtılmıştır (Şekil 3.75). Sınır koşullarının ardından başlangıç koşullarının tanımı için ilgili sekme açılmış ve rezervuarda depolanan su için kanalın 1.2x1.2x0.3 m’lik bir kısmına su tanımlaması

yapılmış, mansap kısmı ise kuru olarak bırakılmıştır (Şekil 3.76). Burada tanımlanan 30 cm'lik rezervuar su seviyesi yapılan diğer deneylerde 25 cm olarak da dikkate alınmıştır. Ayrıca yine bu bölümde basınç dağılımının hidrostatik olarak değiştiği kabul edilmiş ve başlangıç aşamasında tüm yönlerde hız sıfır olarak dikkate alınmıştır.



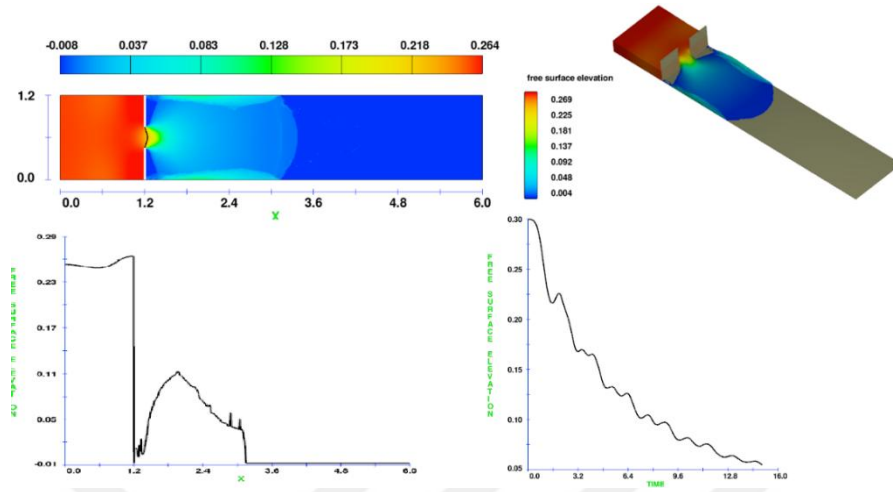
Şekil 3.75. Flow-3D’de kuru mansap yatağı durumu için sınır koşullarının belirlenmesi



Şekil 3.76. Flow-3D’de kuru mansap yatağı durumu için başlangıç koşullarının belirlenmesi

Geometri ve ağ atamasından sonra çıktıların alınması aşamasına geçilmiştir. Bu bölümde hangi verilerin hangi zaman aralığıyla alınacağı programa girilmiş ve daha sonra açık veya kapalı çözüm yöntemleri ile süreklilik - momentum denklemlerinin kaçınıcı dereceden çözüleceği gibi kısımlar belirlenmiştir. Böylece modelin kurulum bölümü tamamlanmış ve simülasyon başlatılmıştır. Simülasyon belirlenen toplam süreye ulaştığında analiz sekmesinden noktasal, 1, 2, ve 3 boyutlu çıktılar metin dosyası şeklinde elde edilmiştir. Elde edilen veriler Flow-3D programının grafik, kontur, 3 boyutlu

gösterim ve animasyon özellikleri ile görselleştirilmiş ve deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılmıştır (Şekil 3.77).

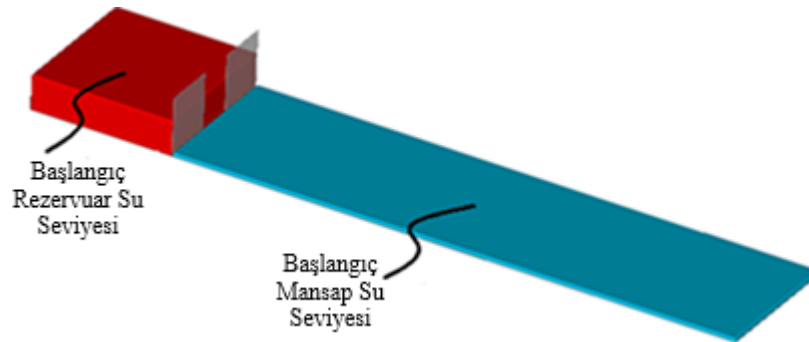


Şekil 3.77. Flow-3D verilerin elde edilmesi

Islak durum için farklı olarak sadece, mansap/memba su derinliği oranı 0.1 olacak şekilde mansap yatağı boyunca su tanımlaması yapılmış ve kanalın çıkış kesitindeki sınır şartı “duvar” olarak değiştirilmiştir (Şekil 3.78 ve Şekil 3.79). Böylece rezervuarında ve mansabında farklı derinliklerde su bulunan ıslak koşul elde edilmiştir.



Şekil 3.78. Flow-3D’de ıslak mansap yatağı durumu için sınır koşullarının belirlenmesi



Şekil 3.79. Flow-3D’de ıslak mansap yatağı durumu için başlangıç koşullarının belirlenmesi

3.2.1.2. Yapısal ortamların kullanıldığı 3B sayısal model çalışmaları

Bu bölümde 6.0x1.2x0.5 m boyutlara sahip dikdörtgen enkesitli yatay bir kanalda, kuru mansap yatağında ve kapaktan itibaren 30 cm uzaklıkta 120x100 cm boyutunda yapısal ortam bulunan kısmi baraj yıkılması problemi için sayısal modelleme çalışmaları açıklanmaktadır. Modelleme için Flow-3D programı RANS modeli kullanılmış ve yapısal ortamlar Solidworks programı yardımıyla oluşturulup Flow-3D programına STL dosyası şeklinde dâhil edilmiştir.

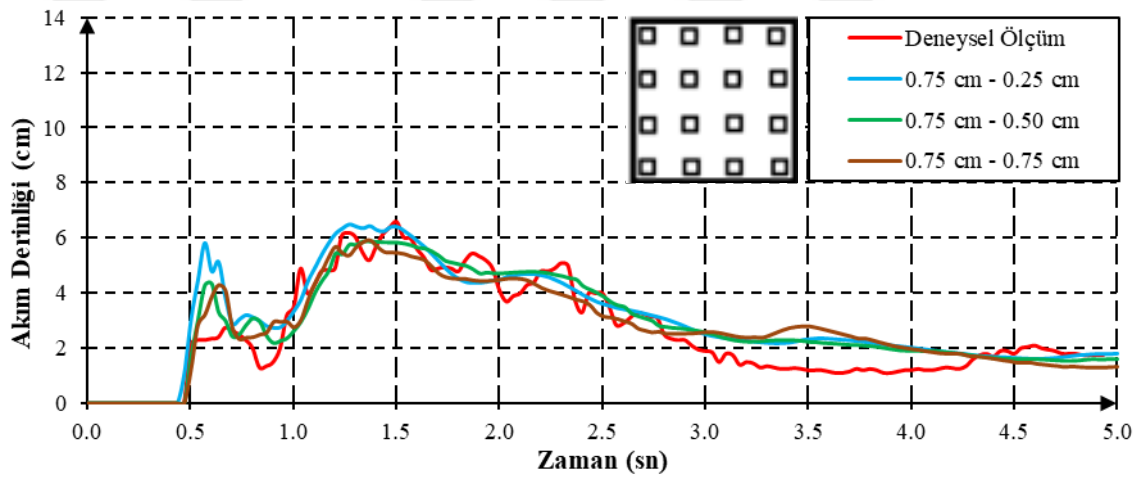
Diğer modelleme adımları daha önce belirtildiği şekilde yürütülmüş ve simülasyon süresi 5 sn olarak belirlenmiştir. Ayrıca zaman adımının seçimi programa bırakılmış ve program tarafından zaman adımı 0.033 sn olarak seçilmiştir. Geometri ve mesh atama kısımlarında ise deneysel kanalın boyutları düşünülerek sistemin geometrisi oluşturulmuş ve hücre boyutunu belirlemek için ağdan bağımsızlık testleri yapılmıştır.

Kanal mansabında yapısal ortamlar olması durumunda ağ boyutunun (hücre boyutu) etkisini araştırmak amacıyla Tip YO-1.1 örnek alınarak yapılan ağdan bağımsızlık testlerinde Çizelge 3.9’da verilen hücre boyutları kullanılarak ağ hassasiyetleri incelenmiştir. Yapısal ortamın memba ve mansabında ölçülen akım derinliklerini gösteren Şekil 3.80 ve Şekil 3.81 incelendiğinde, ana kanalın (mesh blok 1) 0.75 cm hücre boyutuna sahip olduğu yapısal ortamın olduğu kısmın (mesh blok 2) ise kademeli olarak azaltıldığı görülmektedir. Grafikler incelendiğinde ortam mansabının ortam membana kıyasla deneysel ölçüm sonuçlarıyla daha uyumlu olduğu görülmektedir. Bu çalışmada yapısal ortamlardan geçen akımın sayısal olarak modellenmesinde Ağ Tip-I seçilmiştir. Bu ağ tipinin seçilmesinin nedeni 1 cm’lik yüksekliğe sahip olan prizmatik yapısal elemanların ağ sıklaştırması yapılan bölgede (mesh blok 2) 0.25 cm hücre boyutuyla sayısal olarak daha iyi temsil edileceğinin düşünülmesidir.

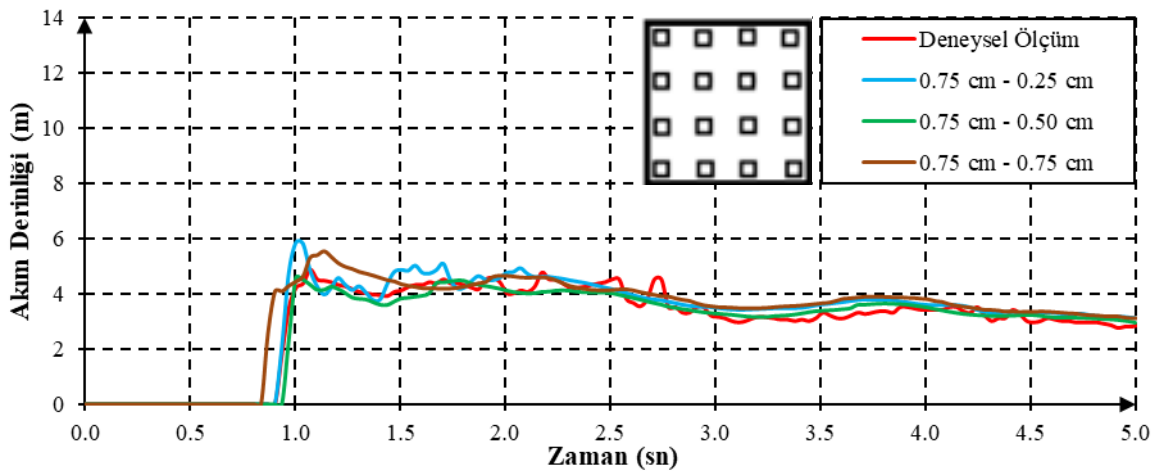
Çizelge 3.9’da belirtilen * ifadesi, Ağ Tip-I’in mesh blok 1’e ait olan farklılığını dile getirmek amacıyla eklenmiştir. Bu ifade Ağ Tip-I’de kanalın x doğrultusundaki tüm uzunluğu dikkate alınarak ağ ataması yapıldığını, diğer iki ağ tipinde ise kanalın x doğrultusundaki uzunluğunun bir kısmı dikkate alınarak ağ ataması yapıldığını göstermektedir. Yapısal ortamda sıklaştırma yapılan mesh blok 2’nin boyutları ise tüm ağ tiplerinde aynıdır.

Çizelge 3.9. Yapısal ortamların kullanımı durumunda akım derinlikleri için ağdan bağımsızlık testi

Ağ Tipi	Mesh Blok 1	Mesh Blok 2	Mesh Blok 1 Hücre Sayısı	Mesh Blok 2 Hücre Sayısı	Gerçek Zamanlı Simülasyon Süresi
	(Hücre Boyutu) (m)	(Hücre Boyutu) (m)			
Ağ Tip-I*	0.0075	0.0025	8704000	18432000	3 gün 17 saat 3 dk.
Ağ Tip-II	0.0075	0.0050	3520000	2304000	3 saat 50 dk.
Ağ Tip-III	0.0075	0.0075	3520000	691200	1 saat 9 dk.

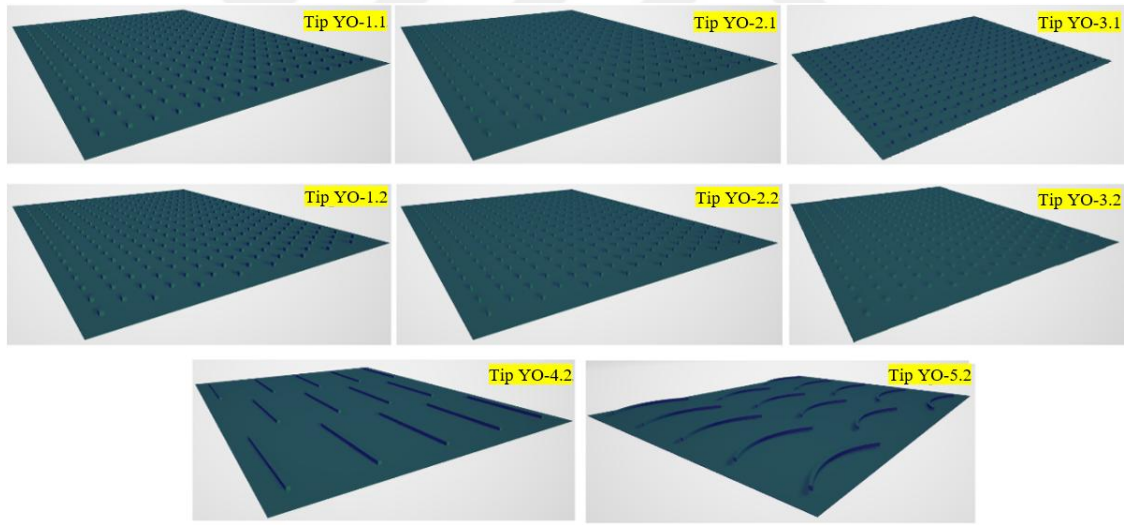


Şekil 3.80. Yapısal ortam Tip YO-1.1 için ortam membaında (kapaktan itibaren 146 cm) ölçülen akım derinliği üzerinde ağ boyutunun etkisi

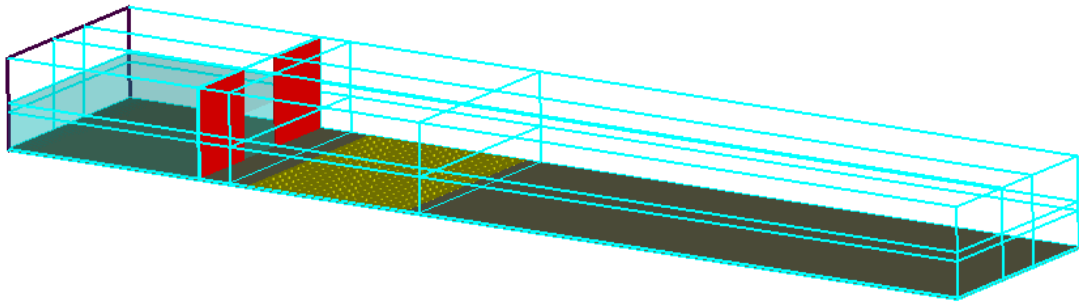


Şekil 3.81. Yapısal ortam Tip YO-1.1 için ortam mansabında (kapaktan itibaren 254 cm) ölçülen akım derinliği üzerinde ağ boyutunun etkisi

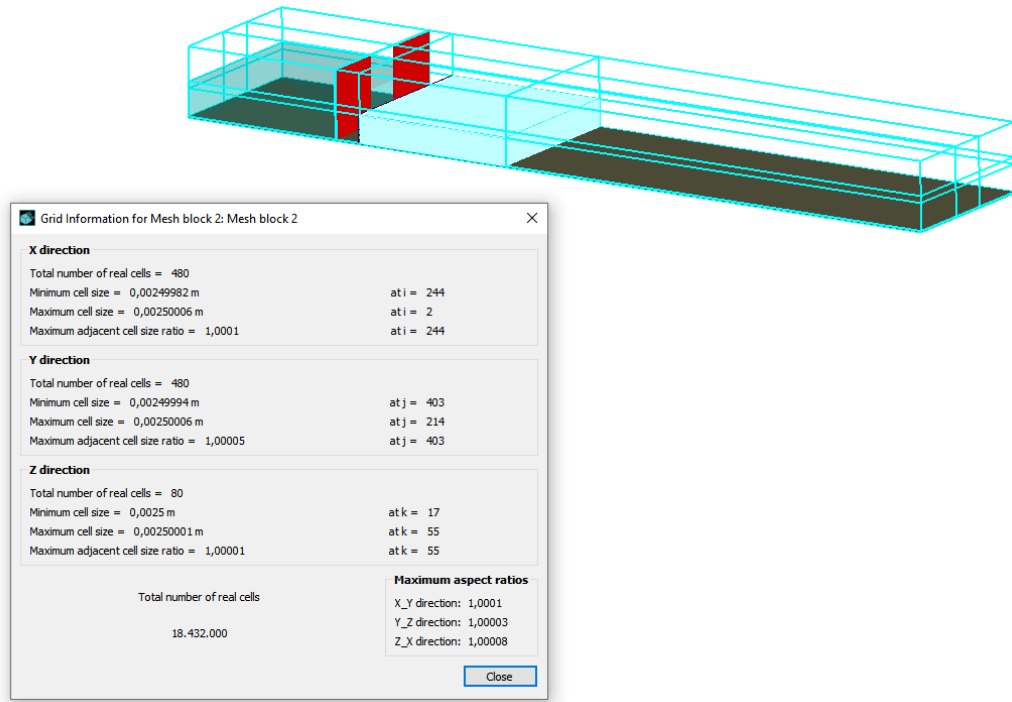
Geometri üzerinde oluşturulan mesh blok 1 için x , y ve z yönlerindeki hücre aralıkları 0.75 cm seçilerek kare mesh ataması gerçekleştirilmiş ve RANS denklemleri için toplamda 8704000 hücre elde edilmiştir. Daha sonra ikinci bir mesh blok tanımlaması yapılarak yapısal ortamın kanal içerisindeki yeri belirlenmiştir. Bu bölüm kapaktan itibaren 30 cm uzaklığa gelecek şekilde yerleştirilmiş ve bu bölüme önceden Solidworks programında oluşturulup STL uzantılı dosya formatında kaydedilen ve Şekil 3.82’de verilen geometriler çağrılmıştır. Bu işlem sonrasında Şekil 3.83’te verilen geometri elde edilmiştir. Ayrıca mesh blok 2 bölgesinde akımı daha iyi tarif edebilmek için bu bölgede hücre boyutu 0.25 cm seçilerek ağ atamasında sıklaştırma yapılmıştır. Dolayısıyla mesh blok 2 için toplamda 18432000 adet kare hücre kullanılmıştır (Şekil 3.84). Böylece sistemde toplam 27136000 adet hücre kullanılarak gerekli analizler yapılmıştır. Ayrıca geometrinin belli bölümleri çözüm alanına dahil edilmemesi için kapatılarak boyut ve analiz süresinde azaltmaya gidilmiştir (Şekil 3.85). Tüm bunların ardından kapak yeri açık kalacak şekilde modelin geometrisi tamamlanmıştır.



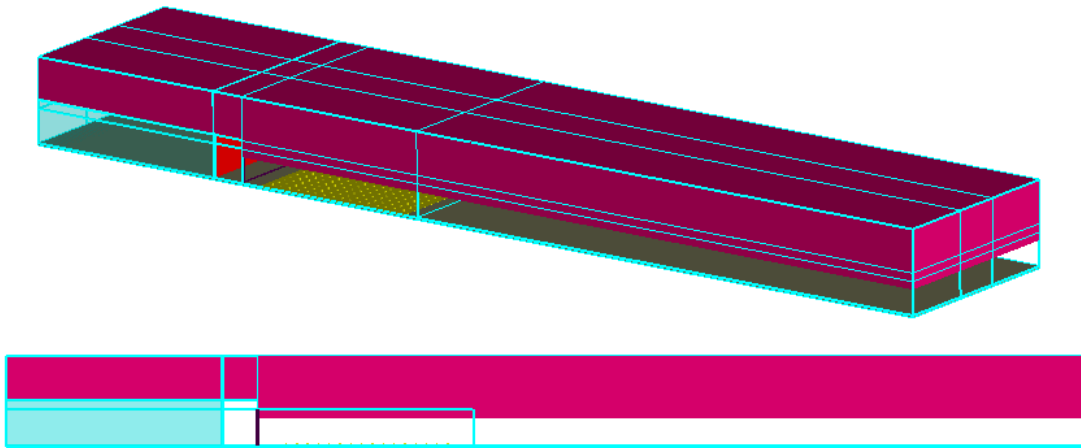
Şekil 3.82. Yapısal ortamlar için kullanılan STL uzantılı geometriler



Şekil 3.83. Flow-3D’de mesh blok 2 için geometrinin oluşturulması



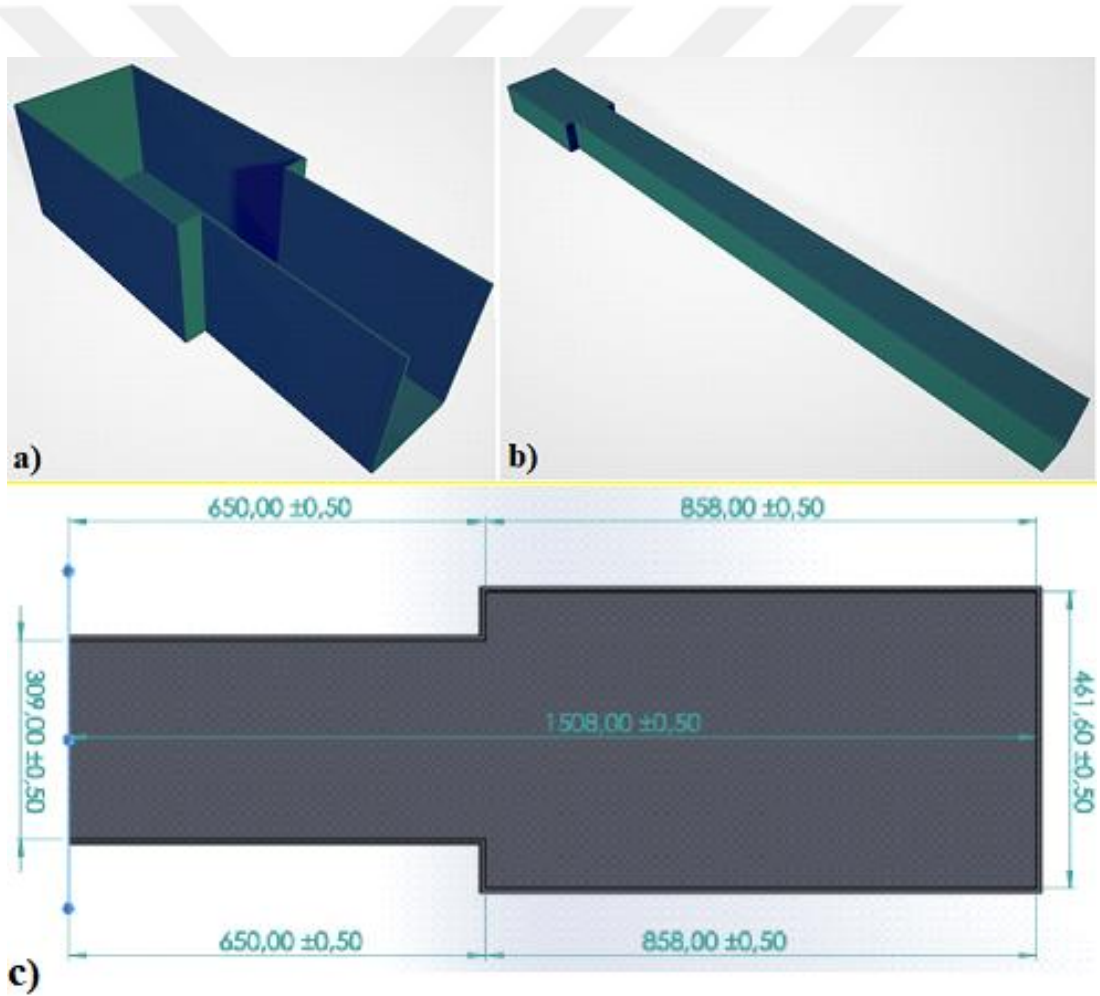
Şekil 3.84. Flow-3D’de geometri üzerine mesh blok 2’de ağ ataması



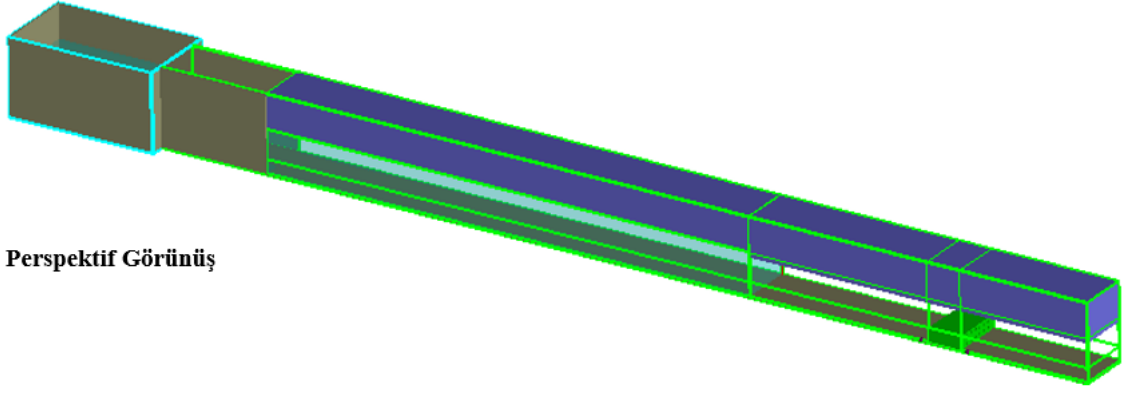
Şekil 3.85. Flow-3D ile tanımlanan kanal-1’e ait geometri

Sonraki aşamada programa probleme özgü sınır koşulları girilmiştir. Bu aşamada mesh blok 1 için X_{min} , Y_{min} , Y_{maks} ve Z_{min} sınır koşulları “duvar” (Wall) olarak tanımlanmış X_{max} “çıkış akımı” (Outflow) ve Z_{max} “simetri” (Symmetry) olarak sisteme tanıtılmıştır (Şekil 3.86 ve Şekil 3.87). Mesh blok 2 için ise X_{min} , X_{max} ve Z_{max} “simetri” (Symmetry) Y_{min} , Y_{maks} ve Z_{min} “duvar” (Wall) olarak tanımlanmıştır (Şekil 3.86 ve Şekil 3.87). Sınır koşullarının ardından başlangıç koşullarının modele işlenmesi için ilgili sekme açılmış ve bu alana 1.2x1.2x0.25 m’lik bir hacim için su tanımlaması yapılmış, mansap kısmı ise kuru olarak bırakılmıştır.

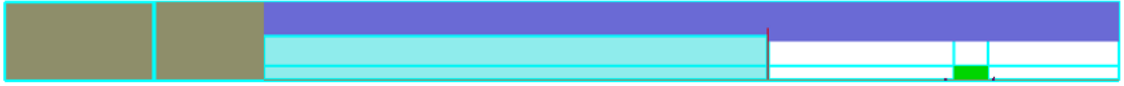
profilleri ve model-yapıya etkiyen kuvvet ölçümlerine dayanan deneyler, boyutları 10x0.309x0.45 m olan Kanal-2 üzerinde yürütüldüğünden geometri olarak bu boyutlarda ve kanalı tam olarak tarif eden bir geometri oluşturulmuştur. Dolayısıyla burada kanalın giriş haznesi de STL formatında geometriye ilave edilmiştir (Şekil 3.88). Bununla birlikte akım derinliği ölçümlerinde başlangıç aşamasında kanalda depolanan 0.25 m’lik su da önceden STL formatında hazırlanarak geometriye dâhil edilmiştir (Şekil 3.88b). Kanalın 2.94 m’sine deneyler sırasında kapağı her iki tarafta tutan kılavuz raylar ilave edilmiş ve gözenekli/gözeneksiz yapılar kanalın 4.03 m’sinden başlayacak şekilde kanal geometrisi üzerine tanımlanmıştır. Kanal-2’ye ait oluşturulan geometrinin son hali ve deneylerde kullanılan gözenekli/gözeneksiz yapılar sırasıyla Şekil 3.89 ve Şekil 3.90’da verilmektedir.



Şekil 3.88. STL formatındaki a) kanal giriş haznesine ait geometri b) başlangıç aşamasında tanımlanan su c) giriş haznesi boyutları (mm)



Perspektif Görünüş

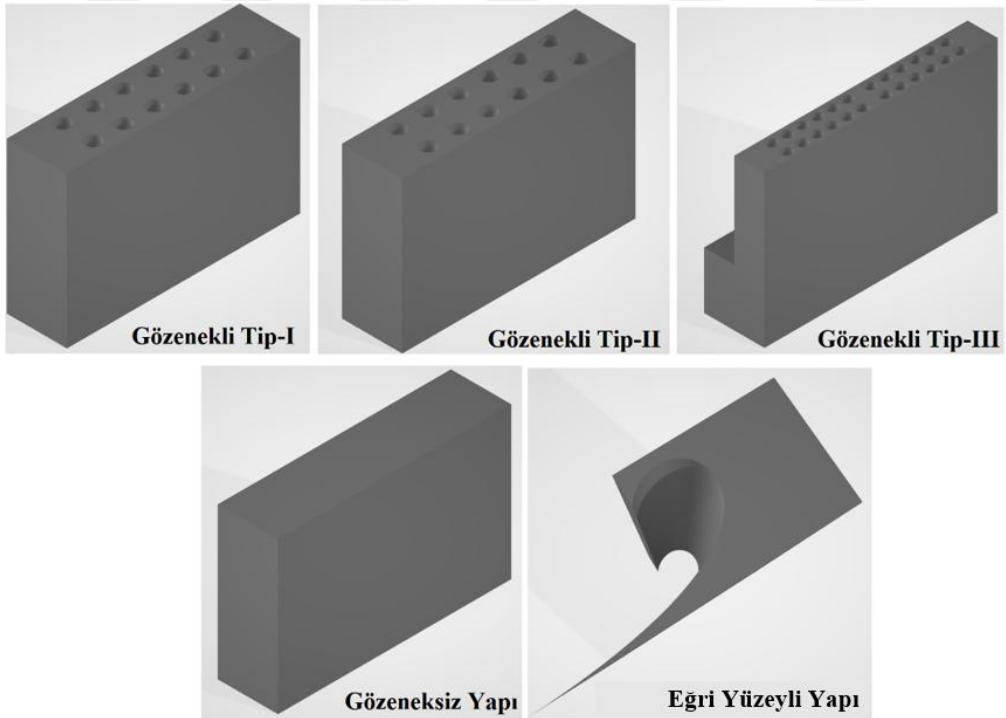


Yan Görünüş



Plan Görünüş

Şekil 3.89. Flow-3D ile tanımlanan kanal-2'ye ait geometri



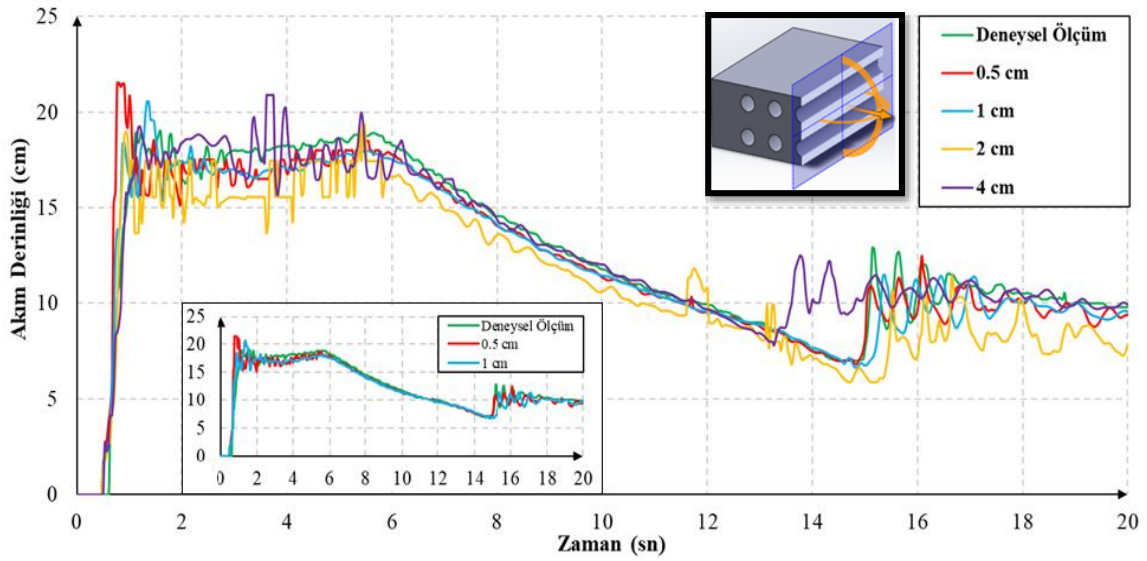
Şekil 3.90. Gözenekli ve gözeneksiz yapılar için kullanılan STL uzantılı geometriler

Geometrinin oluşturulmasından sonra ağ atamasında kullanılacak hücre boyutunun belirlenmesi için ağdan bağımsızlık testleri yapılmıştır. Kanal mansabında

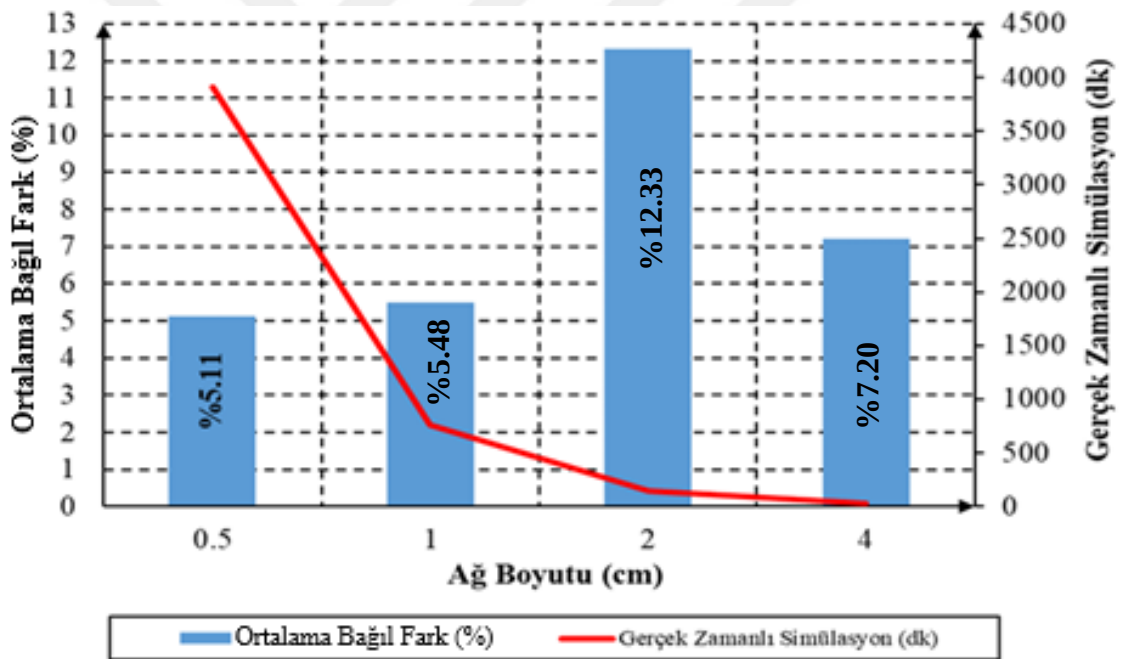
gözenekli/gözeneksiz yapılar olması durumları için yapılan ağdan bağımsızlık testlerinde tüm kanal boyunca 0.5 cm, 1 cm, 2 cm ve 4 cm olmak üzere dört farklı ağ boyutu Gözenekli Tip-I yapısı üzerinden denenmiştir. Burada yapının membaında akım derinliğinin zamanla değişimi ele alınan ağ boyutları açısından karşılaştırılmıştır (Çizelge 3.10). Gözenekli/gözeneksiz yapılar için simülasyon süresi 20 sn olarak belirlenmiş ve zaman adımının seçimi programa bırakılmıştır. Program tarafından zaman adımı 0.033 sn olarak seçilmiştir. Farklı ağ boyutlarının akım derinliğinin zamanla değişimi üzerindeki etkisi Şekil 3.91’de verilmektedir. Şekil 3.91’den de görüleceği üzere 2 cm ve 4 cm hücre boyutuna sahip olan Ağ Tip-III ve Ağ Tip-IV’ün kanal giriş haznesinden yansıyan dalgayı deneysel ölçüm sonuçlarına göre sırasıyla daha sonra ve daha önce ürettiği ve aynı zamanda çok fazla salınım yaptıkları görülmektedir. Bununla birlikte Ağ Tip-I ve Ağ Tip-II’nin deneysel sonuçlarla daha uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Şekil 3.92 incelendiğinde % ortalama bağıl fark değerleri açısından da Ağ Tip I’in %5.11 ile deneysel sonuçlara daha yakın sonuçlar ürettiği görülmüştür. Bu sebeple diğer tüm gözenekli ve gözeneksiz yapılarda x, y, z yönlerindeki hücre boyutu 0.5 cm alınarak sayısal model çalışmalarına devam edilmiştir. Dolayısıyla burada mesh blok 1 için toplam 6537888 adet hücre elde edilmiştir. Ayrıca türbülans kapatma modeli olarak yine $k-\varepsilon$ modeli tercih edilmiş ve akım derinliğinin zamanla değişimini elde etmek için yapıların memba ve mansabına ölçüm noktaları yerleştirilmiştir.

Çizelge 3.10. Gözenekli/gözeneksiz yapıların kullanımı durumunda akım derinlikleri için ağdan bağımsızlık testi

Ağ Tipi	Hücre Boyutu (m)	Hücre Sayısı	Gerçek Zamanlı Simülasyon Süresi
Ağ Tip-I	0.005	6537888	2 gün 17 saat 14 dk.
Ağ Tip-II	0.01	1517264	12 saat 45 dk.
Ağ Tip-III	0.02	108288	2 saat 28 dk.
Ağ Tip-IV	0.04	16920	34 dk.

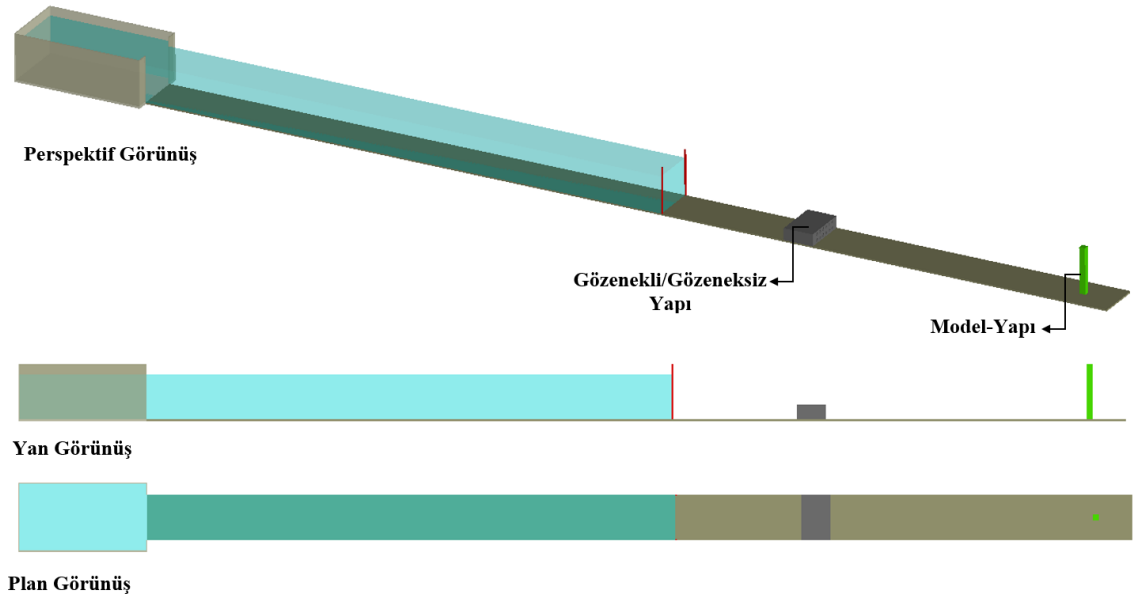


Şekil 3.91. Gözenekli Tip-I için yapının membranında ölçülen akım derinliği üzerinde ağ boyutunun etkisi



Şekil 3.92. Ağ boyutunun simülasyon süresi ve ortalama bağıl fark üzerindeki etkisi

Akım derinliklerinin dışında gözenekli/gözeneksiz yapılardan geçen şok dalgasının bir model-yapı üzerinde oluşturduğu kuvvet de Flow-3D ile modellenmiştir (Şekil 3.93). Modelleme aşamasında yukarıda bahsedilenlerin dışında başlangıç rezervuar su seviyesi 15 cm, 20 cm ve 25 cm olarak dikkate alınmış ve gözenekli/gözeneksiz yapılardan sonra, kapaktan itibaren 2.8 m uzaklığa, 4x4 cm boyutunda kare bir model-yapı yerleştirilmiştir. Bu model-yapı üzerine etkiyen yatay kuvvet Flow-3D programı ile elde edilmiştir.

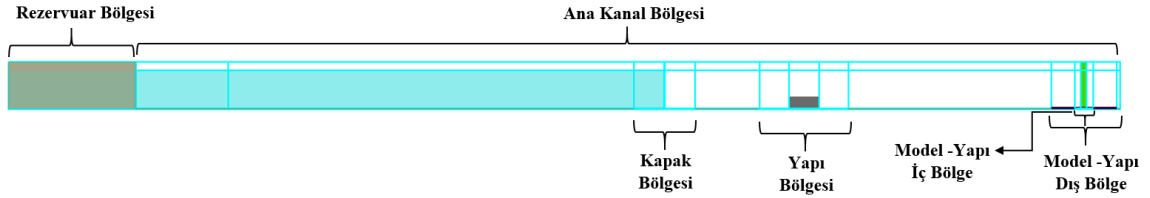


Şekil 3.93. Model-yapı üzerinde kuvvet ölçümüne ait Flow-3D görüntüsü

Diğer durumlarda olduğu gibi gözenekli/gözeneksiz yapılar kullanılarak model-yapı üzerindeki kuvvet ölçümüne dayanan sayısal modelleme çalışmaları için de ağdan bağımsızlık testi yapılmıştır. Bu durum için ele alınan ağ boyutları Çizelge 3.11’de verilmektedir. Tüm ağ tiplerinde simülasyon süresi 25 sn olarak dikkate alınmış ve zaman adımının seçimi yine programa bırakılmıştır. Program tarafından zaman adımı 0.02 sn olarak seçilmiştir. Çizelge 3.11’de tanımlanan “Yapı” gözenekli/gözeneksiz yapı bölgesini tanımlamakta ve bu bölge yapıdan önceki ve sonraki 20 cm’lik bölgeyi tarif etmektedir. Benzer şekilde “Kapak” olarak isimlendirilen kısım kapağın 20 cm ilerisi ve gerisindeki bölgeyi temsil etmektedir. “Model-Yapı” olarak belirtilen bölge ise dış ve iç olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Dış kısım model-yapının 20 cm ilerisi ve gerisini, iç kısım ise model-yapının 4 cm ilerisi ve gerisini kapsamaktadır (Şekil 3.94). Bu bölgede kuvvetin etkidiği model-yapıyı daha iyi tanımlayabilmek için mevcut bölge iki kısma ayrılmıştır. İç kısımdaki bölgede hücre aralığı tüm yapı tipleri için 0.25 cm olarak seçilmiştir. Çizelge 3.10’da verilen tüm ağ boyutları cm cinsindedir.

Model-yapı üzerine etkiyen kuvvetin zamansal değişimini araştırmak için kanal mansabında Gözenekli Tip-I yapısı olması durumuna ait dört farklı ağ yapısı denenmiş ve sonuçlar Şekil 3.95’te verilmiştir. Şekil 3.95 incelendiğinde tüm ağ tiplerinin genel anlamda birbirine yakın sonuçlar ürettiği görülmektedir. Fakat hem deneysel sonuçlara yakınlık hem de gerçek zamanlı simülasyon süresi açısından Ağ Tip-II’nin en uygun ağ yapısı olduğuna karar verilmiştir.

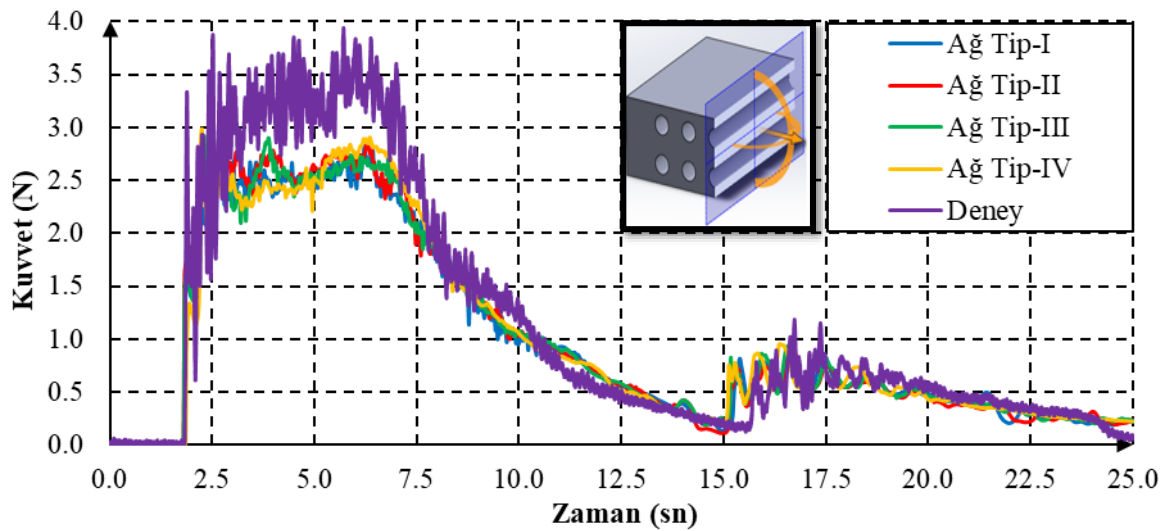
Dolayısıyla bu kurulumda tüm kanal 1 cm hücre boyutuyla geçilmiş ve gözenekli/gözeneksiz yapılar ile model-yapının olduğu kısımlarda ağ sıklaştırması yapılmıştır. Gözenekli/gözeneksiz yapıların olduğu kısımlar 0.5 cm hücre boyutuyla, model-yapının olduğu kısım ise dış kısımda 0.5 cm ve iç kısımda 0.25 cm hücre boyutuyla tanımlanmıştır.



Şekil 3.94. Kanal-2 üzerinde bölgelerin tanımlanması

Çizelge 3.11. Gözenekli/gözeneksiz yapıların kullanımı durumunda kuvvet ölçümü için ağdan bağımsızlık testi

Ağ Tipi	Ana Kanal	Yapı	Kapak	Model-Yapı (Dış)	Model-Yapı (İç)	Toplam Hücre Sayısı	Gerçek Zamanlı Simülasyon Süresi
Ağ Tip-I	1.00	0.50	0.50	1.00	0.25	2246284	20 sa. 47 dk.
Ağ Tip-II	1.00	0.50	0.50	0.50	0.25	2540908	25 sa. 5 dk.
Ağ Tip-III	1.00	0.50	0.50	0.25	0.25	4908812	41 sa. 59 dk.
Ağ Tip-IV	1.00	0.25	0.50	0.50	0.25	5777308	87 sa. 57 dk.



Şekil 3.95. Gözenekli Tip-I için ağ boyutunun kuvvet üzerindeki etkisi

3.2.2 İki boyutlu FVSSWE sayısal modeli

Erduran (2001) tarafından geliştirilen model, Denklem (3.12) - Denklem (3.15)'te verilen 2 boyutlu sığ su denklemlerini sonlu hacimler yöntemini ve Riemann çözücülerini kullanarak çözmektedir.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0 \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(hu^2 + \frac{1}{2} gh^2 \right) + \frac{\partial}{\partial y} (huv) = gh(S_{0x} - S_{fx}) \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(hv^2 + \frac{1}{2} gh^2 \right) + \frac{\partial}{\partial x} (huv) = gh(S_{0y} - S_{fy}) \quad (3.14)$$

$$S_{fx} = \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}}, \quad S_{fy} = \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (3.15)$$

Burada; h su derinliğini, u ve v x - y yönündeki derinlik ortalamalı hız bileşenlerini, g yer çekimi ivmesini, S_{0x} ve S_{fx} x yönündeki kanal taban eğimi ve enerji çizgisi eğimini, S_{0y} ve S_{fy} y yönündeki taban eğimi ve enerji çizgisi eğimini ve n Manning katsayısını göstermektedir.

Modelde beş farklı Riemann çözücüsüne (şok yakalama şemasına) yer verilmiştir; Osher, HLL, FVS, HLLC ve Roe. Model birinci ve ikinci dereceden doğrulukla çözümler üretebilmektedir. Ayrıca taban sürtünmesini ifade etmek için farklı sürtünme metotları ile türbülans modellerini içermektedir (Şekil 3.96).

Modelleme çalışmalarında başlangıç akım koşulları, mambadaki rezervuar su seviyesi ve mansap yatağındaki kuyruk suyu seviyeleri olarak tanımlanmıştır. Kuru mansap yatağındaki deneysel çalışmalar için memba sınır koşulu kapalı, mansap sınır koşulu ise açık olarak belirlenmiştir. Islak mansap yatağı çalışmalarında ise mansap sınır koşulu da kapalı olacak şekilde tanımlanmıştır. Bu tez çalışmasında birinci dereceden doğrulukla çözüm ve HLLC şeması kullanılmış ve Manning sürtünme katsayısı 0.01 olarak alınmıştır. Sığ su denklemlerinin ayrıntılı çözümü ile sınır ve başlangıç koşullarının tanımları Erduran (2001) ve Erduran vd., (2002)'de verilmektedir. Kuru ve ıslak mansap

yatağındaki simülasyon süreleri 15 sn ve 20 sn olarak tanımlanmıştır. Stabiliteleri sağlamak amacıyla zaman adımı 0.002 saniye olarak seçilmiştir.



Şekil 3.96. FVSSWE modelinde kullanılan nümerik çözümler (Erduran, 2001)

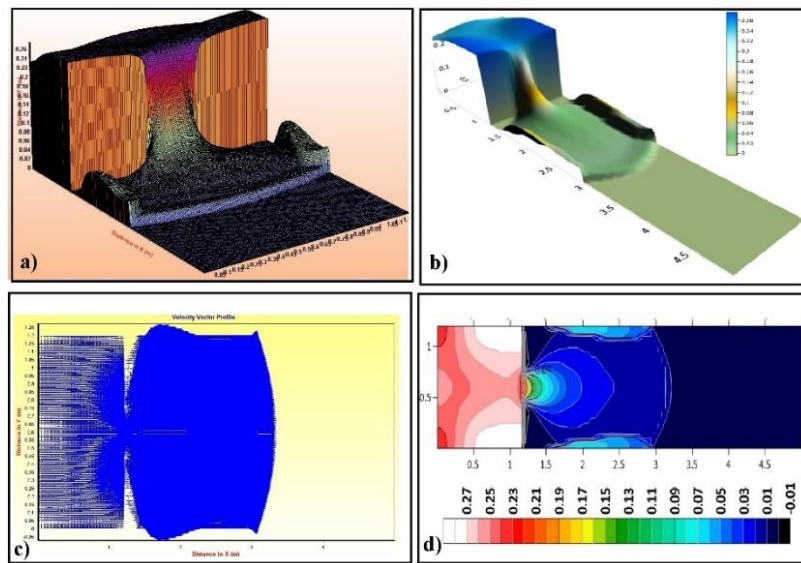
Model kısaca şu şekilde çalışmaktadır (Şekil 3.97):

1. Öncelikle daha önce hazırlanmış metin dosyalarından başlangıç akım, geometrik, sınır ve koordinat verileri okunur.
2. Daha sonra su derinliği, hız ve birim debi sonuçlarının yazdırılması için bir çıktı/metin dosyası oluşturulur.
3. Simülasyon sekmesinden çözümün doğruluk derecesi, hücre sayısı, sürtünme metodu vs. seçilir.
4. Son olarak zaman adımı, zaman adımı sayısı ve çıktı sıklığı değerleri girilerek simülasyon başlatılır.



Şekil 3.97. FVSSWE modelinin çalışma şekli (Erduran, 2001)

Geliştirilen bu model ile grafiksel ve görsel sonuçlar elde edilebildiği gibi sayısal olarak da veriler elde edilebilmektedir. Modelden belli zamanlarda 3 boyutlu görüntüler, 2 boyutlu hız dağılımı ve kontur haritaları elde edilebilmektedir (Şekil 3.98). Ayrıca modelin ürettiği sayısal sonuçlar Surfer ve Gnuplot gibi farklı programlar kullanılarak da görselleştirilebilmektedir.



Şekil 3.98. FVSSWE modeline ait a) 3B görünüm b) Surfer 3B görünüm c) hız dağılımı d) Surfer kontur görünümü

3.3 Analitik Yöntemler

Bu bölümde baraj yıkılması sonrası oluşan şok dalgasının karakteristiklerini elde etmede yaygın olarak kullanılan analitik çözümler anlatılmıştır.

3.3.1 Ortalama dalga yayılma hızının hesaplanması

Literatürde kullanılan ortalama dalga önü yayılma hızına ait bağıntı Denklem (3.16)'da verilmektedir. Denklem 3.16'da görülen α değeri farklı araştırmacılar tarafından deneysel veriler kullanılarak elde edilen bir katsayıdır. Bu katsayının literatürde belirtilen değerleri Çizelge 3.12'de sunulmaktadır. Çizelge 3.12 incelendiğinde en düşük katsayının (0.66) Matsutomi ve Okamoto (2010) tarafından, en yüksek katsayının (2.0) ise FEMA (2001) tarafından önerildiği görülmektedir.

$$U = \alpha * \sqrt{g * h_0} \quad (3.16)$$

Burada; U : ortalama dalga önü yayılma hızını (m/s), g : yer çekimi ivmesini (m/s^2) ve h_0 : rezervuar su seviyesini ifade etmektedir.

Çizelge 3.12. α katsayıları

Kaynak	α katsayısı
Iizuka ve Matsutomi (2000)	1.10
Kirkoz (1983)	1.414
FEMA (2001)	2.00
Murty (1977)	1.83
Bryant (2001)	0.67
Matsutomi ve Okamoto (2010)	0.66
Shafiei vd., (2016)	1.70
Wüthrich (2018a)	1.25
Erduran vd., (2025)-Sayısal	1.27
Erduran vd., (2025)-Deneysel	1.35 ve 1.38

3.3.2 Dalga önü hızları ve konumlarının hesaplanması

Bu çalışmada, deneysel ve sayısal çalışmaların yanı sıra, Erduran vd., (2025) tarafından, Ritter (1892) ve Chanson (2005) denklemlerinin Darcy sürtünme katsayısının Colebrook-

White denklemi ile elde edildiği analitik çözümleri kullanılarak baraj yıkılması sonucu oluşan şok dalgasının karakteristikleri elde edilmiştir.

Ritter (1892) çözümünde kuru mansap yatağında sürtünmesiz bir ortamda baraj yıkılması sonucu oluşan ortalama akım hızını boyutsuz değişkenler kullanarak hesaplanmıştır. Bu değişkenleri $X = x/h_0$, $T = t * (g/h_0)^{1/2}$ ve $V = u/(g * h_0)^{1/2}$ olarak tanımlamıştır. Burada, V Denklem (3.17) kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$V = \frac{2}{3} * \left(1 + \frac{X}{T}\right) \quad (3.17)$$

Burada; x : mansapta belirlenen konumu (m), t : yıkılma sonrası zamanı (sn), u : ortalama akım hızını (m/s), g : yer çekimi ivmesini (m/s^2) h_0 : rezervuar su seviyesini, X : boyutsuz konumu, T : boyutsuz zamanı ve V boyutsuz hızı ifade etmektedir.

Chanson (2005) ise dalga önü hızını ve dalga önü konumunu sürtünme etkilerini dikkate alarak Denklem (3.18) ve Denklem (3.19) aracılığıyla hesaplanmıştır. Bu çalışmada sürtünme katsayısının hesabında Denklem (3.20)'de verilen Colebrook White formülünden yararlanıldığı için Chanson (2005)'in çözümü "Değiştirilmiş Chanson (2005)" olarak isimlendirilmiştir.

$$\frac{8}{3} * \frac{1}{f} * \frac{\left(1 - \frac{1}{2} * \frac{U}{\sqrt{g * h_0}}\right)^3}{\frac{U^2}{g * h_0}} = \sqrt{\frac{g}{h_0}} * t \quad (3.18)$$

$$\frac{x_s}{h_0} = \left(\frac{3}{2} * \frac{U}{\sqrt{g * h_0}} - 1\right) * \sqrt{\frac{g}{h_0}} * t + \frac{4}{f * \frac{U^2}{g * h_0}} * \left(1 - \frac{1}{2} * \frac{U}{\sqrt{g * h_0}}\right)^4 \quad (3.19)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{k_s}{3,71 * D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (3.20)$$

Burada; U : dalga önü hızını, f : Darcy sürtünme katsayısını, x_s : dalga önünün konumunu, k_s : pürüzlülük yüksekliğini ve Re : Reynolds sayısını belirtmektedir.

BÖLÜM IV

BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde öncelikle taşkın şok dalgasının karakteristiği ve taşkın şok dalgasının etkilerini azaltmak üzere tasarlanan yapısal önlemlerin performansları araştırılmıştır.

4.1 Taşkın Şok Dalgası Karakteristiğinin Belirlenmesi

Taşkın şok dalgasının akım derinliği, akım hızı ve profilinden oluşan karakteristikleri ve bu karakteristikler üzerinde kapak açılma süresi ile kuru ve ıslak mansap yatağının etkileri bu başlık altında incelenmiştir. Aynı zamanda kuru mansap yatağında ilerleyen taşkın şok dalgasının bazı karakteristiklerinin analitik yöntemlerle hesabı anlatılmıştır.

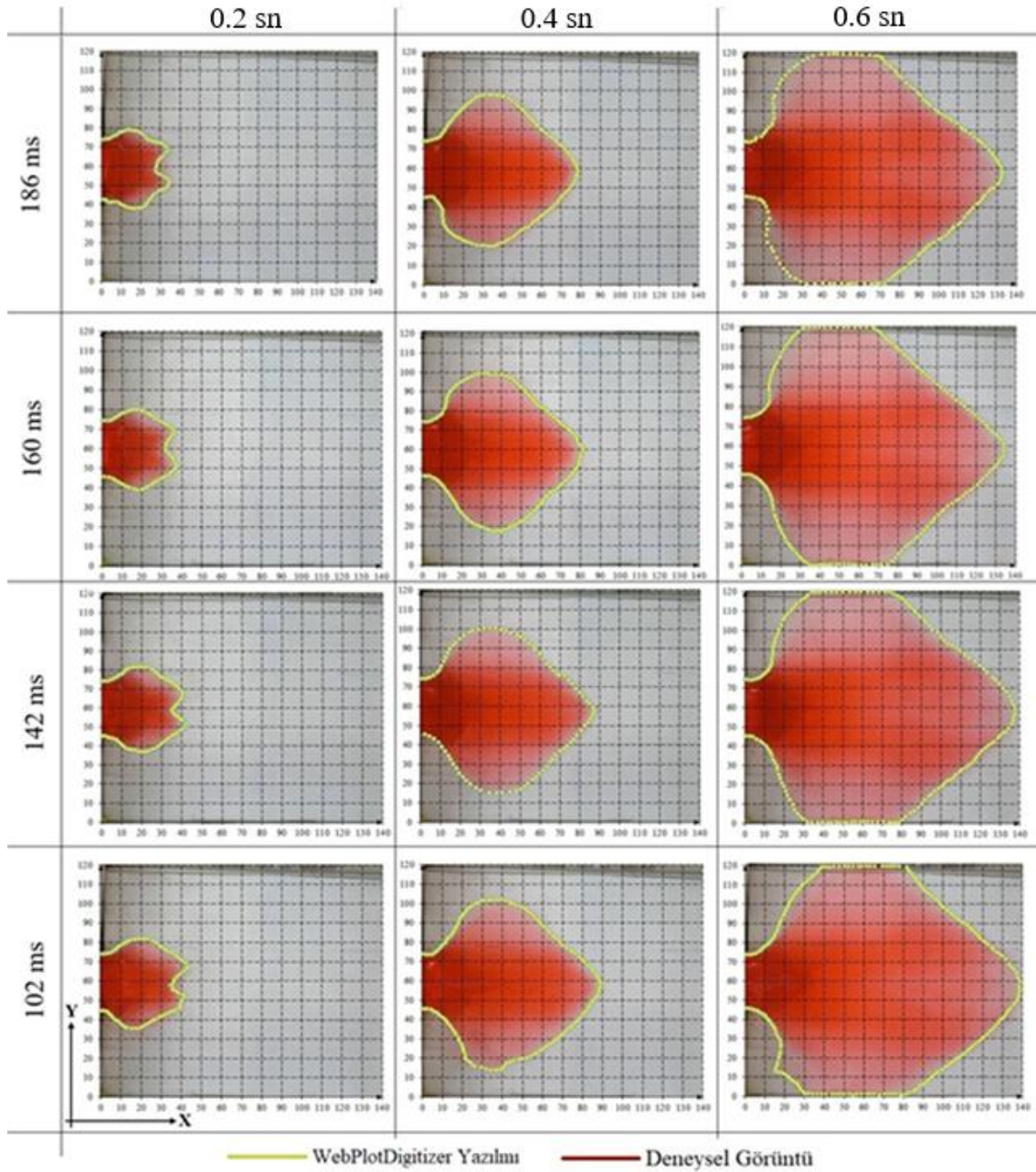
4.1.1 Kapak açılma süresinin etkisi

Bu bölümde Kanal-1 üzerinde yürütülen deneylerde kapak açılma süresinin akım karakteristikleri üzerindeki etkisinin yanı sıra görüntü işleme tekniği ve sayısal modellerin kapak açılma süresine bağlı performansları araştırılmıştır.

Deneyler, Lauber ve Hager (1998a) tarafından yatay, dikdörtgen en kesitli ve kuru mansap yatağına sahip kanallar için önerilen ve Denklem (3.1) kullanılarak hesaplanan maksimum kapak açılma süresi koşulunu sağlayacak şekilde 186 ms, 160 ms, 142 ms ve 102 ms olmak üzere 4 farklı kapak açılma süresi için yürütülmüştür. Denklem (3.1) kullanılarak 25 cm başlangıç rezervuar su seviyesi için hesaplanan maksimum kapak açılma süresi 0.199 sn (199 ms) olarak elde edilmiş ve burada uygulanan tüm deneysel kapak açılma sürelerinin ani baraj yıkılması koşulunu sağladığı görülmüştür. Burada önemle belirtilmelidir ki; Lauber ve Hager koşulunu sağlamayan kapak açılma süreleri değerlendirme dışı tutulmuştur.

Oluşturulan 4 farklı ani kapak açılma süresi için Üst Kamera-1 yardımıyla elde edilen görüntüler, WebPlotDigitizer yazılımı aracılığıyla sayısal verilere dönüştürülmüştür. Her bir kapak açılma süresi için üç farklı zamana (0.2 sn, 0.4 sn ve 0.6 sn) ait taşkın şok dalgasının 2 boyutlu yayılımını temsil eden sınır değerler elde edilmiş ve bu yayılım

sınırları deneysel görüntülerle birlikte karelere ayrılmış bir düzlem üzerine yerleştirilerek kapak açılma süresinin yayılım üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Farklı kapak açılma sürelerine ait WebPlotDigitizer yazılımıyla elde edilen 2 boyutlu taşkın şok dalgalarına ait yayılım sınırları ve kapaktan itibaren ölçülen taşkın şok dalgası önünün ulaştığı maksimum mesafeler sırasıyla Şekil 4.1 ve Çizelge 4.1’de sunulmaktadır.



Şekil 4.1. WebPlotDigitizer yazılımı kullanılarak elde edilen farklı kapak açılma süreleri için taşkın şok dalgasının 0.2 sn, 0.4 sn ve 0.6 sn’deki 2 boyutlu yayılım görüntüleri

Çizelge 4.1. WebPlotDigitizer yazılımı kullanılarak elde edilen ve kapaktan itibaren ölçülen şok dalgası önünün ulaştığı maksimum mesafeler

Kapak Açılma Süresi (ms)	Maksimum Mesafeler (cm)		
	0.2 sn	0.4 sn	0.6 sn
186	34.57	78.54	132.53
160	37.11	81.32	134.09
142	41.86	87.02	137.78
102	43.24	88.87	138.71

Çizelge 4.2’de WebPlotDigitizer yazılımı sonuçları kullanılarak farklı kapak açılma sürelerine ait farklı zamanlarda oluşan yayılma hızları ile en hızlı kapak açılma süresi baz alınarak hesaplanan yüzde bağıl fark değerleri görülmektedir. Çizelge 4.2 incelendiğinde kapak açılma süresinin dalga yayılım hızları üzerinde azda olsa etkili olduğu ve bu etkinin yayılma hızlarını çok değiştirmedeği, özellikle dalga ilerledikçe kapak açılma sürelerine ait bağıl farkların Takagi ve Furukawa (2021)’nın da belirttiği üzere azaldığı tespit edilmiştir.

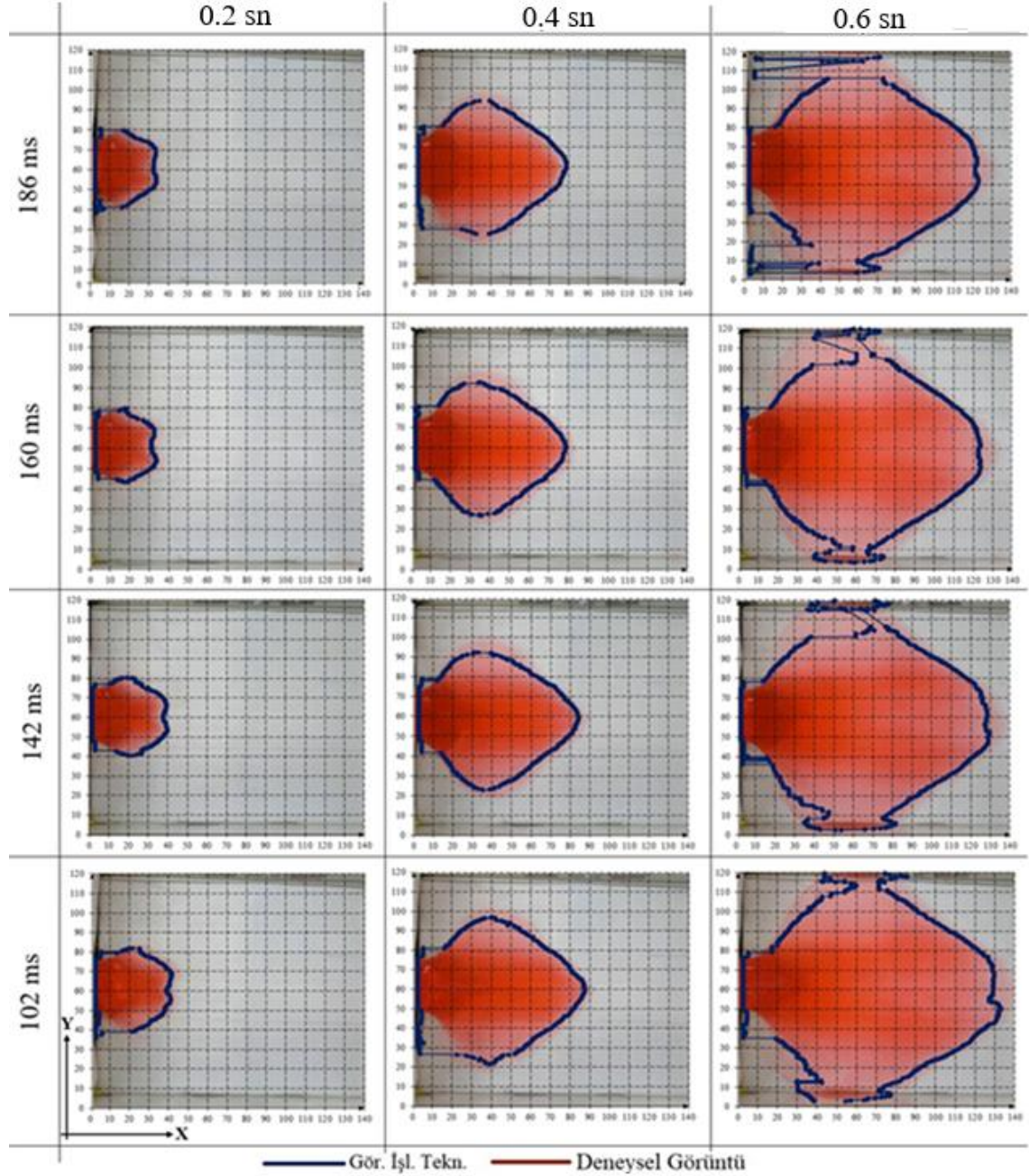
Çizelge 4.2. Farklı kapak açılma süresi ve farklı zamanlarda hesaplanan dalga yayılma hızları

Kapak Açılma Süresi (ms)	Hız (m/s) ve Bağıl Farklar (%)					
	0.2 sn’deki Hız (m/s)	% Bağıl Fark	0.4 sn’deki Hız (m/s)	% Bağıl Fark	0.6 sn’deki Hız (m/s)	% Bağıl Fark
186	1.729	20.05	1.964	11.62	2.209	4.46
160	1.856	14.18	2.033	8.50	2.235	3.33
142	2.093	3.19	2.176	2.08	2.296	0.67
102	2.162	0.00	2.222	0.00	2.312	0.00

Bu çalışmada kapak açılma süresi, dalga yayılım hızının yanı sıra görüntü işleme tekniği ve sayısal modelin performanslarını belirlemede de bir kriter olarak ele alınmıştır. Bunun için yine üç farklı zamana (0.2 sn, 0.4 sn ve 0.6 sn) ait taşkın şok dalgasının 2 boyutlu yayılımına ait sınırlar görüntü işleme tekniğiyle de elde edilmiştir (Şekil 4.2).

Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de verilen dalga yayılımlarına ait sınırlar incelendiğinde görüntü işleme tekniği ile elde edilen yayılımın deneysel çalışmalara ait görüntülerle genel olarak uyumlu olduğu fakat bazı bölgelerde farklılıklar gösterdiği görülmüştür. WebPlotDigitizer yazılımı aracılığıyla elde dalga yayılım sınırları ile deneysel görüntüler

karşılaştırıldığında ise belirlenen üç zaman adımı için de görüntü işleme tekniği sonuçlarından daha iyi bir uyum içinde olduğu görülmektedir. Ayrıca, yazılımın dalga önu ucunu özellikle 0.6 sn'de görüntü işleme tekniğine göre daha iyi yakaladığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.2. Görüntü işleme tekniği kullanılarak elde edilen farklı kapak açılma süreleri için taşkın dalgasının 0.2 sn, 0.4 sn ve 0.6 sn'deki 2 boyutlu yayılım görüntüleri

Çizelge 4.3. Görüntü işleme tekniği kullanılarak elde edilen ve kapaktan itibaren ölçülen şok dalgası önünün ulaştığı maksimum mesafeler

Kapak Açılma Süresi (ms)	Maksimum Mesafeler (cm)		
	0.2 sn	0.4 sn	0.6 sn
186	34.05	78.74	122.70
160	33.99	78.56	123.86
142	39.97	84.18	129.70
102	41.84	87.48	133.31

Gerek Şekil 4.1 ve Şekil 4.2, gerekse Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.3'ten şok dalgasının yayılma hızının kapak açılma süresiyle genel olarak ters orantılı olduğu, kapak açılma süresi azaldıkça dalga yayılma hızının arttığı görülmüştür. Bunun nedeni kapak açılma hızı arttıkça, kapağın olduğu yerdeki ara yüzün memba ve mansap tarafındaki akım parametreleri arasındaki farklar büyümekte (Takagi ve Furukawa, 2021) ve bunun sonucu olarak kapak açılımı ile birlikte mansaba doğru ilerleyen akılar daha büyük olmaktadır. Çizelge 4.3 incelendiğinde bu kuralı sadece 160 ms kapak açılma süresi için 0.2 sn ve 0.4 sn'deki şok dalgası yayılımına ait görüntü işleme tekniğinden alınan değerler bozmaktadır. WebPlotDigitizer yazılımı ile görüntü işleme tekniği arasında WebPlotDigitizer yazılımı sonuçları baz alınarak hesaplanan % bağıl fark değerleri Çizelge 4.4'te verilmiştir. Çizelge 4.4'e göre bu iki yöntem arasında bağıl fark maksimum %8.41 ve minimum %0.25 olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.4. WebPlotDigitizer yazılımı ve görüntü işleme tekniği sonuçları arasında hesaplanan yüzde bağıl fark değerleri

Kapak Açılma Süresi (ms)	Bağıl Farklar (%)		
	0.2 sn	0.4 sn	0.6 sn
186	1.50	0.25	7.42
160	8.41	3.39	7.63
142	4.52	3.26	5.86
102	3.24	1.56	3.89

Görüntü işleme tekniği ile deneysel sonuçlar arasında bazı bölgelerde görülen (Şekil 4.2) farklılıkların ve Çizelge 4.3'te verilen 160 ms için 0.2 sn ve 0.4 sn'deki şok dalgası yayılımına ait elde edilen maksimum mesafelerdeki diğer sonuçlarla uyumsuzlukların nedeni; renk filtrelemesi yapılırken belirlenen kırmızı renk değerinin bu bölgelerde deneysel görüntülerdeki renk tonunu yeterince karşılayamamasından kaynaklı olduğu

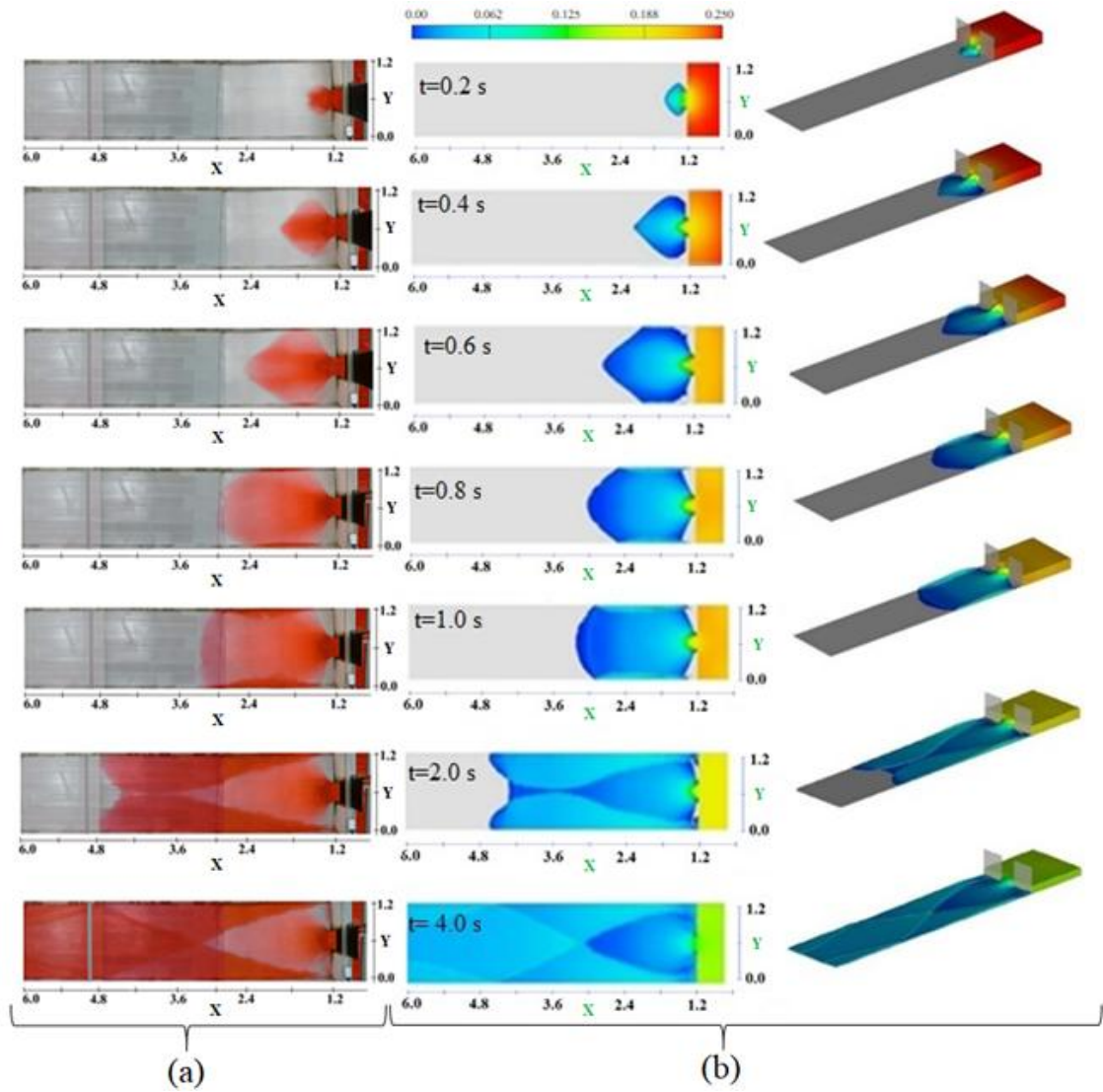
düşünülmektedir. Bununla birlikte, Şekil 4.2’de özellikle 0.2 sn ve 0.4 sn’lerdeki görüntülerde 2 boyutlu dalga yayılımına ait görüntülerle görüntü işleme tekniğinden elde olunan sınırların örtüştüğü ancak 0.6 sn’de ayrışmaların daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun sebebinin de dalga kanalın yan duvarlarına çarpması ile birlikte daha karmaşık bir yapı kazanan akım durumunun görüntüsünün renk filtresi ile ayrıklaştırılmasında ve görüntü işleme tekniği ile sayısallaştırılmasında yaşanan belirsizlikler olduğu söylenebilir. Ancak, gerçek bir baraj yıkılması sonucu oluşan yıkıcı şok dalgasına karşı alınacak önlemler açısından şok dalgasının mansap yatağındaki ilerleyiş hızı önemli bir parametre olarak değerlendirilmektedir. Bu kapsamda kanal boyunca farklı zamanlarda şok dalgası önünün ulaştığı son noktalar belirlenmiş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma neticesinde görüntü işleme tekniğinin deneysel sonuçlara oldukça yakın olduğu görülmüştür (Çizelge 4.3). Bu bulgu, yöntemin benzer problemlere uygulanabilirliği açısından ümit verici olarak değerlendirilebilir.

Sayısal modelin performansını belirlemek için ise sayısal model kapak açılma süresine (anlık) en yakın süre olan 102 ms kapak açılma süresine ait deneysel çalışma görüntüleri dikkate alınmıştır. Bu kapsamda söz konusu duruma ait deneysel görüntüler ile aynı koşullar altında Flow-3D RANS modeli kullanılarak elde edilen 2 ve 3 boyutlu görüntüler karşılaştırılmış ve Şekil 4.3’te verilmiştir.

Taşkın şok dalgasının yayılımını gösteren deneysel çalışmalardan elde edilen görüntüler ile sayısal modelden elde edilen görüntülerin genel olarak oldukça benzer olduğu görülmektedir (Şekil 4.3). Görüntülerden çıkartılabilecek bir diğer sonuç ise, modele ait taşkın şok dalgasının hem x hem de y doğrultusunda deneysel sonuçlara göre azda olsa daha fazla ilerlediği, başka bir deyişle daha hızlı yayıldığı görülmektedir. Özellikle 0.6 sn’ye kadar bu farklılık göze çarpmaktadır.

Şekil 4.3’te verilen sayısal model sonuçlarına göre 0.2 sn, 0.4 sn ve 0.6 sn için kanal boyunca şok dalgası önünün ulaştığı mesafeler sırasıyla 48.0 cm, 103.5 cm ve 164.7 cm olarak elde edilmiştir. Kapak açılma süresinin taşkın şok dalgasının yayılımı üzerindeki etkisi burada da görülmektedir. Sayısal modelde kapak açılması anlık ve pratik olarak 0.sn’de gerçekleşmektedir. Bunun sonucu olarak taşkın dalgası daha hızlı ilerlemektedir. En uzun kapak açılma süresi (186 ms) dikkate alınarak hesaplanan şok dalgasının kanal boyunca ilerlemesi, sayısal model sonuçlarına göre minimum %24 ve maksimum %39

daha yavaş olmuştur. Ani baraj yıkılma süresinin sınır değeri olan 199 ms alındığında bu farkın daha da büyüyeceği görülebilir.



Şekil 4.3. 102 ms kapak açılma süresi için a) deneysel çalışmalara ait görüntüler b) 2 ve 3 boyutlu sayısal modele ait görüntüler

Ayrıca taşkın şok dalgası yayılımına ait 2 boyutlu su yüzü profillerinin görüntülerinin kapak açılma süresinden etkilenmediği, görsel olarak birbirlerine çok benzer olduğu görülmektedir. Benzer bir sonuç Stolle vd., (2019) tarafından yapılan çalışmada da bahsedilmektedir. Dört farklı kapak açılma süresi için yürütülen deneyler ve sayısal model sonuçlarından, sayısal modelin kısmi baraj yıkılması sonucu oluşan taşkın şok dalgası yayılımına ait fiziksel problemi tarif etmede oldukça iyi olduğu sonucu çıkartılmıştır.

Teorik şok dalgası yayılma hızı ($c = 2 * \sqrt{g * h_0} = 3.132 \text{ m/s}$) baz alınarak 0.2 sn - 0.6 sn aralığında şok dalgası önünün ulaşacağı mesafeler hesaplandığında, sırasıyla 62.64 cm, 125.28 cm ve 187.92 cm olacaktır. Bu durumda en uzun kapak açılma süresi (186 ms) dikkate alınarak hesaplanan şok dalgasının kanal boyunca ilerlemesi ise minimum %29 ve maksimum %45 daha yavaş olacaktır.

4.1.2 Kuru ve ıslak mansap yatağının etkisi

Bu bölümde, Kanal-1 üzerinde yürütülen deneylerde taşkın şok dalgasının kuru ve ıslak mansap yatağı olması durumundaki karakteristik özellikleri (dalga önü konumu ve hız) ve görüntü işleme tekniği ile sayısal modellerin performansı araştırılmıştır.

Deneyisel çalışmalarda 25 cm ve 30 cm başlangıç rezervuar su seviyeleri için kapak açılma süreleri Arduino ile belirlenmiştir. Buna göre kuru mansap yatağında 25 cm ve 30 cm başlangıç rezervuar su seviyelerinde kapak açılma süreleri sırasıyla 136 ms ve 129 ms olarak ölçülmüştür. Bu süreler Lauber ve Hager (1998a) tarafından kuru mansap yatağında yürütülen deneyler için önerilen ve Denklem (3.1) ile hesaplanan maksimum kapak açılma süreleriyle karşılaştırılmıştır. Buna göre 25 cm ve 30 cm başlangıç rezervuar su seviyeleri için maksimum kapak açılma süreleri sırasıyla 199 ms ve 219 ms olarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla kuru mansap yatağında yürütülen deneylerde ani yıkılma koşulu sağlanmıştır. Benzer şekilde ıslak mansap yatağında da deneyisel kapak açılma süreleri Arduino ile elde edilmiş ve bu süreler 25 cm ve 30 cm başlangıç rezervuar su seviyeleri için sırasıyla 150 ms ve 140 ms olarak kaydedilmiştir. Burada belirtilen süreler Yang vd., (2020) tarafından ıslak mansap yatağında yürütülen deneyler için önerilen maksimum kapak açılma süresi Denklem (3.2) kullanılarak hesaplanmıştır. Buna göre 25 cm ve 30 cm başlangıç rezervuar su seviyeleri için kapak açılma süreleri sırasıyla 214 ms ve 235 ms olarak bulunmuştur. Dolayısıyla ıslak mansap yatağında yürütülen deneylerde de ani yıkılma koşulu sağlanmıştır.

Deneyisel ve sayısal çalışmalarda, şok dalgası yayılımı açısından kuru ve ıslak mansap yatağı durumları karşılaştırıldığında şok dalgası önünün kuru durumlarda ıslak durumlardan daha ileride olduğu belirlenmiştir. Başka bir deyişle ortalama şok dalgası yayılma hızının kuru durumlarda ıslak durumlardan daha yüksek olduğu görülmüştür (Şekil 4.4 ve Çizelge 4.5). Benzer bir sonuç Kocaman vd., (2021) tarafından da elde

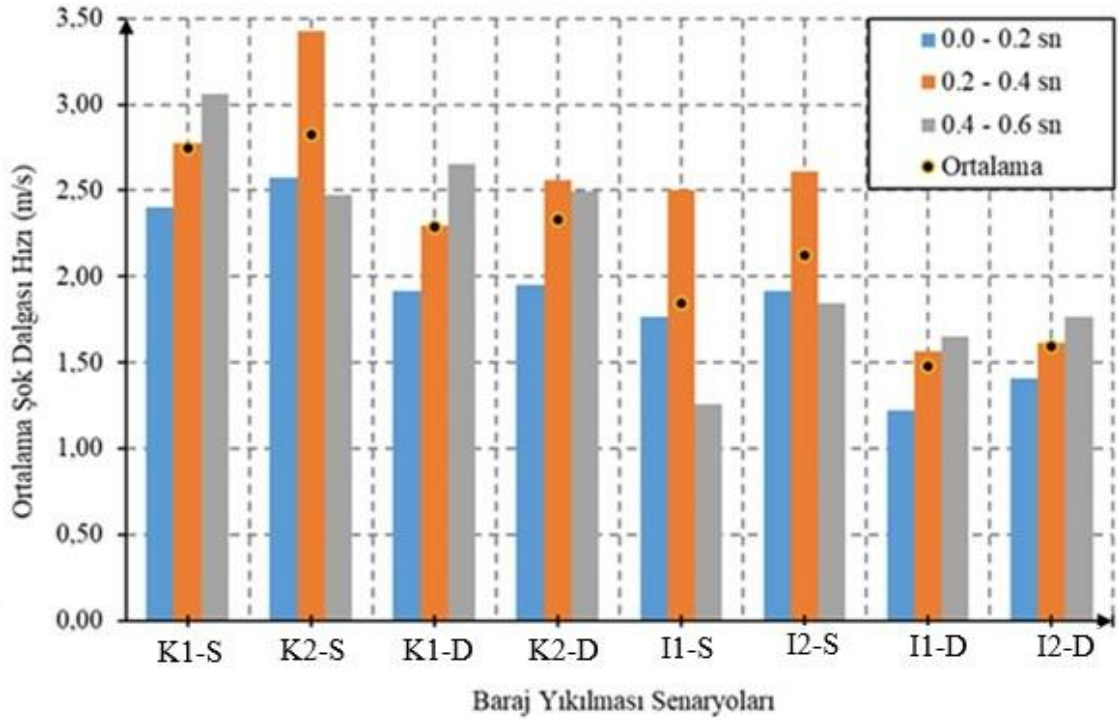
edilmiştir. Araştırmacılar kuru ve ıslak durumları karşılaştırdıkları kısmi baraj yıkılması probleminde, kuru durumda oluşan şok dalgasının ıslak durumlardan daha hızlı yayıldığını bildirmişlerdir. Çizelge 4.5 ve Şekil 4.4'te sunulan sayısal sonuçlar Flow-3D RANS modelinden elde edilmiştir.

Şekil 4.4'te gösterilen ortalama şok dalgası hızları, mesafenin zaman aralığına (0.2 sn) bölünmesiyle hesaplanmıştır. Buradaki mesafe şok dalgası önünün ulaştığı kanaldaki son nokta olarak dikkate alınmıştır. Ayrıca ortalama hız, her bir kısmi baraj yıkılması senaryosu için 0.0 – 0.2 sn, 0.2 – 0.4 sn ve 0.4 – 0.6 sn için hesaplanan üç hızın aritmetik ortalaması olarak elde edilmiştir. Şekil 4.4'te ifade edilen S ve D harfleri sırasıyla sayısal ve deneysel çalışmalara ait sonuçları ifade etmek için kullanılmıştır.

Çizelge 4.5. Deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen ve kapaktan itibaren ölçülen şok dalgası önünün ulaştığı maksimum mesafeler

Durumlar	Maksimum Mesafeler (cm)		
	0.2 sn	0.4 sn	0.6 sn
K1 (Sayısal Model Çalışmaları) K1-S	48.00	103.49	164.78
K2 (Sayısal Model Çalışmaları) K2-S	51.53	120.0	169.43
K1 (Deneysel Çalışmalar) K1-D	38.40	84.30	137.43
K2 (Deneysel Çalışmalar) K2-D	39.00	90.15	140.04
I1 (Sayısal Model Çalışmaları) I1-S	35.40	85.53	110.72
I2 (Sayısal Model Çalışmaları) I2-S	38.40	90.64	127.55
I1 (Deneysel Çalışmalar) I1-D	24.46	55.75	88.83
I2 (Deneysel Çalışmalar) I2-D	28.15	60.47	95.84

Sayısal çalışmalardan elde edilen ortalama şok dalgası hızlarının deneysel çalışmalardan daha büyük olduğu görülmüştür (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. Farklı kısmi baraj yıkılma senaryoları için ortalama şok dalgası hızları

Kuru durumda sayısal ortalama şok dalgası hızı 25 cm başlangıç rezervuar su seviyesi için ıslak durumdan %48.82 daha yüksek bulunurken, 30 cm başlangıç rezervuar su seviyesi için %32.83 daha yüksek bulunmuştur. Kuru durumda deneysel ortalama şok dalgası hızı 25 cm başlangıç rezervuar su seviyesi için ıslak durumdan %54.71 daha yüksekken, 30 cm başlangıç rezervuar su seviyesi için %46.11 daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. 25 cm başlangıç rezervuar su seviyesi için kuru ve ıslak durumlar arasındaki sayısal ortalama şok dalgası hız farkı 0.901 m/s olarak, 30 cm başlangıç rezervuar su seviyesi için ise 0.711 m/s olarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde 25 cm'lik başlangıç rezervuar su seviyesi için kuru ve ıslak durumlar arasındaki deneysel ortalama şok dalgası hız farkı 0.810 m/s olarak hesaplanırken 30 cm'lik başlangıç rezervuar su seviyesi için 0.736 m/s olarak hesaplanmıştır. Sonuçlar mansap/memba su derinliği oranı sabit olmasına rağmen ıslak ve kuru durumun ortalama şok dalgası hızı arasındaki farkın başlangıç rezervuar su seviyesi arttıkça azaldığını göstermektedir.

Kuru ve ıslak mansap yatağında ilerleyen şok dalgasının akım karakteristikleri incelendikten sonra kuru ve ıslak mansap yatağı kriter alınarak görüntü işleme tekniği ve sayısal modellerin performansları araştırılmıştır.

Bunun için öncelikle kuru ve ıslak mansap yatağı koşulları için 25 cm ve 30 cm başlangıç rezervuar su seviyelerinde akım derinliğinin zamanla değişimi, rezervuarın sağ ve sol arka köşelerine yerleştirilen şerit metre okumaları ve deneyler sırasında alınan video kayıtları kullanılarak elde edilmiştir (Şekil 4.5 - Şekil 4.8). Bu kayıtlar öncelikle bir yardımcı video-çerçeve düzenleme programı vasıtasıyla çerçevelere dönüştürülmüş ve daha sonra şerit metre üzerinde her bir çerçevedeki akım derinliğinin yeri okunarak akım derinliğinin zamana göre değişimi elde edilmiştir. Aynı zamanda bu video kayıtları görüntü işleme tekniği ile işlenmiş ve akım derinliklerinin zamana göre değişimi sayısallaştırılmıştır.

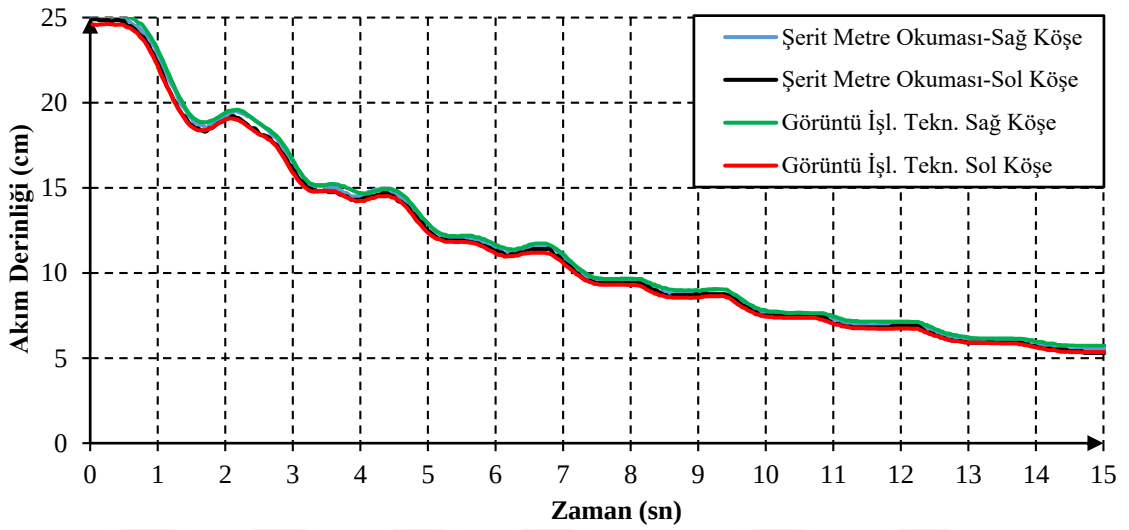
Şekil 4.5 – Şekil 4.8 incelendiğinde şerit metre okuma sonuçlarının, görüntü işleme tekniği sonuçlarıyla oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Bu sonuç, hem tekrarlanabilirlik indeksi hem de Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7’de hesaplanan maksimum yüzde bağıl fark değerleriyle desteklenmektedir. Şekil 4.5 ve Şekil 4.8’de verilen tüm durumlar için tekrarlanabilirlik indeksi maksimum %1.37 ve minimum %0.10 olarak hesaplanmıştır. Maksimum yüzde bağıl farklar ise, rezervuarın sağ ve sol arka köşe noktaları için tekrarlanan üç deneyin ortalamasına göre görüntü işleme tekniği sonuçları baz alınarak hesaplanmıştır. Maksimum yüzde bağıl farkın I1 hariç tüm durumlarda %10’un altında kaldığı görülmektedir. I1’de ise maksimum bağıl fark %13.27 olarak hesaplanmıştır. Maksimum bağıl fark değerleri her bir zaman adımında görüntü işleme tekniği ile şerit metre okuma sonuçları arasında hesaplanan bağıl farkların maksimumlarını göstermektedir. Görüldüğü üzere görüntü işleme tekniği, türbülansın yoğun olmadığı ve su yüzeyinin tedrici olarak değiştiği rezervuarın arka köşe noktalarında deneysel çalışmalara ait bulguların sayısallaştırılmasında oldukça etkili bir yöntemdir.

Çizelge 4.6. 25 cm başlangıç rezervuar su seviyesi için şerit metre okuma sonuçları ile görüntü işleme tekniği sonuçları arasındaki maksimum yüzde bağıl farklar

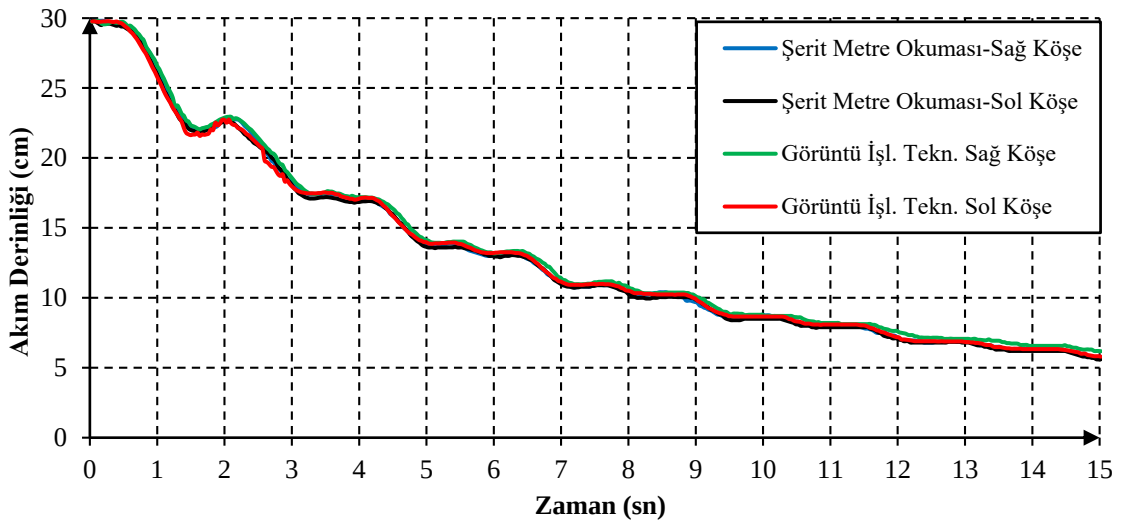
Başlangıç Rezervuar su seviyesi-25 cm	Rezervuar sağ arka köşe		Rezervuar sol arka köşe	
	Oluşma Zamanı (sn)	Bağıl Fark %	Oluşma Zamanı (sn)	Bağıl Fark %
K1	14.29	4.72	10.89	3.13
I1	11.75	13.27	15.35	7.34

Çizelge 4.7. 30 cm başlangıç rezervuar su seviyesi için şerit metre okuma sonuçları ile görüntü işleme tekniği sonuçları arasındaki maksimum yüzde bağıl farklar

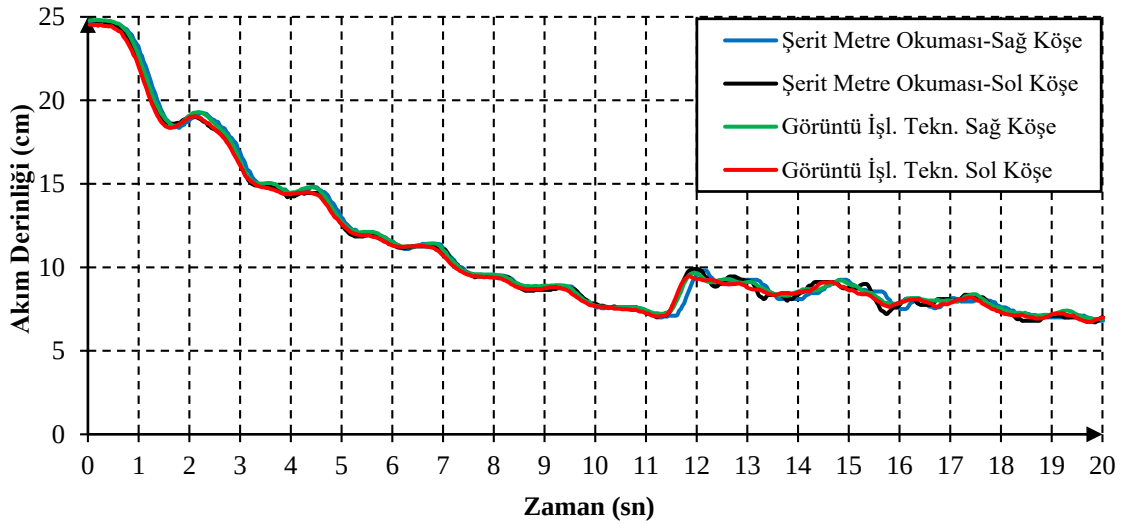
Başlangıç Rezervuar su seviyesi-30 cm	Rezervuar sağ arka köşe		Rezervuar sol arka köşe	
	Oluşma Zamanı (sn)	Bağıl Fark %	Oluşma Zamanı (sn)	Bağıl Fark %
K2	14.98	8.09	14.98	3.98
I2	19.47	6.51	13.15	9.36



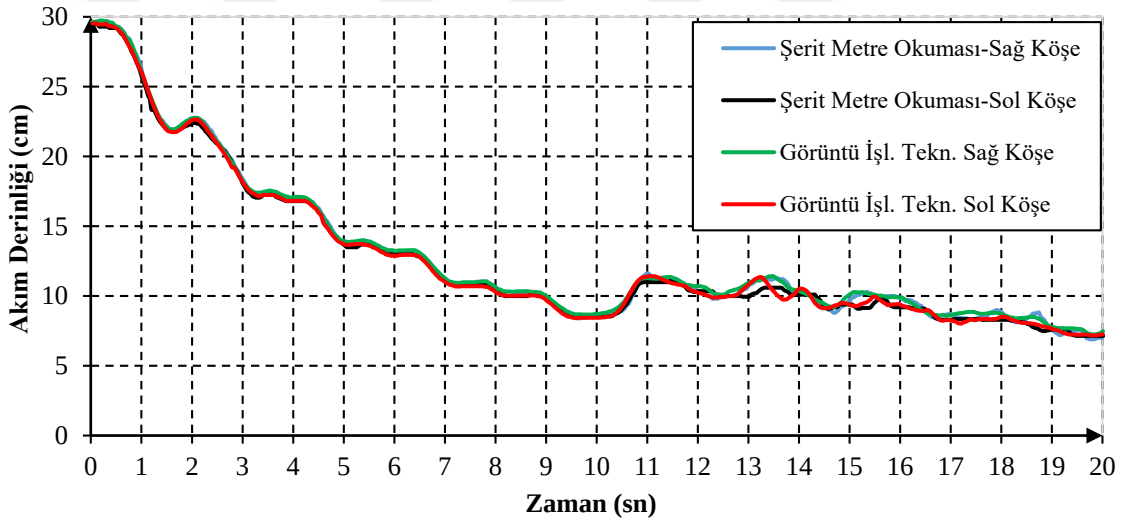
Şekil 4.5. Rezervuarın sağ ve sol arka köşesi için deneysel ölçümlere dayalı akım derinliğinin zamansal değişimi - Durum K1



Şekil 4.6. Rezervuarın sağ ve sol arka köşesi için deneysel ölçümlere dayalı akım derinliğinin zamansal değişimi - Durum K2



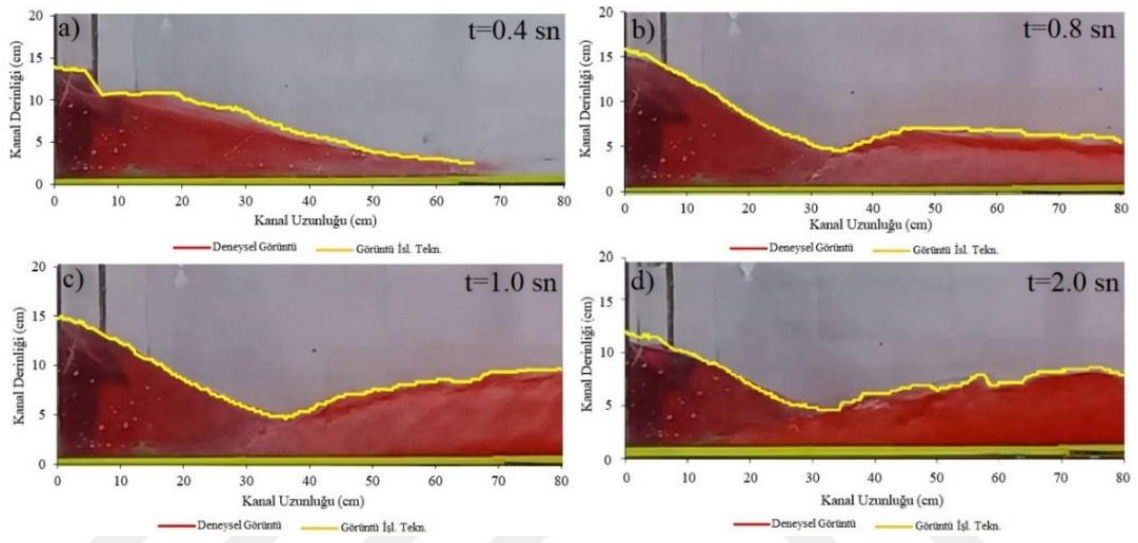
Şekil 4.7. Rezervuarın sağ ve sol arka köşesi için deneysel ölçümlere dayalı akım derinliğinin zamansal değişimi - Durum I1



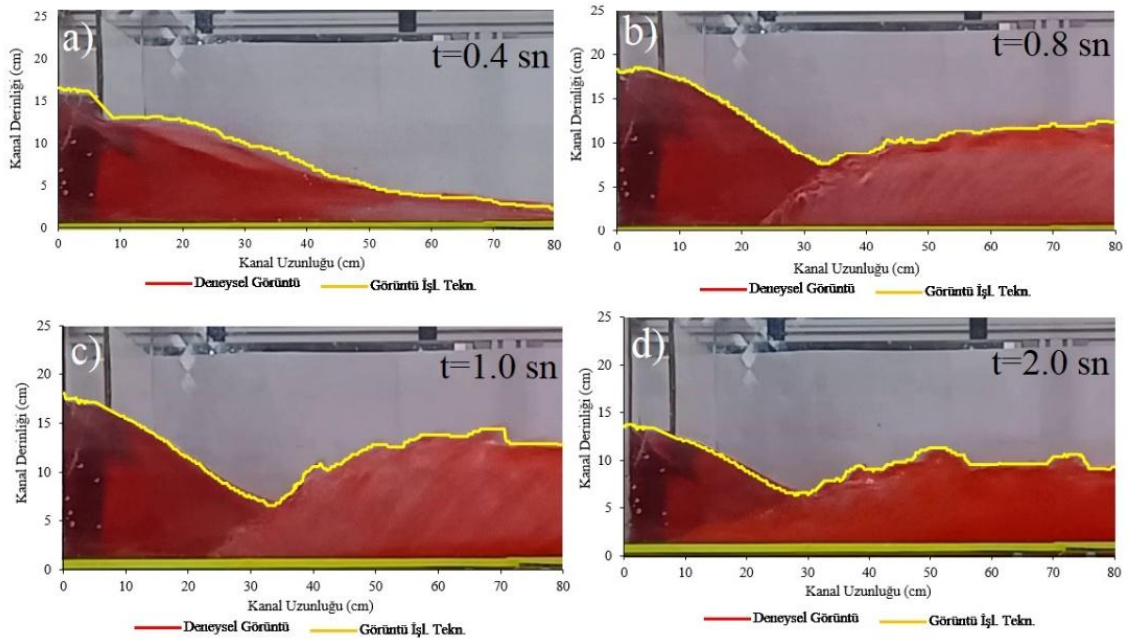
Şekil 4.8. Rezervuarın sağ ve sol arka köşesi için deneysel ölçümlere dayalı akım derinliğinin zamansal değişimi - Durum I2

Rezervuar sağ duvarı üzerinde rezervuar memba ucundan itibaren 1.055m uzaklıkta alınan noktada, 25 cm başlangıç rezervuar su seviyesi için K1 ve I1 durumlarına ait maksimum yüzde bağıl farklar sırasıyla %10.53 ve %13.20 olarak hesaplanmıştır. 30 cm başlangıç rezervuar su seviyesi için K2 ve I2 durumlarına ait maksimum yüzde bağıl farklar ise sırasıyla %15.82 ve %21.09 olarak elde edilmiştir. Bu noktada yapılan tekrarlanabilirlik indeksi sonuçlarının ise maksimum %1.44 ve minimum %0.16 olarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla rezervuar sağ duvarı üzerinde 1.055m'de alınan şerit metre okumalarıyla görüntü işleme tekniği sonuçlarının uyumlu olduğu görülmektedir.

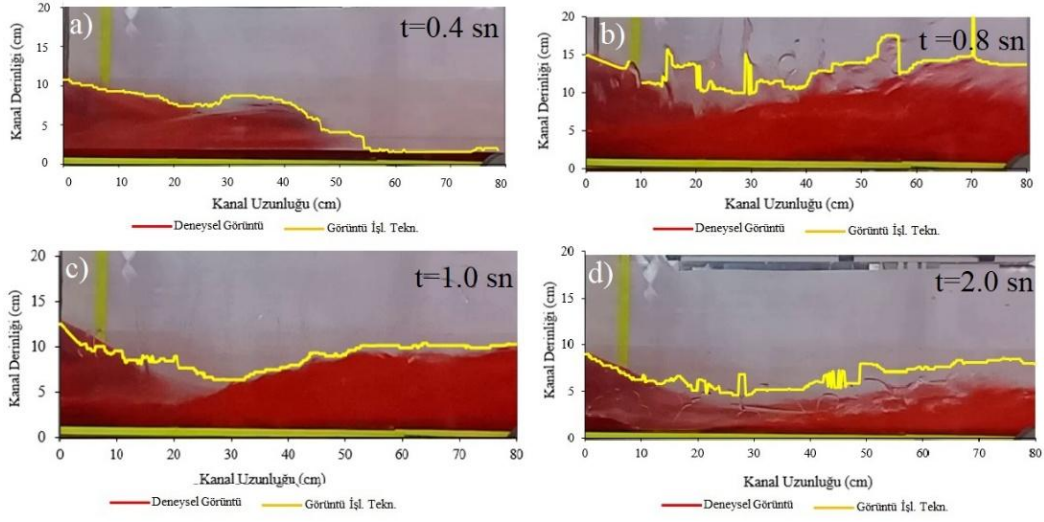
Şekil 4.9 - Şekil 4.12’de ise kuru ve ıslak durumlar için belirli zamanlara ait şok dalgasının bir boyutlu yayılımları deneysel görüntüler ve görüntü işleme tekniği sonuçlarıyla karşılaştırılarak incelenmektedir. Şekil 4.9 – Şekil 4.12’de görülen su yüzü profilleri kanal boyunca her kesitte kaydedilen maksimum su seviyelerini temsil etmektedir. Bu nedenle maksimum su seviyelerinin konumları tüm kesitler için aynı değildir. Bunun gibi kompleks akım koşullarında her kesitteki su seviyelerinin kanal boyunca deneysel olarak belirlenmesinin mümkün olmadığı görülmektedir.



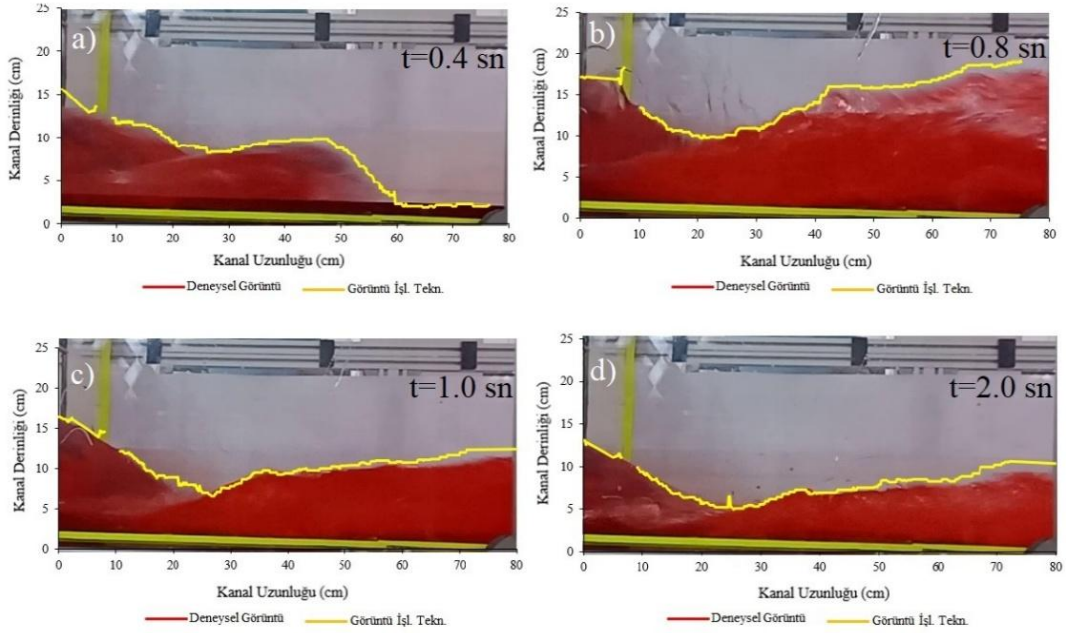
Şekil 4.9. Taşkın şok dalgasının bir boyutlu yayılımı - Durum K1



Şekil 4.10. Taşkın şok dalgasının bir boyutlu yayılımı - Durum K2



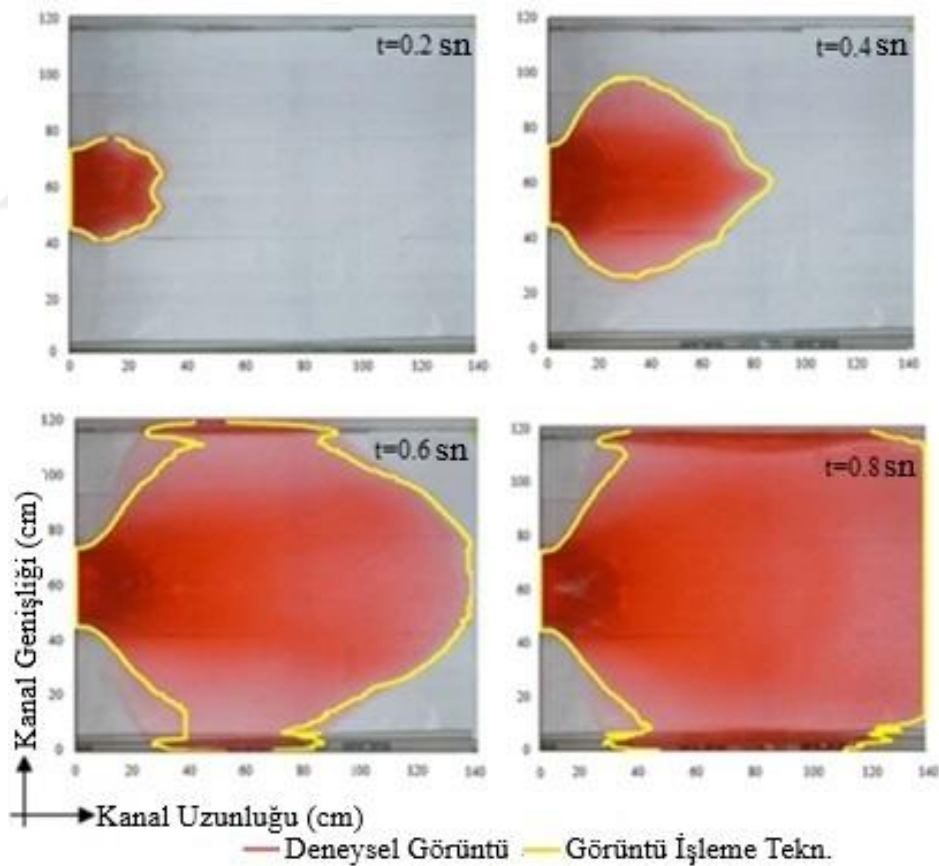
Şekil 4.11. Taşkın şok dalgasının bir boyutlu yayılımı - Durum I1



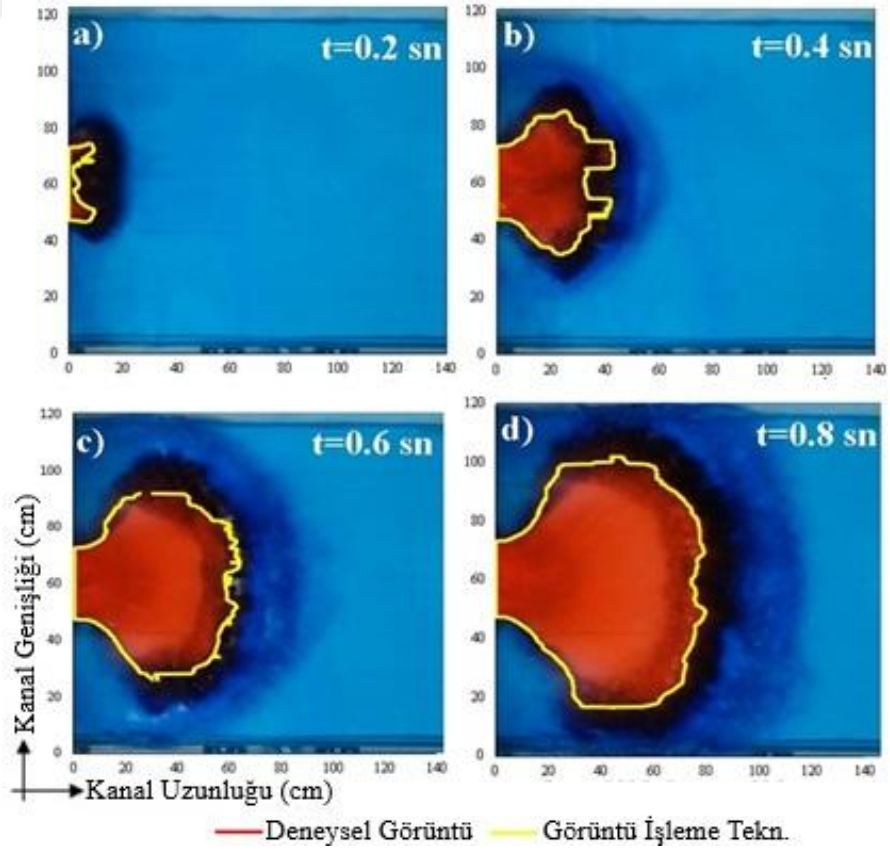
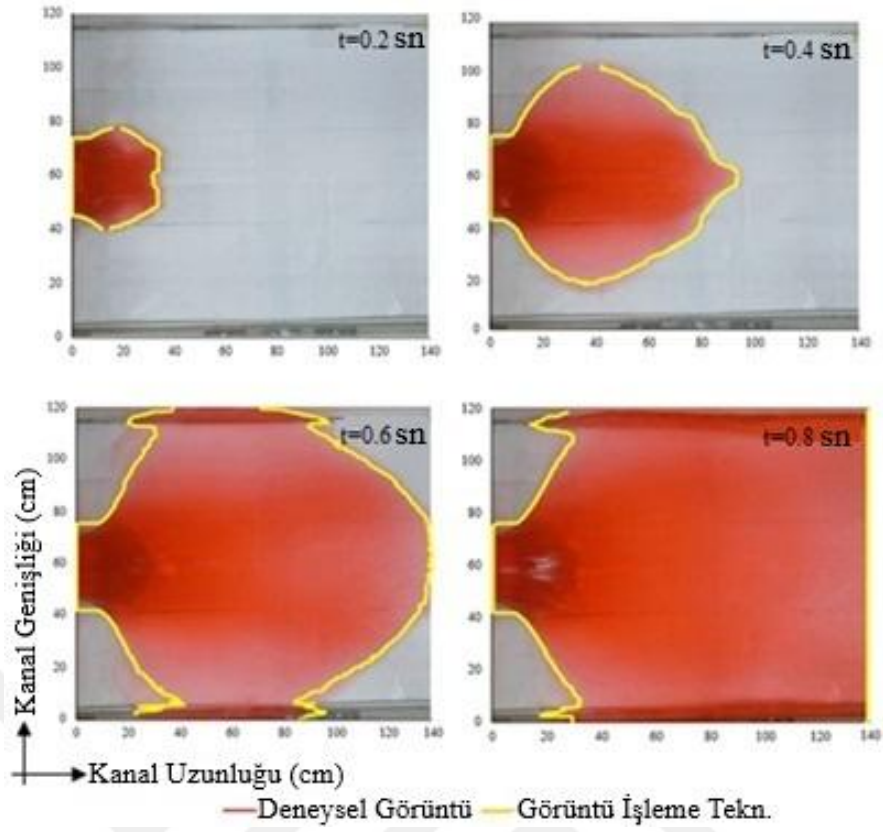
Şekil 4.12. Taşkın şok dalgasının bir boyutlu yayılımı - Durum I2

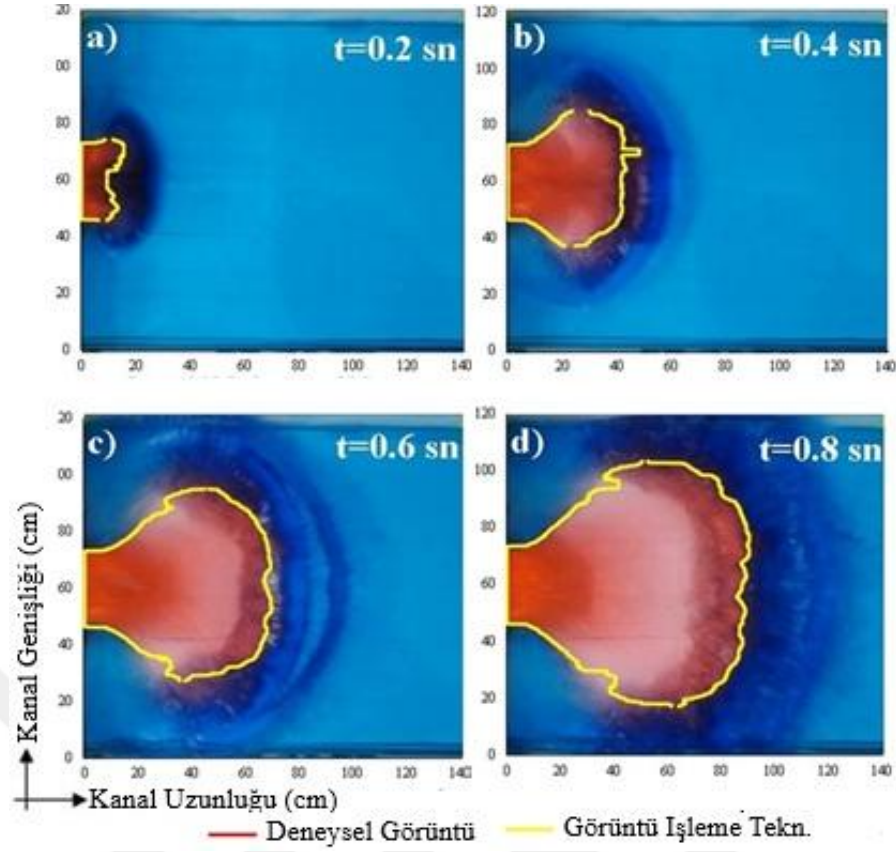
Şekil 4.9 – Şekil 4.12'de görüntü işleme tekniğinin kuru mansap yatağında (K1 ve K2 durumları) taşkın şok dalgasının bir boyutlu yayılımını oldukça iyi yakaladığı görülmektedir. Ancak ıslak durumdaki görüntü işleme tekniğinin sonuçlarının bazı yerlerde deneysel görüntüden oldukça farklı olduğu tespit edilmiştir. Buradaki farklılıklar akımda görülen ayrılmalara ve akışkan parçacıklarının kanal duvarlarına yapışmasına bağlanabilir. Görüntü işleme tekniği "maksimum kırmızı rengi takip et" komutuyla çalıştığından, 0.8 sn I1 durumunda olduğu gibi gerçek kırmızı renkli su yüzeyinden ziyade duvara yapışan maksimum kırmızı renkli akışkan parçacıklarını takip edebilmektedir.

Bununla birlikte iki boyutlu deneysel görüntüler de görüntü işleme tekniği sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve taşkın şok dalgasının 2 boyutlu yayılım sınırlarının genel olarak görüntü işleme tekniğiyle (K1 ve K2 durumu 0.6 sn hariç) iyi bir şekilde yakalanabildiği görülmüştür (Şekil 4.13 – Şekil 4.16). Burada kuru durumlarda şok dalgası yayılımının başlangıç aşamasında görüntü işleme tekniği ile deneysel görüntüler arasında belirgin farklılıklar gözlemlenmiştir (Şekil 4.13 – Şekil 4.14). Islak durumlarda ise iki farklı rengin kullanılması nedeniyle taşkın şok dalgasının görüntü işleme tekniğiyle daha doğru bir şekilde izlenebildiği tespit edilmiştir (Şekil 4.15 – Şekil 4.16). Bununla birlikte başlangıç rezervuar su seviyesinin şok dalgasının yayılım deseni üzerindeki etkisi 25 cm ve 30 cm rezervuar su seviyeleri için araştırılmıştır. Başlangıç rezervuar su seviyesindeki artışın neredeyse benzer şok dalgası desenlerine yol açtığı ancak ortalama şok dalgası hızını artırdığı tespit edilmiştir. (Şekil 4.4 ve Çizelge 4.5, Şekil 4.13 - Şekil 4.16). Benzer bir sonuç Ye vd., (2020) tarafından da bildirilmiştir.



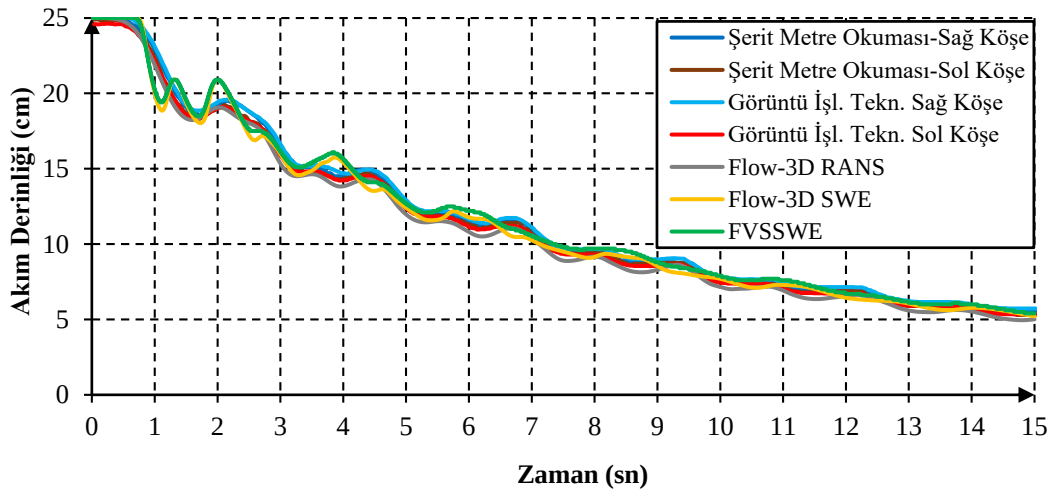
Şekil 4.13. Taşkın şok dalgasının iki boyutlu yayılımı - Durum K1



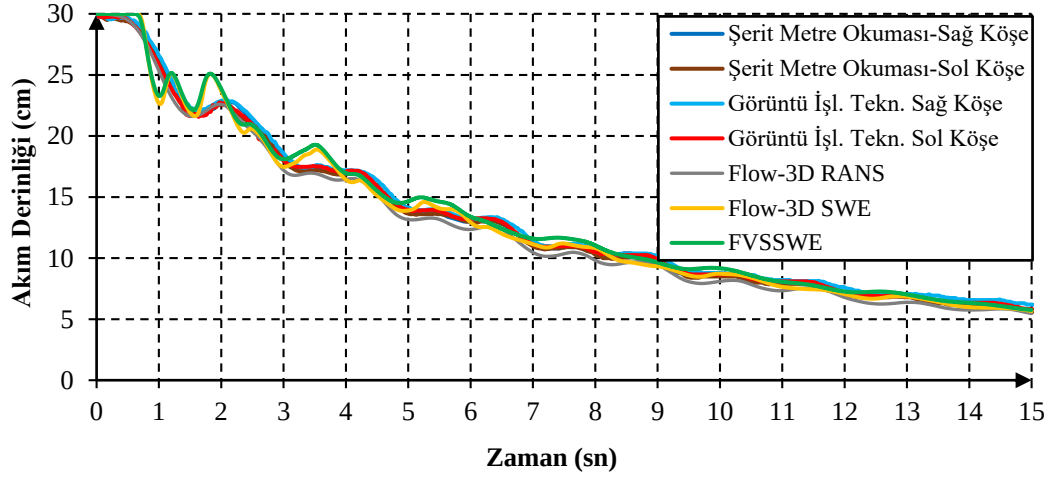


Şekil 4.16. Taşkın şok dalgasının iki boyutlu yayılımı - Durum I2

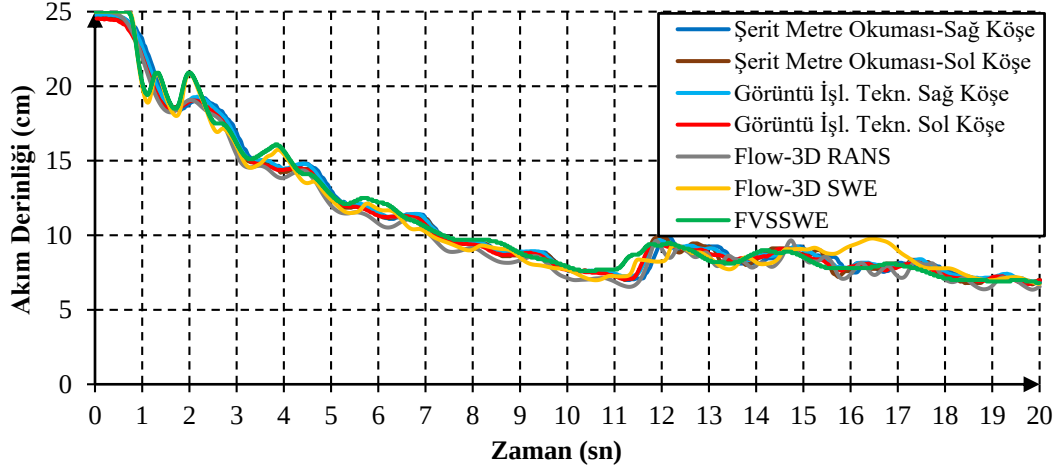
Rezervuarın sağ/sol arka köşe noktalarında ve rezervuar sağ duvarı üzerinde 1.055m’de akım derinliğinin zamana bağlı değişimi sayısal modeller kullanılarak da elde edilmiş ve deneysel ve sayısal sonuçlar kuru ve ıslak mansap yatağı durumları için karşılaştırılmalı olarak Şekil 4.17 - Şekil 4.24’te verilmiştir.



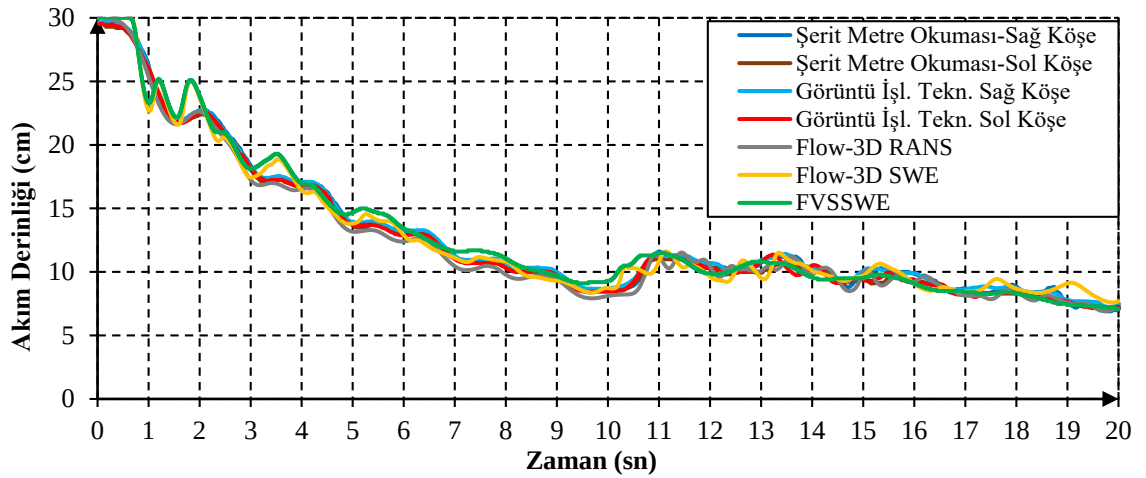
Şekil 4.17. Rezervuarın sağ/sol arka köşesi için akım derinliğinin zamana göre değişimi - Durum K1



Şekil 4.18. Rezervuarın sağ/sol arka köşesi için akım derinliğinin zamana göre değişimi
- Durum K2



Şekil 4.19. Rezervuarın sağ/sol arka köşesi için akım derinliğinin zamana göre değişimi
- Durum I1



Şekil 4.20. Rezervuarın sağ/sol arka köşesi için akım derinliğinin zamana göre değişimi
- Durum I2

Şekil 4.17 – Şekil 4.20 incelendiğinde sayısal model sonuçlarının genel olarak deneysel çalışmalara ait sonuçlarla iyi bir uyum içinde olduğunu görülmektedir. Bu durum deneysel ve sayısal yöntemlerden elde edilen sonuçlar arasında hesaplanan tekrarlanabilirlik indeksleriyle (maksimum %2.34 ve minimum %1.56) de desteklenmektedir.

Çizelge 4.8 ve Çizelge 4.9, rezervuarın membana doğru yayılan seyreltme dalgasının etkisiyle değişen akım derinliğinin, sayısal model ve görüntü işleme tekniği ile elde edilen değerleri arasındaki yüzde bağıl farkları göstermektedir. Çizelge 4.8 ve Çizelge 4.9 incelendiğinde Flow-3D RANS modelinin hem ıslak hem de kuru durumlar için deneysel ölçüm sonuçlarına daha yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. 25 cm ve 30 cm başlangıç rezervuar su seviyelerinde maksimum yüzde bağıl fark değeri kuru durum için %12.58, ıslak durum için ise %11.82 olarak hesaplanmıştır. Diğer yandan Flow-3D SWE modelinde kuru durumlar için maksimum yüzde bağıl fark 25 cm başlangıç rezervuar su seviyesi için %15.18 ve 30 cm başlangıç rezervuar su seviyesi için %14.71 olarak elde edilmiştir. Bununla birlikte Flow-3D SWE model sonuçları ıslak mansap yatağı durumları için 10 sn sonra belirgin tutarsızlıklar göstermektedir. I1 durumu için Flow-3D SWE modeli ile görüntü işleme tekniği arasında hesaplanan maksimum yüzde bağıl fark %23.35 olarak elde edilmiştir.

K2 durumu için ise Flow-3D RANS modeli ile görüntü işleme tekniği arasında minimum yüzde bağıl fark %6.31 olarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla Flow-3D RANS modeli deneysel çalışma sonuçlarına en yakın sonuçları üretmiştir. Bu nedenle Flow-3D RANS modeli ile görüntü işleme tekniği arasında hesaplanan yüzde bağıl farklar diğerlerine kıyasla daha düşük çıkmıştır. Hesaplanan yüzde bağıl fark değerleri açısından ise FVSSWE'nin performansı Flow-3D RANS ile Flow-3D SWE arasında yer almaktadır.

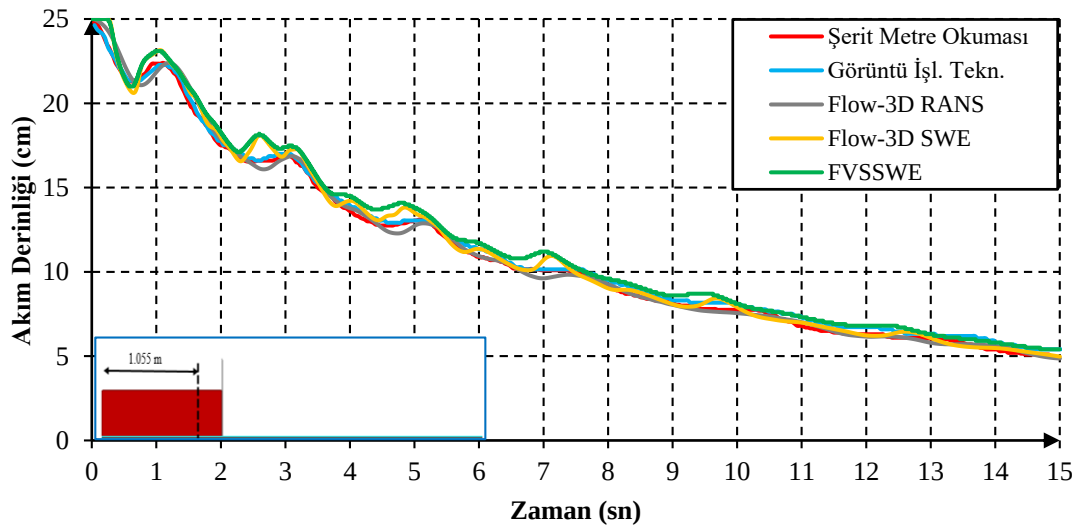
Çizelge 4.8. Sayısal model ve görüntü işleme tekniği ile elde edilen akım derinliği değerlerinin yüzde bağıl farkları - K1 ve I1 durumları

Başlangıç Rezervuar Su Seviyesi-25 cm	Rezervuar Sağ Arka Köşe			Rezervuar Sol Arka Köşe			Rezervuar (1.055, 0) Noktası		
	Flow- 3D RANS	Flow- 3D SWE	FVSSWE	Flow- 3D RANS	Flow- 3D SWE	FVSSWE	Flow- 3D RANS	Flow- 3D SWE	FVSSWE
K1	10.94	15.18	14.01	6.64	11.15	11.88	8.54	7.45	9.24
I1	9.75	21.54	18.94	8.02	23.35	21.35	10.71	13.91	19.26

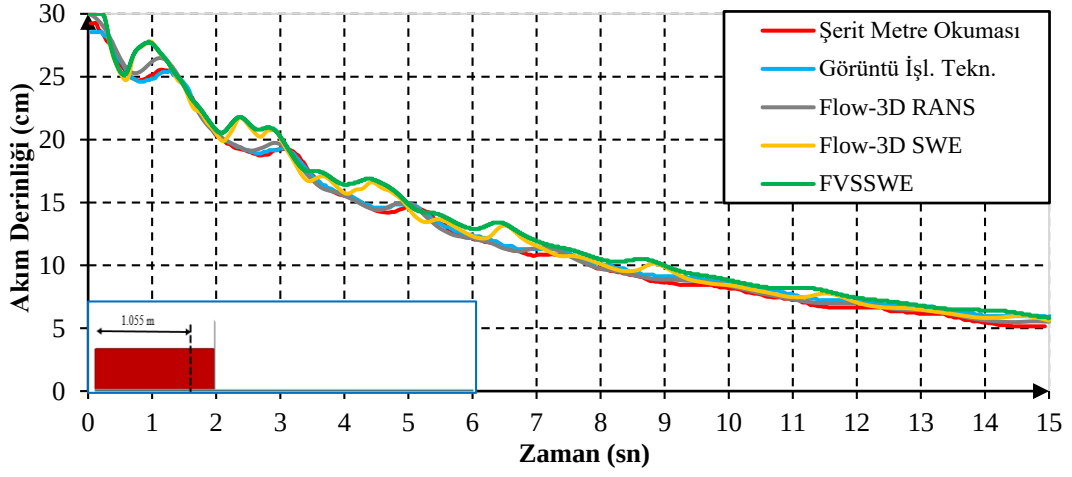
Çizelge 4.9. Sayısal model ve görüntü işleme tekniği ile elde edilen akım derinliği değerlerinin yüzde bağıl farkları – K2 ve I2 durumları

Başlangıç Rezervuar Su Seviyesi-30 cm	Rezervuar Sağ Arka Köşe			Rezervuar Sol Arka Köşe			Rezervuar (1.055, 0) Noktası		
	Flow- 3D RANS	Flow- 3D SWE	FVSSWE	Flow- 3D RANS	Flow- 3D SWE	FVSSWE	Flow- 3D RANS	Flow- 3D SWE	FVSSWE
K2	12.58	14.71	13.21	9.39	13.96	12.25	6.31	11.75	14.46
I2	11.82	17.79	16.72	9.47	21.27	21.35	12.27	9.90	10.17

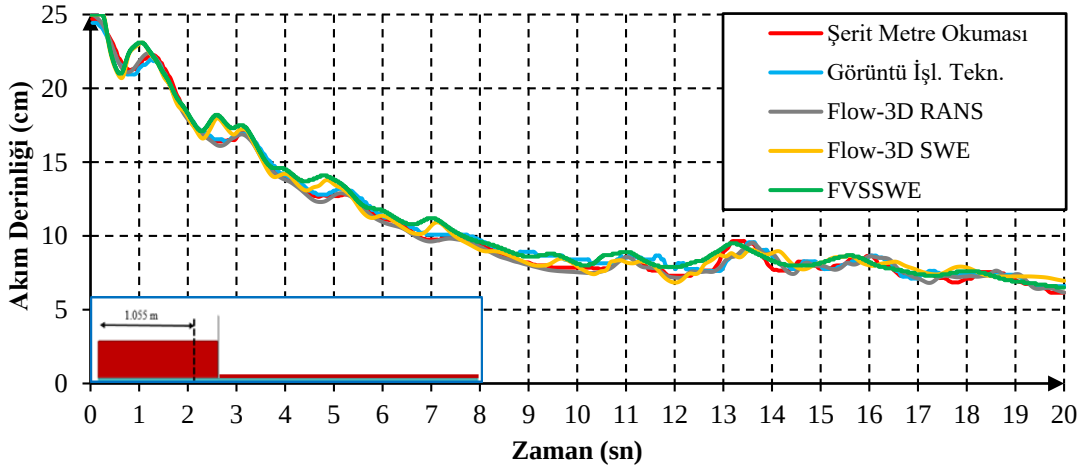
Benzer şekilde, Şekil 4.21 – Şekil 4.24’ten görüldüğü üzere, rezervuarın sağ duvarı üzerinde (1.055, 0) bulunan ölçüm noktası için görüntü işleme tekniği sonuçları ile sayısal model sonuçları arasında iyi bir uyum olduğu söylenebilir. Yine bu durum da deneysel ve sayısal yöntemlerden elde edilen sonuçlar arasında hesaplanan düşük tekrarlanabilirlik indeksleriyle (maksimum %2.75 ve minimum %1.54) desteklenmektedir. Bununla birlikte görüntü işleme tekniği ile Flow-3D RANS modeli arasında görüntü işleme tekniği baz alınarak hesaplanan maksimum yüzde bağıl fark değeri kuru durum için %8.54 ve ıslak durum için %12.27 olarak hesaplanmıştır. Flow-3D SWE modeli ile karşılaştırıldığında ise kuru durum için %11.75 ve ıslak durum için %13.91 olarak elde edilmiştir. Görüntü işleme tekniği ile FVSSWE modeli arasındaki hesaplanan maksimum yüzde bağıl fark değeri ise kuru ve ıslak durumlar için sırasıyla %14.46 ve %19.26 olarak belirlenmiştir (Çizelge 4.8 ve Çizelge 4.9).



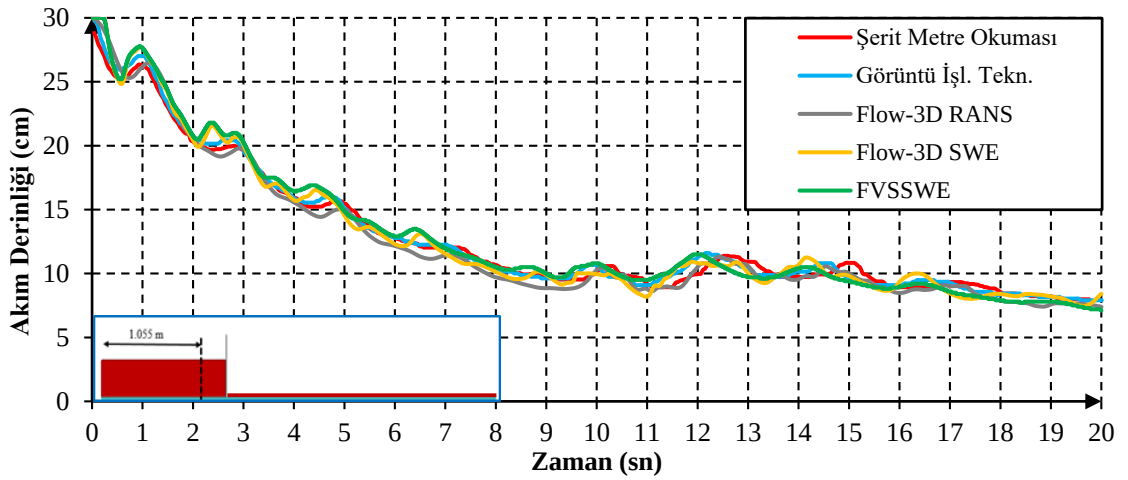
Şekil 4.21. Rezervuar üzerindeki (1.055, 0) noktası için akım derinliğinin zamana göre değişimi - Durum K1



Şekil 4.22. Rezervuar üzerindeki (1.055, 0) noktası için akım derinliğinin zamana göre değişimi - Durum K2



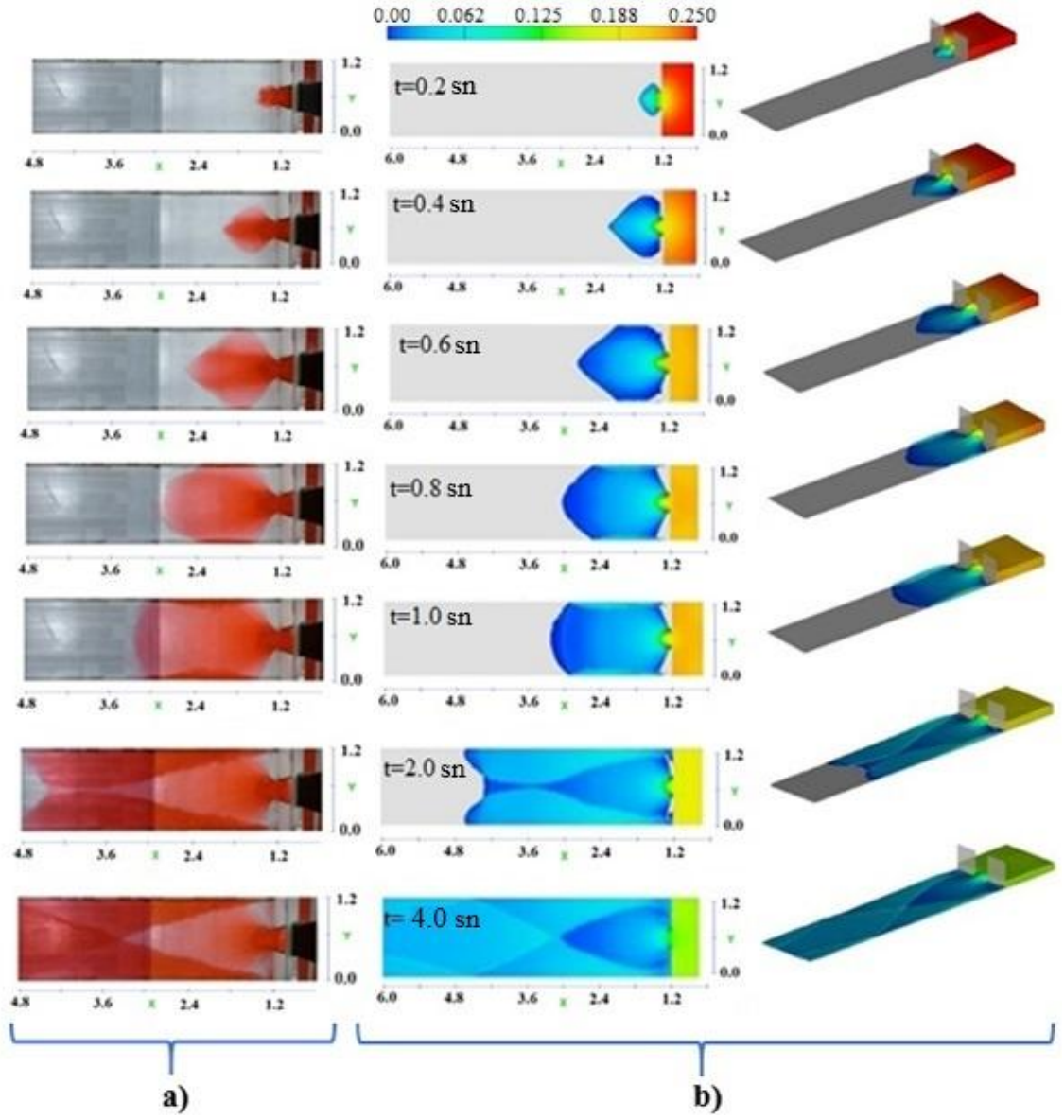
Şekil 4.23. Rezervuar üzerindeki (1.055, 0) noktası için akım derinliğinin zamana göre değişimi - Durum I1



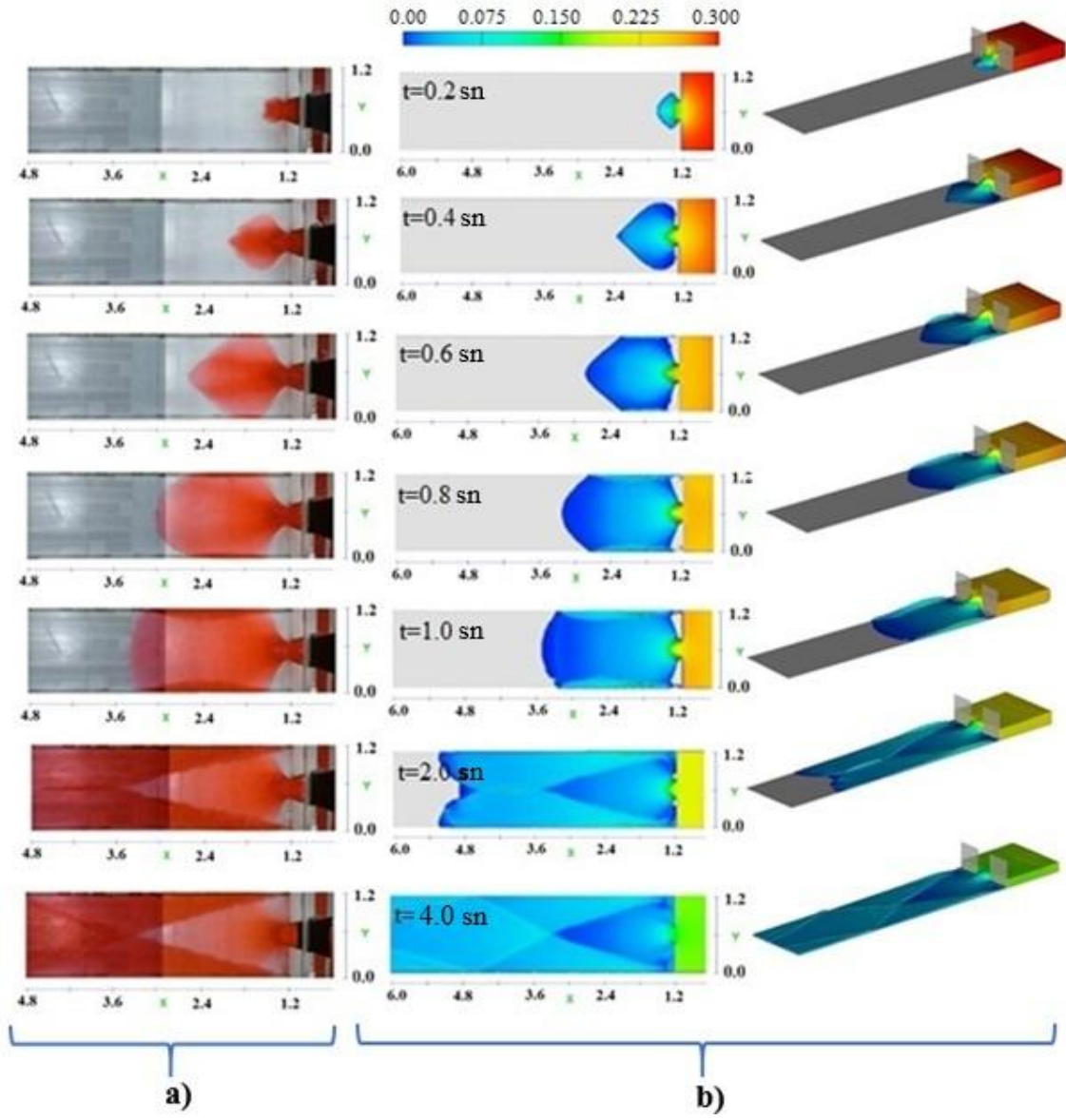
Şekil 4.24. Rezervuar üzerindeki (1.055, 0) noktası için akım derinliğinin zamana göre değişimi - Durum I2

Bununla birlikte gerçek zamanlı simülasyon süreleri açısından 3 boyutlu ve 2 boyutlu modeller arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. Zaman adımı ve simülasyon süresi sırasıyla 0.02 sn ve 15 sn olarak belirlenmiştir. Burada 3 boyutlu model için kullanılan mesh sayısı 3672000 iken 2 boyutlu model için ise 144000 olarak elde edilmiştir. 3 boyutlu model için gerçek zamanlı simülasyon süresi yaklaşık 2 saat 17 dakika, 2 boyutlu model için ise 57 dakika sürmüştür. Görüldüğü üzere, 3 boyutlu sayısal model kullanımının daha iyi sonuçlar ürettiği ancak zaman açısından oldukça maliyetli olduğu tespit edilmiştir.

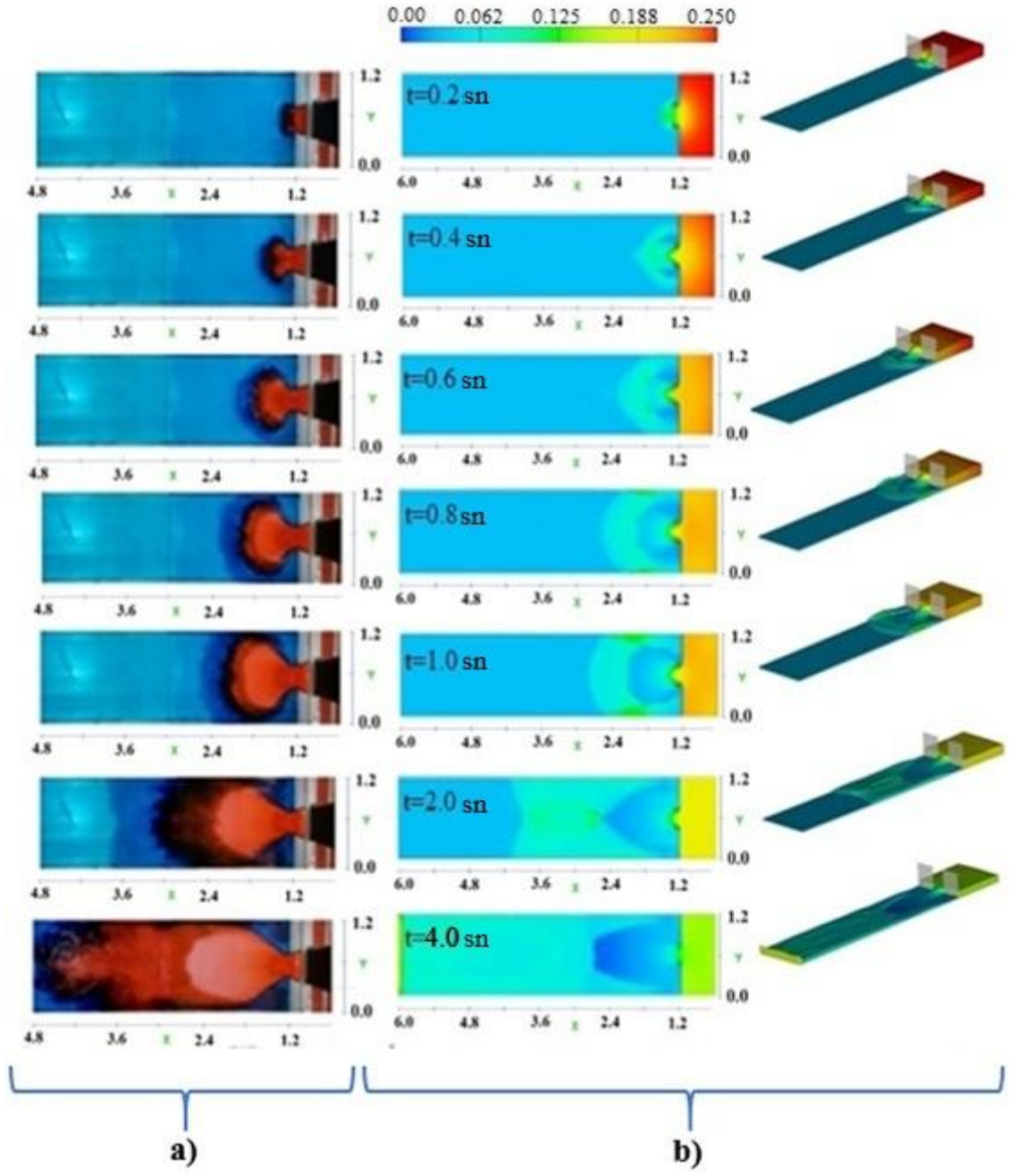
Şekil 4.25 – Şekil 4.28 ise deneysel çalışmalardan ve Flow-3D RANS modelinden elde edilen 2B su yüzü görüntülerinin 0.2 ile 4.0 sn aralığındaki karşılaştırmalarını göstermektedir. Görüntülerde, kuru durumlar (K1 ve K2) için taşkın şok dalgasının yayılma desenlerinin tüm zaman aralıkları için oldukça benzer olduğu görülmüştür. Ancak Flow-3D RANS modelinde şok dalgası önlerinin daha çok ilerlediği ve dolayısıyla modelin daha yüksek şok dalgası hızına sahip olduğu tespit edilmiştir. Islak durumlara gelince şok dalgası desenlerinin yine benzer olduğu, ancak kuru durumlar kadar olmadığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.27 ve Şekil 4.28). Burada da kuru durumlara benzer şekilde Flow-3D RANS modeli ile hesaplanan şok dalgası hızlarının deneysel sonuçlardan daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bunun nedeninin kapağın açılma süresi olduğu düşünülmektedir. Deneysel çalışmalarda kapağın tamamen açılması zaman alırken sayısal modelleme çalışmalarında bu süre anında (sıfır) olmakta yani kapak açılması için bir süreye ihtiyaç duyulmamaktadır.



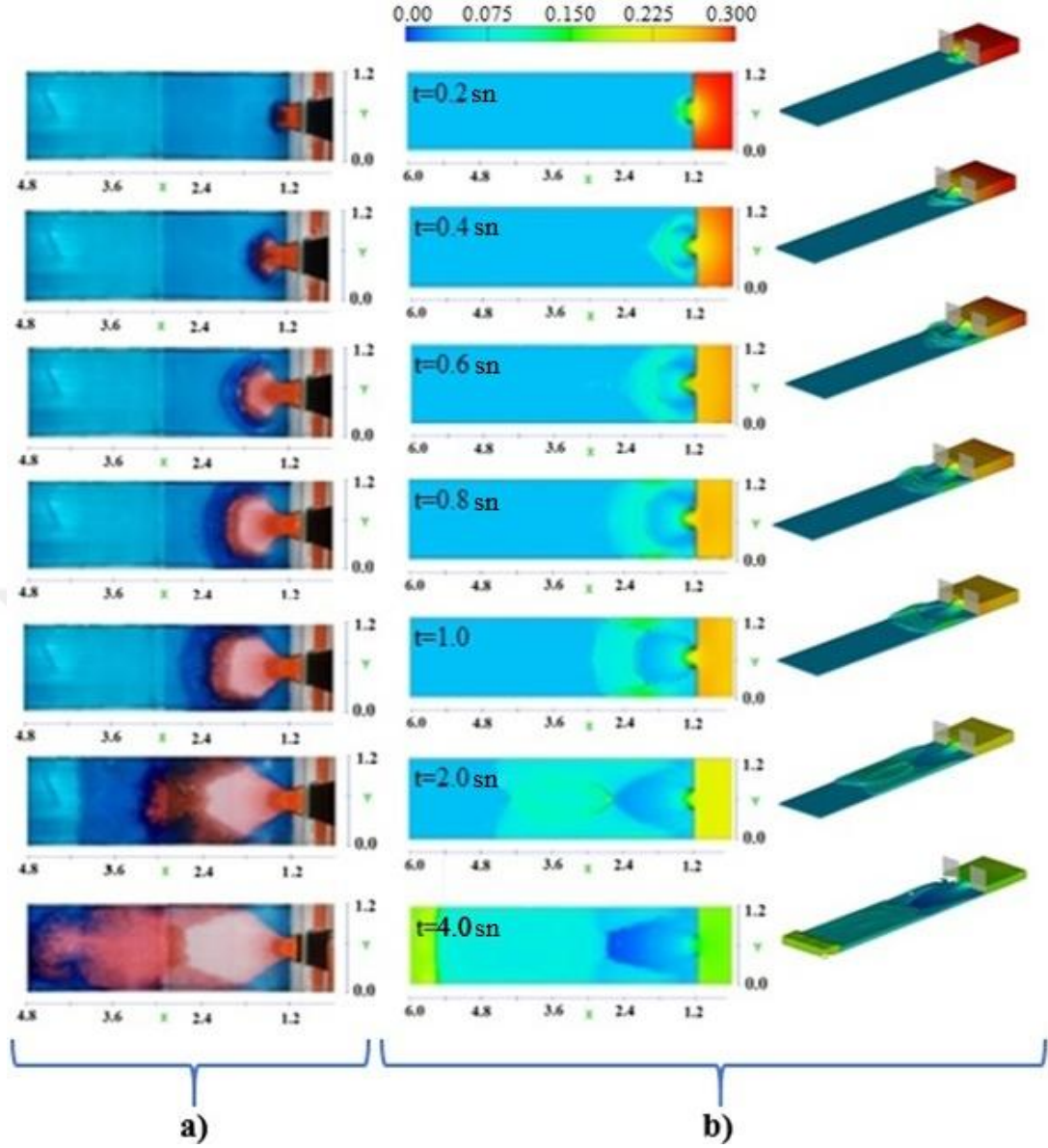
Şekil 4.25. a) Deneysel görüntü b) Flow-3D RANS sayısal modeli - Durum K1



Şekil 4.26. a) Deneysel görüntü b) Flow-3D RANS sayısal modeli - Durum K2



Şekil 4.27. a) Deneysel görüntü b) Flow-3D RANS sayısal modeli - Durum I1



Şekil 4.28. a) Deneysel görüntü b) Flow-3D RANS sayısal modeli - Durum I2

4.1.3 Taşkın şok dalgası karakteristiğinin analitik yöntemlerle incelenmesi

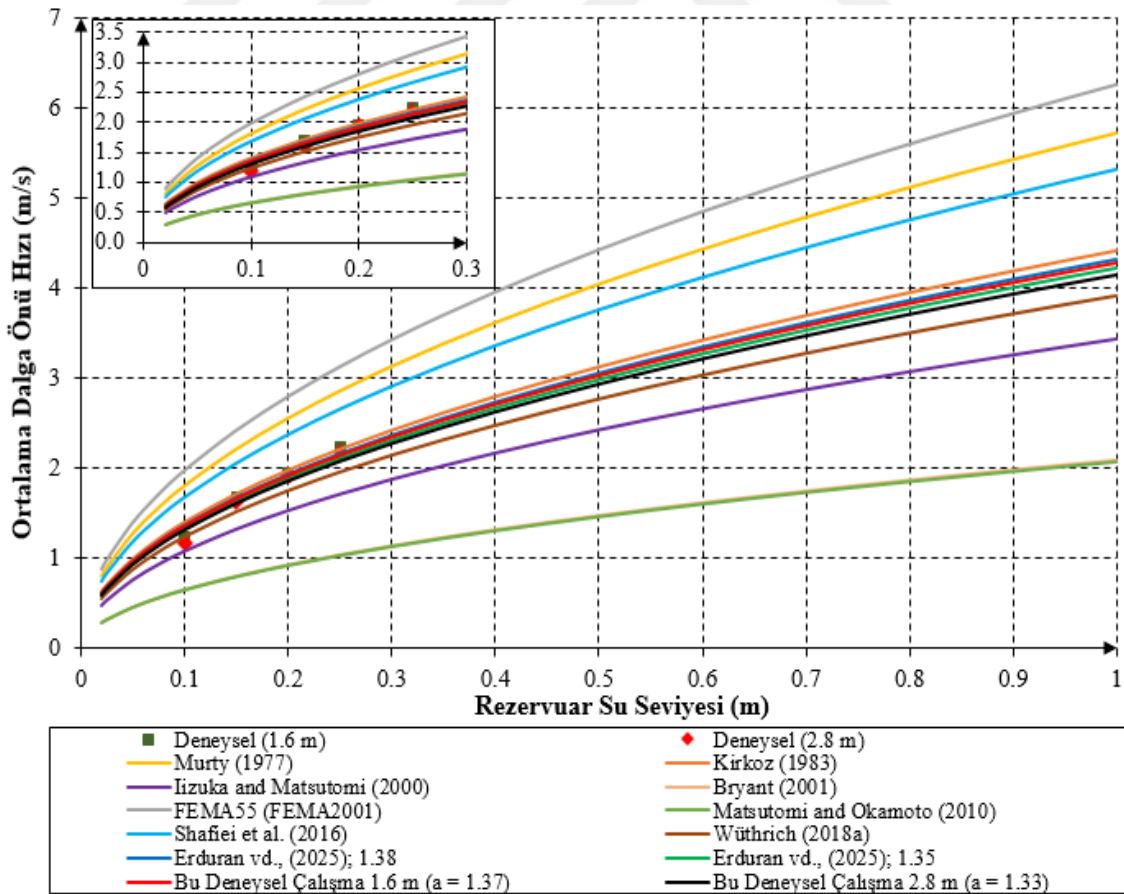
Bu bölümde taşkın şok dalgasının ortalama dalga önü hızları ve dalga önü konumları analitik yöntemlerle incelenmiştir.

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda kanalda herhangi bir yapısal önlem yokken elde edilen ortalama dalga önü hızları ve bu hızların literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırılması Şekil 4.29’da verilmektedir. Şekil 4.29 incelendiğinde her bir başlangıç rezervuar su seviyesi için deneysel çalışmadan elde edilen sonuçların birbirine yakın olduğu fakat model-yapının kapaktan uzaklaşmasıyla hızların beklendiği üzere sürtünme etkisinin de artmasıyla birlikte azaldığı görülmüştür. Kanalda herhangi bir yapısal önlem

yokken elde edilen deneysel veriler kullanılarak Denklem 3.16'da verilen α katsayıları, yapının kapaktan itibaren 1.6 m ve 2.8 m uzaklıkta olması durumları için sırasıyla 1.37 ve 1.33 olarak hesaplanmıştır (Çizelge 4.10). Hesaplanan bu katsayıların literatürde belirtilen aralıkta olduğu görülmektedir (Şekil 4.29 ve Çizelge 4.10). Bununla birlikte Erduran vd., (2025) tarafından yapılan çalışmada da benzer katsayılar elde edilmiştir.

Çizelge 4.10. Kanalda herhangi bir yapısal ortam yokken deneysel çalışmalardan elde edilen ortalama hızlar ve α katsayıları

Başlangıç Rezervuar Su Seviyesi (m)	0.25	0.20	0.15	0.10	
Çarpma Zamanı (sn); 1.6 m	0.7166	0.8166	0.9499	1.2833	
Çarpma Zamanı (sn); 2.8 m	1.2832	1.4499	1.7166	2.3833	
Yapının Konumu; 1.6 m	1.6	1.6	1.6	1.6	
Yapının Konumu; 2.8 m	2.8	2.8	2.8	2.8	
Hesaplanan Ort. Hız (m/s) 1.6 m	2.2328	1.9593	1.6844	1.2468	
Hesaplanan Ort. Hız (m/s) 2.8 m	2.1820	1.9312	1.6311	1.1748	Ort.
α (1.6 m)	1.4257	1.3988	1.3886	1.2588	1.37
α (2.8 m)	1.3933	1.3787	1.3446	1.1862	1.33



Şekil 4.29. Kanalda herhangi bir yapısal ortam yokken ortalama dalga önü hızının rezervuar su seviyesine göre değişimi

Ritter (1892)'in kuru ve sürtünmesiz bir yüzeye sahip kanalda ilerleyen şok dalgası karakteristiklerini elde etmede kullanılan analitik denklemler dikkate alınarak edilen dalga önü hızları Çizelge 4.11'de verilmektedir. Çizelge 4.12'de ise deney sonuçlarına dayalı dalga önü hızları ve bu hızlar ile Ritter çözümünden elde olunan dalga önü hızları arasındaki yüzde bağıl farklar verilmektedir. Çizelge 4.12 incelendiğinde deneysel veriler baz alınarak Konum-1 ve Konum-2 için sırasıyla minimum %13.43 ve %14.51 fark olduğu görülmektedir. Hesaplanan bu farklar Ritter (1892)'in sürtünmesiz ideal akışkan kabulü ile hesaplamalarını yapmasından kaynaklanmaktadır.

Çizelge 4.11. Ritter (1892)'in analitik denklemleri kullanılarak hesaplanan dalga önü hızları

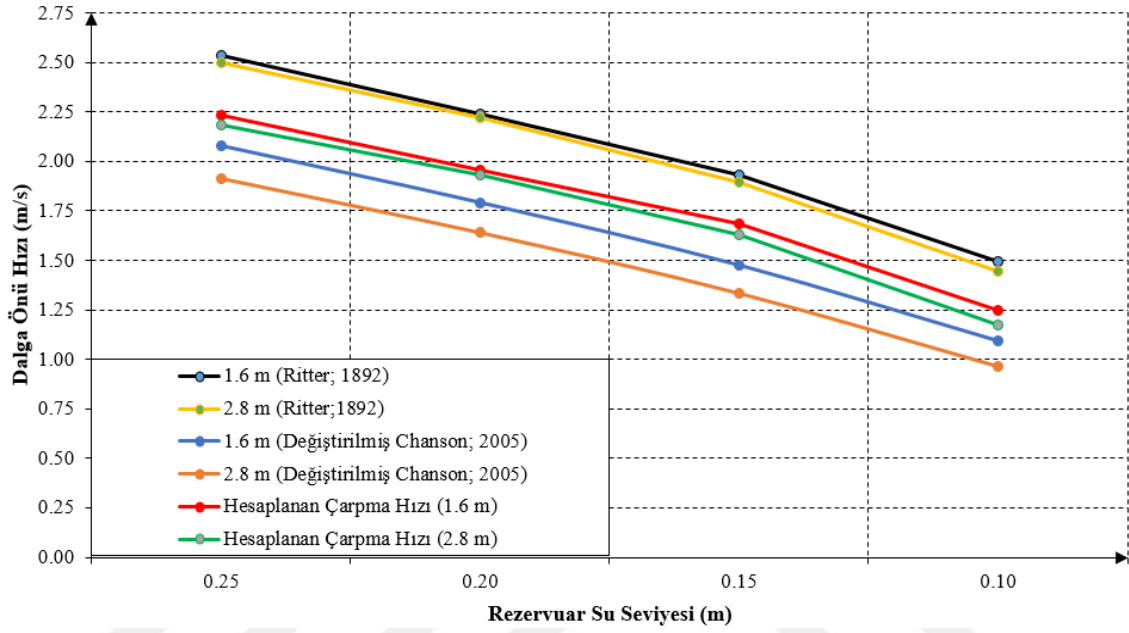
Konum	Başlangıç Rezervuar Su Seviyesi (m)	x (m)	t (s)	X(x/h ₀)	T (t* $\sqrt{g/h_0}$)	V	Ritter (1892) U (m/s)
Konum-1 (1.6 m)	0.10	1.6	1.2833	16.00	12.71	1.506	1.491
	0.15	1.6	0.9499	10.67	7.68	1.592	1.932
	0.20	1.6	0.8166	8.00	5.72	1.599	2.240
	0.25	1.6	0.7166	6.40	4.49	1.617	2.533
Konum-2 (2.8 m)	0.10	2.8	2.3833	28.00	23.61	1.457	1.444
	0.15	2.8	1.7166	18.67	13.88	1.563	1.896
	0.20	2.8	1.4499	14.00	10.15	1.586	2.221
	0.25	2.8	1.2832	11.20	8.04	1.596	2.499

Çizelge 4.12. Deney sonuçlarından elde edilen dalga önü hızları ve yüzde bağıl farklar

Konum	Başlangıç Rezervuar Su Seviyesi (m)	x (m)	t (s)	Deney U (m/s)	Ritter (1892) ve Deneysel Dalga Önü Hızları Arasındaki % Bağıl Farklar
Konum-1 (1.6 m)	0.10	1.6	1.2833	1.247	19.63
	0.15	1.6	0.9499	1.684	14.68
	0.20	1.6	0.8166	1.959	14.33
	0.25	1.6	0.7166	2.233	13.43
Konum-2 (2.8 m)	0.10	2.8	2.3833	1.175	22.87
	0.15	2.8	1.7166	1.631	16.25
	0.20	2.8	1.4499	1.931	15.02
	0.25	2.8	1.2832	2.182	14.51

Ritter (1892)'den farklı olarak, Chanson (2005) sürtünme etkisini de düşünerek dalga önü hızlarını ve dalga önünün konumunu incelemiştir. Bu çalışmada Chanson (2005)'nin dalga önü hızı ve konumunu bulmak için önerdiği formüllerdeki (Denklem 3.18 ve Denklem 3.19) sürtünme katsayısı Denklem 3.20'de verilen Colebrook-White formülü aracılığıyla hesaplanmıştır. Burada sürtünme katsayısının hesaplanmasında Colebrook-White denklemi kullanıldığından Chanson (2005)'in çözümü “değiştirilmiş Chanson

(2005)” olarak isimlendirilmiştir. Değiştirilmiş Chanson (2005) ile elde edilen dalga önü hızları diğer yöntemlerle birlikte Şekil 4.30’da verilmektedir. Şekil 4.30 incelendiğinde değiştirilmiş Chanson (2005) ile elde edilen dalga önü hızlarının Ritter (1892)’e kıyasla özellikle 1.6 m için deneysel verilere daha yakın olduğu görülmektedir, benzer sonuç Çizelge 4.12 ve Çizelge 4.13’ten de çıkartılabilir.



Şekil 4.30. Kanalda herhangi bir yapısal önlem yokken dalga önü hızlarının rezervuar su seviyesine göre değişimi

Çizelge 4.13. Deneysel veriler baz alınarak dalga önü hızları için hesaplanan yüzde bağıl farklar

Başlangıç Rezervuar Su Seviyesi (m)	0.25	0.20	0.15	0.10
1.6 m (Değiştirilmiş Chanson, 2005)	6.91	8.56	12.40	12.34
2.8 m (Değiştirilmiş Chanson, 2005)	12.21	14.96	18.08	17.65

Dalga önü hesabının dışında aynı zamanda değiştirilmiş Chanson (2005) ile dalga önünün konumu da hesaplanmıştır. Değiştirilmiş Chanson (2005) ile hesaplanan dalga önü konumları ve bu konumların gerçek değerleri ile arasındaki % bağıl hata değerleri sırasıyla Çizelge 4.14 ve Çizelge 4.15’te verilmektedir. Dalga önü konumu 1.6 m için maksimum bağıl hata %5.47 ve minimum bağıl hata %1.70 olarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde 2.8 m konum için maksimum bağıl hata %3.91 ve minimum bağıl hata %0.05 olarak hesaplanmıştır (Çizelge 4.15).

Çizelge 4.14. Dalga önu konumları

Başlangıç Rezervuar Su Seviyesi (m)	Dalga Önu Konumları (m)			
	0.25	0.20	0.15	0.10
1.6 m (Değiştirilmiş Chanson, 2005)	1.68	1.67	1.63	1.69
2.8 m (Değiştirilmiş Chanson, 2005)	2.85	2.80	2.76	2.91

Çizelge 4.15. Dalga önu konumları için hesaplanan yüzde bağıl hata

Başlangıç Rezervuar Su Seviyesi (m)	0.25	0.20	0.15	0.10
1.6 m (Değiştirilmiş Chanson, 2005)	4.89	4.32	1.70	5.47
2.8 m (Değiştirilmiş Chanson, 2005)	1.72	0.05	1.37	3.91

4.2 Yapısal Önlemlerin Performanslarının Araştırılması

Bu bölümde yapısal önlemlerin performansı hız, maksimum derinlik, maksimum yatay çarpma kuvveti, kuvvet şiddeti ve impuls olmak üzere beş farklı kritere göre değerlendirilmiştir.

4.2.1 Hız

Bilindiği üzere taşkın gibi doğal afetlerin etkilerinin azaltılmasındaki en önemli unsurlardan bir tanesi doğal afet olduğu anda taşkına maruz kalacak bölgedeki insanların/canlıların uyarılması, tahliye edilmesi ve kısa süre içerisinde alınabilecek önlemler (doğalgaz ve elektrik kesilmesi vb.)'dir. Burada bahsedilen hız, ani taşkın dalgasının yayılma hızı olup yapısal önlemlerin ani taşkın dalgasının yayılma hızını ne derece azalttığını tespit etmek amacıyla performans kriteri olarak belirlenmiştir.

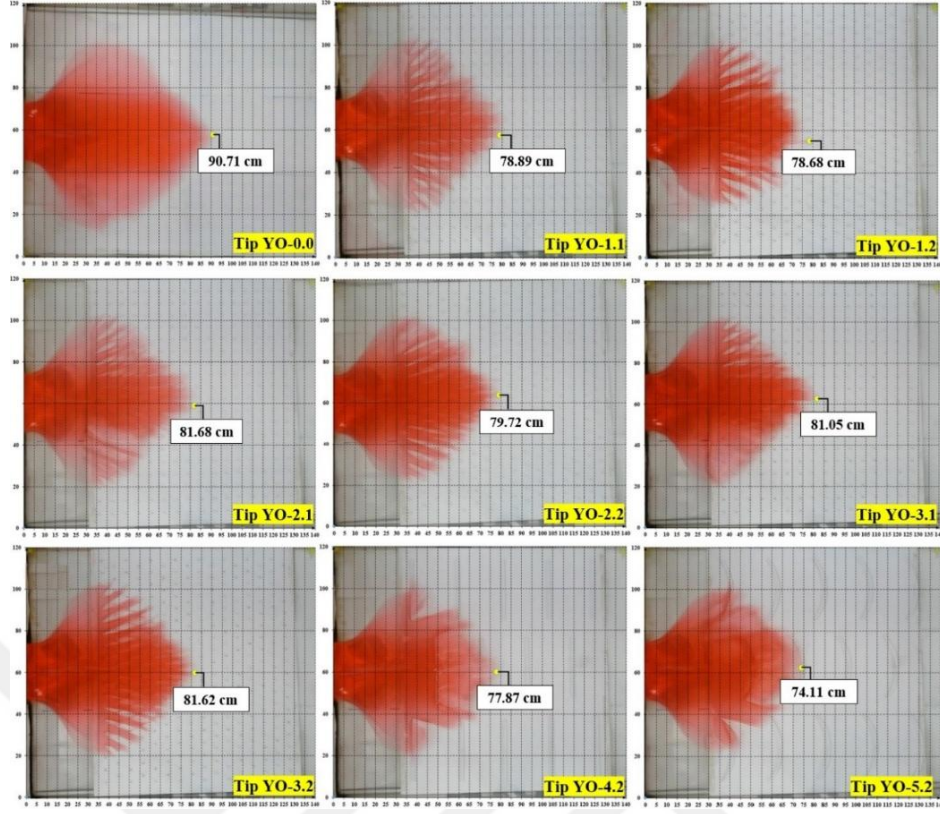
Kanal içerisinde yapısal ortamlar olması durumu

Kanal-1 üzerinde yapılan deneylerde şok dalgası önünün kanal içerisinde ulaştığı maksimum mesafe, Kanal-2 üzerinde yapılan deneylerde ise şok dalgasının iki farklı konum için model-yapıya ulaşma süresi düşünülerek yapısal ortamlar arasında gerekli karşılaştırmalar yapılmıştır.

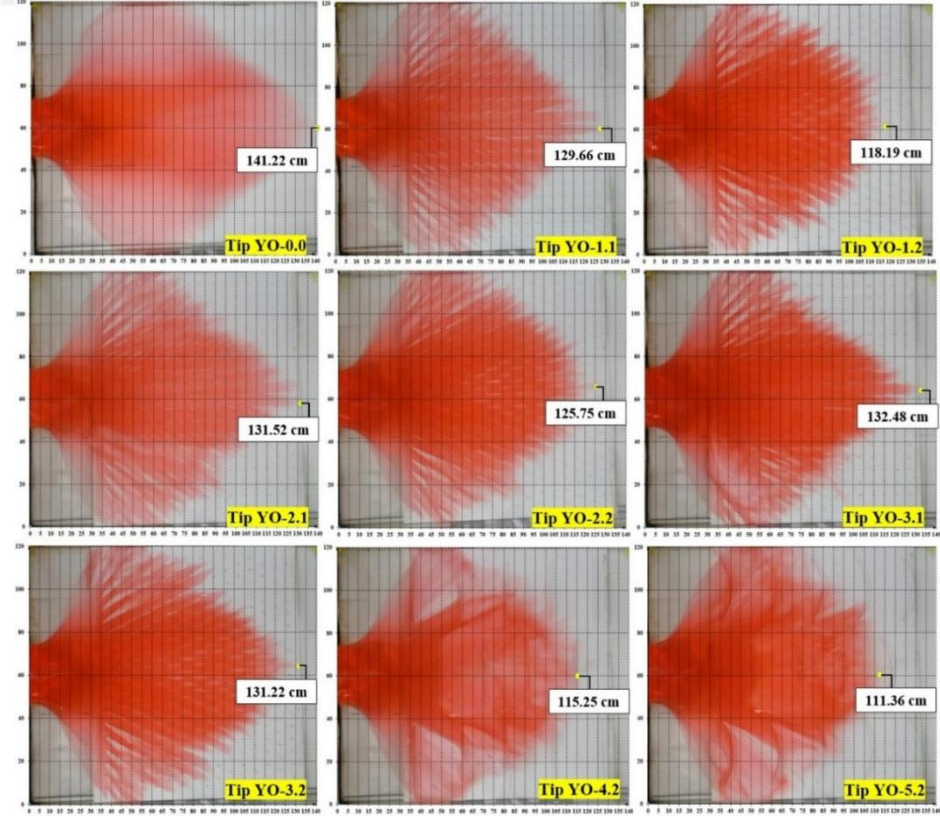
Kanal-1 üzerinde farklı yapısal ortamlar olması durumunda 25 cm başlangıç rezervuar su seviyesinde dalga önünün ulaştığı maksimum mesafe deneysel çalışmalardan alınan görüntüler kullanılarak elde edilmiştir (Şekil 4.31 ve Şekil 4.32). Burada Üst Kamera-1'e ait 2 boyutlu görüntüler kullanılarak 0.4 sn ve 0.6 sn'deki dalga önü konumları belirlenmiştir. Çizelge 4.16 incelendiğinde tüm yapı tipleri arasında Tip YO-5.2'nin şok dalgasını en fazla geciktirdiği Tip YO-3.1 ve Tip YO 2.1'in ise en az geciktirdiği görülmektedir. Tip YO-0.0 baz alındığında dalga önünün kanal içerisinde Tip YO-5.2'ye göre maksimum %21.14 ve Tip YO-3.1'e göre minimum %6.19 daha geride olduğu görülmüştür. Hız açısından bir karşılaştırma yapıldığında ise Tip YO-5.2'nin maksimum %20.85, Tip YO-3.1'in ise minimum %5.96 oranında şok dalgasının yayılma hızını azalttığı hesaplanmıştır. Ayrıca şaşırtmalı dizilimler kullanılarak yapılan deneylerde 0.6 sn'de şok dalgası önünün düz dizilimlere kıyasla maksimum %8.85 oranında daha geride kaldığı belirlenmiştir. Dolayısıyla şaşırtmalı dizilimlerden geçen şok dalgasının kanal içerisinde daha yavaş ilerlediği tespit edilmiştir. Bu bulguya benzer bir sonuç Chaudhuri vd., (2013) tarafından elde edilmiştir. Araştırmacılar kare, daire ve üçgen en kesitlere sahip düz ve şaşırtmalı dizilimlerden oluşan yüzeylerde, şok dalgasının şaşırtmalı dizilimlerde düz dizilimlere göre daha yavaş ilerlediğini bildirmişlerdir.

Çizelge 4.16. Farklı yapısal ortamlar için kapaktan itibaren ölçülen şok dalgası önünün ulaştığı maksimum mesafeler ve hızlar

Yapısal Ortam Tipi	Dalga Önünün Ulaştığı Maksimum Mesafe (cm)		Maksimum Mesafeler Arasındaki Farklar (cm)		Hız (m/s)	
	0.4 sn	0.6 sn	0.4 sn	0.6 sn	0.4 sn	0.6 sn
Tip YO-0.0	90.71	141.22	-	-	2.27	2.35
Tip YO-1.1	78.89	129.66	11.82	11.56	1.97	2.16
Tip YO-1.2	78.68	118.19	12.03	23.03	1.97	1.97
Tip YO-2.1	81.68	131.52	9.03	9.70	2.04	2.19
Tip YO-2.2	79.72	125.75	10.99	15.47	1.99	2.10
Tip YO-3.1	81.05	132.48	9.66	8.74	2.03	2.21
Tip YO-3.2	81.62	131.22	9.09	10.00	2.04	2.19
Tip YO-4.2	77.87	115.25	12.84	25.97	1.95	1.92
Tip YO-5.2	74.11	111.36	16.60	29.86	1.85	1.86



Şekil 4.31. Kanalda farklı yapısal ortamlar olması durumunda 0.4 sn’de dalga önünün ulaştığı maksimum mesafeler



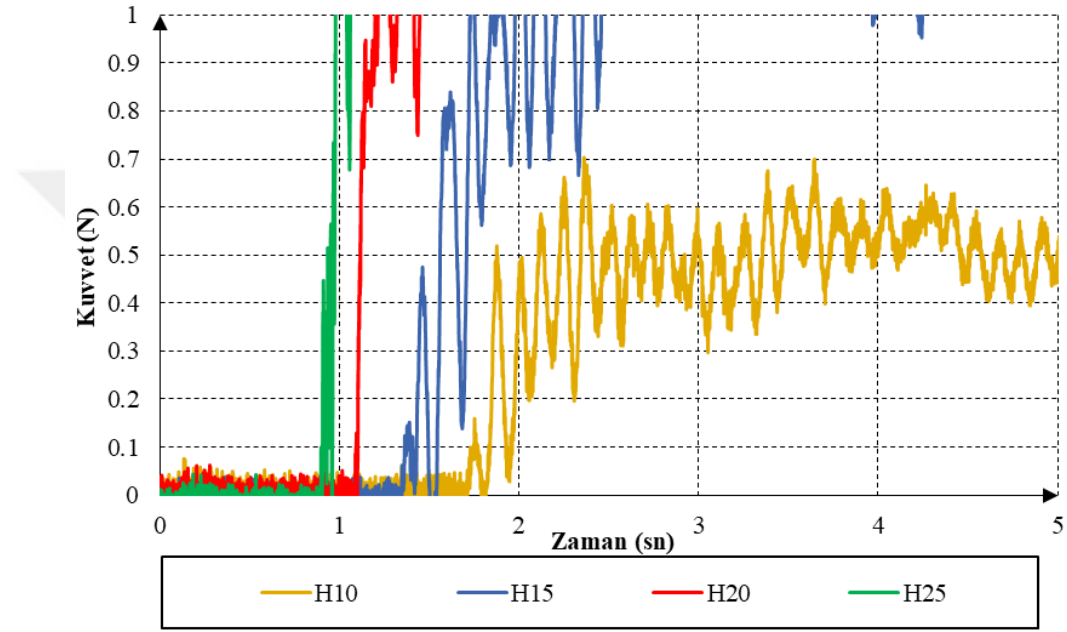
Şekil 4.32. Kanalda farklı yapısal ortamlar olması durumunda 0.6 sn’de dalga önünün ulaştığı maksimum mesafeler

Kanal-2 üzerinde yapılan deneylerde ise yapısal ortamlardan geçen şok dalgasının Konum-1 ve Konum-2'ye yerleştirilen model-yapıya çarpma süreleri ölçülmüş ve Çizelge 4.17 ile Çizelge 4.18'de verilmiştir. Konum-1 için Çizelge 4.17 incelendiğinde Tip YO-0.0'ın model-yapıya en kısa sürede çarptığı diğer yapısal ortam tiplerinin ise daha geç sürede model-yapıya ulaştığı dolayısıyla yapısal ortamların şok dalgasını geciktirdiği açık şekilde görülmektedir. Yapısal ortam tipleri kendi arasında karşılaştırıldığında ise Tip YO-5.2'nin şok dalgasını en fazla geciktirdiği ve onu Tip YO-4.2'nin takip ettiği görülmektedir. Bununla birlikte Tip YO-2.1 ve Tip YO-3.1'in şok dalgasını en az geciktirdiği tespit edilmiştir. Bir başka deyişle Tip YO-5.2 ve Tip YO-4.2'nin en hızlı Tip YO-2.1 ve Tip YO-3.1'in en yavaş dalga yayılma hızına sebep olduğu belirlenmiştir. Konum-1 için gecikme süresi Tip YO-0.0'a göre maksimum %54.62, minimum ise %4.20 oranında daha fazla hesaplanmıştır. Hız açısından karşılaştırıldığında ise bu ortamların maksimum %35.32, minimum %4.03 oranında yayılma hızını azalttığını tespit edilmiştir. Ayrıca yine şaşırtmalı dizilimlerden geçen şok dalgasının düz dizilimlerden geçen şok dalgasına göre genel olarak daha geç model-yapıya çarptığı belirlenmiştir. Düz dizilimler baz alınarak yapılan karşılaştırmada şaşırtmalı dizilimlerden geçen şok dalgası maksimum %5.62 oranında daha geç model-yapıya ulaşmıştır. Son olarak başlangıç rezervuar su seviyesi arttıkça gecikme sürelerinin azaldığı dolayısıyla yapısal ortamların daha az etkili olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.17. Yapısal ortamlardan geçen şok dalgası önünün model-yapıya çarpma süreleri - Konum-1

Model-Yapıya Çarpma Süreleri (sn)									
	Tip YO-0.0	Tip YO-1.1	Tip YO-1.2	Tip YO-2.1	Tip YO-2.2	Tip YO-3.1	Tip YO-3.2	Tip YO-4.2	Tip YO-5.2
H10	1.256	1.730	1.760	1.549	1.597	1.563	1.565	1.815	1.942
H15	1.002	1.225	1.264	1.189	1.207	1.133	1.127	1.336	1.413
H20	0.859	0.973	1.006	0.938	0.945	0.920	0.965	1.016	1.085
H25	0.809	0.894	0.910	0.907	0.856	0.843	0.853	0.901	0.916
Yayılma Hızı (m/s)									
H10	1.274	0.925	0.909	1.033	1.002	1.024	1.022	0.882	0.824
H15	1.597	1.306	1.266	1.346	1.326	1.412	1.420	1.198	1.132
H20	1.863	1.644	1.590	1.706	1.693	1.739	1.658	1.575	1.475
H25	1.978	1.790	1.758	1.764	1.869	1.898	1.876	1.776	1.747

Örnek olması açısından Şekil 4.33, farklı başlangıç rezervuar su seviyelerinde oluşan şok dalgalarının Kanal-2 içerisine yerleştirilen Tip-YO-5.2’den geçmesi durumunda Konum-1’de (1.6 m) bulunan model-yapıya çarpma sürelerini göstermektedir. Şekil 4.33 incelendiğinde başlangıç rezervuar su seviyesi arttıkça şok dalgasının beklendiği üzere daha hızlı ilerlediği ve bu sayede daha kısa sürede model-yapıya ulaştığı açık şekilde görülmektedir. Benzer bir sonuç Erduran vd., (2025) tarafından yapılan çalışmada da rapor edilmiştir.



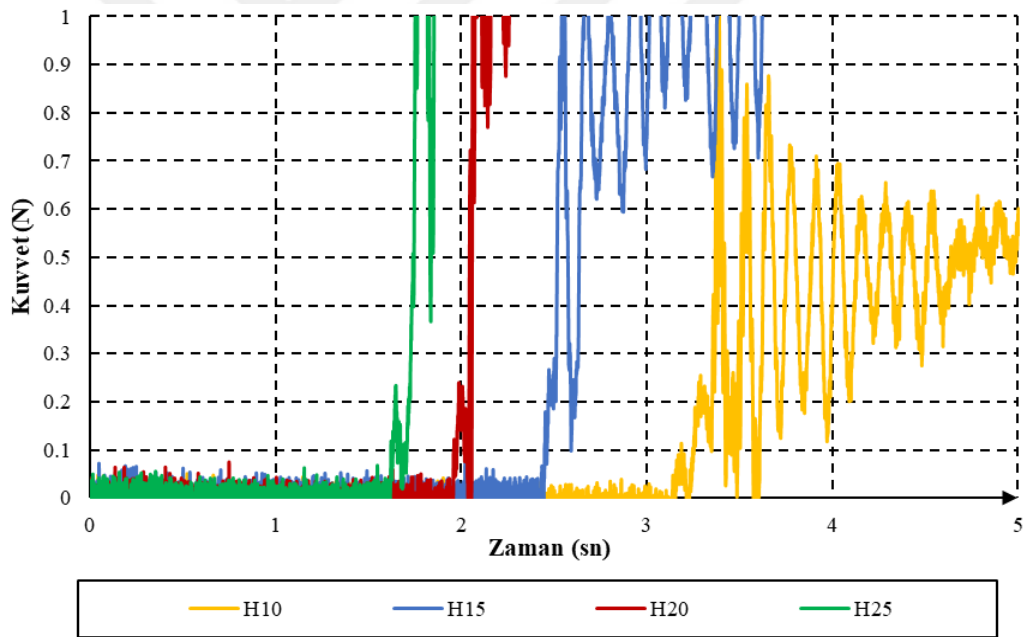
Şekil 4.33. Farklı başlangıç rezervuar su seviyelerinde şok dalgalarının model-yapıya ulaşma süreleri - Konum-1

Çizelge 4.18 incelendiğinde Konum-1’de olduğu gibi Konum-2’de de başlangıç rezervuar su seviyesi arttıkça yapısal ortamlardan geçen şok dalgasının model-yapıya çarpma süresinin azaldığı ve en erken çarpma süresinin beklendiği üzere Tip YO-0.0’da meydana geldiği görülmüştür. Bunu yanı sıra Konum-1’e benzer olacak şekilde yine şok dalgasını en fazla geciktiren yapısal ortamların sırasıyla Tip YO-5.2 ve Tip-YO-4.2 olduğu tespit edilmiş, en az geciktiren ortam ise Tip YO-3.2 olarak belirlenmiştir. Ayrıca burada Tip YO-0.0 baz alınarak hesaplanan gecikme süreleri maksimum %36.07 ve minimum %2.83 daha fazla hesaplanmıştır. Bununla birlikte hız açısından yapılan karşılaştırmada yapısal ortamların maksimum %26.51 ve minimum %2.75 oranında yayılma hızında bir azalma sağladığı görülmüştür. Burada da başlangıç rezervuar su seviyesi arttıkça yapısal ortamların gecikme süresi açısından daha az etkili olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.18. Yapısal ortamlardan geçen şok dalgası önünün model-yapıya çarpma süreleri - Konum-2

Model-Yapıya Çarpma Süreleri (sn)									
	Tip YO-0.0	Tip YO-1.1	Tip YO-1.2	Tip YO-2.1	Tip YO-2.2	Tip YO-3.1	Tip YO-3.2	Tip YO-4.2	Tip YO-5.2
H10	2.467	3.065	3.065	3.033	2.943	2.856	2.799	3.290	3.236
H15	1.805	2.272	2.233	2.166	2.157	2.119	2.129	2.362	2.446
H20	1.511	1.790	1.811	1.673	1.719	1.603	1.562	1.869	2.056
H25	1.307	1.472	1.506	1.422	1.486	1.402	1.344	1.618	1.676

Yayılma Hızı (m/s)									
H10	1.135	0.914	0.914	0.923	0.951	0.980	1.000	0.851	0.865
H15	1.551	1.232	1.254	1.293	1.298	1.321	1.315	1.185	1.145
H20	1.853	1.564	1.546	1.674	1.629	1.747	1.793	1.498	1.362
H25	2.142	1.902	1.859	1.969	1.884	1.997	2.083	1.731	1.671



Şekil 4.34. Farklı başlangıç rezervuar su seviyelerinde şok dalgalarının model-yapıya ulaşma süreleri - Konum-2

Konum-1'e benzer olarak Şekil 4.34 Kanal-2 içinde Tip YO-5.2 olması durumunda farklı başlangıç rezervuar su seviyelerinde oluşan şok dalgalarının Konum-2 (2.8 m)'de bulunan model-yapıya çarpma sürelerini göstermektedir. Şekil 4.34 incelendiğinde başlangıç rezervuar su seviyesi arttıkça şok dalgasının yine daha hızlı ilerlediği ve bu sayede daha kısa sürede model-yapıya ulaştığı burada da açık şekilde görülebilmektedir. Ayrıca Konum-1 ve Konum-2 model-yapıya ulaşma süreleri açısından Tip YO-5.2 baz

alınarak karşılaştırıldığında şok dalgası önünün tüm başlangıç su seviyelerinde beklendiği üzere kapağa daha yakın olan Konum-1'e daha kısa sürede ulaştığı görülmüştür.

Kanal içerisinde gözenekli ve gözeneksiz yapılar olması durumu

Burada gözenekli ve gözeneksiz yapılardan geçen şok dalgasının hem kanal içerisinde ulaştığı maksimum mesafe hem de model-yapıya ulaşma süresi dikkate alınarak bu yapıların hız kriteri açısından performansı değerlendirilmiştir. Farklı başlangıç rezervuar su seviyelerinde oluşan şok dalgasına ait tüm deneyler Kanal-2 üzerinde gerçekleştirilmiştir.

25 cm başlangıç rezervuar su seviyesi ve 0.8 – 1.6 sn aralığında farklı yapı tipleri için deneysel çalışmalarla elde edilen su yüzü profilleri ve şok dalgası önünün kanal içerisinde ulaştığı maksimum mesafe Şekil 4.35 ve Çizelge 4.19'da verilmektedir. Şok dalgası önünün ulaştığı mesafeler incelendiğinde 0.8 sn, 1.0 sn ve 1.6 sn zaman adımlarında boş kanal baz alınarak hesaplanan şok dalgasının ulaştığı maksimum mesafe farkı sıralamasının; gözenekli yapılar arasında sırasıyla Tip-III, Tip-II ve Tip-I şeklinde olduğu, 1.2 sn ve 1.4 sn zaman adımlarında ise bu sıralamanın Tip-II, Tip-I ve Tip-III şeklinde değiştiği tespit edilmiştir (Çizelge 4.19). Burada Gözenekli Tip-III'e ait su yüzü profilinde görülen farklılık, başlangıçta akışa karşı gösterilen dirençten kaynaklanmaktadır. Bu yapı tipinde akımın karşılaştığı yüzey alanı diğer yapı tiplerinin yüzey alanından daha az olduğundan kabarma etkileri yapının mansabındaki tüm boya ulaştığında görülmektedir. Kameranın gördüğü son mesafe olan kanalın 6.25 m'sine en geç ulaşma süreleri bakımından gözenekli yapılar incelendiğinde ise sıralamanın yine Tip-III, Tip-II ve Tip-I şeklinde olduğu belirlenmiştir (Çizelge 4.20). Diğer yapı türleri olan gözeneksiz ve eğri yüzeyli yapıların taşkın şok dalgası üzerindeki etkilerine bakıldığında ise bu yapıların dikkate alınan tüm zaman adımlarında (0.8 sn – 1.6 sn) gözenekli yapılara göre şok dalgasını daha fazla mesafe farkıyla geciktirdiği tespit edilmiştir (Çizelge 4.19).

Tüm yapılar arasında dikkate alınan son zaman adımı 1.6 sn ve 25 cm başlangıç rezervuar su seviyesi için şok dalgası önünü en fazla geciktirenden en az geciktirene doğru bir karşılaştırma yapıldığında sıralamanın Eğri Yüzeyli Yapı, Gözeneksiz Yapı, Gözenekli Tip-III, Gözenekli Tip-II ve Gözenekli Tip-I şeklinde olduğu görülmüştür. Ayrıca 1.6

sn'de boş kanala göre şok dalgası önünün Eğri Yüzeyli Yapı'da %9.24, Gözeneksiz Yapı'da %8.61, Gözenekli Tip-III'te %8.14, Gözenekli Tip-II'de %7.60 ve Gözenekli Tip-I'de %5.94 oranında daha geride olduğu tespit edilmiştir.

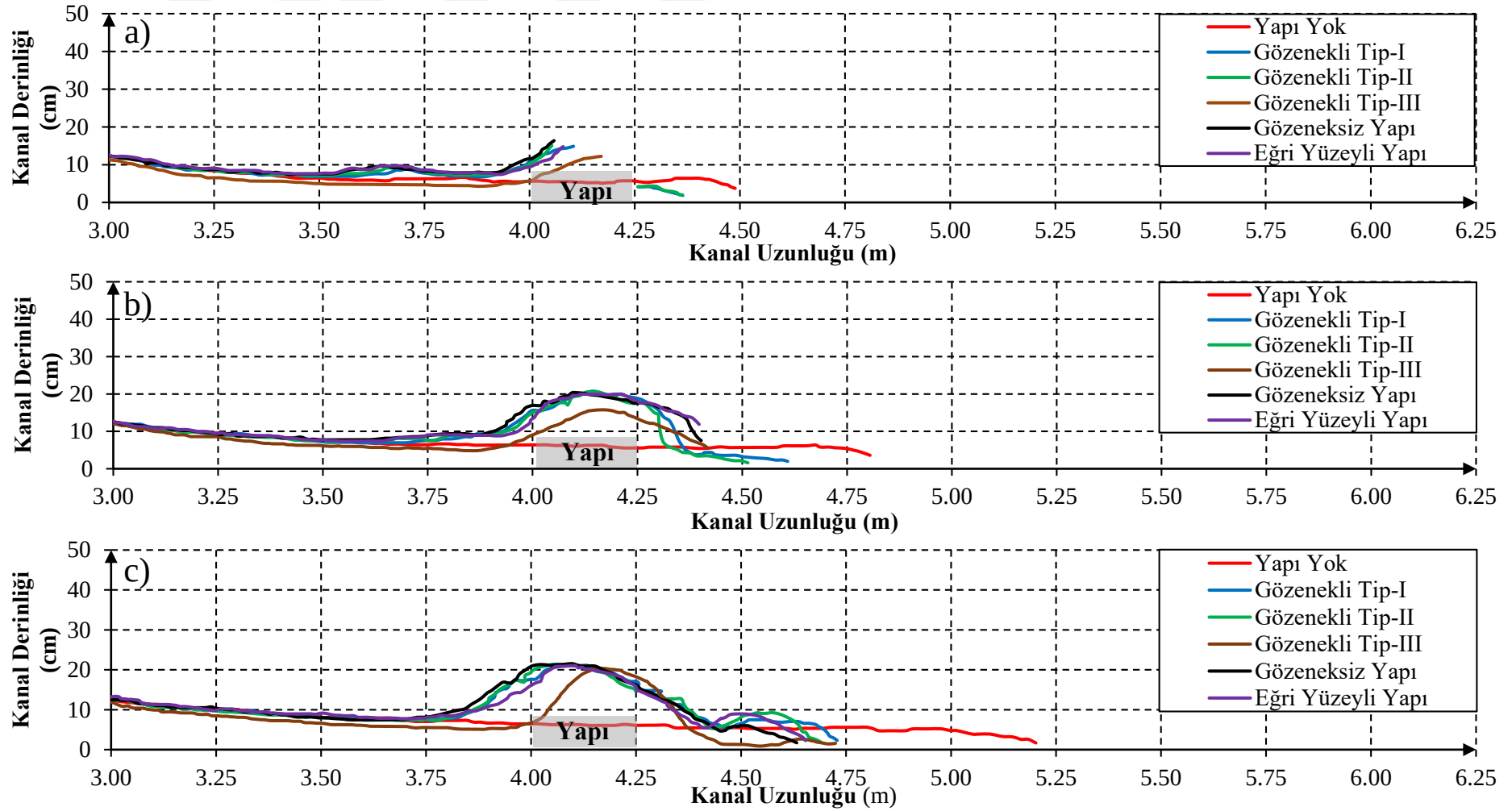
Çizelge 4.19. Deneysel ölçüm sonuçlarına göre elde edilen şok dalgası önünün ulaştığı maksimum mesafeler ve maksimum mesafeler arasındaki farklar

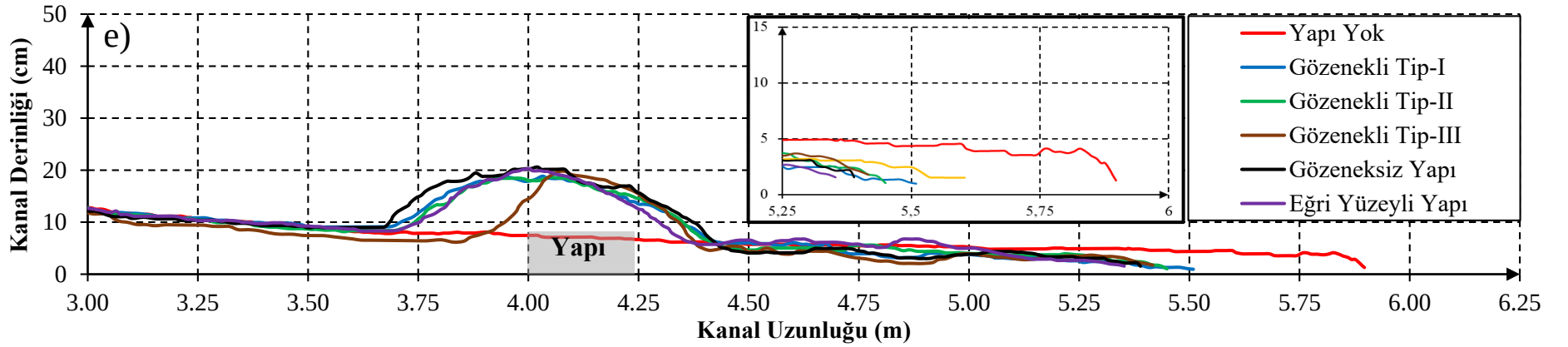
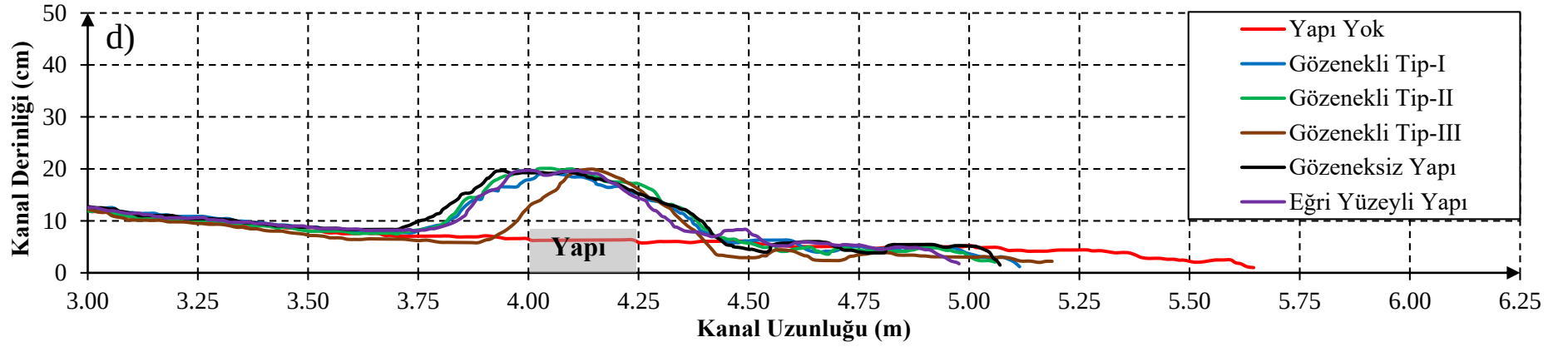
Yapı Tipi	0.8 sn	1.0 sn	1.2 sn	1.4 sn	1.6 sn
	Şok Dalgası Önünün Ulaştığı Maksimum Mesafe (m)				
Boş Kanal	4.488	4.804	5.202	5.645	5.897
Gözenekli Tip-I	4.364	4.608	4.728	5.114	5.547
Gözenekli Tip-II	4.363	4.513	4.691	5.058	5.449
Gözenekli Tip-III	4.171	4.418	4.725	5.189	5.417
Gözeneksiz Yapı	4.058	4.402	4.632	5.040	5.389
Eğri Yüzeyli Yapı	4.080	4.397	4.653	4.977	5.352

Yapı Tipi	0.8 sn	1.0 sn	1.2 sn	1.4 sn	1.6 sn
	Maksimum Mesafeler Arasındaki Farklar (m)				
Boş Kanal	-	-	-	-	-
Gözenekli Tip-I	0.124	0.196	0.474	0.531	0.350
Gözenekli Tip-II	0.125	0.291	0.511	0.587	0.448
Gözenekli Tip-III	0.317	0.386	0.477	0.456	0.480
Gözeneksiz Yapı	0.430	0.402	0.570	0.605	0.508
Eğri Yüzeyli Yapı	0.408	0.407	0.549	0.668	0.545

Çizelge 4.20. Deneysel ölçüm sonuçlarına göre elde edilen şok dalgası önünün kanalın 6.25 m'sine ulaşma süreleri

Yapı Tipi	Maksimum Gecikme Süresi (sn)	
	Kanalın 6.25 m'sine ulaşma süresi (sn)	Gecikme süresi (sn)
Boş Kanal	1.699	-
Gözenekli Yapı Tip-I	1.999	0.300
Gözenekli Yapı Tip-II	2.067	0.368
Gözenekli Yapı Tip-III	2.099	0.400
Gözeneksiz Yapı	2.099	0.400
Eğri Yüzeyli Yapı	2.166	0.467





Şekil 4.35. (Devam) Kanalda farklı yapı tipleri olması durumunda deneysel ölçümlerle elde edilen su yüzü profilleri ve dalga önünün ulaştığı maksimum mesafeler a) 0.8 sn b) 1.0 sn c) 1.2 sn d) 1.4 sn e) 1.6 sn

Çizelge 4.21 ise deneysel çalışma ve sayısal model sonuçlarına göre gözenekli ve gözeneksiz yapılardan geçen şok dalgasının model-yapıya çarpma sürelerini göstermektedir. Çizelge 4.21 incelendiğinde, başlangıç rezervuar su seviyesi arttıkça şok dalgasının daha hızlı hareket ettiği dolayısıyla model-yapıya daha kısa sürede çarptığı net şekilde görülmektedir. Bununla birlikte deneysel ve sayısal sonuçlar açısından tüm başlangıç rezervuar su seviyelerinde kanalda herhangi bir yapı yokken şok dalgasının en kısa sürede model-yapıya ulaştığı anlaşılmaktadır. Yapı tipleri kendi arasında karşılaştırıldığında ise Gözenekli Tip-I (deneysel sonuçlar H25 hariç) ve Gözenekli Tip-II'den geçen şok dalgasının farklı başlangıç rezervuar su seviyelerinde en kısa sürede model-yapıya çarptığı görülmektedir. Bunun sebebi Gözenekli Tip-I ve Gözenekli Tip-II'den geçen akımın diğer yapı tiplerine göre enerjisinin daha az kırılmasından kaynaklanmaktadır. Gözenekli Tip-III ise akımı geri döndürme özelliğinden dolayı, daha fazla momentum alışverişine (rezervuardan gelen akımla yapıdan çıkan akım arasında) neden olmuş ve bu durum daha fazla enerjinin kırılmasını sağlamıştır.

Çizelge 4.21. Farklı yapı tiplerinden geçen şok dalgası önünün deneysel ve sayısal sonuçlara dayalı olarak elde edilen model-yapıya çarpma süreleri

Yapı Tipi	Model-Yapıya Çarpma Süreleri (sn)					
	H15		H20		H25	
	Deneysel	Sayısal	Deneysel	Sayısal	Deneysel	Sayısal
Boş Kanal	1.82	1.83	1.51	1.72	1.31	1.22
Gözenekli Tip-I	2.74	2.52	2.05	2.03	1.82	1.77
Gözenekli Tip-II	2.90	2.65	2.17	2.05	1.79	1.83
Gözenekli Tip-III	3.10	3.27	2.26	2.38	1.87	1.92
Gözeneksiz Yapı	3.04	3.15	2.10	2.30	1.64	1.85
Eğri Yüzeyli Yapı	2.91	3.30	2.17	2.48	1.78	2.10

Ayrıca deneysel çalışma ve sayısal model sonuçları arasında şok dalgasının model-yapıya çarpma zamanları açısından bir karşılaştırma yapılmış ve deneysel sonuçlar baz alınarak yüzde bağıl fark değerleri hesaplanmıştır. Buna göre deneysel ve sayısal sonuçlar arasında çarpma zamanı olarak maksimum %17.78 ve minimum %0.60 bağıl fark hesaplanmıştır. Bu fark, deneysel çalışmalarda kameranın tüm deneysel kurulumu daha geniş açıda görebilmesi için daha uzağa yerleştirilmesi ve bu nedenle dalga önünü ucunun takip edilmesinde (belirlenmesinde) yaşanan zorluklardan kaynaklanmaktadır. Bu yüzden daha sağlıklı bir karşılaştırma adına sayısal model sonuçları dikkate alınarak şok dalgası önünün model-yapıya ulaşma süreleri farklı yapı tipleri için karşılaştırılmış ve

sıralamanın Eğri Yüzeyli Yapı, Gözenekli Tip-III, Gözeneksiz Yapı, Gözenekli Tip-II ve Gözenekli Tip-I şeklinde olduğu tespit edilmiştir.

Tüm bu anlatılanlar ışığında şok dalgası önünün model-yapıya çarpma süreleri açısından şok dalgasını en fazla geciktiren yapı tipinin Eğri Yüzeyli Yapı, en az geciktiren yapı tipinin ise Gözenekli Tip-I olduğu tespit edilmiştir. Bu yapı tiplerinin boş kanal baz alındığında maksimum %80.33 ve minimum %18.02 oranında model-yapıya çarpma süresini azalttığı belirlenmiştir.

Kanal içerisinde yapısal ortam ve gözenekli/gözeneksiz yapıların birlikte olması durumu

Şekil 4.36 – Şekil 4.39, 25 cm başlangıç rezervuar su seviyesi için 1.8 sn ile 2.2 sn arasında yapısal ortam ve gözenekli/gözeneksiz yapıların birlikte kullanımları durumunda Kanal-2 üzerinde oluşan su yüzü profillerini göstermektedir. Burada yapısal ortam olarak şok dalgasını en fazla geciktiren Tip YO-5.2'nin tüm gözeneksiz yapılarla birlikte kullanımı değerlendirilmiş ve tüm zaman adımlarında Tip YO-5.2'nin eğri yüzeyli yapı ile birlikte kullanımının diğer kombinasyonlardan daha fazla şok dalgasını geciktirdiği tespit edilmiştir. Çizelge 4.22'ye göre şok dalgasını en fazla geciktirenden en aza geciktirene doğru tüm kombinasyonlar arasında yapılan karşılaştırmada sıralamanın Tip YO-5.2 + Eğri Yüzeyli Yapı, Tip YO-5.2 + Gözeneksiz Yapı ve Tip YO-5.2 + Gözenekli Tip-III şeklinde olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.22. Yapısal ortam ve gözenekli-gözeneksiz yapılar olması durumunda deneysel ölçüm sonuçlarına göre elde edilen şok dalgası önünün ulaştığı maksimum mesafeler ve maksimum mesafeler arasındaki farklar

Ortam ve Yapı Tipi	1.8 sn	2.0 sn	2.2 sn
	Taşkın Şok Dalgası Önünün Ulaştığı Maksimum Mesafe (m)		
Ortam/Yapı Yok	6.39	6.74	7.22
Tip YO-5.2 + Gözenekli Tip-III	5.64	5.90	6.13
Tip YO-5.2 + Gözeneksiz Yapı	5.56	5.71	6.05
Tip YO-5.2 + Eğri Yüzeyli Yapı	5.55	5.70	5.99

Ortam ve Yapı Tipi	1.8 sn	2.0 sn	2.2 sn
	Maksimum Mesafeler Arasındaki Farklar (m)		
Ortam/Yapı Yok	-	-	-
Tip YO-5.2 + Gözenekli Tip-III	0.75	0.84	1.09
Tip YO-5.2 + Gözeneksiz Yapı	0.83	1.04	1.17
Tip YO-5.2 + Eğri Yüzeyli Yapı	0.84	1.04	1.23

Ayrıca kanalda herhangi bir yapısal ortam veya gözenekli/gözeneksiz yapı olmaması durumuna göre 2.2 sn'de yapılan karşılaştırmada Tip YO-5.2 + Eğri Yüzeyli Yapı kombinasyonunda şok dalgası önünün %17.04, Tip YO-5.2 + Gözeneksiz Yapı kombinasyonunda %16.20 ve Tip YO-5.2 + Gözenekli Tip-III kombinasyonunda %15.10 oranında daha geride olduğu tespit edilmiştir.

Flow-3D ile elde edilen sayısal model sonuçları incelendiğinde de sıralamanın yine deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlarla aynı olduğu görülmüştür (Çizelge 4.23). Burada kanalda herhangi bir yapısal ortam veya gözenekli/gözeneksiz yapı olmaması durumuna göre 2.2 sn'de yapılan karşılaştırmada Tip YO-5.2 + Eğri Yüzeyli Yapı kombinasyonunda şok dalgası önünün %15.65, Tip YO-5.2 + Gözeneksiz Yapı kombinasyonunda %11.91 ve Tip YO-5.2 + Gözenekli Tip-III kombinasyonunda %10.94 oranında daha geride kaldığı tespit edilmiştir. Çizelge 4.22 ile Çizelge 4.23'te verilen maksimum dalga önleri arasında oluşan farklılıkların ana nedeni deneysel ve sayısal çalışmalardaki kapak açılma sürelerinin farklı olmasıdır. Bunun yanı sıra sayısal modellerde kullanılan denklemlerin fiziksel modeli tam olarak tarif edememesi, model kabulleri ve çözüm yaklaşımları da bu farklılıklara neden olmuştur. Ayrıca her ne kadar dikkatli ölçümler yapılsa da deneysel çalışmalarda çok küçük akım derinliklerinin ölçülememesi de bu farklılıkları oluşturmuştur.

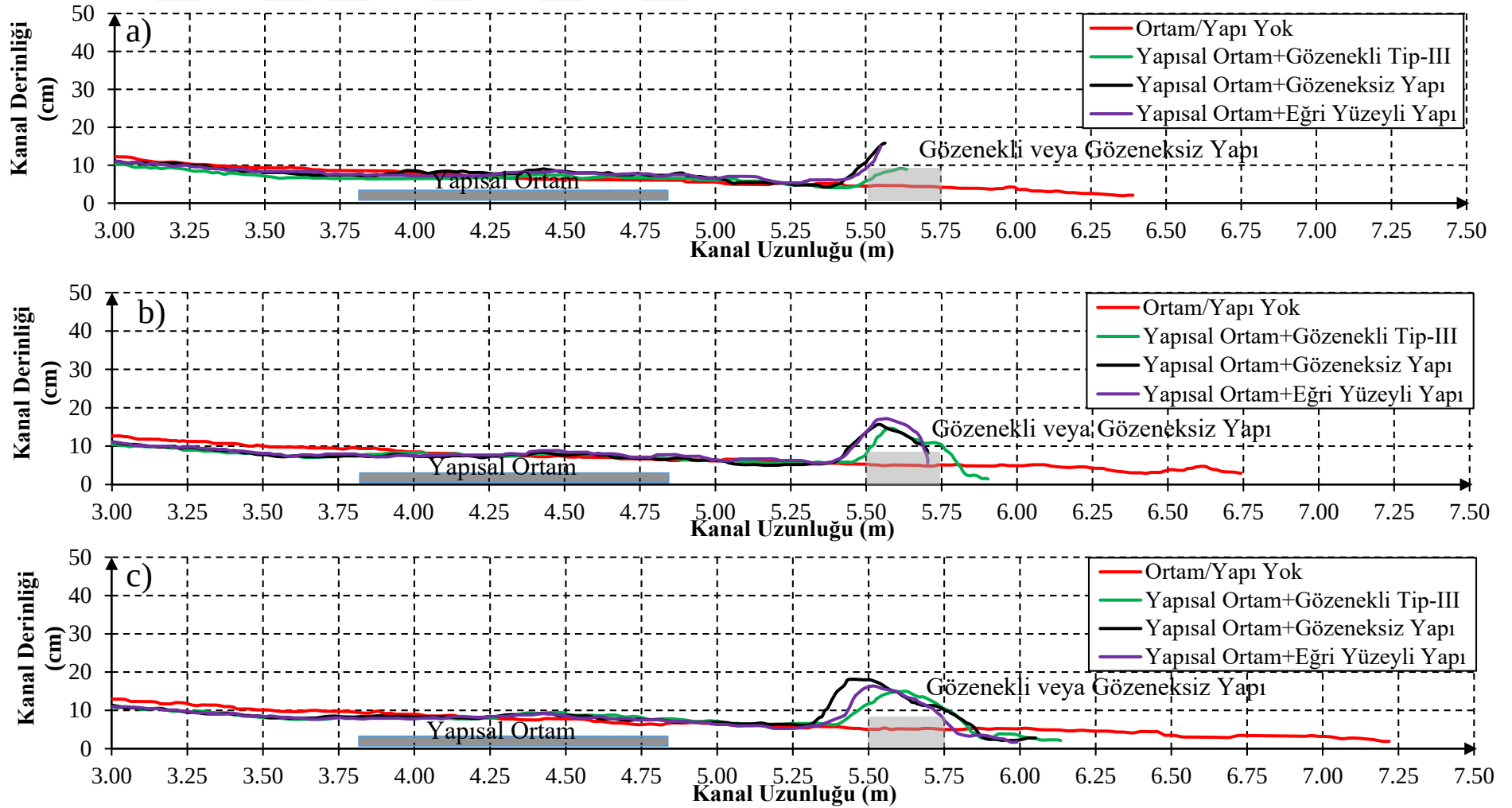
Çizelge 4.23. Yapısal ortam ve gözenekli-gözeneksiz yapılar olması durumunda sayısal model sonuçlarına göre elde edilen şok dalgası önünün ulaştığı maksimum mesafeler ve maksimum mesafeler arasındaki farklar

Ortam ve Yapı Tipi	1.8 sn	2.0 sn	2.2 sn
	Taşkın Şok Dalgası Önünün Ulaştığı Maksimum Mesafe (m)		
Ortam/Yapı Yok	6.53	6.87	7.22
Tip YO-5.2 + Gözenekli Tip-III	5.93	6.07	6.43
Tip YO-5.2 + Gözeneksiz Yapı	5.74	6.05	6.36
Tip YO-5.2 + Eğri Yüzeyli Yapı	5.74	5.85	6.09
Ortam ve Yapı Tipi	1.8 sn	2.0 sn	2.2 sn
	Maksimum Mesafeler Arasındaki Farklar (m)		
Ortam/Yapı Yok	-	-	-
Tip YO-5.2 + Gözenekli Tip-III	0.60	0.80	0.79
Tip YO-5.2 + Gözeneksiz Yapı	0.78	0.83	0.86
Tip YO-5.2 + Eğri Yüzeyli Yapı	0.78	1.03	1.13

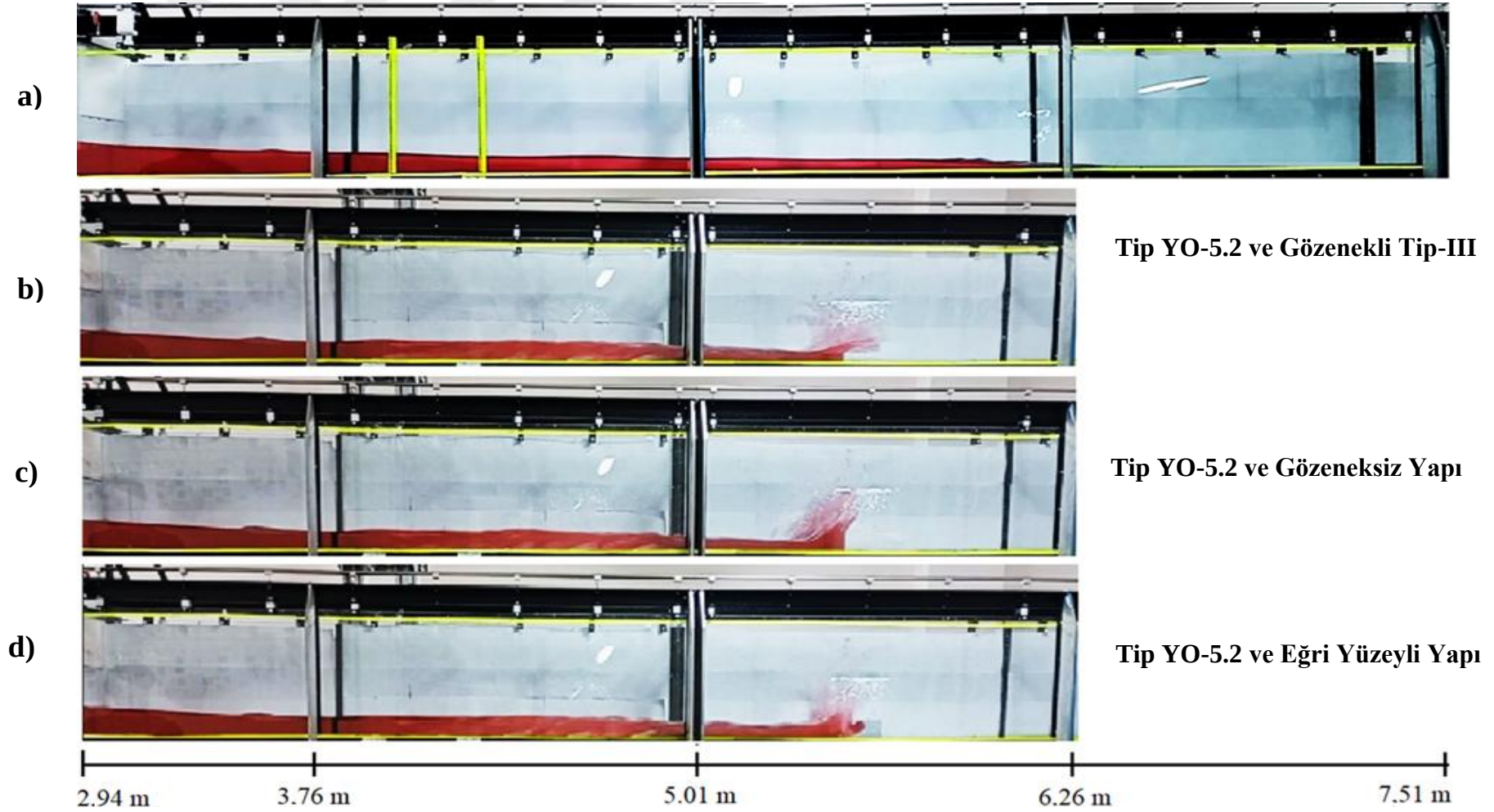
Çizelge 4.24 25 cm başlangıç rezervuar su seviyesinde farklı yapısal önlem kombinasyonlarının kanalın kameranin gördüğü son mesafe olan 6.25 m'sine ulaşma sürelerini göstermektedir. Çizelge 4.24 incelendiğinde ise yapısal ortam ve gözenekli/gözeneksiz yapıların birlikte kullanımının taşkın şok dalgasının daha fazla geciktirdiği net şekilde görülmektedir. Kanalda herhangi bir yapısal ortam veya gözenekli/gözeneksiz yapı olmaması durumu baz alınarak yapılan karşılaştırmada Tip YO-5.2 + Eğri Yüzeyli Yapı kombinasyonunun şok dalgası önünü %39.26, Tip YO-5.2 + Gözeneksiz Yapı kombinasyonunun %37.32 ve Tip YO-5.2 + Gözenekli Tip-III kombinasyonunun %31.43 oranında daha fazla süreyle geciktirdiği tespit edilmiştir.

Çizelge 4.24. Kanal mansabında yapısal ortam ve gözenekli/gözeneksiz yapılar olması durumunda deneysel ölçüm sonuçlarına göre elde edilen şok dalgası önünün kanalın 6.25 m'sine ulaşma süreleri

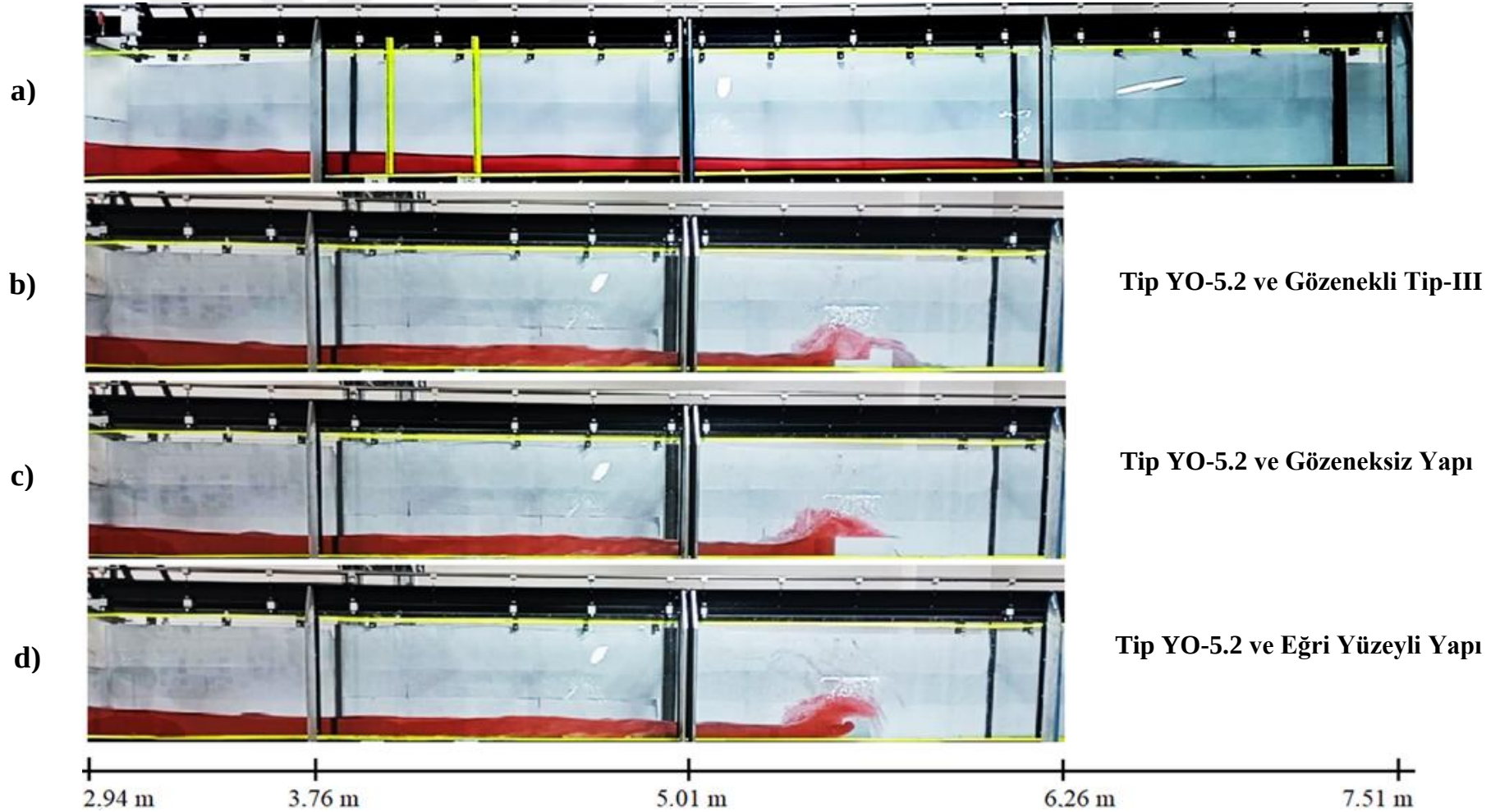
Yapı Tipi	Maksimum Gecikme Süresi (sn)	
	6.25 m'ye ulaşma Süresi (sn)	Gecikme süresi (sn)
Herhangi Bir Ortam veya Yapı Yok	1.699	-
Tip YO-5.2 + Gözenekli Tip-III	2.233	0.534
Tip YO-5.2 + Gözeneksiz Yapı	2.333	0.634
Tip YO-5.2 + Eğri Yüzeyli Yapı	2.366	0.667



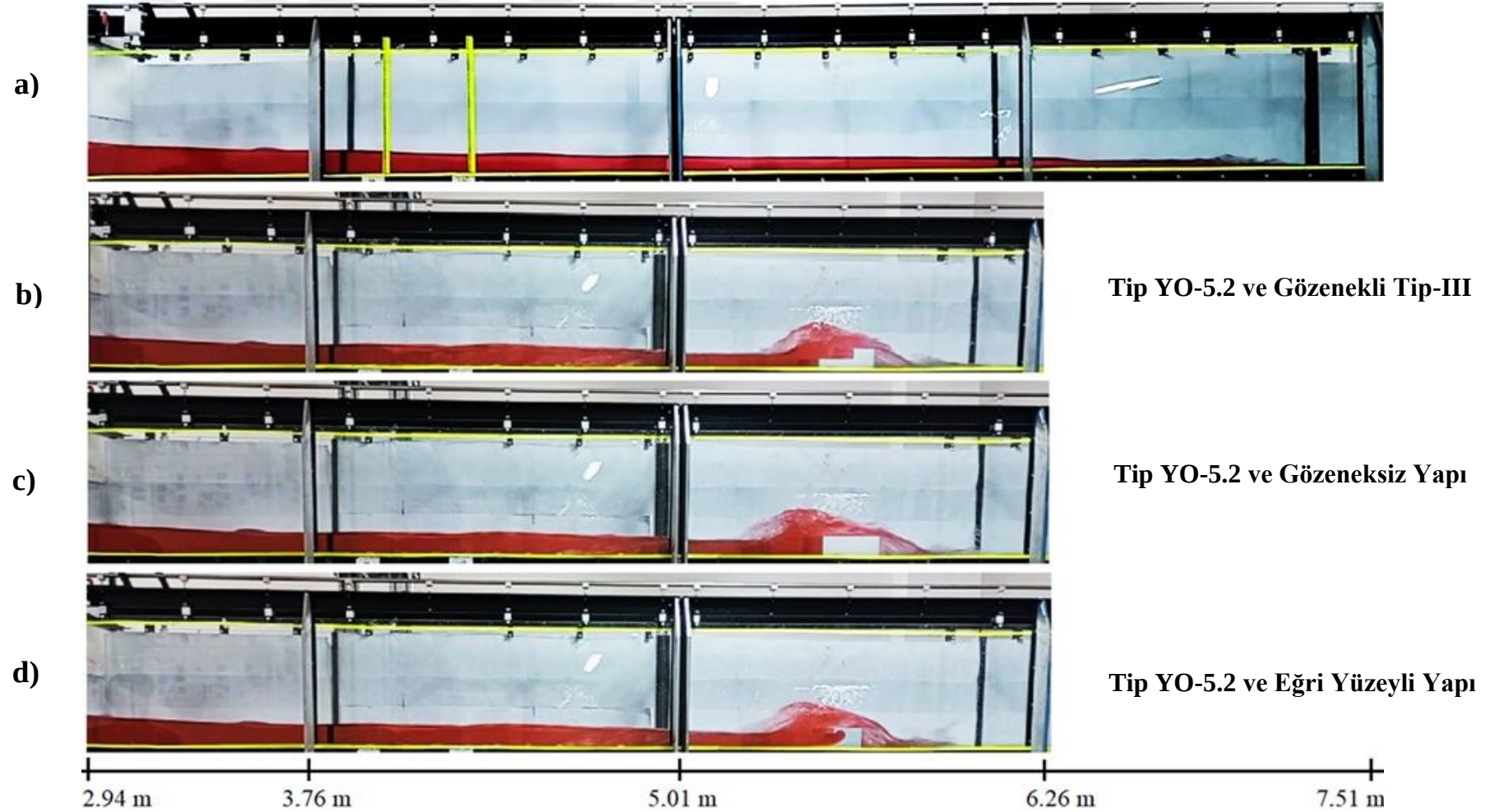
Şekil 4.36. Kanalda yapısal ortam/gözenekli-gözeneksiz yapılar olması durumunda deneysel ölçümlerle elde edilen su yüzü profilleri ve dalga önünün ulaştığı maksimum mesafeler a) 1.8 sn b) 2.0 sn c) 2.2 sn



Şekil 4.37. Yapısal ortam ve gözenekli-gözeneksiz yapılar olması durumu için deneysel görüntülerden elde edilen su yüzü profilleri ve dalga önü konumları a) ortam/yapı yok b) Tip YO-5.2 + Gözenekli Tip-III c) Tip YO-5.2 + Gözeneksiz Yapı d) Tip YO-5.2 + Eğri Yüzeyle Yapı ($t = 1.8$ sn)



Şekil 4.38. Yapısal ortam ve gözenekli-gözeneksiz yapılar olması durumu için deneysel görüntülerden elde edilen su yüzü profilleri ve dalga önü konumları a) ortam/yapı yok b) Tip YO-5.2 + Gözenekli Tip-III c) Tip YO-5.2 + Gözeneksiz Yapı d) Tip YO-5.2 + Eğri Yüzeyle Yapı ($t = 2.0$ sn)



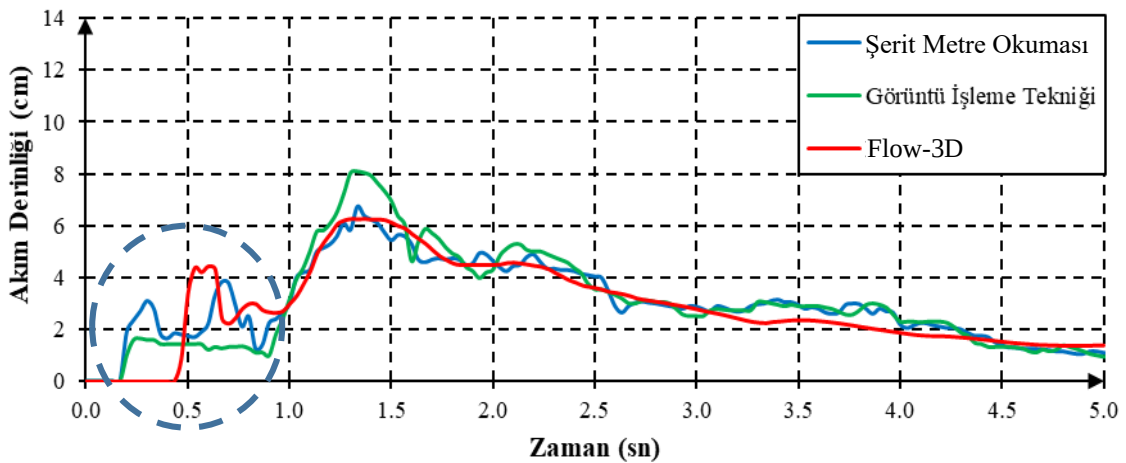
Şekil 4.39. Yapısal ortam ve gözenekli-gözeneksiz yapılar olması durumu için deneysel görüntülerden elde edilen su yüzü profilleri ve dalga önü konumları a) ortam/yapı yok b) Tip YO-5.2 + Gözenekli Tip-III c) Tip YO-5.2 + Gözeneksiz Yapı d) Tip YO-5.2 + Eğri Yüzeyli Yapı ($t= 2.2$ sn)

4.2.2 Maksimum derinlik

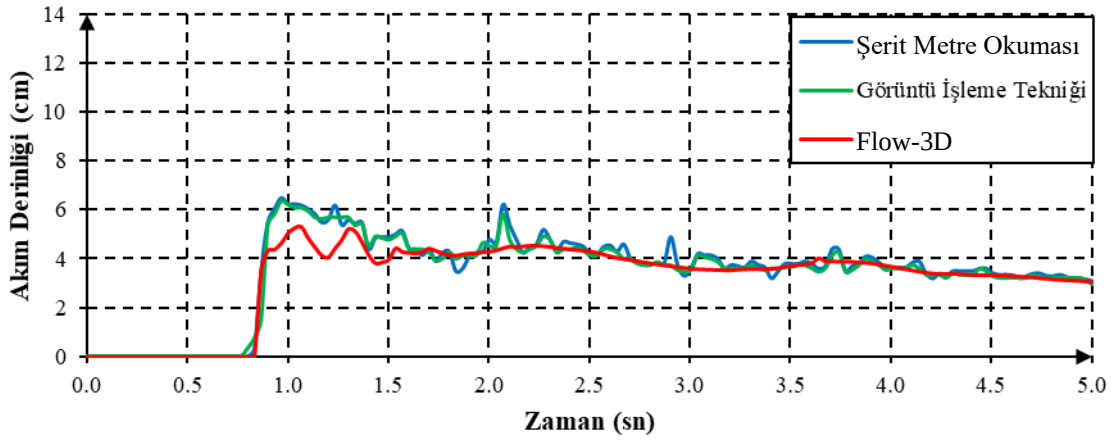
Yapısal önlemler ve model-yapı etrafında meydana gelen maksimumderinlikler gerek yapısal önlemlerin gerekse de taşkın korunacak bölgelerin membaındaki taşkın bölgesini genişleteceğinden taşkın boyutları üzerinde önemli bir yere sahiptir. Yapısal önlemlerin memba ve mansapları ile model-yapının hemen membaında oluşan maksimum derinlikleri en aza indirgeyen yapısal önlemin bu anlamda iyi bir performans sergilediği düşünülmüş ve gerekli karşılaştırmalar bu durum göz önüne alınarak yapılmıştır.

Kanal içerisinde yapısal ortamlar olması durumu

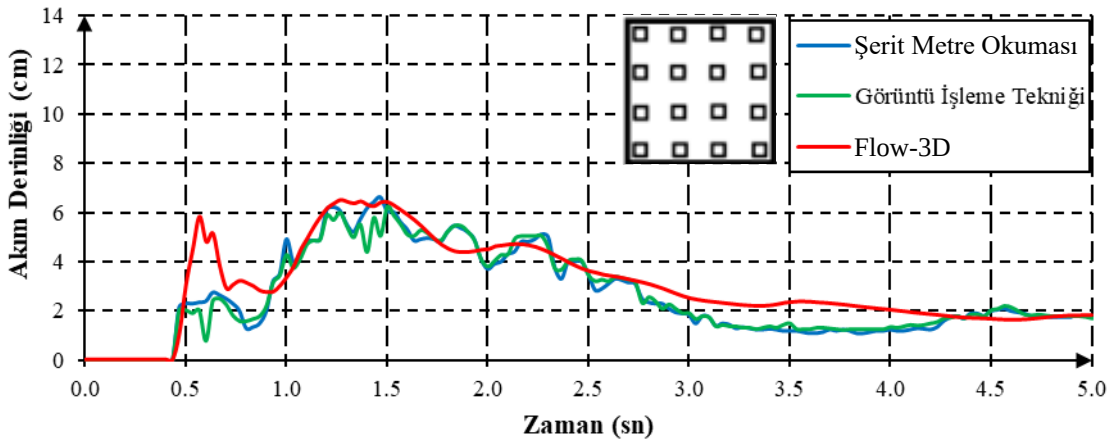
Kuru mansap yatağı ve 25 cm başlangıç rezervuar su seviyesi için Kanal-1 üzerinde yürütülen deneylerde akım derinliğinin zamanla değişimi, ilgili yapısal ortamın hemen memba (rezervuar memba ucundan itibaren 146 cm) ve hemen mansabına (rezervuar memba ucundan itibaren 254 cm) yapıştırılan şerit metre okumaları, görüntü işleme tekniği ve sayısal model sonuçları kullanılarak elde edilmiştir. Akım derinliğinin zamanla değişimini gösteren grafikler Şekil 4.40 – Şekil 4.57’de verilmektedir. Çizelge 4.25’te ise şerit metre okuma sonuçları baz alınarak hesaplanan % ortalama bağıl fark değerleri sunulmaktadır.



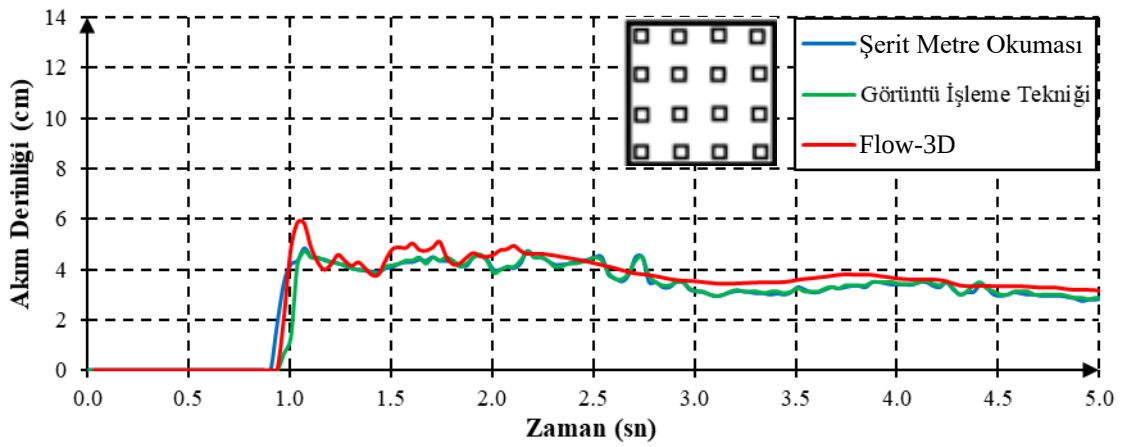
Şekil 4.40. Kanal mansabında yapısal ortam olmaması durumunda rezervuardan itibaren 146 cm’de ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi



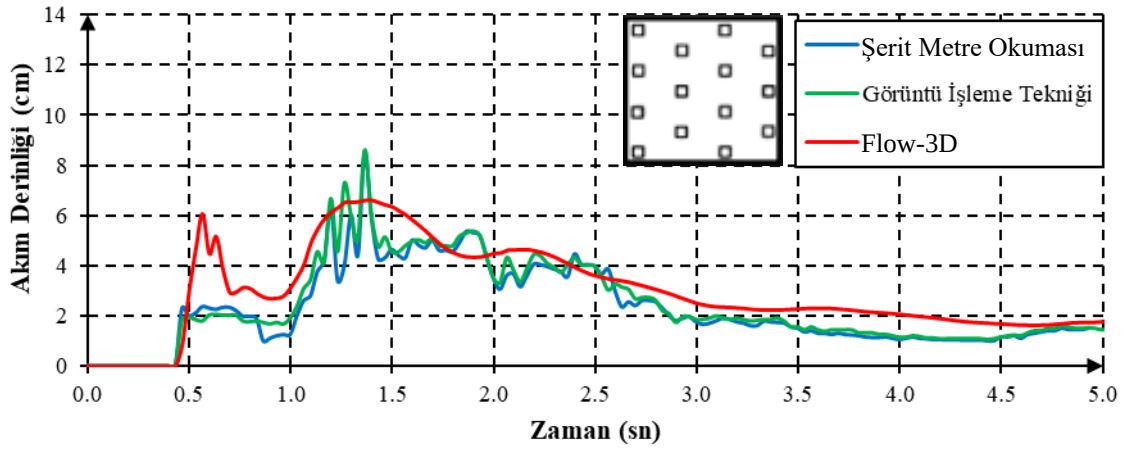
Şekil 4.41. Kanal mansabında yapısal ortam olmaması durumunda rezervuardan itibaren 254 cm’de ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi



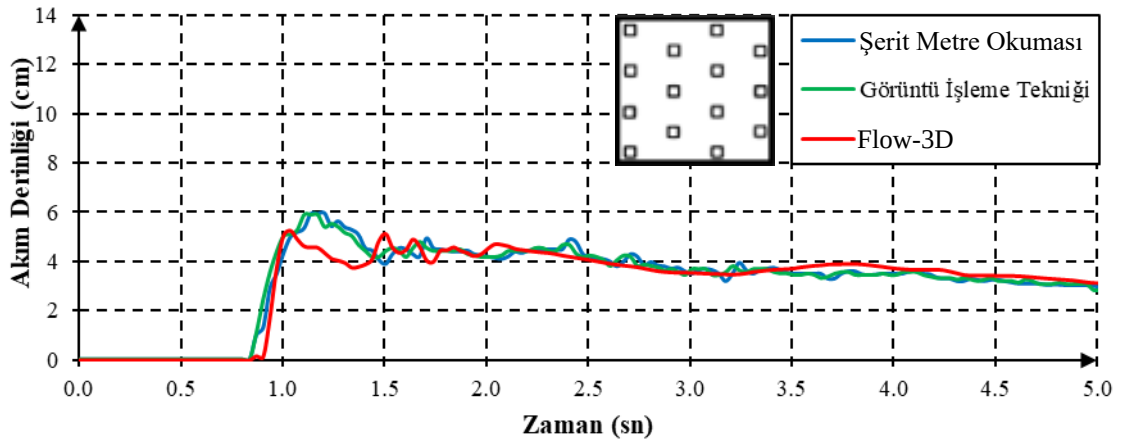
Şekil 4.42. Tip YO-1.1 için yapısal ortamın membainda ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi



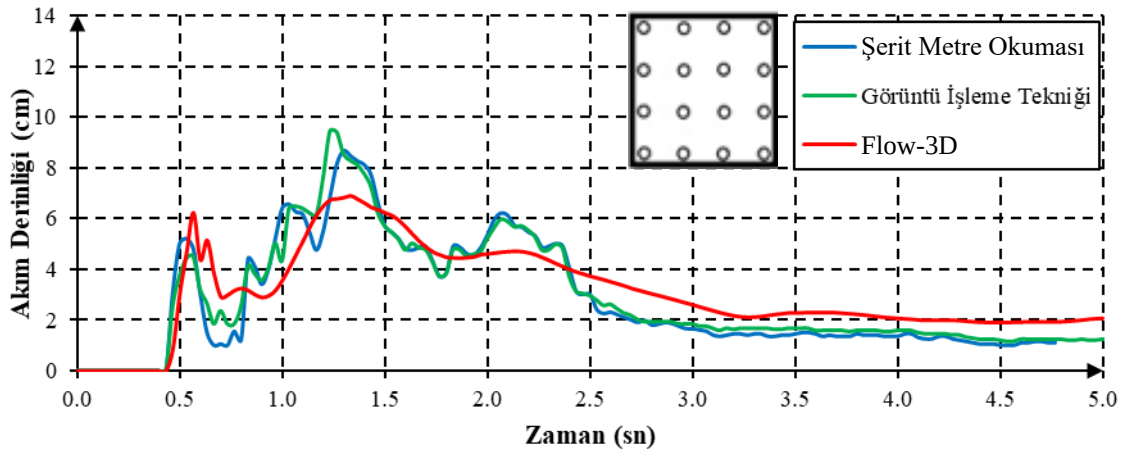
Şekil 4.43. Tip YO-1.1 için yapısal ortamın mansabında ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi



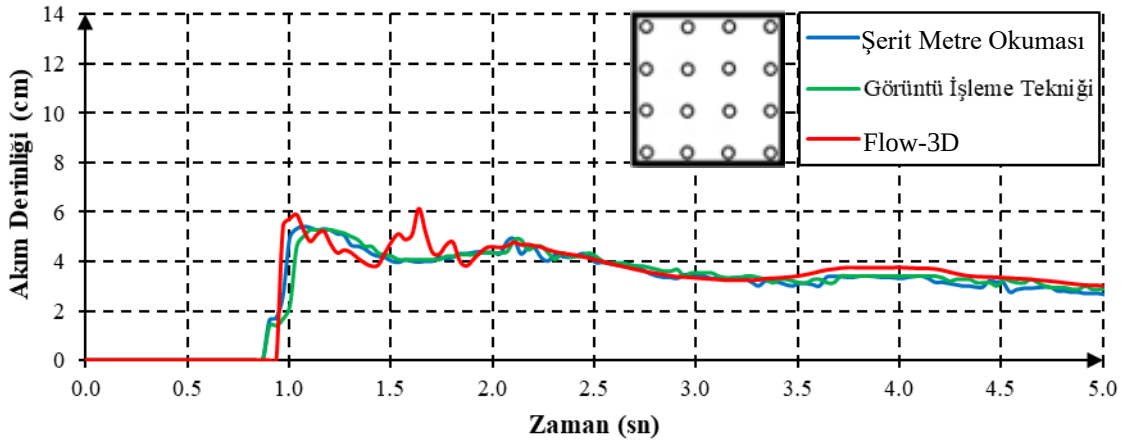
Şekil 4.44. Tip YO-1.2 için yapısal ortamın membaında ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi



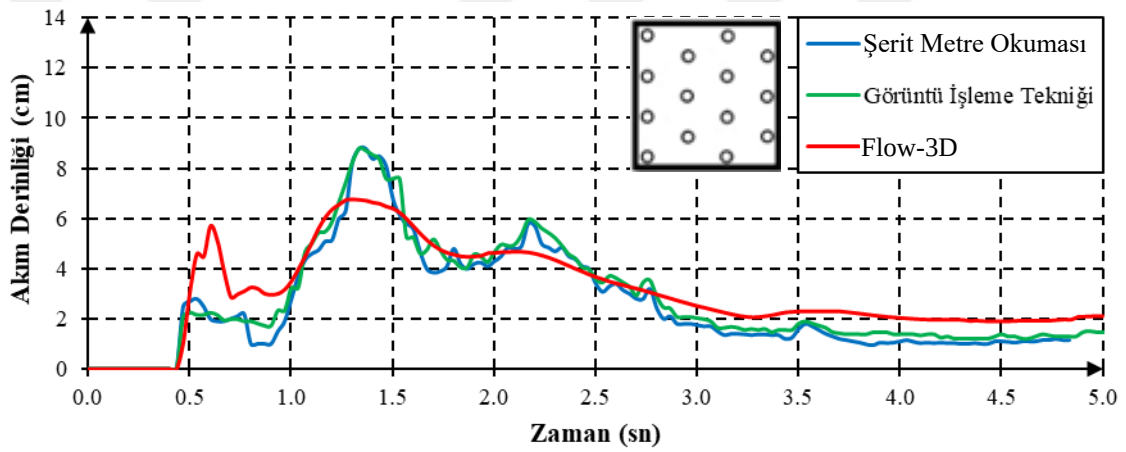
Şekil 4.45. Tip YO-1.2 için yapısal ortamın mansabında ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi



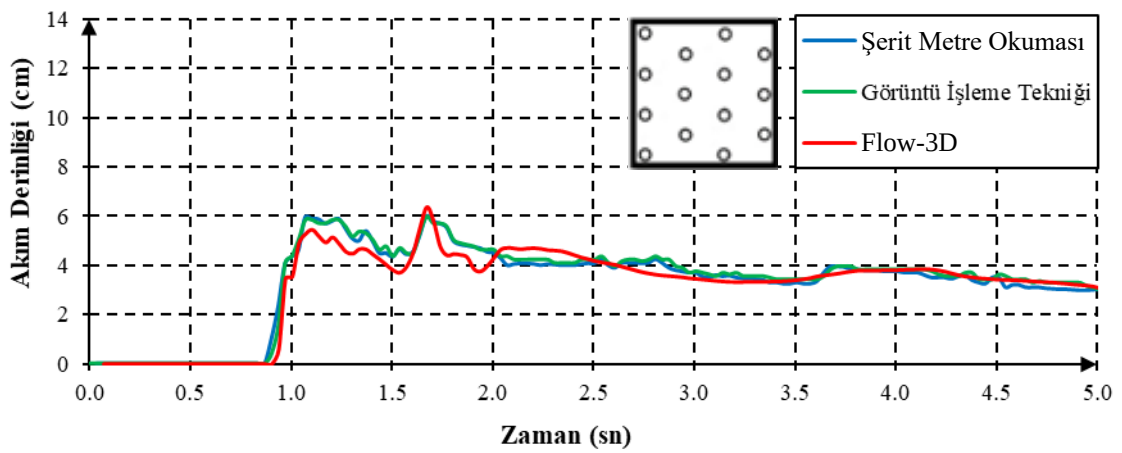
Şekil 4.46. Tip YO-2.1 için yapısal ortamın membaında ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi



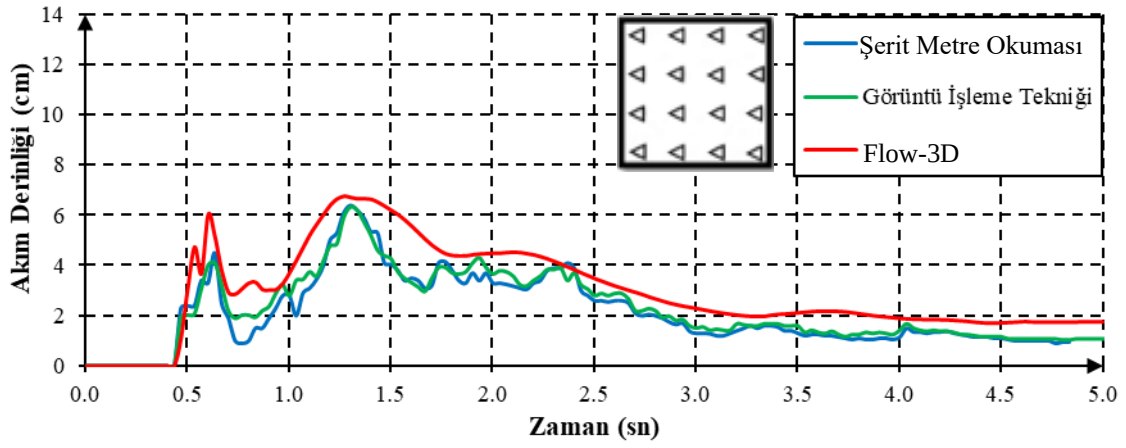
Şekil 4.47. Tip YO-2.1 için yapısal ortamın mansabında ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi



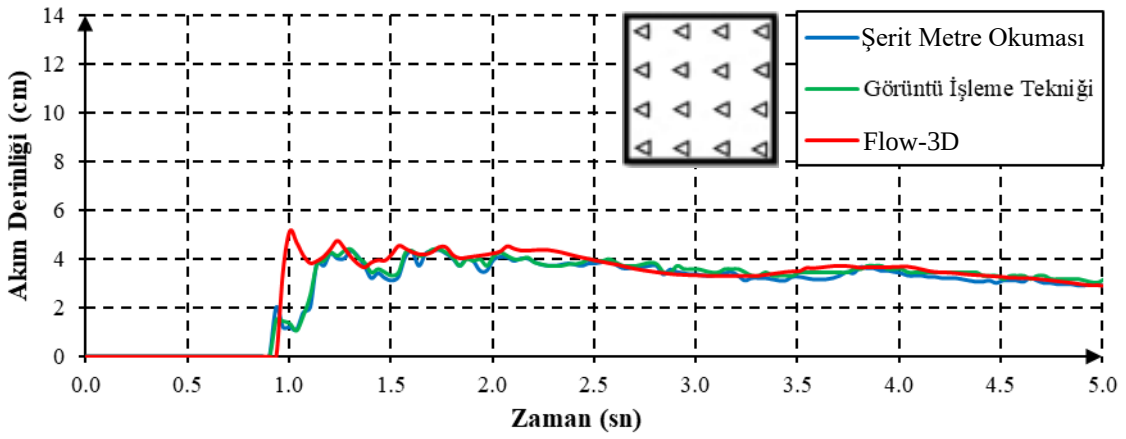
Şekil 4.48. Tip YO-2.2 için yapısal ortamın membainda ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi



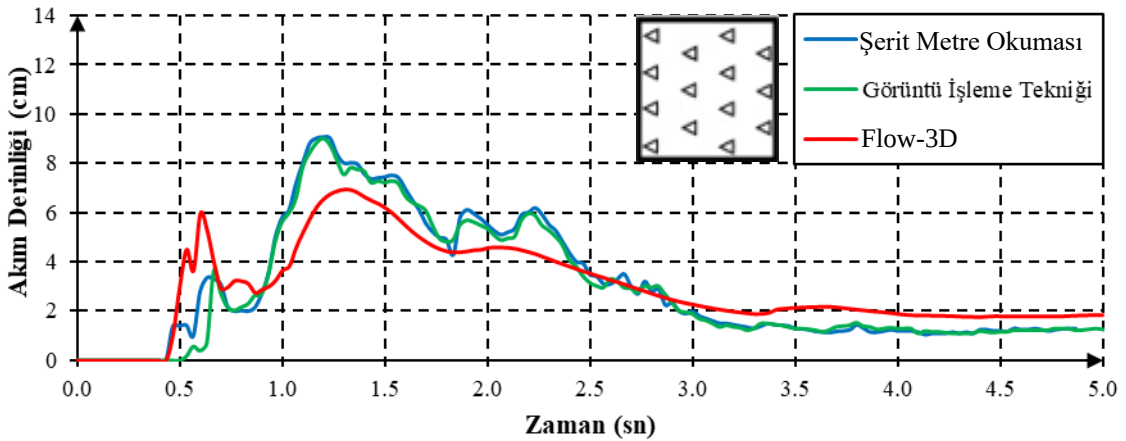
Şekil 4.49. Tip YO-2.2 için yapısal ortamın mansabında ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi



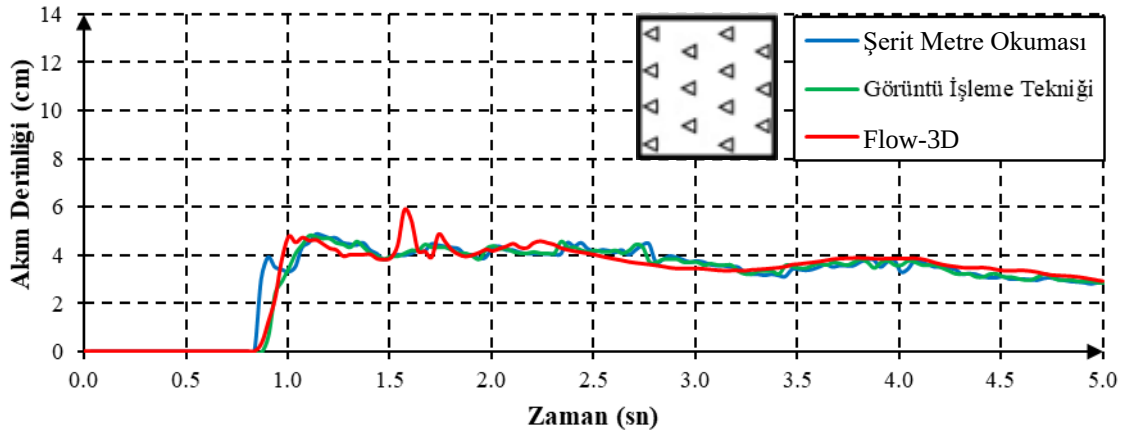
Şekil 4.50. Tip YO-3.1 için yapısal ortamın membaında ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi



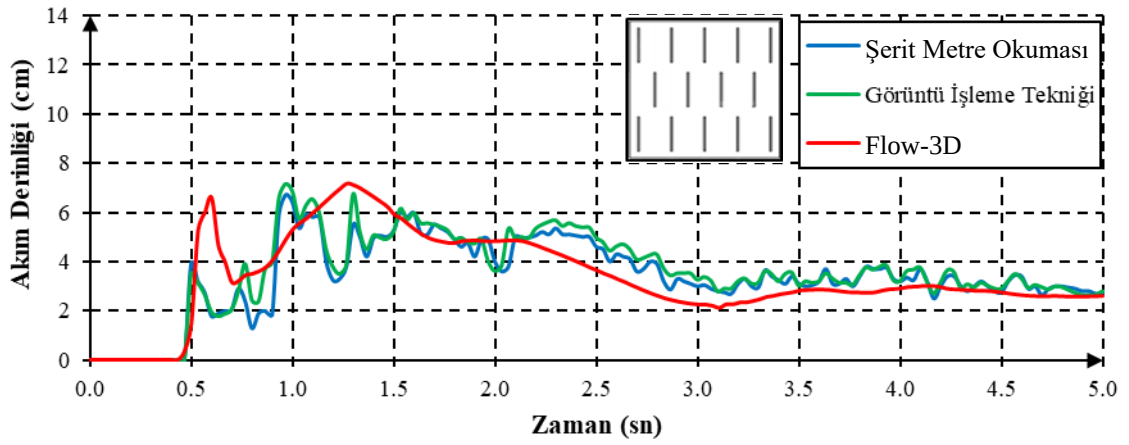
Şekil 4.51. Tip YO-3.1 için yapısal ortamın mansabında ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi



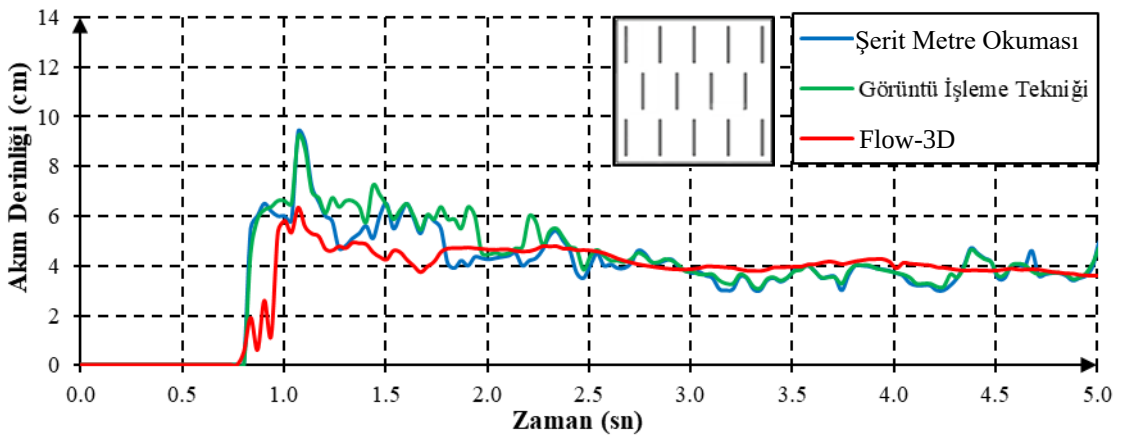
Şekil 4.52. Tip YO-3.2 için yapısal ortamın membaında ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi



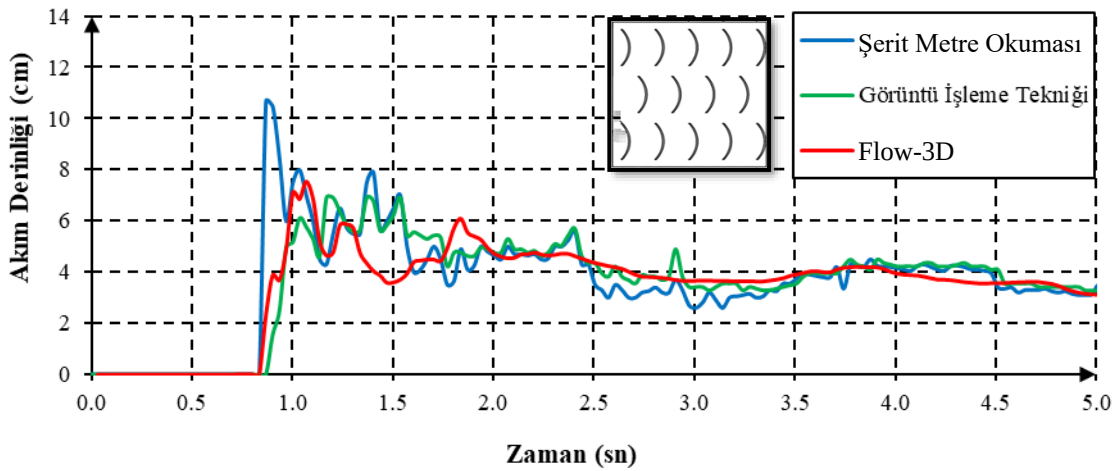
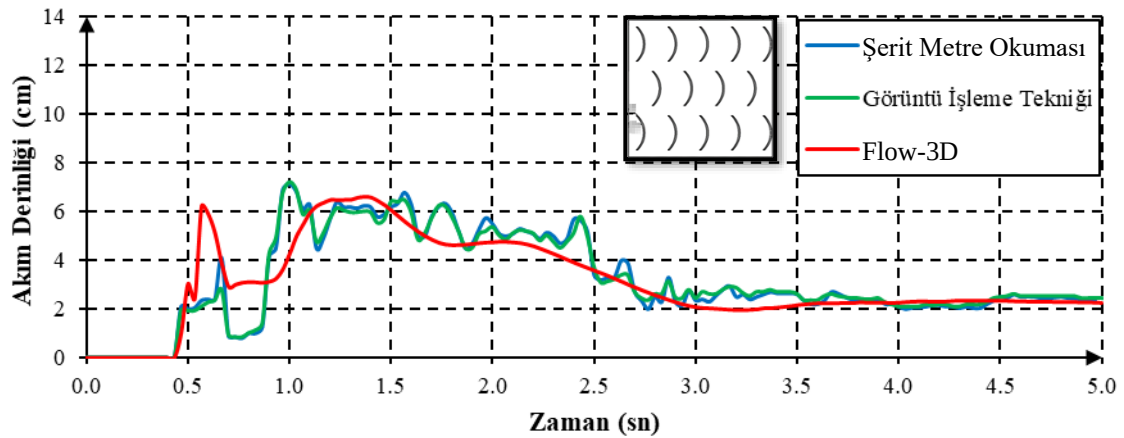
Şekil 4.53. Tip YO-3.2 için yapısal ortamın mansabında ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi



Şekil 4.54. Tip YO-4.2 için yapısal ortamın membainde ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi



Şekil 4.55. Tip YO-4.2 için yapısal ortamın mansabında ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi



Şekil 4.40 - Şekil 4.57 incelendiğinde şerit metre okuma sonuçlarının, görüntü işleme tekniği kullanılarak elde edilen sonuçlarla genel olarak uyumlu olduğu görülmektedir. Burada özellikle yapısal ortamların mansabında elde edilen akım derinliği-zaman grafiklerinin her iki yöntem sonucuna göre ortamların membaya nazaran daha uyumlu olduğu göze çarpmaktadır (Çizelge 4.25). İki yöntem arasında yapılan tekrarlanabilirlik analizi sonuçları da bunu desteklemektedir. Şerit metre okumaları ile görüntü işleme tekniği arasında hesaplanan tekrarlanabilirlik indeksi ortamların membada maksimum %4.30 ve minimum %0.15 olarak elde edilirken ortamların mansabında bu değerler maksimum %3.38 ve minimum %0.10 olarak elde edilmiştir. Bunun sebebinin mansapta akımın membaya nazaran tedrici olarak değişmesi ve membada kanal duvarına dalganın çarpması, tırmanması ve geri dönüşü nedeni ile ortamın daha kompleks bir hale gelmesinden kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

Bununla birlikte ilk çarpma anında görüntü işleme tekniği akım henüz duvara çarpmadan arkadaki suyun yayılımını gördüğünden olması gerekenden daha erken bir zamanda grafiği başlatmaktadır. Bu durum örnek olması açısından Şekil 4.40'ta daire içine alınmış ve olduğu gibi bırakılmıştır. Diğer durumlarda ise gerçekte böyle bir durum oluşmadığından grafikler zamansal olarak kaydırılarak yeniden düzenlenmiştir.

Flow-3D sonuçlarının ise şerit metre okumaları ve görüntü işleme tekniği sonuçlarına göre özellikle ortamların membaında farklılıklar gösterdiği fakat yine de genel eğilimi yakalayabildiği görülmüştür. Bununla birlikte programın yapısal ortamların mansabında, membasına nazaran şerit metre okumaları ve görüntü işleme tekniği sonuçlarına daha yakın değerler ürettiği tespit edilmiştir (Çizelge 4.25). Deneysel yöntemler ve Flow-3D sonuçları arasında yapılan tekrarlanabilirlik indeksi değerlerinin ise ortamların membaında maksimum %20.76 ve minimum %1.42, ortamların mansabında ise bu indeksi maksimum %4.79 ve minimum %0.81 olarak değiştiği tespit edilmiştir.

Çizelge 4.25. Farklı yapısal ortamlar tipleri için yüzde ortalama bağıl fark değerleri

Yapısal Ortam Tipi	Görüntü işleme Tekniği		Flow-3D	
	Ortam Membaı (1.46 m)	Ortam Mansabı (2.54 m)	Ortam Membaı (1.46 m)	Ortam Mansabı (2.54 m)
	% Ort. Bağıl Fark	% Ort. Bağıl Fark	% Ort. Bağıl Fark	% Ort. Bağıl Fark
Tip YO-0.0	13.69	5.23	19.65	8.35
Tip YO-1.1	10.76	4.18	33.87	11.04
Tip YO-1.2	11.68	4.30	48.40	9.66
Tip YO-2.1	16.07	5.23	45.87	11.46
Tip YO-2.2	18.01	4.20	57.35	11.17
Tip YO-3.1	15.47	5.48	51.67	16.81
Tip YO-3.2	14.44	4.91	40.25	9.60
Tip YO-4.2	8.69	7.03	26.42	15.46
Tip YO-5.2	5.45	11.79	26.43	14.60

Bununla birlikte farklı yapısal ortam tiplerinin memba ve mansabında 5.0 sn boyunca hem şerit metre okumaları hem de görüntü işleme tekniğiyle elde edilen maksimum akım derinlikleri (kabarma derinliği) Çizelge 4.26 ve Çizelge 4.27'de verilmektedir. Çizelge 4.26'da maksimum derinlik açısından neredeyse tüm ortamların Tip YO-0.0'a göre daha fazla akım derinliklerine neden olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni gelen akımın özgül enerjisinin ortamlardaki engellerden geçmeye yetememesi ve akımın bu engellerden geçmek için özgül enerjisini arttırarak kabarmaya neden olmasından kaynaklanmaktadır.

Tüm ortam tipleri membada oluşan maksimum derinlik açısından karşılaştırıldığında en iyi ortamın Tip YO-3.1 olduğu tespit edilmiştir. Bu ortam tipinde, Tip YO-0.0 baz alındığında şerit metre okumalarına göre maksimum derinliğin %5.19 oranında azaldığı belirlenmiştir.

Çizelge 4.26. Yapısal ortamların membada ölçülen maksimum derinlikler

Yapısal Ortam Tipi	Maksimum Derinlikler (cm)	
	Şerit Metre Okuması	Gör. İşl. Tekn.
Tip YO-0.0	6.75	8.08
Tip YO-1.1	6.60	6.21
Tip YO-1.2	8.50	8.63
Tip YO-2.1	8.65	9.47
Tip YO-2.2	8.80	8.77
Tip YO-3.1	6.40	6.33
Tip YO-3.2	9.05	9.01
Tip YO-4.2	6.70	7.14
Tip YO-5.2	7.15	7.23

Çizelge 4.27 ise yapısal ortamların mansabında oluşan maksimum derinlikleri göstermektedir. Çizelge 4.27 incelendiğinde Tip YO-5.2 ve Tip-YO 4.2 dışındaki diğer yapısal ortamlarda maksimum derinliklerin azaldığı net bir şekilde görülmektedir. Burada yapılan karşılaştırmada Tip YO-3.1'in maksimum derinlik bakımından yapısal ortamlar arasında en iyi performansa sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu ortamda maksimum derinliğin Tip YO-0.0'a göre yapılan kıyaslamada, şerit metre okumalarına göre %33.08 görüntü işleme tekniği sonuçlarına göre %30.60 oranında azaldığı belirlenmiştir.

Çizelge 4.27. Yapısal ortamların mansabında ölçülen maksimum derinlikler

Yapısal Ortam Tipi	Maksimum Derinlikler (cm)	
	Şerit Metre Okuması	Gör. İşl. Tekn.
Tip YO-0.0	6.50	6.34
Tip YO-1.1	4.85	4.73
Tip YO-1.2	5.98	5.90
Tip YO-2.1	5.40	5.29
Tip YO-2.2	6.00	5.98
Tip YO-3.1	4.35	4.40
Tip YO-3.2	4.85	4.82
Tip YO-4.2	9.40	9.18
Tip YO-5.2	10.7	6.90

Ayrıca şerit metre okuma sonuçlarıyla görüntü işleme tekniği sonuçlarının da birbirine yakın olduğu Çizelge 4.26 ve Çizelge 4.27’den görülmektedir. Şerit metre okuma sonuçları baz alınarak yapılan karşılaştırmada yapısal ortamların membaında maksimum derinlikler açısından en fazla %9.5 ve en az % 0.3 bağıl fark hesaplanmıştır. Benzer şekilde yapısal ortamların mansabında yapılan karşılaştırmada ise maksimum derinlikler açısından en fazla %35.5 ve en az % 0.3 bağıl fark olduğu hesaplanmıştır. Burada görülen %35.5 bağıl fark Tip YO-5.2’nin mansabında görülmüş olup görüntü işleme tekniğinin burada ani değişim gösteren akım derinliğini yakalayamamasından kaynaklanmaktadır.

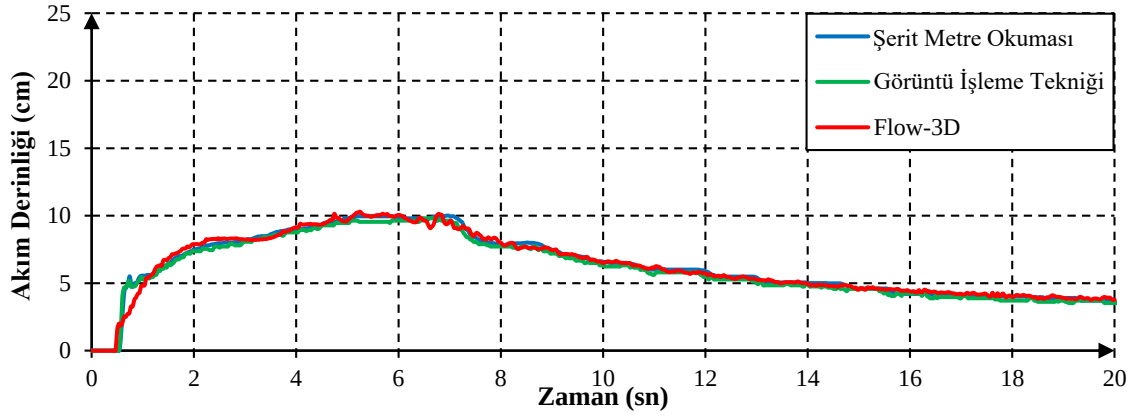
Yapısal ortamlardan geçen şok dalgasının taşkın koruma bölgesindeki yapıları temsil eden model-yapının membaında oluşturduğu maksimum derinlikler ise Çizelge 4.28’de görülmektedir. Çizelge 4.28 incelendiğinde H15 başlangıç rezervuar su seviyesi hariç yapısal ortamların model-yapı membaındaki maksimum derinlikleri az da olsa azalttığı tespit edilmiştir. Bu ortamların Tip YO-0.0’a göre maksimum derinlikleri en fazla %14.83 ve en az %0.16 oranında azalttığı belirlenmiş olup ortamlar arasındaki maksimum derinliklerin birbirine oldukça yakın olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.28. Yapısal ortamlar kullanılması durumunda model-yapının hemen membaında oluşan maksimum derinlikler

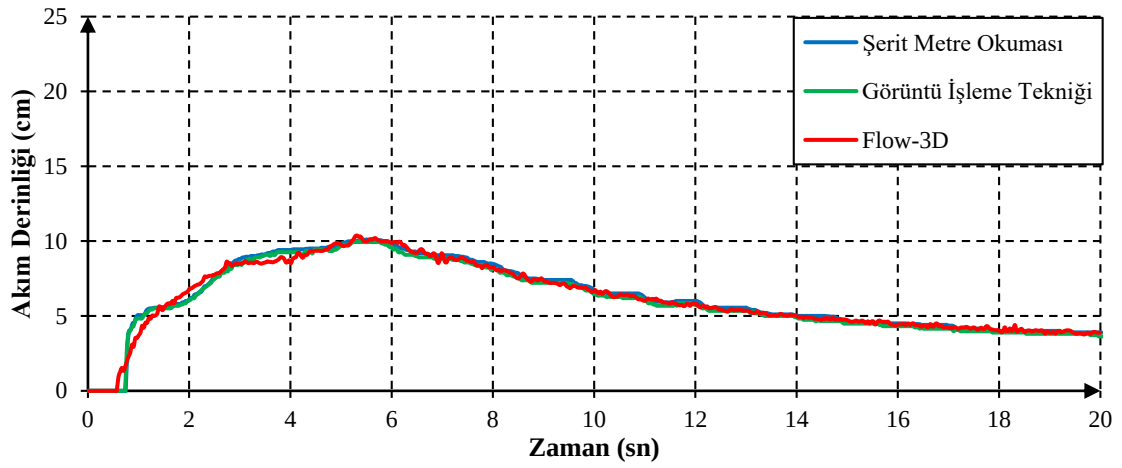
Yapı Tipi	Maksimum Derinlikler (cm)			
	H10	H15	H20	H25
Tip YO-0.0	6.18	9.03	12.32	15.71
Tip YO-1.1	5.95	9.14	11.89	14.39
Tip YO-1.2	5.60	8.77	11.79	13.79
Tip YO-2.1	5.92	9.25	12.04	14.37
Tip YO-2.2	5.93	8.83	11.89	14.13
Tip YO-3.1	5.94	9.38	11.90	14.57
Tip YO-3.2	5.84	9.30	11.31	13.76
Tip YO-4.2	6.00	9.56	12.30	13.69
Tip YO-5.2	5.61	9.60	12.04	13.38

Kanal içerisinde gözenekli ve gözeneksiz yapılar olması durumu

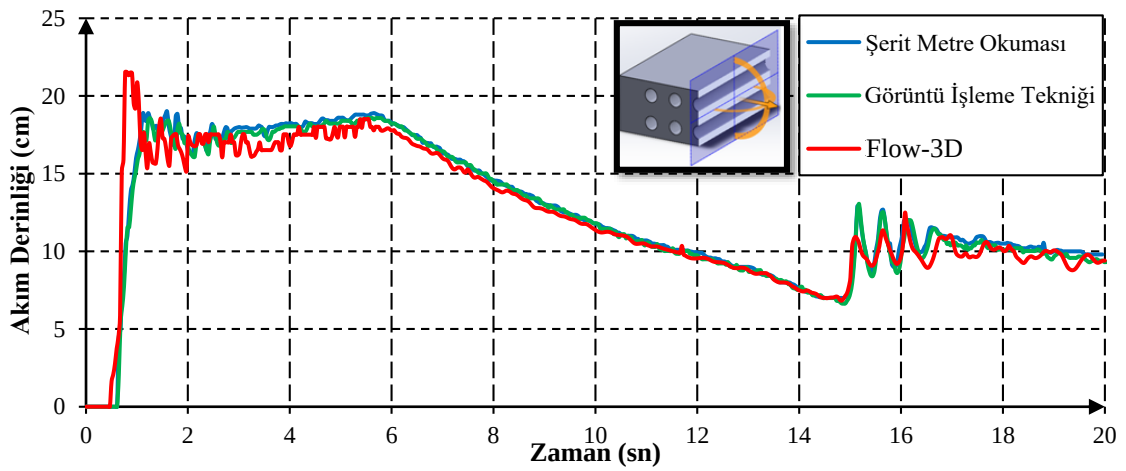
Kuru mansap yatağı ve 25 cm başlangıç rezervuar su seviyesi için Kanal-2 üzerinde yürütülen deneylerde akım derinliğinin zamanla değişimi, ilgili yapı tipinin memba (105 cm) ve mansabına (133 cm) yapıştırılan şerit metre okumaları, görüntü işleme tekniği ve sayısal model sonuçları kullanılarak elde edilmiştir. (Şekil 4.58- Şekil 4.69).



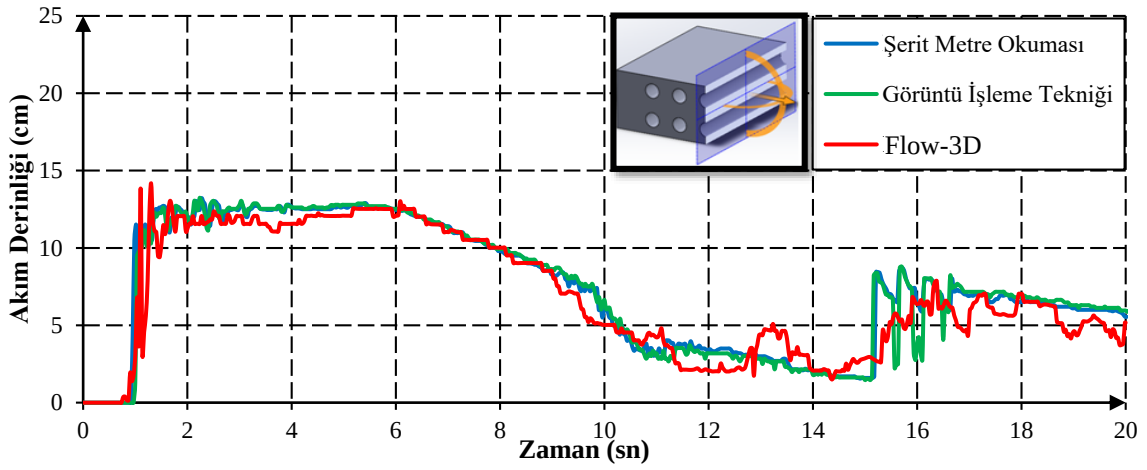
Şekil 4.58. Herhangi bir yapı yokken kapaktan itibaren 105 cm’de ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi



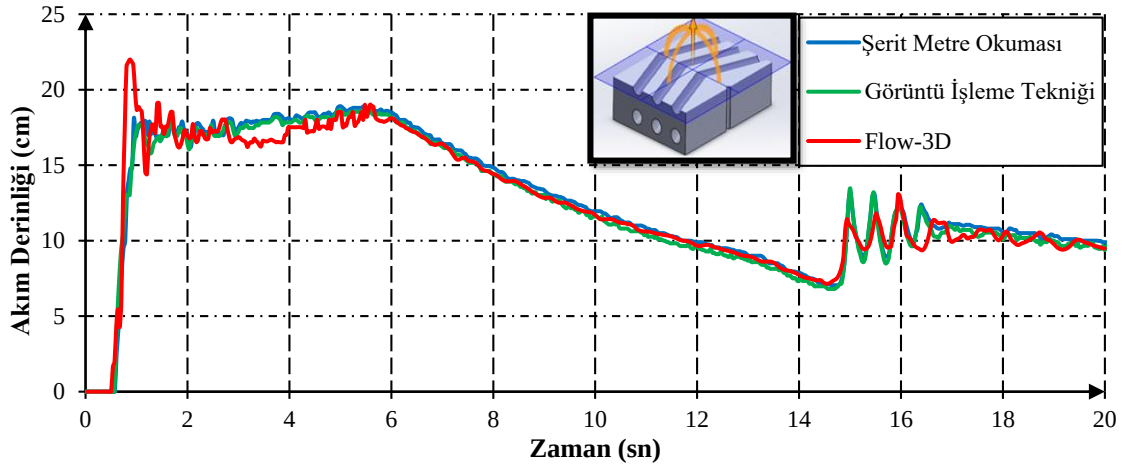
Şekil 4.59. Herhangi bir yapı yokken kapaktan itibaren 133 cm’de ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi



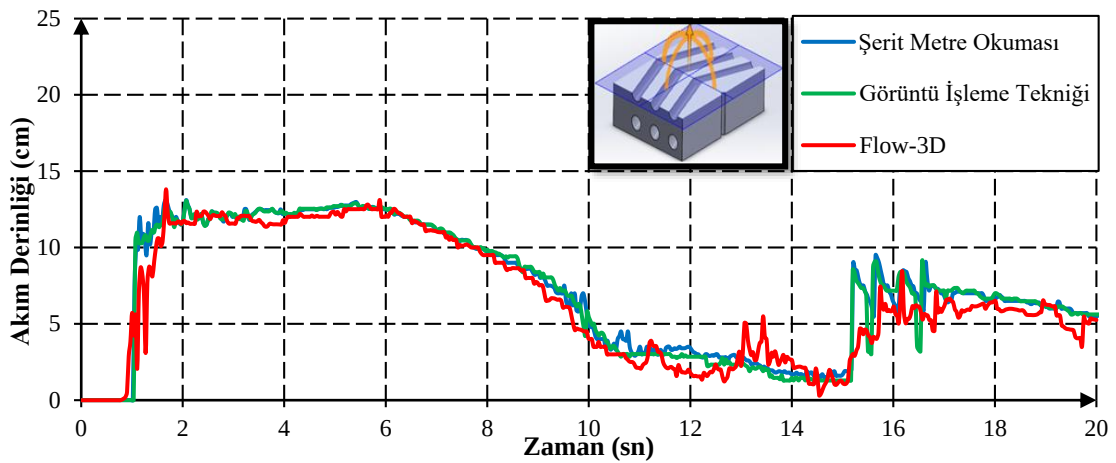
Şekil 4.60. Gözenekli Tip-I için yapının membranında ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi



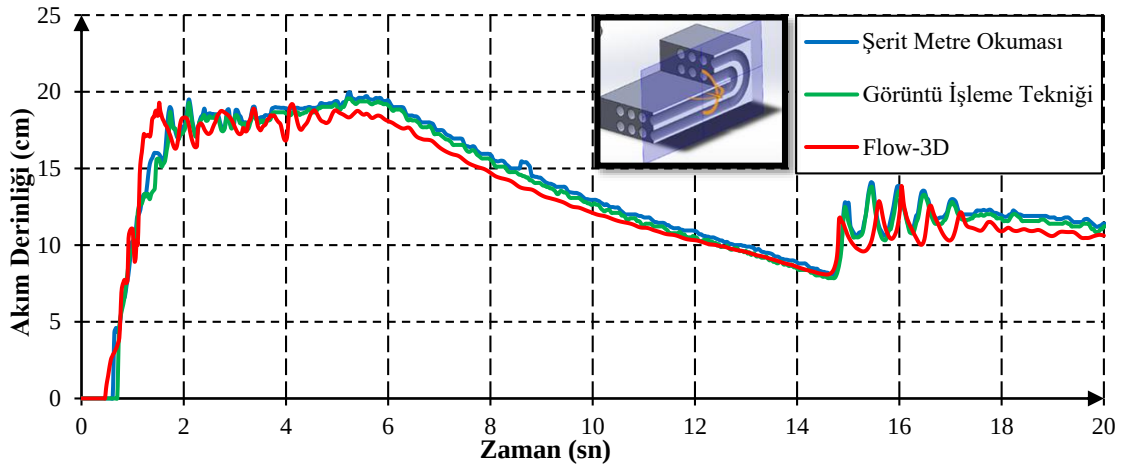
Şekil 4.61. Gözenekli Tip-I için yapının mansabında ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi



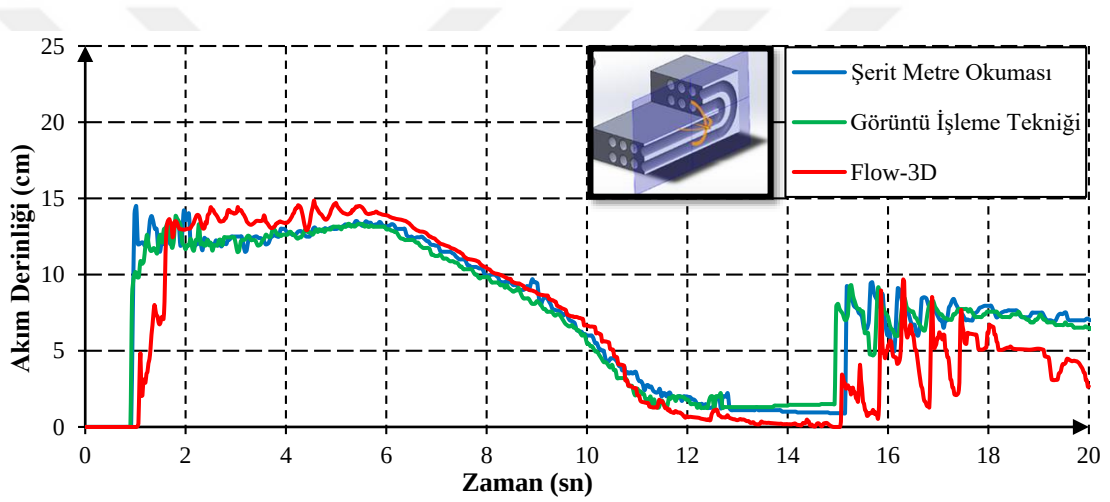
Şekil 4.62. Gözenekli Tip-II için yapının membaında ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi



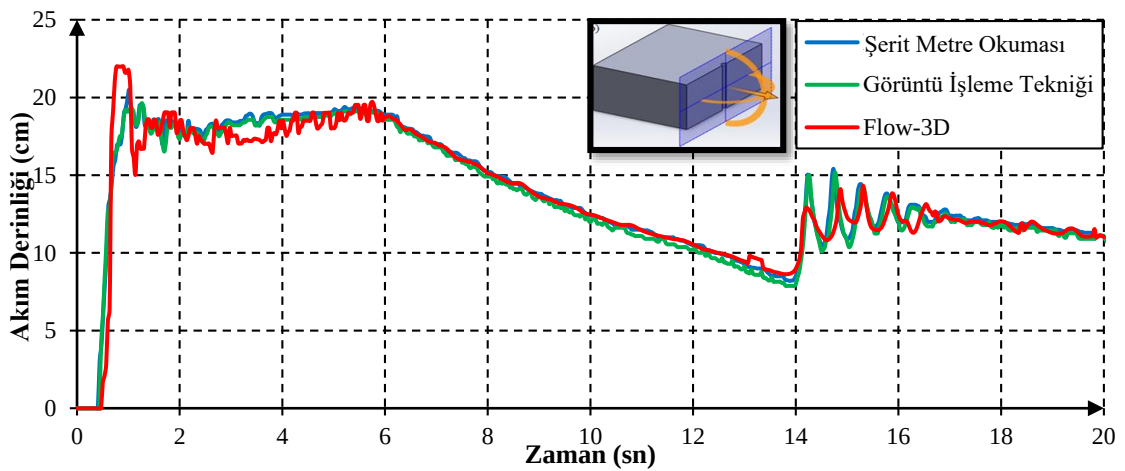
Şekil 4.63. Gözenekli Tip-II için yapının mansabında ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi



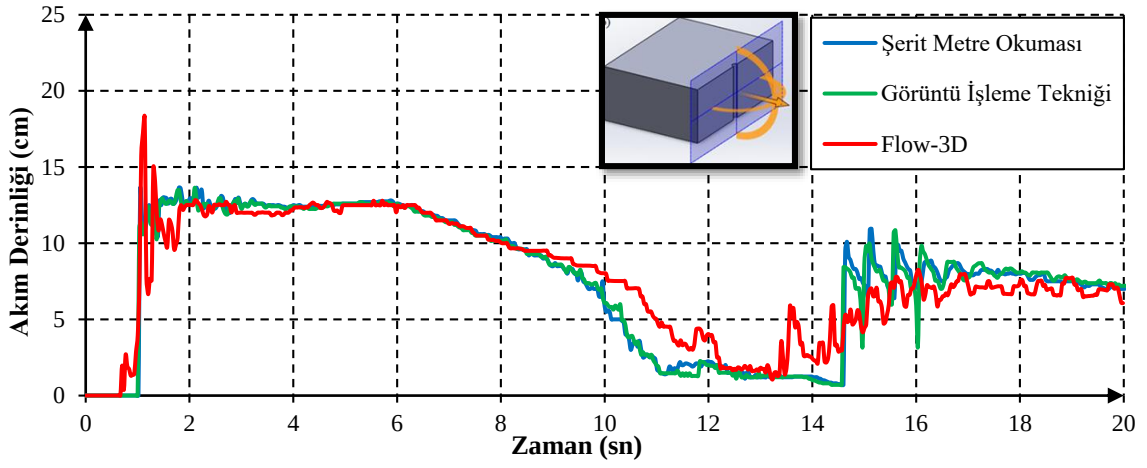
Şekil 4.64. Gözenekli Tip-III için yapının membaında ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi



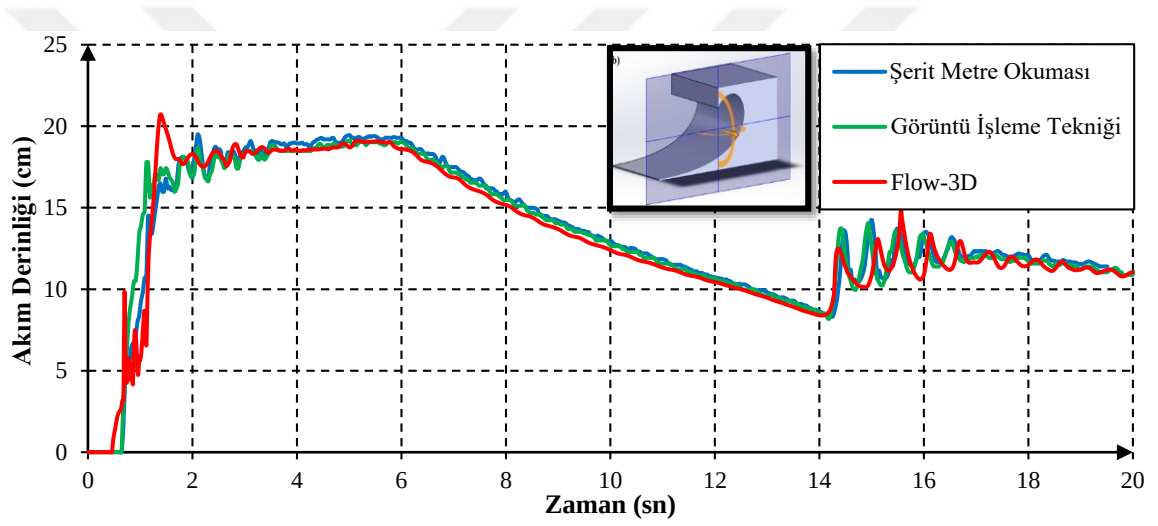
Şekil 4.65. Gözenekli Tip-III için yapının mansabında ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi



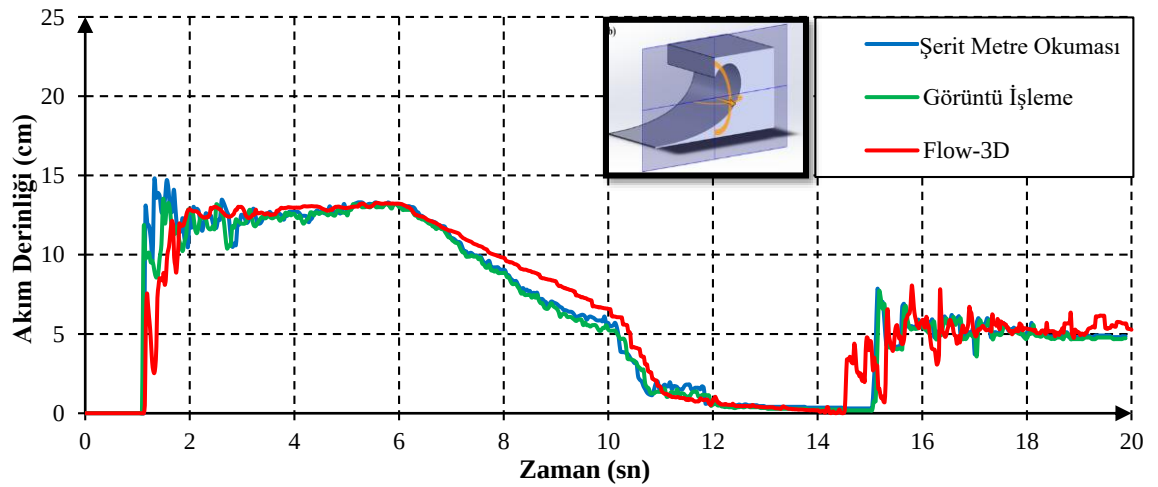
Şekil 4.66. Gözeneksiz Yapı için yapının membaında ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi



Şekil 4.67. Gözeneksiz Yapı için yapının mansabında ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi



Şekil 4.68. Eğri Yüzeyli Yapı için yapının membaında ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi



Şekil 4.69. Eğri Yüzeyli Yapı için yapının mansabında ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi

Şekil 4.58 - Şekil 4.69 incelendiğinde kanalda herhangi bir yapı olmaması durumu ile gözenekli ve gözeneksiz yapıların memba ve mansabında görüntü işleme tekniği ve şerit metre okumalarıyla elde edilen akım derinliğinin zamanla değişiminin birbiriyle oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. İki yöntemden elde edilen sonuçlar arasında uygulanan tekrarlanabilirlik indeksi membada maksimum %2.33 ve minimum %0.42 olarak hesaplanmıştır. Mansapta ise bu indeks maksimum %2.14 ve minimum %0.33 olarak elde edilmiştir. Bununla birlikte görüntü işleme tekniği ile şerit metre okumaları arasında şerit metre okuma sonuçları baz alınarak hesaplanan yüzde ortalama bağıl fark değeri yapının membada maksimum %4.03 mansabında ise maksimum %10.73 olarak tespit edilmiştir. (Çizelge 4.29). Ayrıca Flow-3D sonuçlarının yapıların membada şerit metre okumalarına yakın sonuçlar verdiği (maksimum ortalama bağıl fark %6.95) yapıların mansabında ise özellikle ortalama 10. sn'den sonra şerit metre okuma sonuçlarıyla belirgin tutarsızlıklar olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebinin Flow-3D programının akımda kopmaların süreksizliklerin olduğu rezervuardan yansıyıp gelen ve yapı üzerinden ikinci defa aşan dalgayı tam olarak tarif edememesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Deneysel yöntemler ve Flow-3D sonuçları arasında uygulanan tekrarlanabilirlik indeksi ise membada maksimum %2.48 ve minimum %1.0, mansapta ise maksimum %6.29 ve minimum %0.84 olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.29. Gözeneksiz ve gözenekli yapılar için yüzde ortalama bağıl fark değerleri

Yapı Tipi	Görüntü işleme Tekniği		Flow-3D	
	Yapı Membaı (1.05 m)	Yapı Mansabı (1.33 m)	Yapı Membaı (1.05 m)	Yapı Mansabı (1.33 m)
	% Ort. Bağıl Fark	% Ort. Bağıl Fark	% Ort. Bağıl Fark	% Ort. Bağıl Fark
Boş Kanal	2.92	2.40	3.66	2.97
Gözenekli Yapı Tip-I	3.63	8.70	5.54	17.36
Gözenekli Yapı Tip-II	4.03	9.98	5.08	17.06
Gözenekli Yapı Tip-III	3.95	10.73	6.95	31.52
Gözeneksiz Yapı	3.75	8.27	5.02	35.34
Eğri Yüzeyli Yapı	3.67	10.25	4.98	45.98

Çizelge 4.30 kanalda farklı yapı tipleri olması durumunda yapıların hemen memba ve mansabında oluşan maksimum derinlikleri göstermektedir. Çizelge 4.30 incelendiğinde tüm yapı tiplerinin hem membada hem de mansabında boş kanala göre maksimum

derinliğin arttığı görülmektedir. Boş kanal baz alınarak yapılan karşılaştırmada Gözenekli Tip-II'nin memba ve mansabında oluşan maksimum derinliklerin diğer yapı tiplerine göre daha az olduğu tespit edilmiştir. Bu yapı tipinin boş kanal baz alındığında şerit metre okuma sonuçlarına göre membada %89.00 mansapta ise %29.32 oranında maksimum derinlikte artışa neden olduğu hesaplanmıştır. Ayrıca maksimum derinliğin en fazla olduğu yapı tiplerinin membada Gözeneksiz Yapı (%105), mansapta ise Eğri Yüzeyli Yapı (%45.11) olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.30. Yapıların memba ve mansabında oluşan maksimum derinlikler

Yapı Tipi	Maksimum Derinlikler (cm)			
	Yapı Membaı		Yapı Mansabı	
	Şerit Metre Okuması	Gör. İşl. Tekn.	Şerit Metre Okuması	Gör. İşl. Tekn.
Boş Kanal	10.00	9.80	10.13	9.94
Gözenekli Yapı Tip-I	19.00	18.57	13.20	13.22
Gözenekli Yapı Tip-II	18.90	18.62	13.10	13.05
Gözenekli Yapı Tip-III	19.97	19.55	14.50	13.84
Gözeneksiz Yapı	20.50	19.64	13.65	13.64
Eğri Yüzeyli Yapı	19.50	19.11	14.70	13.52

Model-yapının hemen membaında oluşan maksimum derinlikler ise Çizelge 4.31'de verilmiştir. Çizelge 4.31 incelendiğinde tüm yapı tiplerinin model-yapının membaında oluşan maksimum derinliklerde azalmalara neden olduğu görülmektedir. Buradaki azalma miktarları göz önüne alınarak boş kanala göre yapılan karşılaştırmalarda maksimum ve minimum azalma miktarları sırasıyla %42.34 ve %8.41 olarak hesaplanmıştır. Yine boş kanal baz alınarak yapı tipleri kendi arasında karşılaştırıldığında ise H15 başlangıç rezervuar su seviyesinde Eğri Yüzeyli Yapının, H20 ve H25 başlangıç rezervuar su seviyelerinde ise Gözenekli Tip-II'nin daha etkili olduğu görülmektedir. Eğri Yüzeyli Yapı'nın H15 rezervuar su seviyesinde maksimum derinliği %42.64 oranında azalttığı Gözenekli Tip-II'nin ise H20 ve H25 rezervuar su seviyelerinde maksimum derinliği sırasıyla %15.63 ve % 19.52 oranında azalttığı tespit edilmiştir.

Çizelge 4.31. Gözenekli/gözeneksiz yapılar kullanılması durumunda model-yapının hemen membaında oluşan maksimum derinlikler

Yapı Tipi	Maksimum Derinlikler (cm)		
	H15	H20	H25
Boş Kanal	11.29	14.78	17.47
Gözenekli Yapı Tip-I	8.61	12.54	15.28
Gözenekli Yapı Tip-II	8.83	12.47	14.06
Gözenekli Yapı Tip-III	6.93	13.39	16.00
Gözeneksiz Yapı	6.86	12.75	15.50
Eğri Yüzeyli Yapı	6.51	13.06	15.55

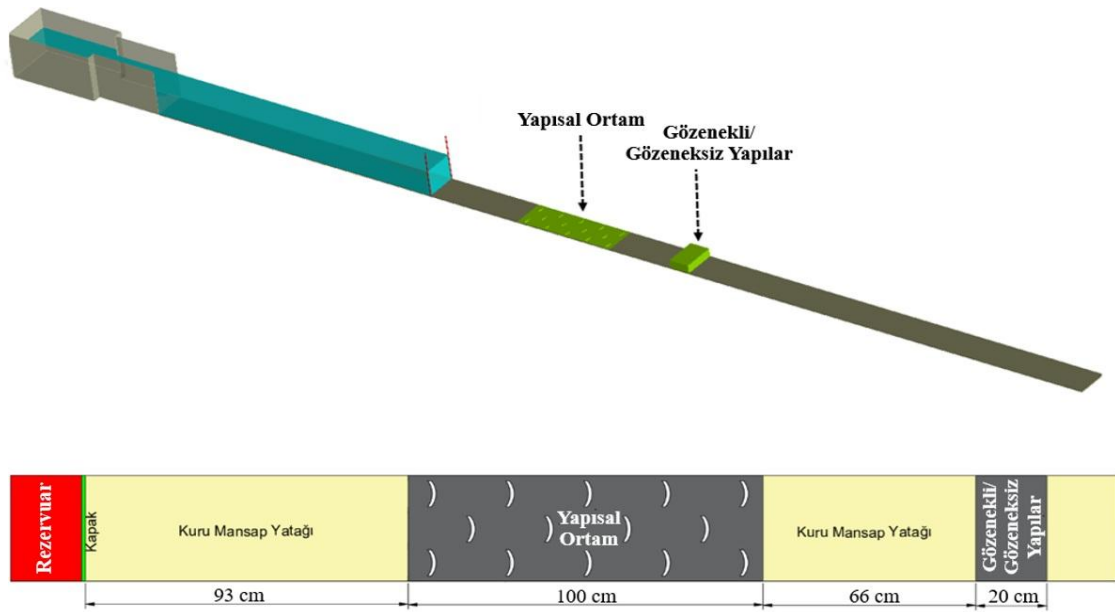
Kanal içerisinde yapısal ortam ve gözenekli/gözeneksiz yapıların birlikte olması durumu

Kanal-2 üzerinde yürütülen deneylerde kanal mansabında Şekil 4.70’te gösterildiği gibi yapısal ortam ve gözenekli/gözeneksiz yapıların birlikte kullanılması durumu incelenmiştir. Burada yapılan tüm deneyler 25 cm başlangıç rezervuar su seviyesinde yürütülmüş ve ortam ve yapıların memba/mansabındaki akım derinliği değişimleri elde edilmiştir. (Şekil 4.71 - Şekil 4.82). Burada kullanılan yapısal ortam daha önce de belirtildiği üzere şok dalgasını daha fazla geciktirmesinden dolayı Tip YO-5.2 olarak tercih edilmiş ve bu ortamın yine en fazla geciktirmeyi sağlayan Eğri Yüzeyli Yapı, Gözeneksiz Yapı ve Gözenekli Tip-III ile birlikte kullanımı üzerine araştırmalar yapılmıştır.

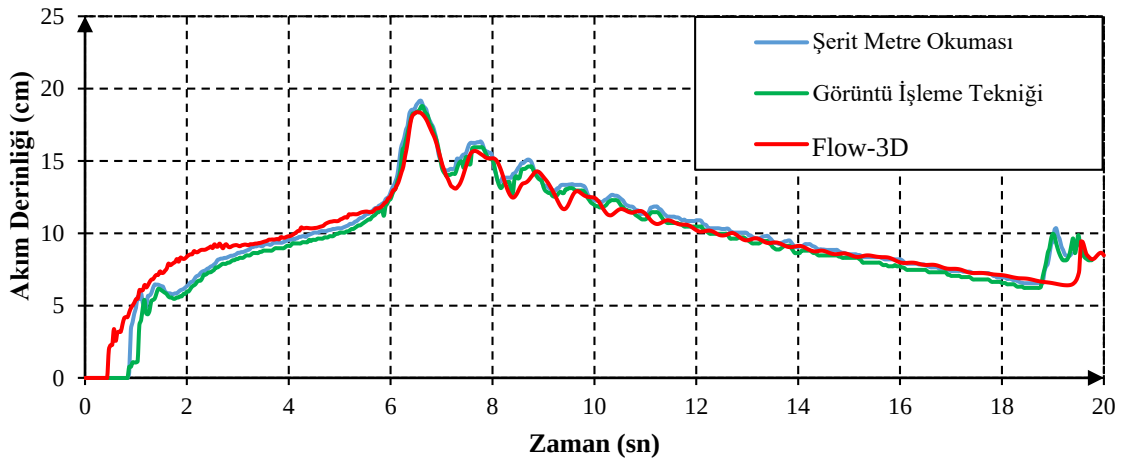
Çizelge 4.32 ortam ve yapıların memba ve mansabındaki maksimum derinlikleri göstermektedir. Çizelge 4.32 incelendiğinde tüm kombinasyonların ortam ve yapılara ait memba ve mansabında maksimum derinliklerin arttığı net olarak görülmektedir. Boş kanala göre yapılan karşılaştırmada ortam memba ve mansaplarında Tip YO-5.2 ve Gözeneksiz Yapı kombinasyonunun, yapı memba ve mansaplarında ise Tip YO-5.2 ve Eğri Yüzeyli Yapı kombinasyonunun daha fazla maksimum derinliğe neden olduğu tespit edilmiştir. En az maksimum derinlik ise ortam ve yapıların membaları ile ortam mansaplarında Tip YO-5.2 ve Gözenekli Tip-III kombinasyonunda (ortam membaında maksimum %98, yapı membaında maksimum %113.48 ve ortam mansabında maksimum %103.19), yapıların mansabında ise Tip YO-5.2 ve Gözeneksiz Yapı kombinasyonunda (maksimum %51.16) meydana geldiği görülmüştür.

Çizelge 4.32. Ortam ve yapıların memba ve mansabında oluşan maksimum derinlikler

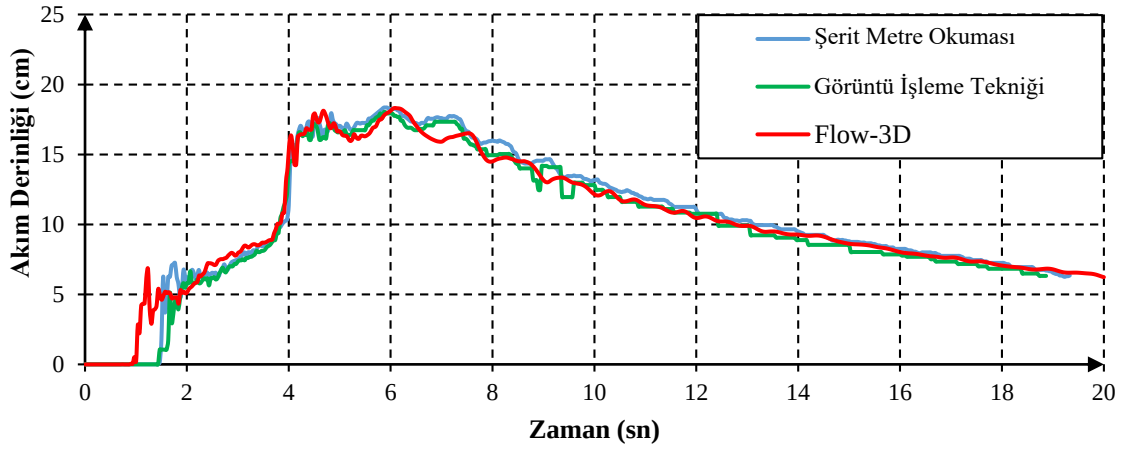
Ortam ve Yapı Tipi	Maksimum Derinlikler (cm)			
	Ortam Membaı (91 cm)	Ortam Mansabı (196 cm)	Yapı Membaı (256 cm)	Yapı Mansabı (284 cm)
Ortam/Yapı Yok	10.00	9.40	8.90	8.60
Tip YO-5.2 ve Gözenekli Yapı Tip-III	19.80	19.10	19.00	13.48
Tip YO-5.2 ve Gözeneksiz Yapı	20.20	19.80	19.25	13.00
Tip YO-5.2 ve Eğri Yüzeyli Yapı	19.95	19.20	19.60	13.80



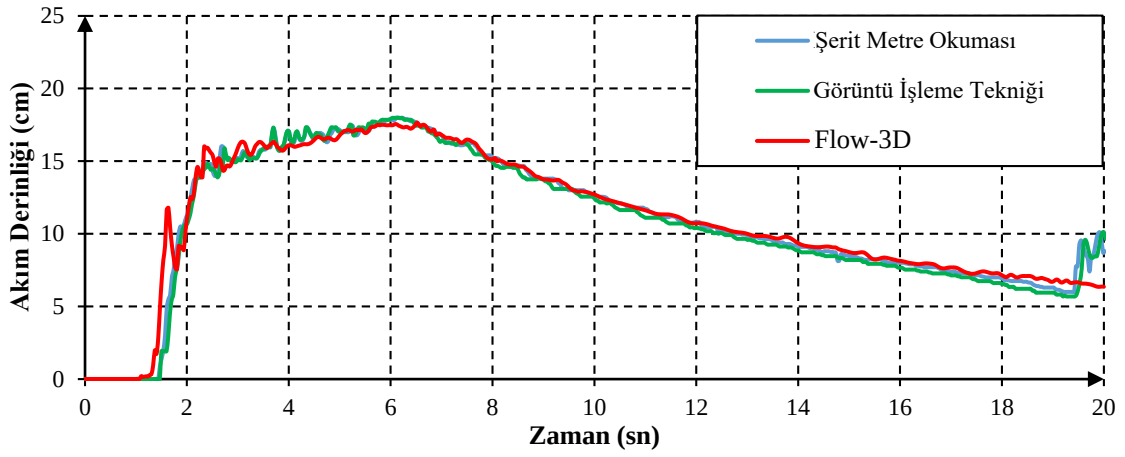
Şekil 4.70. Yapısal ortam ve gözenekli/gözeneksiz yapıların birlikte kullanımına ait Flow-3D görüntüsü ve şematik çizim



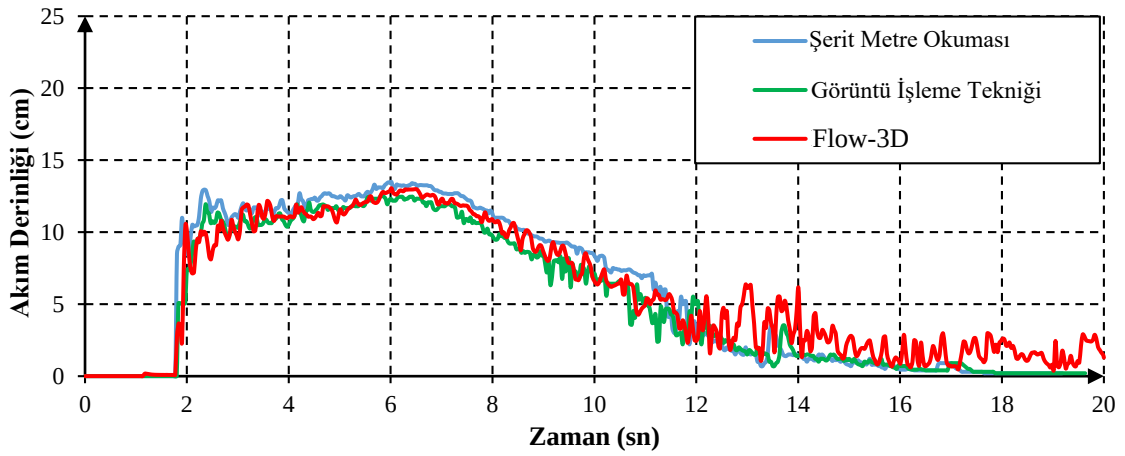
Şekil 4.71. Tip YO-5.2 ve Gözenekli Tip-III için kapaktan itibaren 91 cm'de ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi



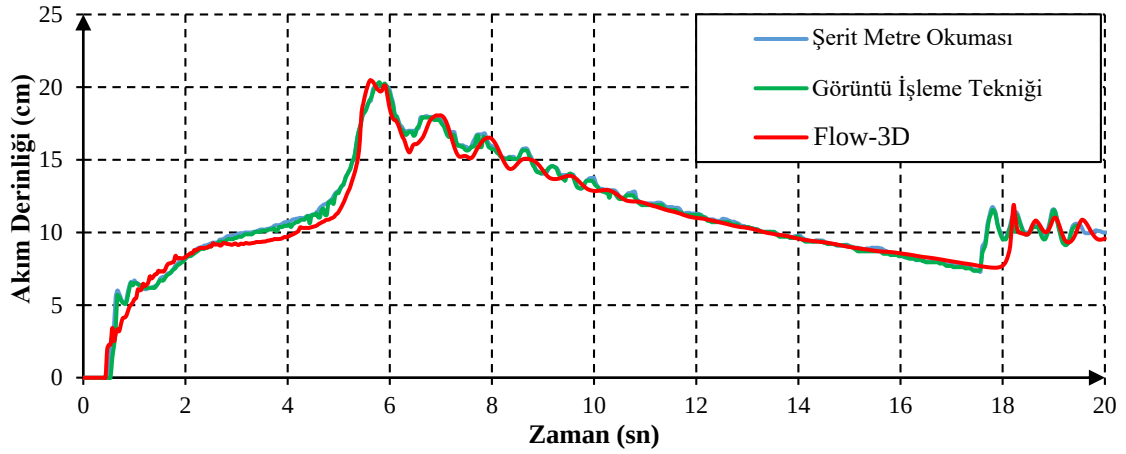
Şekil 4.72. Tip YO-5.2 ve Gözenekli Tip-III için kapaktan itibaren 196 cm’de ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi



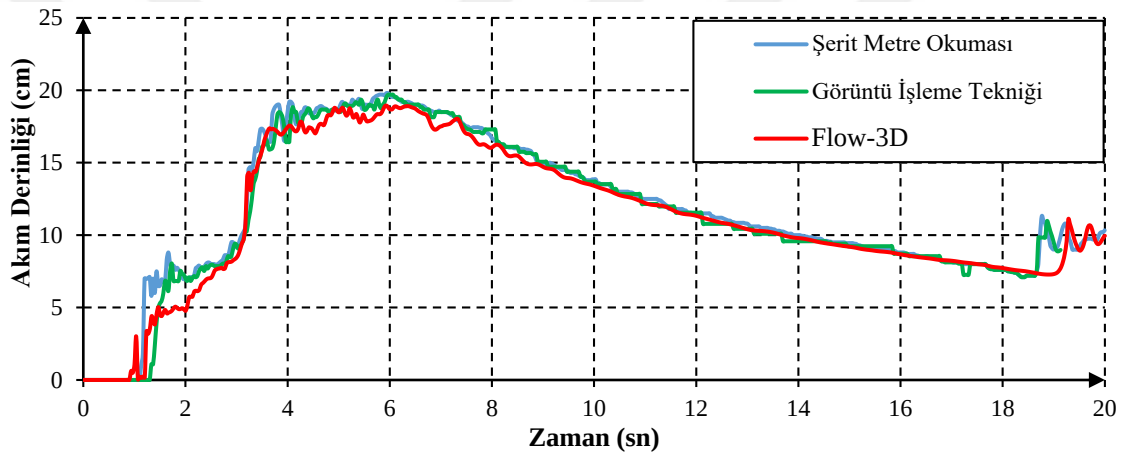
Şekil 4.73. Tip YO-5.2 ve Gözenekli Tip-III için kapaktan itibaren 256 cm’de ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi



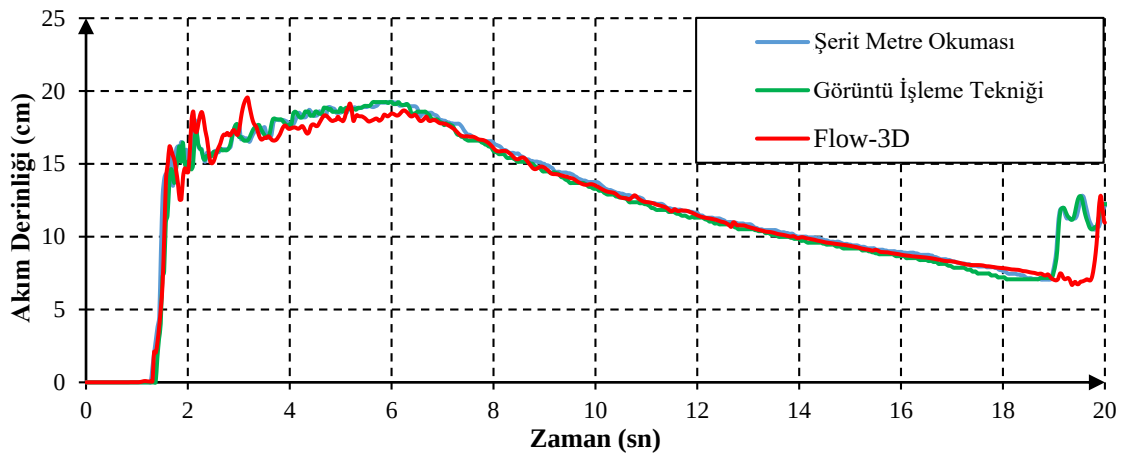
Şekil 4.74. Tip YO-5.2 ve Gözenekli Tip-III için kapaktan itibaren 284 cm’de ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi



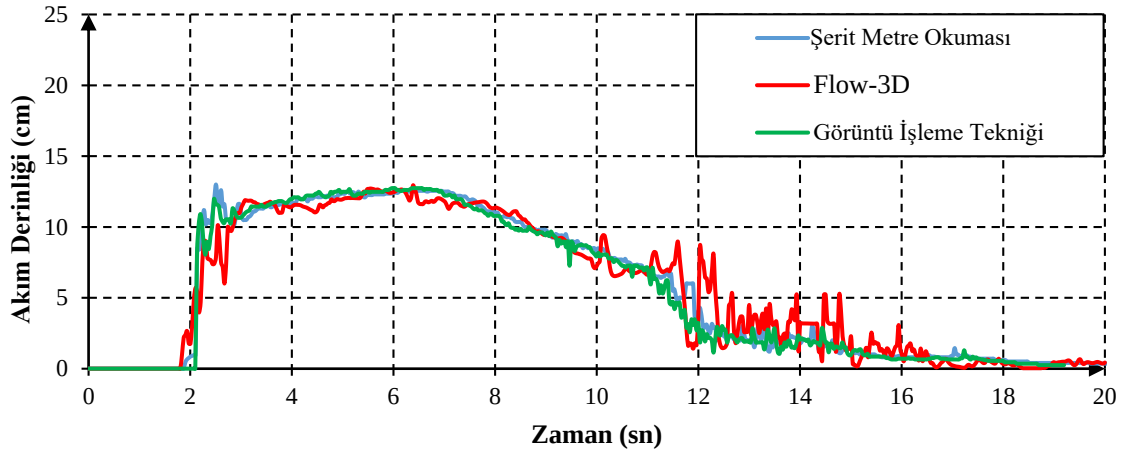
Şekil 4.75. Tip YO-5.2 ve Gözeneksiz Yapı için kapaktan itibaren 91 cm’de ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi



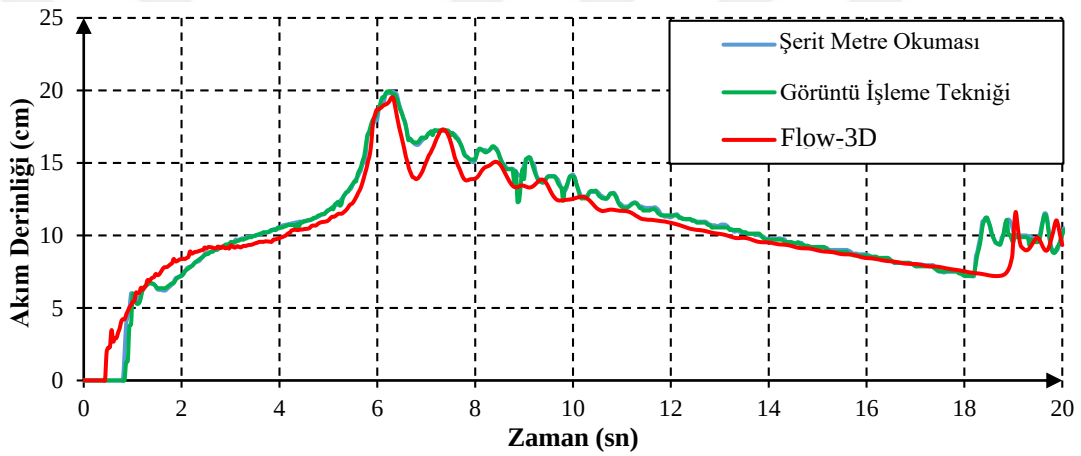
Şekil 4.76. Tip YO-5.2 ve Gözeneksiz Yapı için kapaktan itibaren 196 cm’de ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi



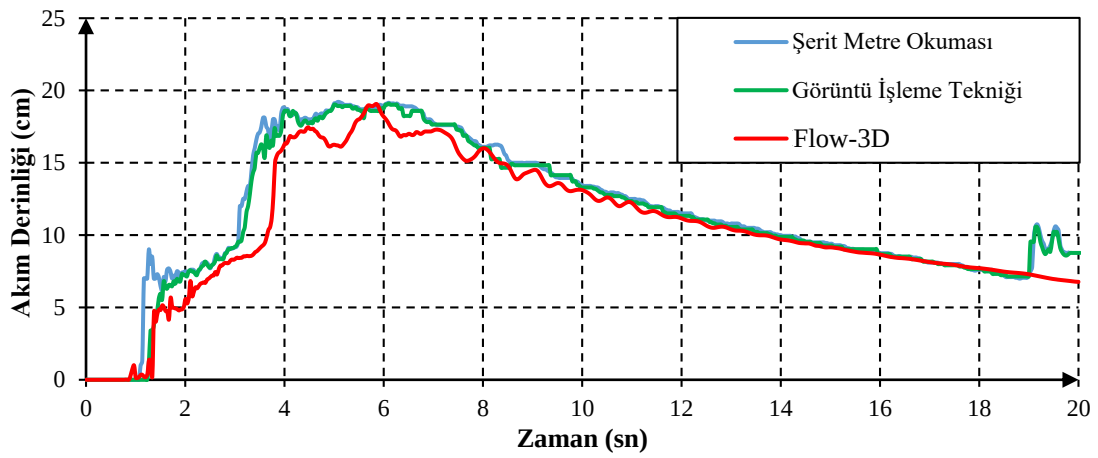
Şekil 4.77. Tip YO-5.2 ve Gözeneksiz Yapı için kapaktan itibaren 256 cm’de ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi



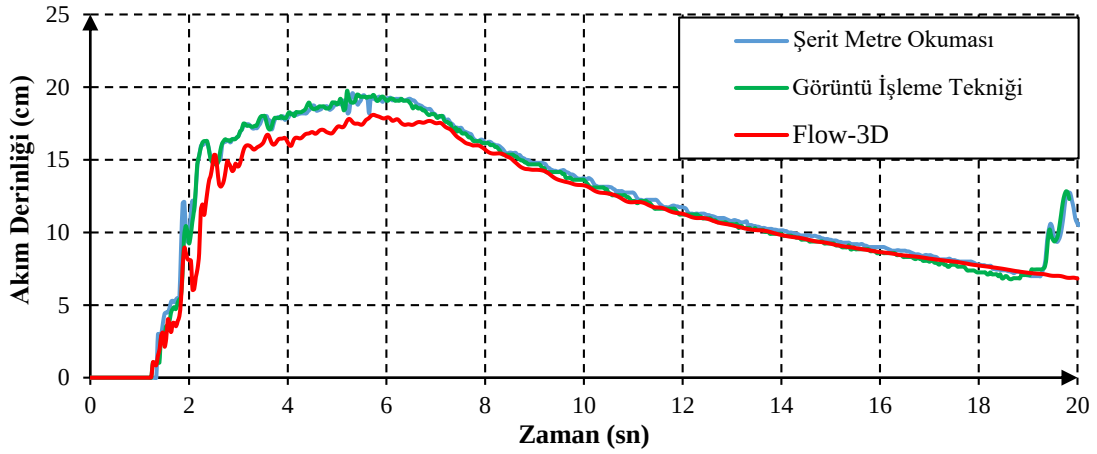
Şekil 4.78. Tip YO-5.2 ve Gözeneksiz Yapı için kapaktan itibaren 284 cm’de ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi



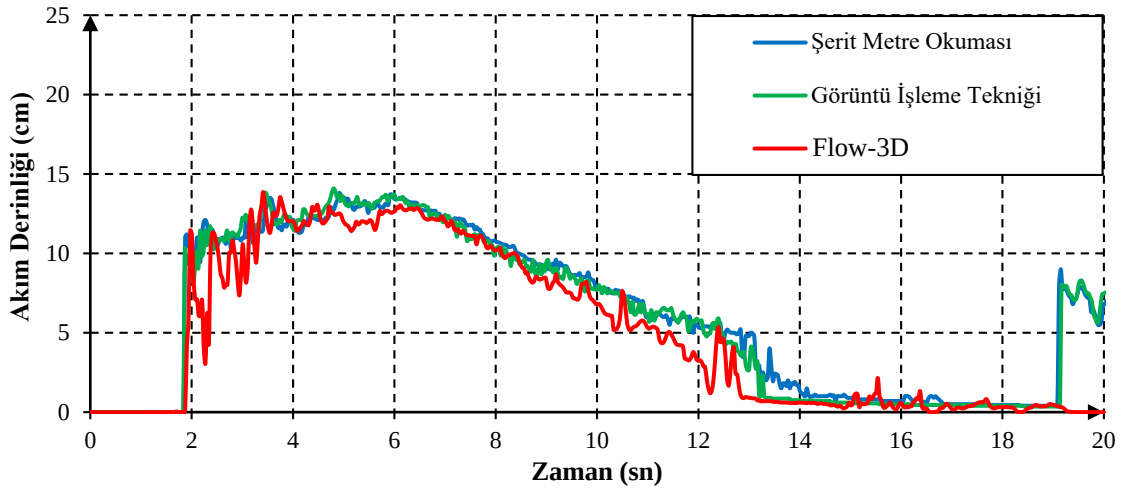
Şekil 4.79. Tip YO-5.2 ve Eğri Yüzeyli Yapı için kapaktan itibaren 91 cm’de ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi



Şekil 4.80. Tip YO-5.2 ve Eğri Yüzeyli Yapı için kapaktan itibaren 196 cm’de ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi



Şekil 4.81. Tip YO-5.2 ve Eğri Yüzeyle Yapı için kapaktan itibaren 256 cm’de ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi



Şekil 4.82. Tip YO-5.2 ve Eğri Yüzeyle Yapı için kapaktan itibaren 284 cm’de ölçülen akım derinliğinin zamanla değişimi

Çizelge 4.33 kanal mansabında Tip YO-5.2 ve gözenekli/gözeneksiz yapılar olması durumunda şerit metre okuma sonuçları baz alınarak hesaplanan Flow-3D ve görüntü işleme tekniği arasındaki ortalama bağıl farkları göstermektedir. Çizelge 4.33’ten şerit metre okuma sonuçları ile görüntü işleme tekniği sonuçlarının yapısal ortamların memba ile mansabında ve gözenekli/gözeneksiz yapıların membaında birbiriyle uyumlu olduğu görülmektedir (maksimum yüzde ortalama bağıl fark %6.76). Bununla birlikte Flow-3D sonuçlarının da özellikle yapısal ortamın memba ile mansabında ve gözenekli/gözeneksiz yapının membaında şerit metre okuma sonuçlarına yakın değerler ürettiği tespit edilmiştir (maksimum yüzde ortalama bağıl fark %16.11).

Tekrarlanabilirlik analizi sonuçlarına göre; ortamların memba ve mansaplarında tekrarlanabilirlik indeksi maksimum %4.78 ve minimum %1.44 olarak hesaplanmış, yapıların memba ve mansaplarında ise bu indis maksimum %10.41 ve minimum %1.44 olarak elde edilmiştir. Yapıların mansabında ise Flow-3D sonuçlarının genel olarak şerit metre okuma sonuçlarıyla uyumlu olduğu fakat yaklaşık 11. sn'den itibaren tutarsızlıkların oluştuğu ve salınımların meydana geldiği fark edilmektedir. Bu durum daha öncede belirtildiği üzere Flow-3D'nin rezervuardan yansıyıp gelen ve yapı üzerinden ikinci kez aşan dalgayı tam olarak tarif edememesinden kaynaklanmaktadır.

Çizelge 4.33. Yapısal ortam ve gözenekli/gözeneksiz yapılar için yüzde ortalama bağlı fark değerleri

Ortam ve Yapı Tipi	Ortam Membaı (91 cm)		Ortam Mansabı (196 cm)		Yapı Membaı (256 cm)		Yapı Mansabı (284 cm)	
	Gör. İşl. Tekn.	Flow-3D	Gör. İşl. Tekn.	Flow-3D	Gör. İşl. Tekn.	Flow-3D	Gör. İşl. Tekn.	Flow-3D
Tip YO-5.2 ve Gözenekli Yapı Tip-III	5.13	8.23	6.76	10.58	3.63	6.39	20.98	169.11
Tip YO-5.2 ve Gözeneksiz Yapı	1.59	16.11	5.15	6.03	3.28	4.58	13.38	35.07
Tip YO-5.2 ve Eğri Yüzeyli Yapı	1.47	6.89	3.04	9.36	2.92	6.86	13.11	30.79

4.2.3 Maksimum yatay çarpma kuvveti

Ani taşkın şok dalgalarına maruz kalan yapıların güvenli tasarımında en önemli parametrelerden biri de yapıya etkiyen maksimum yatay çarpma kuvvetidir. Bu kriter bu açıdan performans kriteri olarak belirlenmiştir. Burada model-yapı üzerine etkiyen şok dalgası kaynaklı yatay çarpma kuvveti üzerinde yapısal ortamların ve gözenekli ve gözeneksiz yapıların etkileri incelenmiştir.

Kanal içerisinde yapısal ortamlar olması durumu

Farklı başlangıç rezervuar su seviyelerinde Kanal-2 üzerinde yürütülen deneylerde yapısal ortamlardan geçen şok dalgasının Konum-1 ve Konum-2'ye yerleştirilen model-

yapı üzerinde oluşturduğu maksimum yatay çarpma kuvvetleri sırasıyla Çizelge 4.34 ve Çizelge 4.35'te verilmektedir. Çizelge 4.34 incelendiğinde başlangıç rezervuar su seviyesi arttıkça model-yapıya etkiyen maksimum yatay çarpma kuvveti büyüklüğünün arttığı açık şekilde görülmektedir. Benzer bir sonuç Arnason vd., (2009) ve Al-Faesly vd., (2012) tarafından da elde edilmiştir.

Bununla birlikte H10 hariç diğer tüm rezervuar su seviyeleri için Tip YO-5.2'nin maksimum yatay çarpma kuvveti büyüklüğünü en fazla azaltan yapısal ortam tipi olduğu H10'da ise Tip YO-4.2'nin daha etkili olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 4.34). Burada Tip YO-0.0'a göre Tip YO-5.2'nin maksimum yatay çarpma kuvveti büyüklüğünü en fazla %23.3 en az %9.2 oranında azalttığı hesaplanmıştır. Maksimum yatay çarpma kuvveti büyüklüğünü her koşulda en aza indirgeyen tek bir ortamdan söz etmek mümkün olmasa da Tip YO-5.2 ve Tip YO-4.2 dışındaki ortamların maksimum yatay kuvveti büyüklüğünü azaltmada daha az etkili oldukları ve genel olarak Tip YO-3.1'in maksimum yatay çarpma kuvveti büyüklüğünü en az azaltan ortam tipi olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.34. Farklı rezervuar su seviyelerinde yapısal ortamlardan geçen şok dalgasının Konum-1'e yerleştirilen model-yapı üzerinde oluşturduğu maksimum yatay çarpma kuvvetleri

	Maksimum Yatay Çarpma Kuvvetleri (N)								
	Tip YO-0.0	Tip YO-1.1	Tip YO-1.2	Tip YO-2.1	Tip YO-2.2	Tip YO-3.1	Tip YO-3.2	Tip YO-4.2	Tip YO-5.2
H10	0.98	0.92	0.91	0.90	0.93	0.89	0.94	0.83	0.89
H15	1.91	1.76	1.82	1.78	1.74	1.81	1.78	1.67	1.65
H20	3.56	3.16	3.15	2.97	3.31	3.28	3.10	2.92	2.73
H25	4.94	4.93	4.79	4.65	4.82	4.91	4.90	4.71	4.31

Benzer Şekilde Çizelge 4.35 incelendiğinde yine başlangıç rezervuar su seviyesi arttıkça model-yapıya etkiyen maksimum yatay çarpma kuvvetinin arttığı görülmektedir. Bununla birlikte H10 hariç Tip YO-5.2'nin model-yapıya etkiyen maksimum yatay çarpma kuvveti büyüklüğünü en fazla azaltan ortam tipi olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca bu ortamın Tip YO-0.0'a göre maksimum yatay çarpma kuvveti büyüklüğünü en fazla %12.3 en az %10.9 oranında azalttığı hesaplanmıştır. Maksimum yatay çarpma kuvveti büyüklüğünü en az azaltan ortam tiplerinin ise Tip YO-5.2 ve Tip YO-4.2 dışındaki ortamlar olduğu ve genel olarak Tip YO-3.2'nin maksimum yatay çarpma kuvveti üzerinde en az etkili ortam tipi olduğu belirlenmiştir.

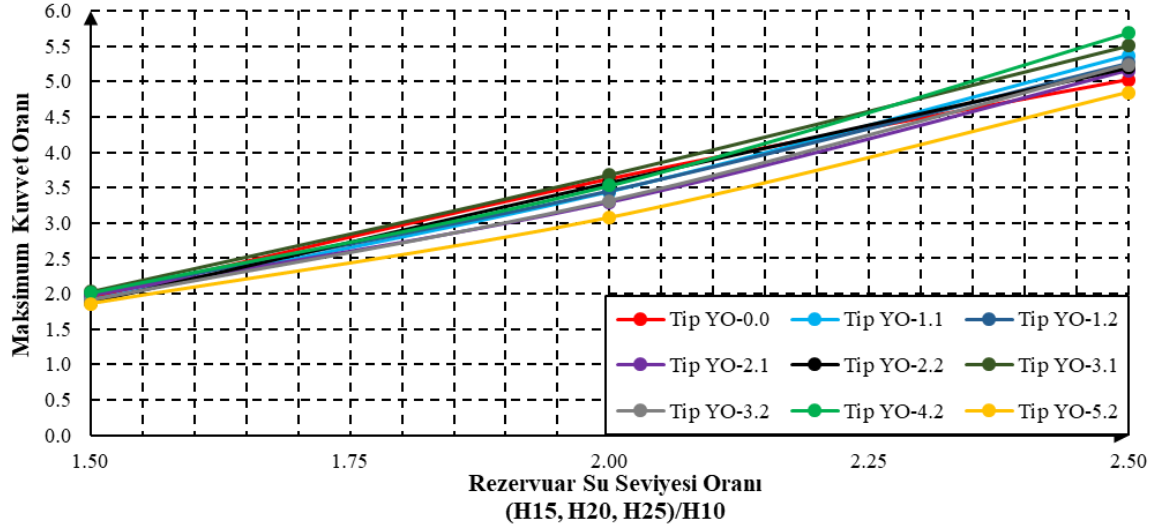
Çizelge 4.35. Farklı rezervuar su seviyelerinde yapısal ortamlardan geçen şok dalgasının Konum-2'ye yerleştirilen model-yapı üzerinde oluşturduğu maksimum yatay çarpma kuvvetleri

Maksimum Yatay Çarpma Kuvvetleri (N)									
	Tip YO-0.0	Tip YO-1.1	Tip YO-1.2	Tip YO-2.1	Tip YO-2.2	Tip YO-3.1	Tip YO-3.2	Tip YO-4.2	Tip YO-5.2
H10	0.97	0.85	0.96	0.85	0.91	0.88	0.93	1.32	1.04
H15	1.84	1.79	1.92	1.79	1.84	1.81	1.91	1.77	1.64
H20	3.42	3.02	3.15	3.21	3.10	3.01	3.14	2.99	3.0
H25	4.95	4.77	4.79	4.83	4.71	4.71	4.96	4.55	4.38

Çizelge 4.36, Konum-1 için 10 cm başlangıç rezervuar su seviyesi baz alınarak diğer su seviyelerinde hesaplanan maksimum yatay çarpma kuvvetindeki artış yüzdesini göstermektedir. Çizelge 4.36 incelendiğinde maksimum yatay çarpma kuvvetindeki artış oranının her bir su seviyesindeki artış oranının çok üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Örneğin H10'dan H15'e su seviyesi %50 oranında artarken maksimum yatay çarpma kuvvetinin tüm yapısal ortam tipleri için %50'nin üstünde arttığı görülmektedir. Benzer bir yaklaşımla H10 başlangıç rezervuar su seviyesi baz alınarak elde edilen rezervuar su seviyesi oranlarının maksimum yatay çarpma kuvveti oranları ile değişimi Şekil 4.83'te verilmektedir. Şekil 4.83 incelendiğinde tüm durumlarda rezervuar su seviyesi oranının üzerinde bir maksimum yatay çarpma kuvveti oranında artış gerçekleştiği görülmektedir.

Çizelge 4.36. H10'a göre farklı rezervuar su seviyeleri için maksimum yatay çarpma kuvvetinin yüzdelik artışı oranları– Konum-1

Yapısal Ortam	H15	H20	H25
Tip-YO-0.0	94.46	262.14	402.25
Tip-YO-1.1	91.06	244.00	436.43
Tip-YO-1.2	99.82	245.68	425.86
Tip-YO-2.1	97.89	229.53	415.84
Tip-YO-2.2	87.44	256.90	420.04
Tip-YO-3.1	102.65	268.23	450.70
Tip-YO-3.2	90.51	231.26	423.55
Tip-YO-4.2	101.30	253.00	468.84
Tip-YO-5.2	85.98	207.45	384.25

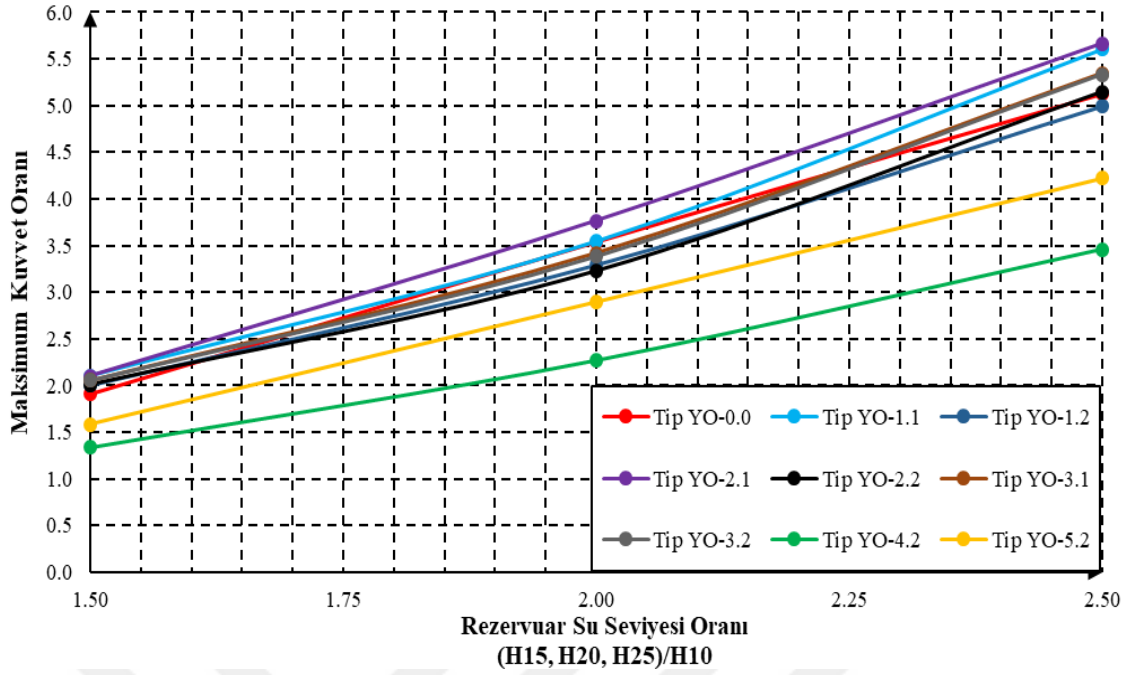


Şekil 4.83. Rezervuar su seviyesi oranının maksimum yatay çarpma kuvveti oranıyla değişimi-Konum-1

Konum-1'e benzer olacak şekilde Çizelge 4.37'de en küçük başlangıç rezervuar su seviyesi olan 10 cm dikkate alındığında Konum-2'de oluşan maksimum yatay çarpma kuvvetindeki artış yüzdeleri görülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre H15 Tip YO-4.2 dışında her bir başlangıç rezervuar su seviyesindeki artıştan daha fazla bir maksimum yatay çarpma kuvvetinde artış gerçekleştiği tespit edilmiştir. Yine Konum-1'de olduğu gibi burada da başlangıç rezervuar su seviyesi oranının üzerinde bir maksimum yatay çarpma kuvveti oranında artış olduğu Şekil 4.84'ten görülmektedir.

Çizelge 4.37. H10'a göre farklı rezervuar su seviyeleri için maksimum yatay çarpma kuvvetinin yüzdelik artışı oranları– Konum-2

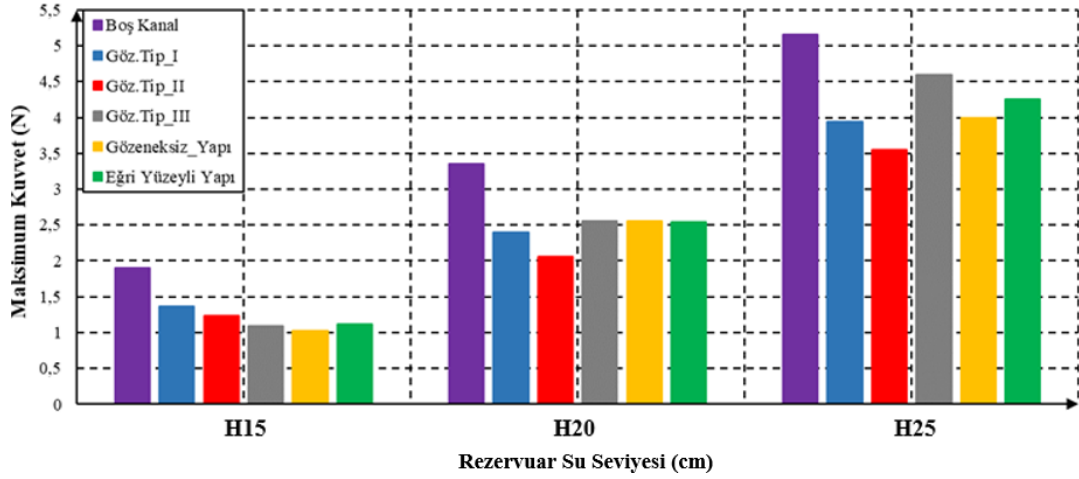
Yapısal Ortam	H15	H20	H25
Tip-YO-0.0	90.73	253.76	412.38
Tip-YO-1.1	109.91	254.31	460.56
Tip-YO-1.2	99.90	229.12	399.34
Tip-YO-2.1	110.00	276.36	466.25
Tip-YO-2.2	101.13	222.82	414.76
Tip-YO-3.1	105.41	241.94	434.34
Tip-YO-3.2	105.77	238.48	433.17
Tip-YO-4.2	34.03	126.96	245.47
Tip-YO-5.2	58.65	189.81	322.36



Şekil 4.84. Rezervuar su seviyesi oranının maksimum yatay çarpma kuvveti oranıyla değişimi-Konum-2

Kanal içerisinde gözenekli ve gözeneksiz yapılar olması durumu

Farklı başlangıç rezervuar su seviyelerinde Kanal-2 üzerinde yürütülen deneylerde gözenekli/gözeneksiz yapılardan geçen şok dalgasının model-yapı üzerinde oluşturduğu maksimum yatay çarpma kuvveti Şekil 4.85 ve Çizelge 4.38’de verilmektedir. Şekil 4.85 ve Çizelge 4.38 incelendiğinde başlangıç rezervuar su seviyesi arttıkça model-yapı üzerinde oluşan maksimum yatay çarpma kuvveti büyüklüğünün arttığı açık şekilde görülmektedir. Ayrıca model-yapı üzerinde oluşan maksimum yatay çarpma kuvveti beklendiği üzere tüm başlangıç rezervuar su seviyelerinde boş kanalda meydana geldiği tespit edilmiştir. Tüm yapı tipleri arasında model-yapı üzerinde oluşan maksimum yatay çarpma kuvveti büyüklüğünü en fazla azaltan yapı ise 20 cm ve 25 cm rezervuar su seviyelerinde Gözenekli Tip-II olurken 15 cm rezervuar su seviyesinde Gözeneksiz Yapı olmuştur. Gözenekli Tip-II’nin boş kanala göre maksimum yatay çarpma kuvveti büyüklüğünü en fazla %38.73 en az ise %31.27 oranında azalttığı hesaplanmıştır. Maksimum yatay çarpma kuvveti büyüklüğünü en az azaltan yapı tipinin ise H15 rezervuar su seviyesinde Gözenekli Tip-I, H20 ve H25 su seviyelerinde Gözenekli Tip-III olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 4.38).



Şekil 4.85. Farklı başlangıç rezervuar su seviyelerinde maksimum yatay çarpma kuvvetinin yapı tipi ile değişimi

Çizelge 4.38. Farklı rezervuar su seviyelerinde gözenekli ve gözeneksiz yapılardan geçen şok dalgasının model-yapı üzerinde oluşturduğu maksimum yatay çarpma kuvvetleri

Maksimum Yatay Çarpma Kuvvetleri (N)						
	Boş Kanal	Göz. Tip-I	Göz. Tip-II	Göz. Tip-III	Gözeneksiz Yapı	Eğri Yüzeyli Yapı
H15	1.895	1.367	1.240	1.094	1.030	1.119
H20	3.353	2.394	2.054	2.554	2.553	2.539
H25	5.164	3.942	3.549	4.590	3.996	4.255

Çizelge 4.39 en küçük başlangıç rezervuar su seviyesi olan 15 cm'e ait maksimum yatay çarpma kuvveti baz alındığında diğer su seviyelerinin maksimum yatay çarpma kuvvetlerindeki artış yüzdelerini göstermektedir. Çizelge 4.39 incelendiğinde yapısal ortamlardan elde edilen sonuçlara paralel olacak şekilde tüm yapı tipleri için maksimum yatay çarpma kuvvetindeki artış yüzdesinin rezervuar su seviyesindeki artış yüzdesinden daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Rezervuar su seviyesi %66.67 arttığında model-yapıya etkiyen maksimum yatay çarpma kuvvetinin en fazla %319.69 arttığı görülmüştür.

Çizelge 4.39. Farklı rezervuar su seviyelerinin H15'e göre maksimum yatay çarpma kuvvetindeki artış yüzdeleri

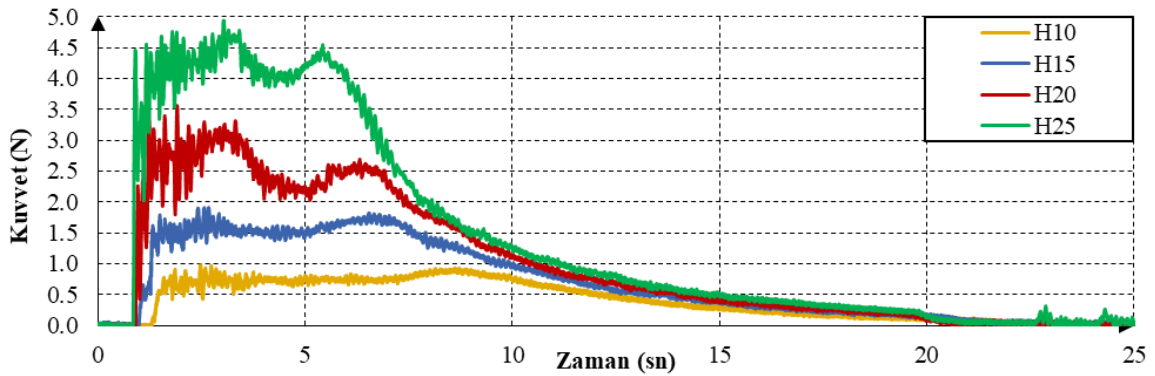
	Boş Kanal	Göz. Tip-I	Göz. Tip-II	Göz. Tip-III	Gözeneksiz Yapı	Eğri Yüzeyli Yapı
H20	76.92	75.11	65.68	133.50	147.80	127.00
H25	172.49	188.38	186.23	319.69	287.91	280.41

4.2.4 Kuvvet şiddeti

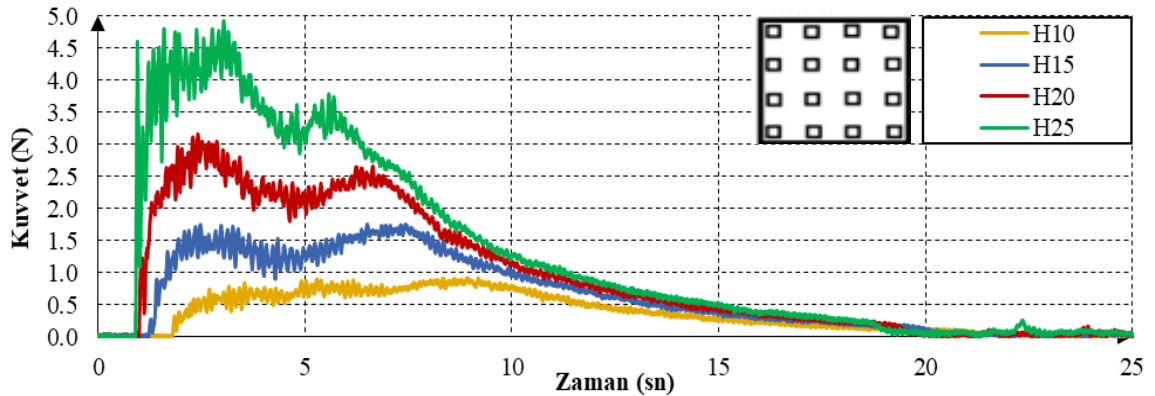
Yapıların statik ve dinamik yükler altındaki stabilitesi açısından önemli olan diğer bir husus da yapıların ne kadar süreyle o kuvvete maruz kaldığıdır. Bu kriter bu amaç doğrultusunda seçilmiştir. Bu bölümde farklı yapısal ortam ve gözenekli/gözeneksiz yapı tiplerinin model-yapıya etki eden kuvvet şiddetini ne derece azalttığı araştırılmıştır.

Kanal içerisinde yapısal ortamlar olması durumu

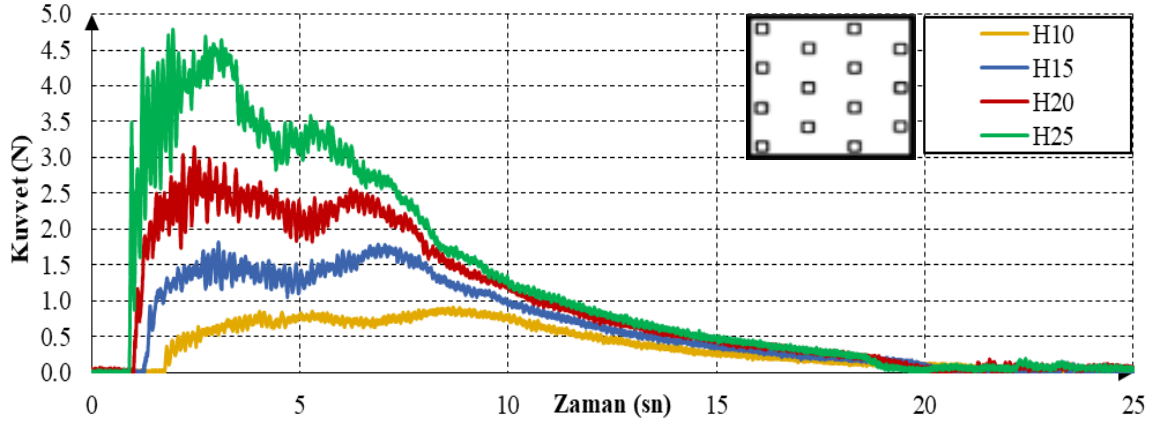
Bir model-yapı üzerine etkiyen yatay çarpma kuvvetinin zamanla değişimi sekiz farklı yapısal ortam tipi, dört farklı başlangıç rezervuar su seviyesi ve iki farklı model-yapı konumu için Kanal-2 üzerinde yürütülen deneysel çalışmalarla araştırılmıştır. Şekil 4.86 – Şekil 4.94 Konum-1’e yerleştirilen model yapıya 25 sn boyunca etkiyen yatay çarpma kuvvetinin değişimini göstermektedir.



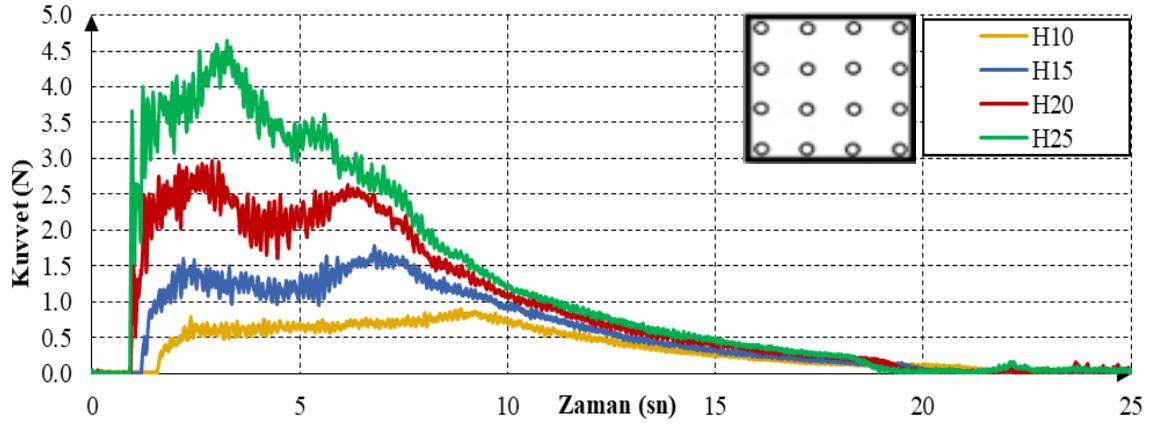
Şekil 4.86. Kanalda herhangi bir yapısal ortam yokken Konum-1 için yatay çarpma kuvvetinin zamanla değişimi



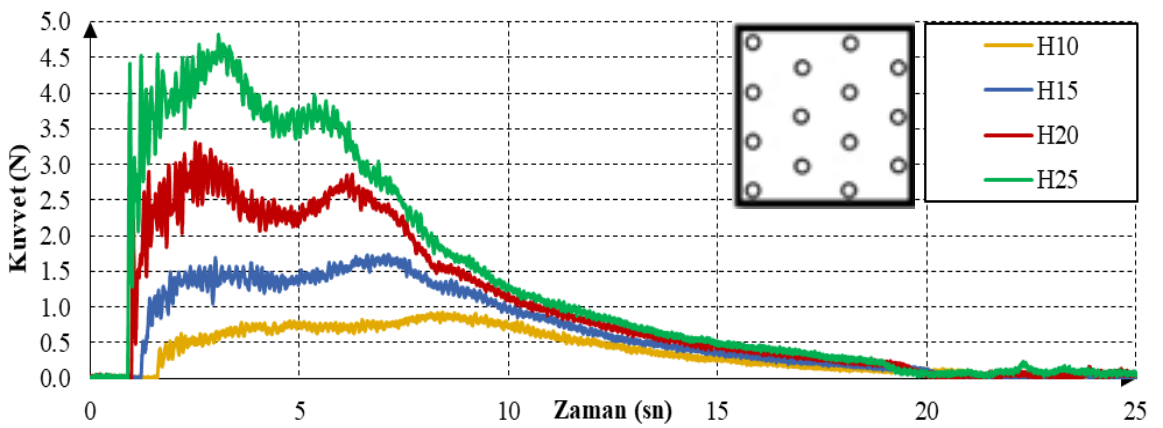
Şekil 4.87. Kanalda Tip-YO-1.1 varken Konum-1 için yatay çarpma kuvvetinin zamanla değişimi



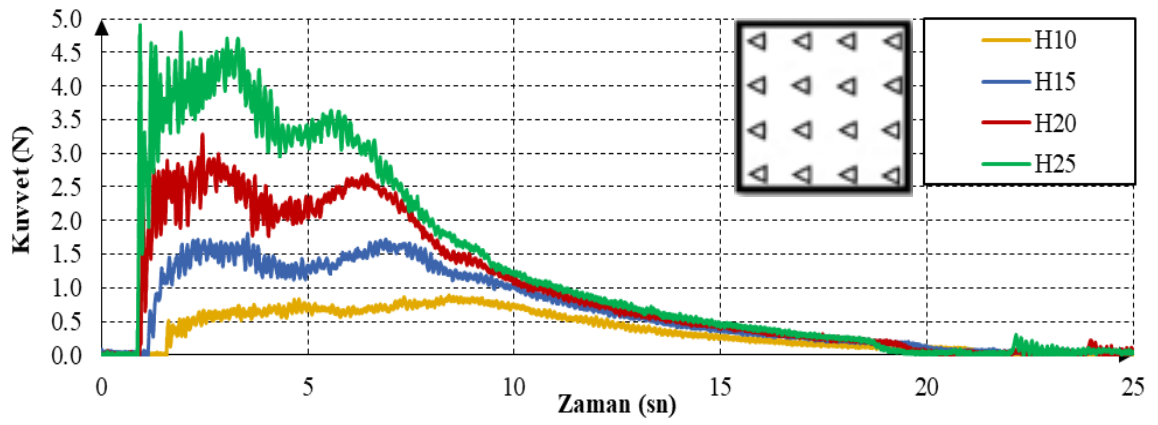
Şekil 4.88. Kanalda Tip-YO-1.2 varken Konum-1 için yatay çarpma kuvvetinin zamanla değişimi



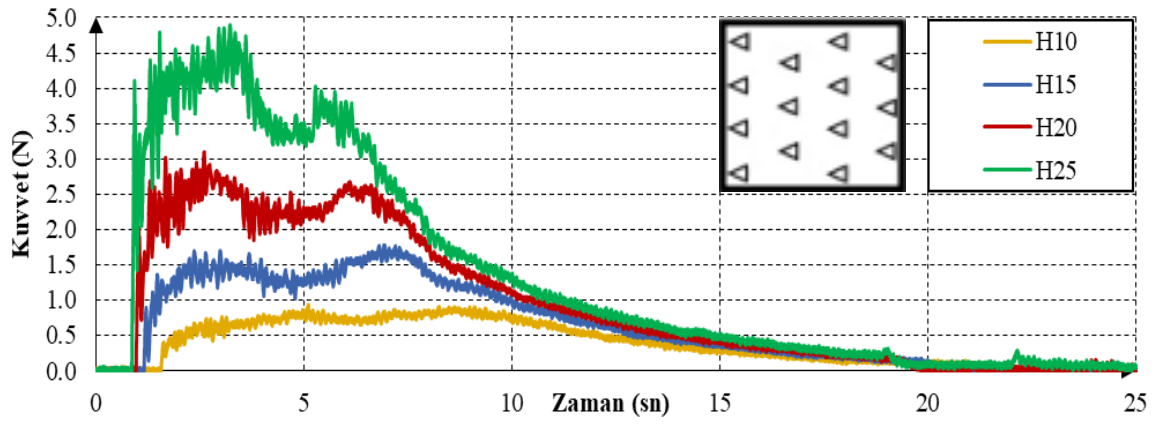
Şekil 4.89. Kanalda Tip-YO-2.1 varken Konum-1 için yatay çarpma kuvvetinin zamanla değişimi



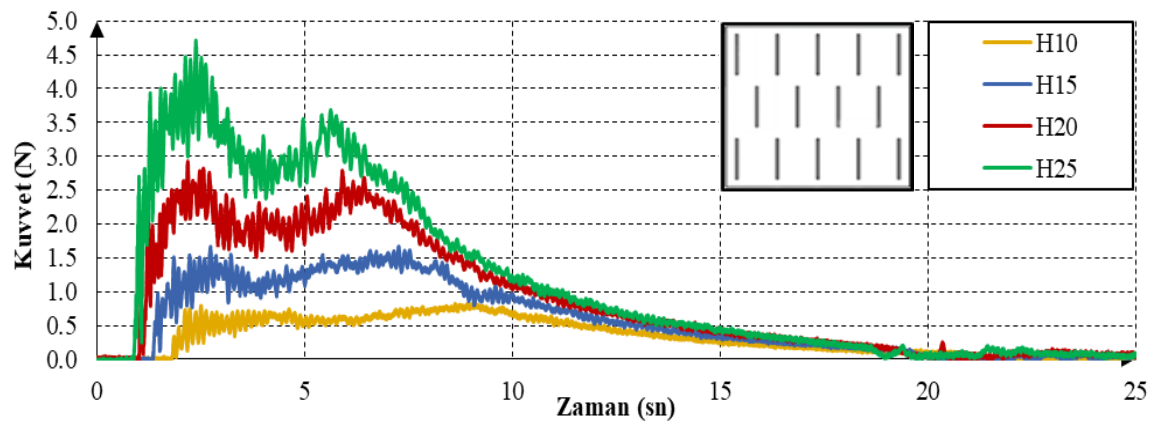
Şekil 4.90. Kanalda Tip-YO-2.2 varken Konum-1 için yatay çarpma kuvvetinin zamanla değişimi



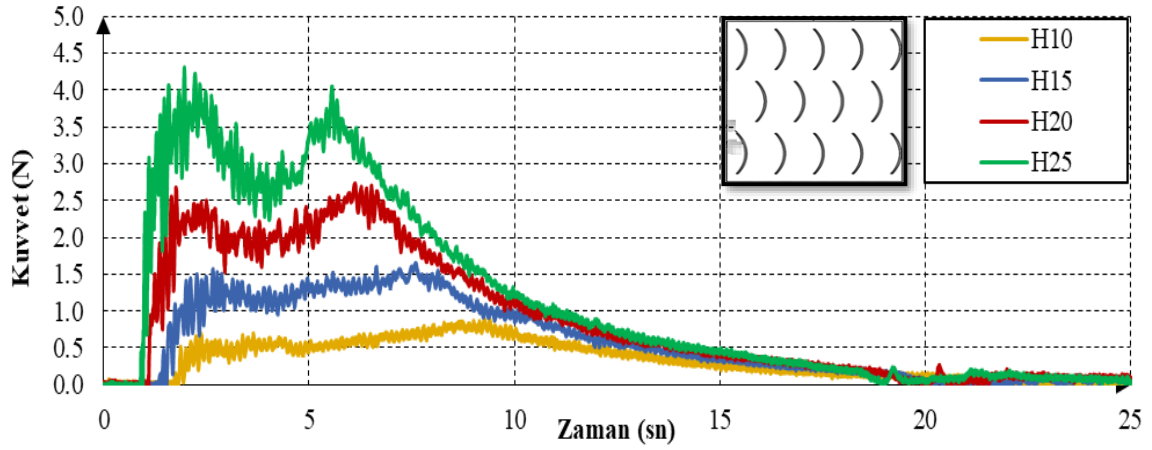
Şekil 4.91. Kanalda Tip-YO-3.1 varken Konum-1 için yatay çarpma kuvvetinin zamanla değişimi



Şekil 4.92. Kanalda Tip-YO-3.2 varken Konum-1 için yatay çarpma kuvvetinin zamanla değişimi

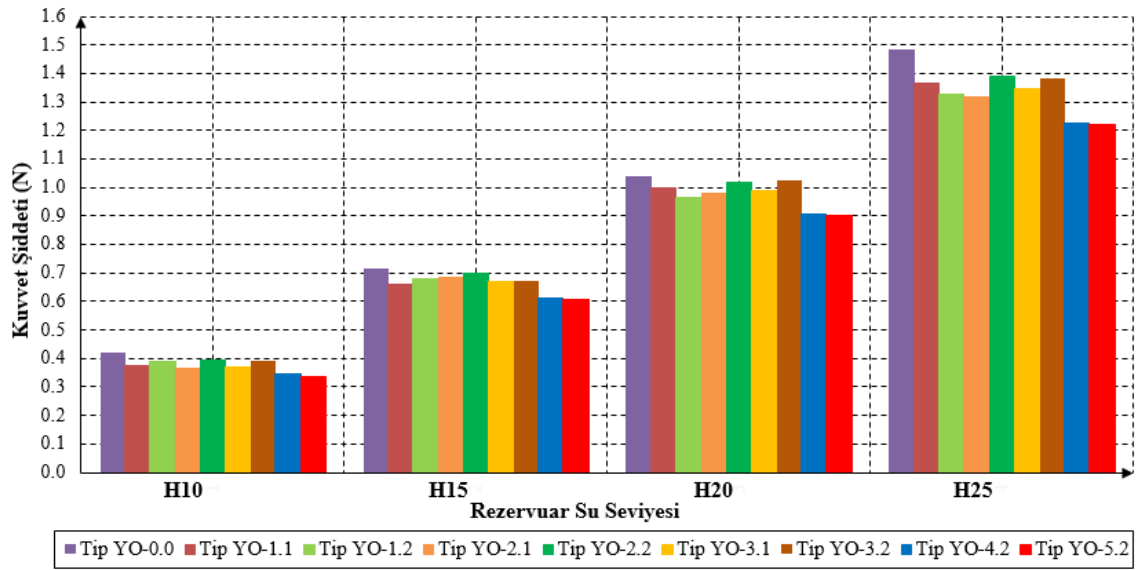


Şekil 4.93. Kanalda Tip-YO-4.2 varken Konum-1 için yatay çarpma kuvvetinin zamanla değişimi



Şekil 4.94. Kanalda Tip-YO-5.2 varken Konum-1 için yatay çarpma kuvvetinin zamanla değişimi

Şekil 4.95 ise model-yapı üzerine etkiyen yatay çarpma kuvvetinin oluşturduğu kuvvet şiddetini ve Çizelge 4.40 kanalda herhangi bir yapısal ortam olmadığı durum baz alınarak tüm ortam tipleri için hesaplanan kuvvet şiddetindeki azaltmayı niceliksel olarak göstermektedir. Şekil 4.95 incelendiğinde başlangıç rezervuar su seviyesi arttıkça kuvvet şiddetinin de net bir şekilde arttığı görülmektedir. Benzer bir sonuç Erduran vd., (2025)'nin farklı rezervuar su seviyelerinde farklı tipteki köprü ayaklarına etkiyen kuvvet şiddetinin belirlenmesinde de görülmektedir. Bununla birlikte en fazla kuvvet şiddetinin beklendiği üzere tüm başlangıç rezervuar su seviyelerinde Tip YO-0.0'da meydana geldiği tespit edilmiştir. Yapısal ortamlar kendi arasında karşılaştırıldığında ise kuvvet şiddetini en fazla azaltan ortamların Şekil 4.95 ve Çizelge 4.40'tan Tip YO-5.2 ve Tip YO-4.2 (Tip YO-0.0 baz alındığında Tip YO-5.2 için maksimum %19.67 ve Tip YO-4.2 için maksimum %17.41) olduğu belirlenmiştir. Bu durumun tam tersi olacak şekilde yapı üzerine etkiyen kuvvet şiddetini en az azaltan ortamların ise Tip YO-3.2 ve Tip YO-2.2 olduğu tespit edilmiştir. Burada yüzey alanı ve direnç katsayısının kuvvet üzerinde etkili olduğu bilindiğinden, akım yönüne dik doğrultudaki yüzey alanı daha fazla olan Tip YO-5.2 ve Tip YO-4.2'nin kuvvet şiddetini azaltmada daha etkili olduğu görülmüştür. Tip YO-5.2 ve Tip YO-4.2 dışındaki diğer ortam tiplerinin kuvvet şiddeti azaltımı üzerindeki etkisi ise Konum-1 için ortalama %6.86 olarak hesaplanmıştır.



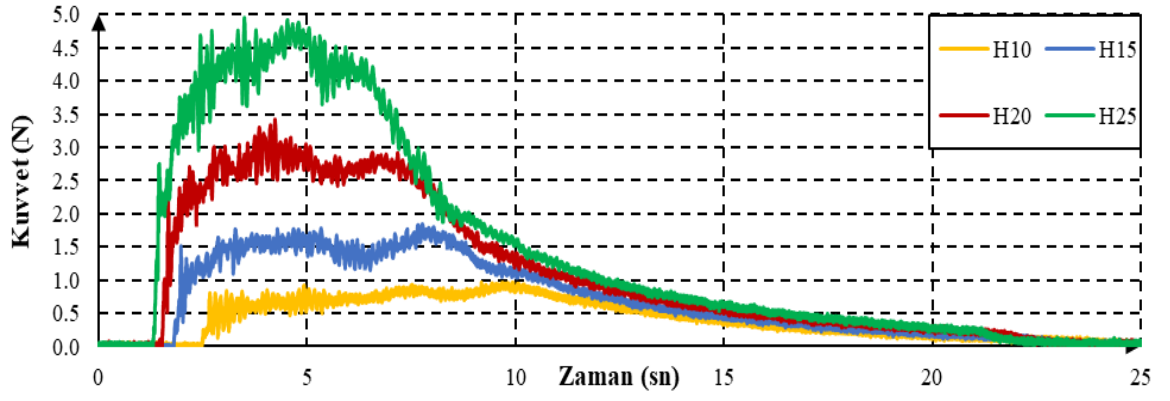
Şekil 4.95. Farklı yapısal ortam tiplerinde oluşan kuvvet şiddetleri - Konum-1

Bununla birlikte Çizelge 4.40 incelendiğinde düz yerleşimlerin şaşırtmalı yerleşimlere göre kuvvet şiddetini azaltmada genel olarak daha etkili olduğu görülmüştür. Benzer bir sonuç Udarika ve Tanaka (2025)'nın düz, şaşırtmalı ve rastgele dizilimde kullandığı bitki örtüsü modelinde de görülmektedir. Araştırmacılar düz dizilimde yerleştirilmiş bitki örtüsünün bir yapı üzerine etkiyen yatay çarpma kuvvetini, şaşırtmalı ve rastgele yerleştirilmiş dizilimlere göre daha fazla azalttığını belirtmişlerdir.

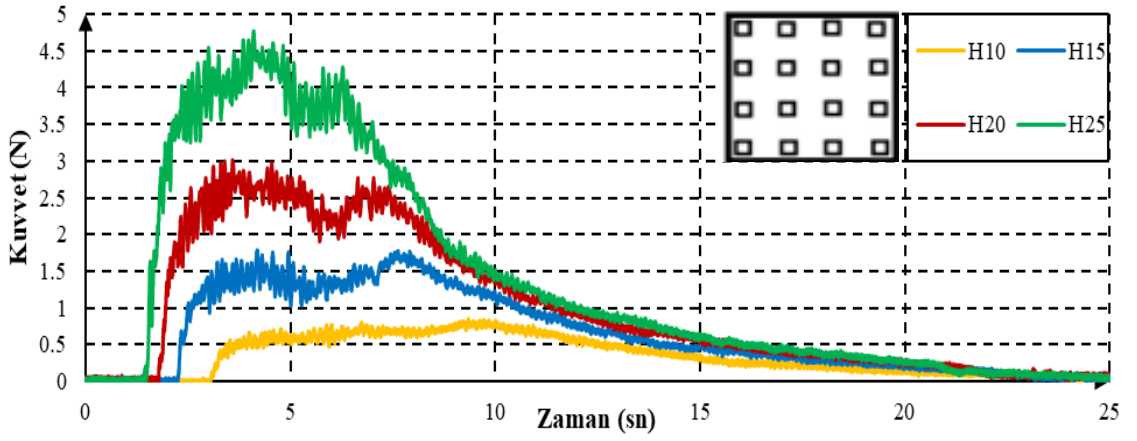
Çizelge 4.40. Farklı rezervuar su seviyelerinde yapısal ortamların kuvvet şiddetini azaltma yüzdeleri - Konum-1

	Tip YO-1.1	Tip YO-1.2	Tip YO-2.1	Tip YO-2.2	Tip YO-3.1	Tip YO-3.2	Tip YO-4.2	Tip YO-5.2
H10	10.74	7.44	12.57	6.40	12.09	6.20	17.08	19.67
H15	8.00	4.86	4.33	2.64	6.71	6.36	14.43	15.12
H20	4.04	7.31	5.63	1.92	4.60	1.15	12.82	13.14
H25	7.78	10.66	11.08	6.19	9.27	6.65	17.41	17.56

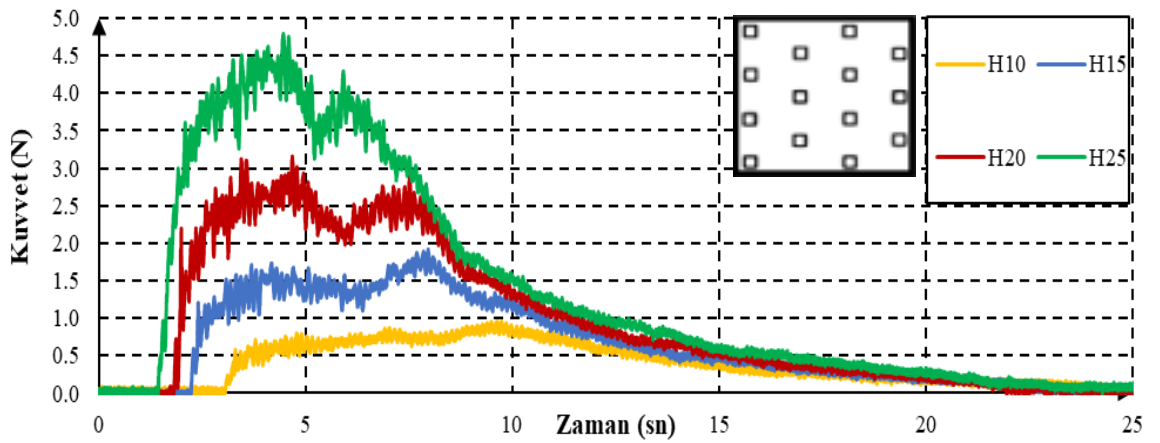
Şekil 4.96 - Şekil 4.104 Konum-2 için yapısal ortamlardan geçerek model-yapıya ulaşan şok dalgasının model-yapı üzerinde oluşturduğu yatay çarpma kuvvetinin zamanla değişimini göstermektedir.



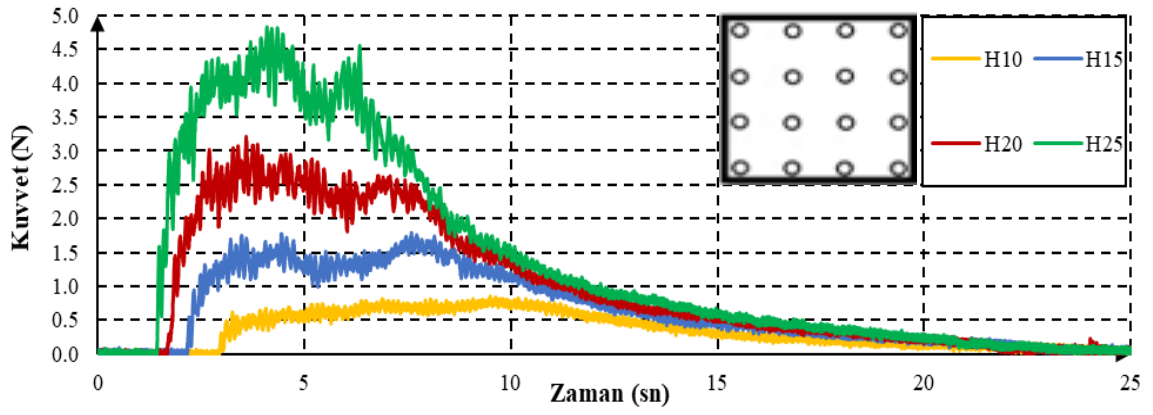
Şekil 4.96. Kanalda herhangi bir yapısal ortam yokken Konum-2 için farklı rezervuar su seviyelerinde yatay çarpma kuvvetinin zamanla değişimi



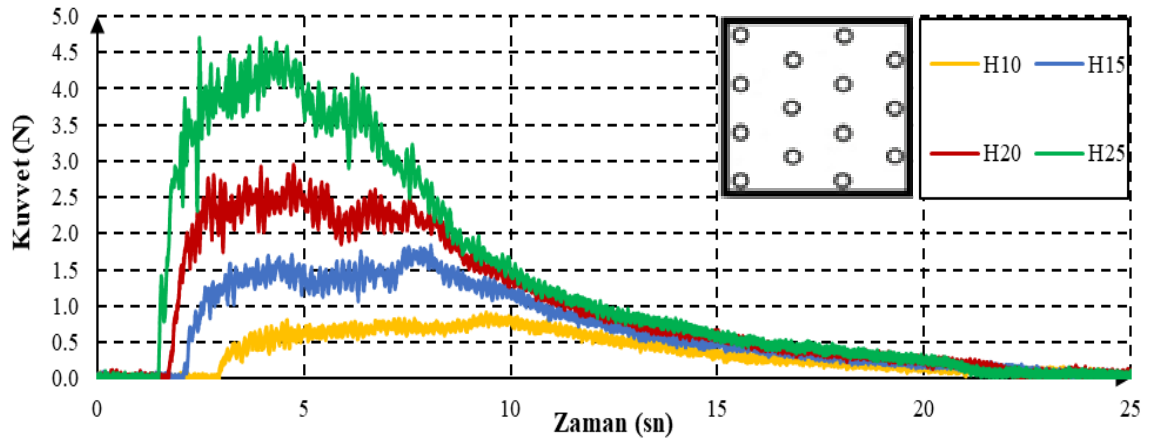
Şekil 4.97. Kanalda Tip YO-1.1 varken Konum-2 için farklı rezervuar su seviyelerinde yatay çarpma kuvvetinin zamanla değişimi



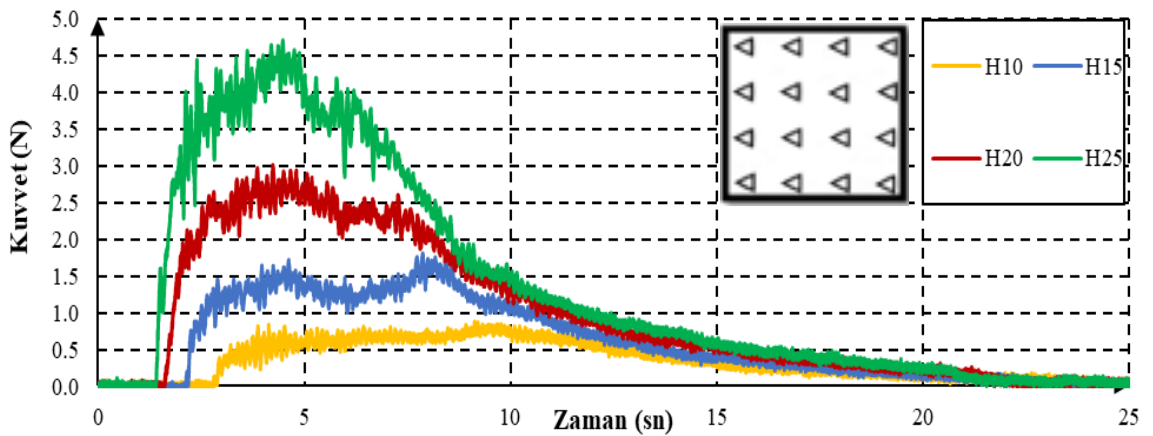
Şekil 4.98. Kanalda Tip YO-1.2 varken Konum-2 için farklı rezervuar su seviyelerinde yatay çarpma kuvvetinin zamanla değişimi



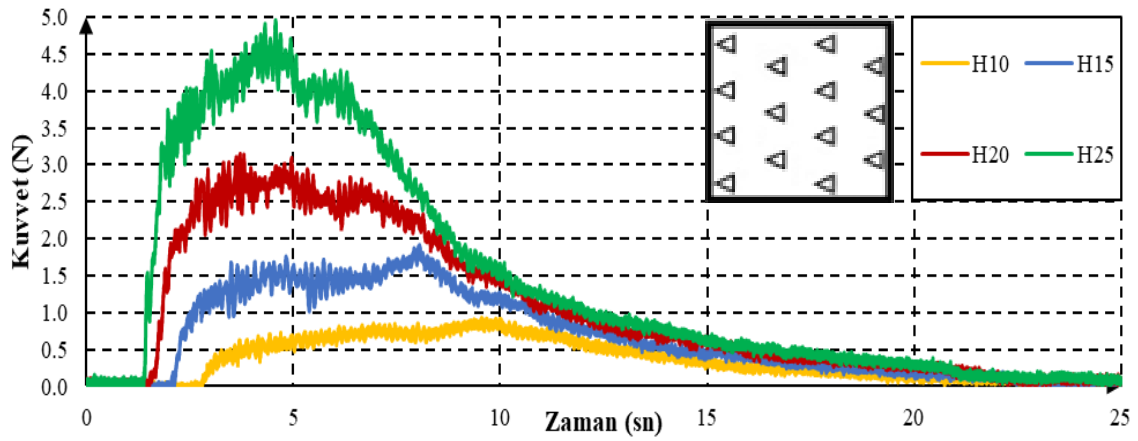
Şekil 4.99. Kanalda Tip YO-2.1 varken Konum-2 için farklı rezervuar su seviyelerinde yatay çarpma kuvvetinin zamanla değişimi



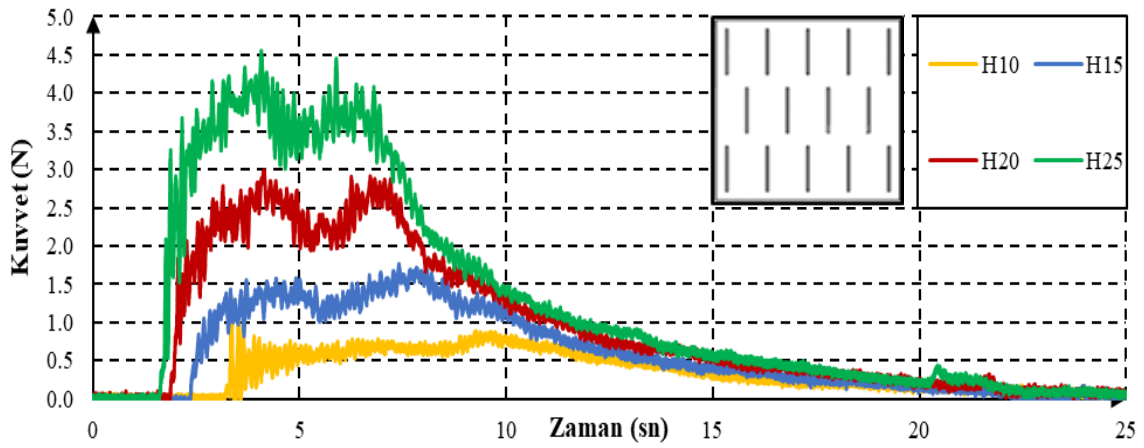
Şekil 4.100. Kanalda Tip YO-2.2 varken Konum-2 için farklı rezervuar su seviyelerinde yatay çarpma kuvvetinin zamanla değişimi



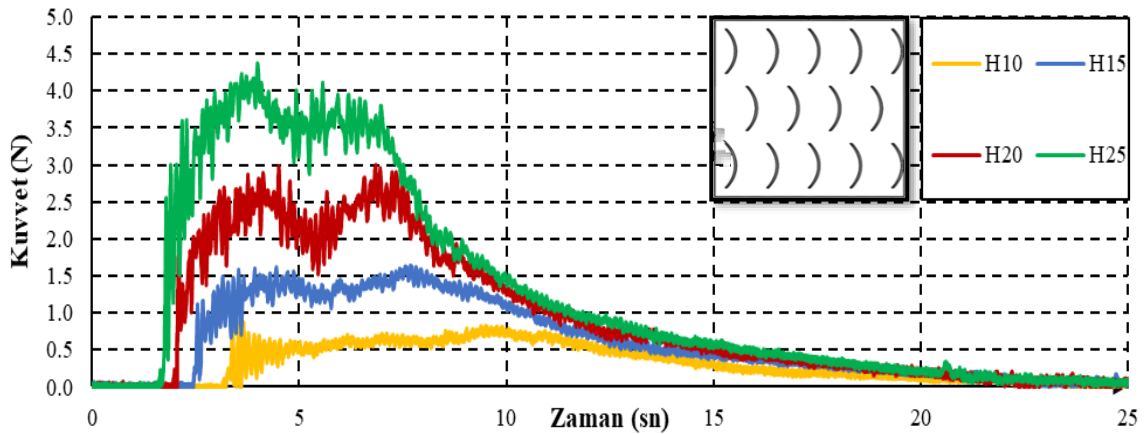
Şekil 4.101. Kanalda Tip YO-3.1 varken Konum-2 için farklı rezervuar su seviyelerinde yatay çarpma kuvvetinin zamanla değişimi



Şekil 4.102. Kanalda Tip YO-3.2 varken Konum-2 için farklı rezervuar su seviyelerinde yatay çarpma kuvvetinin zamanla değişimi

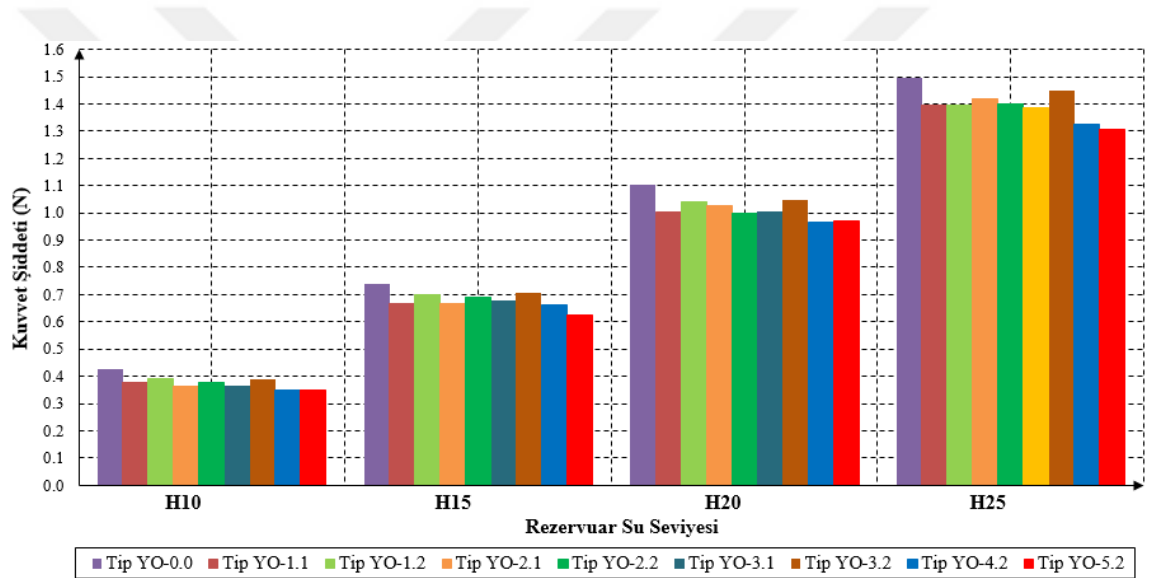


Şekil 4.103. Kanalda Tip YO-4.2 varken Konum-2 için farklı rezervuar su seviyelerinde yatay çarpma kuvvetinin zamanla değişimi



Şekil 4.104. Kanalda Tip YO-5.2 varken Konum-2 için farklı rezervuar su seviyelerinde yatay çarpma kuvvetinin zamanla değişimi

Konum-1'e benzer şekilde Şekil 4.105, 25 sn boyunca Konum-2'ye yerleştirilen model-yapı üzerine etkiyen yatay çarpma kuvvetinin oluşturduğu kuvvet şiddetini göstermektedir. Şekil 4.105 incelendiğinde Konum-1'de olduğu gibi başlangıç rezervuar su seviyesi artıkça kuvvet şiddetinin de artış gösterdiği görülmektedir. Ayrıca yine burada da en fazla kuvvet şiddetinin tüm başlangıç rezervuar su seviyeleri için Tip YO-0.0'da meydana geldiği belirlenmiştir. Yapısal ortamların kendi içindeki karşılaştırılması yapıldığında ise Tip YO-5.2'nin kuvvet şiddetini genel anlamda en fazla azalttığı (maksimum %17.66) Şekil 4.105 ve Çizelge 4.41'den görülmektedir. Yapı üzerine etkiyen kuvvet şiddetini en az azaltan ortamın ise Tip YO-3.2 olduğu belirlenmiştir. Tip YO-4.2 ve Tip YO-5.2 dışındaki diğer ortam tiplerinin kuvvet şiddeti azaltımı üzerindeki etkisi ise Konum-2 için ortalama %7.88 olarak hesaplanmıştır.



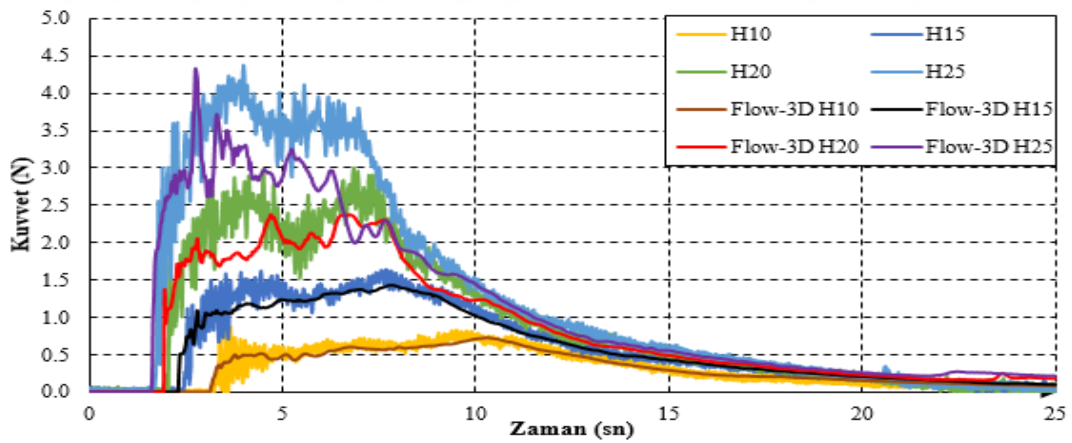
Şekil 4.105. Farklı yapısal ortam tiplerinde oluşan kuvvet şiddetleri- Konum-2

Çizelge 4.41. Farklı rezervuar su seviyelerinde yapısal ortamların kuvvet şiddetini azaltma yüzdeleri - Konum-2

	Tip YO-1.1	Tip YO-1.2	Tip YO-2.1	Tip YO-2.2	Tip YO-3.1	Tip YO-3.2	Tip YO-4.2	Tip YO-5.2
H10	10.65	8.26	13.95	10.57	14.23	7.87	17.75	17.66
H15	9.73	5.17	9.90	6.82	8.17	4.26	10.45	15.50
H20	9.16	5.58	6.81	9.57	8.58	4.99	12.45	12.14
H25	6.59	6.68	5.15	6.34	7.17	3.00	11.15	12.57

Deneyisel çalışma sonuçlarının dışında yapısal ortamlar arasında en etkili ortam olan Tip YO-5.2 için sayısal model çalışmaları da yapılmıştır. Farklı başlangıç rezervuar su

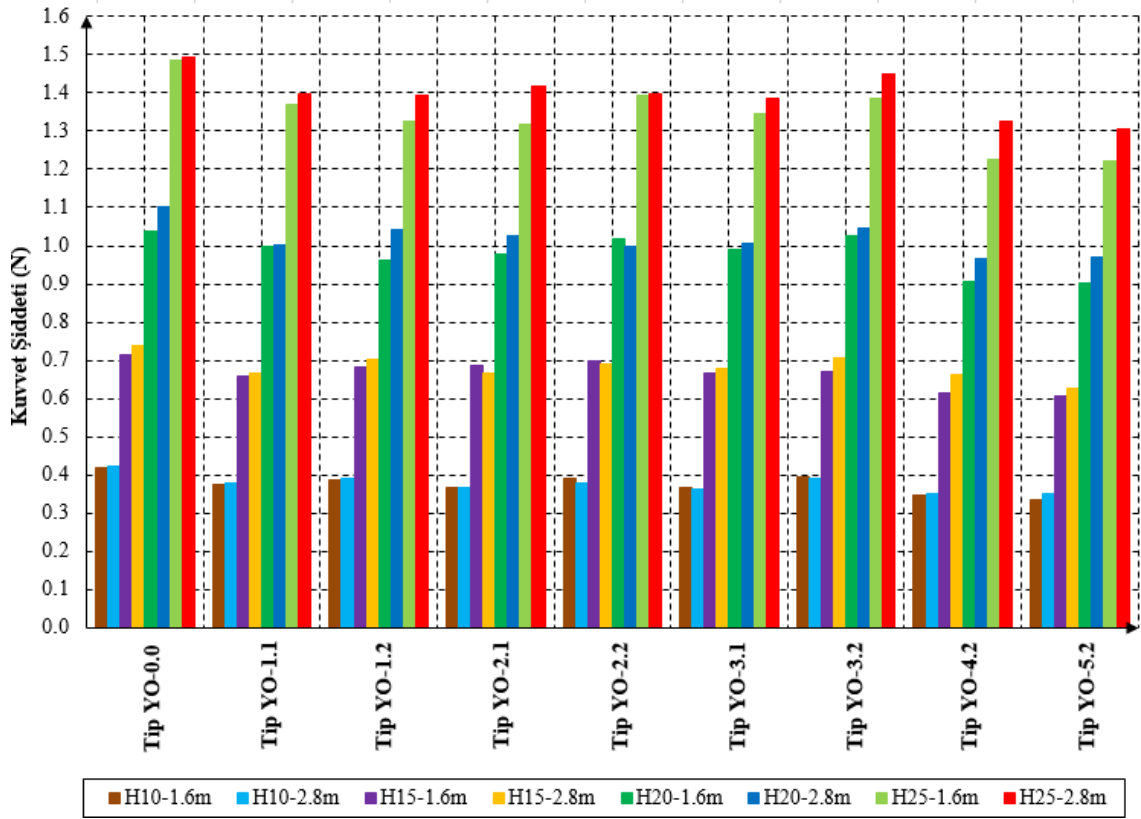
seviyelerinde yürütülen çalışmalarda H10 ve H15 gibi küçük başlangıç rezervuar su seviyeleri için kuvvetler arasında yapılan karşılaştırmalarda sayısal model sonuçlarının deneysel çalışma sonuçlarına oldukça yakın olduğu, H20 ve H25 gibi daha yüksek rezervuar su seviyelerinde ise deneysel ve sayısal model sonuçları arasındaki farkın arttığı görülmüştür (Şekil 4.106). Deneysel ve sayısal model sonuçları arasında hesaplanan tekrarlanabilirlik indeksleri H10 için %0.29, H15 için %2.08, H20 için %4.76, H25 için %7.92 olarak elde edilmiştir. Görüldüğü üzere artan kuvvetlerle birlikte deneysel ve sayısal model sonuçları arasındaki fark da artmaktadır. Kuvvet şiddetleri açısından deneysel sonuçlar baz alınarak deneysel ve sayısal model sonuçları arasında yapılan karşılaştırmalarda ise H10 için % 2.88, H15 için % 0.78, H20 için %6.47 ve H25 için %8.77 bağıl fark hesaplanmıştır. Buradan da görüldüğü üzere H20 ve H25 su seviyelerinde kuvvet şiddetleri arasındaki fark %5'in üzerine çıkmaktadır. Bu durum yine H20 ve H25 su seviyelerinde deney ve sayısal model sonuçları arasında farklılık olduğunu göstermektedir. Ayrıca tüm başlangıç rezervuar su seviyelerinde şok dalgasının model-yapıya çarpma sürelerinin deneysel ve sayısal sonuçlar açısından birbirine yakın olduğu (maksimum fark %4.96 ve minimum fark % 1.27) tespit edilmiştir.



Şekil 4.106. Kanalda Tip YO-5.2 varken Konum-2 için farklı rezervuar su seviyelerinde deneysel ve sayısal olarak kuvvetin zamanla değişimi

Şekil 4.107 incelendiğinde ise iki farklı konuma ait kuvvet şiddetlerinin karşılaştırılması görülmektedir. Şekil 4.107 incelediğinde H10 rezervuar su seviyesinde her iki konum için de kuvvet şiddetlerinin tüm yapısal ortam tiplerinde birbirine oldukça yakın olduğu (maksimum %3.78) H15, H20 ve H25 su derinliklerinde ise Konum-2 (2.8 m)'ye ait kuvvet şiddetinin genel olarak daha fazla (maksimum %8.34) olduğu tespit edilmiştir. Bu durum yapısal ortamlar ile model-yapı arasındaki mesafenin daha az olması durumunda

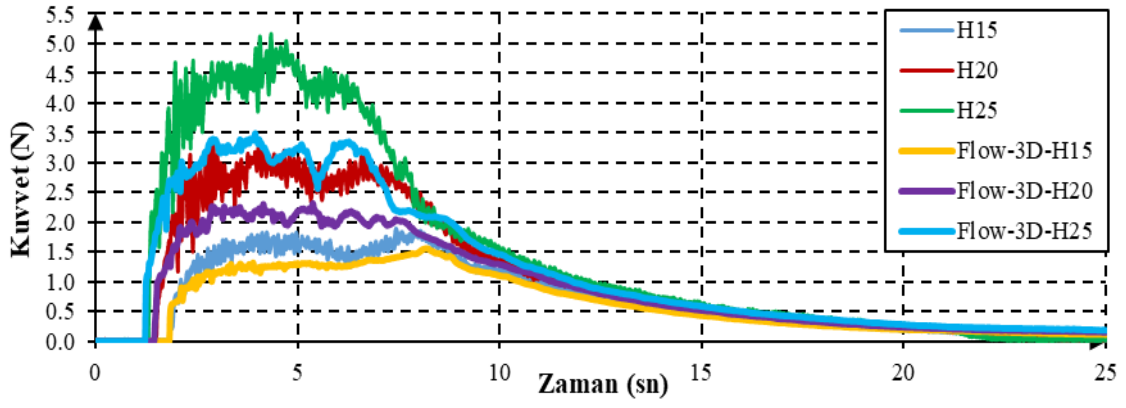
yapısal ortamların şok dalgasının yıkıcı etkisini azaltmada daha etkili olduğunu göstermiştir. Benzer bir sonuç Nurhasanah ve Triatmadja (2014) tarafından yapılan deniz duvarları ile korunmuş bir yapı örneği üzerinde de görülmüştür. Araştırmacılar deniz duvarlarının yapıya yakın olması durumunda yapıya etkiyen kuvvetin daha fazla azaltılacağını bildirmişlerdir.



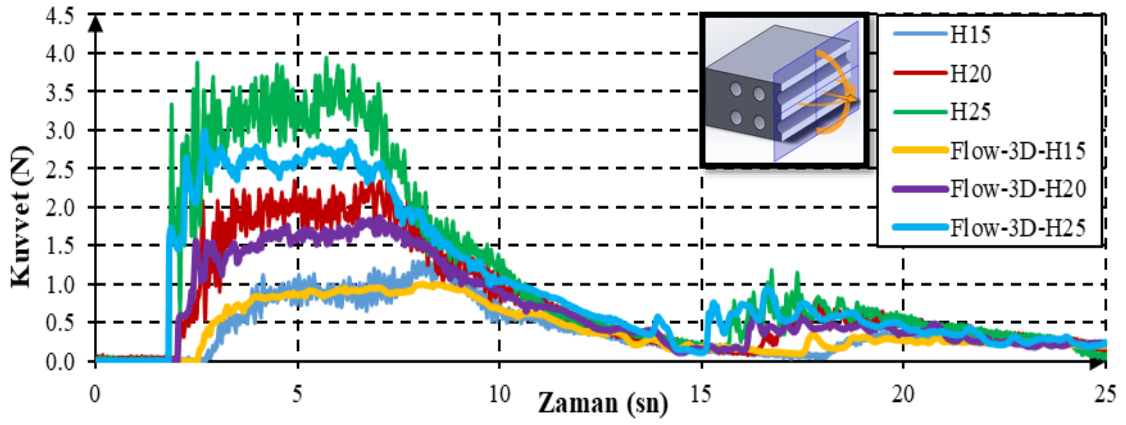
Şekil 4.107. Kuvvet şiddetlerinin Konum-1 ve Konum-2 için karşılaştırılması

Kanal içerisinde gözenekli ve gözeneksiz yapılar olması durumu

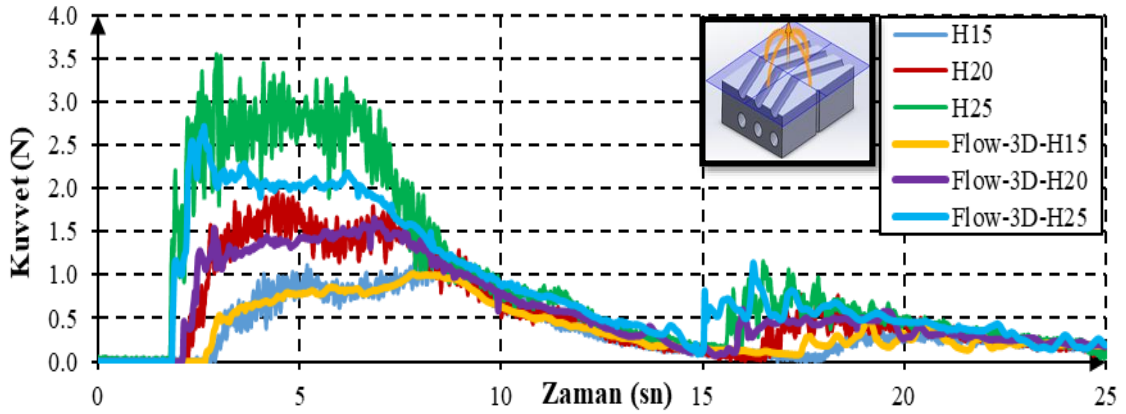
Bu bölümde bir model-yapı üzerine etkiyen yatay çarpma kuvvetinin zamanla değişimi, farklı gözenekli/gözeneksiz yapı tipleri ve farklı rezervuar su seviyeleri için Kanal-2 üzerinde yürütülen deneysel çalışmalarla araştırılmıştır. Şekil 4.108 - Şekil 4.113 farklı rezervuar su seviyelerinde ve gözenekli/gözeneksiz yapı tiplerinden geçen şok dalgasının bir model-yapı üzerinde 25 sn boyunca oluşturduğu yatay çarpma kuvvetinin zamanla değişimini deneysel ve sayısal sonuçlara dayalı olarak göstermektedir. Grafiklerde her bir başlangıç rezervuar su seviyesi için görülen kuvvetin zamanla değişimine ait eğriler tekrarlanan üç deneyin ortalaması alınarak elde edilmiştir.



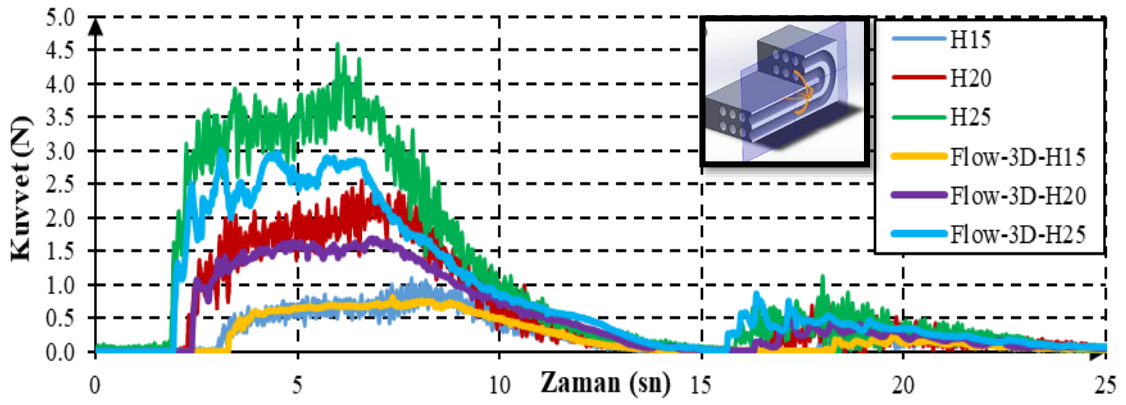
Şekil 4.108. Kanalda herhangi bir gözenekli/gözeneksiz yapı yokken farklı rezervuar su seviyeleri için yatay çarpma kuvvetinin zamanla değişimi



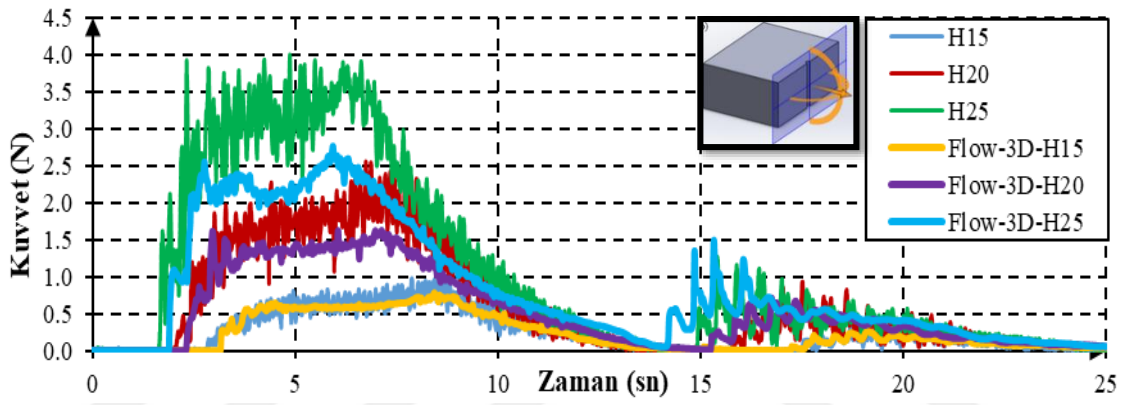
Şekil 4.109. Kanalda Gözenekli-Tip-I varken farklı rezervuar su seviyeleri için yatay çarpma kuvvetinin zamanla değişimi



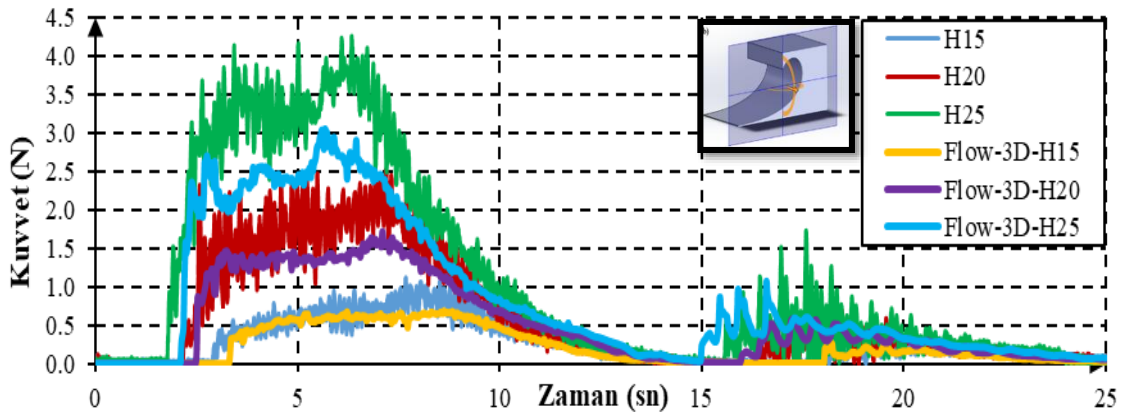
Şekil 4.110. Kanalda Gözenekli-Tip-II varken farklı rezervuar su seviyeleri için yatay çarpma kuvvetinin zamanla değişimi



Şekil 4.111. Kanalda Gözenekli-Tip-III varken farklı rezervuar su seviyeleri için yatay çarpma kuvvetinin zamanla değişimi



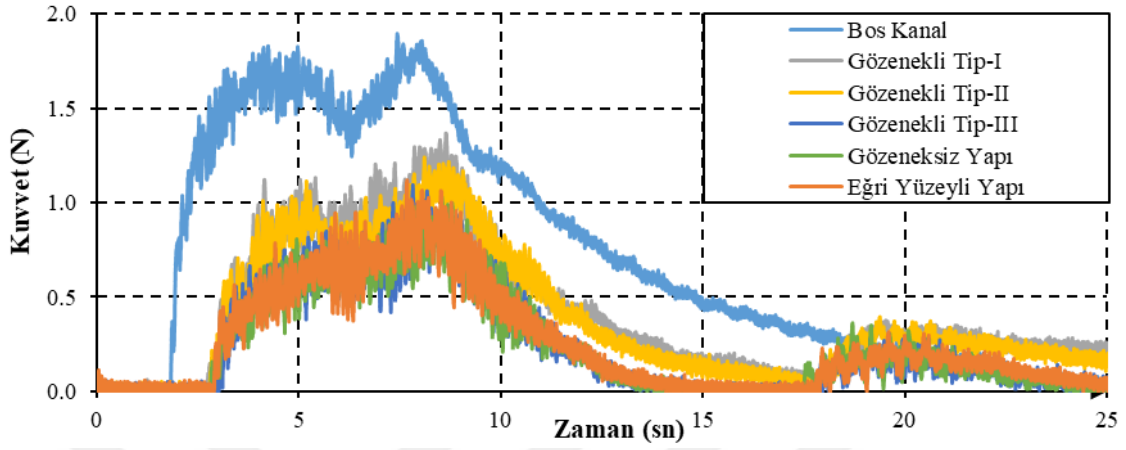
Şekil 4.112. Kanalda Gözeneksiz Yapı varken farklı rezervuar su seviyeleri için yatay çarpma kuvvetinin zamanla değişimi



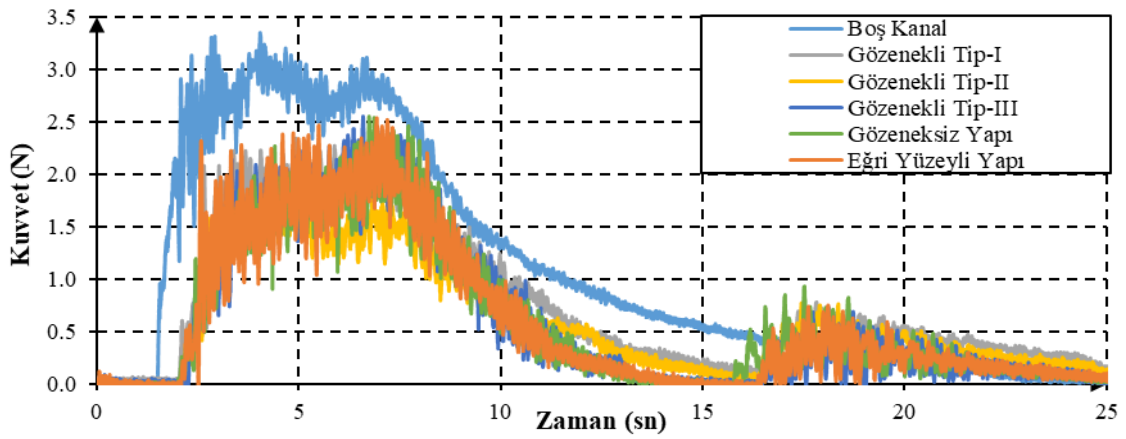
Şekil 4.113. Kanalda Eğri Yüzeyli Yapı varken farklı rezervuar su seviyeleri için yatay çarpma kuvvetinin zamanla değişimi

Şekil 4.114 - Şekil 4.116'da ise farklı başlangıç rezervuar su seviyelerinde şok dalgasının farklı yapı tiplerinden geçtikten sonra model-yapı üzerinde oluşturduğu yatay çarpma kuvvetinin zamanla değişimi görülmektedir. Burada da benzer şekilde tüm başlangıç

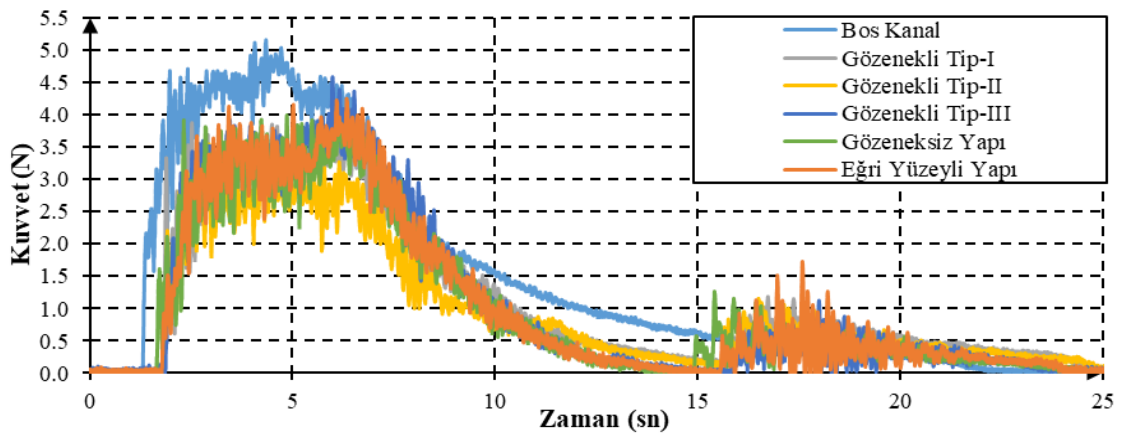
rezervuar su seviyelerinde gözenekli/gözeneksiz yapıların model-yapı üzerindeki yatay çarpma kuvveti büyüklüğünü azalttığı açık şekilde görülmektedir (Şekil 4.114 - Şekil 4.116).



Şekil 4.114. Tüm yapı tipleri için kuvvetin zamanla değişimi – H15

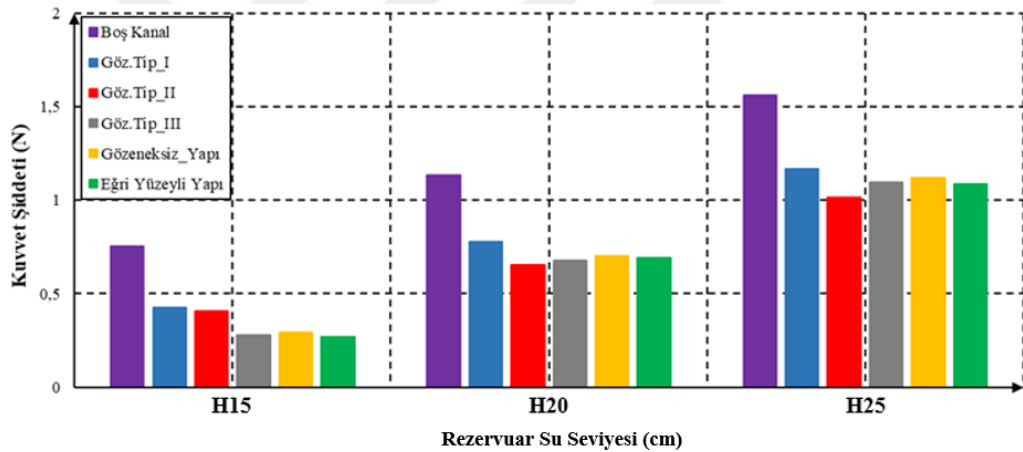


Şekil 4.115. Tüm yapı tipleri için kuvvetin zamanla değişimi – H20

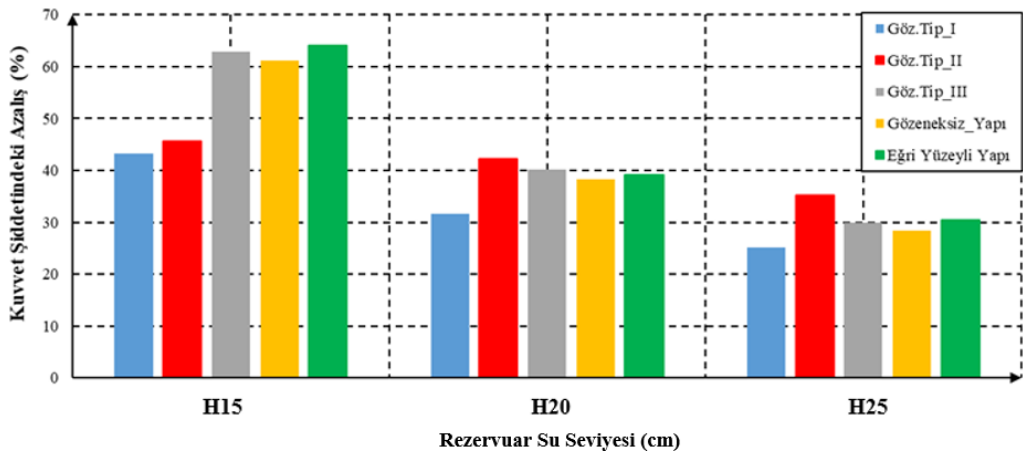


Şekil 4.116. Tüm yapı tipleri için kuvvetin zamanla değişimi – H25

Şekil 4.117 deneysel çalışma sonuçlarına göre kuvvet şiddetinin farklı rezervuar su seviyelerinde ve farklı yapı tiplerinde nasıl değiştiğini, Şekil 4.118 ve Çizelge 4.42 ise boş kanala göre kuvvet şiddetindeki azalma yüzdesini göstermektedir. Şekil 4.117 ve Çizelge 4.42 incelendiğinde model-yapıya etkiyen kuvvet şiddetini boş kanala göre en fazla azaltan yapı tipinin H20 ve H25 su seviyelerinde Gözenekli Tip-II (maksimum %42.26), H15 su seviyesinde ise Eğri Yüzeyli Yapı (maksimum %64.05) olduğu tespit edilmiştir. Başlangıç rezervuar su seviyesinin az olması gözeneksiz yapıların gözenekli yapılara göre daha etkili olduğunu göstermiştir. Burada ele alınan yapı tipleri 8 cm yüksekliğinde olduğundan 15 cm başlangıç rezervuar su seviyesinde gözeneksiz yapıların veya akımı geri döndüren Gözenekli Tip-III'ün daha etkili olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte kuvvet şiddetini en az azaltan yapı tipinin Gözenekli Tip-I olduğu tespit edilmiştir. Bu tipin H15 su seviyesinde %43.18, H20 su seviyesinde %31.68 ve H25 su seviyesinde %25.21 oranında kuvvet şiddetini azalttığı belirlenmiştir.



Şekil 4.117. Farklı rezervuar su seviyelerinde kuvvet şiddetinin yapı tipi ile değişimi



Şekil 4.118. Farklı rezervuar su seviyeleri için kuvvet şiddetinin yapı tipine göre azalış yüzdesi

Çizelge 4.42. Farklı rezervuar su seviyelerinde oluşan kuvvet şiddetinin azalma yüzdeleri - Gözenekli/Gözeneksiz yapılar

	Yapı Tipi				Eğri Yüzeyli Yapı
	Göz. Tip-I	Göz. Tip-II	Göz. Tip-III	Gözeneksiz Yapı	
H15	43.18	45.70	62.80	61.10	64.05
H20	31.68	42.26	40.22	38.29	39.18
H25	25.21	35.18	29.96	28.32	30.39

Bunun yanı sıra deneysel çalışma ve sayısal model sonuçları arasında kuvvet şiddeti açısından bir karşılaştırma yapılmıştır. Yapılan bu karşılaştırmada deneysel sonuçlar baz alınarak yüzde bağıl fark değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 4.43). Buna göre deneysel ve sayısal çalışma sonuçları arasında maksimum bağıl fark %21.53 olarak hesaplanmış, minimum fark ise %1.73 olarak elde edilmiştir. Bununla birlikte tüm yapı tipleri için deneysel ve sayısal çalışma sonuçları arasında tekrarlanabilirlik indeksi hesaplanmış ve bu indeks H15 için maksimum %13.02 ve minimum %0.19, H20 için maksimum %12.27 ve minimum %1.87, H25 için maksimum %16.59 ve minimum %8.79 olarak hesaplanmıştır. Çizelge 4.43 ve tekrarlanabilirlik indeksleri incelendiğinde deneysel ve sayısal model sonuçları arasındaki kuvvet şiddeti farkının ve tekrarlanabilirlik indeksinin genel olarak başlangıç rezervuar su seviyesi arttıkça arttığı görülmektedir. Bu durum Şekil 4.108 - Şekil 4.113 arasında verilen grafiklerden de net şekilde anlaşılabilmektedir.

Çizelge 4.43. Deneysel ve sayısal sonuçlara dayalı kuvvet şiddetleri arasındaki yüzde bağıl farklar

Yapı Tipi	H15	H20	H25
Boş Kanal	8.31	14.23	16.70
Gözenekli Tip-I	4.64	5.46	7.24
Gözenekli Tip-II	4.09	1.73	9.21
Gözenekli Tip-III	5.98	15.26	16.29
Gözeneksiz Yapı	11.00	17.74	21.53
Eğri Yüzeyli Yapı	9.72	16.91	15.04

4.2.5 İmpuls

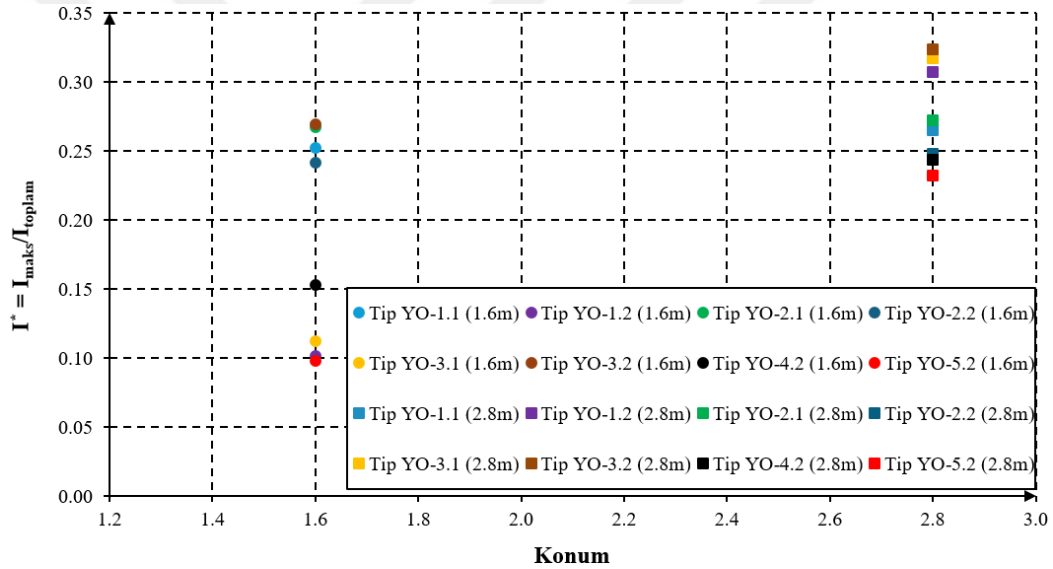
Bu kriter yapı güvenliği açısından dinamik analizlerde önemli bir role sahip olduğu için seçilmiştir. Sözü edilen kriter, yapıya aktarılan toplam momentumu ve bunun ne kadarının dinamik yüklerden kaynaklı olduğunu göstermektedir. Burada hem yapısal ortamlar hem de gözenekli/gözeneksiz yapıların etkisi bu kriter göz önüne alınarak incelenmiştir.

Kanal içerisinde yapısal ortamlar olması durumu

Kanal-2 üzerinde yürütülen deneylerde, tüm yapısal ortam tiplerinin 25 cm başlangıç rezervuar su seviyesi için toplam impuls ve maksimum impuls değerleri hesaplanmış ve maksimum impulsun toplam impulsa oranı belirlenmiştir. Bu sayede yapısal ortam tiplerinde momentumun ne kadarının hidrodinamik kuvvetlerden kaynaklı olduğu görülmüştür. Çizelge 4.44 farklı yapısal ortam konumları için toplam impuls ve maksimum impuls değerlerini göstermektedir. Çizelge 4.44 incelendiğinde genel olarak model-yapının yapısal ortamlardan uzaklaştıkça daha fazla toplam impuls ve maksimum impulsa maruz kaldığı (Konum-2) tespit edilmiştir. Bununla birlikte Şekil 4.119 incelendiğinde maksimum impulsun toplam impulsa oranının en az olduğu ortam tipinin Tip YO-5.2 ve en fazla olan ortam tipinin ise Tip YO-3.2 olduğu belirlenmiştir. Burada Konum-1 için Tip YO-5.2’de toplam impulsun %9.79’unu maksimum yatay çarpma kuvvetinin oluşturduğu Konum-2’de ise bu oranın %23.21 olduğu tespit edilmiştir. Bu durum Tip YO-5.2’den geçerek model-yapıya ulaşan şok dalgasının momentumunun daha çok hidrodinamik kuvvetlerden kaynaklı olduğunu ve maksimum kuvvet oluşuncaya kadar yapıya aktarılan momentumun toplam yapıya aktarılan momentumun yanında daha az olduğunu göstermektedir. Tip YO-3.2’de ise tersi bir durum vardır ve burada momentumun daha çok hidrostatik kuvvetlerden kaynaklı olduğu tespit edilmiştir. Bu durum ayrıca maksimum kuvvet oluşuncaya değin yapıya gelen momentumun toplam momentumdaki payının en fazla olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla impuls oranı açısından Tip YO-5.2’nin en yüksek performansa sahip olduğu, Tip YO-3.2’nin ise en düşük performansa sahip olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 4.44. Yapısal ortamlardan geçen şok dalgasının model-yapı üzerinde oluşturduğu toplam impuls ve maksimum impuls

Toplam İmpuls								
	Tip YO-1.1	Tip YO-1.2	Tip YO-2.1	Tip YO-2.2	Tip YO-3.1	Tip YO-3.2	Tip YO-4.2	Tip YO-5.2
Konum-1 (1.6 m)	33.3026	32.2654	31.9263	34.4461	32.6204	33.9372	29.6465	29.6926
Konum-2 (2.8 m)	34.6278	34.5854	34.3110	33.9909	33.9143	36.1995	32.3509	31.7096
Maksimum İmpuls								
	Tip YO-1.1	Tip YO-1.2	Tip YO-2.1	Tip YO-2.2	Tip YO-3.1	Tip YO-3.2	Tip YO-4.2	Tip YO-5.2
Konum-1 (1.6 m)	8.3976	3.2742	8.5416	8.3297	3.6543	9.1509	4.5323	2.9089
Konum-2 (2.8 m)	9.1937	10.6333	9.3417	8.4332	10.7754	11.7115	7.8897	7.3594



Şekil 4.119. Yapısal ortam tipleri ve iki farklı konum için impuls oranının değişimi

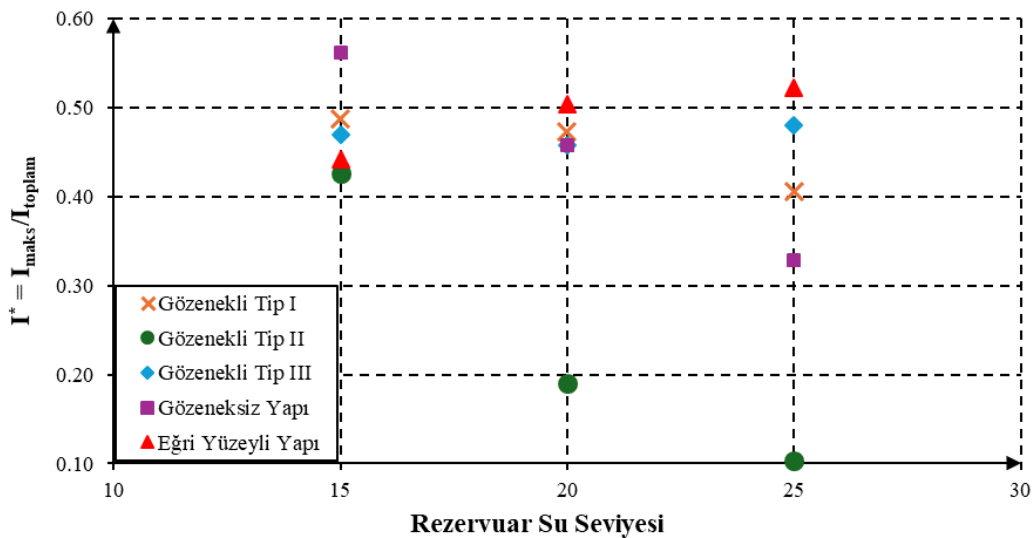
Kanal içerisinde gözenekli ve gözeneksiz yapılar olması durumu

Kanal-2 üzerinde yürütülen deneylerde, yapısal ortamlara benzer olacak şekilde tüm gözenekli ve gözeneksiz yapı tiplerinin başlangıç rezervuar su seviyesi ve impuls oranı ile değişimi araştırılmıştır. Bunun için öncelikle toplam impuls ve maksimum impuls hesaplanmış daha sonra ise maksimum impulsun toplam impulsa oranı elde edilmiştir (Çizelge 4.45). Şekil 4.120 incelendiğinde en küçük rezervuar su seviyesinde tüm yapı tipleri için toplam impulsun %40'ından fazlasının maksimum yatay çarpma kuvveti oluşmadan önce model-yapıya aktarıldığı görülmektedir. H2O su seviyesinde de benzer bir durum olmasına rağmen burada Gözenekli Tip-II yapısından geçen şok dalgasının

model-yapı üzerinde oluşturduğu maksimum yatay çarpma kuvvetinin yaklaşık %20'sinin model-yapıya aktarıldığı görülmektedir. Son olarak en yüksek rezervuar su seviyesine bakıldığında yine Gözenekli Tip-II'nin en düşük impuls oranına (yaklaşık %10) sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum Gözenekli Tip-II'de model-yapıya etkileyen kuvvetlerin daha çok hidrodinamik kaynaklı olduğunu ve maksimum kuvvet oluşuncaya kadar yapıya aktarılan momentumun toplam yapıya aktarılan momentumun yanında daha az olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla impuls oranı açısından genel olarak Gözenekli Tip-II'nin en yüksek, Eğri Yüzeyli Yapı'nın ise düşük performansa sahip olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.45. Gözenekli ve gözeneksiz yapılardan geçen şok dalgasının model-yapı üzerinde oluşturduğu toplam impuls ve maksimum impuls

Toplam İmpuls					
Başlangıç Rezervuar Su Seviyesi	Gözenekli Tip I	Gözenekli Tip II	Gözenekli Tip III	Gözeneksiz Yapı	Eğri Yüzeyli Yapı
H15	10.34775	9.54519	6.03817	5.96226	6.36785
H20	19.36156	15.03289	15.25920	15.21815	15.04423
H25	28.73627	24.59560	27.20003	26.04141	26.61072
Maksimum İmpuls					
Başlangıç Rezervuar Su Seviyesi	Gözenekli Tip I	Gözenekli Tip II	Gözenekli Tip III	Gözeneksiz Yapı	Eğri Yüzeyli Yapı
H15	5.04804	4.07196	2.83657	3.35153	2.81389
H20	9.16649	2.85070	6.99212	6.97573	7.57285
H25	11.64447	2.53448	13.07094	8.56317	13.88879



Şekil 4.120. Tüm yapı tipleri için rezervuar su seviyesi ile impuls oranının değişimi

4.2.6 Performans araştırmasından elde edilen yaygın çıkarımlar

Bu bölümde 5 farklı kritere göre araştırılan yapısal önlemlerin performansı, i) yapısal ortamlar ii) gözenekli/gözeneksiz yapılar ve iii) yapısal ortamlar ile gözenekli/gözeneksiz yapıların birlikte kullanılması durumları için değerlendirilmiştir. Elde edilen yaygın çıkarımlar Çizelge 4.46 - Çizelge 4.48’de verilmiştir. Çizelgelerde görülen puanlandırmalarda en küçük rakam o yapısal önlem tipinin en düşük performansa sahip olduğunu en büyük rakam ise en yüksek performansa sahip olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.46 incelendiğinde yapısal ortamların genel performans olarak Tip YO-5.2 > Tip YO-4.2 > Tip YO-1.2 > Tip YO-2.1 > Tip YO-1.1 > Tip YO-3.1 > Tip YO-2.2 > Tip YO-3.2 şeklinde sıralandığı görülmektedir. Burada yapısal ortamlar tüm performans kriterleri açısından değerlendirildiğinde en yüksek performansa sahip olan Tip-YO-5.2’nin en düşük performansa sahip olan Tip YO-3.2’den yaklaşık 2.33 kat daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Çizelge 4.47’de ise gözenekli ve gözeneksiz yapıların performansı verilmektedir. Bu yapılar genel performanslarına göre sıralandığında Gözenekli Tip-II > Gözenekli Tip-I = Eğri Yüzeyli Yapı > Gözeneksiz Yapı > Gözenekli Tip-III şeklinde bir sıralamanın olduğu belirlenmiştir. Benzer şekilde en yüksek performansı gösteren Gözenekli Tip-II’nin en düşük performansı gösteren Gözenekli Tip-III’ten yaklaşık 2.08 kat daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca Çizelge 4.48’de verilen yapısal önlemlerin birlikte kullanım durumuna bakıldığında performans sıralamasının Tip YO-5.2 + Gözenekli Tip-III > Tip YO-5.2 + Eğri Yüzeyli Yapı > Tip YO-5.2 + Gözeneksiz Yapı şeklinde olduğu görülmüştür. Burada da en yüksek performansa sahip kombinasyonun en düşük performansa sahip kombinasyondan 1.4 kat daha iyi olduğu belirlenmiştir.

Burada performans kriterlerine göre verilen puanların, performans kriterlerinin taşkın boyutları ve yıkıcı etkileri üzerindeki rolü dikkate alınarak yapılmasının daha doğru bir yaklaşım olacağı da unutulmamalıdır.

Çizelge 4.46. Yapısal ortamların performans araştırmasından elde edilen yaygın çıkarımlar

Performans Kriteri	Tip YO-1.1	Tip YO-1.2	Tip YO-2.1	Tip YO-2.2	Tip YO-3.1	Tip YO-3.2	Tip YO-4.2	Tip YO-5.2
Hız	5	6	3	4	1	2	7	8
Maksimum Derinlik (Ortam Membayı)	7	4	3	2	8	1	6	5
Maksimum Derinlik (Model-Yapı Membayı)	3	8	4	6	1	7	2	5
Maksimum Yatay Çarpma Kuvveti	2	3	6	4	1	5	7	8
Kuvvet Şiddeti	3	4	6	1	5	2	7	8
İmpuls Oranı	3	7	2	4	6	1	5	8
Toplam Performans Puanı	23	32	24	21	22	18	34	42
Performans Sıralaması	5	3	4	7	6	8	2	1

Çizelge 4.47. Gözenekli ve gözeneksiz yapıların performans araştırmasından elde edilen yaygın çıkarımlar

Performans Kriteri	Gözenekli Tip-I	Gözenekli Tip-II	Gözenekli Tip-III	Gözeneksiz Yapı	Eğri Yüzeyle Yapı
Hız	1	2	3	4	5
Maksimum Derinlik (Yapı Membre)	4	5	2	1	3
Maksimum Derinlik (Model-Yapı Membre)	4	5	1	3	2
Maksimum Yatay Çarpma Kuvveti	3	5	1	4	2
Kuvvet Şiddeti	1	5	3	2	4
İmpuls Oranı	4	5	3	2	1
Toplam Performans Puanı	17	27	13	16	17
Performans Sıralaması	2	1	4	3	2

Çizelge 4.48. Yapısal ortam ve gözenekli/gözeneksiz yapıların birlikte kullanımlarına ait performans araştırmasından elde edilen yaygın çıkarımlar

Performans Kriteri	Tip YO-5.2 ve Gözenekli Tip-III	Tip YO-5.2 ve Gözeneksiz Yapı	Tip YO-5.2 ve Eğri Yüzeyle Yapı
Hız	1	2	3
Maksimum Derinlik (Ortam Membre)	3	1	2
Maksimum Derinlik (Yapı Membre)	3	2	1
Toplam Performans Puanı	7	5	6
Performans Sıralaması	1	3	2

BÖLÜM V

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Deneyssel ve sayısal çalışmalardan elde edilen sonuçlar; taşkın şok dalgasına ait akım karakteristikleri ve bu karakteristikler üzerinde kapak açılma süresi ile kuru/ıslak mansap yatağı durumlarının etkileri, görüntü işleme tekniğinin uygulanabilirliği, sayısal modellerin deneyssel sonuçları üretmedeki başarısı ve yapısal önlemlerin şok dalgasının olumsuz etkilerini azaltmadaki performansı belirlenen kriterler açısından araştırılmış ve aşağıda maddeler halinde verilen sonuçlar elde edilmiştir.

5.1.1 Taşkın şok dalgasına ait akım karakteristikleri ve bu karakteristikler üzerinde etkili olan faktörler

- Ani yıkılma koşulunu sağlayacak şekilde uygulanan kapak açılma sürelerinin taşkın şok dalgası yayılma hızı ile ters orantılı ve yayılma hızı üzerinde maksimum %20.05 oranında etkili olduğu ancak ilerleyen zamanla birlikte bu etkinin ihmal edilecek düzeyde (minimum %0.67) kaldığı görülmüştür. Ayrıca bu sürenin şok dalgasının iki boyutlu su yüzü profil şekillerini etkilemediği tespit edilmiştir.
- Kuru mansap yatağı durumlarında sayısal ve deneyssel ortalama şok dalgası hızları ıslak durumlara göre daha yüksek bulunmuş ancak ortalama şok dalgası hızları arasındaki bu yükseklik farkı mansap/memba su derinliği oranı sabit olmasına rağmen rezervuar su derinliğindeki artışla azalmıştır. Rezervuar su derinliğindeki %20 artış, hem kuru hem de ıslak mansap yatağı durumları için deneyssel ortalama şok dalgası hızlarında sırasıyla %1.75 ve %7.91 artışa neden olmuştur.
- Dalga önünün model-yapıya ulaşma süresi üzerinde başlangıç rezervuar su seviyesi önemli bir rol oynamaktadır. Başlangıç rezervuar su seviyesi %150 arttığında dalga önünün model-yapıya minimum %35.59 daha kısa sürede ulaştığı (çarptığı) gözlemlenmiştir.
- Ortalama dalga önü hızlarının analitik olarak hesaplanmasında kullanılan α katsayısı deneyssel çalışmalardan elde edilen verilerle hesaplanmıştır. Farklı

model-yapı konumları (1.6 m ve 2.8 m) için kanalda herhangi bir yapısal ortam yokken sırasıyla 1.37 ve 1.33 olarak hesaplanan α katsayılarının literatürde belirtilen aralıkta olduğu tespit edilmiştir.

- Yapılan analitik çözümlerde dalga önü hızlarını tahmin etmede Ritter (1892) çözümünün sürtünmesiz ortam kabulü nedeniyle deneysel ölçümlerden oldukça farklı olduğu (maksimum bağıl fark %22.87), değiştirilmiş Chanson (2005) çözümünün ise sürtünme etkisini dikkate almasından dolayı deneysel ölçümlere daha yakın sonuçlar ürettiği (maksimum bağıl fark %18.08) görülmüştür.

5.1.2 Görüntü işleme tekniğinin uygulanabilirliği

- Bir noktadaki (rezervuar üzerinde seçilen noktalar ile yapısal önlemlerin memba ve mansapları) görüntü işleme tekniğinden elde edilen akım derinliği ölçümlerinin şerit metre okuma sonuçlarıyla oldukça uyumlu ve elde edilen sonuçlar arasında hesaplanan tekrarlanabilirlik indeksinin maksimum %4.30 olduğu tespit edilmiştir.
- Bir boyutlu su yüzü profillerinin elde edilmesinde kullanılan görüntü işleme tekniğinin, kuru mansap yatağındaki şok dalgası profil sınırlarını iyi bir şekilde yakalayabildiği fakat ıslak durumlar için bazı bölgelerde su yüzü profillerini belirlemede tutarsızlıklarının olduğu gözlemlenmiştir.
- İki boyutlu su yüzü profillerinin belirlenmesinde ise kuru ve ıslak durumlarda şok dalgasının iki boyutlu deneysel yayılım sınırlarını görüntü işleme tekniğinin iyi bir şekilde yakalayabildiği görülmüştür. Bununla birlikte dalga önü ucunu tespit etmede, deneysel görüntülere en yakın dalga yayılım sınırlarını veren WebPlotDigitizer yazılımı ile arasında maksimum %8.41'lik bir bağıl fark olduğu tespit edilmiştir.
- Her ne kadar akım karakteristiklerinin ani ve çok değişim gösterdiği yerlerde çok iyi sonuçlar elde edilemese de, görüntü işleme tekniğinin zaman ve iş gücü açısından değerlendirildiğinde, deneysel çalışmalarda benzer amaçlar doğrultusunda kullanılabilecek faydalı bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır.

5.1.3 Sayısal modellerin deneysel sonuçları üretmedeki başarısı

- Flow-3D RANS ve $k-\epsilon$ türbülans modelinin deneysel çalışmalarda ölçülen şok dalgasının yayılma hızlarını yakalama performansı değerlendirildiğinde, sayısal model çıktılarından elde edilen şok dalgası yayılım görüntülerinin en hızlı kapak açılma süresine (102 ms) ait deneysel çalışma çıktılarından elde edilen görüntüler ile genel olarak uyumlu olduğu görülmüştür. Sayısal model çıktılarından elde edilen taşkın şok dalgası yayılma hızının deneysel çalışma çıktılarına kıyasla maksimum %18.74 daha fazla olduğu tespit edilmiştir.
- Flow-3D RANS ve $k-\epsilon$ türbülans modelinin deneysel çalışmalarda ölçülen akım derinliği ve su yüzü profillerini üretebilme performansı açısından bir değerlendirme yapıldığında, akım karakteristiklerinin az değişim gösterdiği rezervuar kısmında ve gözenekli/gözeneksiz yapıların membaında program deney sonuçlarına yakın (tekrarlanabilirlik indeksi maksimum %4.03) sonuçlar üretmiştir. Bunun yanı sıra, akım karakteristiklerindeki değişimin fazla olduğu yapısal ortamların membaında program sonuçları ile deneysel ölçüm sonuçları arasında belirgin farklar olduğu tespit edilmiştir. Tüm yapısal önlem tipleri için deneysel yöntem ve Flow-3D çıktıları arasında tekrarlanabilirlik indeksi membada maksimum %20.76 mansapta ise maksimum %6.29 olarak hesaplanmıştır.
- Flow-3D RANS ve $k-\epsilon$ türbülans modelinin model-yapıya etkiyen kuvvetler baz alınarak performansı incelendiğinde ise programın etkiyen kuvvetleri düşük başlangıç rezervuar su seviyesinde (H15) deneysel ölçümlere yakın (Eğri Yüzeyli Yapı hariç tekrarlanabilirlik indeksi maksimum %3.76) tahmin ettiği fakat su seviyesi arttıkça (H20 ve H25) elde olunan kuvvetlerin deneysel ölçümlerden uzaklaştığı görülmüştür. Tüm gözenekli ve gözeneksiz yapı tipleri için model-yapıya etki eden kuvvet değerlerine ait tekrarlanabilirlik indeksi maksimum %16.59 olarak hesaplanmıştır.
- 2B modellerin (FVSSWE ve Flow-3D SWE) bir noktadaki deneylerde ölçülen akım derinliklerini yakalayabilme performansları değerlendirildiğinde ise, deneysel ölçüm sonuçlarına göre FVSSWE modeli için maksimum %21.35 ve Flow-3D SWE modeli için maksimum % 23.35 bağıl fark elde edilmiştir.

5.1.4 Yapısal önlemlerin şok dalgasının olumsuz etkilerini azaltmadaki performansları

Yapısal önlemlerin belirlenen beş farklı kritere göre performans araştırmasından elde edilen sonuçlar şu şekildedir.

Hız Kriteri

- Kanal-2 üzerinde yapısal ortamlar kullanılarak yapılan deneylerde taşkın şok dalgasını en fazla geciktiren ortamların Tip YO-5.2 ve Tip YO-4.2, en az geciktiren ortamların ise Tip YO-3.1 ve Tip YO-3.2 olduğu tespit edilmiştir. Bu ortamlar Tip YO-0.0'a göre maksimum %54.62 ve minimum %2.83 oranında model-yapıya çarpma süresini arttırmıştır. Bununla birlikte şok dalgasını en fazla geciktiren yapı tiplerinin Eğri Yüzeyli ve Gözeneksiz Yapılar olduğu en az geciktiren yapı tipinin ise Gözenekli Tip-I olduğu belirlenmiştir. Bu yapı tipleri ise boş kanala göre maksimum %80.33 ve minimum %18.02 oranında model-yapıya çarpma süresini arttırmıştır.
- Yapısal ortamlar kullanılarak yapılan deneylerde taşkın şok dalgasını geciktirmede şaşırtmalı dizilimlerin düz dizilimlere göre daha etkili oldukları görülmüştür. Kanal-1 üzerinde şaşırtmalı dizilimler kullanılarak yapılan deneylerde 0.6 sn'de şok dalgası önü düz dizilimlere göre maksimum %8.85 oranında geride kalmıştır. Kanal-2'de ise şaşırtmalı dizilimlerin şok dalgasının model-yapıya çarpma süresini maksimum %5.62 oranında geciktirdiği tespit edilmiştir.
- Kanal-2 üzerinde yapısal ortam ve gözenekli/gözeneksiz yapıların kombinasyonları kullanılarak yapılan deneylerde 2.2 sn'de şok dalgası önünün kanal içindeki konumu incelendiğinde Tip YO-5.2 ve Eğri Yüzeyli Yapı'dan oluşan kombinasyonun en iyi performansı gösterdiği belirlenmiştir. Bu kombinasyonda dalga önünün boş kanala göre %17.04 oranında geride kaldığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte Tip YO-5.2 ve Gözenekli Tip-III'ten oluşan kombinasyonun ise daha az etkili olduğu görülmüş ve bu kombinasyonda dalga önünün boş kanala göre %15.10 oranında geride olduğu belirlenmiştir.

Maksimum Derinlik Kriteri

- Kanal-1 üzerinde yapılan deneylerde yapısal ortamların maksimum derinlik kriterine göre performansı değerlendirildiğinde, Tip YO-3.1’de Tip YO-0.0’a göre membada %5.19 mansapta ise %33.08 oranında maksimum derinliğin azaldığı tespit edilmiştir.
- Kanal-2 üzerinde yapılan deneylerde gözenekli ve gözeneksiz yapıların maksimum derinlik kriterine göre performans araştırmasından elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde ise yapıların memba ve mansaplarında maksimum akım derinliklerinin arttığı görülmüştür. Yapıların memba ve mansaplarında en az artış Gözenekli Tip-II’de meydana gelmiş ve bu artış membada %89.00 ve mansapta % 29.32 olarak elde edilmiştir. Dolayısıyla maksimum derinlik açısından yapıların memba ve mansabında en az artışa neden olan Gözenekli Tip-II’nin en iyi performansa sahip olduğu belirlenmiştir.
- Yapısal ortam ve gözenekli/gözeneksiz yapıların kombinasyonları kullanılarak Kanal-2 üzerinde yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar maksimum derinlik kriteri açısından değerlendirildiğinde, yine ortam ve yapıların memba ve mansaplarında maksimum akım derinliklerinin arttığı görülmüştür. Ortam ve yapıların membaları ile ortam mansaplarında en az artış Tip YO-5.2 ve Gözenekli Tip-III kombinasyonunda (ortam membaında maksimum %98.00, yapı membaında maksimum %113.48 ve ortam mansabında maksimum %103.19) görülmüş, yapıların mansaplarında ise en az artış Tip YO-5.2 ve Gözeneksiz Yapı kombinasyonunda (maksimum %51.16) meydana gelmiştir.
- Kanal-2 üzerinde yapısal ortamlar ve gözenekli/gözeneksiz yapılar kullanılarak yapılan deneylerde model-yapının membaında oluşan maksimum derinlikler incelendiğinde ise genel olarak Tip YO-1.2 ve Gözenekli Tip-II’nin en iyi performansa sahip olduğu görülmüştür. Boş kanala göre Tip YO-1.2’de maksimum akım derinliğinin en fazla %9.39, Gözenekli Tip-II’de ise en fazla %19.52 oranında azaldığı tespit edilmiştir.

Maksimum Yatay Çarpma Kuvveti Kriteri

- Kanal-2 üzerinde yapılan deneylerde yapısal ortamların maksimum yatay çarpma kuvveti kriterine göre performansı değerlendirildiğinde, Tip YO-5.2 ve Tip YO-4.2’nin en yüksek performansa sahip oldukları, Tip YO-3.1 ve Tip YO-3.2’nin ise en düşük performansa sahip oldukları görülmüştür. Tip YO-0.0’a göre yapılan

karşılaştırmada Tip YO-5.2'nin model-yapıya etkiyen maksimum yatay çarpma kuvvetini %23.31 ve Tip YO-4.2'nin ise %17.98 oranında azalttığı tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra Tip YO-3.1'in %0.61 ve Tip YO-3.2'nin %0.81 oranında maksimum yatay çarpma kuvvetini azalttığı görülmüştür.

- Kanal-2 üzerinde yapılan deneylerde gözenekli ve gözeneksiz yapıların maksimum yatay çarpma kuvveti kriterine göre performansı değerlendirildiğinde ise H20 ve H25 başlangıç rezervuar su seviyelerinde Gözenekli Tip-II'nin en yüksek performansı, Gözenekli Tip-III'ün en düşük performansı sergilediği belirlenmiştir. Gözenekli Tip-II'nin boş kanala göre yatay çarpma kuvvetini maksimum %38.73 oranında, Gözenekli Tip-III'ün ise maksimum %23.83 oranında azalttığı tespit edilmiştir.
- Bununla birlikte Kanal-2 üzerinde yapılan deneylerde başlangıç rezervuar su seviyesinin maksimum yatay çarpma kuvveti üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Yapılan deneysel çalışmalara göre kanalda yapısal ortamlar olması durumunda başlangıç rezervuar su seviyesi %150 arttığında model-yapıya etkiyen yatay çarpma kuvvetinin maksimum %468.84 arttığı görülmüştür. Kanalda gözenekli/gözeneksiz yapılar olması durumunda ise başlangıç rezervuar su seviyesi %66.67 arttığında model-yapı üzerine etkiyen yatay çarpma kuvvetinin maksimum %319.69 oranında arttığı tespit edilmiştir.

Kuvvet Şiddeti Kriteri

- Kanal-2 üzerinde yapılan deneylerde yapısal ortamlar kuvvet şiddeti kriterine göre değerlendirildiğinde model-yapı üzerine etkiyen kuvvet şiddetini en fazla azaltan ortam tiplerinin sırasıyla Tip YO-5.2 ve Tip YO-4.2 olduğu görülmüştür. Tip YO-0.0'a göre Tip YO-5.2'nin maksimum %19.67 oranında ve Tip YO-4.2'nin maksimum %17.75 oranında kuvvet şiddetini azalttıkları tespit edilmiştir. Diğer ortam tiplerinin model-yapı üzerindeki kuvvet şiddetini azaltma etkileri ise Konum-1 için ortalama %6.86, Konum-2 için ortalama %7.88 olarak hesaplanmıştır.
- Kanal-2 üzerinde yapısal ortamlar kullanılarak yapılan deneylerde model-yapının farklı konumlara yerleştirilmesinin kuvvet şiddetini hangi ölçüde etkilediği değerlendirildiğinde, H10 başlangıç rezervuar su seviyesinde model-yapıya etkiyen kuvvet şiddetinin önemli ölçüde değişmediği (maksimum %3.78) sonucuna ulaşılmıştır. Bununla birlikte H15, H20 ve H25 su seviyelerinde model-

yapıya etkiyen kuvvet şiddetinin, model-yapının yapısal ortamlardan uzaklaşmasıyla arttığı görülmüş ve bu artış maksimum %8.34 olarak hesaplanmıştır.

- Kanal-2 üzerinde yapılan deneylerde gözenekli ve gözeneksiz yapılar kuvvet şiddeti kriterine göre değerlendirildiğinde, model-yapı üzerine etkiyen kuvvet şiddetini H15 hariç en fazla azaltan yapı tipinin Gözenekli Tip-II, H15 rezervuar su seviyesinde ise Eğri Yüzeyli Yapı olduğu belirlenmiştir. Gözenekli Tip-II'nin boş kanal baz alındığında model-yapıya etkiyen kuvvet şiddetini maksimum %42.26, Eğri Yüzeyli Yapı'nın ise %64.05 oranında azaltarak en iyi performansı gösterdiği tespit edilmiştir.
- Bununla birlikte Kanal-2 üzerinde yapılan deneylerde başlangıç rezervuar su seviyesinin kuvvet şiddeti üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Yürütülen deneysel çalışmalardan elde edilen verilere göre kanalda yapısal ortamlar olması durumunda başlangıç rezervuar su seviyesi %150 arttığında model-yapı üzerine etkiyen kuvvet şiddetinin maksimum %287.93 oranında, kanalda gözenekli/gözeneksiz yapılar olması durumunda ise başlangıç rezervuar su seviyesi %66.67 arttığında model-yapı üzerine etkiyen kuvvet şiddetinin maksimum %302.43 oranında arttığı belirlenmiştir.

İmpuls Kriteri

- Kanal-2 üzerinde yapılan deneylerde yapısal ortamların impuls kriteri açısından performans araştırmasından elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, Tip YO-5.2'nin diğer ortam tiplerine kıyasla daha düşük bir impuls oranına sahip olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç Tip YO 5.2'de maksimum kuvvet oluşuncaya kadar yapıya aktarılan momentumun toplam yapıya aktarılan momentumun yanında daha az olduğunu göstermektedir. Bu ortam tipinde Konum-1 için maksimum impuls toplam impulsun %9.79'unu, Konum-2 için ise %23.21'ini oluşturmaktadır.
- Kanal-2 üzerinde yapılan deneylerde gözenekli ve gözeneksiz yapıların impuls kriteri açısından performans araştırmasından elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde ise Gözenekli Tip-II'nin diğer yapı tiplerine kıyasla daha düşük bir impuls oranına sahip olduğu görülmüştür. Benzer şekilde bu sonuç Gözenekli Tip-II'de maksimum kuvvet oluşuncaya kadar yapıya aktarılan momentumun toplam yapıya aktarılan momentumun yanında daha az olduğunu

göstermektedir. Bu yapı tipinde maksimum impuls toplam impulsun en fazla %42.66'sını en az %10.30'unu oluşturmaktadır.

Bu tez çalışmasının yakın amacı doğrultusunda elde edilen sonuçlara göre, Eğri Yüzeyli ve Gözeneksiz Yapılar, şok dalgasını daha fazla geciktirdiğinden taşkından korunacak bölgede yapılacak tahliye çalışmaları ve önlemler açısından tercih edilebilir. Taşkından korunacak bölgedeki yapıların stabilitesi ve güvenliği açısından ise Gözenekli Tip-II etkileyen maksimum kuvveti, kuvvet şiddetini ve impuls oranını azalttığı için tercih edilebilir. Bunun yanı sıra, Gözenekli Tip-II taşkın boyutlarının azaltılması açısından da taşkın bölgesinde oluşan maksimum su derinliğini azalttığından faydalı olacaktır.

Taşkın etkilerini azaltmada küçük boyutlarda yapısal engeller tercih edilecekse bu durumda Tip YO-5.2'nin kullanılması ve bunun da yapılara yakın şekilde konumlandırılması durumunda maksimum faydanın elde edileceği sonucuna varılmıştır.

Ayrıca her iki yapısal önlem tipinin birlikte kullanımı, şok dalgasının oluşturduğu taşkın alanını en aza indirmesinden ötürü önerilmektedir.

Her ne kadar yapısal önlemlerin özellikle de büyük boyutlardaki yapısal önlemlerin pratikte kullanım ve inşaa zorlukları olabileceği düşünülse de baraj yıkılması gibi büyük boyutlarda taşkınlara ve yıkıcı etkilere sahip felaketleri önlemede/etkilerini azaltmada çok daha küçük boyutlardaki engellerin/ortamların çok etkili olmayacağı da görülmüştür. Benzer durum taşkın şok dalgası özellikleri taşıyan ve kıyı içlerine doğru ilerleyen tsunami dalgalarını önlemede de geçerlidir. Bu nedenle baraj güvenliği, taşkın yönetimi ve taşkın koruma/önleme çalışmaları açısından bu önlemlerin etkili bir çözüm yöntemi olacağı ve şok dalgasının olumsuz etkilerini azaltma amacıyla geliştirilecek olan startajilere ışık tutacağı düşünülmektedir.

5.2 Öneriler

Bu tez çalışmasında taşkın şok dalgasının olumsuz etkilerinin azaltılmasına yönelik olarak tavsiye edilen yapısal önlemler ve ölçüm yöntemi olarak kullanılan görüntü işleme tekniği aşağıda belirtilen öneriler dikkate alınarak geliştirilebilir.

- Taşkın şok dalgasının yıkıcı etkisini azaltmaya yönelik bu tez çalışmasında toplamda on üç farklı yapısal önlem denenmiştir. Fakat burada denenen yapısal önlemler kendi aralarında sabit yoğunluğa, dizilime ve geometrik özelliklere sahiptir. Oysaki bu özelliklerin değiştirilmesiyle şok dalgasının yıkıcı etkisini azaltmada kullanılan yapısal önlemlerden daha verimli şekilde yararlanmak mümkün olabilir. Bunun için optimizasyon teknikleri kullanılarak daha etkili, ekonomik ve pratik olarak uygulanabilir önlemlerin araştırılması önerilmektedir.
- Yapısal önlemlerin taşkın şok dalgalarının olumsuz etkilerini azaltılmada ne derece etkili oldukları ıslak mansap yatağı durumlarındaki kullanımları araştırılarak değerlendirilmelidir.
- Görüntü işleme tekniğinin bir ve iki boyutlu su yüzü profillerini elde etmede kullanılan algoritmalarının geliştirilmesi, dalga önü konumunun yakalanmasında ve özellikle ıslak durumlara ait bir boyutlu su yüzü profillerinin belirlemede deneysel sonuçlara daha yakın sonuçlar elde edilmesini sağlayacaktır. Bunun için daha gelişmiş filtreleme algoritmaları, daha yüksek çözünürlüğe ve hıza sahip kameraların kullanımı ve ortam aydınlatmasının daha uygun olması bu farklılıkların azaltılmasına yardımcı olacaktır.

KAYNAKLAR

Akman, M.U., “Taşkın koruma ve kontrol yapılarının değerlendirilmesi”, *Türk Hidrolik Dergisi*. 5(1), 25-31, 2021.

Alcrudo, F. and Garcia-Navarro, P., “A high-resolution Godunov-type scheme in finite volumes for the 2D shallow-water equations”, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 16(6), 489-505, 1993.

Al-Faesly, T., Palermo, D., Nistor, I. and Cornett, A., “Experimental modeling of extreme hydrodynamic forces on structural models”, *International Journal of Protective Structures*, 3(4), 477–506, 2012.

Alijani, R., Khavasi, E. and Mahmoudi, P., “Drag force acting on the structure due to dam-break flow: effect of porous media and bed slope”, *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 31(1), 62-72, 2025.

Anonim-1: “Dam failure”, https://en.wikipedia.org/wiki/Dam_failure, 16 Haziran 2025.

Anonim-2: “Bodies wash ashore in Libya as devastated city races to count its dead” . *NBC News*. 2023-09-13, Archived from the original on 2023-09-14, https://en.wikipedia.org/wiki/Dam_failure, 16 Haziran 2025.

Anonim-3: “Sudan: Collapse of Arba'at Dam in Port Sudan, Red Sea State (26 August 2024) – Sudan” . *ReliefWeb*. 2024-08-26, Archived from the original on 2024-08-27, https://en.wikipedia.org/wiki/Dam_failure, 16 Haziran 2025.

Arefi, R., Nistor, I, Mohammadian, A. and Elsheikh, N., “Effects of a rectangular water-filled canal on bore induced horizontal force exerted on a nearshore structure”, *Research Square*, 1-51, 2025.

Arimitsu, T. and Kawasaki, K., “Development of estimation method of tsunami wave pressure exerting on land structure using depth-integrated flow model”, ***Coastal Engineering Journal***, 58(04), 1640021, 2016.

Arnason, H., “Interactions between an incident bore and a free-standing coastal structure”, **University of Washington**, 2005.

Arnason, H., Petroff, C. and Yeh, H., “Tsunami bore impingement onto a vertical column”, ***Journal of Disaster Research***, 4(6), 391-403, 2009.

Aureli, F., Maranzoni, A., Mignosa, P. and Ziveri, C., “Dam-break flows: Acquisition of experimental data through an imaging technique and 2D numerical modeling”, ***Journal of Hydraulic Engineering***, 134(8), 1089-1101, 2008.

Aureli, F., Dazzi, S., Maranzoni, A., Mignosa, P. and Vacondio, R., “Experimental and numerical evaluation of the force due to the impact of a dam-break wave on a structure”, ***Advances in Water Resources***, 76, 29-42, 2015.

Bryant, E., *Tsunami: The Underrated Hazard*, 1st Ed., **Cambridge University Press**, New York, 2001.

Bukreev, V.I., “On the water depth breach during a partial dam break”, ***Fluid Dynamics***, 40 (5):769-776, 2005.

Cao, Z., Huang, W., Pender, G. and Liu, X., “Even more destructive: Cascade dam break floods”, ***Journal of Flood Risk Management***, 7(4), 357-373, 2014.

Capasso, S., Tagliafierro, B., Güzel, H., Yilmaz, A., Dal, K., Kocaman, S., Viccione, G. and Evangelista, S.A., “Numerical validation of 3D experimental dam-breakwave interaction with a sharp obstacle Using DualSPHysics”, ***Water***, 13, 2133, 2021.

Causon, D. M., Mingham, C. G. and Qian, L., “Developments in multi-fluid finite volume free surface capturing methods”, ***In Advances in Numerical Simulation of Nonlinear Water Waves***, 397-427, 2010.

Chang, C.C. and Wu, Y.T., “SPH modeling of dam-break bores on smooth and macro-roughness slopes”, *Ocean Engineering*, 279, 114484, 2023.

Chanson, H., Applications of the Saint-Venant equations and method of characteristics to the dam break wave problem, The University of Queensland, Department of Civil Engineering, *Technical Report, CH55/05*, 2005.

Chanson, H., “Analytical solutions of laminar and turbulent dam break wave”, *River Flow*, 1, 465–474, 2006.

Chanson, H., “Application of the method of characteristics to the dam break wave problem”, *Journal of Hydraulic Research*, 47(1), 41-49, 2009.

Chaudhuri, A., Hadjadj, A., Sadot, O. and Ben-Dor, G., “Numerical study of shock-wave mitigation through matrices of solid obstacles”, *Shock Waves*, 23(1), 91-101, 2013.

Chumchan, C. and Rattanadecho, P., “Experimental and numerical investigation of dam break flow propagation passed through complex obstacles using LES model based on FVM and LBM”, *Songklanakarin Journal Science Technology*, 42(3), 564-572, 2020.

Davis, R.S., Flash flood forecast and detection methods, In Severe convective storms, *MA: American Meteorological Society*, 481-525, Boston, 2001.

Del Gaudio, A., La Forgia, G., Constantinescu, G., De Paola, F., Di Cristo, C., Iervolino, M. and Vacca, A., “Modelling the impact of a dam-break wave on a vertical wall”, *Earth Surface Processes and Landforms*, 49(7), 2080-2095, 2024.

Dressler, R.F., “Hydraulic resistance effects upon the dam break functions”, *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 49(3), 217-225, 1952.

Dumergue, L.E. and Abadie S., “Numerical study of the wave impacts generated in a wet dam break”, *Journal of Fluids and Structures*, 114, 103716, 2022.

Eaket, J., Hicks, F.E. and Peterson A.E., “Use of stereoscopy for dam break flow measurement”, *Journal of Hydraulic Engineering*, 131, 24-29, 2005

Elkholy, M., LaRocque, L.A., Chaudhry, M.H. and Imran, J., “Experimental investigations of partial-breach dam-break flows”, *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(11), 04016042, 2016.

Erduran, K.S., An integrated model for complex flow simulations: COMSIM, PhD Thesis, *University of Newcastle Upon Tyne*, England, 2001.

Erduran, K.S., Kutija, V. and Hewett, C.J.M., “Performance of finite volume solutions to the shallow water equations with shock-capturing schemes”, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 40(10), 1237-1273, 2002.

Erduran, K.S., Dokuz, A.Ş. ve Ünal, U. “Baraj yıkılması sonucu oluşan taşkın dalgasının deneysel ve sayısal olarak incelenmesi”, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi*, MMT 2021/3-BAGEP, 2023.

Erduran, K.S., Ünal, U. and Dokuz, A.Ş., “Experimental and numerical investigation of partial dam-break waves”, *Ocean Engineering*, 308, 118346, 2024a.

Erduran, K.S., Akansu, Y.E., Ünal, U. and Adekoya, O.O. “An Experimental investigation of tsunami bore impact on coastal structures”, *Hydrology*, 11(9), 131, 2024b.

Erduran, K.S., Adekoya, O.O., Ünal, U. and Akansu, Y.E. “Dam-break-induced shock wave characteristic and bridge pier shape effects on shock wave force”, *Physics of Fluids*, 37(6), 067142, 2025.

Espartel, L. and Manica, R., “Experiments on initial stages of development of dam-break waves”, *Brazilian Journal of Water Resources*, 26(6), 1-14, 2021.

Feizi Khankandi, A., Tahershamsi, A. and Soares-Frazão, S., “Experimental investigation of reservoir geometry effect on dam-break flow”, *Journal of Hydraulic Research*, 50(4), 376-387, 2012.

FEMA: Federal Emergency Management Agency, “Coastal construction manual: Principles and practices of planning, siting, designing, constructing, and maintaining residential buildings in coastal regions.” *FEMA 55*, Washington, DC, 2001.

FEMA: Federal Emergency Management Agency, “Living with Dams, Know Your Risks”, *FEMA P-956*, 2013.

Ferdowsi, A., Nemati, M. and Farzin, S., “Development of dam-break model considering real case studies with asymmetric reservoirs”, *Computational Engineering and Physical Modeling*, 4(4), 39-63, 2021.

Ferreira Torezani, R., “Study on North American Dams at potential high risk of failure”, *SSRN*, 2025.

Fraccarollo, L. and Toro, E.F. “Experimental and numerical assessment of the shallow water model for two-dimensional dam-break type problems”, *Journal of Hydraulic Research*, 33(6), 843-864, 1995.

Fritz, H.M. and Hager, W.H., “Hydraulics of embankment weirs,” *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(9), 963-971, 1998.

Garoosi, F., Mellado-Cusichua, A.N., Shademani, M. and Shakibaeinia, A., “Experimental and numerical investigations of dam break flow over dry and wet beds”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 215, 106946, 2022.

Golda Percy, V., Sriram, V., Sundar, V. and Schüttrumpf, H., “Effect of the buffer blocks in attenuating a tsunami-like flow,” *Ocean Engineering*, 286, 115489, 2023.

Gruntfest, E. and Huber, C.J., “Toward a comprehensive national assessment of flash flooding in the United States”, 1991.

Hernández, I.D., Hernández-Fontes, J.V., Vitola, M.A., Silva, M.C. and Esperança, P.T.T., “Water elevation measurements using binary image analysis for 2D hydrodynamic experiments”, ***Ocean Engineering***, 157, 325–338, 2018.

Heller, V., “Scale effects in physical hydraulic engineering models,” ***Journal of Hydraulic Research***, 49(3), 293-306, 2011.

Hien, L.T.T. and Van Chien N., “Investigate impact force of dam-break flow against structures by both 2D and 3D numerical simulations”, ***Water (Basel)*** 13(3), 2021.

Hirt, C.W and Nichols, B.D., “Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries”, ***Journal of Computational Physics***, 39, 201-225, 1981.

Hong, Y., Adhikari, P. and Gourley, J.J., “Flash flood”, ***In Encyclopedia of Natural Hazards***, Springer, Dordrecht, 324- 325, 2013.

Hooshyaripor, F. and Tahershamsi, A., “Effect of reservoir side slopes on dam-break flood waves”, ***Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics***, 9(1), 458-468, 2015.

Hsiao, C.C., Sun, M.C., Chen, A.Y. and Hsu, Y.T., “Location problems for shelter-in-place deployment: A case study of vertical evacuation upon dam-break floods”, ***International Journal of Disaster Risk Reduction***, 57, 102048, 2021.

Huppert, H.E., “The propagation of two-dimensional and axisymmetric viscous gravity currents over a rigid horizontal surface”, ***Journal of Fluid Mechanics***, 121, 43–58, 1982.

Khoshkonesh, A., Nsom, B., Bahmanpouri, F., Dehrashid, F.A. and Adeli, A., “Numerical study of the dynamics and structure of a partial dam-break flow using the VOF method”, ***Water Resources Management***, 35, 1513-1528, 2021.

Kim, H.J., Kim, J.M., Kim, J.H., Jung, K.H. and Lee, G.N., “Experimental study on flow kinematics and pressure characteristics of dam break flow”, ***Ocean Engineering***, 299, 117170, 2024.

Kirkoz, M., “Breaking and run-up of long waves, tsunamis: Their science and engineering.” *Proceedings of the 10th IUGG international tsunami symposium Terra Scientif**ic*, Tokyo, 1983.

Kocaman, S., Güzel, H., Evangelista, S., Ozmen-Cagatay H. and Viccione G., “Experimental and numerical analysis of a dam-break flow through different contraction geometries of the channel”, *Water*, 12, 1124, 2020.

Kocaman, S., Evangelista, S., Guzel, H., Dal, K., Yilmaz, A. and Viccione, G., “Experimental and numerical investigation of 3D dam-break wave propagation in an enclosed domain with dry and wet bottom”, *Applied Sciences*, 11(12), 5638, 2021.

Kumar Jha, A., Akiyama, J. and Ura, M., “First and Second- Order FluxDifference Splitting Schemes for Dam Break Problem”, *Journal of Hydraulic Engineering*, 121, 877-884, 1995.

LaRocque, L.A., Imran, J. and Chaudhry, M.H., “Experimental and numerical investigations of two-dimensional dam-break flows”, *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(6), 569-579, 2013.

Lauber G. and Hager WH., “Experiments to dam break wave: horizontal channel”, *Journal of Hydraulic Research*, 36(3): 291–307, 1998a.

Lauber, G. and Hager, W.H., “Experiments to dam break wave: Sloping channel”, *Journal of Hydraulic Research*, 36(5), 761-773, 1998b.

Lin, B., Gong, Z. and Wang, L., “Dam-site hydrographs due to sudden release”, *Scientia Sinica*, 23(12), 1570-1582, 1980.

Liu, H., Liu, H., Guo, L. and Lu, S., “Experimental study on the dam-break hydrographs at the gate location”, *Journal of Ocean University of China*, 16(4), 697-702, 2017.

Liu, W., Wang, B., Guo, Y., Zhang, J. and Chen, Y., “Experimental investigation on the effects of bed slope and tailwater on dam-break flows”, *Journal of Hydrology*, 125256, 2020.

Liu, Y., Zhang, X., Sun, Y., Yu, H., Sun, C., Li, Z. and Li, X. “Characterization of partial dam-break waves: Effects of upstream and downstream water levels”, *Water Resources Management*, 1-19, 2024.

Iizuka, H., and Matsutomi, H., “Damage due to flood flow of tsunami.” *Proceedings of Coastal Engineering JSCE*, 47, 381–385, 2000.

Lobovský, L. Botia-Vera, E. Castellana F., Mas-Soler, J. and Souto-Iglesias A., “Experimental investigation of dynamic pressure loads during dam break,” *Journal of Fluids and Structures*, 48, 407–434, 2014.

Lukkunaprasit, P., Thanasisathit, N. and Yeh, H., “Experimental verification of FEMA P646 tsunami loading”, *Journal of Disaster Research*, 4(6), 410-418, 2009.

Maggi, M.R., Adduce, C. and Negretti, M.E., “Lock-release gravity currents propagating over roughness elements”, *Environmental Fluid Mechanics*, 22(2), 383-402, 2022.

Mahmoud, A.A. and Uchida, T., “Dam break flow through rigid-emergent vegetation”, *Experiments in Fluids*, 65(11), 1-14, 2024.

Marchi, L., Borga, M., Preciso, E. and Gaume, E., “Characterisation of selected extreme flash floods in Europe and implications for flood risk management”, *Journal of Hydrology*, 394(1-2), 118-133, 2010.

Martin, H. and Pohl, R., “Technische Hydromechanik 4”, *Verlag für Bauwesen*, Berlin, 2000.

Matsutomi, H. and Okamoto, K., “Inundation flow velocity of tsunami on land”, *Island Arc*, 19(3), 443–457, 2010.

Mingham, C.G. and Causon, D.M., “Calculation of unsteady bore diffraction using a high resolution finite volume method”, ***Journal of Hydraulic Research***, 38, 49-56, 2000.

Mokhtar, Z.A., Mohammed, T.A., Yusuf, B. and Lau, T.L., “Experimental investigation of tsunami bore impact pressure on a perforated seawall”, ***Applied Ocean Research***, 84, 291-301, 2019.

Mohamed, M.M.A. and El-Ghorab, E.A.S., “Investigating scale effects on breach evolution of overtopped sand embankments,” ***Water Science***, 30(2), 84-95, 2016.

Moon, W.C., Chiew, L.Q., Cheong, K.W., Tee, Y.C., Chun, J.B. and Lau, T.L., “An experimental study for estimating tsunami wave forces acting on building with seaward and landward macroroughness”, ***Ocean Engineering***, 186, 106116, 2019.

Mu, D. Chen, L. and Ning, D. “Modeling Impact Load on a Vertical Cylinder in Dam-Break Flows,” ***Journal of Marine Science and Engineering***, 11(5), 2023.

Murty, T.S., “Seismic sea waves: Tsunamis”, Department of Fisheries and the Environment Fisheries and Marine Service, Ottawa, 1977.

Nema, M. and Desmukh, T.S., “Dam break-a review”, ***International Journal of Advanced Engineering Research and Science***, 3(6), 236758, 2016.

Nguyen-Thi, L.Q., Nguyen, V.D., Pierens, X. and Coorevits, P., “An experimental and numerical study of the influence of viscosity on the behavior of dam-break flow”, ***Theoretical and Computational Fluid Dynamics***, 35, 345–362, 2021.

Nistor, I., Nouri, Y., Palermo, D. and Cornett, A., “Experimental investigation of the impact of a tsunami-induced bore on structures”, ***Coastal Engineering 2008***, 5, 3324-3336, 2009.

Noël B., Soares-Frazão S. and Zech Y., “Computation of the isolated obstruction test case and the model city experiment benchmarks, impact investigation of extreme flood

processes and uncertainty”, *Proceedings 3rd Project Workshop, Louvain-laNeuve*, Belgium 6-7 November 2003.

Nouri, Y. Nistor, I. Palermo, D. and Cornett, A., “Experimental investigation of tsunami impact on free standing structures,” *Coastal Engineering Journal*, 52(1), 43–70, 2010.

Nsom, B., Debiane, K. and Piau, M.J., “Bed slope effect on dam break problem”, *Journal of Hydraulic Research*, 38(6), 459-464, 2000.

Nurhasanah, A. and Triatmadja, R., “Tsunami force on a building with sea wall protection”, *In International Conference on Engineering and Technology Development (ICETD)*, 2014.

Oertel, M. and Süfke, F., “Two-dimensional dam-break wave analysis: Particle image velocimetry versus optical flow”, *Journal of Hydraulic Research*, 58(2), 326-334, 2020.

Ozmen-Cagatay, H., Kocaman, S. and Güzel, H., “Investigation of dam-break flood waves in a dry channel with a hump”, *Journal of Hydro-environment Research*, 8(2014): 304-315, 2014.

Ozmen-Cagatay, H., Turhan, E. and Kocaman, S., “An experimental investigation of dam-break induced flood waves for different density fluids”, *Ocean Engineering*, 243, 110227, 2022.

Peng, L., Zhang, T., Rong, Y., Hu, C. and Feng, P., “Numerical investigation of the impact of a dam-break induced flood on a structure”, *Ocean Engineering*, 223, 108669, 2021.

Peng, L., Zhang, T., Li, J. and Feng, P., “Three-dimensional numerical study of dam-break flood impacting problem with VOF method and different turbulence closures”, *Water Resources Management*, 37(10), 3875-3895, 2023.

Pfister, M., and Chanson, H., “Scale effects in physical hydraulic engineering models by Valentin Heller,” *Journal of Hydraulic Research*, 50(2), 244–246, 2012.

Pratiwi, V., Kusuma, M.S.B., Kardhana, H. and Farid, M., “Experimental study of dam break flow generated by the flap gate in horizontal channel”, *International Journal of GEOMATE*, 19(75), 19-26, 2020.

Rahman, S., Akib, S., Khan, M.T.R. and Shirazi, S.M., “Experimental study on tsunami risk reduction on coastal building fronted by sea wall”, *The Scientific World Journal*, 1, 729357, 2014.

Rahman, M. M., Schaab, C. and Nakaza, E., “Experimental and numerical modeling of tsunami mitigation by canals”, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 143(1), 04016012, 2017.

Ramsden, J.D., “Forces on a vertical wall due to long waves, bores, and dry-bed surges”, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 122(3), 134-141, 1996.

Ritter, A., “Die fortpflanzung de wasserwellen”, *Zeitschrift Verein Deutscher Ingenieure*, 36(33), 947–954, 1892.

Rohatgi, A., “WebPlotDigitizer v4.6 (Version 4.6)”, Pacifica, USA. <https://automeris.io/WebPlotDigitizer>, 2022.

Shafiei, S., Melville B.W. and Shamseldin, A.Y. “Experimental investigation of tsunami bore impact force and pressure on a square prism,” *Coastal Engineering*, 110, 1–16, 2016.

Shen, J. Wei, L. Wu D., Liu, H. and Huangfu, J. “Spatiotemporal characteristics of the dam-break induced surge pressure on a vertical wall,” *Coastal Engineering Journal*, 62(4), 566–581, 2020.

Shige-eda, M. and Akiyama, J., “Numerical and experimental study on two-dimensional flood flows with and without structures”, *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(10), 817–821, 2003.

Soares-Frazão, S., Bueger, C.D., Dourson, V. and Zech, Y., “Dam-break wave over a triangular bottom sill”, *Proceedings River Flow Conference*, Louvain-la-Neuve, Belgium, Balkema, 1, 437-442, 2002.

Soares-Frazão, S. and Zech, Y., “Dam-break flow through an idealised city”, *Journal of Hydraulic Research*, 46, 648–658, 2008.

Stoker, J.J., “Water waves”, *Interscience Publishers*, Wiley, Newyork, 333-341, 1957.

Stolle, J. Ghodoosipour, B. Derschum, C. Nistor, I. Petriu, E. and Goseberg, N. “Swing gate generated dam-break waves,” *Journal of Hydraulic Research*, 57(5), 675-687, 2019.

Takagi, H. and Furukawa, F., “Stochastic uncertainty in a dam-break experiment with varying gate speeds”, *Journal Marine Science Engineering*, 9, 67, 2021.

Tar, T., Kato, N., Suzuki, H., Nagai, Y., Ohnishi, K. and Okubayashi, T., “Experimental and numerical study on the reduction of tsunami flow using multiple flexible pipes”, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 50, 364-385, 2017.

Tarım ve Orman Bakanlığı, Taşkın Yönetimi, *Su Yönetimi Genel Müdürlüğü*, Ankara, 288, 2022.

Toro, E.F., Spruce, M. and Speares, W., “Restoration of the contact surface in the HLL-Riemann solver.” *Shock Waves*, 4, 25–34, 1994.

Triatmadja, R. and Nurhasanah, A.N.Y., “Tsunami force on buildings with openings and protection”, *Journal of Earthquake and Tsunami*, 6(4), 1250024, 2012.

Triatmadja, R. and Rana, A.S.W., “The effectiveness of tsunami walls in mitigating tsunami impact”, *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1479(1), 012011, 2025.

Triatmadja, R., Tahalele, M. and Pratomo, A.N.R., “Impact of tsunamis on buildings in array layouts as macro roughness: Lessons from the 2018 Anak Krakatau event through DualSPHysics modeling”, *Natural Hazards*, 1-26, 2025.

Udarika, R. N. and Tanaka, N., “Force reduction of tsunami-like waves on coastal structures by varying arrangements and densities of seaside vegetation: A physical model study”, *Ocean Engineering*, 318, 120103, 2025.

Wang, B., Zhang, J., Chen, Y., Peng, Y., Liu, X. and Liu, W., “Comparison of measured dam-break flood waves in triangular and rectangular channels”, *Journal of Hydrology*, 575, 690–703, 2019.

Wang, B., Liu, W., Wang, W., Zhang, J., Chen, Y., Peng, Y., Liu, X. and Yang, S., (2020). “Experimental and numerical investigations of similarity for dam-break flows on wet bed”, *Journal of Hydrology*, 583, 124598, 2020.

Watanabe, S., Fujisaki, S. and Hu, C., “Numerical simulation of dam break flow impact on vertical cylinder by cumulant Lattice Boltzmann method”, *Journal of Hydrodynamics*, 33(2), 185-194, 2021.

Wei, Z., Dalrymple, R.A., Hérault, A., Bilotta, G., Rustico, E. and Yeh, H., “SPH modeling of dynamic impact of tsunami bore on bridge piers”, *Coastal Engineering*, 104, 26-42, 2015.

Wüthrich, D., Pfister, M., Nistor, I. and Schleiss, A.J., “Experimental study of tsunami-like waves generated with a vertical release technique on dry and wet beds”, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 144(4), 04018006, 2018a.

Wüthrich, D., Pfister, M., Nistor, I. and Schleiss, A.J., “Experimental study on forces exerted on buildings with openings due to extreme hydrodynamic events”, *Coastal Engineering*, 140, 72-86, 2018b.

Wüthrich, D., Pfister, M. and Schleiss, A.J., “Effect of bed roughness on tsunami-like waves and induced loads on buildings”, *Coastal Engineering*, 152, 103508, 2019.

Wüthrich, D., Pfister, M., Nistor, I. and Schleiss, A.J., “Effect of building overtopping on induced loads during extreme hydrodynamic events”, *Journal of Hydraulic Research*, 58(2), 289-304, 2020.

Xu, X., Jiang, Y.L., Yu, P., “SPH simulations of 3D dam-break flow against various forms of the obstacle: Toward an optimal design”, *Ocean Engineering*, 229, 108978, 2021a.

Xu, Z., Melville, B., Whittaker, C., Nandasena, N.A.K. and Shamseldin, A., “Mitigation of tsunami bore impact on a vertical wall behind a barrier”, *Coastal Engineering*, 164, 103833, 2021b.

Yang, C., Lin, B., Jiang, C. and Liu, Y., “Predicting near-field dam-break flow and impact force using a 3D model”, *Journal of Hydraulic Research*, 49(6), 784, 2010.

Yang, S., Wang, B., Guo, Y., Zhang, J. and Chen, Y., “Gate-opening criterion for generating dam-break flow in non-rectangular wet bed channels”, *Energies*, 13(23), 6280, 2020.

Yang, S., Yang, W., Zhang, C., Qin, S., Wei, K. and Zhang, J., “Experimental and numerical study on the evolution of wave front profile of dam-break waves”, *Ocean Engineering*, 247, 110681, 2022a.

Yang, S., Tan, Z., Yang, W., Imani, H., Song, D., Luo, J. and Zhang, J., “Experimental study on hydrodynamic interaction between dam-break waves and circular pier”, *Ocean Engineering*, 266, 113093, 2022b.

Ye, Y., Xu, T. and Zhu, D.Z., “Numerical analysis of dam-break waves propagating over dry and wet beds by the mesh-free method”, *Ocean Engineering*, 217, 107969, 2020.

Yeh, H.H., Ghazali, A. and Marton, I., “Experimental study of bore run-up”, *Journal of fluid Mechanics*, 206, 563-578, 1989.

Yu, C., Li, Y., Meng, W. and An, R., “Numerical simulation of dam-break flood impacting buildings by a volume of fluid and immersed boundary method”, ***Frontiers in Earth Science***, 8, 303, 2020.

Zhao, D.H., Shen, H.W., Tabios III, G.Q., Lai, J.S. and Tan, W.Y., “Finite-volume two-dimensional unsteady-flow model for river basins.” ***Journal of Hydraulic Engineering***, 120(7), 863-883, 1994.

Zhao, D.H., Shen, H.W., Lai, J.S. and III, G.T., “Approximate Riemann solvers in FVM for 2D hydraulic shock wave modeling”, ***Journal of Hydraulic Engineering***, 122(12), 692-702, 1996.

Zhen, Y., Fang, Q., Liu, S., Zhou, Z., Zhong, G., Zhuang, Q. and Liang, J., “Exploring the effect of building openings and orientation on induced loads due to extreme flood events”, ***Journal of Fluids and Structures***, 121, 103933, 2023.

Zhou, J. G., Causon, D.M., Ingram, D.M. and Mingham, C.G., “Numerical solutions of the shallow water equations with discontinuous bed topography”, ***International Journal for Numerical Methods in Fluids***, 38(8), 769-788, 2002.

Zhou, X., Su, L., He, X., Hu, R. and Yuan, H., “Experimental investigations of propagation characteristics and wave energy of dam-break waves on wet bed”, ***Ocean Engineering***, 301, 117566, 2024.

Zhu, Z., Gou, L., Peng, D. and Pang, B., “Quantifying the role of openings in the impact of a dam-break-induced flood on a porous building”, ***Journal of Hydrology***, 614, 128596, 2022.

Zoppou, C. and Roberts, S., “Catastrophic collapse of water supply reservoirs in urban areas.” ***Journal of Hydraulic Engineering***, 125, 686-695, 1999.

ÖZ GEÇMİŞ

Uğur ÜNAL **.**.**** tarihinde *****'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini İstanbul'da tamamladı. 2009 yılında girdiği Selçuk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2014 yılında mezun oldu. 2015 yılında İstanbul Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik ABD'de yüksek lisans eğitimine başladı ve 2018 yılında mezun oldu. Aynı yıl Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik ABD'de doktora eğitimine başladı. 2017 yılında Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik ABD'ye Araştırma Görevlisi olarak atandı. Hala aynı kurumda çalışmakta ve bilimsel çalışmalarına devam etmektedir. Yüksek lisans ve doktora eğitimleri boyunca tez çalışmaları dışında akademik çalışmalar da gerçekleştirmiş ve 2 uluslararası SCI makale, 2 uluslararası indeksli makale, 7 ulusal makale, 9 uluslararası bildiri ve 1 adet ulusal bildiri olmak üzere akademik eserler üretmiştir. Ayrıca 1 adet BAP projesinde araştırmacı olarak görev almıştır.

TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN ESERLER

Bu tez çalışmasından, 1 (bir) adet uluslararası SCI makale ve 1 (bir) adet uluslararası bildiri üretilmiştir. Üretilen bu çalışmalar aşağıda sunulmuştur.

Erduran, K.S., Ünal U. and Dokuz A.Ş., “Experimental and numerical investigation of partial dam-break waves”, ***Ocean Engineering***, 308, 118346, 2024.

Erduran, K.S., Ünal U. and Dokuz A.Ş., “Kapak açılma süresinin taşkın şok dalgası yayılımı üzerindeki etkisi”, ***4th International Symposium of Engineering Applications on Civil Engineering and Earth Sciences (IEACES2023)***, Karabük, 31 Mayıs- 2 Haziran, 2023.

